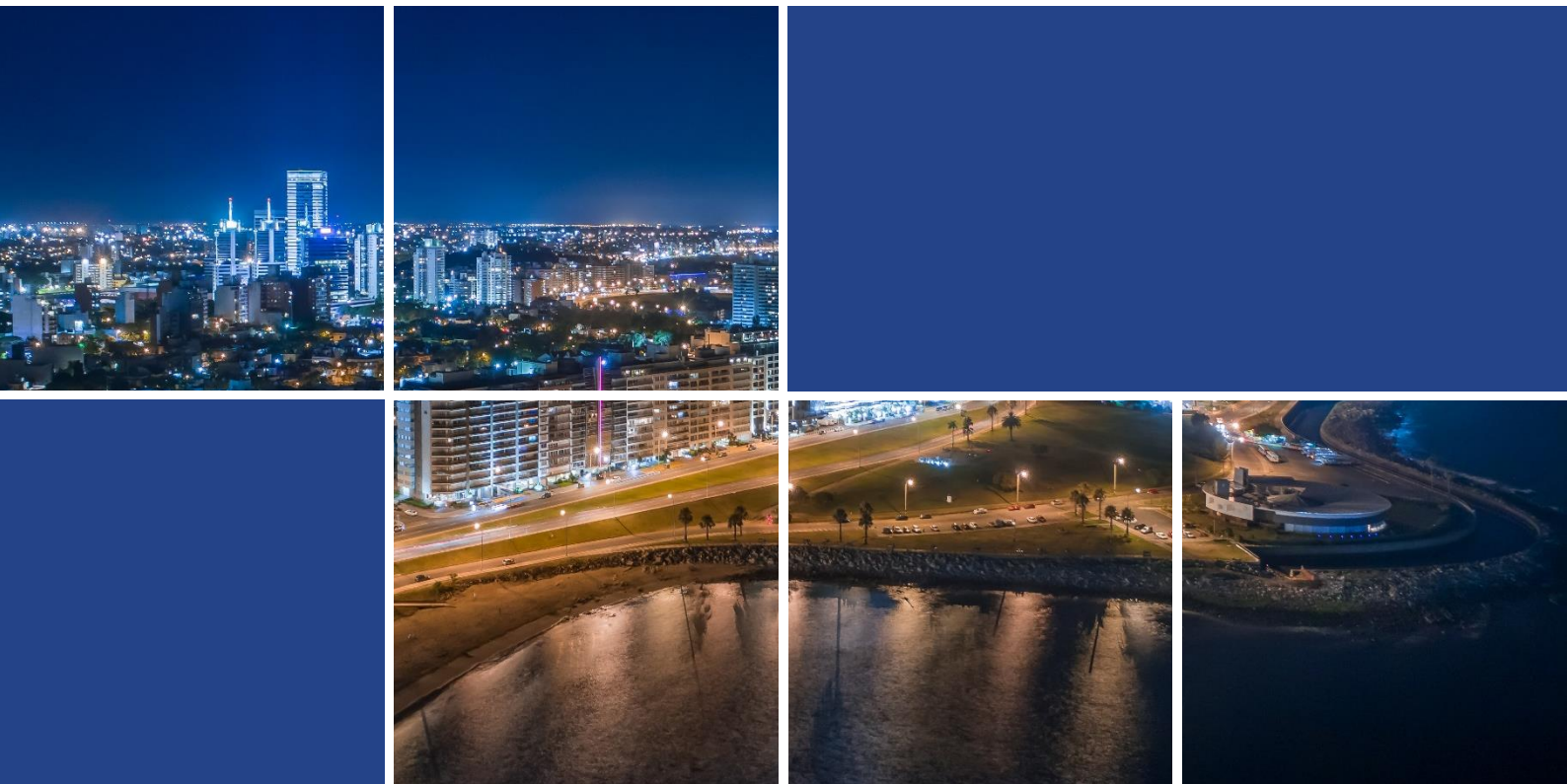


Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía



Elaborado para:



Consultoría:

Elaboración de una hoja de ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial

Elaborado para:

Red y Centro de Tecnología del Clima (CTCN)

CTCN, Ciudad de las Naciones Unidas, Marmorvej 51, 2100 Copenhague, Dinamarca

<https://www.ctc-n.org/>

Elaborado por:

DEUMAN

Dirección: Av. Vitacura 2909, Las Condes, Santiago, Chile

Teléfono: +56 2 32247478

www.deuman.com

Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA)

Departamento de Geología. Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

<http://www.cega-uchile.cl/>

Dato de contacto:

Jaime Parada

jparada@deuman.com

Lugar y fecha de presentación:

Santiago, 18 de abril del 2022.

2° versión: 29 de agosto del 20220.

Índice

Índice.....	1
Índice de tablas.....	2
Índice de figuras	3
Índice de ecuaciones	3
Siglas y acrónimos.....	4
1. Introducción.....	5
2. Antecedentes del proyecto.....	6
2.1. Clima.....	6
2.2. Dimensiones y elementos constructivos de la edificación.....	7
2.2.1. Dimensionamiento de la escuela.....	7
2.2.2. Cálculo de transmitancias térmicas	8
2.3. Uso del inmueble.....	9
2.4. Otros.....	9
3. Dimensionamiento del sistema de climatización	10
3.1. Carga y demanda energética de la edificación	11
3.2. Componentes del sistema del clima	12
4. Evaluación técnica del proyecto	1
4.1. Condiciones de terreno.....	1
4.2. Parámetros de operación y costos de inversión	1
5. Análisis económico	3
5.1. Cálculo CAPEX.....	3
5.2. Cálculo del OPEX	4
6. Beneficios socioambientales	7
6.1. Sociales.....	9
6.2. Ambientales	10
6.3. Económicos.....	12
7. Conclusiones.....	14
Agradecimientos	15
Referencias bibliográficas	16
Anexos.....	18
Anexo 1. Cálculo de cargas térmicas y demanda energética.....	18
Anexo 2. Cálculo sistema de climatización	21

Índice de tablas

Tabla 1. Dimensiones del recinto que alberga 3 salones de clases	8
Tabla 2. Transmitancias térmicas calculadas	8
Tabla 3. Carga térmica de climatización y demanda energética anual de los 3 salones de clases.....	12
Tabla 4. Resumen de parámetros de operación del sistema de climatización	2
Tabla 5. Actividades, subcontrataciones y compra de equipos más importantes para el cálculo del CAPEX	2
Tabla 6. CAPEX a nivel de ingeniería básica del proyecto.....	3
Tabla 7. Evaluación económica del proyecto - OPEX.....	4
Tabla 8. Ahorros económicos anuales	5
Tabla 9. Actualización evaluación económica del proyecto	5
Tabla 10. ODS relacionados con la implementación de proyectos de energía geotérmica.....	7
Tabla 11. Beneficios identificados en la implementación del sistema de climatización con energía geotérmica.....	9
Tabla 12. Factor de emisión del SIN.....	11
Tabla 13. Demanda energética en kWh/año para cada sistema de climatización	11
Tabla 14. Reducción de emisiones de GEI por la implementación de energía geotérmica	11
Tabla 15. Revisión de parámetros de apropiación tecnológica	13
Tabla 16. Valores del área superficial de cada elemento de la envolvente térmica	18
Tabla 17. Valores de transmitancia térmica de cada elemento de la envolvente térmica	19
Tabla 18. Valores de carga y ganancia térmica para la calefacción	19
Tabla 19. Demandas energéticas mensuales para la calefacción	19
Tabla 20. Variables calculadas para la carga térmica de refrigeración	21
Tabla 21. Demanda energética de frío en el año	21
Tabla 22. Demanda de energía eléctrica de la bomba de calor para climatización.....	22

Índice de figuras

Figura 1. Temperatura media, mínima y máxima mensual de la localidad de Colonia Wilson	6
Figura 2. Temperatura media por hora para distintas horas del día y meses del año	6
Figura 3. Fotografías del recinto que contiene 3 salones de clases a evaluar	7
Figura 4. Diagrama ilustrativo de dimensiones del recinto a climatizar	7
Figura 5. Diagrama de la solución constructiva del complejo muro (izquierda) y techumbre (derecha)	8
Figura 6. Vista aérea de la escuela rural de Colonia Wilson, en cuadro blanco corresponde a los salones a evaluar para climatizar con geotermia	10
Figura 7. Fotografía de salones de clases de la escuela rural de Colonia Wilson	10
Figura 8. Diagrama ilustrativo de cargas térmicas de calefacción.....	11
Figura 9. Demanda energética mensual de climatización	12
Figura 10. Consumo eléctrico mensual de la bomba de calor geotérmica	14
Figura 11. Diagrama de flujo de proceso y componentes del sistema de climatización con geotermia somera para 3 salones de la escuela rural de Colonia Wilson	15
Figura 12. Piezometría resultante y perforaciones relevadas en la campaña de medición de niveles ...	1
Figura 13. Lineamientos a la Política Nacional de Cambio Climático.....	8
Figura 14. Beneficios sociales del proyecto	9
Figura 15. ODS asociados a los beneficios en la comunidad estudiantil de la escuela rural	10
Figura 16. Ubicación del actual sistema de aire acondicionado en la escuela	12

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo de emisiones de CO ₂	10
Ecuación 2. Cálculo de cargas térmicas para calefacción.....	18
Ecuación 3. Cálculo de demanda energética para calefacción	18
Ecuación 4. Cálculo de cargas térmicas para refrigeración.....	20
Ecuación 5. Cálculo de demandas energéticas para refrigeración	20
Ecuación 6. Cálculo de ganancias solares	20
Ecuación 7. Factor M.....	20
Ecuación 8. Cargas térmicas solar de verano (superior) e invierno (inferior)	21
Ecuación 9. Cálculo del COP (superior) y del EER (inferior)	22
Ecuación 10. Caudal másico necesario del pozo	23
Ecuación 11. Potencia y consumo eléctrico de la bomba hidráulica de pozo	23

Siglas y acrónimos

BEN	Balance Energético Nacional
CO₂	Dióxido de Carbono
COP	Coefficient of Performance o Coeficiente de rendimiento
CTCN	Climate Technology Centre and Network
DNE	Dirección Nacional de Energía
EER	Energy Efficiency Ratio o Factor de Eficiencia Energética
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
GEI	Gases de Efecto Invernadero
m	Metros (unidad)
MA	Ministerio de Ambiente de Uruguay
MIEM	Ministerio de Industria, Energía y Minería de Uruguay
SIN	Sistema Interconectado Nacional
UdelaR	Universidad de la República
USD	Dólares estadounidense

1. Introducción

En el marco de la Asistencia Técnica “Elaboración de una hoja de ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay”, la segunda parte de la consultoría consiste en encontrar un proyecto piloto a desarrollarse en el país que sirva como base para el desarrollo de otros a futuro, levantar las barreras y brechas existentes, y dar confianza a la población sobre el uso de esta energía renovable no convencional.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Convocatoria para la selección de proyectos de interés para desarrollar un piloto geotérmico de baja entalpía, se seleccionó el proyecto “Climatización con geotermia en una escuela en el acuífero de Raigón” propuesto por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República.

Actualmente, los encargados del proyecto tienen una instalación experimental para el estudio del uso del acuífero Raigón para usos térmicos en funcionamiento, en el predio de una escuela rural de Colonia Wilson en San José. La finalidad de este proyecto piloto es aprovechar esta instalación y ampliarla incorporando el sistema de bombeo de calor (y acondicionamiento) para acondicionar los salones de la escuela.

En el presente informe se abordará un estudio de factibilidad de dicho proyecto evaluando desde el dimensionamiento del sistema de climatización, la carga y demanda energética, los componentes del sistema de clima, las condiciones del terreno y obras civiles, los parámetros de operación y características mínimas de los equipos, los impactos del proyecto desde un punto de vista de beneficios sociales y ambientales, y, por último, el análisis económico del mismo.

2. Antecedentes del proyecto

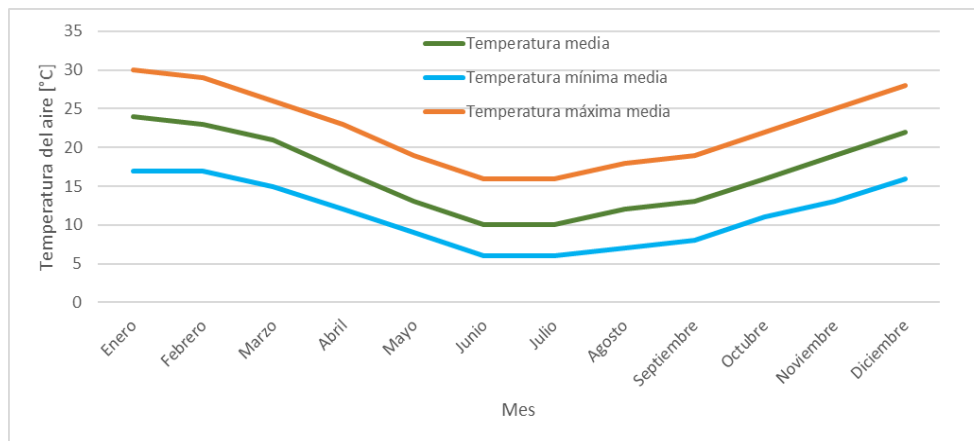
A continuación, se presentan los antecedentes que se utilizarán para el dimensionamiento del sistema de climatización con bomba de calor geotérmica.

