

Geotermia de baja entalpía aplicada a una vivienda unifamiliar sustentable en Brandsen. Dimensionamiento de intercambiador de calor tierra-aire (pozo canadiense o provenzal).

Birche, María Belén⁽¹⁾; Czajkowski, Jorge Daniel⁽²⁾; Ferrer Tevar, José Antonio⁽³⁾

Birche, María Belén (Autor 1)^a Czajkowski, Jorge Daniel (Autor 2)^b Ferrer Tevar, José Antonio (Autor 3)^c

a Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable FAU-UNLP / CIC
b Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable FAU-UNLP / CIC / CONICET
c Unidad de Investigación sobre Eficiencia Energética en Edificación CIEMAT
mariabelenbirche@gmail.com

RESUMEN.

El objetivo de este trabajo es poner de manifiesto un caso de aplicación de un aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía por medio de un intercambiador de calor tierra-aire comúnmente conocido como Pozo Canadiense o Provenzal en una vivienda unifamiliar en la Provincia de Buenos Aires. Se realizan los cálculos y diseño en base a las características del suelo y clima local. El sistema se comporta como una opción sustentable para la colaboración en la climatización de ambientes.

Palabras Claves: Geotermia de baja entalpía, Pozo canadiense o provenzal, Dimensionamiento, Intercambiador de calor tierra-aire, Acondicionamiento térmico.

Área Temática: Energías sustentables.

Categoría del Trabajo: Trabajo de docentes y/o investigadores.

1. INTRODUCCIÓN

Nuestro país puede recorrerse de norte a sur y de este a oeste y es mayoritaria la forma común de materializar edificios para cualquier función. A medida que avanzó la industria del vidrio y de los metales no ferrosos fue creciendo su uso que junto al hormigón armado y al ladrillo hueco cocido prácticamente monopolizan las edificaciones. Pero no se ha considerado la variable climática, la adaptación al sitio o el uso de pautas bioclimáticas. Esto debido a que se propone un modo casi homogéneo de construcción con un uso variable de energía en climatización sustentado en subsidios crecientes. Esto lleva a que no se han incorporado en los edificios técnicas adecuadas de mitigación del cambio climático, sea por "contenido energético" del edificio al momento de su habilitación y durante su "vida útil".

Las normativas existentes, en particular las Normas IRAM, si bien han sido actualizadas, no son de aplicación obligatoria en la mayor parte del país y las prácticas parecieran apuntadas a resolver sólo la reducción del costo inicial del edificio. Queda para los usuarios sean públicos o privados resolver las deficiencias, las patologías debidas al tipo de ocupación, la reposición y mantenimiento, y los altos costos operativos con sus recursos. En síntesis: costo inicial lo más bajo posible y no consideración del costo total en el ciclo de vida del edificio, que en algunos casos triplica el costo inicial.

El cuadro antes descrito señala una alta ineficiencia energética de los edificios que implica una excesiva demanda energética por m² habitable o km² urbanizado.

Se destaca que, de acuerdo al Balance Energético Nacional del año 2021 (Ministerio de Energía y Minería, 2021) y los datos del mismo año del informe anual de la Compañía Administradora del Mercado Eléctrico Mayorista (CAMMESA, 2021):

- El 88% de la energía total (primaria + secundaria) de la matriz nacional en el año 2021 proviene de fuentes fósiles tales como: gas natural, petróleo, carbón y sus derivados. El 4% se obtiene a partir de represas hidroeléctricas de alto impacto, el 1% a partir de centrales nucleares y solo el 7% corresponde con fuentes renovables. Se llama fuentes renovables al conjunto compuesto por energía eólica, solar, biomasa, biogás e hidro-renovable (de bajo impacto).
- Si observamos únicamente la generación de energía eléctrica por fuente, el porcentaje que se obtiene a partir de recursos fósiles es menor y corresponde al 64%, la energía hidráulica a un 17%, el porcentaje de energía nuclear es del 7% y las renovables representan un 12% del total.
- El 34% de la energía total nacional es consumida por el sector residencial, comercial y público.

Como se vio anteriormente, la matriz de generación eléctrica argentina se basa principalmente en energías generadas mediante combustibles fósiles. Es conocido que el precio de dichos combustibles se encuentra en constante aumento debido a la creciente reducción de la disponibilidad del recurso. Además se vuelve cada vez más urgente la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero para asegurar que la temperatura media mundial se mantenga por debajo de 2 °C sobre los niveles preindustriales y limitar ese aumento a 1,5 °C, lo que reduciría considerablemente los riesgos y el impacto del cambio climático. Al ratificar la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), nuestro país asumió una serie de obligaciones, entre las que figuran reportar sus inventarios nacionales de Gases de Efecto Invernadero "GEI" y establecer programas nacionales que contengan medidas para mitigar y facilitar la adecuada adaptación al cambio climático. (Secretaría de energía, 2019).

