

## **DISEÑO DE INTERCAMBIADOR TIERRA-AIRE, PARA UNA VIVIENDA TIPO EN LA CIUDAD DE CONCEPCIÓN**

*N. Barrera Aguayo<sup>1</sup>, F. González Monsalve<sup>2</sup>, C. Correa Rogel<sup>3</sup>*

### **1. RESUMEN**

Los intercambiadores de calor tierra-aire, mejor conocidos como pozos canadienses o pozos provenzal, consiste en un sistema de acondicionamiento pasivo y sustentable. Históricamente el uso de la energía geotérmica data de la prehistoria, ocupados en cuevas, en donde al interior de estas las condiciones climáticas eran mucho más favorables y agradables para el ser humano.

Este sistema funciona a través de ductos enterrados por el cual fluye el aire exterior al interior de la vivienda o edificio que se quiera calefaccionar. El sistema ocupa la energía geotérmica del suelo, ayudando así a disminuir la temperatura del aire que ingresa en la vivienda y en épocas de fríos ayuda a aumentar la temperatura, generando una menor demanda para la climatización o calefacción del lugar.

En los últimos años con la búsqueda de nuevas energías sustentables, se ha estado intensificado la implementación de este sistema tanto en edificios públicos como hoteles, escuelas y en invernaderos, ya que permite ahorrar más de 45% de la demanda energética (Brunat & Escuer, 2010).

El sistema también se destaca por requerir de un mantenimiento mínimo durante el año, además de requerir un bajo costo para su implementación en comparación con otros sistemas de climatización.

En el presente trabajo se busca realizar un programa que modele los pozos canadienses para poder ver el comportamiento que tiene bajo distintas condiciones (climáticas, suelos, etc.) y ser de ayuda para elegir la opción más favorable para las condiciones deseadas.

<sup>1</sup>Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, [nbarreraa@ing.ucsc.cl](mailto:nbarreraa@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup>Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, [fgonzalez@ucsc.cl](mailto:fgonzalez@ucsc.cl)

<sup>3</sup>Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, [claudiocorrea@ucsc.cl](mailto:claudiocorrea@ucsc.cl)

## **2. ABSTRACT**

The ground-air heat exchangers, better known as Canadian wells or Provençal wells, consist of a passive and sustainable conditioning system. Historically, the use of geothermal energy dates back to prehistory, occupied in caves, where inside these climatic conditions were much more favorable and pleasant for human beings.

This system works through buried ducts through which the outside air flows into the home or building that you want to heat. The system will occupy the geothermal energy of the ground, thus helping to reduce the temperature of the air that enters the house and in cold seasons it helps to increase the temperature, generating less demand for air conditioning or heating of the place.

In recent years, with the search for new sustainable energies, the implementation of this system has been intensifying both in public buildings such as hotels, schools and greenhouses, since it saves more than 45% of energy demand (Brunat & Escuer, 2010).

The system also stands out for requiring minimal maintenance during the year, in addition to requiring a low cost for its implementation compared to other air conditioning systems.

In the present work, we seek to carry out a program that models Canadian wells in order to be able to see their behavior under different conditions (climate, soil, etc.) and be of help in choosing the most favorable option for the desired conditions.

### 3. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo de investigación se busca realizar un programa que modele el intercambiador de calor tierra-aire para poder ver el comportamiento que tiene bajo distintas condiciones a través de ingreso de variables como será la longitud del sistema, profundidad a la que se dispondrá, caudal entre otros parámetros más. y ser de ayuda para elegir la opción más favorable para la implementación del sistema según las condiciones.

Las características principales de este tipo de sistema es que, en comparación con otros sistemas climatización o calefacción, el costo de implementación y mantención es mucho menor. Otra gran ventaja es la reducción del salto térmico entre la temperatura ambiente exterior e interior, por lo que se requiere una menor demanda energía para alcanzar la temperatura de confort.

El objetivo de la realización de este programa es que sirva de ayuda para ver y analizar cómo será el comportamiento del sistema, según la condición a la que estará sometido y a su vez ver si es factible la aplicación de este.

### 4. OBJETIVOS

#### 4.1. Objetivos generales

- Diseñar un intercambiador tierra-aire para una vivienda tipo, ubicada en la ciudad de Concepción.

#### 4.2. Objetivos específicos

- Determinar o identificar característica del terreno (tipo de suelo, conductividad, etc.).
- Modelar intercambiador.

### 5. MARCO TEÓRICO

#### 5.1. Coeficiente de transferencia térmico entre el subsuelo y el aire al interior de la tubería.

Se define un parámetro  $U$ , adimensional que relaciona los efectos de la transferencia de calor entre el flujo de aire y la tierra, teniendo en consideración los factores geométricos de la tubería, profundidad y conductividad térmica del suelo (Albers,1991)

$$[F1] \quad U = 2\pi \frac{\lambda}{U_L} \frac{1}{\ln\left(\frac{S_0}{R_0} + \sqrt{\left(\frac{S_0}{R_0}\right)^2 - 1}\right)}$$

$U_L$  : Coeficiente de transferencia de calor por longitud de la pared de la tubería entre el aire a granel y la pared [W/m K].

$S_0$  : Profundidad de implementación [m].

$R_0$  : Radio de la tubería [m].

$\lambda$  : Conductividad térmica del suelo [W/m K].

### 5.1.1. El coeficiente de transferencia de calor por longitud ( $U_L$ )

El coeficiente de transferencia de calor por longitud de tubería, en la cuales se recomienda ocupar tuberías que tengan el menor espesor posible, para que solo dependerán del coeficiente de transferencia de calor ( $h_i$ ) en la pared interna del ducto (Benkert, Heidt & Schöler, 1997).

$$[F2] \quad U_L = 2\pi \cdot R_0 \cdot h_i$$

$h_i$  : Coeficiente de transferencia de calor en la pared interior de la tubería [ $W/m^2 K$ ].

### 5.1.2. El coeficiente de transferencia de calor en la pared interior de la tubería ( $h_i$ )

El coeficiente de transferencia de calor en la pared interior de la tubería va a depender del radio de la tubería, propiedades del aire y la transmisión de calor con respecto a una superficie según el tipo de flujo (Benkert et al, 1997; Tibabisco,2018)

$$[F3] \quad h_i = \frac{\lambda_{A,P} Nu}{2R_0}$$

$Nu$  : Número de Nusselt, adimensional.

$\lambda_{A,P}$  : Conductividad térmica del aire en el tubo [ $W/m K$ ].

$R_0$  : Radio de la tubería [ $m$ ].

### 5.1.3. Número de Nusselt ( $Nu$ ).

Este valor proviene del número de Reynolds por lo cual está estrechamente relacionado a las condiciones de flujo a la que está sometido, para los flujos turbulentos V. Gnielinski ofrece la siguiente aproximación (Benkert, Heidt & Schöler, 1997).

$$[F4] \quad Nu = 0.0214 \cdot (Re^{0.8} - 100) \cdot Pr^{0.4}$$

$Pr$  : Numero de Prandtl, adimensional.