Parte de la información obtenida se debe al trabajo de la Universidad de la República (UdelaR) y de su trabajo en el proyecto *Acumulación estacional de energía solar en acuífero para acondicionamiento térmico* (Galione, et al., 2022) y de los responsables de su equipo técnico a cargo de dicho proyecto.

2.1. Clima

El clima en Colonia Wilson es templado y húmedo, con una temperatura media anual de 16,5°C, con veranos calurosos y húmedos e inviernos medianamente fríos. Durante el transcurso del año, la temperatura varía de 6°C a 30°C (ver Figura 1), donde rara vez disminuye bajo 0°C o sube más de 33°C. La temperatura media máxima se alcanza en el mes de enero y la media mínima se alcanza en el de junio y julio.

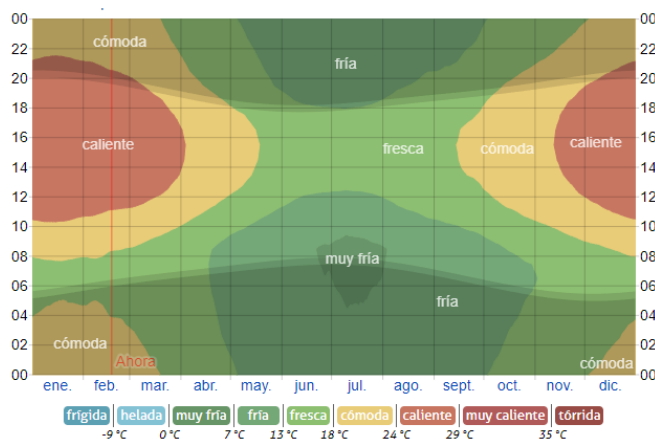
Figura 1. Temperatura media, mínima y máxima mensual de la localidad de Colonia Wilson



Fuente: Recuperado de Weather Spark.

Desde el diagrama que se muestra en la Figura 2 se puede ver que existe variabilidad en la temperatura con estaciones marcadas por lo que se tienen necesidades de calefaccionar y refrigerar el espacio solo en ciertas épocas del año.

Figura 2. Temperatura media por hora para distintas horas del día y meses del año



Se observa temperaturas predominantes entre 7°C a 18°C, con sensación térmica de fresca, fría y muy fría entre los meses de mayo a septiembre.

Mientras que en los meses de octubre a abril predomina temperaturas entre 18°C a 29°C, con sensaciones térmicas de fresca, cómoda y caliente en los meses de octubre a abril).

Fuente: Recuperado de Weather Spark.

2.2. Dimensiones y elementos constructivos de la edificación

2.2.1. Dimensionamiento de la escuela

En base a la información proporcionada por el Equipo técnico de la Universidad de la República (UdelaR), se obtiene que la edificación de la *Escuela Rural* consiste en un recinto con 3 salones de clases con las siguientes medidas y se distribuyen como se observa en la Figura 4.

- Salón 1: 7,6 x 6,4 x 2,75 metros [m]
- Salón 2: 7,6 x 6,2 x 2,75 metros [m]
- Salón 3: 7,6 x 6,0 x 2,75 metros [m]

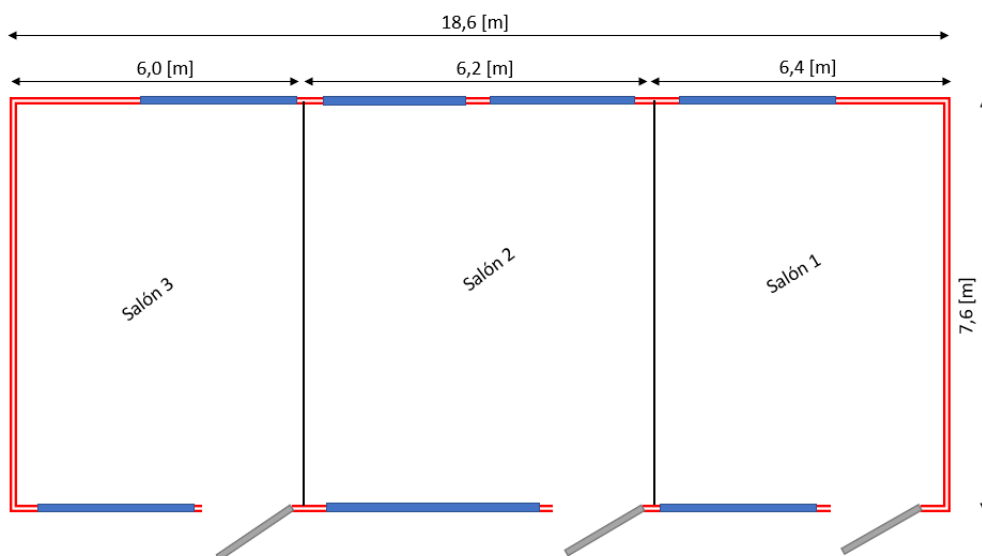
En ese sentido, para el análisis se considera un espacio completo de 7,6 m x 18,6 m x 2,75 m. En la Figura 3, se ve la edificación a evaluar.

Figura 3. Fotografías del recinto que contiene 3 salones de clases a evaluar



Fuente: Fotografía del equipo técnico de la UdelaR.

Figura 4. Diagrama ilustrativo de dimensiones del recinto a climatizar



Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por el equipo técnico de la UdelaR.

A partir de las fotografías se logra dimensionar la superficie de las ventanas, muros y techumbre. Cabe mencionar que las puertas se agregan como superficie de ventana.

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Tabla 1. Dimensiones del recinto que alberga 3 salones de clases

Parámetro	Dimensión	Unidad
Largo	18,6	Metro [m]
Ancho	7,6	Metro [m]
Alto	2,75	Metro [m]
Superficie piso	141	Metro cuadrado [m ²]
Volumen	389	Metros cúbicos [m ³]
Superficie muro	122	Metro cuadrado [m ²]
Superficie ventanas	22	Metro cuadrado [m ²]
Superficie techumbre	141	Metro cuadrado [m ²]
Perímetro Piso	52	Metro [m]

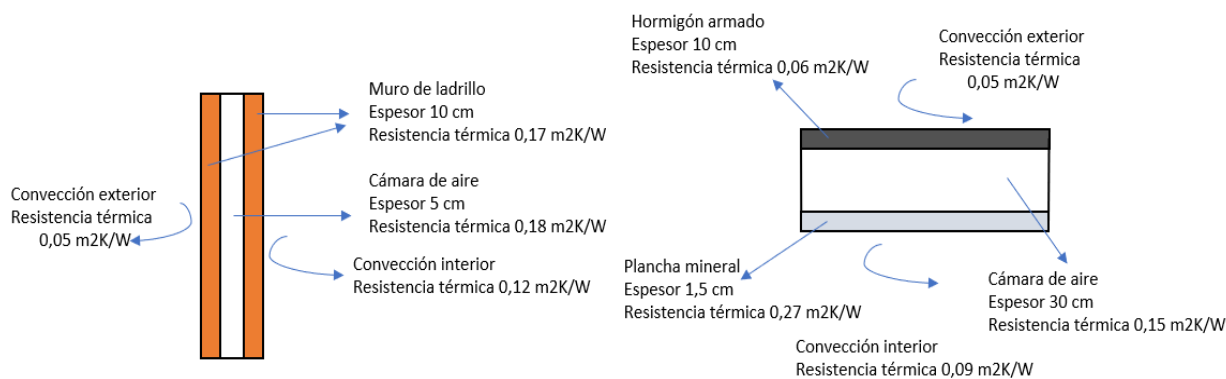
Fuente: Elaboración propia.

2.2.2. Cálculo de transmitancias térmicas

Respecto a la materialidad de la construcción de la edificación, la escuela cuenta con muros de ladrillo doble con cámara de aire, ventanas con doble vidrio herméticas, un cielo falso registrable con cámara de aire y techo de losa, y piso de hormigón armado¹.

Con dicha información se calcularon valores de transmitancias térmicas en el Anexo 1, utilizando la metodología expuesta en la Norma Técnica NCh853.2007; los resultados se muestran en la Tabla 2.

Figura 5. Diagrama de la solución constructiva del complejo muro (izquierda) y techumbre (derecha)



Nota: Se considera una conductividad de 1,63 W/m²K para el hormigón armado. Fuente: Elaboración propia según valores de NCh853.2007.

Tabla 2. Transmitancias térmicas calculadas

Elemento constructivo	Transmitancia térmica [W/m ² K]
Complejo muros	1,73
Ventanas	1,81
Complejo techumbre	2,7

Fuente: Elaboración propia.

¹ Información obtenida desde el Equipo técnico de la Universidad de la República.

2.3. Uso del inmueble

Los salones son utilizados por 60 alumnos. Se utilizan desde la primera semana de marzo hasta la tercera semana de diciembre. No se utiliza por vacaciones de verano enero, febrero y la última semana de diciembre. Tampoco se utiliza en 2 semanas de julio por vacaciones de invierno ni en 1 semana de septiembre.

El horario de clases destinado para el uso del inmueble es de 10AM hasta 3PM, destinando 5 horas diarias y 5 días a la semana. Por consiguiente, en un mes el recinto se utiliza 100 horas, sin considerar vacaciones.

2.4. Otros

La escuela se emplaza sobre el acuífero Raigón y actualmente cuenta con una instalación solar térmica experimental que extrae agua del acuífero, por lo que se propone ampliar esta instalación como colector geotérmico abierto para la bomba de calor.

Por último, actualmente los 3 salones de clases mencionados se climatizan con aerotermia con sistemas Split en cada salón, con una capacidad de 24.000 BTU cada uno². En otros términos, los equipos tienen una potencia frigorífica de 6,8 kW y una potencia térmica de 7,4 kW aproximadamente cada uno.

Con relación al sistema de distribución de la bomba de calor geotérmica y para mantener la familiaridad de operación de estos sistemas, se proponen *fan coils* (o **ventilo convectores**). Sin embargo, existen otras opciones como los radiadores convencionales y la loza radiante. Los radiadores funcionan a mayores temperaturas, lo cual bajaría la eficiencia completa del sistema; además de tener una distribución más lenta de calor y no ser aptos para refrigerar espacios. Por otro lado, la loza radiante, tuberías subterráneas, presentan dificultades en recintos ya edificados puesto que se tendría que renovar completamente el piso, encareciendo de esta forma la implementación del sistema.

² Información obtenida desde el Equipo técnico de la Universidad de la República.

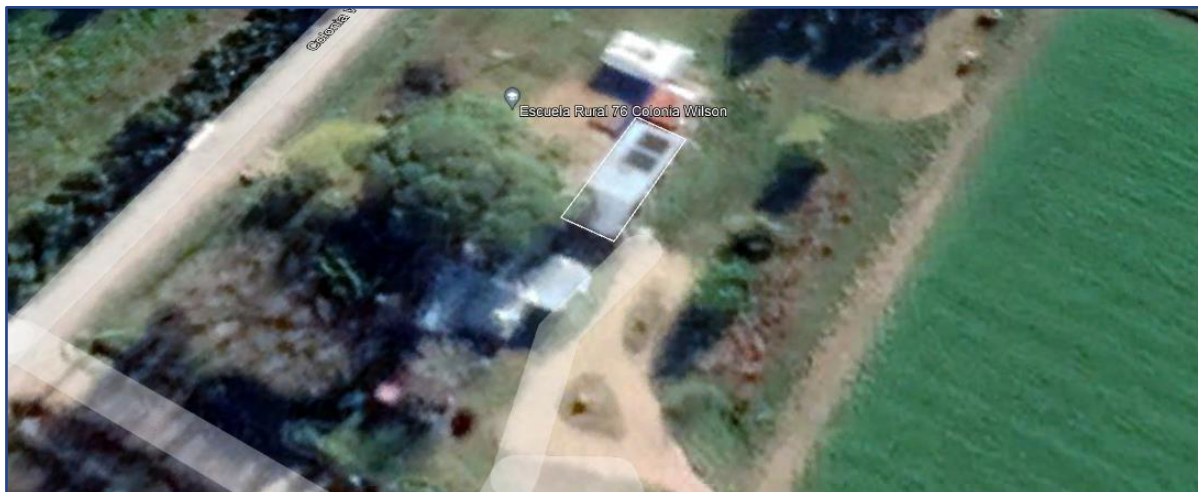
3. Dimensionamiento del sistema de climatización

El alcance de esta sección es definir y dimensionar los principales equipos de un sistema de climatización con geotermia somera en la escuela rural de Colonia Wilson en San José. Esto se realiza a partir de una cuantificación de cargas térmicas del recinto a climatizar y del tipo de configuración del sistema de climatización geotérmico.

