



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de un sistema de climatización basado en bomba de calor
hidrotérmica en el edificio Isaac Peral de la ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Guillermo Rubiera Quesada

DIRECTORES: Guillermo Rey González
Elena Arce Fariña

CURSO ACADÉMICO: 2015-2016

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Estudio de un sistema de climatización basado en bomba de calor
hidrotérmica en el edificio Isaac Peral de la ENM*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) constituye la continuación del TFG desarrollado en el pasado curso 2014-2015 por el AF Eduardo Díaz del Río Oleaga titulado “Estudio de alternativas de climatización en el cuartel Francisco Moreno”.

Este TFG comprende el cálculo de las necesidades térmicas de la instalación, en cumplimiento de los códigos técnicos y normativas de aplicación, mediante la simulación informática en TRNSYS. En dicha simulación se tuvieron en cuenta, entre otros, la configuración del edificio (cerramientos, perfil de utilización, etc.), la localización (condiciones meteorológicas típicas para el año) y las diferentes condiciones de uso (trabajo sedentario en aula o ejercicio moderado en laboratorio, etc.). A continuación, se dimensionó la instalación propuesta, basada en energías renovables mediante la utilización de una bomba de calor hidrotérmica y se indicaron y seleccionaron los componentes principales de la misma.

Dado que dicha instalación necesita de una inversión en equipamiento, instalación y obra civil, se realizó un estudio comparativo con la actual instalación (basada en caldera de gas) y se realizaron los cálculos correspondientes al periodo de amortización.

Un análisis final de sensibilidad nos permitió conocer qué condicionantes externos (por ejemplo, la evolución en el precio del gas) o internos (por ejemplo, el precio de determinados equipamientos, como la bomba de calor) pueden modificar, de manera sustancial, los cálculos de amortización propuestos.

PALABRAS CLAVE

hidrotérmica, TRNSYS, análisis de sensibilidad, climatización

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecerle su apoyo y su preocupación por sacar adelante este proyecto a mi tutor, Guillermo Rey.

A mi tutora Elena Arce, por su incansable adicción al trabajo y predisposición a ayudarme tanto a mí como a mis compañeros que compartían tutora conmigo.

A mi familia por preguntarme todos los días por mi proyecto, con la segunda intención de darme el empujón necesario para ponerme a trabajar en él.

A mis compañeros de camareta Javier Sánchez-Tembleque, Alejandro Carrión y José Rico, por soportar mis arranques de ira ante el gran rival que ha supuesto TRNSYS, y mis noches en vela estas últimas semanas.

A todos mis compañeros que han sufrido el yugo opresor de TRNSYS conmigo.

Y por último, a todos aquellos compañeros que siempre han estado ahí, tanto en lo profesional como en lo personal, dentro y fuera de la ENM, porque no les hace falta que diga quienes son.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción.....	9
1.1 Objetivos	12
1.2 Localización	12
1.3 Entorno.....	13
1.4 Edificio.....	14
1.5 Software utilizado	15
1.5.1 Google SketchUp.....	16
1.5.2 TRNSYS3D	17
1.5.3 TRNSYS Simulation Studio	19
1.5.4 TRNBuild	21
1.5.5 TRNExe	26
2 Antecedentes	27
2.1 Climatización	27
2.2 Fundamentos básicos de climatización	27
2.2.1 Humedad absoluta y relativa	27
2.2.2 Calor específico	28
2.2.3 Entalpía	29
2.2.4 Diagrama psicrométrico.....	30
2.3 Procesos básicos de climatización	30
2.3.1 Calentamiento y enfriamiento.....	30
2.3.2 Calentamiento y humidificación.....	31
2.3.3 Enfriamiento y deshumidificación.....	32
2.3.4 Enfriamiento por evaporación	33
2.3.5 Mezcla adiabática de corrientes de aire	34
2.4 Carga térmica	35
2.5 Infiltraciones	35
2.6 Teoría de confort.....	36
3 Estado del arte	39
3.1 Sistemas de climatización	39
3.2 Elementos de un sistema de climatización.....	39

3.3 Calderas.....	40
3.3.1 Calderas de combustibles fluidos	40
3.3.2 Calderas de condensación.....	41
3.3.3 Calderas de combustibles sólidos	42
3.4 Bomba de calor	42
3.4.1 Sistemas aerotérmicos	45
3.4.2 Sistemas geotérmicos.....	46
3.4.3 Sistemas hidrotérmicos	48
3.4.4 Aspectos ecológicos.....	49
4 Desarrollo	50
4.1 Diseño del edificio en SketchUp.....	50
4.2 Definición de cerramientos en TRNBuild	52
4.3 Introducción de inputs en Simulation Studio.....	54
4.3.1 Datos meteorológicos	54
4.3.2 Modelo de infiltraciones	55
4.3.3 Modelo de ocupación.....	57
4.3.4 Controladores de las temperaturas de consigna.....	59
4.4 Introducción de inputs en TRNBuild	61
5 Resultados	63
5.1 Iteración a través de los primeros resultados	63
5.2 Obtención de temperaturas.....	67
5.3 Selección de la instalación	68
5.3.1 Elementos de la instalación hidrotérmica	68
5.4 Diseño de la instalación	69
5.4.1 Bomba de calor	69
5.4.2 Conjunto de captación	71
5.4.3 Conjunto de disipación	72
5.4.4 Elementos intermedios.....	73
5.4.5 Instalación de las dos bombas de calor en cascada.....	74
5.5 Esquema de la instalación	75
5.6 Estudio energético.....	79
5.7 Estudio económico	80
5.7.1 Coste de instalación	80
5.7.2 Tiempo de amortización	80
5.7.3 Estudio de sensibilidad	81
6 Conclusiones	85

6.1 Líneas futuras	86
7 Bibliografía.....	87
8 Anexos.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Desarrollo económico, extracción de recursos, población e intensidad de los materiales. Fuente: SER	9
Figura 2 Crecimiento de la población mundial a lo largo de los años y por año. Fuente: www.worldometer.com/ Datos: ONU	10
Figura 3 Demanda mundial de energía. Fuente: Universidad de Cambridge.....	11
Figura 4 Plano General de la Escuela Naval Militar, resaltando el edificio Isaac Peral. Fuente: Google Maps.....	13
Figura 5 Interfaz de usuario de TRNSYS. Elaboración propia.....	16
Figura 6 Herramientas de TRNSYS3D en SketchUp. Elaboración propia.....	17
Figura 7 Ventana de error de TRNBuild. Elaboración propia.....	17
Figura 8 Modelado en 3D mediante SketchUp del edificio Isaac Peral. Elaboración propia	18
Figura 9 Detalle de dos zonas térmicas adyacentes. Elaboración propia.....	18
Figura 10 Interfaz de usuario de TRNSYS Simulation Studio. Elaboración propia.....	19
Figura 11 Detalle de los inputs de los que se compone Simulation Studio. Elaboración propia	20
Figura 12 Interfaz de usuario de TRNBuild. Elaboración propia	21
Figura 13 Librería de TRNBuild de los diferentes aislantes a escoger por el usuario. Elaboración propia	22
Figura 14 Herramientas de TRNSYS para definición térmica de las distintas zonas de climatización. Elaboración propia.....	22
Figura 15 Ventana de herramienta de introducción del modelo de infiltraciones. Elaboración propia	23
Figura 16 Ventana de la herramienta para la configuración de la ventilación. Elaboración propia.....	24
Figura 17 Ventana de configuración del sistema de calefacción. Elaboración propia.....	25
Figura 18 Salida de datos en TRNExe. Elaboración propia.....	26
Figura 19 Ejemplo de diagrama psicrométrico y sus componentes. Fuente: UPM	30
Figura 20 Representación gráfica del proceso de calentamiento sensible. Fuente: UPM.....	31
Figura 21 Representación gráfica del proceso de enfriamiento sensible. Fuente: UPM.....	31
Figura 22 Representación del proceso de calentamiento y humidificación. Fuente: UPM	32
Figura 23: Representación gráfica del proceso de enfriamiento y deshumidificación. Fuente: UPM	33
Figura 24 Representación gráfica del proceso de deshumidificación con calentamiento. Fuente: UPM.....	33
Figura 25 Representación gráfica del proceso de enfriamiento por evaporación. Fuente: UPM.....	33
Figura 26 Representación gráfica de la mezcla adiabática de corrientes de aire. Fuente: UPM.....	34
Figura 27 Representación gráfica del PPD frente al PMV. Fuente: UNE-EN ISO 7730	38
Figura 28 Caldera de combustibles fluidos. Fuente: desconocida	40

Figura 29 Esquema de instalación de una caldera de condensación. Fuente: Daikin	41
Figura 30 Caldera de combustibles sólidos. Fuente: Sitiosolar.....	42
Figura 32 Ciclos de refrigeración y calefacción de una bomba de calor. Fuente: Universidad de Cantabria	43
Figura 33 Configuración para verano e invierno de una bomba de calor. Fuente: Universidad de Cantabria	43
Figura 34 Válvula de 4 vías para la circulación del refrigerante. Fuente: desconocida	43
Figura 35 Ciclo de trabajo de una bomba de calor. Fuente: Universidad de Cantabria	44
Figura 36 Ciclo de Rankine real, con vapor sobrecalentado. Fuente: desconocida	44
Figura 37 Diagrama de Mollier del refrigerante R134A. Fuente: Apuntes Ingeniería Térmica.	45
Figura 47 Zonas climáticas de España. Fuente: IDAE.....	54
Figura 51 Detalle del modelo del type571 para el modelo de infiltraciones. Elaboración propia ...	55
Figura 52 Unión del output de infiltraciones con el input de infiltraciones del Aula 46. Elaboración propia	56
Figura 53 Herramienta online basada en Lider-Calener ofrecida por Aurea Design Builder. Elaboración propia	57
Figura 54 Tabla de ganancias de calor dependiendo del trabajo realizado. Fuente: ISO 7730.....	58
Figura 55 Detalle del controlador del modelo de ocupación. Elaboración propia	59
Figura 56 Detalle de los controladores de las temperaturas de consigna. Elaboración propia	60
Figura 57 Componentes del controlador de la temperatura de consigna, termostato (izquierda) y control de estación (derecha). Elaboración propia.....	60
Figura 58 Salida de datos de temperatura en una zona de muestra (línea azul representa temperatura interior de la zona, línea roja representa temperatura exterior de la zona). Elaboración propia	61
Figura 59 Ejemplo de configuración de salida de datos. Elaboración propia	61
Figura 60 Obtención datos de QSens en TRNExe. Elaboración propia.....	64
Figura 61 Datos obtenidos a través del Plotter 65c. Elaboración propia.....	64
Figura 62 Representación gráfica de las potencias obtenidas. Elaboración propia.....	66
Figura 63 Operador de TRNSYS Simulation Studio. Elaboración propia.....	66
Figura 64 Obtención de temperaturas en TRNExe. Elaboración propia.....	67
Figura 65 Obtención de las temperaturas restantes en TRNExe. Elaboración propia.....	67
Figura 66 Bomba de calor ecoGEO HP1. Fuente: ecoForest	70
Figura 67 Funcionamiento de la bomba de calor ecoGEO HP1. Fuente: ecoForest.....	70
Figura 68 Bomba de circulación EBARA modelo 65/Serie 3. Fuente: EBARA	71
Figura 69 Intercambiador de calor Alfa Laval AC120EQ. Fuente: Alfa Laval	72
Figura 70 Fancoil ecoGEO FC-W4. Fuente: ecoForest	73
Figura 71 Vista de la fachada principal del Isaac Peral en 3D.....	75

Figura 72 Esquema de instalación del sistema de climatización hidrotérmico en primera planta. Elaboración propia	77
Figura 73 Esquema de instalación en primera planta. Elaboración propia	78
Figura 74 Evolución del precio del gas natural de consumo (en verde). Fuente: Preciogas.....	82
Figura 75 Representación gráfica de las tres predicciones del precio del gas natural. Elaboración propia	83
Figura 76 Hoja de especificaciones 1-2 de Intercambiador de calor. Fuente: Alfa Laval	90
Figura 77 Hoja de Especificaciones de intercambiador de calor 2-2. Fuente: Alfa Laval.....	91
Figura 78 Hoja de especificaciones de bomba de calor ecoGEO HP1. Fuente: ecoForest.....	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Evolución del calor específico frente al incremento de temperatura. Fuente: UPM.....	29
Tabla 2 Ponderación de los valores de K_1 , K_2 y K_3 según las características del edificio. Fuente: ASHRAE.....	36
Tabla 3 Ponderación de las diferentes tasas metabólicas dependiendo de la actividad realizada.	37
Tabla 4 Tratamiento de datos en Excel para operar con ellos. Elaboración propia	65
Tabla 5 Consumos de energía obtenidos para los meses del año. Elaboración propia	65
Tabla 6 Relación de características de las tuberías para su dimensionamiento en instalaciones de bombas de calor operando con agua. Fuente: IDAE.....	74
Tabla 7 Ejemplo de esquema de instalación con 6 bombas de calor en cascada. Fuente: ecoForest	75
Tabla 8 Comparación de consumo actual con el de la instalación hidrotérmica. Elaboración propia	79
Tabla 9 Relación de costes de equipamientos de la instalación. Elaboración propia.....	80
Tabla 10 Evaluación del tiempo de amortización de la instalación. Elaboración propia.....	81
Tabla 11 Análisis de sensibilidad desde el punto de vista pesimista. Elaboración propia.....	83
Tabla 12 Análisis del tiempo de amortización desde el punto de vista optimista. Elaboración propia	83

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad hoy en día es la lucha que se está produciendo entre la demanda energética y el crecimiento demográfico, así como el consumo de los recursos naturales convencionales (como por ejemplo el petróleo).

Thomas Robert Malthus ya anunció en 1798 en su *Ensayo sobre el principio de la población* que la población mundial aumentaría de forma geométrica, dobándose cada 25 años, mientras que los recursos energéticos aumentarían de forma aritmética, siendo este crecimiento insuficiente para evitar que “un hombre ya nacido no tenga sitio en el gran banquete de la naturaleza”.

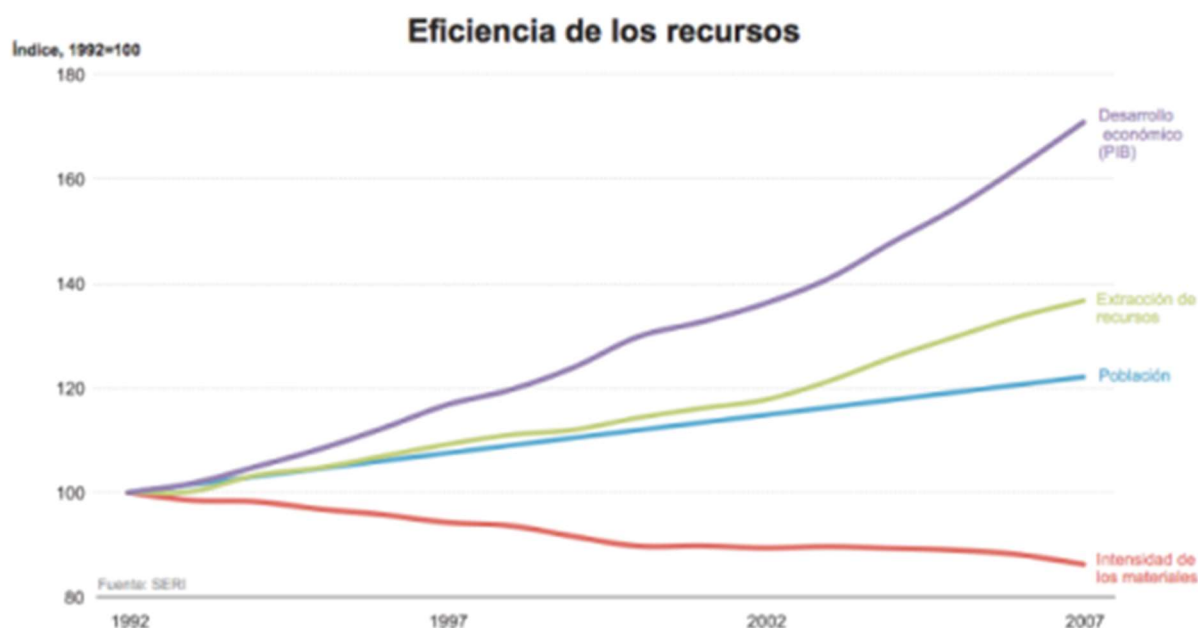


Figura 1 Desarrollo económico, extracción de recursos, población e intensidad de los materiales. Fuente: SER

Si bien el malthusianismo ofrece una visión catastrófica del crecimiento demográfico que no se ha cumplido, cabe destacar el hecho de que la población mundial ha pasado de 2500 millones de habitantes en 1950 a 7000 millones en la actualidad según datos ofrecidos por la ONU.