### 5.1.4. Numero de Reynolds ( $Re$ ).

Este parámetro se ocupa para determinar el comportamiento del flujo y va a depender del radio del ducto además de la viscosidad cinemática y velocidad del flujo.

$$[F5] \quad Re = \frac{V_{A,P} \cdot 2 \cdot R_0}{\nu_{A,P}}$$

$\nu_{A,P}$  : Viscosidad cinemática del aire en la tubería [ $m^2/s$ ].

$V_{A,P}$  : Velocidad del flujo [ $m/s$ ].

## 5.2. Temperatura del suelo ( $T_{E,0}(z)$ )

Para la determinación de la temperatura del suelo, con profundidades que se vean afectados por factores climáticos (< 20m) se ocupa la función sinusoidal (Zenteno, 2013).

$$[F6] \quad T_{E,0}(z) = T_m + (T_{m\acute{a}x} - T_m) \cdot e^{-\xi} \cos \left( 2\pi \frac{t}{t_0} - \xi \right)$$

$T_m$  : Temperatura media anual del ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$T_{m\acute{a}x}$  : Temperatura máxima anual del ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$t$  : Tiempo de medición anual [s].

$t_0$  : Duración del año [s] [ 1 año  $\approx 31.5 \times 10^6$  s].

Se debe tener en cuenta que para ocupar la ecuación  $T_{E,0}(z)$  se está considerando que el suelo es homogéneo e inalterado.

### 4.2.1 Parámetro para la profundidad térmica ( $\xi$ ).

Corresponde a un parámetro adimensional que depende de los factores de profundidad y las capacidades térmicas del suelo donde se implementará.

$$[F7] \quad \xi = S_0 \sqrt{\frac{\pi \rho_c}{t_0 \lambda}}$$

$S_0$  : Profundidad de implementación [m].

$\rho_c$  : Capacidad calorífica volumétrica del suelo [ $\text{J}/\text{m}^3 \text{K}$ ].

$\xi$  : Parámetro adimensional para la profundidad térmica de la tubería.

$t_0$  : Duración del año [s] [ 1 año  $\approx 31.5 \times 10^6$  s].

## 5.3. Temperatura del suelo corregida.

Para tener una mayor precisión en la determinación de la temperatura se deben hacer unas modificaciones debido a que al momento de instalar los ductos el suelo se ve alterado por lo cual la temperatura se ve afectada, para determinar la temperatura real que va a tener se emplea la siguiente ecuación.

$$[F8] \quad T_{E,W} = \frac{U \cdot T_{E,0} + T_{A,P}}{U + 1}$$

$T_{E,W}$  : Temperatura de la tierra en la pared de la tubería [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$T_{A,P}$  : Temperatura del aire en el interior de la tubería [ $^{\circ}\text{C}$ ].

$T_{E,0}(z)$  : Temperatura del terreno en la profundidad  $z$  [ $^{\circ}\text{C}$ ].

#### 5.4. Flujo de calor

Ecuación para obtener la transferencia de calor realizados en entre el tubo y el aire que circula en él, considerando que en cada segmento se mantiene la temperatura constante al interior y que el cambio solo ocurre en el extremo del segmento.

*“De las leyes de conservación para el transporte de calor se deduce que, para tuberías con paredes delgadas con capacidad de almacenamiento de calor insignificante, el flujo de calor entre el suelo y la tubería es igual al flujo de calor a través de la pared de la tubería e igual al flujo de calor entre la tubería pared y el aire en la tubería”* (Benkert, Heidt & Schöler, 1997).

$$[F9] \quad \dot{Q}_W = \Delta z \cdot U_L \cdot (T_{E,W} - T_{A,P})$$

$\dot{Q}_W$  : Flujo de calor que se transmite desde el suelo hasta el aire de la tubería [W].

$\Delta z$  : Longitud del segmento [m].

#### 5.5. Intercambio de calor.

Ecuación para determinar la temperatura del aire según el intercambio de calor en cada segmento por medio de la capacidad calorífica del aire [4].

$$[F10] \quad T_{A,P,f} = \frac{\rho_A C_A \cdot \dot{V}_{A,P} \cdot T_{A,P,i} + \dot{Q}_W}{\rho_A C_A \cdot \dot{V}_{A,P}}$$

$T_{A,P,f}$  : Temperatura del aire en la tubería al salir del segmento [°C].

$\rho_A C_A$  : Capacidad calorífica volumétrica del aire [J/m<sup>3</sup> °C].

$T_{A,P,i}$  : Temperatura del aire en la tubería al ingresar del segmento [°C].

$\dot{V}_{A,P}$  : Caudal que pasa por la tubería [m<sup>3</sup>/s].

### 6. RECOMENDACIONES TÉCNICAS.

Diversas investigaciones han estudiado la aplicación de este sistema de los cuales las conclusiones más importantes que se pueden extraer son (Escuer, 2012).

#### 6.1. Material de los ductos

- Se recomienda implementar tubos de PVC o HDPE, por su fácil acceso a ellos, además de ser un material económico en comparación con otros, además de ser lo suficientemente liso para facilitar la limpieza, otro factor para tener en cuenta es que el material tiene que ser lo suficientemente resistente para soportar las cargas de confinamiento a la que estará sometido y a la corrosión.

#### 6.2. Dimensionado del sistema.

- La temperatura que ingresa a la vivienda o zona que se quiera climatizar depende en gran medida de la temperatura ambiente exterior que ingresa al sistema.
- A mayores profundidades de implementación mayor es el rendimiento, por lo que se recomienda que la implementación sea a una profundidad mínima de 3 metros bajo el nivel del suelo.
- La longitud óptima del sistema se encuentra en un rango de 10 a 100 metros.

### 6.3. Suelo

- El factor más importante es la conductividad térmica del terreno, de esto depende todo el dimensionado del sistema.
- Los suelos con un porcentaje de humedad, pero sin alcanzar los extremos son preferibles.
- Se requiere de un informe geológico en el cual tiene que incluir un mapa geológico, con sus perfiles estratigráficos, estimación de la temperatura media anual en el suelo, estimaciones de los valores de conductividad y difusividad térmica del terreno, una estimación de la posición y características del nivel freático y flujo de agua subterráneo.

## 7. FUNCIONAMIENTO

### 7.1. Paso 1.

Se requiere determinar el volumen que se quiere climatizar para poder determinar el caudal requerido que debe de ingresar al sistema, para esto se debe tener en cuenta las renovaciones del aire mínimo para mantener los valores admisibles de contaminantes como el CO<sub>2</sub> que, producidos por nosotros mismos, también gases que son dañinos como el monóxido de carbono, radón entre otros más. La norma DIN 1946 nos indica el número de renovaciones de aire según el tipo de local, se detallan algunas de ellas a continuación.

Tabla 1: Renovaciones de aire por hora según tipo de local.