El proyecto tiene como principal objetivo la instalación de un sistema de climatización con geotermia que sirva como demostrativo piloto de climatizar con bomba de calor geotérmica de fuente somera.

Para dimensionar los equipos del sistema de climatización geotérmico se requiere determinar el consumo energético y potencia de calefacción/refrigeración que permita cubrir la demanda energética de los espacios a climatizar. Esta tarea se realiza en base a información como la materialidad y dimensiones, además de las características meteorológicas de la zona. Por otra parte, es necesario definir la configuración del sistema de climatización geotérmico a instalar, que en este caso corresponde a un sistema vertical abierto junto con un sistema de distribución de calor mediante ventilo convectores o *fan coils*.

Figura 6. Vista aérea de la escuela rural de Colonia Wilson, en cuadro blanco corresponde a los salones a evaluar para climatizar con geotermia



Fuente: Elaboración propia en base a Google Earth.

Figura 7. Fotografía de salones de clases de la escuela rural de Colonia Wilson



Fuente: Elaboración propia en base a Google Street View.

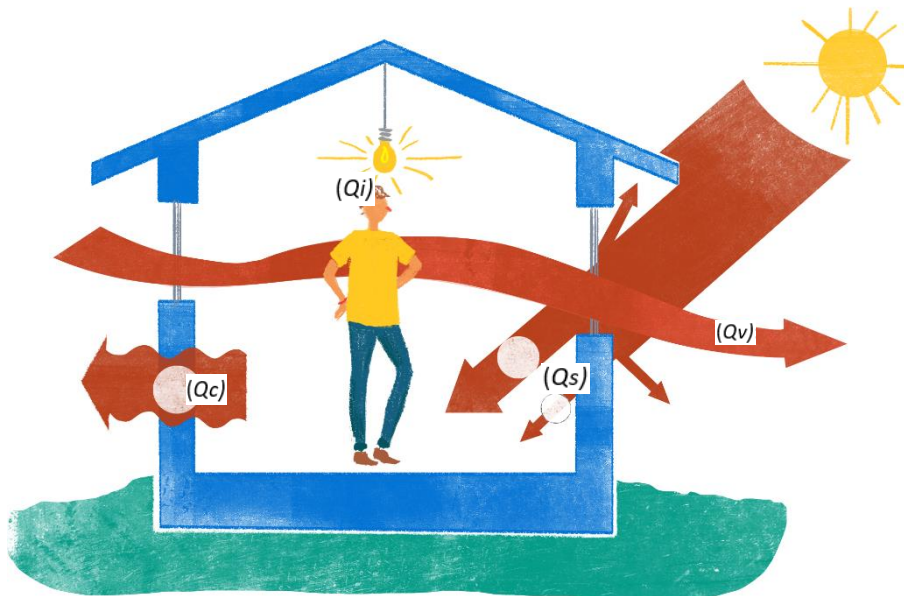
3.1. Carga y demanda energética de la edificación

A continuación, se muestran los principales resultados del cálculo de carga térmica (ver Anexo 1) y demanda energética de climatización (ver Anexo 2), separados por calefacción y refrigeración del inmueble. Para el cálculo de cargas térmicas se realiza un balance energético que toma en consideración las siguientes componentes:

- Pérdidas de calor por superficies (Q_c): muros, techos, suelos, ventanas.
- Pérdidas de calor por renovaciones de aire (Q_v): infiltraciones y ventilaciones.
- Ganancias de calor por radiación solar (Q_s): directa y difusa.
- Ganancias de calor por personas y equipos (Q_i).

En el caso de refrigerar el ambiente, el calor recibido por radiación solar y el emitido por personas y equipos se consideran como cargas térmicas.

Figura 8. Diagrama ilustrativo de cargas térmicas de calefacción



Fuente: Bruno Ortega Leiva, CEGA. Febrero 2022.

Además, el balance energético se realiza con una temperatura de confort de 21°C^3 para calefacción y de 24°C para refrigeración. Para el cálculo de demanda energética de climatización, se realiza en base a las horas de ocupación del inmueble de acuerdo con lo mencionado en 3.3. La metodología detallada del cálculo se puede ver en el Anexo 1 y Anexo 2.

Se considera una ventilación de 7,7 renovaciones de aire por hora ($50 \text{ m}^3/\text{h}/\text{persona}$)⁴ para mantener una buena calidad del aire, a pesar de tener ventilación natural por apertura manual de ventanas se asume que los ocupantes ventilarán adecuadamente las salas para mantener una calidad del aire

³ Se considera una temperatura confort de 21°C como experiencia del equipo consultor.

⁴ Según estándar DIN 1946.

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

aceptable. En caso contrario de no ventilar, el sistema de climatización tiene la capacidad de lograr el confort térmico.

La carga térmica calculada se ve en la Tabla 3, en base al mes más frío y caliente, para calefacción y refrigeración respectivamente, y corresponde a la potencia mínima que debe tener el sistema de climatización para ambos casos. Además, se obtiene la demanda energética anual de las 3 salas.

Tabla 3. Carga térmica de climatización y demanda energética anual de los 3 salones de clases

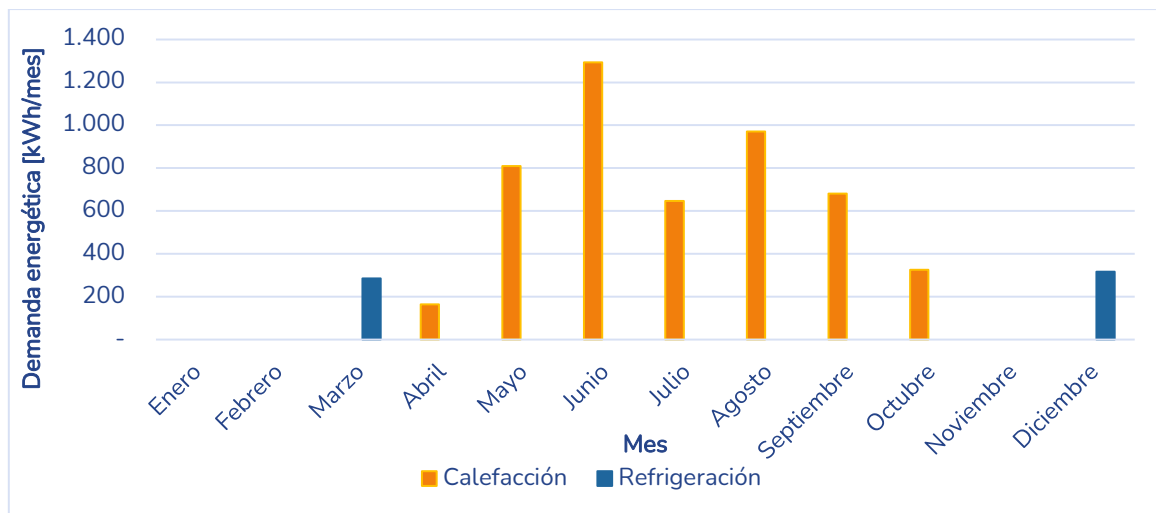
Parámetros	Calefacción	Refrigeración
Carga térmica [kW]	19,4	17,0
Demanda energética [kWh/año]	4.894	601

Fuente: Elaboración propia.

Tomando como referencia la carga térmica de calefacción (19,4 kW para los 3 salones) se tiene que en promedio cada sala debe poseer un sistema de distribución de climatización de al menos **6,5 kW térmicos**. Por otro lado, la carga térmica de refrigeración al ser menor (17,0 kW) que la carga térmica de calefacción, esta última provoca suficiencia en la potencia para enfriar.

Las demandas energéticas mensuales que se visualizan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se explican por una parte por la severidad del clima en el caso de calefacción para los meses de invierno y en el caso de refrigeración para los meses de verano, considerando también una disminución en la demanda debido a periodos de vacaciones de invierno (2 semanas) y verano (2 meses).

Figura 9. Demanda energética mensual de climatización



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Componentes del sistema del clima

A partir de los resultados de carga térmica y demanda energética del recinto correspondiente a 3 salas de la escuela, el sistema de climatización debe ser de **al menos 19,4 kW térmicos**. La bomba de calor a instalar debe tener una potencia superior a la mencionada. Las condiciones de operación evaluadas son una temperatura de fuente de 16°C y de carga de 55°C. Estas condiciones de operación implican

un COP de bomba de calor de 4,7⁵. En adición, la bomba de calor debe incluir una válvula de 4 vías para que el sistema sea capaz de ofrecer calefacción y refrigeración de espacios.

Con los antecedentes descritos, se tiene el sistema de climatización geotérmico tiene un sistema de captación del tipo vertical abierto, ya que puede aprovechar la estructura experimental que ya se realiza con extracción de agua del acuífero Raigón. La temperatura del flujo de agua del colector abierto 18°C, un salto térmico de 5°C y un caudal máximo de 1,1 L/s⁶. Además, se estima una bomba de pozo de al menos 0,66 HP, considerando la profundidad del acuífero de 25 metros, una altura neta positiva de aspiración (NPSH) mínima de 2 metros, pérdidas estimadas de 1 metro y con una eficiencia de la bomba del 60%.

Por otra parte, se evalúa el sistema de climatización con un sistema de distribución base en *fan coils* o ventilosconvectores, debido a su versatilidad para calefaccionar o refrigerar ambientes y por su familiaridad de operación al ser similar a los sistemas *Split* actualmente instalados. Estos sistemas de distribución (del tipo agua-agua) se encuentran mayor disponibles en el mercado a diferencia que las bombas agua-aire; a ello se suma que los sistemas hidráulicos son más sencillos en su instalación al tener más espacio a climatizar.

En ese sentido, se considera que el sistema tenga una temperatura de distribución⁷ de 50°C junto con un salto térmico de 10°C. En caso de refrigerar ambientes, se considera una temperatura de distribución de 5°C con un salto térmico de 10°C.

En adición, se deben considerar estanques de inercia pequeños, para calefacción y climatización, con objetivo de reducir las partidas y paradas de la bomba de calor, y en consecuencia aumentar la vida útil del sistema. Se consideran 2 estanques de inercia de alrededor de ~150 Litros cada uno. Cuando ocurre el arranque inicial del sistema, se estima que el estanque de inercia demora aproximadamente 1 hora en llegar a la temperatura de operación.

Por último, el sistema de clima, en base a la experiencia, se compone del sistema de tuberías, bombas hidráulicas que permiten impulsar los distintos flujos q conforman el circuito, tales como el agua de la fuente, de la carga y del que alimenta el sistema de distribución. Además, se deben considerar válvulas termostáticas que permiten regular el caudal de flujo de servicio, en conjunto de termómetros, manómetros, flujómetros, filtros, válvulas y vasos de expansión.

Considerando los parámetros anteriores, el consumo eléctrico del sistema de climatización se estima en 1.278kWh eléctricos anuales (ver cálculo en Anexo 2).

Por último, todos los componentes mencionados se pueden ver en el diagrama de flujo de proceso en la Figura 10.