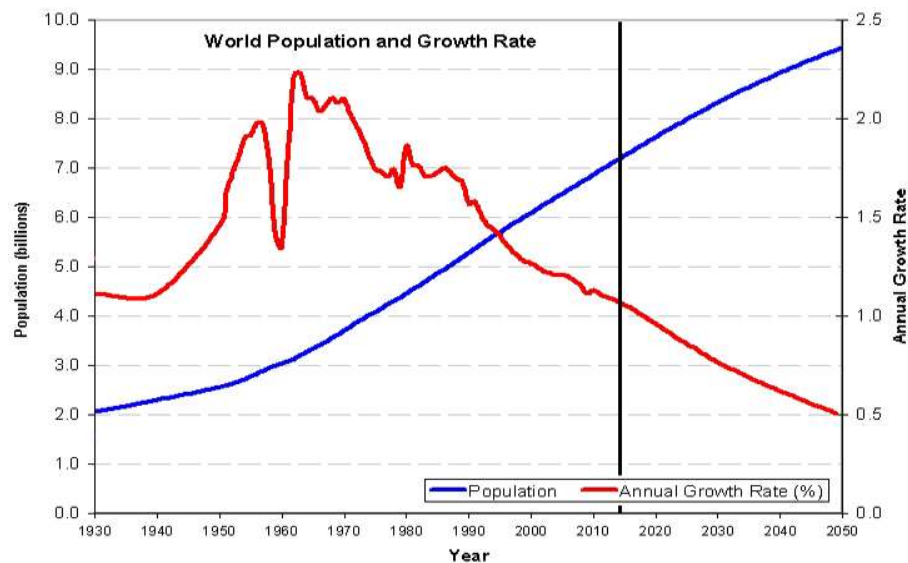


Figura 2 Crecimiento de la población mundial a lo largo de los años y por año. Fuente: www.worldometer.com/ Datos: ONU

A su vez, la ONU ha estimado que para el año 2150, la población mundial rondará los 23000 millones de habitantes, lo cual es alarmante desde el punto de vista del desarrollo sostenible y la repartición de recursos naturales.

Además, desde la Revolución Industrial hasta nuestros días, el recurso energético más usado han sido los combustibles fósiles, cuya formación y acumulación ha requerido millones de años. Su uso indiscriminado ha provocado la aparición de nuevas vías para su refinamiento y consumo con el fin de evitar su agotamiento.

El mapa energético mundial ha cambiado mucho durante los últimos 40 años; no solo por el aumento de demanda energética en la totalidad de las fuentes de energía, si no por las contribuciones a nivel global de cada una de ellas. El petróleo ha pasado de ser la principal fuente de energía destacada a compartir el primer puesto con el gas natural y el carbón. Estos cambios se vuelven cada vez más bruscos, provocados por ejemplo por el resurgimiento de la producción de petróleo y gas en Estados Unidos, la retirada de energía nuclear en ciertos países, el rápido crecimiento de la de las tecnologías eólica y solar o al aumento de la producción de gas no convencional. Esto deriva en graves consecuencias para los mercados y el comercio de la energía.

Por ello, las iniciativas políticas de los países desarrollados se centran en mejorar la eficiencia energética mundial y el apoyo a las energías renovables, a fin de evitar la dependencia y el uso excesivo de aquellas fuentes de energía que además de estar agotándose lentamente son las principales causantes de los problemas medioambientales actuales tales como la emisión de gases contaminantes a la atmósfera derivados de cualquier combustión de hidrocarburos (NO_x , SO_x , entre otros).

España, como país, es consciente de la necesidad de una transición energética hacia las energías renovables y sostenibles y su postura energética la sitúa en el puesto número 9 del ranking realizado por el “World Energy Council” en el año 2013, en el que se valoran la seguridad y equidad energética así como la sostenibilidad energética.

No obstante, uno de los factores que le son muy criticados a España, en lo referente al consumo energético, es su alto nivel de importación de gas y petróleo procedente de terceros países.

Según el estudio realizado por el WEC, el “mix energético” de España se divide en un 45,6% de energía térmica convencional, 20,5% nuclear, un 14,5% de la energía hidroeléctrica, y un 19,4% proveniente de otras energías renovables. De estos datos se puede deducir que España se ve obligada a importar casi la mitad del mix energético total del que dispone, lo cual supone un esfuerzo económico importante que además se ve agravado por el hecho de que ese dinero no se invierte en empresas ni infraestructuras nacionales, es decir, no es una buena inversión desde el punto de vista sostenible.

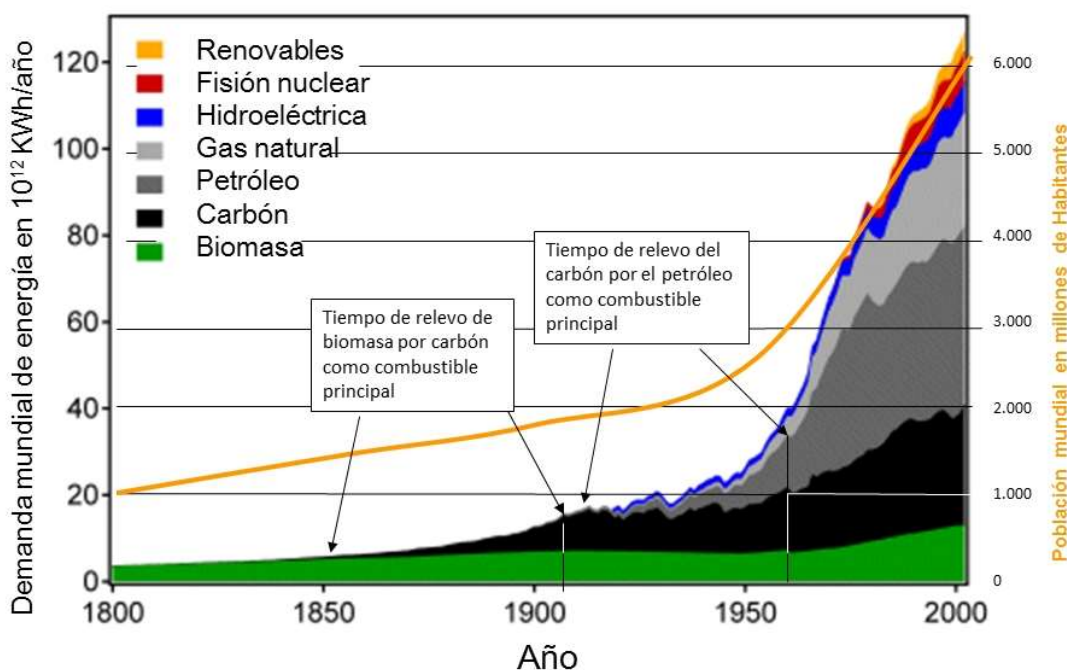


Figura 3 Demanda mundial de energía. Fuente: Universidad de Cambridge

Es más que evidente que estamos viviendo un momento de debilidad económica, marcada por las políticas de austeridad y los apoyos económicos entre países aliados como ocurre en la Unión Europea. En este contexto se hacen aún más necesarias las medidas que posibiliten un mayor aprovechamiento energético y una mejor inversión en materia de energía.

Este proyecto pretende implantar un sistema de climatización alternativo en uno de los edificios de la Escuela Naval Militar de Marín, que suponga un ahorro energético y una inversión segura y responsable desde el punto de vista medioambiental y económico. Para ello se tomarán en cuenta todas las vicisitudes que condicionarán nuestra temperatura de consigna, como el estudio de los

cerramientos, la circulación de personas, las infiltraciones de la edificación, la localización y orientación del edificio, entre otros.

1.1 Objetivos

En este proyecto se pretende realizar una mejora del sistema de climatización instalado en el edificio Isaac Peral, sometiendo a estudio las diferentes alternativas de climatización presentes hoy en día.

En primer lugar, se realizará un breve análisis de los factores externos que afectan a la climatización del edificio tales como su localización, orientación frente al sol o la media de temperaturas que se dan en su situación geográfica a lo largo del año. Para ello se usará la herramienta “METEONORM”, en la que introduciendo los datos de la situación geográfica se obtiene como resultado los datos atmosféricos relevantes para este proyecto.

Una vez tenidos en cuenta los factores externos de la edificación, se pasará a estudiar los factores internos. En este sentido, se pretende analizar el uso del edificio a lo largo del año, sus cerramientos y filtraciones, así como su afluencia de alumnos y media de aforo durante sus períodos de actividad.

Con el estudio de los factores internos y externos del edificio en cuestión, se pasará a realizar una breve reseña sobre el sistema de climatización actualmente instalada en el mismo, con la intención de que dicha reseña sirva de base para comparar esta instalación con una de las diferentes alternativas que habrán de estudiarse.

Tras comparar las virtudes y defectos de los diferentes sistemas, se procederá a escoger uno de ellos y se realizará el resto del proyecto teniendo en cuenta que el sistema llamado a sustituir la instalación actual es el escogido en este punto. Así, se realizarán los cálculos pertinentes y los esquemas necesarios en herramientas de delineación tales como “SketchUp” para su posterior implementación en el software de simulación “TRNSYS”.

El objetivo principal del proyecto es la obtención de resultados reales de una posible instalación de una bomba de calor hidrotérmica en la edificación en cuestión. Así, dicha instalación podrá ser dimensionada y cuantificada tanto técnica como económicamente.

El estudio económico también forma parte de los objetivos finales, pretendiéndose realizar un estudio de viabilidad y sensibilidad de la instalación. Para ello se tendrán en cuenta tanto los costes de instalación, mantenimiento y operación, como el cambio del escenario económico de cara al futuro, ya sea favorable o desfavorable, de cara a aquellos factores más sensibles ante el objeto del proyecto.

1.2 Localización

El edificio Isaac Peral es uno de los edificios de la Escuela Naval Militar destinado a albergar algunas de las aulas y laboratorios en los que se imparten las clases a los alumnos del centro militar de formación. En su concepción, este edificio estaba destinado a contener única y exclusivamente las aulas especializadas o laboratorios: como el laboratorio de máquinas y motores o el simulador de navegación, así como el laboratorio de electrotecnia. Sin embargo, su uso se ha extendido hasta albergar las aulas de la 43 a la 56 además de dichos laboratorios, posteriormente modernizados.

Este edificio se encuentra situado al Norte de las instalaciones de la ENM, en el punto medio del muelle Almirante Vierna, punto de atraque del Patrullero “Tabarca” y el Buque de Salvamento y Rescate “María Pita”. Cuenta con dos plantas y 4 accesos distintos: uno principal, dos traseros y uno lateral. El acceso a la planta superior puede realizarse mediante unas escaleras situadas frente a la entrada principal en el interior del mismo o mediante el único acceso lateral, ascendiendo por una escalera de aluminio situada en el exterior.



Figura 4 Plano General de la Escuela Naval Militar, resaltando el edificio Isaac Peral. Fuente: Google Maps

La Escuela Naval Militar se encuentra situada en la costa Sur de la ría de Pontevedra, en la localidad de Marín (42,3713N, 8,6956W). Su edificación se remonta al año 1943, fecha en la que se decide su creación en Marín, por ofrecer un gran elenco de posibilidades marineras como, por ejemplo, el abrigo del interior de la ría o la bravura de la “costa de la vela” situada entre la ría de Pontevedra y la ría de Vigo.

Por el hecho de estar situada la ENM en Galicia, al Noroeste de España, cabe reseñar ciertos aspectos a colación del clima característico de esta zona geográfica, que se estudiarán a continuación.

1.3 Entorno

El clima gallego está influenciado a lo largo del año por la circulación de las borrascas del Atlántico Norte que nacen en el continente americano y se trasladan hasta desaparecer en el norte europeo. Esta circulación natural de las borrascas provoca que sus frentes fríos, los cuales son más extensos que los frentes cálidos de las mismas, azoten las costas gallegas e incluso el interior de la región.

A su vez, pese a que las borrascas son recibidas por el litoral gallego en su etapa de madurez, no se encuentran totalmente ocluidas, por lo que mantienen la forma característica que provoca que el frente frío extendido permanezca sobre el norte peninsular después incluso de que haya pasado el centro de la borrasca.

Si se tiene en cuenta el patrón circulatorio de las borrascas del Hemisferio Norte, se puede deducir que, durante las épocas de mayor actividad borrascosa del año, la región noroeste de España recibe un frente borrascoso con una frecuencia media de cada 3 días.

El clima, por tanto, está altamente influenciado por la humedad, las temperaturas templadas y la nubosidad. Todo ello se tendrá en cuenta gracias al uso del software informático METEONORM, que a su vez aportará los datos de la radiación solar recibida en la zona geográfica del emplazamiento del edificio a lo largo del año.

1.4 Edificio

El Isaac Peral es un edificio de alta intensidad académica a lo largo del año en la Escuela Naval Militar. Sus aulas abarcan una superficie de más de 2300m² y su actividad lectiva se mantiene durante todos los periodos del día, a excepción de otras dependencias docentes de la Escuela Naval.

El edificio supone por tanto uno de los enclaves más importantes para la actividad docente del centro, siendo el centro neurálgico para la impartición de clases prácticas de laboratorio, así como el lugar donde se realizan todos los exámenes de todas las asignaturas impartidas, ya sean civiles o militares.

Desde su construcción ha sido concebido como el lugar en que se imparten las prácticas de las distintas asignaturas que se han ido impartiendo durante los años, desde los primeros de electrotecnia y turbinas y motores navales hasta los más actualizados de materiales, instrumentos, química y electrónica.

Durante la semana, alrededor de 300 alumnos circulan por el edificio, recibiendo clases prácticas y teóricas desde las 8:30 de la mañana hasta las 17:40 de la tarde. Este trasiego de gente afectará a la simulación en la medida en que el flujo de gente provoque la apertura de puertas y ventanas que generen renovaciones de aire en las zonas a climatizar.

A su vez, el número de personas presentes en una habitación también condiciona el cálculo del aporte calorífico necesario para alcanzar nuestra temperatura de consigna, puesto que, dependiendo del trabajo que se esté realizando, el rango de edad y el peso de los ocupantes, los mismos funcionarán como aportadores de calor al ambiente. Este dato se obtendrá de forma estadística, a través de la media de edad y peso de los alumnos.

Sin embargo, el mayor factor a tener en cuenta es el de las características de los cerramientos que constituyen el edificio. El uso de los aislantes adecuados tanto en las paredes adjuntas como en las exteriores, así como en las cubiertas y fachadas, marca la diferencia en lo referente al aporte de calor necesario para mantener el edificio dentro de los valores consigna.

Cabe destacar que, debido a la falta de un archivo en la Escuela Naval en el que quede constancia del proyecto de construcción de la edificación en cuestión, se han realizado las siguientes aproximaciones:

- Los suelos de la primera planta, aquellos que están en contacto con el terreno, se han definido como un forjado macizo exterior con placas alveolares y 4cms de aislamiento sobre el forjado.

- Todas las paredes exteriores del edificio se han definido como muros de dos hojas con ladrillo perforado, 5cms de aislamiento, cámara de aire y ladrillo hueco al exterior.
- Todas las paredes adyacentes del edificio, las interiores, se han definido como muros de una hoja con ladrillo macizo y 4cms de aislamiento interior.
- La entreplanta se ha definido como un forjado macizo con bovedilla de hormigón unidireccional.
- Los techos de la segunda planta se han definido como una cubierta plana invertida no transitable con bovedilla cerámica unidireccional y 5cms de aislamiento.
- Todas las ventanas han sido configuradas como cristal simple claro de 6mm.

Para ello, se han tenido en cuenta los límites superiores de la conductividad térmica preestablecidos en el Código Técnico de Edificación, en su Documento Básico HE, sabiendo que Pontevedra se encuentra en la zona climática invernal C. A su vez, se han extraído todos los aislantes de los cerramientos de la librería instalada en TRNSYS, escogiendo de todas las opciones, aquellas que están al límite de superar lo establecido por el CTE DB-HE debido a la antigüedad del edificio.

1.5 Software utilizado

Distintas herramientas de software han servido de apoyo para la realización del presente proyecto:

- Google SketchUp.
- Plugin para Google SketchUp: TRNSYS3D.
- TRNSYS: Transient System Simulation Tool, y sus componentes, TRNBuild y Simulation Studio.
- Aplicaciones de Office: Excel, Word, etc.

1.5.1 Google SketchUp

Google SketchUp es un programa de CAD gratuito que permite el diseño y modelado en tres dimensiones. Su uso se extiende desde la arquitectura, ingeniería civil, diseño industrial y escénico, hasta los videojuegos. Es un software desarrollado por @Last Software, empresa que fue adquirida en 2006 por Google.

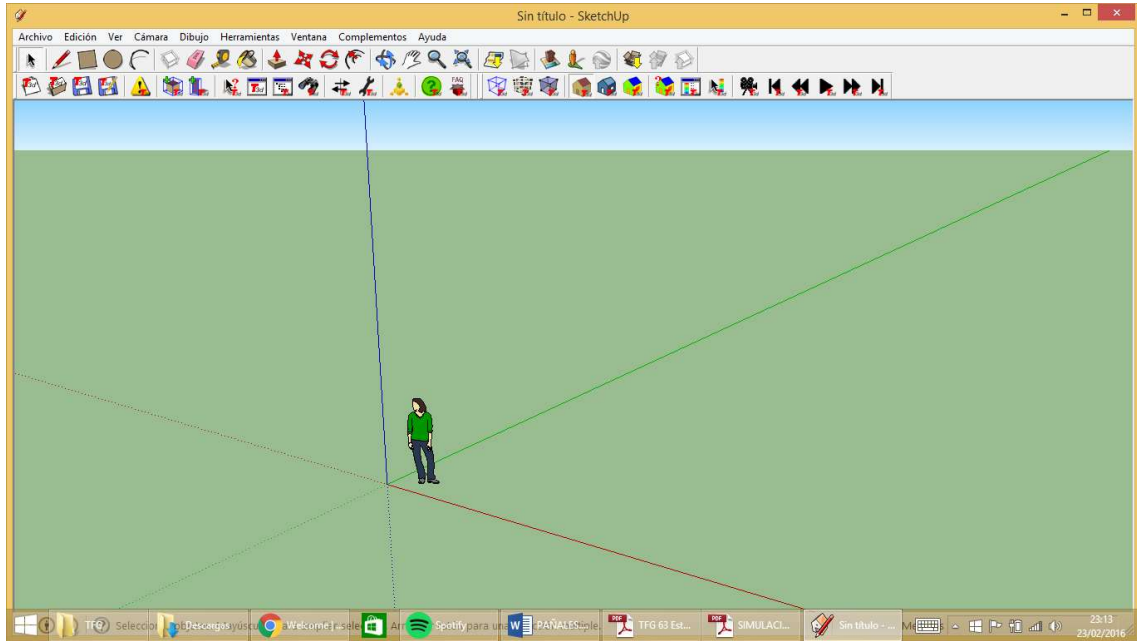


Figura 5 Interfaz de usuario de TRNSYS. Elaboración propia

Gracias al uso del lenguaje de programación de scripts integrado Ruby, los desarrolladores de aplicaciones pueden implementar funciones sobre este mismo programa para incrementar sus funcionalidades CAD. Es así como se ha conseguido implementar un plugin en el mismo, que permite el uso de las herramientas de *EnergyPlus*, lo cual ofrece la posibilidad de diseñar un edificio en 3D, definiendo zonas térmicas y superficies bajo estudio térmico.