Tipo de local	Renovaciones de aire por hora	Sector
Auditorios	6 - 8	Terciario
Aulas	5 - 7	
Bibliotecas	4 - 5	
Casinos	8 - 12	
Oficinas	4 - 8	
Armario roperos	4 - 6	Residenciales o domésticos
Cocinas residenciales	10 - 15	
Cuarto de baños	5 - 7	
Duchas	15 - 25	
Habitaciones residenciales	3 - 8	
Inodoro residencial	4 - 5	Industria I
Almacenes	5 - 10	
Laboratorios	8 - 15	
Sala de máquinas	10 - 40	
Talleres de soldadura	20 - 30	

Para considerar un cálculo más exacto se puede recurrir a la norma chilena NCh1960.Of89. Aislación térmica - Cálculo de coeficientes volumétricos globales de pérdidas térmicas, donde se detalla con mayor precisión las renovaciones que se requieren por el tipo de recinto que tiene una vivienda.

Tabla 2: Renovaciones de aire para una vivienda.

Tipo de recinto	Renovaciones de aire de cálculo por hora
Baño con W.C.	2 - 3
Baño con ducha	5 - 8
Cocina	3 - 4
Lavado y secado de ropa	6 - 8
Estar, comedor	1 - 1.5
Dormitorio (1 cama)	1
Dormitorio (2 cama)	1 - 1.5
Dormitorio (3 cama)	1.5 - 2
Otros recintos habitacionales	1 - 1.5

### 7.2. Paso 2.

Se debe identificar las características climáticas de la zona donde se localizará el sistema para esto se pueden acceder a la página web de la dirección meteorológica de Chile donde se debe elegir la estación más cercana a la zona donde se deben extraer los siguientes datos:

1. Temperatura máxima anual.
2. Temperatura mínima anual.

Siguiendo con el ejemplo, si se quiere localizar en un sector cercano a la Universidad Católica de la Santísima Concepción, la estación más cercana se encuentra la estación Carriel Sur, Concepción. De la cual se extrae los datos históricos del año 2021.

Tabla 3: Datos de temperatura del año 2021, extraído de la estación Carrier Sur, Concepción.

Temperatura año 2021 Concepción [°C]			
Mes	T°_mín.	T°_prom.	T°_máx.
Enero	8,1	16,3	26,3
Febrero	9	16	24,9
Marzo	6,8	15,3	24,8
Abril	5,3	13,7	23,4
Mayo	3,9	12,2	19,6
Junio	-0,3	10,9	17,3
Julio	0,6	9,6	21
Agosto	0,6	10,3	19
Septiembre	2,9	11	19,9
Octubre	3,2	12,6	21,3
Noviembre	5,4	14,6	24,1
Diciembre	7,9	16,5	29,7

### 7.3. Paso 3.

Determinación de la propiedad del aire, el cual será el encargado de trasportar el calor por medio de la convección. Para lo anterior, se pueden ocupar los siguientes valores ocupados en la construcción donde la densidad es de  $1.2 \text{ kg/m}^3$  y la capacidad calorífica volumétrica toma un valor de  $1.214 \text{ kJ/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$  (Lira & Guevara, 2017).

Los valores de viscosidad cinemática, número de Prandtl y conductividad térmica pueden ser extraídos del libro “Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones” escrito por Yunus A. y John M.

De esto se puede interpretar que entre un rango de  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , las propiedades no tienen mucha variación entre sí mismas, Los valores que pueden tomar se representan en la tabla 4.

Tabla 4: Propiedades del aire a 1 atm de presión y a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Elemento	Densidad $\text{kg/m}^3$	Calor específico $\text{J/kg K}$	Conductividad térmica $\text{W/m K}$	Número de Prandtl	Viscosidad cinemática $\text{m}^2/\text{s}$
Aire	1.2	1007	0.02	0.73	$1.5 \times 10^{-5}$

En caso de considerar otros valores pueden ingresar al mismo documento donde determina las propiedades según la temperatura del aire.

### 7.4. Paso 4.

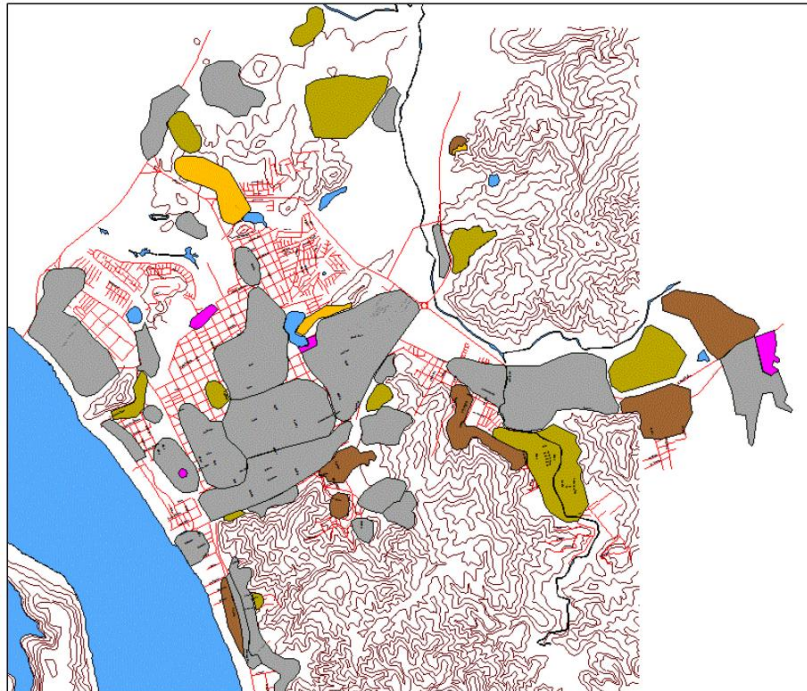
Determinación de la caracterización del suelo, ya que de esto depende el dimensionado del sistema.

Para poder caracterizar los suelos de Concepción se realizaron investigaciones en donde se detalla el tipo de suelo que se encuentra en algunos lugares de dicha ciudad. Estos datos se obtuvieron en base a una recopilación de sondajes realizados por diferentes empresas en la zona de Concepción y los resultados que concluyeron se detallan en la figura 1 (Sáez, 2016).

Tabla 5: Clasificación empleada en zonificación.

Clasificación	Descripción	Color
Tipo I	Arenas limosas	
Tipo II	Arcillas	
Tipo III	Limos	
Tipo IV	Limos y arcillas	
Rellenos	Rellenos mayores a 5 m de profundidad	

Figura 1. Zonificación de los suelos de concepción



La figura 1 sirve de ayuda para poder orientar e identificar el suelo en el cual se podría estar trabajando.

Las propiedades térmicas requeridas del suelo son su densidad, conductividad y capacidad calorífica, las que se ven influenciadas por diversos factores, entre los cuales encontramos la porosidad, contenido de humedad, granulometría entre otros; por lo cual en la tabla 6 y la tabla 7 se presentarán diversas propiedades térmicas que pueden ser usadas (Zenteno, 2013).

Tabla 6: Propiedades térmicas de diferentes tipos de suelo.