La energía geotérmica de muy baja temperatura basa sus aplicaciones en la capacidad que el subsuelo posee de acumular calor, y de mantener una temperatura sensiblemente constante a determinada profundidad, a lo largo de todo el año. Por otra parte, las necesidades energéticas más comunes de los seres humanos, en los hogares, se centran en la calefacción y el agua caliente sanitaria (52% y 18% respectivamente, del gasto energético doméstico) (Trillio & Angulo, 2008) por lo que utilizando este recurso para satisfacer las mencionadas necesidades, se puede reducir hasta un 70% el gasto energético de las viviendas de cualquier sitio de nuestro país y del planeta entero, ya que en toda la corteza terrestre puede encontrarse energía geotérmica de muy baja temperatura. Aprovechando esa temperatura prácticamente estable del subsuelo hacer circular el aire por un pozo canadiense mejorará sensiblemente esa temperatura y, aunque no consiga la temperatura adecuada de refrigeración (o calefacción), como si puede conseguirse con otros sistemas de captación de energía geotérmica de baja entalpía, siempre mejorará el rendimiento al partir de una temperatura más próxima a la de demanda. (Trillio & Angulo, 2008)

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO EN ESTUDIO

2.1. La vivienda

La vivienda en estudio se encuentra en la provincia de Buenos Aires, partido de Brandsen, en el barrio El Mirador, actualmente se encuentra en construcción. El proyecto cuenta con un subsuelo, planta baja y primer piso. Tiene un total cubierto útil sin galerías de 257,12 m². En la planta del subsuelo se previó una instalación de acondicionamiento térmico por geotermia de baja entalpía conocida comúnmente como “Pozo canadiense”.

A fin de garantizar el funcionamiento bioclimático la vivienda poseerá suficiente inercia térmica interior que se materializará con tapias de tierra cruda estabilizada, obtenida de la excavación de fundaciones y sótano. La envolvente (muros, techos, pisos y aberturas) tendrán una transmitancia térmica ponderada de 0.60 W/m²K que cumple sobradamente lo exigido por la ley 13059/03 y su decreto reglamentario 1030/10. En lo estructural la vivienda tendrá un sistema convencional de H°A° en cimientos, tabiques estructurales, columnas y vigas, sumado a las losas pretensadas. Se eliminarán puentes térmicos con un aislamiento continuo de 5cm de EPS 30kg/m³ o 4 cm de PUR 30Kg/m³ en muros, 10 cm de lana de vidrio de 12 kg/m³ en cielorrasos suspendidos, aberturas de PVC con DVH LowE de 1.86 W/m²K.

La planta baja posee cubiertas de losas premoldeadas tipo SHAP que se cubrirán con un techo verde de bajo mantenimiento. La envolvente vertical serán dobles muros con tapia o bloques de BTC al interior, un alma de aislamiento térmico de alta densidad (EPS o PUR) y el exterior con ladrillos de BTC vistos, protegidos inicialmente por un tratamiento alkídico “tipo Bricol”. Para la planta alta, los muros y aberturas son iguales a la planta baja pero el techo es liviano. Conformado por chapa trapezoidal de color negro engrampada en una estructura de perfiles de chapa doblada galvanizada con una capa de PUR de 3cm en el interior. Luego un ático ventilado con un cielorraso suspendido de placas de yeso y 10 cm de lana de vidrio con foil de aluminio.

Respecto al aprovechamiento de la energía, la planta baja cuenta con un invernadero adosado con un grueso muro de carga de 40 cm de espesor que actúa como sistema solar pasivo. Sobre el invernadero se ubica parte de un generador fotovoltaico (6 paneles de 400 W) y 18 paneles en la planta superior sobre el techo (aprox. 10 kW) de potencia para lograr la autosuficiencia eléctrica. Toda esta planta funcionará con la estrategia de ventilación selectiva y de geotermia de baja entalpía. Cuenta además con un piso radiante eléctrico energizado por el generador solar en combinación de una estufa de masa tipo BBR en el estar y una cocina económica en el cuarto de cocina-comedor, ambas a leña. El sistema pasivo de climatización se activa con el calor generado en el interior de la vivienda sumado al del invernadero adosado que comienzan a aspirar por chimeneas solares el aire viciado. La planta alta cuenta con un muro Trombe-Michel orientado al norte y ventilación cruzada en verano más inercia térmica.

Toda la iluminación será tipo LED energizada por el generador solar. El agua de cubiertas metálicas se recogerá y enviará a una cisterna enterrada en la arista noreste para riego. El de cubiertas verdes se enviará a un estanque ubicado al norte. Las aguas jabonosas se separarán y tratarán en una cámara de lecho de raíces previo envío al estanque. Las aguas negras se tratarán con una cámara séptica más un biodigestor “tipo Rotoplas”, previo envío a un lecho nitrificante bajo la huerta, al sur. La meta es obtener de mínima una vivienda energía cero (< 15 kWh/m².año), que pueda evolucionar a energía plus conectada a red y de bajas emisiones de CO₂eq en su ciclo de vida.