SketchUp, con la implementación del *plugin* OpenStudio, permite a los usuarios de EnergyPlus el diseño de zonas térmicas, así como las paredes que las delimitan y los materiales que las forman. Por tanto, para la realización del proyecto se ha realizado en primer lugar un diseño en 3D del edificio a estudiar, delimitando sus zonas térmicas al mismo tiempo que se realiza la construcción virtual.

A su vez, la aplicación permite definir la orientación del edificio usando como referencia el Norte solar, así como la creación de zonas de sombra.

Pese a que SketchUp trabaje con un tipo de archivos. *skp* por defecto, posee la capacidad de volcar todos estos datos del *plugin* OpenStudio en un archivo. *idf*, el cual no es más que un documento de texto escrito en lenguaje de programación ASCII en el que quedan reflejados todos los datos que posteriormente usará TRNSYS.

1.5.2 TRNSYS3D

TRNSYS3D es un plugin gratuito desarrollado por TranSolar para TRNBuild en su versión 17, que implementa en Google SketchUp una barra de herramientas para ser utilizada en la definición térmica del edificio.



Figura 6 Herramientas de TRNSYS3D en SketchUp. Elaboración propia

Esta barra de herramientas incluye botones con los que definir nuevas zonas térmicas y grupos de sombras, además de otros con los que se facilita el trabajo por parte del usuario como, por ejemplo, botones para ocultar o mostrar las zonas térmicas deseadas.

Pese a que el plugin presenta muchas virtudes, también tiene algunos defectos que, aunque son evitables por parte del usuario, requieren especial atención a la hora de diseñar un nuevo edificio para su estudio térmico.

En concreto, el software presenta serias dificultades ante formas geométricas complejas que presentan adyacencias entre sí, así como incapacidad en algunos momentos de encontrar dichas adyacencias debido a un fallo de comunicación entre los archivos .idf (utilizado por TRNSYS) y .b17 (utilizado por el TRNBuild), a la hora de nombrar las distintas superficies que forman parte de todo el edificio.

Como se ha expuesto anteriormente, estos posibles errores tienen solución, la cual depende muchas veces de la pericia del usuario para encontrar el origen del fallo. En el resto de ocasiones pueden ser originados por la instalación incorrecta del software o de los complementos .dll o .ocx en el sistema operativo en el que se esté realizando la simulación.

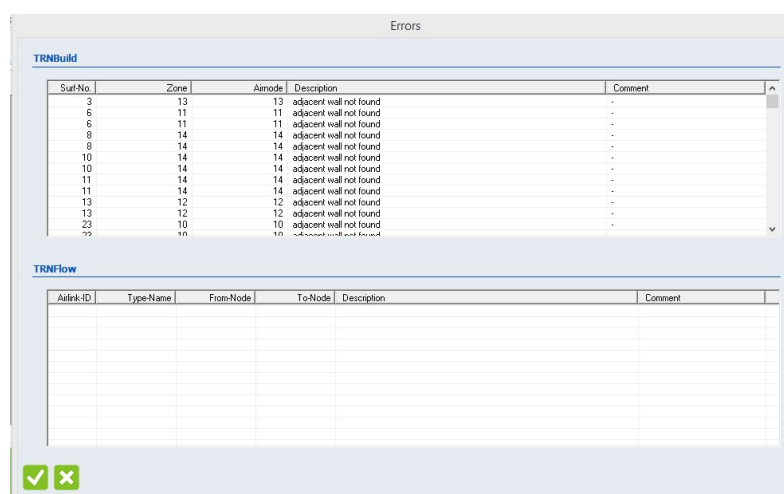


Figura 7 Ventana de error de TRNBuild. Elaboración propia

Como uno de los objetivos para las líneas futuras de este proyecto consiste en la continuación de este estudio con mayor profundidad o con la implementación de cualquier otro sistema de calefacción del que se vaya a escoger, es iniciativa del redactor indicar algunos consejos sobre la utilización de esta herramienta en Google SketchUp.

Algunos de los consejos que resuelven los problemas más frecuentes son:

- Actualizar siempre el archivo sobre el cual se está trabajando, lo cual quiere decir que siempre que se realice cualquier modificación sobre el proyecto de SketchUp original, se guarde una copia del mismo con otro nombre, para poder volver atrás en cualquier momento en caso de producirse un error en cualquier punto del diseño CAD.

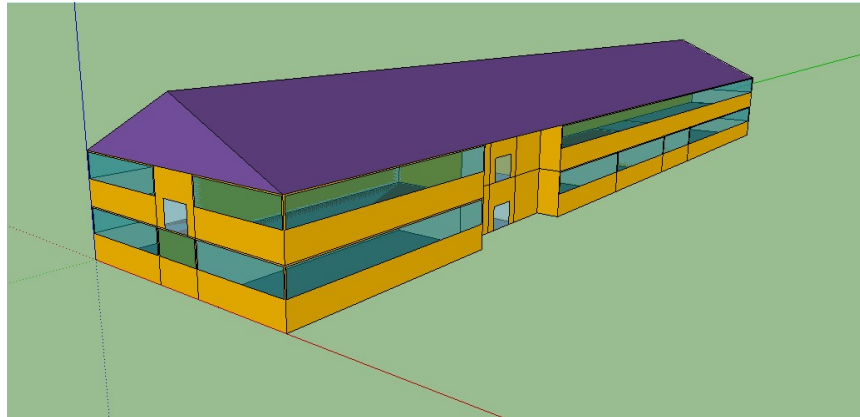


Figura 8 Modelado en 3D mediante SketchUp del edificio Isaac Peral. Elaboración propia

- Simplificar al máximo la geometría tanto del edificio en sí como de sus zonas térmicas. Esto no quiere decir que se deban reducir las zonas térmicas a un número mínimo si significa que se estén sacrificando zonas intermedias que son dignas de estudio. TRNSYS3D tiene serios problemas a la hora de identificar las adyacencias de las distintas zonas térmicas que forman parte del edificio en cuestión, por tanto, siempre es recomendable que las mismas sean volúmenes regulares, que no abarquen otros volúmenes dentro de ellas.
- A la hora de definir una nueva zona térmica siempre se empieza seleccionando un punto de partida o referencia del cual se expande el volumen que posteriormente constituirá la zona térmica. Pues bien, estos puntos de partida deben estar perfectamente en contacto con el vértice adyacente de la zona térmica contigua ya que, en caso de no coincidir un vértice con otro, al importar el fichero. idf el programa de TRNBuild tipificará un error de adyacencia no encontrada.

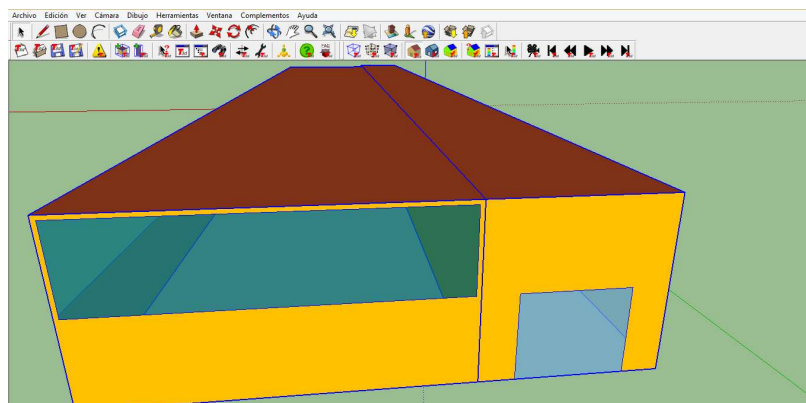


Figura 9 Detalle de dos zonas térmicas adyacentes. Elaboración propia

- Es importante no mostrarse temeroso ante el número de zonas térmicas creadas. Puede que a la hora de definir todos los parámetros que poseen las zonas térmicas en TRNBuild sea más rápido y sencillo cuantas menos zonas existan, sin embargo, el número de zonas térmicas es totalmente independiente de la correcta operatividad y precisión del software. Es decir, si se configura y maneja bien el software, no se deben cometer mayor número de fallos por la existencia de más zonas térmicas
- Una buena práctica para la detección de fallos es importar sucesivas veces el archivo volcado como input de TRNSYS al TRNBuild conforme se vaya avanzando en el mismo.

1.5.3 TRNSYS Simulation Studio

Simulation Studio supone el entorno de programación de TRNSYS. Sobre él se asientan todas las funciones del programa. Tal y como viene reflejado en la documentación de ayuda del mismo, Simulation Studio es un paquete de simulación completa que contiene diversas herramientas, desde programas motores de simulación y programas de conexión gráfica, hasta software de impresión y hojas de cálculo. Es una herramienta integrada que puede ser usada desde el diseño de un proyecto a su simulación.

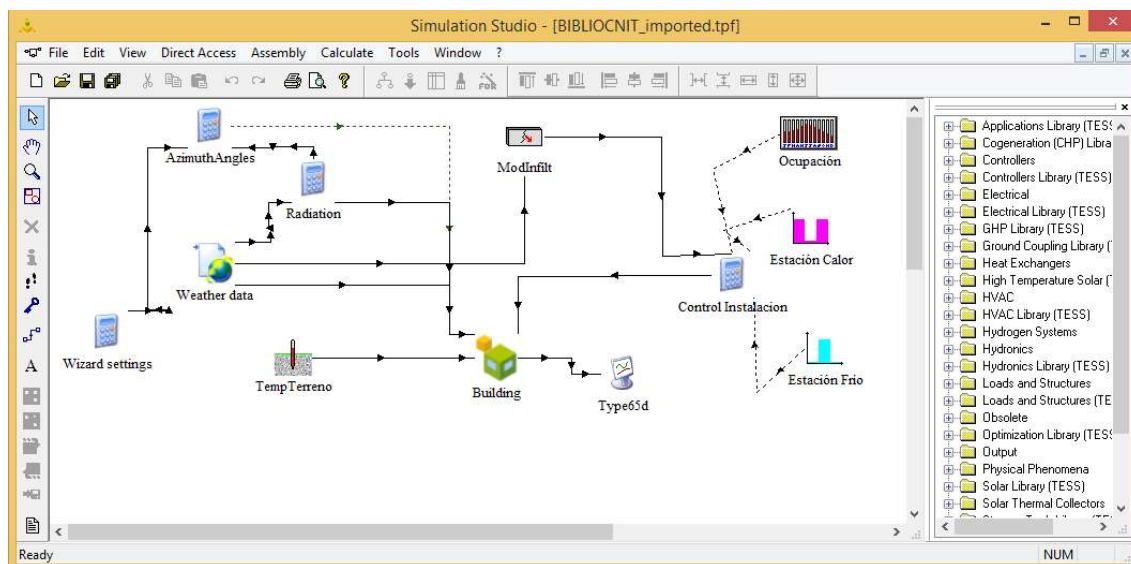


Figura 10 Interfaz de usuario de TRNSYS Simulation Studio. Elaboración propia

En este entorno se trabaja con distintos elementos:

- En primer lugar, están los parámetros de entrada o inputs, los cuales se configuran y definen previamente una vez se han implementado en el entorno de trabajo. Existe un gran número de inputs distintos, los cuales se pueden combinar entre ellos para conseguir un input que combine las propiedades de varios al mismo tiempo. Estos inputs sirven para definir las condiciones de trabajo del edificio, controlar el equipamiento de la instalación, añadir a la simulación datos de temperatura y/o radiación anual, que se conectan a otros componentes.

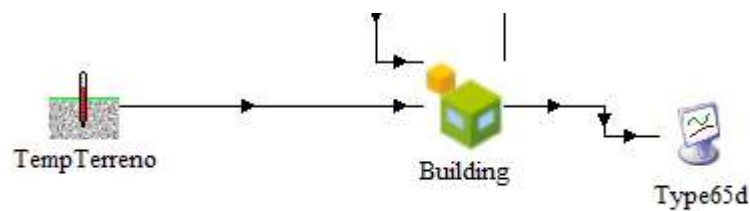


Figura 11 Detalle de los inputs de los que se compone Simulation Studio. Elaboración propia

- De los componentes salen los llamados outputs, que son los parámetros de salida de los componentes, tras procesar los outputs y realizar las operaciones correspondientes según la naturaleza de los mismos.
- Los parámetros son los valores que configuran el comportamiento de un input, un output o un componente.
- Las ecuaciones son controladores que se implementan al espacio de trabajo para realizar operaciones con los inputs y convertirlos en outputs

Los outputs, a su vez, pueden ser utilizados de nuevo como inputs de otro componente sucesivas veces. Según la configuración del espacio de trabajo del Simulation Studio, se podrán definir en mayor o en menor medida la definición térmica del edificio, así como la configuración de la operación de la instalación.

El núcleo central del espacio de trabajo es el controlador que constituye el parámetro del edificio. Su input principal es el archivo. idf que se habrá importado desde el diseño en 3D realizado por SketchUp con el plugin de TRNSYS3D. Sin embargo, se le pueden añadir más inputs, tales como los referentes a su sistema de calefacción, su ocupación, su modelo de infiltraciones, los datos meteorológicos de su emplazamiento, entre otros.

Los outputs extraídos del componente del edificio se pueden introducir como inputs en aquellos controladores que permiten visualizar las simulaciones en forma de gráficas, e incluso, volcarlas en un documento de texto para la utilización de sus valores en Excel, por ejemplo.

Aquellos que se pueden extraer para el estudio de la simulación del edificio son los siguientes:

- Temperatura de aire: de cualquiera de las zonas térmicas seleccionada para su salida en el plot generado por TRNExe, el cual es el motor que genera las gráficas de resultados tras las simulaciones.
- QSens: es uno de los parámetros más importantes a extraer de la simulación en sus primeras iteraciones antes de llegar a la aproximación final. QSens representa el calor que es necesario aportar para que la zona térmica en cuestión alcance la temperatura de consigna deseada. Haciendo un paralelismo entre este calor a aportar y la energía que ello conlleva es como se dimensiona la potencia total que debe suministrar la calefacción del edificio.

Un valor negativo de QSens estará notificando al usuario que se debe aportar calor a la zona para alcanzar la temperatura de consigna deseada, mientras que un valor positivo indica que se debe ceder el calor de la zona para lograr el mismo objetivo.

Como se ha expuesto anteriormente, este valor se utiliza en el proceso iterativo de dimensionamiento de la instalación. Este proceso se puede realizar gracias a que en TRNBuild es posible definir un sistema de calefacción como de “potencia ilimitada”. Una vez calculado el pico de potencia máximo necesario para abastecer la demanda energética el resto del año, se dimensiona la instalación teniendo en cuenta dicho pico.

Todos los controladores están incluidos en una librería implementada en el programa que además se puede aumentar con la descarga de una librería adicional creada por los desarrolladores del mismo, TESS o Thermal Energy System Specialists.

1.5.4 TRNBuild

TRNBuild supone el motor sobre el cual se asienta la configuración de los parámetros correspondientes a la configuración de las distintas zonas térmicas. Dicha configuración se basa en la definición de los distintos materiales de la geometría de las zonas, la implementación de un sistema de calefacción o refrigeración, la inserción de un modelo de infiltraciones, etc.

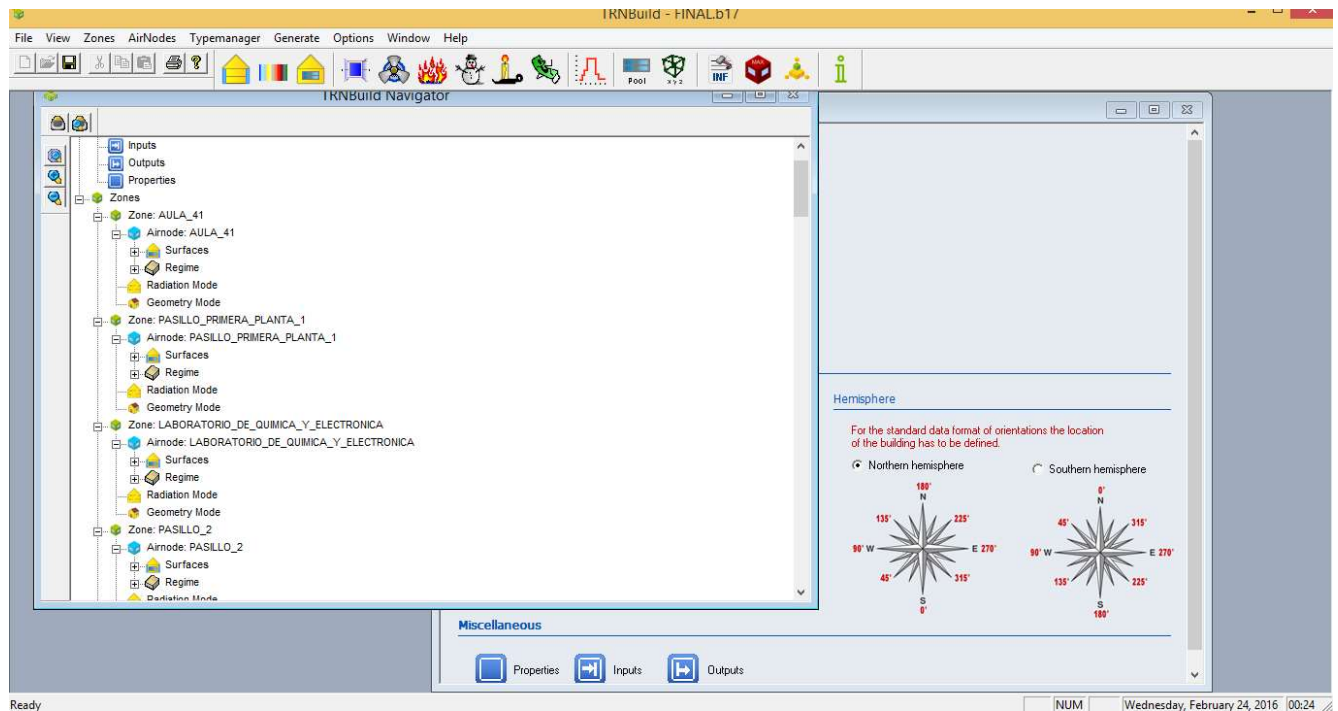


Figura 12 Interfaz de usuario de TRNBuild. Elaboración propia

En primer lugar, en este software se pueden crear nuevos inputs que podrán servir como vías de entrada de los inputs del Simulation Studio, es decir, se puede crear un nuevo input con el que controlar el termostato de la caldera del edificio para introducirlo en Simulation Studio y así no configurarlo en TRNBuild.