Tipo de suelo	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductividad [W/m K]	Capacidad calorífica [kJ/kg K]
Grava gruesa	2000	0,52	1,84
Óxido de calcio	1670	2,23	0,71
Arcilla arenosa	1650	2,3	2,85
Arcilla arenosa húmeda	1800	1,49	1,34
Arena	1780	0,93	1,39
Arena seca	1500	0,7	0,92

Tabla 7: propiedades térmicas de diferentes tipos de rocas.

Tipo de roca	Conductividad térmica [W/m K]			Capacidad térmica volumétrica [MJ/m <sup>3</sup> K]
	Mínimo	Valor típico	Máximo	
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

También los datos pueden ser extraídos de forma experimental, por ejemplo, la zona de la Universidad Católica de la Santísima Concepción cuenta con diversos sondeos realizados, uno de ellos está cercano a los laboratorios de geomateriales, que fue realizado el 3 de junio de 2011 con una profundidad de 30 metros y en donde los respectivos resultados fueron ingresados al software Earth Energy Designer (EED). Cabe señalar que el propio software cuenta con su propia base de datos con valores de parámetros térmicos según el material del suelo, donde los datos arrojados fueron: (Vidal, 2017)

Tabla 8: Descripción del sondeo y propiedades térmicas estimadas por la clasificación del software EED

Horizonte N°	Profundidad [m]	Espesor [m]	Descripción del sondeo	Clasificación según EED	Conductividad recomendada [W/m K]	Capacidad calorífica volumétrica [MJ/m <sup>3</sup> K]
1	0.00-0.15	0.15	Capa vegetal	Arena húmeda	1	1.8
2	0.15-2.5	2.35	Arena fina algo arcillosa	Arena húmeda	1	1.8
3	2.50-5.00	2.5	Arena fina con algo de arcilla, lentes de limo arenoso y gravas	Arena húmeda	1	1.8
4	5.00-6.30	1.3	Maicillo, arena media gruesa cuarzosa, lentes de limo	Arena húmeda	1	1.8
5	6.30-10.40	4.1	Arena fina limosa	Arena húmeda	1	1.8
6	10.40-16.30	5.8	Arena muy fina o arcillosa	Arena húmeda	1	1.8
7	16.20-19.62	3.42	Arcilla con vetas arenosas	Arcilla húmeda	1.6	2.3
8	19.62-20.30	0.68	Arcillas gradualmente cementadas	Lutita	2.2	2.3
9	20.30-25.10	4.8	Areniscas medianamente cementadas	Arenisca	2.3	2
10	25.10-31.37	6.27	Arena fina arcillosa algo cementadas	Arenisca	2.3	2
11	31.30-100	68.7	Formación Curanilahue	Arenisca	2.3	2
Promedio ponderado					2.182	1.9886

Entonces, si queremos localizar el sistema en los terrenos de la Universidad Católica de la Santísima Concepción solo debemos buscar un valor ponderado a una profundidad cercana a la que trabajaremos, donde como máximo son 6 m de profundidad. Lo anterior, dando como resultado que desde los 0 m a los 6.3 la clasificación que le entrega al suelo el software (EED) es de arena húmeda con parámetros de conductividad recomendada de 1 W/m K y una capacidad calorífica de 1.8 MJ/m<sup>3</sup> K.

### 7.5. Paso 5

Parámetros del conducto a utilizar como se mencionó antes se recomienda ocupar tuberías de PVC o HDPE por sus bajos costos y facilidad de instalación, entre otras razones más.

Las dimensiones de este material pueden ser extraídas de diversos catálogos dispuestos por las empresas dedicadas a este rubro, entre las cuales encontramos la empresa TIGRE que trabaja tuberías que van de los 16 mm a 630 mm. A continuación, se detalla las dimensiones y algunos espesores que trabajan.

Tabla 8: dimensiones de tubería HDPE de 110 mm a 225 mm de radio

<b>Diámetro nominal [mm]</b>	<b>Espesor [mm]</b>	<b>Peso [kg/m]</b>
110	2.7	0.9
125	3.1	1.2
140	3.5	1.5
160	3.9	2.0
180	4.4	2.5
200	4.9	3.1
225	5.5	3.9

Considerando que este material es hidráulicamente liso el factor de fricción será obtenido mediante la ley de Blasius. Para más información se puede acceder al catálogo que proporciona la empresa en la página web [tigre.cl](http://tigre.cl), para polietileno alta densidad.

### 7.6. Paso 6

Se debe tener presente que al estar trabajando con un ventilador este no siempre trabajará a toda su potencia, por lo general con el pasar del tiempo se verá afectado por la acumulación de suciedad, los cambios de caudal, lo que afecta de manera negativa al ventilador. Teniendo lo anterior en consideración se debe otorgar un valor numérico a la eficiencia de ventilador, donde los valores ocupados normalmente para un ventilador centrífugo su eficiencia va entre el rango de los 0.6 a 0.87, mientras que para ventiladores axiales van de los 0.3 a 0.9 de eficiencia (Benkert, Heidt & Schöler, 1997).

## 8. APLICACIÓN

Para análisis del programa realizado mediante el Software de hojas de cálculo Microsoft Excel, se realizará el siguiente cálculo, para posteriormente ser comparado con los resultados obtenidos del software GAEA (Graphische Auslegung von ErdwärmeAustauschern), desarrollado por el Departamento de Física de la Universidad de Siegen, Alemania, software especializado el diseño de en intercambiador de calor terrestres para edificaciones.

### Características de la zona que se quiere climatizar

Para efecto de este ejemplo se va a considerar que se tratara de una vivienda de 60 m<sup>2</sup> y 2.3m de alto lo que de un volumen total de 1138 m<sup>3</sup> se tienen que calefaccionar. Considerando que se trata de una vivienda, tomaremos la renovación para habitaciones residenciales de la Tabla 1 asumimos un valor de 3 renovaciones por hora.

Como resultado tenemos que el caudal que se debe de asegurar que llegue a la vivienda es de 414 m<sup>3</sup>/h para poder garantizar una óptima ventilación.

En el programa solo se debe de ingresar los parámetros volumen total y las renovaciones de aire por hora, el caudal requerido es calculado de forma automática.

Tabla 9: resumen de datos

<b>Características de la zona a calefaccionar</b>		
<b>Volumen total</b>	138	m3
<b>Renovaciones de aire</b>	3	1/h
<b>Caudal requerido</b>	414	m3/h

### Características climáticas:

De la Tabla 3 se pueden extraer los datos requeridos que se deben ingresar, donde en el año 2021 en Concepción la máxima temperatura fue de 29.7 °C en el mes de diciembre mientras que la mínima se alcanzó en junio con una temperatura de -0.3 °C.

También se agregó la opción en la cual permite analizar el comportamiento de la temperatura deseada al interior de la tubería en una estación determinada (verano, otoño, invierno, primavera), la cual puede ser modificada en cualquier momento.

Tabla 10: Datos de características climáticas de la zona de implementación del sistema (Concepción).