2.2. El clima

El clima del sitio fue analizado mediante el procesamiento de los datos meteorológicos de un archivo EPW (EnergyPlus Weather Data File) con el programa Climate Consultant 6.0. Este archivo contiene datos históricos referidos al clima de la localización (temperatura de bulbo seco, velocidad del viento, humedad relativa, entre otros). Los mismos pueden descargarse del Repositorio de datos climáticos gratuitos para la simulación del rendimiento de edificios (Climate OneBuilding, 2022). Se utilizó el correspondiente a la ciudad de La Plata ya que resulta la ubicación más cercana a Brandsen del repositorio. Los datos meteorológicos en este sitio se derivan de una serie de fuentes públicas, para el caso del EPW utilizado en este análisis se obtuvieron en (Bre & Fachinotti, 2016). Esta página contiene información sobre cada conjunto de datos.

Según la fuente mencionada, la temperatura máxima de diseño del aire alcanza su máximo en enero (35,1°C) y su mínimo en junio (-1,5°C). La temperatura media anual es de 16,7°C y la

humedad relativa media anual es de 77,9 %. La humedad relativa de enero de acuerdo a los datos de Climate Consultant tiene un valor de 73% y en junio 82%. La ubicación corresponde a la zona bioambiental IIIb de la norma IRAM 11603 (templado cálido).

2.3. El suelo

Los suelos de la zona son suelos sedimentarios. De acuerdo al estudio de suelos realizado por la empresa Atterberg S.R.L, el perfil del terreno auscultado, es homogéneo y parejo, ya sea por las características de textura y plasticidad de los sedimentos que lo forman, como por su densificación relativa medida a través de los ensayos penetrométricos. El perfil estudiado está integrado en la profundidad investigada por: Hasta -2,50 m arcillas limosas de plasticidad moderada y coloración castaña, pertenecientes al subgrupo CL del Sistema de Clasificación Unificado ideado por Arturo Casagrande. Entre -2,50 m y -4,50 m, sedimentos limos arcillosos de plasticidad media y coloración castaña, clasificados como ML en el sistema antes mencionado. Entre -4,50 m y -7,50 m, suelos limos arcillosos de plasticidad elevada, tipo MH. Entre -7,50 m y -9,50 m, sedimentos limos arenosos de plasticidad nula y coloración castaña, también tipo ML en el Sistema Unificado. El nivel de agua libre fue ubicado a una profundidad promedio de 8,12 metros de profundidad.

2.4 La instalación: pozo canadiense

Existen diferentes formas de aprovechar la energía geotérmica de baja entalpía. Los pozos canadienses o provenzales cuentan con tres elementos principales: la torre de aspiración por donde ingresa el aire a acondicionar, un intercambiador de calor que básicamente consiste en uno o más tubos de cierto material y espesor que permita el intercambio y un sistema de impulsión de aire, que puede ser mecánico o pasivo (chimeneas solares).

Dentro de estos intercambiadores térmicos existen varias tipologías, la elección de una u otra dependerá del espacio disponible y necesario para la instalación, del caudal del aire a tratar, de las exigencias de calefacción y refrigeración y la superficie a climatizar. Se pueden agrupar en tres grupos: directos aislados (anillo), distribución Techelmann (rejilla) y bloque Techelmann (bloque-rejilla) (Díaz, 2008).

La torre de aspiración capta el aire exterior y lo transporta verticalmente hasta el tubo intercambiador. Se realiza la primera depuración del aire mediante un filtro que minimiza el paso de partículas y polen a los conductos enterrados. (Díaz, 2008). También impide el ingreso de animales que puedan hacer un nido o depositar sus excrementos y así contaminar el sistema. (Pacheco Rivas, 2016) La torre debe estar razonablemente protegida de la incidencia constante de la radiación solar, ya que se calentaría el aire interior induciendo un movimiento contrario al que deseamos (Díaz, 2008). El punto de captación del aire debe ubicarse por lo menos entre 1 y 1,5 metros sobre el nivel del suelo para evitar el ingreso de gas radón al sistema (Pacheco Rivas, 2016). El radón es un gas radiactivo incoloro, inodoro e insípido. Se produce por desintegración radiactiva natural del uranio presente en suelos y rocas. El radón emana fácilmente del suelo y pasa al aire, donde se desintegra y emite otras partículas radiactivas. Al respirar se inhalan esas partículas, que se depositan en las células que recubren las vías respiratorias, donde pueden dañar el ADN y provocar cáncer de pulmón. (OMS, 2021) El gas radón se genera de forma natural en la corteza terrestre y con mayor intensidad en zonas volcánicas. Como es más pesado que el aire, tiende a acumularse en zonas bajas y donde no hay circulación de aire. (Pacheco Rivas, 2016). La OMS recomienda establecer un promedio anual de referencia de 100 Bq/m^3 en todos los países y, si se dan circunstancias concretas que impiden alcanzarlo, fijar un nivel que no supere los 300 Bq/m^3 . Según las mediciones de Canoba, A.C. y López, F.O. (2006) de las 2689 viviendas analizadas son muy pocos los valores que superan los 200 Bq/m^3 y ninguno supera los 300 Bq/m^3 , la media de todas las viviendas fue de $41,6 \text{ Bq/m}^3$.