⁵ Se utilizó como referencia el Catálogo ecoGEO 5-22 de bombas de calor geotérmicas. [\[Enlace\]](#)

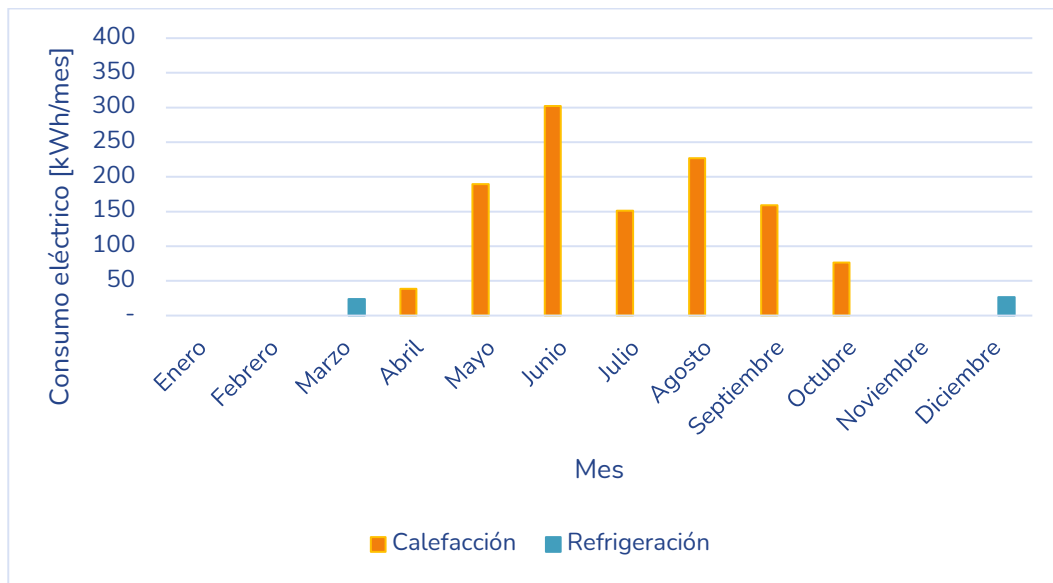
⁶ Información obtenida del Equipo técnico de la Universidad de la República.

⁷ Considerado como temperatura de distribución al promedio entre la temperatura de entrada (55°C) y la temperatura de salida (45°C).

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

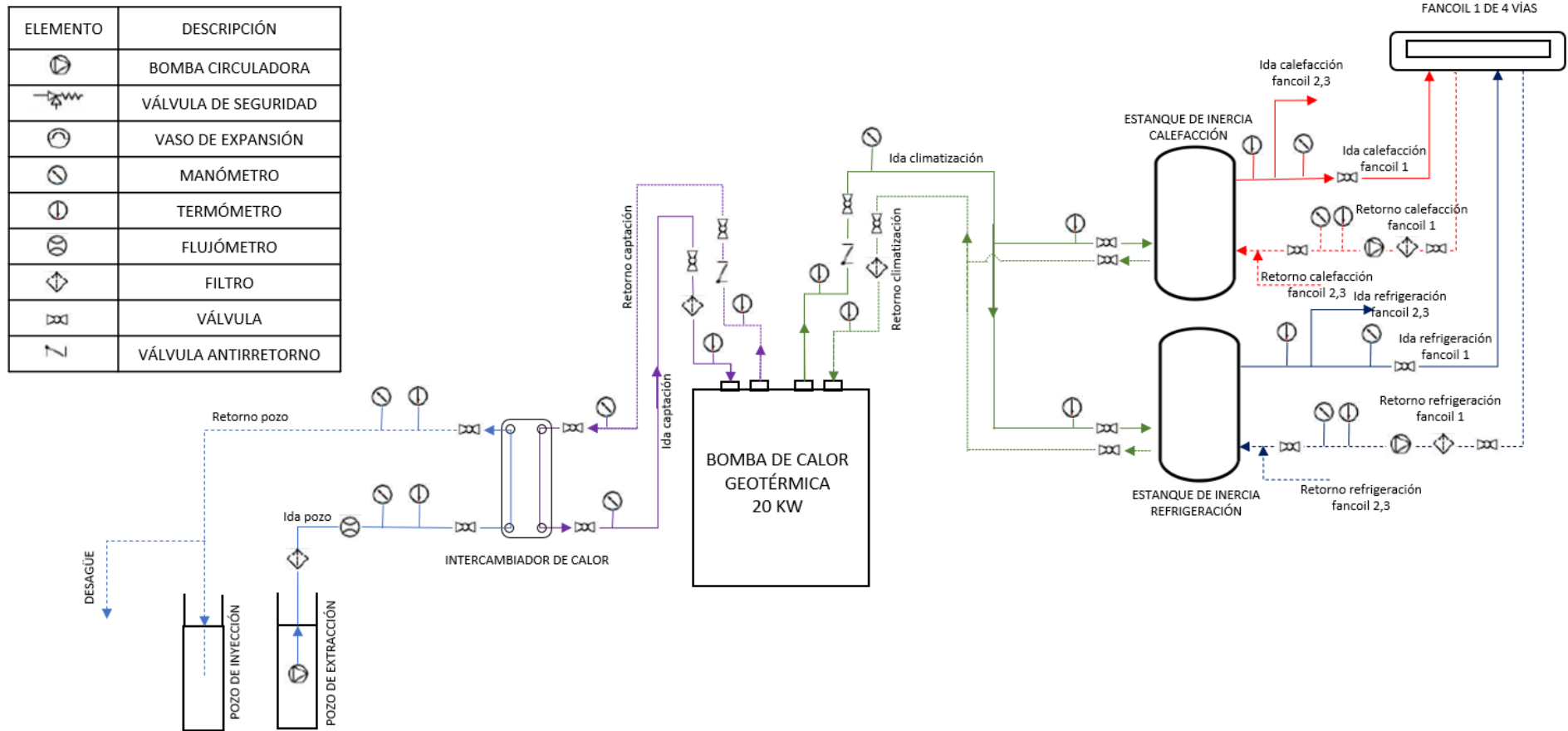
Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Figura 10. Consumo eléctrico mensual de la bomba de calor geotérmica



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Diagrama de flujo de proceso y componentes del sistema de climatización con geotermia somera para 3 salones de la escuela rural de Colonia Wilson



Fuente: Elaboración propia.

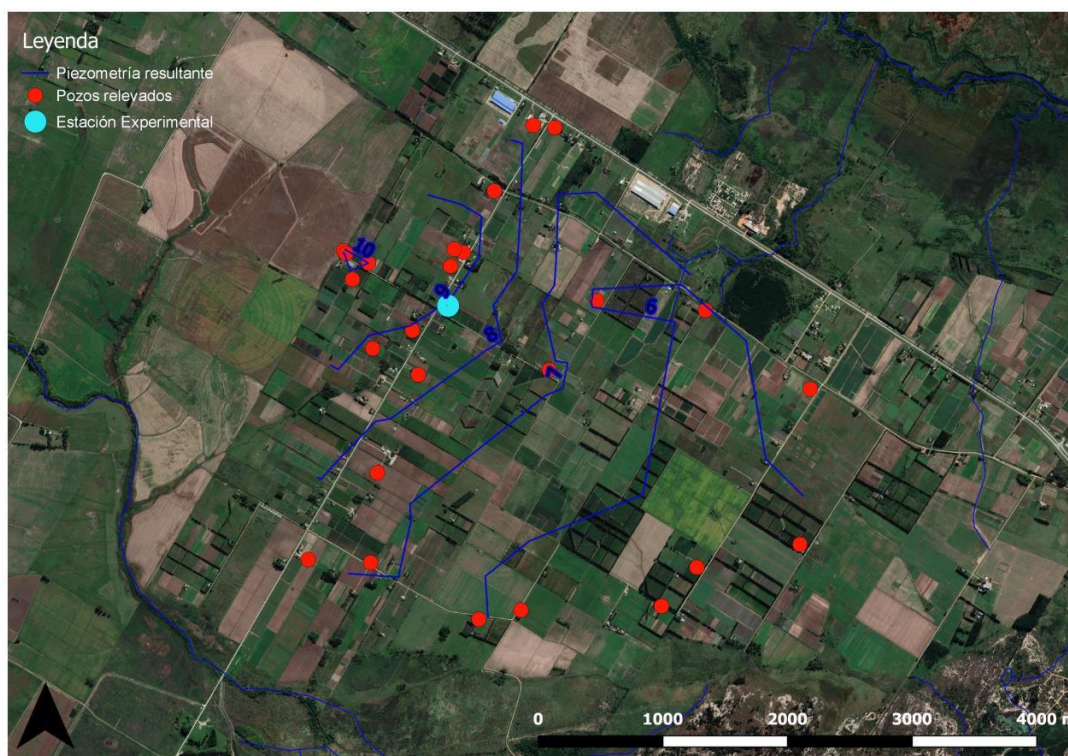
4. Evaluación técnica del proyecto

4.1. Condiciones de terreno

El terreno en la escuela de Colonia Wilson se emplaza sobre el acuífero Raigón, departamento de San José. Se trata de un acuífero sedimentario, compuesto principalmente de arenas y gravas, con una extensión de aproximadamente 2300 km².

En el sitio de estudio, las distribuciones granulométricas muestran un predominio de sedimentos tamaño arena muy gruesa a gruesa, con variaciones en el porcentaje de gravas y limo-arcillas. El acuífero se comporta como libre, presenta un nivel freático de ~9 m (ver Figura 12) y es altamente productivo, con caudales específicos del orden de 15 m³/h/m (Galione, et al., 2022). La transmisividad del medio es del orden de 200 m²/día, el espesor saturado es de aproximadamente 15 m y la velocidad de Darcy (caudal por unidad de área) del flujo subterráneo en la zona es de 0,013 m/día (Galione, et al., 2022).

Figura 12. Piezometría resultante y perforaciones relevadas en la campaña de medición de niveles



Fuente: Equipo técnico UdelaR (enero 2018).

Las características del acuífero, tanto a escala local como regional, son favorables para la replicabilidad de proyectos como el descrito, con una potencia baja y donde ya se conocen las propiedades hidráulicas del acuífero.

4.2. Parámetros de operación y costos de inversión

A continuación, se resumen los principales parámetros de operación establecidos en el dimensionamiento del sistema de climatización (Tabla 4). Además, se muestran los principales costos que serán considerados como CAPEX en la evaluación económica (Tabla 5).

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Tabla 4. Resumen de parámetros de operación del sistema de climatización

Bomba de calor	
Potencia requerida [kWt]	19.4
Consumo eléctrico del sistema de climatización [kWh/año]	1.248
Temperatura de fuente [°C].	10
Temperatura de carga [°C].	55
COP esperado	4.7

Circuito acuífero- intercambiador de calor- bomba de calor	
Temperatura agua acuífero [°C].	16.5
Salto térmico sistema suelo [°C].	5
Caudal requerido [m3/h].	3.24
Potencia bomba hidráulica [HP].	0.66

Circuito bomba de calor- estanques de inercia- fan coils	
Temperatura de distribución estanque de inercia 1 (Calefacción) [°C].	50
Temperatura de distribución estanque de inercia 2 (Refrigeración) [°C].	5
Salto térmico (Calefacción y refrigeración) [°C].	10

Tabla 5. Actividades, subcontrataciones y compra de equipos más importantes para el cálculo del CAPEX

Sala de máquinas
Bomba de Calor agua-agua reversible de >20 kWt ^B
Dos estanques de inercia de 500 L (debido a que no se encontraron en el mercado estanques de 150L)
Intercambiador de calor de placas
Instalación de tubería y bomba hidráulica en pozo
Construcción de sala de máquinas
Instalación de equipos y marcha blanca

Sistema de Distribución
Tres fan coils 4 vías (potencia >6,5 kW)
Termostatos y válvulas
Bomba de circulación
Instalación tuberías superficie

8 Ecogeo HTR B1 5-22 o similar.

5. Análisis económico

5.1. Cálculo CAPEX

A partir del trabajo específico de dimensionamiento desarrollado en la Sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para el proyecto en la escuela de Colonia Wilson, se procedió con la valorización en detalle de las distintas partidas de costo asociadas al proyecto, de tal manera de establecer el valor del CAPEX a nivel de ingeniería básica, corregido con respecto a la evaluación preliminar realizada con anterioridad en la asesoría (prefactibilidad). Se espera que este costo se encuentre más o menos entorno al 5% del costo final real del proyecto.

Para la valorización de las distintas componentes del proyecto, se consideraron las siguientes fuentes:

- **Índice de precios:** corresponde al precio de lista de equipamiento que debe importarse. El costo indicado considera el precio de compra, junto con la respectiva internación en el país correspondiente. Como referencia, se utiliza un índice de precios de Chile (GIZ, 2020), el cual se maneja en USD\$, y se actualiza por CPI a un valor 2022. Se establece que las condiciones de internación son similares entre Chile y Uruguay. Se refiere particularmente al costo de bombas de calor.
- **Local:** corresponde a precios locales típicos de Uruguay, levantados a partir de consultas directas realizadas por el equipo de Deuman. Se refiere principalmente a obras civiles y elementos estándares, que será posible encontrar directamente en el mercado uruguayo.
- **CEGA:** corresponde a homologaciones de costos de proyectos reales desarrollados por el CEGA en Chile, manejados directamente en USD\$. Se refiere particularmente al costo de equipamiento que se diseña a la medida y que debe mediar cotización directa para estimar un valor.

Con esto, se obtiene el detalle de CAPEX presentado en la Tabla 6.