<u>Características climáticas</u>		
Temperatura máxima anual	<input type="text" value="29,7"/>	°C
Temperatura mínima anual	<input type="text" value="-0,3"/>	°C
Temperatura promedio	<input type="text" value="14,7"/>	°C
Temperatura variable	<input type="text" value="2"/>	°C
Estación del año	<input type="text" value="invierno"/>	

### Propiedades del aire:

Los valores que se consideran son extradidos de la Tabla 4, valores considerados que el aire se encuentra a 1 atm de presión y a 20 °C y se podrán ingresar de manera automática seleccionado la casilla de “Ocupar valores recomendados”.

La capacidad calorífica volumétrica es obtenida mediante los parámetros densidad y calor específico

Tabla 11: Datos de características del aire.

<u>Parametros del aire</u>		
<input checked="" type="checkbox"/> Ocupar valores recomendados		
Densidad	<input type="text" value="1,2"/>	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad cinemática	<input type="text" value="0,000015"/>	m <sup>2</sup> /s
Numero de Prandtl	<input type="text" value="0,73"/>	
Capacidad calorífica volumetrica	<input type="text" value="1,21"/>	kJ/m <sup>3</sup> K
Conductividad	<input type="text" value="0,024"/>	W/m K

### Parámetros del suelo:

Los parámetros pueden ser extraídos de diversas literaturas que se encuentran disponibles, pero para eso se debe tener completamente identificado en suelo donde se va a estar trabajando. En la imagen 1 se detalla los tipos de suelos localizados en Concepción, por ejemplo, se puede interpretar que en la mencionada ciudad en su sector centro corresponde a un suelo predominado por arenas limosas, mientras que para el sector de Collao se pueden encontrar suelos del tipo arenas limosas junto con suelos tipo limo y arcillas.

Teniendo en consideración lo anteriores a modo de ejemplo asumiremos que el sistema se implementará en un suelo del tipo arena donde los valores se puede extraer de la tabla 6.

Tabla 12: Datos de características del suelo

**Parametros del suelo**

Tipo de suelo

Rellenar parametros del suelo

<b>Densidad</b>	<input type="text" value="1780"/>	kg/m <sup>3</sup>
<b>Conductividad</b>	<input type="text" value="0,93"/>	W/m K
<b>Capacidad calorífica</b>	<input type="text" value="1,39"/>	kJ/kg K
<b>Capacidad calorífica volumétrica</b>	2474200	J/m <sup>3</sup> K

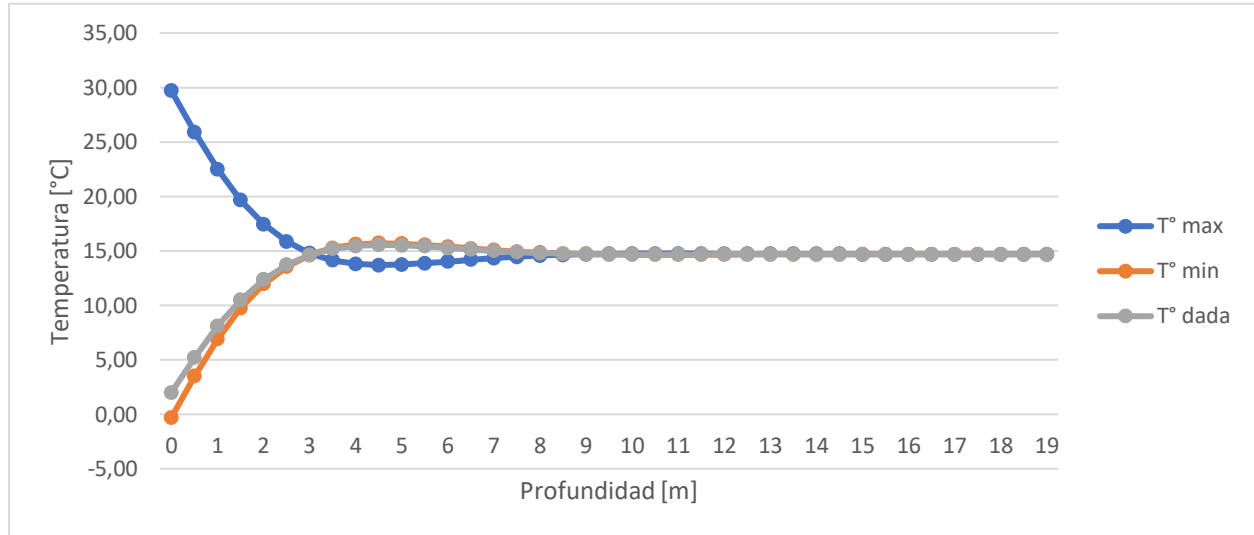
### Parámetros de material del conducto:

Se recomienda ocupar la tubería HDPE o PVC de 110 mm de diámetro, ya que es fácil de obtener además de ser un material relativamente económico. De la Tabla 8 se extraen los diámetros comerciales.

Ahora teniendo el diámetro que se quiere analizar se procede a determinar una profundidad a la que operará el sistema. Para lo anterior, es recomendable optar por profundidades que van desde los 2.5 m a 9 m, que cuando la temperatura de la tierra alcanza en la mayoría de los casos alcanza una temperatura constante.

Por ejemplo, considerando valores extraídos de Tabla 12 y Tabla 10 para poder hacer uso de la ecuación [F6] se puede apreciar la variación de temperatura.

Figura 2: Variación de la temperatura en función de la profundidad.



De la Figura 2 se puede extraer que para el suelo trata de encontrar un equilibrio térmico, el cual, será la temperatura promedio anual que para este caso es de  $14.7^{\circ}\text{C}$  el que se logra a los 9 metros de profundidad, así también vemos que se logra alcanzar a los 3 metros. Entonces, la profundidad que elegiremos va a ser la mínima obtenida en este caso sería de 3 metros, para de esta manera los costos de excavación sean mínimos. De la misma manera si analizamos los tipos de suelos de la Tabla 6 se pueden obtener los rangos de profundidades óptimos de implementación.

Tabla 13: Rango óptimo de profundidad según el tipo de suelo

Tipo de suelo	Rango óptimo de profundidad a implementar [m]
Grava gruesa	2 - 5.5
Oxido de calcio	7 - 20
Arcilla arenosa	3.5 - 10
Arcilla arenosa húmeda	4 - 10
Arena	3 - 9
Arena seca	3.5 - 10

Entonces teniendo en cuenta lo anterior, se procede a rellenar los datos requeridos los cuales son:

Tabla 14: Parámetro del ducto.

<b>Parámetros del sistema</b>		
<b>Diametro exterior de la tubería</b>	<input type="text" value="110"/>	mm
<b>Longitud</b>	<input type="text" value="40"/>	m
<b>Profundidad de implementación</b>	<input type="text" value="3"/>	m
<b>Eficiencia del ventilador</b>	<input type="text" value="0,6"/>	

La eficiencia del ventilador fue considerada como 0,6 que es un valor promedio entre el rango aconsejado de eficiencia para ventiladores axiales.

## 9. RESULTADOS

Si se ingresan los datos al programa se obtiene los siguientes datos.