El conducto o tubo intercambiador es el elemento principal del sistema, allí ocurre el intercambio de calor. Son tubos macizos cuya resistencia debe soportar los esfuerzos a los que se encuentra sometido. Deben ser óptimos en la estanqueidad del aire y en la evacuación de condensados. Igualmente, deben ser posibles las intervenciones de mantenimiento y reparación. Para mejorar la calidad del aire es aconsejable que los conductos estén provistos de una capa interior antimicrobiana. Comercialmente encontramos distintos materiales y dimensiones. Debido al cambio de temperatura del aire o a la situación bajo tierra de los conductos es posible que se formen condensaciones o se infiltre parte del agua desde el terreno. En ambos casos para garantizar la calidad del aire y evitar la aparición de bacterias y malos olores debemos ser capaces de eliminar el agua del interior de los conductos. La primera medida que debe tomarse es la colocación de los tubos con inclinación hacia un punto donde pueda recogerse el agua. Este agua se deriva hacia

un colector estanco mediante un desagüe y posteriormente se expulsa mediante una bomba (Díaz, 2008).

3. METODOLOGÍA

Para realizar el cálculo de la instalación del caso en estudio se utilizó la metodología propuesta en “El terreno como intercambiador, Enfriamiento pasivo aplicado a un edificio de nueva planta” (Díaz, 2008) con algunas modificaciones en la obtención de datos climáticos y utilización de normativas para la aplicación en Argentina. Se analizó el comportamiento térmico del suelo siguiendo las pautas de la Guía técnica, Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica (ATECYR, 2010). En Argentina se cuenta como antecedente el caso estudiado por (Carro Pérez et al., 2018) que sigue otra metodología de las disponibles para realizar el dimensionado.

3.1. Temperatura del suelo

Para el dimensionamiento del intercambiador suelo-aire de desarrollo horizontal del presente trabajo, nos bastará con comprender como se comportan las capas más superficiales, que como se mencionó anteriormente, están influenciadas por las condiciones atmosféricas y el aporte de energía solar. La variación de temperatura de la capa superficial va estabilizándose con la profundidad, donde se aproxima a la temperatura media anual de la zona. La ondulación de temperaturas no sólo se reduce, sino que también se desfasa debido a la inercia térmica. (Díaz, 2008). La temperatura del suelo se obtiene a partir de la siguiente ecuación, que supone un suelo homogéneo con propiedades térmicas constantes: Guía técnica, Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica (ATECYR, 2010)

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z^2 \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} * \cos \left[\frac{2\pi}{365} \left(t - t_0 - \frac{z}{2} * \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (1)$$

Donde, de acuerdo a la guía técnica de la ATECYR del año 2010:

- $T(z, t)$ es la temperatura en °C del suelo en el tiempo t (en días) a una profundidad z (en centímetros).
- T_m es la temperatura media anual del suelo en °C (a una profundidad en donde no son perceptibles las variaciones de temperatura), se puede asumir como constante hasta profundidades de 100 metros y se estima como la temperatura media anual atmosférica del sitio.
- A_s es la oscilación de la temperatura superficial en °C. Es el valor medio entre la temperatura máxima de diseño anual y la temperatura mínima de diseño anual.
- t_0 el desfase en días. El desfase en días (t_0) se refiere al desplazamiento de la temperatura superficial con la profundidad. Un valor típico de este parámetro es 35 ± 10 días (análisis de Kusuda).
- α es la difusividad térmica del suelo en $\text{cm}^2/\text{día}$. Los valores de la difusividad térmica del suelo dependen del tipo de suelo y del contenido de agua. Se define como el ratio entre la capacidad de conducción del terreno y la capacidad térmica del terreno. Se mide en m^2/s . El rango de valores para la difusividad térmica, de acuerdo con los trabajos de Labs y Harrington (1982), va desde $0,36 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ hasta $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, según sea el suelo seco o húmedo, mientras que Givoni y Katz seleccionaron como valores límites $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para suelo seco y $1,08 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para suelo húmedo.