Esta operación se puede realizar con todos y cada uno de los parámetros que se pueden configurar en este software. Sin embargo, su utilización es crucial para la definición de los materiales de aislamiento de los cerramientos del edificio.

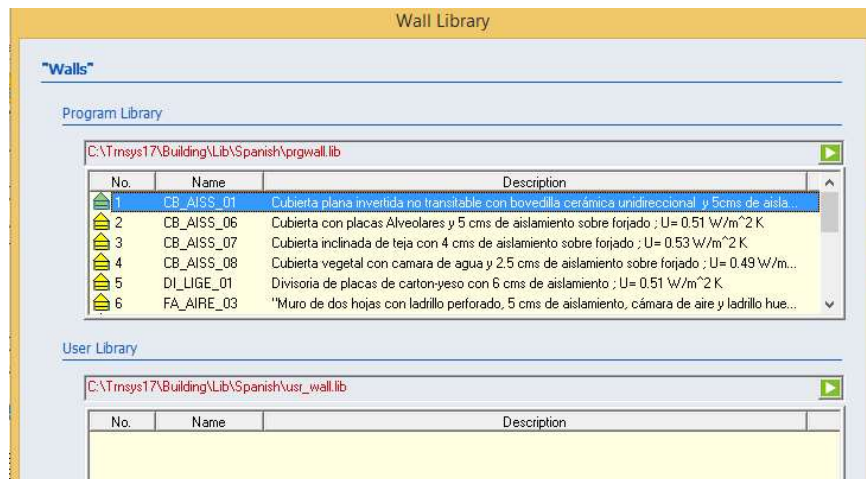


Figura 13 Librería de TRNBuild de los diferentes aislantes a escoger por el usuario. Elaboración propia

En el software están incluidos en su librería una serie de cerramientos tipo, que ya están configurados en cuanto a sus materiales y el espesor de los mismos, y ofrecen datos sobre su conductividad térmica, así como de su composición.

El propio software identifica las zonas térmicas adyacentes entre sí, siempre y cuando el archivo .idf importando no presente errores, lo cual ofrece cierta facilidad a la hora de definir muros y cubiertas que presentan adyacencias en dos zonas distintas, puesto que al detectar la adyacencia el propio software configura la superficie divisoria por sí mismo.

La configuración de los componentes materiales de cada superficie de cada zona térmica es el proceso obligatorio para que una simulación funcione correctamente durante la simulación, ya que es el único parámetro que no es controlable desde el entorno de trabajo de Simulation Studio.

No obstante, la configuración de los parámetros que condicionan la temperatura de las distintas zonas térmicas es mucho más rápida e intuitiva utilizando las herramientas que TRNBuild ofrece al usuario, aunque estas deban ser editadas zona por zona, lo que puede ser un proceso tedioso para aquellos usuarios que posean un gran número de zonas térmicas.

En la pestaña *Typemanager* o en cualquiera de los botones de su barra de herramientas estos parámetros pueden ser definidos, uno a uno, pero deben serlo en cada zona.



Figura 14 Herramientas de TRNSYS para definición térmica de las distintas zonas de climatización. Elaboración propia

Lo primero a tener en cuenta es el modelo de infiltraciones que se pretenda implementar en cada zona. Este valor define el número de renovaciones de aire a la hora debidas a la falta de estanqueidad de la zona en cuestión, y puede definirse a través de infinidad de modelos matemáticos distintos. Si se desea implementar el modelo de infiltraciones desde TRNBuild, este deberá estar apoyado en otra herramienta para el cálculo de renovaciones de aire a la hora. En este sentido, existe una aplicación web basada en el software certificado Lider-Calener para cálculo de este tipo de parámetros en la que, introduciendo datos como el volumen de la zona térmica y el área de sus cubiertas, sus techos y sus ventanas, se obtiene el dato a introducir en la pestaña *Infiltrations* de TRNBuild. Dicha aplicación ofrecida por Aurea Consulting respalda su cálculo en los estándares impuestos por el Código Técnico de Edificación en su Documento Básico HE.

Airchange of Infiltration [1 / h]

Airchange of Infiltration [1 / h]

☒ Constant Value ☐ Input ☐ Schedule

Constant Value

0.162

Information

Please, enter the airchange of infiltration.

✓ ✕

Figura 15 Ventana de herramienta de introducción del modelo de infiltraciones. Elaboración propia

Todos los parámetros restantes son equivalentes en funcionamiento, variando la naturaleza de los valores clave que habrán de ser introducidos por el usuario para definir los diferentes parámetros. Todos ellos son, además de las citadas infiltraciones:

- Ventilación
- Calefacción
- Refrigeración
- Confort
- Ganancias

La opción de ventilación permite al usuario configurar el sistema de ventilación ya instalado, o aquel que se pretenda instalar. Los valores a introducir son, o bien la tasa de renovaciones de aire por hora, o bien la ratio de flujo másico del aire. A su vez, es posible definir la temperatura del aire y su humedad.

Ventilation Type Manager

"Ventilation Type" Manager

ventilation type: VENT001

AirFlow

☒ air change rate 1/h

☐ mass flow rate

Temperature of Air Flow

☒ outside

☐ other

Humidity of Air Flow

☒ relative humidity

☐ absolute humidity

☒ outside

☐ other

✓ ✗

RDCN

Figura 16 Ventana de la herramienta para la configuración de la ventilación. Elaboración propia

Las pestañas de calefacción y refrigeración son, aunque opuestos en cuanto a su cometido, equivalentes en su configuración. Ambas permiten definir el comportamiento del sistema de calefacción/refrigeración instalados en el edificio (o a instalar en el mismo). El valor más importante a introducir es el de la temperatura de consigna que se desea mantener, por tanto, habrá de existir tantas configuraciones de calefacción/refrigeración como temperaturas de consigna haya en el edificio.

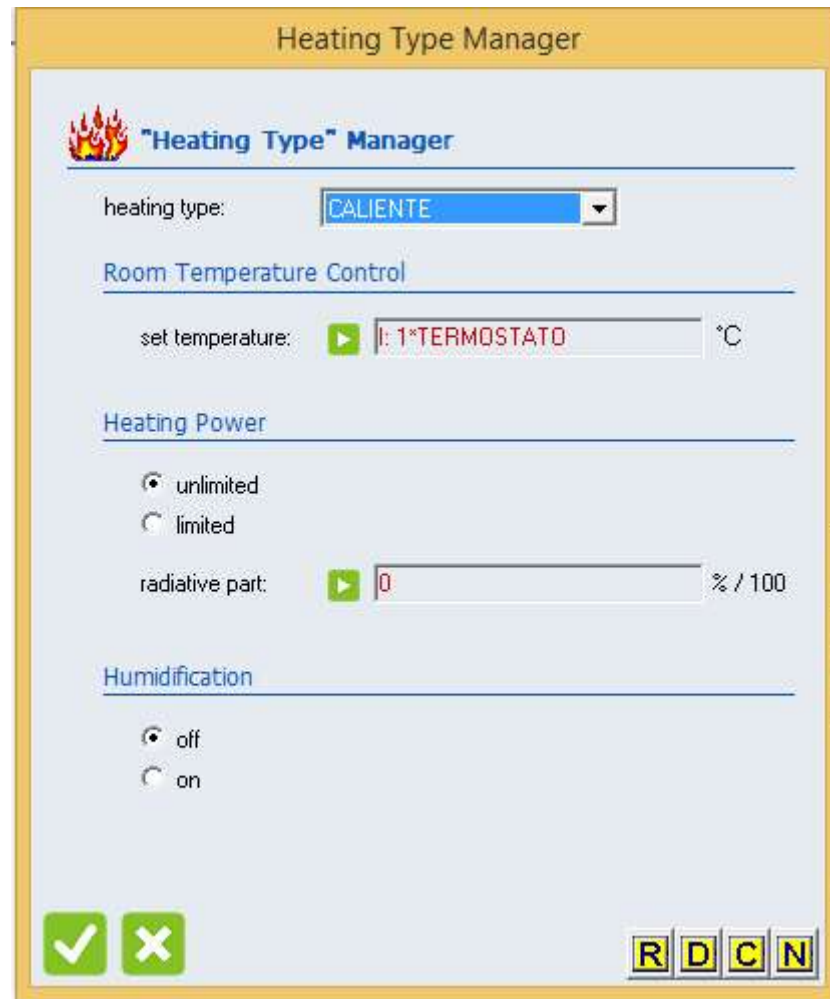


Figura 17 Ventana de configuración del sistema de calefacción. Elaboración propia

Por otra parte, se encuentra el controlador de las ganancias de la zona a configurar. Este controlador trata de calcular las ganancias caloríficas que producen la presencia de luz artificial, las personas que ocupan la zona en cuestión, y la existencia de equipos informáticos en funcionamiento. Todas estas ganancias serán explicadas más adelante.

El último de los controladores es el de confort. En él se implementan los valores establecidos en la fórmula de Fanger para el cálculo del porcentaje de personal insatisfecho o satisfecho con la temperatura de confort de cada zona. Dichos valores son la conductividad de la ropa del personal presente, la propia temperatura de consigna, el coeficiente metabólico de estas personas, la existencia o no de trabajo y la velocidad relativa del aire.

Todos estos factores que definen térmicamente una zona serán explicados en mayor profundidad más adelante.

Una vez configuradas todas las zonas, el archivo en el que quedan volcados todos estos datos sirve de output en Simulation Studio para su posterior tratamiento a base de plotters con los que visualizar los resultados o imprimirlos en un fichero para su tratamiento en otra aplicación (Microsoft Excel, por ejemplo).

1.5.5 TRNExe

TRNExe es el entorno informático de TRNSYS sobre el que se corren las simulaciones programadas con el software anteriormente expuesto. Una vez se corre la simulación en Simulation Studio, es el propio TRNSYS el que abre el TRNExe para empezar a representar la simulación en una gráfica que debe haberse configurado con anterioridad, pudiendo abarcar en sus ejes lo que el usuario desee. La representación proporcionada posee un número limitado de valores a representar, por lo que para representar más valores de los que se ofrece en el plotter de Studio, se habría de realizar simulaciones complementarias.

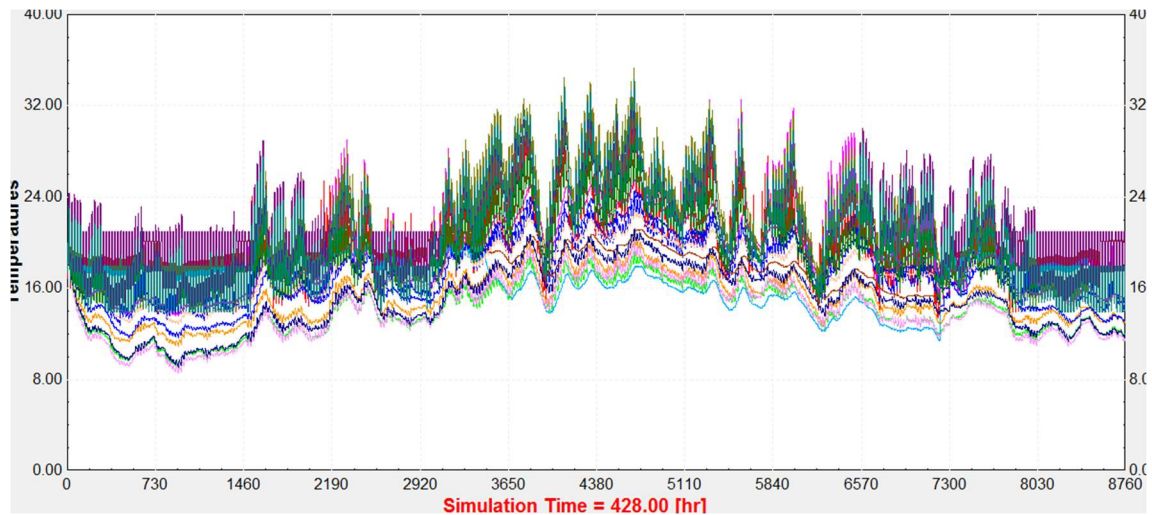


Figura 18 Salida de datos en TRNExe. Elaboración propia

2 ANTECEDENTES

2.1 Climatización

Los sistemas de climatización son el conjunto de tecnologías que permiten controlar aquellos factores que determinan el confort ambiental para las personas que habitan un edificio. Estos pueden incluir sistemas de calefacción, refrigeración, ventilación o todos al mismo tiempo.

En general, cualquier proceso de climatización puede entenderse como el proceso de transformación de unas propiedades del aire existente en una zona determinada en otras distintas, lo cual se consigue añadiendo o retirando una cantidad determinada de calor y/o de agua de ese mismo aire.

Por tanto, se puede extrapolar de lo anterior que existen 4 procesos principales por los cuales se puede realizar un proceso de climatización:

- Calentamiento
- Enfriamiento
- Humidificación
- Deshumidificación

2.2 Fundamentos básicos de climatización

2.2.1 Humedad absoluta y relativa

Llegados a este punto, es necesario recalcar que el aire atmosférico no es un aire seco, sino que es un aire que contiene una cantidad de vapor de agua que varía considerablemente dependiendo del clima, zona geográfica, etc. Sin embargo, la cantidad de vapor de agua presente en el aire es escasa, en cualquier caso, pero aun así tiene una gran importancia desde el punto de vista del confort humano.

En los procesos habituales de climatización, el aire puede ser visto como la mezcla de dos gases, el aire seco y el vapor de agua, que dan como resultado el aire húmedo. Por tanto, se pueden calcular las propiedades del aire húmedo a través de la ley de las presiones parciales de Dalton y la ley de los gases ideales.

Usando la ley de Dalton se pueden determinar las presiones parciales de aire seco y vapor de agua:

$$P_{atm} = P_a + P_v$$

Donde el subíndice a hace referencia al aire seco y el subíndice v , al vapor de agua existente en la mezcla. A su vez, las presiones parciales de los gases pueden ser calculadas con la fórmula de los gases ideales para un volumen específico:

$$P_a \cdot V = m_a \cdot R_a \cdot T$$

$$P_v \cdot V = m_v \cdot R_v \cdot T$$

Estas ecuaciones son importantes porque a partir de ellas es posible calcular uno de los factores del aire más determinantes a la hora de establecer un confort ambiental en una zona climatizada: la humedad. La humedad puede ser específica o absoluta, o relativa.

La humedad específica o absoluta, w , es aquella conocida como el cociente entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco:

$$w = \frac{m_v}{m_a}$$

La unidad en la que se mide esta humedad es el kilogramo de vapor de agua por kilogramo de aire seco: kg/kg_a . Sin embargo, como se ha visto antes, la cantidad de vapor de agua presente en el aire húmedo no es muy significativa en comparación con la cantidad de aire seco, los gramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco (g/kg_a) son comúnmente utilizados para definir este valor.

La humedad relativa, ϕ , se define como la masa de vapor de agua existente en el aire húmedo y la masa que podría contener el mismo aire, estando saturado. Se dice que el aire está saturado cuando alcanza un punto de humedad tal que, disminuyendo su temperatura más allá de ese punto de saturación se produciría un cambio de fase debido a la condensación. A esta temperatura límite situada en la curva de saturación se le conoce como temperatura de rocío.

$$\phi = \frac{m_v}{m_{sat}}$$

El valor de la humedad relativa está acotado entre los valores 0 y 1, por lo que se representa a través de un tanto por ciento:

$$0 \leq \phi \leq 1$$

Ambas humedades pueden ser calculadas haciendo una relación entre sus masas y sus presiones:

$$w = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{P_v / R_v}{P_a / R_a} = 0,622 \frac{P_v}{P_a}$$

$$\phi = \frac{m_v}{m_{sat}} = \frac{P_v V / R_v T}{P_{sat} V / R_v T} = \frac{P_v / R_v}{P_{sat} / R_v} = \frac{P_v}{P_{sat}}$$

La humedad relativa es un valor de gran importancia en la consecución del confort térmico puesto que, con una humedad relativa elevada, el sudor tendrá mayor dificultad para evaporarse y por tanto la sensación de calor de la persona en cuestión aumentará considerablemente, lo que le hace salir fuera de la zona de confort. Si por el contrario la humedad relativa es muy baja, la humedad del cuerpo humano se evaporaría con facilidad, lo que provoca sequedad en los ojos y las mucosas nasales, que vuelve a provocar insatisfacción.