### **Variación de la temperatura en función de la profundidad.**

Esto se demuestra en la Figura 1, donde se muestra la variación de la temperatura en función de la profundidad. Este gráfico se ve afectado por factores como el tipo de suelo, temperaturas máximas y mínimas, lo que queda demostrado en la Tabla 13 donde dependiendo del tipo de material la temperatura del suelo alcanza el equilibrio térmico a distintas profundidades.

Del gráfico se puede interpretar que para un suelo considerado arcilla arenosa la profundidad óptima es a los 3.5 metros, pero esto considerando que el suelo es homogéneo y que no fue intervenido, pero para poder hacer la instalación del sistema esto ya no se cumple por lo cual se deben considerar las correcciones planteadas en la ecuación [F8] que tiene en cuenta el ducto y el flujo de aire que entra.

### **Variación de la temperatura al interior de la tubería.**

Teniendo en consideración los factores mencionados anteriormente, se logra obtener como será el comportamiento de la temperatura al interior de la tubería teniendo en consideración temperaturas extremas alcanzadas en el año 2020.

En la Figura 2 se muestra el comportamiento considerando la temperatura extrema alcanza en dicho año, el análisis se realiza tramo a tramo, para esto la longitud total se va a segmentar en 100 partes, en este caso que la longitud ingresada es de 40 metros entonces el análisis se va a

realizar en tramos de 0.4 m. Para el primer tramo se asume que la temperatura del aire en el primer segmento es igual a la temperatura ambiente, ahora se procede a la utilización de las ecuaciones [F9] y [F10] para tener en consideración el intercambio de calor realizado en el segmento y de esta forma obtener la nueva temperatura del siguiente segmento.

Se procede de esta forma hasta llegar al último segmento donde se debe de considerar la potencia requerida del motor para poder superar las pérdidas, entonces los gráficos quedan de la siguiente forma:

Figura 3. Variación de la temperatura al interior del ducto considerando temperatura mínima.

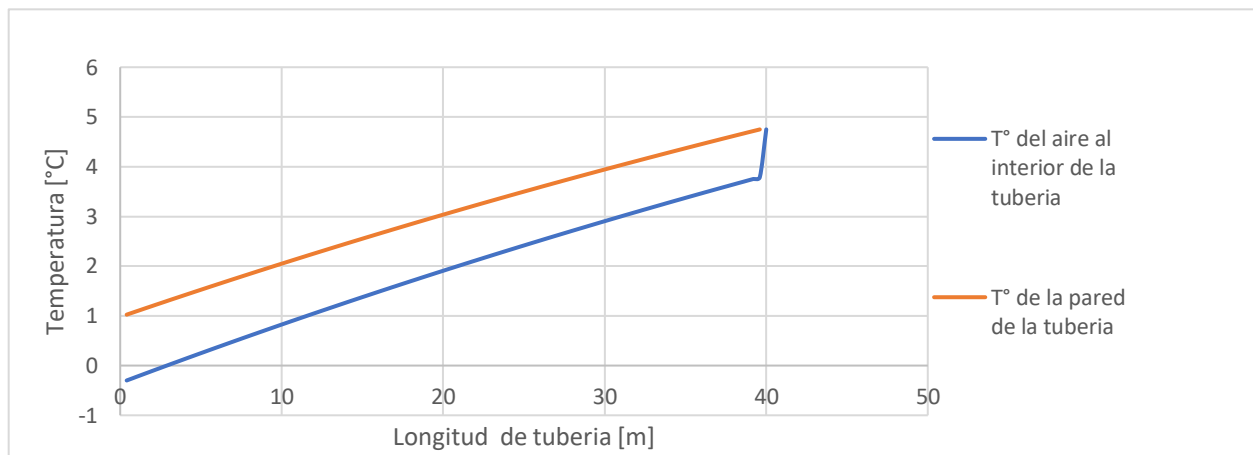
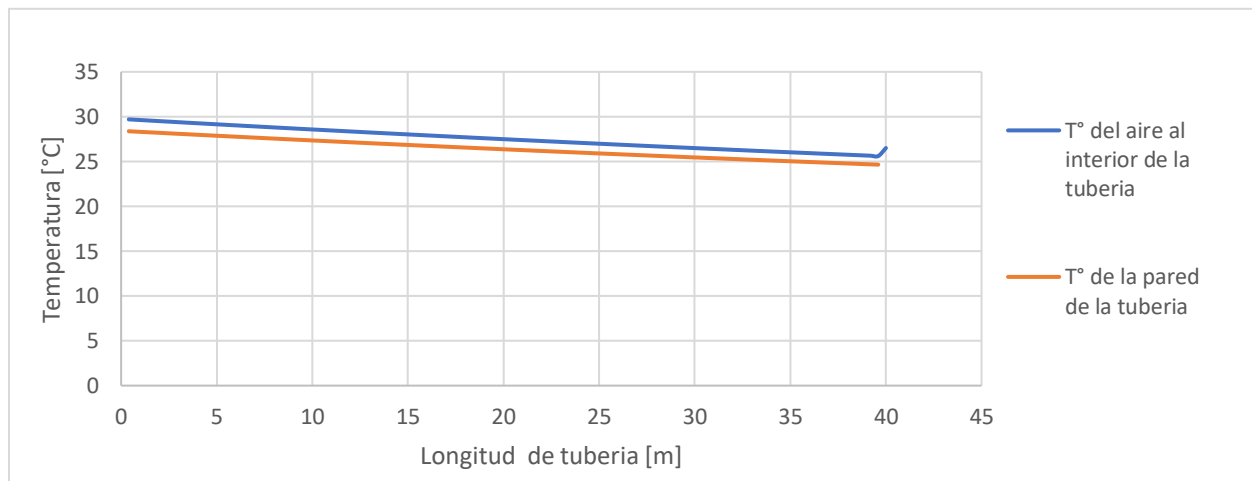


Figura 4. Variación de la temperatura al interior del ducto considerando temperatura máxima.



De la Figura 3 se puede decir que, si en el sistema ingresa una temperatura de  $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$  al sistema esta saldrá en otro extremo con una temperatura de  $4.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  considerando la potencia entregada por el ventilador, por lo que tenemos una ganancia de  $+5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  considerando el caso extremo que es donde mejor funciona el sistema.

De la misma manera, de la Figura 4 considerando a la temperatura máxima que fue de  $29.7\text{ }^{\circ}\text{C}$  el sistema disminuirá la temperatura a  $26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por lo que tenemos una deducción del  $-3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Para que funcione el sistema la potencia del ventilador requerida es de  $129\text{ W}$ , valor entregado

por el mismo programa a través de una Tabla resumen, por lo cual se debe de idear otra solución para poder disminuir la potencia.