A partir de la ecuación (1) se puede obtener la expresión de temperatura máxima (T_H) y mínima (T_L) en el terreno, adoptando una profundidad, que ocurrirá cuando la función coseno se iguale a uno. Entonces:

$$T_L(z) = T_m - A_s e^{-z^2 \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \quad (2)$$

$$T_H(z) = T_m + A_s e^{-z^2 \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \quad (3)$$

Tabla 1: Valores de conductividad y capacidad térmica para distintos suelos. Fuente: (ATECYR, 2010)

Tipo de roca	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica
	Mín.	Valor típico	Máx.	(MJ/m³K)
Rocas sedimentarias				
Caliza	2,5	2,8	4	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6	6,6	2,1-2,2
Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
Rocas no consolidadas				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava, saturada de agua		aprox. 1,8		aprox. 2,4
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5	2,2-2,9
Arcilla/limo, seco	0,4	0,5	1	1,5-1,6
Arcilla/limo, saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8

3.2. Selección de tubo intercambiador de calor, velocidad del aire y cálculo del caudal de aire

Selección de variables:

- Diámetro interno (D)
- Espesor (e)
- Material del tubo: Conductividad térmica del tubo (λ)

Deberá seleccionarse el diámetro, material y espesor del intercambiador de calor de acuerdo a la disponibilidad ofrecida por catálogos locales, teniendo en cuenta que el diámetro del conducto se encuentra estrechamente ligado al caudal de aire que debemos climatizar. Diámetros menores de 20 centímetros no son aconsejables ya que para mantener la velocidad del aire que deseamos vamos a necesitar muchos conductos. Tampoco está recomendado superar los 60 centímetros ya que el intercambio de calor con las capas más cercanas al centro del tubo no se realiza correctamente. (Díaz, 2008)

Respecto al espesor de las paredes de los conductos, cuanto menor sea el espesor de la pared mayor intercambio de calor se producirá con el terreno, pero el conducto debe resistir los esfuerzos verticales y horizontales del terreno adecuadamente. De esta manera el espesor más apropiado será el mínimo suficiente para soportar las cargas (Díaz, 2008). La conductividad térmica del tubo puede obtenerse de los catálogos o de la página del Código técnico de la edificación web CTE WEB promovida por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y el ICCL, Instituto de la Construcción de Castilla y León.

- Velocidad del aire dentro del intercambiador (v)

Según la Guía de renovación de aire eficiente en el sector residencial (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, 2014) para evitar el ruido de la ventilación en las viviendas ha de limitarse la velocidad en los conductos a un máximo de 5 m/s. La velocidad del aire en el intercambiador quedará determinada por el sistema mecánico de impulsión de aire en caso de contar con uno. El aire también podrá ser impulsado de forma pasiva mediante el uso de chimeneas solares con velocidades menores que favorecen el confort. Una vez adoptada la velocidad del aire en el conducto deberá verificarse que el caudal (q) resulte mayor al caudal mínimo reglamentario de acuerdo al capítulo 11 del Decreto 351/79. También se puede verificar según los requerimientos del Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios de España.

Cálculo del caudal de aire (q):

$$q = 4v/(\pi \cdot D^2) \quad (4)$$

3.3. Temperatura media en el conducto para calefacción y refrigeración

Para conocer la temperatura media en el conducto es necesario conocer:

- Temperatura del terreno (T_{terr})
- Temperatura del aire de entrada (T_{ae})
- Temperatura del aire de salida (T_{as})

La temperatura del terreno para el dimensionamiento de calefacción será igual a la temperatura mínima del terreno (T_L) calculada según se indica en el apartado 3.1 mediante la ecuación (2) y para el dimensionamiento de refrigeración será igual a la temperatura máxima (T_H) que se calcula mediante la ecuación (3) del mismo apartado.

La temperatura del aire de entrada para el dimensionamiento de calefacción será igual a la temperatura atmosférica mínima de diseño obtenida del análisis del clima del apartado 2.2. Para el caso del dimensionamiento de refrigeración será igual a la temperatura atmosférica máxima de diseño que se obtiene del mismo apartado que la anterior.

La temperatura del aire de salida se debe adoptar teniendo en cuenta que (T_{as}) deberá ser menor que (T_{terr}) para el dimensionamiento de calefacción y para el caso de refrigeración, donde el terreno recibe calor del aire, (T_{as}) deberá ser mayor que (T_{terr}). Podría llegarse hasta la propia temperatura del terreno, pero eso implicaría una longitud excesiva. (Díaz, 2008).

Conociendo estas temperaturas se puede calcular la Temperatura media en el conducto (T_{ma}):

$$T_{ma} = (T_{ae} + T_{as}) * 0.5 \quad (5)$$

3.4. Resistencia térmica del conducto

La resistencia térmica del conducto total (R) es la suma de la resistencia térmica por conducción (R_{cd}) y la resistencia térmica por convección (R_{cv}):

$$R = R_{cd} + R_{cv} \quad (6)$$

$$R_{cd} = e/\lambda \quad (7)$$

$$R_{cv} = 1/(5,55 * v^{0,8}) \quad (8)$$

Donde (e) es el espesor del intercambiador de calor, (λ) es la conductividad térmica del tubo y (v) es la velocidad del aire dentro del intercambiador, de acuerdo al apartado 3.2.