2.2.2 Calor específico

El calor específico de una sustancia se define como la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa un grado Kelvin. Existen dos tipos de calores específicos: el calor específico a presión constante y el calor específico a volumen constante, dependiendo de la naturaleza del proceso. Los procesos de climatización se realizan a presión constante por lo que el

calor específico a presión constante, c_p , es el valor que tiene mayor relevancia en el dimensionamiento de un sistema de climatización.

El calor específico depende de la temperatura, pero los cambios carecen de relevancia por lo que se permite despreciarlos. La energía transferida a un fluido, q , para variar su temperatura, se puede calcular como:

$$q = m \cdot c_p \cdot \Delta t$$

2.2.3 Entalpía

La entalpía es una propiedad termodinámica que se define como la transferencia de calor por unidad de masa en un sistema a presión constante, por lo que se mide en J/kg en el Sistema Internacional.

La propia definición de la entalpía clarifica que el aspecto importante de la entalpía es su variación, por lo que para su cálculo se suele utilizar una temperatura de referencia sobre la que se compara con la temperatura de consigna deseada, para observar su variación. Normalmente cada fluido posee su propia temperatura de referencia para el cálculo de la variación de entalpía, y en el caso del agua es $0^{\circ}C$.

$$h_w = c_{pw} \cdot (t^a - 0^{\circ}C) = c_{pw} \cdot t$$

2.2.3.1 Entalpía de aire seco y vapor de agua

En el intervalo de temperaturas en el que ocurren los procesos de climatización, entre $-10^{\circ}C$ y $50^{\circ}C$ aproximadamente, se puede considerar que el calor específico del aire seco a presión constante es de $1kJ/kgK$. Con esta aproximación se comete un error de alrededor del 0,5%, pero para mayor exactitud existen tablas tabuladas en las que se especifican los valores del c_{pa} para distintas temperaturas.

$t(^{\circ}C)$	$c_{pa} (kJ/kg^{\circ}C)$
-10	1.0038
0	1.0041
10	1.0045
20	1.0049
30	1.0054
40	1.0059

Tabla 1 Evolución del calor específico frente al incremento de temperatura. Fuente: UPM

Tomando la temperatura de $0^{\circ}C$ como referencia se puede calcular la entalpía del aire seco de la siguiente manera:

$$h_a = c_{pa} \cdot (t - 0^{\circ}C) = c_{pa} \cdot t$$

Por otra parte, si se considera que el vapor de agua se comporta como un gas ideal, se puede calcular su entalpía como:

$$h_v = L_{v0} + c_{pv} \cdot t$$

Siendo L_{v0} el calor latente de vaporización del agua a 0°C . El valor medio del calor específico del vapor de agua a presión constante entre -10° y 50°C puede tomarse como $1,82\text{kJ/kgK}$. Por lo tanto, la entalpía del vapor de agua puede ser calculada como:

$$h_v = 2501 + 1,82 \cdot t$$

2.2.4 Diagrama sicrométrico

Con las ecuaciones reflejadas anteriormente es posible calcular todas las magnitudes de las propiedades presentes en el aire de una zona a climatizar. No obstante, este cálculo es tedioso y por ello la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* o ASHRAE, construyó una herramienta para hacer estos cálculos menos laboriosos.

En concreto esta herramienta es el denominado diagrama sicrométrico de la ASHRAE, el cual representa en un gráfico los valores de saturación, temperatura, punto de rocío, humedad y entalpía del aire.

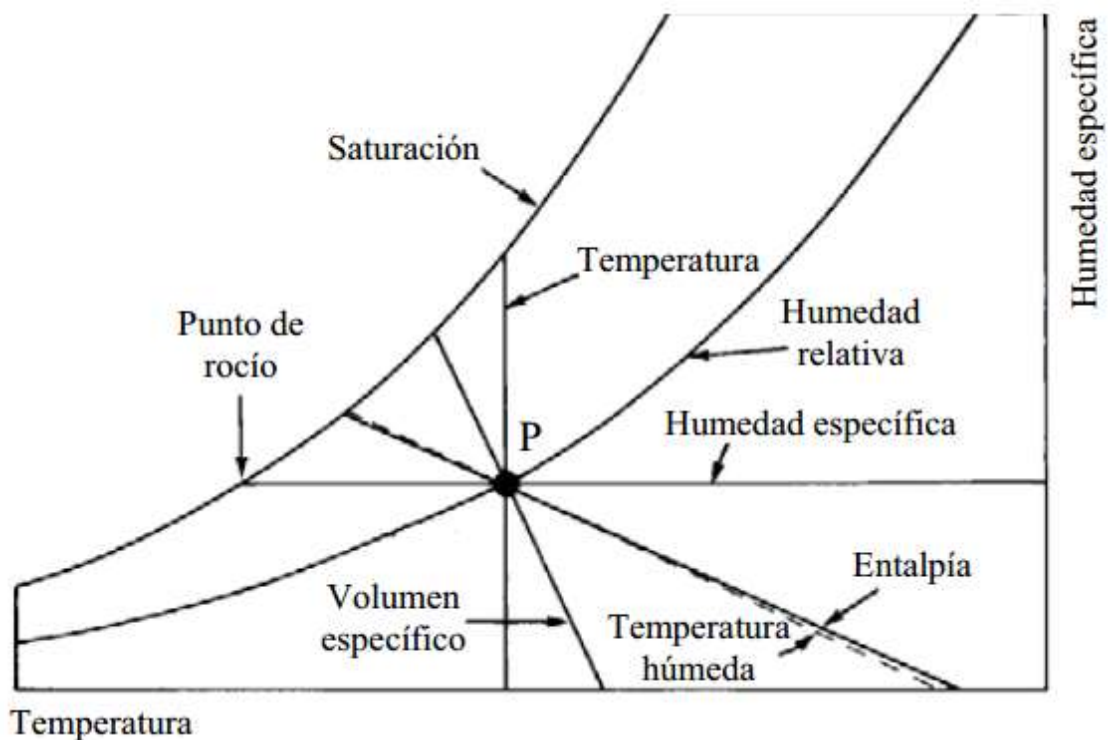


Figura 19 Ejemplo de diagrama sicrométrico y sus componentes. Fuente: UPM

2.3 Procesos básicos de climatización

Como se ha expuesto en el punto 2.1, existen 4 procesos principales con los que es posible climatizar una zona determinada: calentamiento, enfriamiento, humidificación y deshumidificación.

2.3.1 Calentamiento y enfriamiento

Son procesos en los que, manteniendo la humedad absoluta constante, se varía la temperatura del aire de la zona a climatizar. Este tipo de procesos se produce con la introducción en la zona de un radiador eléctrico, por ejemplo.

Estos procesos se representan en el diagrama psicrométrico como rectas horizontales puesto que, como ya se ha dicho, se varía la temperatura manteniendo la humedad específica o absoluta constante. No obstante, hay que tener en cuenta que la humedad relativa sí que sufre variaciones, aumentando con el enfriamiento y disminuyendo con el calentamiento.

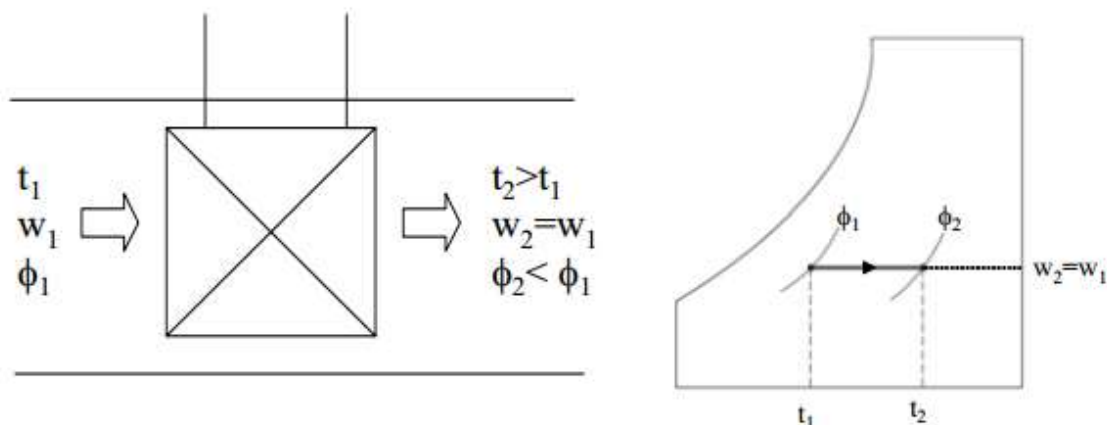


Figura 20 Representación gráfica del proceso de calentamiento sensible. Fuente: UPM

Como ya se ha expuesto, la humedad relativa es un factor muy importante en la consecución del confort térmico, por lo que normalmente estos procesos van acompañados de otro proceso adicional para evitar la variación excesiva de la humedad relativa, que podría provocar exceso de humedad o sequedad en la zona dependiendo del proceso que se esté produciendo.

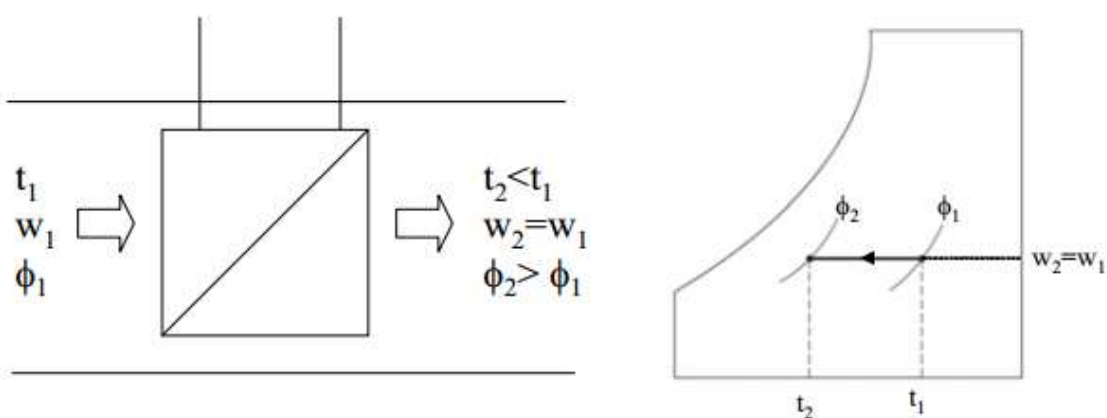


Figura 21 Representación gráfica del proceso de enfriamiento sensible. Fuente: UPM

2.3.2 Calentamiento y humidificación

Como ya se ha mencionado, el calentamiento de una zona por sí solo provoca que la humedad relativa disminuya en el ambiente. Este descenso de la humedad relativa puede provocar una sequedad excesiva en las zonas más sensibles del cuerpo humano, como las mucosas nasales o los ojos, disminuyendo así la sensación de confort.

Por tanto, los procesos de calentamiento suelen ir acompañados de un proceso de humidificación a modo de compensación de este descenso de la humedad relativa. El procedimiento normal para conseguir esta compensación consiste en la colocación de un humidificador tras la batería de calentamiento de la unidad climatizadora.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que, dependiendo del procedimiento seguido para conseguir la humidificación, la temperatura del aire variará con respecto a la temperatura de salida de la batería de calentamiento ya que, al atravesar este aire una zona donde se pulveriza agua, esta agua utiliza parte del calor del aire para la obtención de su calor latente de vaporización lo que da como resultado el descenso de la temperatura del aire.

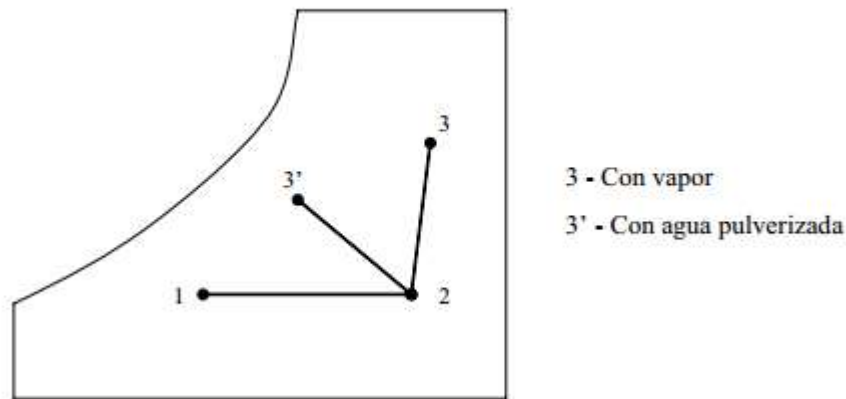


Figura 22 Representación del proceso de calentamiento y humidificación.
Fuente: UPM

Para compensar este inconveniente se puede, o bien sobrecalentar el aire antes de la entrada en la zona de humidificación, o bien postcalentar el aire obtenido a la salida del humidificador. Con el fin de evitar complicaciones, se suele humidificar el aire con vapor sobrecalentado, el cual cede parte de su calor al aire precisamente por estar sobrecalentado, lo que se traduce como un ligero aumento de la temperatura del aire tras el proceso de humidificación.

2.3.3 Enfriamiento y deshumidificación

Normalmente en los sistemas de climatización los procesos de enfriamiento tienen la doble funcionalidad de enfriar y deshumidificar el aire. Para ello la temperatura de las baterías de enfriamiento de estas instalaciones debe ser inferior a la temperatura del punto de rocío del aire de la zona a climatizar, a fin de provocar la condensación del aire al pasar por la propia batería.

En un proceso ideal de enfriamiento, el aire se enfría hasta llegar a la curva de saturación y descender siguiéndola. Sin embargo, en la realidad esto no ocurre debido a que parte del aire no se ve afectado por el enfriamiento y mantiene sus propiedades psicrométricas. Este hecho provoca que no se llegue a alcanzar la curva de saturación ($\phi=100\%$) sino que se llegue a estar muy cerca. La proporción de aire que no se ve afectado por el enfriamiento se calcula mediante un parámetro llamado *Factor de by-pass*, FB, con el cual se puede calcular la temperatura de salida del aire de una batería de enfriamiento mediante la siguiente expresión matemática:

$$t_2 = (1 - FB) \cdot t'_2 + FB \cdot t_1$$

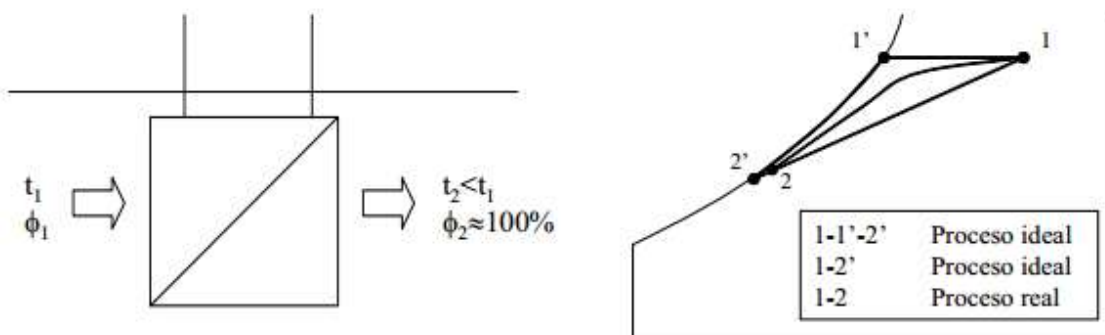


Figura 23: Representación gráfica del proceso de enfriamiento y deshumidificación. Fuente: UPM

Puede ocurrir que lo que se desee es reducir la humedad de una zona determinada, sin reducir su temperatura. Para ello es necesario realizar un proceso de enfriamiento seguido de uno de calentamiento, el cual es el habitual en aquellas instalaciones en que la batería de enfriamiento tiene la doble función de enfriar y deshumidificar el aire.

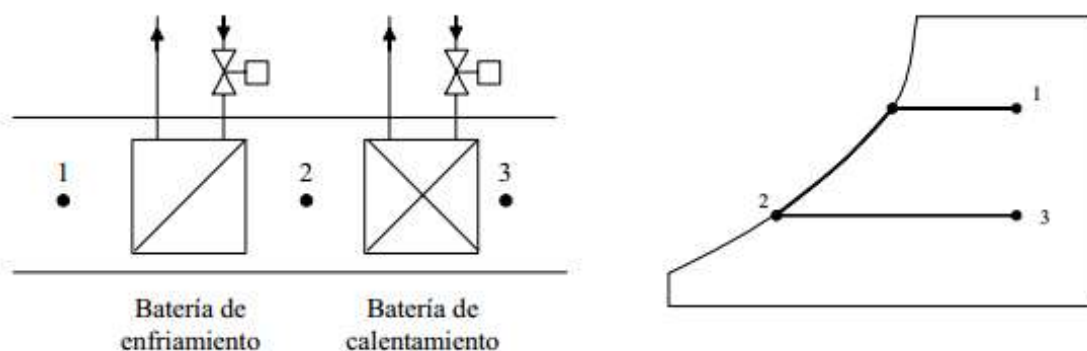


Figura 24 Representación gráfica del proceso de deshumidificación con calentamiento. Fuente: UPM

2.3.4 Enfriamiento por evaporación

Cuando el agua se evapora absorbe el calor latente de vaporización del resto del agua que permanece líquida y del entorno. Este fenómeno ha sido aprovechado a lo largo de la historia para provocar el enfriamiento por evaporación, como por ejemplo en el mecanismo de enfriamiento del agua en un botijo.