Tabla 6. CAPEX a nivel de ingeniería básica del proyecto

Sistema	Partida de costo	Fuente	Valor [USD]	Comentarios
Sala de máquinas	Bomba de Calor Ecogeo HTR B1 5-22	Índice de precios	13.200	600 USD/kW
	Dos estanques 500 L	Local	1.000	500 USD c/u ⁹
	Intercambiador de placas	CEGA	3.094	Referencia proyecto similar tamaño CEGA: marca Alfa Laval modelo T5M-9.
	Instalación de tubería y bomba hidráulica en pozo	Local	700	500 USD (adquisiciones) ¹⁰ + 40% de costo equipo (instalación)
	Construcción de sala de máquinas	Local	16.200	Habitación de 3x3m ²

⁹ Con relación al equipo “tanque tricapa antibacteriano completo de 500 Litros” de la marca Gianni [\[Enlace\]](#). Nota: Se actualizarán los precios dependiendo del modelo y marca a utilizarse.

¹⁰ Con relación al equipo “Bomba Sumergible de 0.75 Hp Kit Completo Altura Máxima 61 mts” de la marca Gianni [\[Enlace\]](#). Nota: Se actualizarán los precios dependiendo del modelo y marca a utilizarse.

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Sistema	Partida de costo	Fuente	Valor [USD]	Comentarios
	Instalación sala de máquinas y marcha blanca	Local	5.280	40% de costo equipo
Sistema de Distribución	3 Fancoils 4 vías (6,5 kW o más)	Local	2.400	Fan-Coil: Modelo Design Inverter 33B ¹¹
	Termostatos y válvulas	CEGA	2.000	Referencia proyecto similar tamaño CEGA ¹²
	Bomba de circulación	CEGA	1.600	Referencia proyecto similar tamaño CEGA: Marca Wilo y modelo TOP RL 30,7,5 EM (3 bombas).
	Instalación tuberías superficie	CEGA	1.800	Referencia proyecto similar tamaño CEGA ¹³
TOTAL			47.274	

(*) Se considera un tipo de cambio USD\$/ CLP\$ de 750 CLP\$/USD\$.

El CAPEX determinado a nivel de prefactibilidad alcanzó aproximadamente USD\$ 30.400, lo que significa que el CAPEX revisado a nivel de ingeniería básica es un 56% más costoso con respecto a la evaluación en ámbito de prefactibilidad.

5.2. Cálculo del OPEX

Para el cálculo del OPEX de la bomba de calor geotérmica y el caso base se consideraron los siguientes parámetros y valores:

Tabla 7. Evaluación económica del proyecto - OPEX

Parámetro	Valor
Mantenimiento de la BCG [UYU\$/año]	602,2
Tipo de tarifa eléctrica	Residencial simple
Valor de tarifa eléctrica ajustada [UYU\$/kWh]	333
Incremento anual de la tarifa eléctrica (%)	0,87%
Incremento anual del costo de mantenimiento (%)	0,87%

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera, se puede comparar el costo de la energía eléctrica utilizada generado por la bomba de calor geotérmica y con el caso base (AC Split), donde la BCG al ser más eficiente generará ahorros económicos anual al ser un sistema con mayor eficiencia. La Tabla 8 proyecta los ahorros económicos anuales a lo largo de la vida útil del sistema.

¹¹ En relación con la marca CIR [Enlace]. Nota: Se actualizarán los precios dependiendo del modelo y marca a utilizarse.

¹² Piezas básicas de gasfitería que permiten medir el caudal y la temperatura de los fluidos. Cada empresa usa sus propios modelos y marcas. Se considera una referencia promedio.

¹³ El costo de los instaladores depende del tiempo a instalarse el equipo y es altamente variable respecto a Uruguay. Los materiales son tubos y adaptadores de polipropileno. Para llegar a más detalle, es necesario realizar una cotización con una empresa de climatización. Ellos son quienes definirán el diseño final en función de sus equipos.

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Tabla 8. Ahorros económicos anuales

Año de operación	Ahorro económico por operación del sistema (UYU\$)
1	24.217
2	26.273
3	28.540
4	30.988
5	33.647
6	36.538
7	39.673
8	43.080
9	46.779
10	50.795
11	55.156
12	59.891
13	65.033
14	70.617
15	76.680
16	83.263
17	90.412
18	98.174
19	106.603
20	115.755

Fuente: Elaboración propia.

De similar forma, el análisis desarrollado en la *Sección 3* también redimensionó la demanda del establecimiento educacional, mejorando el cálculo de carga térmica y agregando demanda de frío. La demanda determinada a nivel de prefactibilidad alcanzó un valor de 2.200 kWh/año, mientras que la demanda determinada a nivel de ingeniería básica (considerando requerimientos de calor y frío) alcanzó un valor de 3.195 kWh/año, lo que significa un aumento de demanda del 45% con respecto a la evaluación en ámbito de prefactibilidad.

En consideración de ambos antecedentes, el valor revisado de CAPEX, OPEX y de demanda anual, se procede a actualizar la evaluación económica del proyecto, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 9¹⁴.

Tabla 9. Actualización evaluación económica del proyecto

Caso	Evaluación a nivel de prefactibilidad	Evaluación a nivel de ingeniería básica
Tipo	Escuela rural	Escuela rural
CAPEX proyecto [USD\$]	30.400	47.274
CAPEX proyecto [UYU\$]	1.423.043	2.213.546
VAN [UYU\$]	-923.166	-552.137

¹⁴ Metodológicamente, la evaluación económica realizada en esta asesoría corresponde a un ejercicio de flujo de caja a 20 años, donde se computan los costos de inversión y se dimensionan los ahorros operacionales contra un caso base. Obtener un VAN positivo significa que el proyecto genera valor económico con respecto a dicho caso base.

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Caso	Evaluación a nivel de prefactibilidad	Evaluación a nivel de ingeniería básica
TIR [%]	-3,1%	0,11%
WACC de proyecto	6%	6%
Payback [años]	29	20
LCOE [UYU/kWh]	20	22
LCOE Caso Base [UYU/kWh]	11	11

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, si bien el resultado económico mejoró con respecto a la evaluación de prefactibilidad, el resultado total sigue presentando un VAN menor que cero, lo que significa que el proyecto no genera valor económico con respecto al caso base (mantener sistemas Split).

Al realizar un análisis de sensibilidad revisando tanto el CAPEX como la demanda, se constata que con una reducción de costo del 26% con respecto al CAPEX revisado, se obtiene un punto de *break-even*, lo que significa que para dicho valor de CAPEX (USD\$34.775) y manteniendo la demanda, el VAN del proyecto es cero y entonces se alcanza la indiferencia con respecto al caso base. Dicha reducción de costo podría alcanzarse, en la medida que el proceso de compra de equipos permita ofertas competitivas de proveedores y otras mejoras de eficiencia económica. Dicha reducción de costo también puede ser abordada el punto de vista del apoyo financiero, donde con un *grant* o fondo no reembolsable de aproximadamente USD\$ 12.500 también se logra el punto de indiferencia.

De forma similar, para el caso de la demanda, se constata que con un aumento de demanda del 67% con respecto a la demanda revisada, se obtiene un punto de *break-even*, lo que significa que para dicho valor de demanda (5.335 kWh/año) y manteniendo el CAPEX, el VAN del proyecto es cero y entonces también se alcanza la indiferencia con respecto al caso base. Dicho aumento en todo caso, no se ve factible de alcanzar, pues significaría más que duplicar la demanda, lo que significaría la ampliación de las instalaciones del colegio, proyecto que no se ve contemplado en esta etapa.

6. Beneficios socioambientales

S La implementación de proyectos de energía geotérmica contribuye, entre otras cosas, a la diversificación de la matriz energética nacional que, aunque al momento cuenta con 76% (MIEM, 2020) de producción por energías renovables, aún es un desafío para el país desarrollar nuevas formas de transformación y aprovechamiento de la energía proveniente de los recursos renovables.

La implementación de proyectos de geotermia en los diferentes sectores se alinea con 2 de las 6 transformaciones planteadas en el último Informe Nacional Voluntario (Presidencia de la República Oriental del Uruguay, 2021), específicamente las transformaciones que hacen referencia a la **industria sostenible y descarbonizada**, y **ciudades y pueblos sostenibles**, mediante las cuales se busca alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible: 7 (Energía asequible y no contaminante), 9 (Industria, innovación e infraestructura) y 11 (Ciudades y comunidades sostenibles).




A ellos, se le suma otros objetivos que la consultoría encuentra potencial en ser cumplidos con la asistencia técnica y al uso de la energía geotérmica de baja entalpía en el país, los cuales son presentados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Tabla 10 con las potenciales metas a cumplir como sus indicadores.

Tabla 10. ODS relacionados con la implementación de proyectos de energía geotérmica

ODS	Metas	Indicadores
	1.2 Reducir al menos a la mitad la proporción de personas que viven en la pobreza en todas sus dimensiones	1.2.2 Proporción de personas que viven en la pobreza, en todas sus dimensiones
	3.9 Reducir considerablemente el número de muertes y enfermedades causadas por la polución y contaminación del aire	3.9.1 Tasa de mortalidad atribuida a la contaminación de los hogares y del aire
	5.4 Reconocer y valorar los cuidados y el trabajo doméstico no remunerados	5.4.1 Proporción de tiempo dedicado al trabajo doméstico no remunerado, desglosada por sexo, edad y ubicación.
	7.1 Garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos 7.2 Aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas 7.3 Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética	7.1.2 Proporción de la población cuya fuente primaria de energía son los combustibles y tecnologías limpias 7.2.1 Proporción de energía renovable en el consumo final total de energía 7.3.1 Intensidad energética medida en función de la energía primaria y el PBI
	8.5 Lograr el empleo pleno y productivo y el trabajo decente	8.5.1 Ingreso medio por hora 8.5.2 Tasa de desempleo
	9.4 Modernizar la infraestructura de las industrias para que sean sostenibles, promoviendo la adopción de procesos industriales limpios	9.4.1 Emisiones de CO ₂ por unidad de valor añadido

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

ODS	Metas	Indicadores
	11.1 Asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles 11.6 Reducir el impacto ambiental negativo de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire	11.1.1 Proporción de la población urbana que vive en viviendas inadecuadas 11.6.2 Niveles medios anuales de partículas finas en suspensión en las ciudades
	12.2 Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de recursos naturales	12.2.1 Huella material en términos absolutos, per cápita y por PBI
	13.2 Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales	13.1.1 Número de países que han comunicado el establecimiento de una política, estrategia o plan que aumente su capacidad para adaptarse a los efectos adversos del cambio climático

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, la implementación de energía geotérmica se alinea con algunas de las líneas estratégicas mencionadas en la Política Nacional de Cambio Climático (Ministerio de Ambiente, 2017), mediante las que se busca hacer frente a los desafíos del cambio y la variabilidad climática en Uruguay. En la Figura 13 se presentan aquellas líneas que se relacionan con esta energía renovable.

Figura 13. Lineamientos a la Política Nacional de Cambio Climático



Fuente: Elaboración propia en base a República Oriental de Uruguay (2017).

En el caso específico, para la generación de sistemas de climatización los beneficios son múltiples como la reducción de emisión de gases contaminantes como compuestos sulfurados y nitrogenados, así como la reducción de material particulado, esto en comparación con otro tipo de métodos utilizados para sistemas de climatización como la generación de calor con leña. Del mismo modo, la implementación de estos nuevos sistemas implica una reducción en la emisión de gases efecto invernadero (GEI) teniendo en cuenta que las bombas de calor a emplear tienen una mayor potencia y eficiencia lo que reduce el consumo de energía eléctrica y por consiguiente la emisión de dichos gases (Santoyo, E. Barragán, R., 2010). En concordancia con lo anterior, la implementación de energía geotérmica en un mediano plazo significará una reducción significativa de los costos asociados al consumo de energía eléctrica comparado con otro tipo de sistemas de climatización como los aerotérmicos.

La implementación del sistema de climatización con energía geotérmica en la Escuela rural N° 76 presenta impactos positivos tanto en la dimensión ambiental, económica y social, los cuales se mencionan en la Tabla 11.

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Tabla 11. Beneficios identificados en la implementación del sistema de climatización con energía geotérmica

Dimensión	Componente	Indicador	Tipo de impacto	
			Negativo	Co-Beneficio
Ambiental	Cambio climático	Emisión de gases efecto invernadero CO ₂ eq		x
		Medidas de adaptación y resiliencia		x
Social	Educación y capacitación	Desarrollo profesional		x
		Servicios educativos		x
		Otros impactos en educación y capacitación		x
Económico	Bienestar social	Desarrollo comunitario y social		x
		Nivel de vida		x
	Consumo energético	Costos por servicio de energía		x
		Apropiación tecnológica	Cubrimiento de necesidades básicas	
	Uso de recursos locales			x
	Sostenibilidad			X
	Transferencia tecnológica		x	

Fuente: Elaboración propia.