3.5. Flujo de calor medio

El flujo de calor medio (ϕ_m) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\phi_m = T_{terr} - T_{ma} / R \quad (9)$$

Las variables (T_{terr}), (T_{ma}) se encuentran definidas en el apartado 3.3 y (R) en el apartado 3.4. Se obtendrá un valor para el caso de calefacción y otro valor para el caso de refrigeración.

3.6. Energía aportada al aire

Se calcula la energía que debe aportarse al aire (E_e) con la siguiente expresión:

$$E_e = (i_s/V_{es}) - (i_e/V_{ee}) \quad (10)$$

Donde:

Entalpía del aire de salida (i_s)

Volumen específico del aire de salida (V_{es})

Entalpía del aire de entrada (i_e)

Volumen específico del aire de entrada (V_{ee})

Para ello se requiere obtener con anterioridad la entalpía y volumen específico a partir del ábaco psicrométrico del aire utilizando como dato de entrada la humedad relativa y la temperatura del aire de entrada y de salida. Los ábacos psicrométricos se encuentran disponibles de forma gratuita en numerosas páginas de internet tanto en forma gráfica como en forma de calculadora. Se obtendrá un valor para el caso de calefacción y otro valor para el caso de refrigeración. Datos requeridos:

Humedad relativa del aire de salida (HR_s)
 Temperatura del aire de salida (T_{as})
 Humedad relativa del aire de entrada (HR_e)
 Temperatura del aire de entrada (T_{ae})

Los valores de las temperaturas fueron definidos en el apartado 3.3. La humedad relativa de entrada y de salida para calefacción y refrigeración se adopta igual a la definida en el apartado 2.2 en correspondencia con el mes de la temperatura de diseño del aire.

3.7. Superficie de intercambio de calor y longitud del intercambiador

La superficie de intercambio (S) necesaria para efectuar el intercambio de calor será:

$$S = E_e \cdot q / \varphi_m \quad (11)$$

Donde, la energía que debe aportarse al aire (E_e) se calcula de acuerdo al apartado 3.6, el caudal de aire (q) se calcula según el apartado 3.2 y el flujo de calor medio (φ_m) según el apartado 3.5.

Conocida la superficie de intercambio (S) y el perímetro interno (P) del intercambiador de calor puede calcularse la longitud del intercambiador de calor:

$$L = S/P \quad (12)$$

Se obtendrán dos valores, uno para el caso de calefacción y otro para el caso de refrigeración. Finalmente se adopta la mayor longitud entre los dos casos.

4. RESULTADOS

Por medio de la ecuación (1) se obtuvo el comportamiento del suelo de la zona en estudio a diferentes profundidades. A continuación se adjunta un gráfico con el comportamiento obtenido para el caso en estudio:

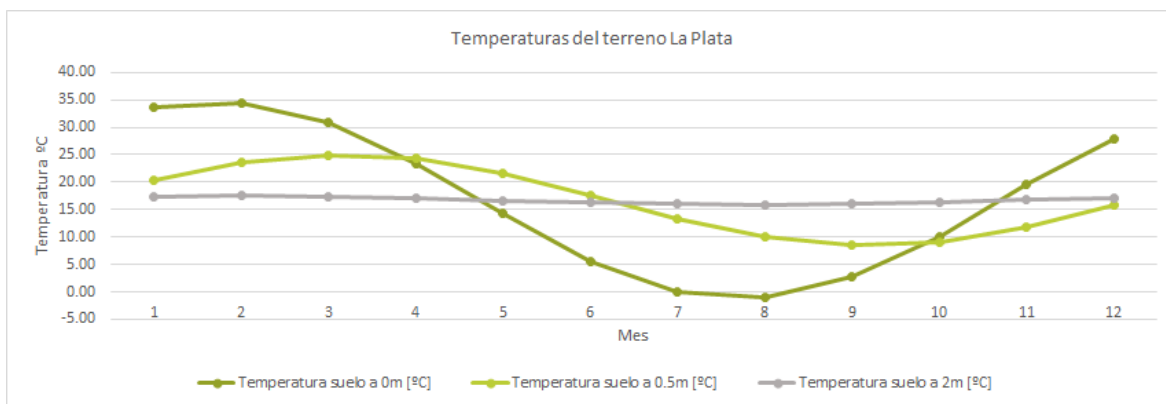


Figura 1: Temperaturas del suelo en la ciudad de La Plata a diferentes profundidades. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Temperaturas del suelo en la ciudad de La Plata a diferentes profundidades. Fuente: Elaboración propia.