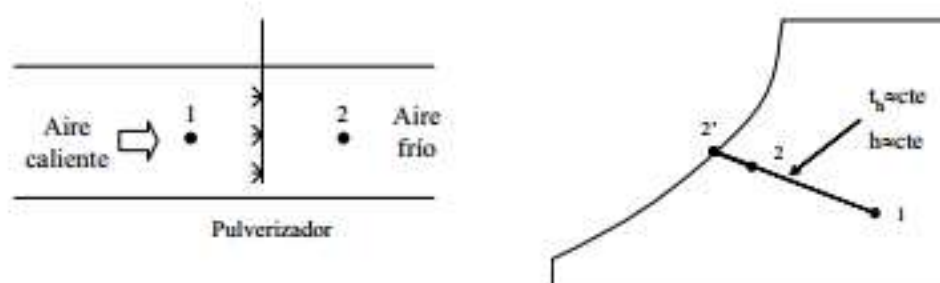


Figura 25 Representación gráfica del proceso de enfriamiento por evaporación. Fuente: UPM

Este proceso sigue una recta de entalpía constante, hasta llegar al punto de rocío del agua. El mecanismo es relativamente sencillo: se hace circular el aire caliente por un conducto donde está instalado un pulverizador, al pasar el aire por la zona pulverizada con agua, parte del agua se evapora

absorbiendo el calor del aire, por lo que el aire resultante se encuentra a una temperatura inferior a la de entrada en el pulverizador.

2.3.5 Mezcla adiabática de corrientes de aire

Muchas instalaciones de climatización requieren la mezcla de dos corrientes de aire: una corriente de recirculación y otra del exterior o de ventilación. La mezcla de ambas corrientes se consigue mediante la unión de ambas en un punto del circuito. Que la mezcla sea adiabática no quiere decir otra cosa que se desprecia el intercambio de calor con el exterior, por lo que las condiciones psicrométricas de la mezcla se pueden calcular con los balances de energía y masa:

- $\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3}$, para el balance de masa de aire seco
- $\dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} = \dot{m}_{v3} \rightarrow w\dot{m}_{v1} + w\dot{m}_{v2} = w\dot{m}_{v3}$, para el balance de masa de vapor de agua
- $\dot{m}_{a1}h_1 + \dot{m}_{a2}h_2 = \dot{m}_{a3}h_3$, para el balance de energía

Sustituyendo la primera ecuación con las dos siguientes se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a2}} = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1}$$

En el diagrama psicrométrico, las condiciones de la mezcla son la resultante de la suma de ambas condiciones, es decir, si la mezcla se produce a partes iguales, el aire resultante poseerá unas condiciones psicrométricas que se encuentran en el punto medio de la unión de ambas condiciones iniciales.

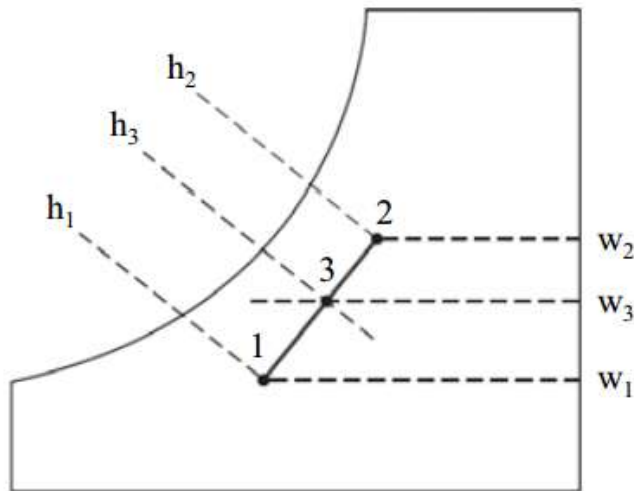


Figura 26 Representación gráfica de la mezcla adiabática de corrientes de aire. Fuente: UPM

La temperatura de la mezcla se puede calcular atendiendo a la proporción de cada corriente de aire:

$$\frac{\dot{m}_{a1}}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}} \cdot t_1 + \frac{\dot{m}_{a2}}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}} \cdot t_2 = t_3 \rightarrow t_3 = t_1 \cdot X_1 + t_2 \cdot X_2$$

Donde X_1 y X_2 son las proporciones relativas de cada corriente de aire en la corriente resultante.

2.4 Carga térmica

La carga térmica son las ganancias o pérdidas de calor que se producen en una zona a climatizar. Esta se puede descomponer en dos partes, por una parte, en carga sensible, que es aquella debida a la diferencia de temperaturas, y, por otro lado, la carga latente, que es aquella provocada por la diferencia de humedad. También es posible diferenciar las cargas térmicas atendiendo a su procedencia. De esta manera, las cargas térmicas pueden ser internas o externas.

Las cargas externas son aquellas debidas a la transmisión de calor al exterior a través de las paredes y techos de una zona climatizada. En invierno, se cederá calor al exterior puesto que la zona térmica se encontrará a menor temperatura que el exterior, o al menos es lo que se pretende. A su vez, la ganancia de calor debida a la radiación solar a través de los muros y las zonas acristaladas constituye también una ganancia externa, así como la entrada de aire del exterior en la zona ya sea por infiltraciones o por ventilación.

Todas estas cargas externas debidas a la ganancia o cesión de calor constituyen a su vez cargas sensibles puesto que se están produciendo diferencias de temperatura con el exterior. La entrada de aire en la zona térmica constituye en sí misma una doble carga sensible y latente, debido a la temperatura del aire que entra del exterior y su humedad, que puede ser distinta a la humedad relativa del aire del local climatizado.

La carga interior es la suma de todas las ganancias de calor aportadas por las personas que se encuentren en el interior del local climatizado, la iluminación artificial en funcionamiento y los equipos que se encuentren operando en la misma, como por ejemplo ordenadores, impresoras, equipos de proyección, entre otros.

2.5 Infiltraciones

En general, las infiltraciones de aire son aquellas entradas de aire del exterior que se producen en una zona térmica, sobre las que no se tiene control positivo. Es decir, si en una zona a climatizar existen grietas o fisuras, se estarán produciendo una serie de renovaciones de aire debidas a la entrada del aire del exterior por esas mismas fisuras, que no pueden ser controladas, al contrario que la tasa de renovación de aire por hora de un sistema de ventilación.

La presencia de infiltraciones produce un aumento de la demanda de calefacción para compensar estas cargas negativas debido al calor tanto latente como sensible, cedido al aire que está infiltrándose en la zona climatizada. Además, son un factor a tener en cuenta debido a que no es necesaria la presencia de grietas o fisuras para que se produzcan, sino que se producen a través de puertas y ventanas.

La medida con la que se cuantifican las infiltraciones es la tasa de renovación de aire por hora, $1/h$ o ach , y es un dato que se obtiene teniendo en cuenta los huecos de la edificación, la permeabilidad de sus huecos, su área de techado y su área de puertas. Los huecos suelen estar referidos a las zonas acristaladas, ya que el cristal es el mayor enemigo del aislamiento térmico.

El cristal supone un hueco en la permeabilidad del edificio tal, que los radiadores de un sistema de calefacción suelen colocarse debajo de las ventanas para provocar una envolvente térmica que contrarreste el efecto permeable de las mismas.

Los edificios comerciales, de oficinas, institucionales, normalmente disponen de sistemas de ventilación mecánica y son habitualmente presurizadas para reducir o eliminar las infiltraciones. La ventilación mecánica tiene un gran potencial para controlar la renovación de aire cuando el sistema se diseña, se instala y opera correctamente. Las viviendas han utilizado la infiltración y la ventilación natural para cumplir con las necesidades de renovación de aire, pero esto no garantiza una correcta ventilación a lo largo del año, ya que dependerá de las condiciones meteorológicas, del tipo de construcción del edificio y su mantenimiento. De todas formas, la ventilación natural, mediante la

apertura de las ventanas, por ejemplo, permite a los ocupantes controlar la contaminación y la temperatura del aire interior, pero a costa de un alto coste de energía.

En general, la tasa de aire infiltrado depende de los siguientes factores:

- El tamaño y configuración de las grietas
- Las características del flujo de aire a través de la grieta
- La diferencia de presión existente a ambos lados de la grieta
- La diferencia de temperatura entre el aire exterior e interior

Existen infinidad de métodos para el cálculo de la tasa de infiltraciones de un edificio. Uno de los más usados es el método empírico de la prueba de la puerta-ventilador, que consiste en colocar un ventilador frente a una puerta para hacer mediciones del aire filtrado a través de la misma. Este método suele hacerse en nuevas edificaciones o en procesos de remodelación de edificios.

A su vez, existen otros métodos de cálculo, unos más laboriosos que otros, como los modelos de la ASHRAE o el método BRE, en los que se trata de calcular la tasa de infiltraciones a través de fórmulas que tienen en cuenta la presión del aire, su velocidad, etc.

Para simplificar este cálculo, la ASHRAE recomienda el uso de un método semi-empírico utilizado en los cálculos por computación, llamado el método $K_1 K_2 K_3$, en el que cada constante hace referencia a un coeficiente distinto. Respectivamente, estos coeficientes son la tasa de renovación de aire por hora, el coeficiente de temperatura del aire de infiltración y el coeficiente de velocidad del aire exterior.

Estos coeficientes están tipificados por la propia ASHRAE teniendo en cuenta la antigüedad del edificio, y son utilizables en un archivo llamado type571, en el cual se introduce, además, el volumen de la zona térmica. En concreto este es el método que posteriormente se seguirá para el cálculo de las infiltraciones en el edificio Isaac Peral.

Construction	K1	K2	K3	Description
	ach	ach/C	ach·s/m	
Tight	0.1	0.011	0.034	New building in which special precautions have been taken to prevent infiltration
Medium	0.1	0.017	0.049	Building constructed using conventional construction procedures
Loose	0.1	0.023	0.070	Evidence of poor construction or older

Tabla 2 Ponderación de los valores de K_1 , K_2 y K_3 según las características del edificio. Fuente: ASHRAE

2.6 Teoría de confort

A la hora de dimensionar un sistema de climatización que abastezca un edificio, es necesario tener en cuenta que la temperatura que se quiera mantener en el edificio ha de garantizar una sensación de confort para las personas que se encuentren dentro de dicho edificio.

La búsqueda del confort es algo inherente a la naturaleza humana, y el confort térmico no iba a ser menos. La sensación de confort térmico para un ser humano depende del equilibrio térmico entre su temperatura y la temperatura que le rodea, además de la humedad y velocidad del viento relativos al mismo.

La consecución de una sensación de confort es tan importante que, concretamente en España existe una normativa general en la que se detallan todos los aspectos a tener en cuenta para lograrla, esta norma es la UNE-EN ISO 7730:2006. En ella se detallan los cálculos a tener en cuenta para estimar el porcentaje de insatisfechos con la sensación térmica de una instalación en concreto.

Existen diversos factores que intentan acotar al máximo algo tan subjetivo y abstracto como la sensación de confort térmico. En primer lugar, se encuentran aquellos factores que son propios de la persona que se encuentra en una zona climatizada. Estos factores propios de la persona son su vestimenta y su metabolismo.

Existe un patrón por el cual se puede definir la conductividad térmica de la ropa, de manera que se le asigna un número dependiendo de si la ropa es más ligera o más abrigada. La tipificación del llamado *clothing factor* proviene principalmente de los ensayos realizados en diversos puestos de trabajo, donde los trabajadores no pueden deshacerse del exceso de ropa en caso de tener sensación de calor.

En cuanto al factor metabólico, existen una serie de patrones que definen en *mets*, la cantidad de energía que una persona consume e irradia al exterior por su consumo dependiendo del trabajo que esté realizando. La norma ISO 7730 introduce algunas tablas tipo sobre las que se puede estimar la cantidad de energía que esas personas aportan como carga térmica positiva al ambiente dependiendo de la naturaleza del trabajo que estén realizando.

Actividad	Tasa metabólica	
	W/m ²	met
Reposo, tendido	46	0.8
Reposo, sentado	58	1.0
Actividad sedentaria (oficina, domicilio, escuela...)	70	1.2
Actividad ligera, de pie (compras, laboratorio...)	93	1.6
Actividad media, de pie (tareas domesticas, trabajo con máquinas...)	116	2.0
Caminar en llano		
2km/h	110	1.9
3km/h	140	2.4
4km/h	165	2.8
5km/h	200	3.4

Tabla 3 Ponderación de las diferentes tasas metabólicas dependiendo de la actividad realizada.
Fuente: UNE-EN ISO 7730

El met es la unidad de medida que se introduce en los diferentes softwares de estudios de climatización y está relacionado con la cantidad de calor emitido por una persona en trabajo sedente por metro cuadrado de piel.

Las herramientas que existen para el cálculo de la sensación de confort térmico en una zona concreta son el voto medio estimado, PMV, y el porcentaje de insatisfechos, PPD. El PMV predice el valor medio de los votos de un gran número de sujetos encuestados sobre su sensación térmica. Para emitir este voto se basa en una tabla de siete niveles que pasan desde el +3 al -3, siendo +3 una sensación de calor excesivo y viceversa. El valor cero representa la zona ideal de confort, puesto que

significa que el votante no tiene ni frío ni calor, lo que quiere decir que su cuerpo está en equilibrio térmico con el ambiente.

Que una persona se encuentre en equilibrio térmico con el ambiente que le rodea quiere decir que la producción interna de calor en su cuerpo es de igual magnitud que la cantidad de calor que su cuerpo cede al ambiente. En un ambiente moderado, un cuerpo en equilibrio térmico es capaz de mantenerse así mediante los mecanismos reguladores propios del ser humano como la sudoración.

Los otros factores que intervienen en la satisfacción o insatisfacción con la sensación térmica con la existencia o no de trabajo físico externo y la velocidad relativa del viento. La velocidad relativa es un factor muy delicado puesto que lo que es una ventilación agradable para personal que esté realizando trabajos ligeros puede ser considerada una corriente de aire indeseada para alguien que esté realizando un trabajo sedentario.

El cálculo del PMV se realiza mediante una serie de expresiones matemáticas complejas que entran dentro del llamado método Fanger para el cálculo del porcentaje de insatisfechos con la sensación térmica. No obstante, existen programas informáticos, como TRNSYS, que incluyen una herramienta que realice estos cálculos introduciendo simplemente los valores de los cuatro factores explicados anteriormente.

Por otro lado, se encuentra el porcentaje de insatisfechos, que intenta calcular el número de personas que habrían emitido un voto muy negativo en cuanto a la sensación térmica experimentada.

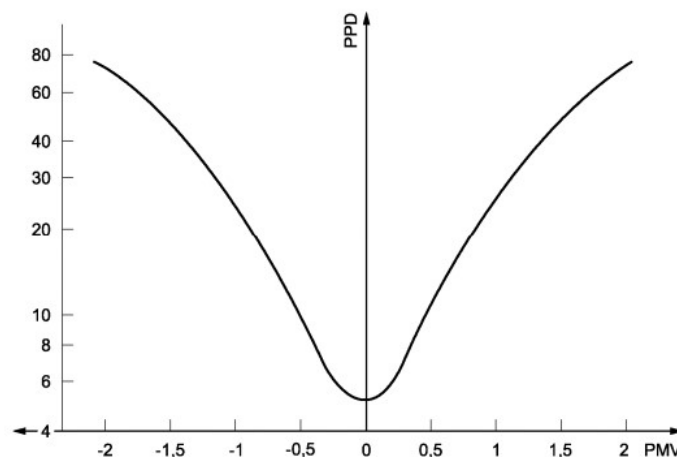


Figura 27 Representación gráfica del PPD frente al PMV. Fuente: UNE-EN ISO 7730

En la normativa se refleja, a su vez, una serie de fenómenos que pueden provocar el malestar térmico. Estos fenómenos son la incomodidad térmica local, la presencia de corrientes de aire, la excesiva diferencia de temperatura entre el aire inferior y superior de una habitación o la temperatura del suelo.

Como ya se ha expresado, la sensación de bienestar térmico es algo totalmente subjetivo. Por tanto, es muy difícil diseñar una zona térmica que satisfaga a todas las personas que se encuentren dentro de ella, pero gracias a estas herramientas es posible diseñar un sistema de climatización capaz de contentar al mayor número de personas posible.

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 Sistemas de climatización

Como se ha visto en el punto 2.1, se conoce por sistema de climatización a todo el conjunto de tecnologías que permiten controlar aquellos factores que aseguran el confort térmico para aquellas personas que habitan un edificio. A lo largo de la historia han aparecido distintas tecnologías que han logrado realizar este proceso, desde una hoguera de leña hasta las bombas geotérmicas.

En la actualidad, los sistemas de climatización pueden clasificarse en 4 grandes grupos:

- Sistemas aire-aire: cuando se utiliza un caudal de aire frío o caliente para acondicionar directamente una zona.
- Sistemas aire-agua: aquellos que utilizan ambos elementos para acondicionar una zona, como por ejemplo mediante el uso de fan-coils.
- Sistemas agua-agua: cuando el calor es exclusivamente aportado por el agua, fría o caliente.
- Sistemas con refrigerante: poseen la misma característica que los sistemas todo agua, solo que se utiliza un líquido refrigerante para el aporte de calor.

Sin embargo, esta clasificación es poco precisa a la hora de encuadrar todos los sistemas capaces de acondicionar una zona, puesto que como se ha visto, cualquier método de aporte de calor es válido siempre y cuando garantice el confort térmico de las personas que estén viviendo o trabajando en la zona en cuestión.

En esta línea se podría decir que los únicos factores limitantes a la hora de diseñar un nuevo sistema de climatización son la imaginación humana y la limitación energética, por lo que no se descarta que en el futuro aparezcan nuevos sistemas que se desvíen de esta clasificación.