Tabla 15. Resumen de datos finales entregados por el programa

T° ambiente [°C]	Potencia requerida del ventilador [W]	Potencia entregada por el sistema [W]	T° de entrada a la vivienda [°C]		
29,7	129	124	26,5	Reducción de T° en	-3,2 °C
-0,3		133,9	4,75	Aumento de T° en	5,50°C
2,00		133,1	6,41	Aumento de T° en	4,4 °C

### Solución al problema planteado.

Una solución sería disminuir el caudal de ventilación; para eso se debe de implementar 2 sistemas por lo cual cada sistema aportará 207 m<sup>3</sup>/h si se aplica esta reducción y manteniendo todos los demás datos igual se obtiene que de 129 W se reduce a 18.8 W cada ventilador, pero ahora al reducir el caudal y manteniendo la sección del ducto hace que la velocidad que pasa sea menor, por lo cual, la tasa de transferencia por segmento aumenta, lo que a su vez significa que se ganará más calor por segmento.

En conclusión, el sistema será más eficiente, pero significará un aumento en los costos.

Figura 5. Variación de la temperatura al interior del ducto considerando temperatura mínima, consideran un caudal de 207 m<sup>3</sup>/h

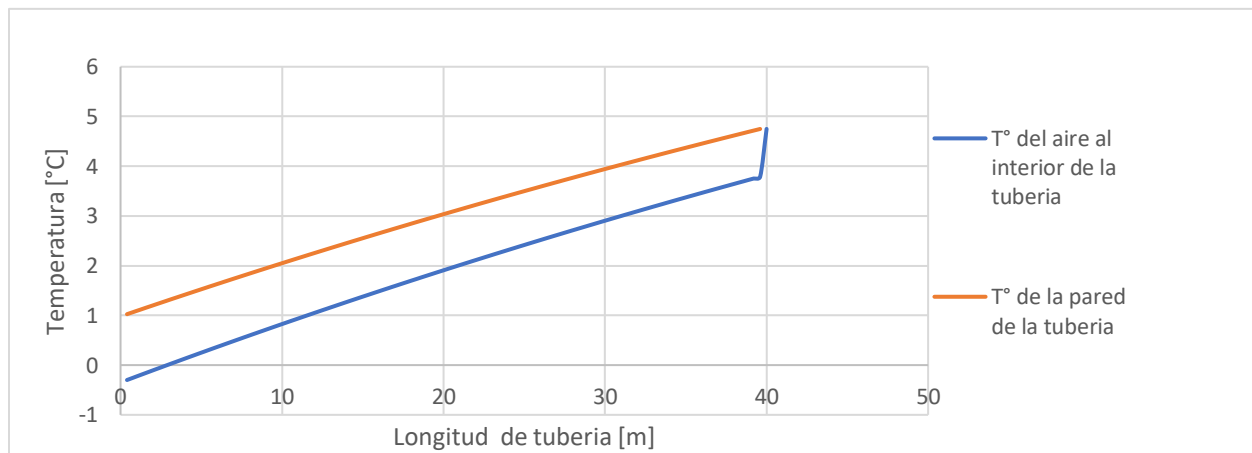
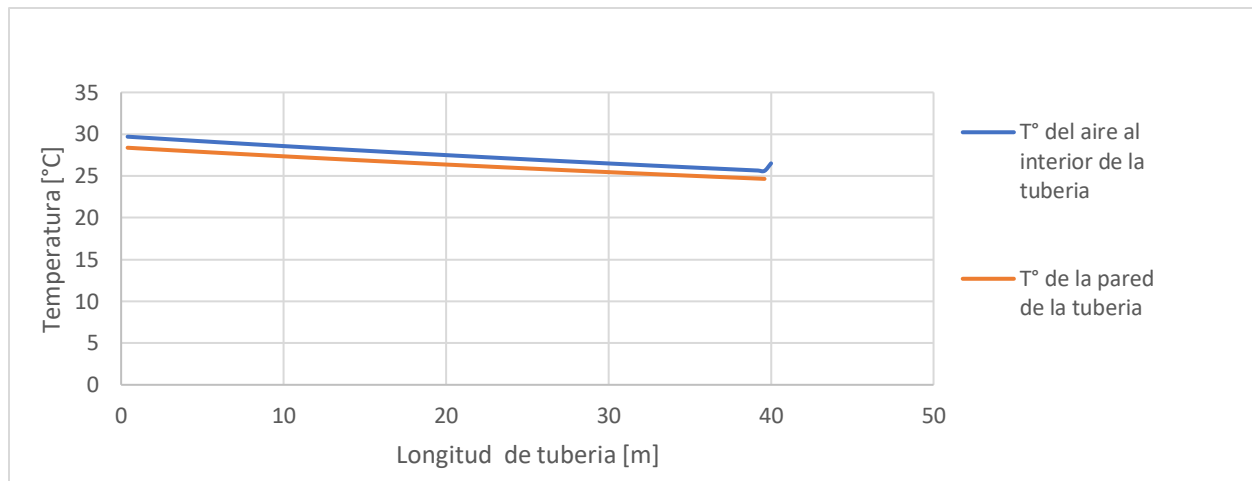


Figura 6. Variación de la temperatura al interior del ducto considerando temperatura máxima, consideran un caudal de 207 m<sup>3</sup>/h



Entonces, si miramos los nuevos gráficos, Figura5 y Figura 6, tenemos una pequeña mejora ya que si consideramos que entra el aire a -0.3 °C ahora ganará en el sistema 7.1 °C, entonces en la salida del sistema el aire ingresará a la casa con 6,8 °C, pero si vamos a los 29.7°C la diferencia se hace mucho mayor ya que el aire ingresará a la casa a una temperatura de 23,18 °C, o sea tiene una reducción de -6.5 °C.

Tabla 16. Resultados finales entregados por el programa

T° ambiente [°C]	Potencia requerida del ventilador [W]	Potencia entregada por el sistema [W]	T° de entrada a la vivienda [°C]		
29,7	18,8	15,3	23,18	Reducción de T° en	-6,5
-0,3		22,3	6,76	Aumentó de T° en	7,1
2,00		21,7	8,01	Aumentó de T° en	6,0

A continuación, se presenta los siguientes resultados obtenidos al variar la temperatura ambiente considerando los mismos parámetros presentados en el primer caso, en resumen, se considera una profundidad de implementación del sistema es de 3 m y con una longitud de 40 m, además de transportar un caudal de 414 m<sup>3</sup>/h y que el terreno se encuentra en arena.

Tabla 17. Resultados obtenidos considerando parámetros de primer caso analizado

<b>T° ambiente [°C]</b>	<b>T° salida del sistema [°C]</b>	<b>Diferencia [°C]</b>
25	23,06	-3,93
22,5	21,25	-2,72
20	19,44	-1,52
15	15,82	0,09
10	12,20	2,5
5	8,59	4,92
2	6,41	6,63

Tabla 18: Potencia requerida para mínima para poder operar el sistema según el diámetro implementado (longitud del sistema de 40 m)

<b>Diámetro [mm]</b>	110	125	140	180	200	225
<b>Potencia del ventilador [W]</b>	129	71,2	42,1	13,2	8,1	4,7

La potencia requerida del ventilador para que el sistema opere de forma óptima se ve afectado principalmente por el caudal que se desea trasportar por el sistema, entre mayor sea el caudal más potencia requerirá el ventilador para funcionar, una forma de solucionar este problema es aumentando el diámetro de la tubería como se muestra en la Tabla 18 donde por cada aumento se tiene una reducción de un 50% de la potencia inicial requerida.