Mes	t	Temperatura suelo a 0m [°C]	Temperatura suelo a 0.5m [°C]	Temperatura suelo a 2m [°C]
Enero	15	33.56	20.22	17.43
Febrero	46	34.44	23.56	17.47
Marzo	74	30.98	24.96	17.32
Abril	105	23.41	24.30	16.99
Mayo	135	14.28	21.65	16.59
Junio	166	5.54	17.57	16.22
Julio	196	0.01	13.37	15.98
Agosto	227	-1.12	9.96	15.93
Septiembre	258	2.71	8.42	16.10
Octubre	288	10.14	9.12	16.42
Noviembre	319	19.58	11.92	16.83
Diciembre	349	27.99	15.90	17.19

Valores adoptados para las variables intervinientes	
Temperatura media anual del suelo T_m	16.7 °C
Oscilación de la temperatura superficial A_s	18.3 °C
Desfase t_0	35.0 días
Difusividad térmica del suelo α	34.6 cm ² /día
Profundidad z	50.0 cm
Profundidad z	200.0 cm

La temperatura media anual del suelo se obtuvo a partir de los datos del clima del sitio indicados en el apartado 2.2, al igual que la oscilación de la temperatura superficial. El desfase en días se adopta $t_0 = 35$ días. Respecto a la difusividad térmica del suelo, el suelo presenta arcillas limosas, y la napa freática se encuentra varios metros por debajo. De acuerdo a la tabla 1, la conductividad térmica típica para arcilla/limo seco, tiene un valor de $0,5 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ y su capacidad térmica volumétrica es $1,5\text{MJ/m}^3\text{K}$, haciendo el cociente entre ambos valores se obtiene que $\alpha = 0,33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Para el presente dimensionado se adoptará el mínimo obtenido por Givoni y Katz de $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para suelo seco. Entonces $\alpha = 34,6 \text{ cm}^2/\text{día}$. Reemplazando los valores adoptados en las ecuaciones (2) y (3) para la profundidad promedio del intercambiador de 200 centímetros se obtiene que $T_L = 15,92^\circ\text{C}$ y $T_H = 17,50^\circ\text{C}$. Para definir las dimensiones del tubo se recurrió al catálogo AWADUKT THERMO antimicrobiano de REHAU que utiliza polipropileno con pintura antimicrobiana. A continuación se adjunta una tabla con el caudal calculado para la instalación Y luego los resultados obtenidos para la longitud de intercambio:

Tabla 3: Caudal de aire requerido y longitud requerida para el intercambiador de calor. Fuente: Elaboración propia.

CAUDAL DE AIRE			
Velocidad del aire (v)	0.4	m/s	
Espesor del tubo (e)	13.5	mm	
Diámetro interior del tubo (D)	400	mm	
Área interna del tubo	125664	mm ²	
Caudal de aire (q)	50	l/s	
Volumen de la vivienda	771	m ³	
Ocupantes	4	u	
Cubaje	193	m ³ /u	
Caudal mínimo por persona dec. 351/79	18	m ³ /(uh)	
Caudal mínimo dec. 351/79	20	l/s	
Ocupantes	4	u	
Caudal mínimo categoría IDA 2	12.5	l/(su)	
Caudal mínimo RITE	50	l/s	

CALEFFACCIÓN	
Temperatura media en el conducto. Calefacción	
Temperatura del aire de salida T_{as}	15 °C
Temperatura del aire de entrada T_{ae}	-1.5 °C
Temperatura del terreno T_{terr}	15.92 °C
Temperatura media en el conducto T_{ma}	6.75 °C
Resistencia térmica del conducto. Calefacción	
Espesor e	0.014 m
Conductividad del tubo λ	0.220 W/(m ² K)
Velocidad del aire v	0.400 m/s
Resistencia por conducción R_{cd}	0.061 m ² °K/W
Resistencia por convección R_{cv}	0.375 m ² °K/W
R total	0.436 m ² °K/W
Flujo de calor. Calefacción	
Temperatura del terreno T_{terr}	15.920 °C
Temperatura media en el conducto T_{ma}	6.750 °C
R total	0.436 m ² °K/W
Flujo de calor ϕ	21.013 W/m ²
Temperatura del aire de entrada T_{ae}	-1.5 °C
Humedad relativa del aire de entrada HR_e	82 %
Temperatura del aire de salida T_{as}	15 °C
Humedad relativa del aire de salida HR_e	82 %
Entalpía i_e	9.5 kJ/kg
Volumen específico V_{ee}	0.77 m ³ /kg
Entalpía i_s	25.8 kJ/kg
Volumen específico V_{es}	0.81 m ³ /kg
Energía aire E_a	19514.19 Ws/m ³
Flujo de calor ϕ	21.01 W/m ²
Caudal de aire q	0.05 m ³ /s
Superficie de intercambio S	46.68 m ²
Perímetro P	1.26 m
Longitud del intercambiador L	37 m