3.2 Elementos de un sistema de climatización

Los elementos sobre los cuales se asienta un sistema completo de climatización son también llamados subsistemas, que se clasifican atendiendo a su función y posición en la etapa de acondicionamiento:

- Central de tratamiento, o conjunto de equipos cuya finalidad es la de preparar los fluidos que deben ser conducidos hasta los elementos terminales de la instalación. Pueden ser filtros para tratar los fluidos mecánicamente y también pueden tratar los fluidos térmicamente e incluir recirculación del aire extraído del exterior.

- Elementos terminales, también llamados splits, situados bien en el local o bien en su proximidad inmediata. Reciben los fluidos primarios de la central de tratamiento, y son utilizados para la preparación del aire húmedo que seguidamente será impulsado al local con vistas a contrarrestar las cargas presentes en este.
- Elementos intermedios, que sirven de unión material entre la central y los elementos terminales, incluyendo tanto las canalizaciones de trasiego como los accesorios que aseguran un buen funcionamiento de la instalación.
- Equipamiento de control, regulación y seguridad, situados en cualquiera de los subsistemas antes citados, aseguran no sólo una buena correspondencia de aportes energéticos, sino también la seguridad necesaria.

3.3 Calderas

En los sistemas de calefacción una caldera es el artefacto que calienta un caloportador, que es el fluido por el cual se transporta el calor obtenido a través de las conducciones del sistema de calefacción. Este caloportador es distribuido a través de los emisores de calor de las instalaciones (elementos terminales de la instalación) después de ser distribuido por una red de tuberías.

Una caldera de calefacción consta de un compartimento llamado hogar, que es la cámara en la que se quema el combustible, y un intercambiador de calor con el que se aporta calor al fluido caloportador. Si además es necesaria la inclusión de un quemador (como posteriormente se verá en el caso de las calderas de combustibles fluidos), el conjunto de caldera y quemador se denomina generador.

3.3.1 Calderas de combustibles fluidos

El combustible se prepara y quema en un quemador, dispositivo que funciona con un ventilador que impulsa aire hacia un inyector de combustible donde, por efecto venturi, éste se mezcla con el aire en las proporciones adecuadas y se impulsa dentro del hogar, donde se produce la combustión. Cuando el combustible es líquido (gasóleo) es necesario pulverizarlo para conseguir la mezcla, por lo que requieren un inyector especial. Los combustibles gaseosos también deben mezclarse con el aire, aunque no es necesario pulverizarlos.

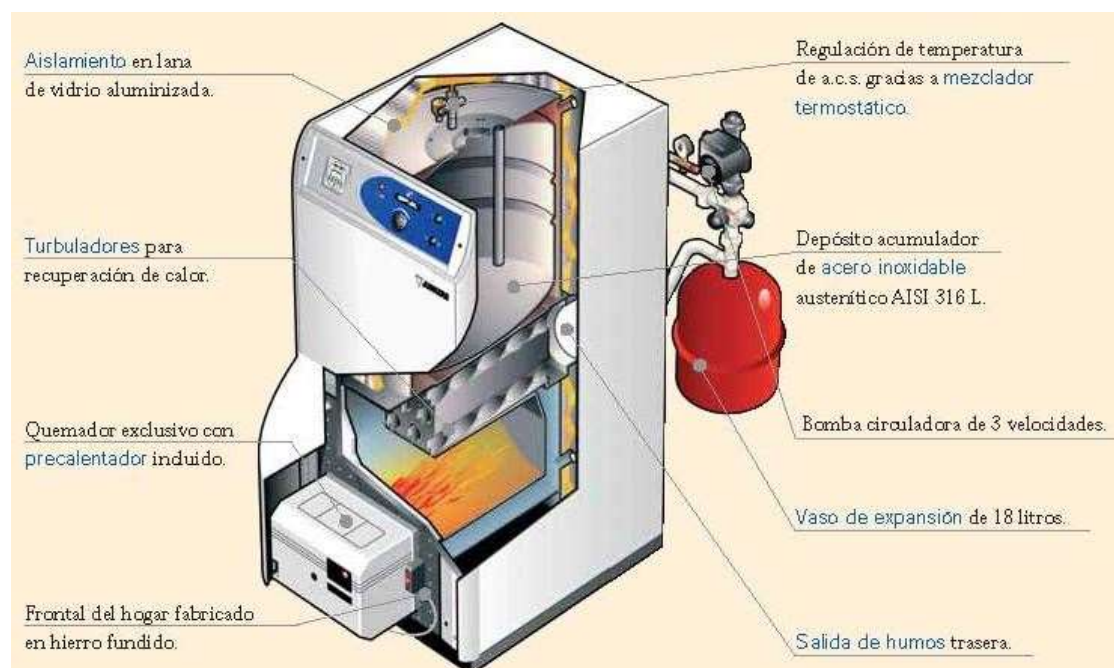


Figura 28 Caldera de combustibles fluidos. Fuente: desconocida

El hogar consiste normalmente en un cilindro con el eje horizontal, con el fondo recubierto de material refractario, contra el que se proyecta la llamarada producida por el quemador. Los gases calientes revocan y vuelven hacia la puerta del hogar y, por los laterales, entran en una serie de tubos que están sumergidos en el caloportador, y por ellos llegan a la caja de humos, de la que arranca el conducto de evacuación de gases quemados.

El intercambiador de estas calderas envuelve el hogar en una primera instancia, pero luego tiene una serie de pasos, en los que los gases calientes de la combustión dejan el calor que llevan. Las más corrientes (llamadas pirotubulares) consisten en un haz de tuberías introducidas en el caloportador. Los gases circulan por los tubos, lo más lentamente posible (para ello tienen unas chapas, plegadas en espiral, llamados turbuladores) para que lleguen al final (caja de humos) con la menor presión posible y la temperatura más baja posible. En las calderas normales esta temperatura es como mínimo de unos 140°C , para evitar que haya condensaciones, muy perjudiciales cuando el combustible tiene trazas de azufre, puesto que este, quemado, forma óxidos de azufre y sumado a vapor de agua condensado de la combustión puede formar ácido sulfúrico ($\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$), corrosivo, perjudicial para la buena conservación de los dispositivos, lo que se evita con temperaturas que impidan la condensación. (si el combustible contiene azufre, el problema se produce luego, en la atmósfera, cuando los óxidos de azufre, con el agua de lluvia, reaccionan formando el ácido y produciendo lluvia ácida. Por esta razón, los combustibles no deben contener azufre).

La regulación de la potencia, en los dos tipos, se hace por tiempo de funcionamiento, con paradas y arranques del quemador, o mediante la regulación del tamaño de la llama (quemadores modulantes y quemadores por etapas).

3.3.2 Calderas de condensación

En las calderas de condensación la temperatura es todavía más baja y la formación de ácidos se evita con un combustible que no contenga azufre (generalmente funcionan con gas natural), lo que permite el aprovechamiento del calor de vaporización del agua formada en la combustión ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$). Su gran ventaja es que el rendimiento es mucho mayor que las normales, pero el problema que puede aparecer en ellas es que la temperatura máxima que puede alcanzar el caloportador es más baja que en las normales, para permitir la condensación, lo que exige emisores (radiadores) más grandes (con mayor superficie de emisión) o sistemas de emisión a baja temperatura (suelo radiante).

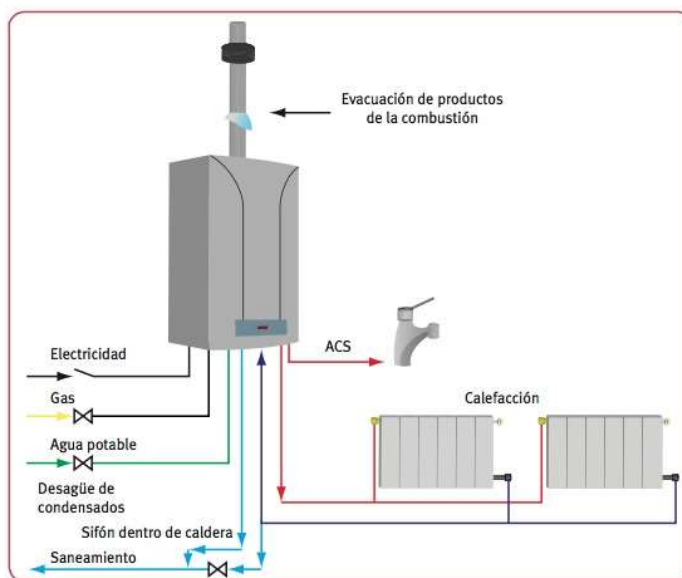


Figura 29 Esquema de instalación de una caldera de condensación. Fuente: Daikin

3.3.3 Calderas de combustibles sólidos

En las calderas de combustibles sólidos (carbón o, actualmente, biomasa), el hogar consta de dos compartimentos superpuestos, cada uno con su portilla correspondiente. En el superior, brasero, se coloca el combustible sobre una parrilla. El inferior, cenicero, recibe las cenizas del combustible. Por la portilla de éste entra el aire necesario para la combustión y los humos salen por un conducto (humero o chimenea) vertical, por tiro térmico, conducto que parte desde el brasero. El propio tiro térmico es que crea en el hogar una falta de presión que aspira el aire necesario para la combustión; la cantidad de aire puede regularse abriendo, más o menos, la portilla del cenicero; a menudo esta portilla tiene unos orificios que pueden abrirse o cerrarse a voluntad mediante una mariposa. La combustión es continua, no hay paradas desde que se enciende hasta que se apaga por falta de combustible, y la regulación de la potencia se hace abriendo o cerrando la entrada del aire.

En estas calderas, el intercambiador es la envoltura, que tiene una doble pared entre cuyas capas circula el caloportador. En algunas, incluso la rejilla de separación entre el brasero y el cenicero consiste en una serie de tuberías, por cuyo interior también circula el caloportador.

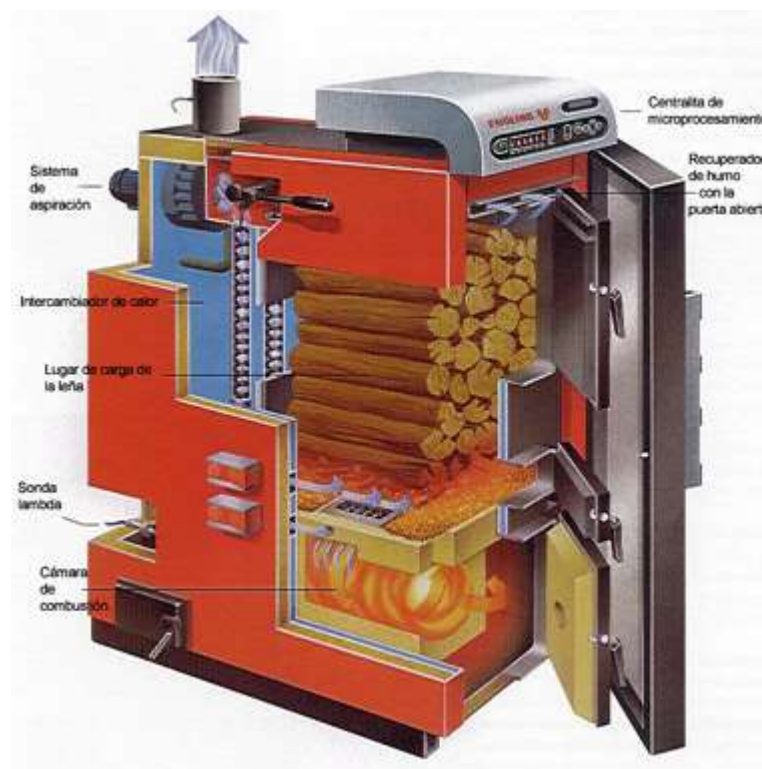


Figura 30 Caldera de combustibles sólidos. Fuente: Sitiosolar

3.4 Bomba de calor

Una bomba de calor es una máquina frigorífica que utiliza como fluido caloportador un refrigerante del cual, gracias a su calor latente, es posible aprovechar sus cambios de temperatura al experimentar procesos de compresión y expansión. Por lo tanto, una bomba de calor es capaz tanto de refrigerar como de calentar una zona determinada.

Por lo tanto, el ciclo que se sigue en una bomba de calor es un ciclo reversible, el cual puede cambiarse a voluntad simplemente invirtiendo el sentido de circulación del fluido refrigerante. El aporte o la retirada de calor dependerá de la posición de las denominadas unidades interior y exterior.

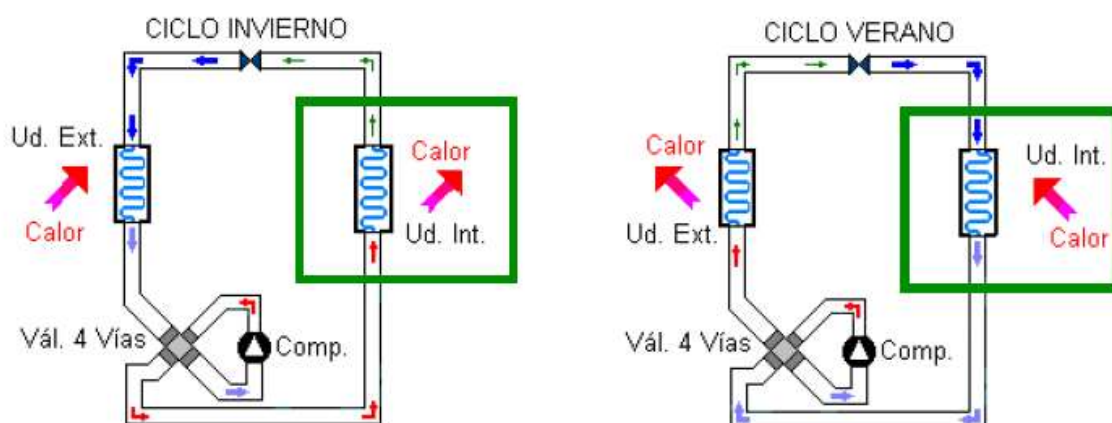


Figura 31 Ciclos de refrigeración y calefacción de una bomba de calor. Fuente: Universidad de Cantabria

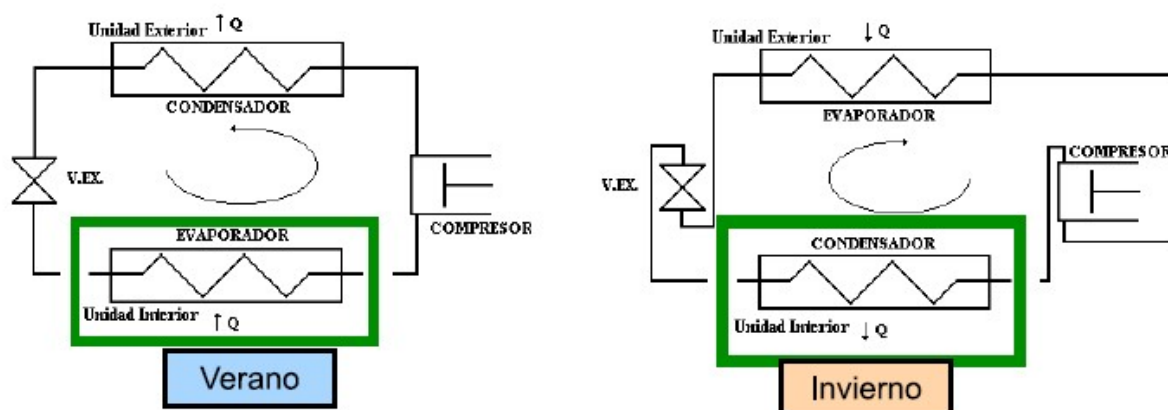


Figura 32 Configuración para verano e invierno de una bomba de calor. Fuente: Universidad de Cantabria

Dependiendo del funcionamiento deseado, será necesario variar el orden de las etapas de condensación y evaporación, colocando de manera opuesta ambos elementos (condensador y evaporador). Este cambio de sentido se realiza mediante un instrumento denominado válvula de 4 vías, que se pilota eléctricamente y es accionada por la presión que ejerce el refrigerante.

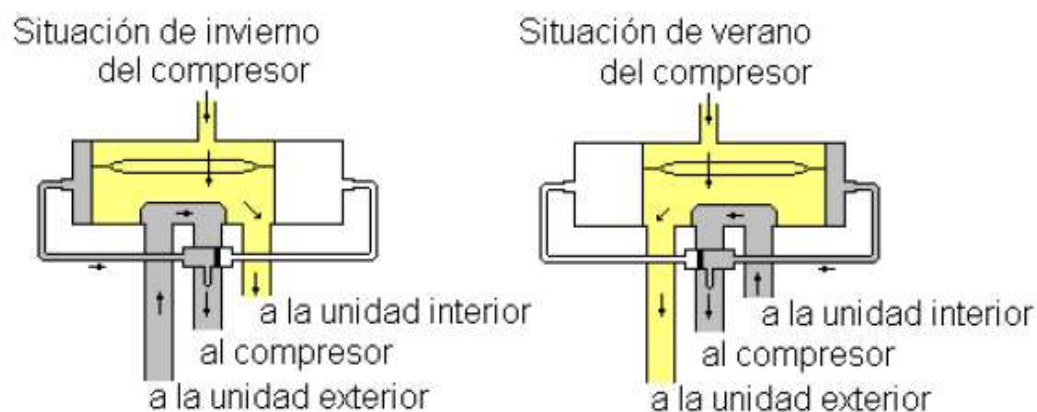


Figura 33 Válvula de 4 vías para la circulación del refrigerante. Fuente: desconocida

El ciclo seguido por el refrigerante en una bomba de calor consta de 4 etapas:

1. El refrigerante circula a través de unos serpentines de evaporación donde absorbe el calor latente del entorno.
2. El refrigerante es circulado por un compresor, que además, aumenta la presión del mismo para facilitar su posterior condensación.
3. A continuación, el refrigerante, en estado gaseoso, circula a través del condensador. El condensador es un intercambiador de calor en el que el refrigerante disipa el calor contenido y pasa de estado gaseoso a líquido.
4. Tras circular por el condensador, el refrigerante llega a la válvula de expansión. En la válvula de expansión se reduce la presión del refrigerante, reduciéndose bruscamente su temperatura, lo que posteriormente provoca su paso de estado líquido a gaseoso en el proceso de absorción de calor en el evaporador.