6.1. Sociales

La escuela rural N° 76 de la Colonia Wilson cuenta con 60 niños que asisten a las 3 únicas aulas de clase que conforman el recinto escolar, comunidad estudiantil será la principal beneficiada por la implementación del sistema de climatización con geotermia. Además, se identifican como beneficiarios directos a los estudiantes de la Universidad de la República de Uruguay (UdelaR), específicamente de la Facultad de Ingeniería y específicamente del equipo técnico del proyecto cuyo centro experimental se ubica en inmediaciones de la escuela. En la Figura 14 se presentan los principales beneficios sociales que obtendrán los estudiantes por la implementación del nuevo sistema de climatización con energía geotérmica.

Figura 14. Beneficios sociales del proyecto



Fuente: Elaboración propia

Entendiendo la variabilidad climática que se presenta en la zona donde se pretende instalar el proyecto, uno de los beneficios más relevantes será la **prestación continua del servicio educativo** durante todo el año escolar puesto que todas las aulas contarán con un óptimo sistema de climatización que facilitará llevar a cabo todas las actividades de forma regular. Esto se explica porque, el sistema de climatización con aerotermia con el que actualmente cuenta la escuela extrae la energía del aire, el cual tiene marcadas fluctuaciones a lo largo de las diferentes estaciones e incluso a lo largo del día, por tanto, se ve afectado el rendimiento y la potencia de la bomba de calor especialmente en

periodos de bajas temperaturas. Por el contrario, un “sistema de climatización con energía geotérmica capturará de forma constante y estable la energía de la tierra, asegurando un rendimiento constante en todas las estaciones del año” (MINCOTUR, 2014).

Por lo mencionado, la continuidad en el acceso al servicio educativo contribuirá al aumento de la calidad de vida de la población estudiantil y por consiguiente asegurará el desarrollo de la sociedad, entendiendo que el acceso a la educación de calidad, desde un punto de vista de confort ambiental, es la base para mejorar el nivel de vida de una comunidad puesto que facilita el abastecimiento de herramientas y capacidades necesarias para el desarrollo de soluciones innovadoras a los problemas que de manera general impactan en la sociedad (CEPAL, s.f). Adicionalmente, contribuye al país a alinearse y alcanzar los Objetivo de Desarrollo Sostenible N° 4 y 7, descritos en la Figura 15.

Figura 15. ODS asociados a los beneficios en la comunidad estudiantil de la escuela rural



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, los estudiantes de la UdelaR podrán contar con un laboratorio piloto adicional, debido a la ampliación del montaje de la instalación térmica solar actualmente existente en el terreno de la escuela, facilitando la obtención de datos experimentales en tiempo real para el desarrollo de **posteriores investigaciones** asociadas a las energías renovables, intercambio térmico, entre otros. Adicionalmente, se espera el fomento de capacitaciones relacionadas con las energías limpias y renovables que garantice la **difusión del conocimiento**.

6.2. Ambientales

A. Reducción de emisiones GEI

Los principales beneficios ambientales que se asocian a la implementación del sistema de climatización se evidencian en el componente de cambio climático donde se favorece la reducción de emisiones de GEI asociados al consumo de energía eléctrica para el funcionamiento del sistema.

Para analizar dichas reducciones asociada a la implementación de un nuevo sistema de climatización con energía geotérmica, se presenta la comparación entre emisiones relacionadas con el consumo de energía eléctrica que presenta el sistema actual y el geotérmico que se propone implementar. La ecuación de cálculo de emisiones es igual al producto de demanda energética de cada sistema por el factor de emisión del SIN, tal como se evidencia en la Ecuación 1.

Ecuación 1. Cálculo de emisiones de CO₂

$$E_{CO_2} = C_p \times EF \times 10^{-6}$$

E_{CO_2} : Emisiones del sistema tonCO₂/KWh

C_p : Consumo o demanda energética en KWh

EF : Factor de emisión del SIN equivalente

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Tabla 12. Factor de emisión del SIN

Año	Factor de emisión (ton CO ₂ /GWh)
2019	13
2020	45

Nota: ton CO₂/GWh es igual a gCO₂/kWh. Fuente: Balance Energético Nacional (BEN) 2020.

Se presentan dos escenarios de análisis donde se evidencia la reducción de emisiones para el año 2019 (año base conservador) y 2020 (año base real). Inicialmente, se considera la demanda energética de cada uno de los sistemas de climatización expresada en kWh/año (Ver Tabla 13). Dicha demanda además de la energía necesaria para el funcionamiento de cada sistema considera las pérdidas de calor por superficies, por renovaciones de aire, ganancias de calor por radiación solar, por personas y equipos, las temperaturas de confort de calefacción y refrigeración y las pérdidas por ventilaciones de las instalaciones, presentadas en las secciones anteriores.

Tabla 13. Demanda energética en kWh/año para cada sistema de climatización

Sistema de climatización	Demanda energética (kWh/año)
Aerotérmico	3.195
Geotérmico	1.248

Fuente: Elaboración propia.

Luego, se efectuó el cálculo aplicando la Ecuación 1 en la cual se incluyeron los factores de emisión SIN basados en el Balance Energético Nacional (BEN) 2020, correspondientes para cada año evaluado. Así, los resultados obtenidos se evidencian en la Tabla 14.

Tabla 14. Reducción de emisiones de GEI por la implementación de energía geotérmica

Año	Sistema de climatización con aerotermia		Sistema de climatización con aerotermia		Reducción de emisiones [tonCO ₂]		
	Demanda [kWh/año]	Emisiones GEI [gCO ₂]	Demanda [kWh/año]	Emisiones GEI [gCO ₂ /kWh]	Reducción de emisiones [gCO ₂]	Reducción de emisiones [tonCO ₂]	Reducción de GEI [%]
2019	3.195	41.535,0	1.248	16.224	25.311,0	0,03	61%
2020	3.195	143.775,0	1.248	56.160	87.615,0	0,09	61%

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al año 2019, el escenario de emisión de GEI se calculó con un factor de emisión SIN de 13 gCO₂/kWh el cual es relativamente conservador respecto al comportamiento del consumo energético de Uruguay durante los últimos años. Sin embargo, el segundo escenario fue calculado con un factor de emisión SIN de 45 gCO₂/kWh el cual triplica el valor del año anterior, esto según el BEN en dicho año la energía eléctrica de origen hidro alcanzó a penas el 30% por la temporada seca, aumentando el uso de energía fósil y aumentando el factor de emisión. Por consiguiente, al efectuar el cálculo de emisiones se evidencia una mayor emisión de gases GEI en el segundo escenario y por tanto el valor de reducción de estos presenta un valor mayor en términos de tonCO₂ comparado con el primer escenario, sin embargo, para ambos casos el porcentaje de reducción de GEI es de 61% con la implementación del sistema de climatización con energía geotérmica de baja entalpía.

B. Otros beneficios

Por otro lado, otro beneficio que implicaría la sustitución del actual sistema aerotérmico por uno geotérmico involucra la **reducción de los niveles de presión sonora** asociados a los ventiladores que tienen los sistemas de aire acondicionado tipo Split. De acuerdo con Marzolf (2014) los sistemas de energía geotérmica solo producen ruido en el punto donde se localiza la bomba de calor y este nunca supera los 50 decibelios, pero en el lugar donde se suministra la climatización no se percibe ningún ruido proveniente del sistema instalado. Sin embargo, en la escuela la unidad de aire acondicionado se encuentra fuera de los salones como se evidencia en la Figura 16, de modo que dentro de estos no se percibe el ruido que generan, por lo cual el cambio de tecnología no debería afectar los niveles de presión sonora dentro de las aulas. Igual su importancia a considerar dentro de otros proyectos geotérmicos.

Figura 16. Ubicación del actual sistema de aire acondicionado en la escuela



Fuente: Fotografía del equipo técnico de la UdelaR.

Adicionalmente, otro beneficio que ofrece la implementación de la energía geotérmica es que no se produce contaminación por vertimientos en el recurso hídrico, aunque para el funcionamiento de los sistemas geotérmicos es necesario extraer determinado caudal de un acuífero, durante su paso por todo el sistema no recibe ninguna sustancia contaminante de modo que este fluido podría ser reinyectado de nuevo al acuífero para no afectar la disponibilidad hídrica del mismo (Flores, Rodríguez, & Wang, 2019), sin embargo, actualmente en Uruguay no se encuentra reglamentada la reinyección de caudales extraídos. Al ser este un proyecto piloto se espera que genere un espacio de investigación el cual contribuya a determinar el impacto que genere dichas reinyecciones y aporte a la formulación de una reglamentación nacional con base científica local.

6.3. Económicos

C. Consumo energético

La reducción del consumo energético representa un **beneficio de tipo económico**. Para 2022 el costo del kWh en Uruguay era de 0,15 USD¹⁵, lo que supone un gasto anual de \$479,25 USD en energía eléctrica por el uso del sistema de climatización aerotérmico, por otro el sistema geotérmico supondría un costo anual de \$187,20 USD, evidenciando una reducción del 61% en los costos por consumo energético. Cabe mencionar que el ahorro mencionado se evidencia a mediano plazo después de la implementación del nuevo sistema, dado que los costos de inversión iniciales son altos, de modo que

¹⁵ Tarifa General Simple según el Pliego Tarifario 2022.

es necesario evaluar opciones de financiamiento que reduzcan dichos costos y permitan obtener en un periodo relativamente corto el Payback de la inversión realizada, sin embargo, esto abordará con mayor precisión en el Producto 7. Por ejemplo, para promover la implementación de este tipo de proyectos el gobierno ofrece múltiples incentivos y beneficios tributarios regulados bajo el Decreto 268/020 los cuales son otorgados a los proyectos de inversión que generen energía a través de fuentes autóctonas y renovables, como también al desarrollo de investigaciones para la incorporación de conocimiento y tecnologías que incrementen la eficiencia energética en el país.

D. Transferencia tecnológica

La implementación de este nuevo sistema de climatización basado en energía geotérmica es un avance en el desarrollo de nuevas tecnologías apropiadas a nivel local, indicador importante en el marco del desarrollo sostenible de las comunidades. La implementación de este tipo de tecnologías permite la flexibilización de las tecnologías tradicionales, para incluir nuevos escenarios de participación comunitaria y aprendizaje que favorezcan la creación de soluciones y el empoderamiento de las comunidades para lograr alcanzar sus propios objetivos de desarrollo.

En este sentido, en el estudio *Appropriate technology – A comprehensive approach for water and sanitation in the developing world* (Murphy, McBean, & Farahbakhsh, 2009), se proponen algunos indicadores para evaluar la apropiación tecnológica de las nuevas tecnologías lo cual favorece el desarrollo de mecanismos para asegurar la transferencia tecnológica a otras generaciones o comunidades. Para el caso de la implementación del sistema de climatización con energía geotérmica, se encuentra que cumple con la mayoría de los parámetros propuestos en el estudio anteriormente mencionado (ver Tabla 15), asegurando la apropiación de la nueva tecnología a nivel local y del mismo modo favorecen la transferencia tecnológica de la misma.

Tabla 15. Revisión de parámetros de apropiación tecnológica

Parámetro	Cumplimiento	Descripción
Necesidades básicas	Sí	Asociándolo a la salud y el acceso continuo a la educación con una buena infraestructura (confort térmico).
Tecnología flexible	Sí	Facilidad con la que se podría implementar este sistema en otros lugares debido al aprovechamiento geotérmico de baja entalpía en cualquier superficie.
Uso de recurso locales	Sí	Aprovechamiento de la energía geotérmica que ofrece el acuífero Raigón.
Sostenibilidad	Sí	Bajo impacto ambiental de la tecnología, reducción de emisiones GEI, así como la comodidad para el mantenimiento y la duración útil de esta.
Inclusión de género	-	Deberá de asegurar la equidad de género respetando el Plan de género propuesto en el marco de la consultoría para cualquier tipo de proyecto, retribuyendo de oportunidades tanto a hombres y mujeres.
Participación comunitaria	Sí	Considerando el intercambio de conocimientos en el proyecto piloto en otras instancias, desde la academia, la comunidad rural y otros espacios que permitan implementar este tipo de proyectos.
Transferencia tecnológica		

Fuente: Elaboración propia basado en Murphy et al. (2009).

7. Conclusiones

En este trabajo a través de la cuantificación de cargas térmicas se corroboró que la potencia instalada, del orden de 21 kW, ya existente para climatización en las salas es suficiente para generar confort térmico en sus ocupantes. Por otra parte, por naturaleza del funcionamiento de una bomba de calor geotérmica, la cual tiene un elevado rendimiento o COP el que para el caso evaluado se estima que sea de 4,3; por lo que se espera una reducción del consumo eléctrico del sistema de climatización en un 61%.