REFRIGERACIÓN	
Temperatura media en el conducto. Refrigeración	
Temperatura del aire de salida T_{as}	24 °C
Temperatura del aire de entrada T_{ae}	35.1 °C
Temperatura del terreno T_{terr}	17.5 °C
Temperatura media en el conducto T_{ma}	29.55 °C
Resistencia térmica del conducto. Refrigeración	
Espesor e	0.014 m
Conductividad del tubo λ	0.220 W/(m ² K)
Velocidad del aire v	0.400 m/s
Resistencia por conducción R_{cd}	0.061 m ² °K/W
Resistencia por convección R_{cv}	0.375 m ² °K/W
R total	0.436 m ² °K/W
Flujo de calor. Refrigeración	
Temperatura del terreno T_{terr}	17.500 °C
Temperatura media en el conducto T_{ma}	29.550 °C
R total	0.436 m ² °K/W
Flujo de calor ϕ	27.613 W/m ²
Temperatura del aire de entrada T_{ae}	35.1 °C
Humedad relativa del aire de entrada HR_e	73 %
Temperatura del aire de salida T_{as}	24 °C
Humedad relativa del aire de salida HR_e	73 %
Entalpía i_e	103.3 kJ/kg
Volumen específico V_{ee}	0.91 m ³ /kg
Entalpía i_s	59 kJ/kg
Volumen específico V_{es}	0.86 m ³ /kg
Energía aire E_a	44911.83 Ws/m ³
Flujo de calor ϕ	27.61 W/m ²
Caudal de aire q	0.05 m ³ /s
Superficie de intercambio S	81.76 m ²
Perímetro P	1.26 m
Longitud del intercambiador L	65 m

Se adoptarán tres tubos de 20 metros de largo cada uno.

5. CONCLUSIONES

La instalación calculada permitirá alcanzar el confort térmico durante el verano a una temperatura de 24°C. Es decir que no será necesario el uso de aire acondicionado. Durante el invierno se podrá elevar la temperatura hasta los 15°C, no se alcanzarán los 20°C de confort. Sin embargo, la calefacción necesaria será menor y podrá ahorrarse energía. Teniendo en cuenta que el 52% de la energía consumida en una vivienda corresponde con energía de calefacción (Llopis Trillo y Rodrigo Angulo, 2008) el pozo canadiense permite aprovechar la inercia térmica del terreno y producir un aporte significativo en el diseño de viviendas de consumo energético cero.

6. REFERENCIAS

- [1] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración ATECYR (2010) Guía técnica, Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica.
- [2] Atterberg S.R.L. (2021) Estudio de suelos
- [3] Bre, F., & Fachinotti, V. D. (2016). Generation of typical meteorological years for the Argentine Littoral Region. *Energy and Buildings*, 129, 432–444. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.006>
- [4] CAMMESA. (2021). Informe anual 2020.
- [5] Canoba, A.C. y López, F.O. (2006) Mediciones de radón 222 en el interior de viviendas de la República Argentina.
- [6] Carro Pérez, M. E., Peiretti, A., & Francisca, F. M. (2018). ENERGÍA GEOTÉRMICA DE BAJA ENTALPÍA EN SUELOS LOÉSSICOS: CÁLCULO y DISEÑO PARA CASO DE ESTUDIO. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 22, 23–27.
- [7] Climate.OneBuilding.org. (2022). Repository of free climate data for building performance simulation. From the Creators of the EPW. *Climate.Onebuilding.Org Web Page*.
- [8] Díaz, Sergio Martín (2008) El terreno como intercambiador. Enfriamiento pasivo aplicado a un edificio de nueva planta.
- [9] Dirección General de Arquitectura, Vivienda y Suelo de España. (2019) Código técnico de la edificación sección DB HS3.
- [10] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2014) Guía de renovación de aire eficiente en el sector residencial
- [11] Ministerio de Energía y Minería. (2021). Balances Energéticos Argentina. Ministerio de Energía y Minería Web Page. <https://www.argentina.gob.ar/produccion/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>
- [12] Ministerio de Justicia y Derechos Humanos. (1979). Reglamentación de la Ley No 19.587, aprobada por Decreto No 351/79. InfoLeg (Web Page). <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/30000-34999/32030/dto351-1979-anexo1.htm>
- [13] Ministerio de la Presidencia de España (2007) Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios de España. [Real Decreto 1027/2007.] Actualizado en 2021.
- [14] Organización mundial de la salud (2021). El radón y sus efectos en la salud. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>.
- [15] Pacheco Rivas, Igma (2016) Cómo Construir un Pozo Canadiense: Un Sistema de Climatización que Utiliza la Energía del Subsuelo. Recuperado en: <https://about-haus.com/como-construir-un-pozo-canadiense/>.
- [16] REHAU. (2017). Ventilación ecoeficiente en edificios. REHAU Web Page. <https://www.rehau.com/es-es/intercambiador-de-aire-awadukt-thermo>

Agradecimientos

A la Arq. Elena Romero por su aporte gráfico y a la familia Frassinelli por brindarnos la oportunidad de pensar de otra manera la forma de funcionar de su vivienda.