## 10. VERIFICACIÓN DE RESULTADOS CON EL SOFTWARE GAEA.

Para esta parte se tomaron los parámetros anteriores, donde solo se realizaron pequeños ajustes como aumentar el volumen a 450, estos datos fueron ingresados software GAEA para poder comparar y verificar si los resultados son similares a los entregados por el programa.

Se ingresan los distintos tipos de suelos con las condiciones planteadas anteriormente dando como resultado los valores son similares, los errores no van más allá del 1.6% del valor entregado por GAEA.

Tabla 19: Comparación de resultados entregados por el software GAEA y el programa propio.

Tipo de suelo	T° ambiente [°C]	GAEA	Programa	Diferencia [°C]	Porcentaje [%]
		T° de salida [°C]	T° de salida [°C]		
Arcilla arenosa	29,7	23,3	23,5	-0,2	0,86%
	-0,3	7,3	7,18	0,12	1,64%
Arena	29,7	26,4	26,49	-0,09	0,34%
	-0,3	4,2	4,19	0,01	0,24%
Arcilla arenosa húmeda	29,7	25,3	25,44	-0,14	0,55%
	-0,3	5,3	5,24	0,06	1,13%
Grava gruesa	29,7	27,8	27,80	0	0,00%
	-0,3	2,9	2,88	0,02	0,69%

Si se considera las mismas condiciones, pero modificando el caudal a 41.4 m<sup>3</sup>/h y reduciendo la longitud del sistema a 30 metros se tiene que la diferencia más grande ocurre con el suelo del tipo arena donde la diferencia no supera 0.34 °C del valor entregado por el software GAEA

Tabla 20: Comparación de resultados entregados por el software GAEA y el programa propio.

Tipo de suelo	T° ambiente [°C]	GAEA	Programa	Diferencia [°C]	Porcentaje [%]
		T° de salida [°C]	T° de salida [°C]		
Arcilla arenosa	29,7	16,5	16,65	-0,15	0,91%
	-0,3	13,1	12,76	0,34	2,60%
Arena	29,7	17,5	17,74	-0,24	1,37%
	-0,3	11,9	11,66	0,24	2,02%
Arcilla arenosa húmeda	29,7	17,7	17,95	-0,25	1,41%
	-0,3	11,8	11,46	0,34	2,88%
Grava gruesa	29,7	18,8	19,09	-0,29	1,54%
	-0,3	10,4	10,32	0,08	0,77%

Ahora si consideramos un caudal de  $41.4 \text{ m}^3/\text{h}$ , un largo del sistema de 30 m, diámetro del ducto de 200 mm y una eficiencia del ventilador de 0.7 se tiene como resultado el error no supera el 2.7% del valor entregado por GAEA y se da cuando se considera un suelo del tipo arcilla arenosa húmeda. Esto se detalla a continuación en la Tabla 19.

Tabla 21: Comparación de resultados entregados por el software GAEA y el programa propio.

Tipo de suelo	T° ambiente [°C]	GAEA	Programa	Diferencia [°C]	Porcentaje [%]
		T° de salida [°C]	T° de salida [°C]		
Arcilla arenosa	29,7	24	24,26	-0,26	1,08%
	-0,3	5,3	5,22	0,08	1,51%
Arena	29,7	26,4	26,57	-0,17	0,64%
	-0,3	3	2,92	0,08	2,67%
Arcilla arenosa húmeda	29,7	25,6	25,76	-0,16	0,63%
	-0,3	3,8	3,72	0,08	2,11%
Grava gruesa	29,7	27,6	27,61	-0,01	0,04%
	-0,3	1,9	1,87	0,03	1,58%

## 11. CONCLUSIÓN

En resumen, se logra diseñar un programa que modele y me entregue datos del comportamiento que tendrá el sistema bajo ciertas condiciones entregadas, y que además al comparar los datos entregados y compararlos con el software GAEA los resultados son satisfactorios, ya que, después de diversas comparaciones donde se varió caudal, largo del sistema, diámetro de los ductos entre otros parámetros, los errores máximos encontrados no superaban la diferencia de 0.35 °C entre ambos, donde variaron diversos parámetros, pero el error seguía siendo el mínimo, también se determina que el sistema sirve para reducir la temperatura a condiciones agradables para las personas pero al momento de calefaccionar no es suficiente con el sistema, por lo que tiene que ser acompañado con otro tipo de sistema para calefaccionar.

También se detectó que el sistema funciona de mejor forma cuando supera la temperatura promedio, por ejemplo, si se ingresa directamente la temperatura promedio anual no se percibirá ningún cambio debido a que el suelo y el aire estarán a la misma temperatura. Lo anterior queda demostrado en la tabla 17, entonces se puede decir que el sistema opera de forma óptima, cuando se encuentra sometido a temperaturas extremas.

También se logra determinar los tipos de suelo gracias a la zonificación de los suelos de concepción, donde se puede dar una idea sobre que tipo de suelo nos encontramos según el sector, pero en cuanto a las propiedades térmicas se logra encontrar los datos, pero para efecto de un cálculo más preciso se recomienda realizar ensayos para obtener los parámetros, porque son fundamentales al momento de determinar el dimensionado del sistema.

## 12. REFERENCIAS

- [1] **L. Brunat, & J. Escuer (2010)**. *“Intercambiadores tierra-aire emparentadas. Ejemplos y experiencias”*.  
<http://www.geoconsultores.org/ficheros/0f3ed2e6e3700e7d724c72f949e1c3d8.pdf>
- [2] **K.J. Albers (1991)**. *“Untersuchungen zur Auslegung von Erdwärmeaustauschern für die Konditionierung der Zuluft für Wohngebäude”*, Ph. D. Thesis, Universität Dortmund, Dortmund.
- [3] **St. Benkert, F.D. Heidt, D. Schöler (1997)**. *“Calculation tool for earth exchangers GAEA”*. Department of Physics, University of Siegen.
- [4] **C. Tibabisco (2018)**. *“Análisis de la transferencia de calor por impacto a través del número de Nusselt en el punto de estancamiento sobre una placa plana”*
- [5] **J. Escuer (2012)**. *“Intercambiadores tierra-aire en la climatización de construcción. Pozos provenzales y técnicas emparentadas”*.
- [6] **A. Zenteno (2013)**. *“Modelación térmica del suelo alrededor de tubos enterrados en sistemas de colección de energía geotérmica de baja entalpia”*
- [7] **P. Sáez (2016)**. *“Actualización de la estratificación y zonificación de los suelos en la Comuna de Concepción”*.
- [8] **A. Lira & A. Guevara (2017)**. *“Medición de la capacidad calorífica de los cuerpos y su relación con la inercia térmica”*
- [9] **A. Vidal (2017)**. *“Estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de climatización con bomba de calor geotérmica en la facultad de ingeniería de la universidad Católica de la Santísima concepción.”*