En el sitio de estudio, las distribuciones granulométricas muestran un predominio de sedimentos tamaño arena muy gruesa a gruesa, con variaciones en el porcentaje de gravas y limo-arcillas, un contexto favorable para la extracción y reinyección de agua subterránea. El acuífero es altamente productivo para suplir la demanda de proyectos pequeños (<30 kWt). Sin embargo, se debe considerar la necesidad de utilizar más de un pozo para suplir el caudal mínimo requerido.

Al revisar el CAPEX y la demanda del proyecto al alero del dimensionamiento del proyecto, se obtiene que, si bien el CAPEX se encarece en un 56%, la demanda compensa creciendo en un 45%. Al llevar estos elementos a una nueva evaluación económica, se obtiene que el resultado económico mejora con respecto a la evaluación de prefactibilidad, aunque el resultado total sigue presentando un VAN menor que cero, lo que significa que, en estas condiciones, el proyecto no genera valor económico con respecto al caso base (mantener sistemas Split).

Es importante recalcar, que existe una dependencia directa del resultado económico con el CAPEX del proyecto, y que este valor tiene un par de posibilidades para mejora. De acuerdo con el análisis de sensibilidad realizado, se constata que con una reducción de costo del 26% con respecto al CAPEX revisado, se obtiene un punto de *break-even*, lo que significa que para dicho valor de CAPEX (USD\$34.775) y manteniendo la demanda, el VAN del proyecto es cero y entonces se alcanza la diferencia con respecto al caso base. Dicha reducción de costo podría alcanzarse, en la medida que el proceso de compra de equipos permita ofertas competitivas de proveedores y otras mejoras de eficiencia económica.

Dicha reducción de costo también puede ser abordada el punto de vista del apoyo financiero, donde con un *grant* o fondo no reembolsable de aproximadamente USD\$ 12.500 también se logra el punto de diferencia. Recogiendo, además, que los primeros proyectos cumplen un propósito demostrativo que estimula la replicabilidad, se ve que el monto indicado es posible de levantar localmente en Uruguay para el desarrollo de este proyecto.

En cuanto a los beneficios asociados a la implementación del proyecto en la Escuela rural N° 76, se identificó que los principales impactos positivos se reflejan en el componente ambiental, en la reducción de GEI de 0,09 tonCO₂ anuales considerando como año base el 2020, asociados a la disminución del consumo de energía eléctrica y por tanto en la mitigación del cambio climático en esta zona. Por otro lado, en el componente social se identificó como población beneficiada a los estudiantes de la escuela, quienes, por la implementación de un sistema de climatización de mayor rendimiento y estabilidad, podrán contar con mejores instalaciones que les permitan acceder al servicio educativo con regularidad durante todo el año escolar. Finalmente, es importante mencionar que el proyecto se encuentra alineado con varios ODS y con los compromisos adquiridos por Uruguay en términos de mitigación del cambio climático.

Agradecimientos

Al **equipo técnico de la Universidad de la República** del Uruguay: Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, y el Instituto de Estructuras y Transporte;

Dr. Ing. Pedro Galione, Msc. Ing. Federico González e Ing. Alfonso Flaquer.

Quienes postularon a la convocatoria de proyectos geotérmicos de baja entalpía en Uruguay, por compartir la información requerida y los resultados del proyecto “Acumulación estacional de energía solar en acuífero para acondicionamiento térmico”.

Referencias bibliográficas

- CEPAL. (s.f). *Comunidades CEPAL*. Obtenido de <https://comunidades.cepal.org/ilpes/es/taxonomy/term/4>
- Flores, J., Rodríguez, C., & Wang, D. (2019). *Situación actual y propuesta de mejorar para sistema de reinyección en central geotérmica de El Salvador*. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Obtenido de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/20791/1/Situaci%C3%B3n%20actual%20y%20propuesta%20de%20mejora%20para%20sistema%20de%20reinyecci%C3%B3n%20en%20Central%20Geot%C3%A9rmica%20de%20El%20Salvador%20-%20copia.pdf>
- Galione, P., González, F., Curto, P., Flaquer, A., Musso, M., & Leonardo, G. (2022). *Acumulación estacional de energía solar en acuífero para acondicionamiento térmico*. Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial. Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Instituto de Estructuras y Transporte. Universidad de la República, Uruguay.
- GIZ. (2020). *Índice de precios de bombas de calor aerotérmicas y geotérmicas en Chile*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.energia.gob.cl%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Findice-de-precios_bombas_de_calor_2020.pdf&clen=5683711&chunk=true
- Marzolf, N. C. (2014). *Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia*. Banco Interamericano de Desarrollo, División de Energía. Obtenido de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Emprendimiento-de-la-energ%C3%ADa-geot%C3%A9rmica-en-Colombia.pdf>
- MIEM. (2020). *Balance Energético Nacional 2020*. Planificación Estadística y Balance (PEB) de la Dirección Nacional de Energía (DNE), Uruguay. Obtenido de <https://ben.miem.gub.uy/descargas/1balance/1-1-Libro-BEN2020.pdf>
- MINCOTUR. (2014). *Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para producción de calor en edificios*. Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España, Madrid, España. Obtenido de https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/Otros%20documentos/Prestaciones_Medias_Estacionales.pdf
- Ministerio de Ambiente. (2017). *Política Nacional de Cambio Climático*. Obtenido de https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Politica_CC_1.pdf
- Murphy, H. M., McBean, E. A., & Farahbakhsh, K. (2009). Appropriate technology – A comprehensive approach for. *Technology in Society*, 32. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160791X0900030X>
- Presidencia de la República Oriental del Uruguay. (2021). *Objetivos de Desarrollo Sostenible - Informe Nacional Voluntario Uruguay 2021*. Montevideo. Obtenido de

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/283682021_VNR_Report_Uruguay.pdf

Santoyo, E. Barragán, R. (Abril de 2010). Energía geotérmica. *Revista Ciencia*, 40-51. Obtenido de https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaGeotermica.pdf

Anexos

Anexo 1. Cálculo de cargas térmicas y demanda energética

El cálculo de cargas térmicas y demanda energética se realiza en base a un balance energético que toma en consideración:

- Pérdidas de calor por superficies (Q_c): muros, techos, suelos, ventanas.
- Pérdidas de calor por renovaciones de aire (Q_v): infiltraciones y ventilaciones.
- Ganancias de calor por radiación solar (Q_s): directa y difusa.
- Ganancias de calor por personas y equipos (Q_i).

A. Cálculo para los sistemas de calefacción

Para el cálculo de cargas y demanda de calefacción se consideran Q_c , Q_v y Q_i . No se consideran las Q_s y por consiguiente se sobredimensiona el sistema. Para el cálculo de refrigeración se consideran las 4 componentes mencionadas. El cálculo de cargas térmicas y demanda energética de calefacción se realiza según las ecuaciones Ecuación 2 y Ecuación 3, respectivamente.

Ecuación 2. Cálculo de cargas térmicas para calefacción

$$\dot{Q}_{cal} = (\sum_i U_i \cdot A_i + \dot{m}_{aire} \cdot c_{p\ aire}) \cdot (T_{confort} - T_{min\ amb}) - \dot{Q}_i$$

Ecuación 3. Cálculo de demanda energética para calefacción

$$Q_{cal\ m} = ((\sum_i U_i \cdot A_i + \dot{m}_{aire} \cdot c_{p\ aire}) \cdot (T_{confort} - \bar{T}_{amb\ m}) - Q_{im}) \cdot h_m$$

Donde:

- U_i es la transmitancia térmica de cada elemento de la envolvente térmica
- A_i es el área superficial de cada elemento de la envolvente térmica
- \dot{m}_{aire} corresponde al caudal másico del aire de renovación
- $c_{p\ aire}$ es el calor específico del aire a temperatura y presión estándar. Se considera un valor de 1 kJ/kgK.
- $T_{confort}$ la temperatura de confort dentro del recinto, para calefacción se establece en 21°C
- $T_{min\ amb}$ temperatura media mensual mínima en el año del ambiente. Para Colonia Wilson se considera el mes de Julio con una temperatura media mensual mínima de 6°C.
- $\bar{T}_{amb\ m}$ corresponde a la temperatura media mensual del mes a evaluar la demanda energética.
- Q_i corresponde a las ganancias internas, principalmente por personas dentro del recinto.
- h_m corresponde a las horas mensuales de uso del inmueble.

Los valores de U_i y A_i se muestran a continuación:

Tabla 16. Valores del área superficial de cada elemento de la envolvente térmica

Elemento de la envolvente térmica	Valor	Unidad
Superficie piso	141,4	[m2]
Volumen salones	388,7	[m3]
Superficie muro	122,5	[m2]
Superficie ventanas	21,6	[m2]
Superficie techumbre	141,4	[m2]

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

perímetro Piso	52,4	[m]
----------------	------	-----

Tabla 17. Valores de transmitancia térmica de cada elemento de la envolvente térmica

Elemento de la envolvente térmica	Valor	Unidad
UA muro	212,4	[W/K]
UA ventanas	58,4	[W/K]
UA techumbre	256,4	[W/K]
KP Piso	85,4	[W/K]

Luego,

$$\sum U_i \cdot A_i = 612,6 \left[\frac{W}{K} \right]$$

Respecto a \dot{m}_{aire} , se utilizó las recomendaciones del estándar DIN1946, el cual menciona que es saludable tener una renovación mínima de $50 \frac{m^3}{h}$ por estudiante. Considerando 60 estudiantes en el recinto y normalizando por el volumen del recinto se tiene que es necesaria una renovación de 7,7 ACH.

Sobre las ganancias internas, se considera que cada estudiante aporta 80 W térmicos. Por consiguiente, la ganancia interna total es de 4.800 W. En términos energéticos, se considera este aporte térmico en conjunto con las horas de uso del inmueble. Luego, la energía térmica aportada mensual por los estudiantes es de $480 \frac{kWh}{mes}$.

La Tabla 18 muestra los valores de carga y ganancia térmica por componente y total del caso calefacción, mientras que la

Tabla 19 muestra las demandas energéticas mensuales para el caso de calefacción.

Tabla 18. Valores de carga y ganancia térmica para la calefacción

Carga	Valor	Unidad
Carga térmica conducción	9.188	[W]
Carga térmica renovación	15.000	[W]
Ganancia térmica internas	-4.800	[W]
Carga térmica calefacción	19,39	[kW]

Tabla 19. Demandas energéticas mensuales para la calefacción

Mes	Factor mensual	Energía calefacción [kWh]
Enero	0	-
Febrero	0	-
Marzo	1	-
Abril	1	165
Mayo	1	810
Junio	1	1.294
Julio	0,5	647
Agosto	1	971

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Septiembre	0,84	680
Octubre	1	326
Noviembre	1	-
Diciembre	0,75	-
Sumatoria		4.894

El factor mensual que se introduce corresponde a la corrección de horas de uso, sobre la base de 100 horas. En Julio se tiene 2 semanas de vacaciones, en septiembre días de turismo y en diciembre 1 semana de vacaciones.

B. Cálculo para los sistemas de refrigeración

El cálculo de cargas térmicas y demandas energéticas mensuales para el caso de refrigeración se realiza según las Ecuación 4 y Ecuación 5, respectivamente.

Ecuación 4. Cálculo de cargas térmicas para refrigeración

$$\dot{Q}_{ref} = \left(\sum_i U_i \cdot A_i + \dot{m}_{aire} \cdot c_{p\ aire} \right) \cdot (T_{m\acute{a}x\ amb} - T_{confort}) + \dot{Q}_{sol\ ver} + \dot{Q}_{i\ m}$$

Ecuación 5. Cálculo de demandas energéticas para refrigeración

$$Q_{ref\ m} = \left[\left(\sum_i U_i \cdot A_i + \dot{m}_{aire} \cdot c_{p\ aire} \right) \cdot (\bar{T}_{amb\ m} - T_{confort}) + \dot{Q}_{sol\ m} + \dot{Q}_{i\ m} \right] \cdot h_m$$

Donde:

- $T_{m\acute{a}x\ amb}$ es la temperatura media mensual máxima en el año. Para Colonia Wilson se considera el mes de enero con una temperatura media mensual máxima de 30°C.
- $T_{confort}$ es la temperatura de confort al refrigerar el recinto. Se establece en 24°C.
- $\dot{Q}_{sol\ ver}$ corresponde a la carga térmica solar en verano.
- $\dot{Q}_{sol\ m}$ Corresponde a la carga térmica solar mensual. Se calcula según la Ecuación 5.

Las ganancias solares (o cargas para el caso de refrigeración) mensuales se estiman en base al procedimiento que se muestra en *RETScreen International 2005. Ground-source Heat Pump Project Analysis*, el cual entrega una formula empírica según distintos factores, entre ellos la latitud de donde está ubicado el recinto y la superficie de elementos translucidos (ventanas).

Ecuación 6. Cálculo de ganancias solares

$$\dot{Q}_{sol\ m} = M \cdot (\bar{T}_{amb\ m} - T_{m\acute{i}n\ amb}) + \dot{Q}_{sol\ inv}$$

Donde:

- $\dot{Q}_{sol\ inv}$ corresponde a la carga térmica solar en invierno.
- M corresponde al factor que relaciona las temperaturas medias máximas y mínimas mensual en el año y las cargas térmicas solar de verano e invierno. Se calcula según la Ecuación 7.

Ecuación 7. Factor M

$$M = \frac{\dot{Q}_{sol\ ver} - \dot{Q}_{sol\ inv}}{T_{m\acute{a}x\ amb} - T_{m\acute{i}n\ amb}}$$

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Las cargas térmicas solar de verano e invierno se calculan según (7) y (8) respectivamente.

Ecuación 8. Cargas térmicas solar de verano (superior) e invierno (inferior)

$$\dot{Q}_{sol\ ver} = 0,0108 \cdot A_{ventana} \cdot (0,86\varphi^2 - 33,9\varphi + 10.955)$$

$$\dot{Q}_{sol\ inv} = 0,0038 \cdot A_{ventana} \cdot (-1,55\varphi^2 + 2,97\varphi + 12.369)$$

Donde:

- φ Es la latitud a la cual se encuentra el recinto. Se utiliza 34,72 sur.

Las variables calculadas para la carga térmica de refrigeración se muestran en la Tabla 20. Mientras que la Tabla 21 muestra la demanda energética de frío en el año y la carga solar media mensual.

Tabla 20. Variables calculadas para la carga térmica de refrigeración

Refrigeración		
M solar	68,8	[W/K]
Carga solar invierno	872,5	[W]
Carga solar verano	2.524,6	[W]
Carga térmica conducción	3.675,4	[W]
Carga térmica renovación	6.000,0	[W]
Carga térmica ganancias internas	4.800,0	[W]
Carga térmica Refrigeración	17,0	[kW]

Tabla 21. Demanda energética de frío en el año

Mes	Factor mensual	Carga solar mensual media [W]	Energía refrigeración [kWh]
Enero	0	2.111,6	-
Febrero	0	2.042,8	-
Marzo	1	1.905,1	187
Abril	1	1.629,7	-
Mayo	1	1.354,4	-
Junio	1	1.492,1	-
Julio	0,5	1.492,1	-
Agosto	1	1.629,7	-
Septiembre	0,84	1.698,6	-
Octubre	1	1.905,1	-
Noviembre	1	2.111,6	-
Diciembre	0,75	2.318,1	292
Sumatoria			479

Anexo 2. Cálculo sistema de climatización

En primer lugar, se define que el sistema de distribución a evaluar corresponde a fancoils (o radiadores de convección forzada). La temperatura de operación del fancoil es de 55°C y 5°C para calefacción y refrigeración respectivamente.

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Luego, se considera que se utiliza un sistema de colector vertical abierto (que extrae agua del acuífero Raigón). La temperatura medida del acuífero es de 18°C. Sin embargo, para la evaluación del sistema de climatización, se calcula para una temperatura de fuente de 16°C. Esto se da debido que se configura el sistema de tal forma que hay un intercambiador de calor de placas entre el circuito de tuberías del acuífero y del que recepciona la bomba de calor, con la finalidad de aumentar la vida útil al lograr manejar de mejor manera el agua que ingresa a la bomba de calor.

Teóricamente se puede calcular el Coeficiente de Rendimiento (COP) y el Factor de eficiencia energética (EER), para calefacción y refrigeración respectivamente, según las ecuaciones (9) y (10).

Ecuación 9. Cálculo del COP (superior) y del EER (inferior)

$$COP = \eta \cdot \frac{T_{dist,c} + 273}{T_{dist,c} - T_{fuente}}$$
$$EER = \eta \cdot \frac{T_{dist,r} + 273}{T_{fuente} - T_{dist,r}}$$

Donde:

- $T_{dist,c}$ corresponde a la temperatura del sistema de distribución para calefacción.
- $T_{dist,r}$ corresponde a la temperatura del sistema de distribución para refrigeración.
- T_{fuente} es la temperatura de la fuente.
- η corresponde a un factor de eficiencia real de los sistemas que se basan en el ciclo de Carnot. Para el caso de las bombas de calor, este factor varía entre 0,3 y 0,7. Actualmente, para una buena bomba de calor este valor se sitúa entre 0,5 y 0,6. En el caso de este estudio se realizó una estimación de este factor según los valores de la hoja de dato de la bomba de calor ECOGEO 5-22 de EcoForest. Se estima un valor de 0,56.

En consecuencia, se obtiene un COP de 4,7 y un EER de 14,2. En ese sentido, se obtiene que la potencia de la bomba de calor es de 4,1 kW eléctricos para satisfacer una carga térmica de calefacción de 19,4 kW.

Si se considera además que: $COP = \frac{\text{Calor entregado}}{\text{Energía consumida}}$ y $EER = \frac{\text{Calor extraído}}{\text{Energía consumida}}$ en términos energéticos, se puede calcular la demanda de energía eléctrica de la bomba de calor para climatización, los cuales se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22. Demanda de energía eléctrica de la bomba de calor para climatización

Tipo de colector Vertical Abierto geotérmico:		
Mes	Calefacción [kWh]	Refrigeración [kWh]
Enero	-	-
Febrero	-	-
Marzo	-	13
Abril	35	-
Mayo	172	-
Junio	275	-
Julio	137	-
Agosto	206	-

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

Septiembre	144	-
Octubre	69	-
Noviembre	-	-
Diciembre	-	21
Total Anual	1.039,1	33,8
Total Anual Ambos	1.072,9	

Por otra parte, se calcula el caudal másico necesario del pozo según la Ecuación 10.

Ecuación 10. Caudal másico necesario del pozo

$$\dot{m}_{cal} = \dot{Q}_{cal} \cdot \frac{(COP - 1)}{COP} \cdot \frac{1}{c_{p\ H_2O} \cdot \Delta T_{H_2O}}$$

$$\dot{m}_{ref} = \dot{Q}_{ref} \cdot \frac{(EER + 1)}{EER} \cdot \frac{1}{c_{p\ H_2O} \cdot \Delta T_{H_2O}}$$

Donde:

- \dot{Q}_{cal} es la carga térmica de calefacción
- \dot{Q}_{ref} es la carga térmica de refrigeración
- $c_{p\ H_2O}$ es el calor específico del agua, se utiliza un valor de $4,81 \frac{kJ}{kgK}$
- ΔT_{H_2O} El salto de temperatura experimentado por el flujo de agua en el paso de la bomba de calor. Se calcula para un valor de 4 °C.

Por otra parte, es necesario estimar la potencia y consumo eléctrico de la bomba hidráulica de pozo. Se estima según la Ecuación 11.

Ecuación 11. Potencia y consumo eléctrico de la bomba hidráulica de pozo

$$W_p = \frac{\dot{m}_w \cdot h \cdot g}{\eta_p}$$

Donde:

- \dot{m}_w caudal másico necesario del pozo, se escoge el mayor entre calefacción y refrigeración
- h es la estimación de suma de las alturas a levantar por la bomba hidráulica: profundidad de pozo, NPSH mínimo requerido, pérdidas estimadas.
- η_p es la eficiencia estimada de la bomba hidráulica. Se utiliza un valor de 0,6.

Producto 6: Análisis de factibilidad para el desarrollo de un proyecto geotérmico de baja entalpía

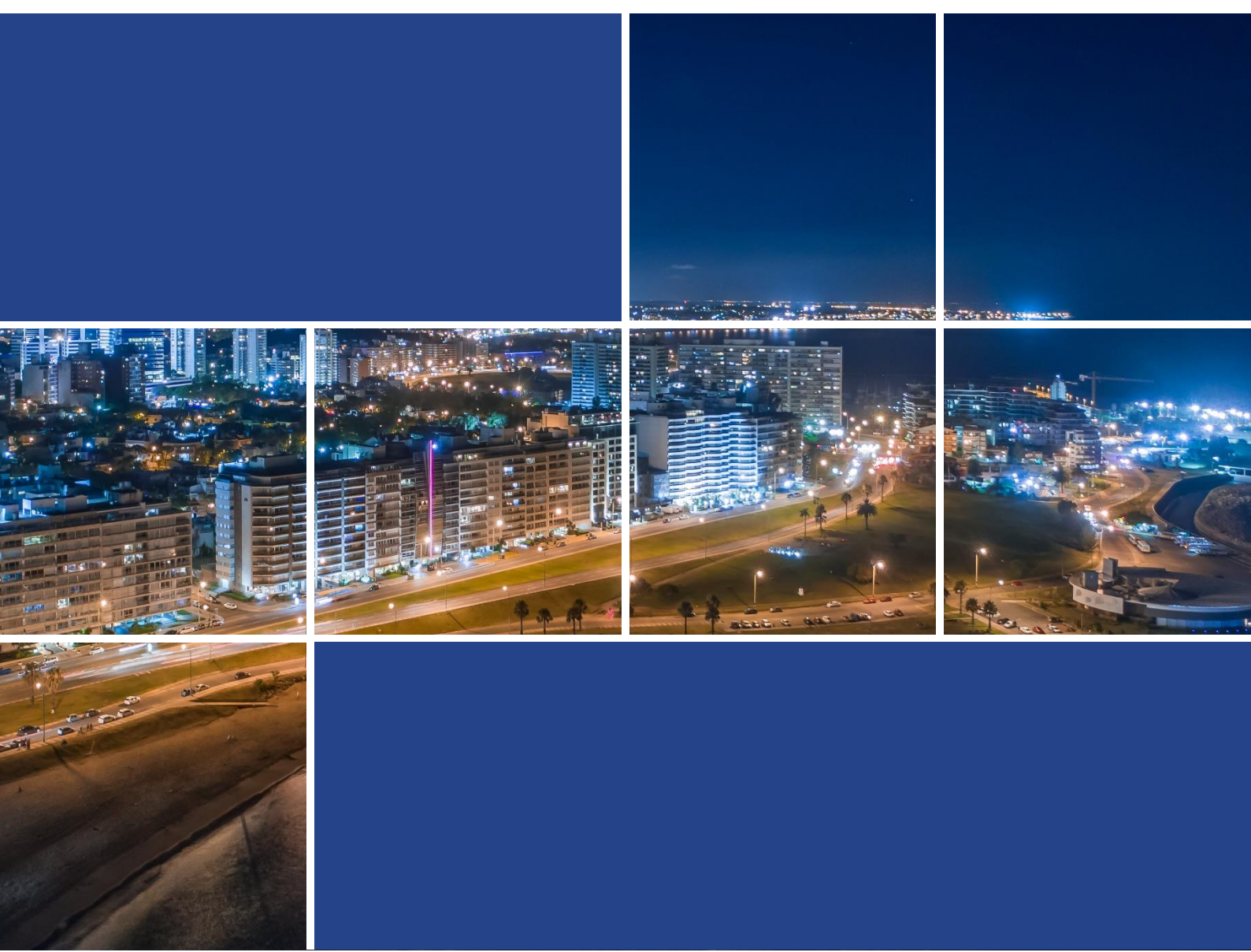
Elaboración de una hoja ruta nacional para el uso de energía geotérmica de baja entalpía para el acondicionamiento térmico en los sectores residencial, industrial y comercial en Uruguay

La siguiente tabla resume las variables utilizadas y estimadas para el colector abierto.

Variabes	Valor	Unidad
Diferencia de temperatura del agua	4	[C]
Calor específico del agua	4.180	[J/kgK]
Flujo masico agua calefacción	0,91	[kg/s]
Flujo masico agua refrigeración	1,09	[kg/s]
Profundidad del acuífero	25	m
Altura mínima req NPSH	2	m
Pérdidas estimadas	0,1	m
eficiencia bomba	0,6	
Potencia bomba pozo	482	W
Consumo bomba pozo	135	kWh/año

Por otra parte, se considera una estimación de la potencia de las bombas hidráulicas de distribución en 250 W y un consumo eléctrico anual de 70 kWh/año.

Finalmente, considerando bomba de calor, bomba hidráulica de pozo y bombas hidráulicas de distribución, la potencia eléctrica total del sistema es de 4,8 kW y el consumo anual de energía eléctrica es de 1.278 kWh/año. Estos valores indican que se obtiene un COP global de 4,0.



DEUMAN

www.deuman.com