Estas cuatro etapas a lo largo de los 4 elementos citados (evaporador, condensador, válvula de expansión y compresor), pueden verse representadas en un diagrama T-s del ciclo de refrigeración ideal (temperatura frente a entropía) de la siguiente figura.

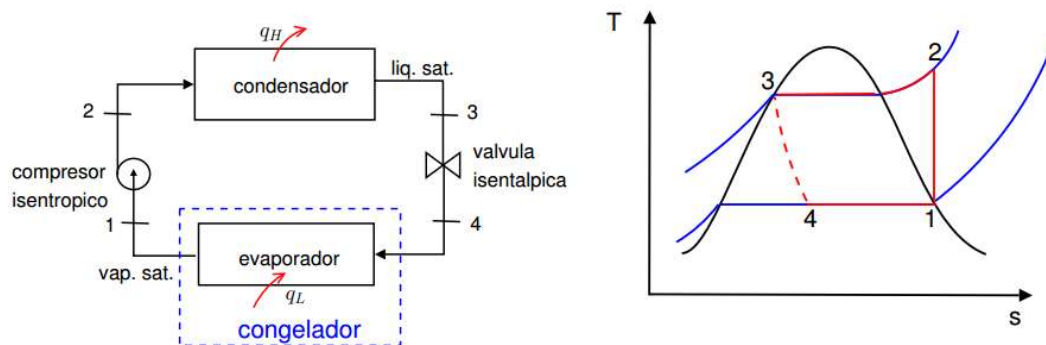


Figura 34 Ciclo de trabajo de una bomba de calor. Fuente: Universidad de Cantabria

Sin embargo, el diagrama T-s de un ciclo de Rankine real, puede observarse que la temperatura del refrigerante al llegar al punto 2 (el condensador) es más elevada que la teórica, debido a que el refrigerante también gana calor en el proceso de transporte hasta el condensador por fricción mecánica y absorción del ambiente.

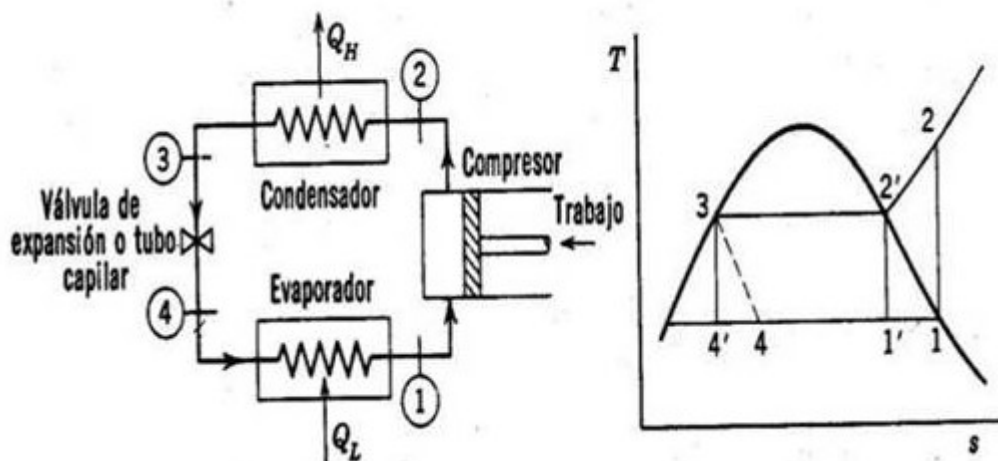


Figura 35 Ciclo de Rankine real, con vapor sobrecalentado. Fuente: desconocida

Existen gran cantidad de refrigerantes para la operación de estos sistemas, entre otros se encuentran el amoníaco, el R-410 o el R-134A, que en particular es el más extendido, y cuyo ciclo de refrigeración representado en un diagrama de Mollier es el siguiente:

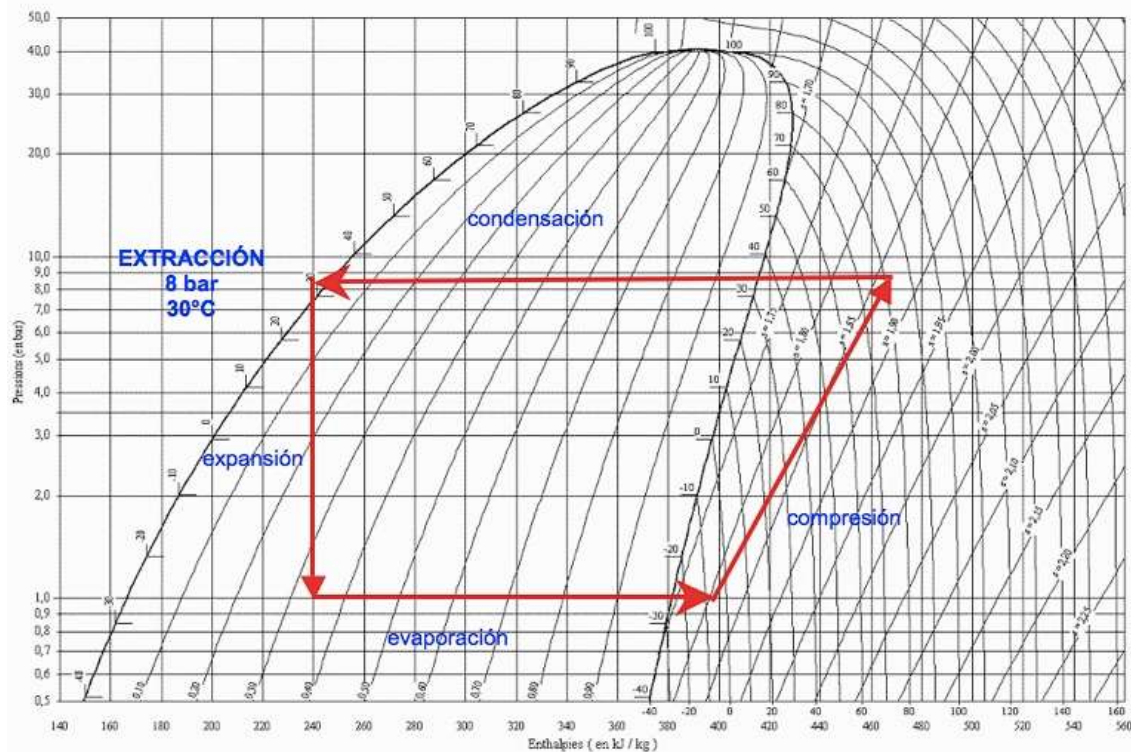


Figura 36 Diagrama de Mollier del refrigerante R134A. Fuente: Apuntes Ingeniería Térmica.

Los valores con los que se evalúan las bombas de calor no son sus rendimientos, sino que se evalúan con un coeficiente llamado Coeficiente de Operación (COP), con el que se compara el calor extraído del foco frío (evaporador) con la entrada de trabajo en el sistema para su funcionamiento, es decir, el trabajo aportado al ciclo en la compresión.

$$COP = \frac{\text{Potencia térmica útil (W)}}{\text{Potencia total absorbida (W)}}$$

Los fabricantes ofrecen a los compradores el valor del COP nominal, el cual se obtiene tras operar el sistema un régimen estacionario a unas temperaturas de foco frío y caliente permanentes y determinadas, por tanto, el valor real del COP puede variar dependiendo de las temperaturas de ambos focos, siendo su valor mayor cuanto mayor sea la diferencia entre las temperaturas de los mismos. No obstante, el COP de una bomba de calor siempre se encuentra enmarcado entre valores entre dos y hasta cinco, haciendo de la bomba de calor uno de los sistemas más eficientes.

3.4.1 Sistemas aerotérmicos

Los sistemas aerotérmicos son aquellos que a través de una bomba de calor extraen la energía del aire del exterior calentado por el sol. En la teoría, estos sistemas son capaces de extraer el calor del aire incluso en días con temperaturas muy bajas, puesto que el aire siempre posee cierta cantidad de energía calorífica.

La principal ventaja de estos sistemas es que ofrecen la posibilidad de invertir su funcionamiento para obtener el proceso opuesto a calefactar una zona. Así, estos sistemas también son capaces de refrigerar durante las épocas calurosas del año.

Sin embargo, estos sistemas dependen de un parámetro muy variable, como lo es la temperatura del aire en el exterior, por lo que los rendimientos que ofrecen son muy desiguales a lo largo del año.

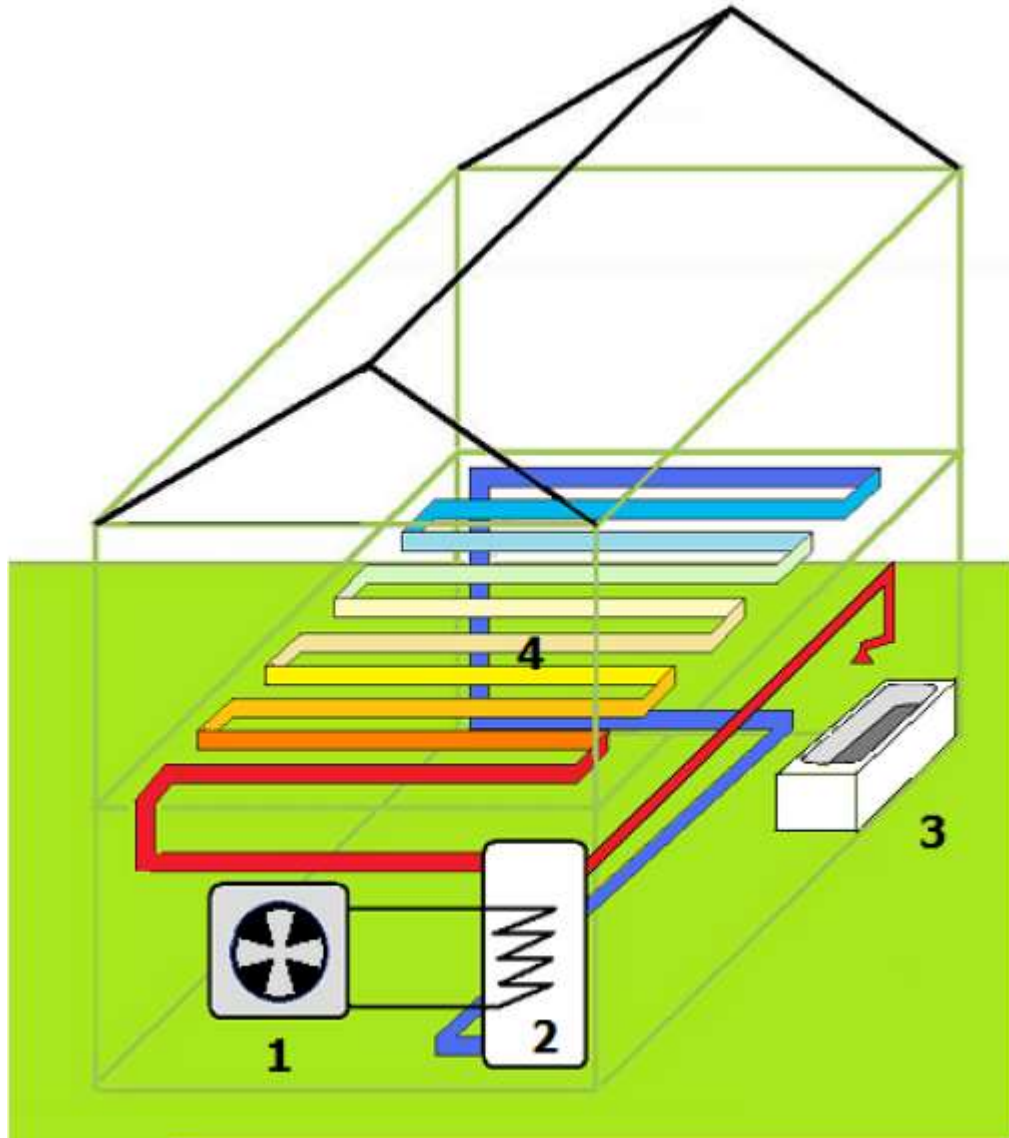


Figura 38 Esquema de una instalación aerotérmica con suelo radiante. Fuente: sitiosolar

3.4.2 Sistemas geotérmicos

La tierra posee una gran estabilidad térmica en aquellas capas más profundas con respecto a su capa superficial, por lo que representa una fuente importante de energía especialmente en aquellas zonas en las que debido al clima extremo los sistemas aerotérmicos no ofrecen grandes rendimientos en los momentos más desfavorables.

Como consecuencia de este hecho, en los sistemas geotérmicos, el calor se extrae de la tierra, mediante la circulación del fluido refrigerante por un evaporador que se encuentra enterrado en ella. Una vez el refrigerante pasa por el condensador y la válvula de expansión, situados en el interior de la zona a climatizar, se vuelve a iniciar el ciclo recirculando el mismo por el evaporador situado en la tierra de nuevo.

En cuanto a su instalación existen dos modelos:

1. Sistema geotérmico horizontal
2. Sistema geotérmico vertical

En el sistema geotérmico horizontal, el intercambiador de calor de captación (evaporador) se coloca de forma horizontal a una profundidad de entre 0,5 y 1,5 metros, para así aprovechar tanto la energía calorífica aportada en la radiación solar sobre la superficie de la tierra como la extraída de las capas más profundas de esta.

No obstante, la zona de captación debe poseer una superficie de al menos el doble del área de la zona a calefactar por lo que uno de sus principales inconvenientes es la obra de instalación en cuanto al espacio necesario para realizarla.

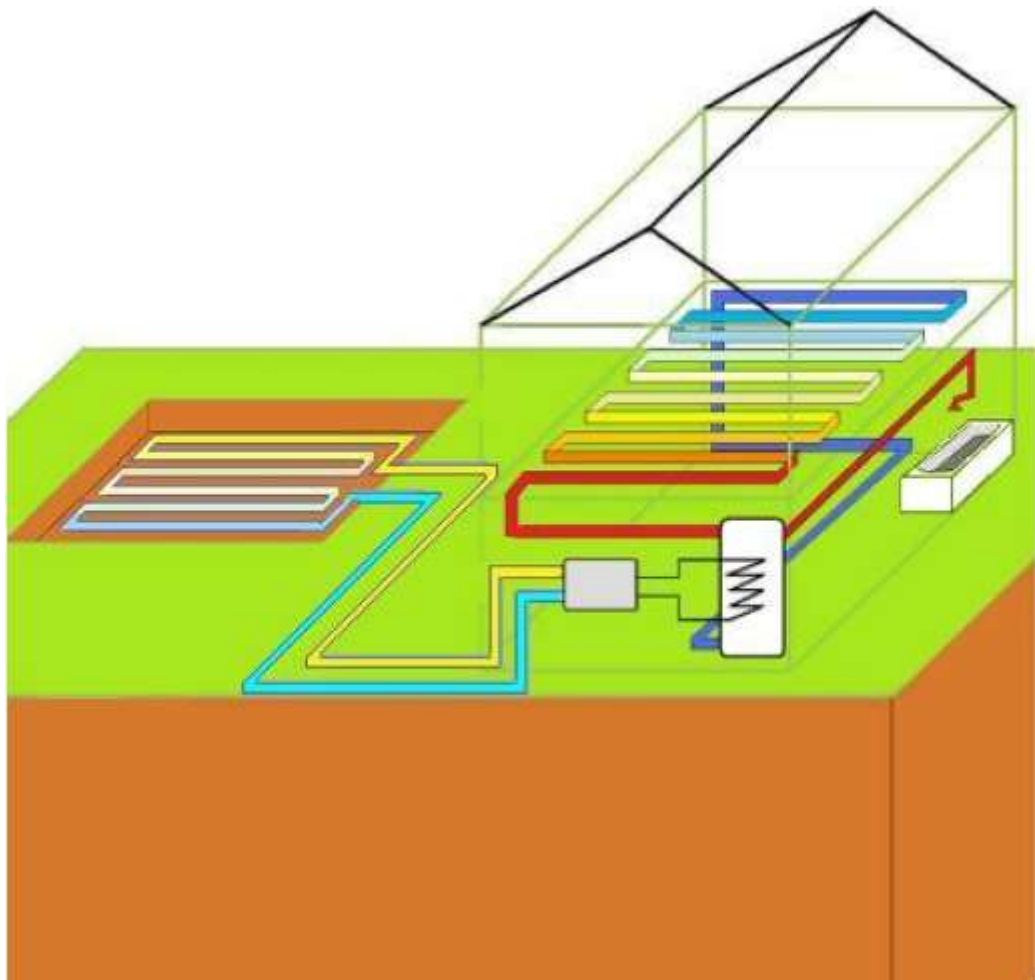


Figura 39 Esquema de una instalación geotérmica con suelo radiante. Fuente: sitiosolar

El sistema geotérmico vertical trata de solventar el problema del espacio encontrado en el sistema horizontal, disponiendo su evaporador en vertical enterrado a una profundidad mucho mayor, de entre 30 y 100 metros, donde la capacidad de captación, no obstante, es mucho mayor.

Sin embargo, el coste de la obra es mayor al de los otros sistemas puesto que es necesaria la participación de una perforadora y, además, habría que perforar a una profundidad tal que puede ser necesaria la obtención de permisos por parte de las autoridades locales.

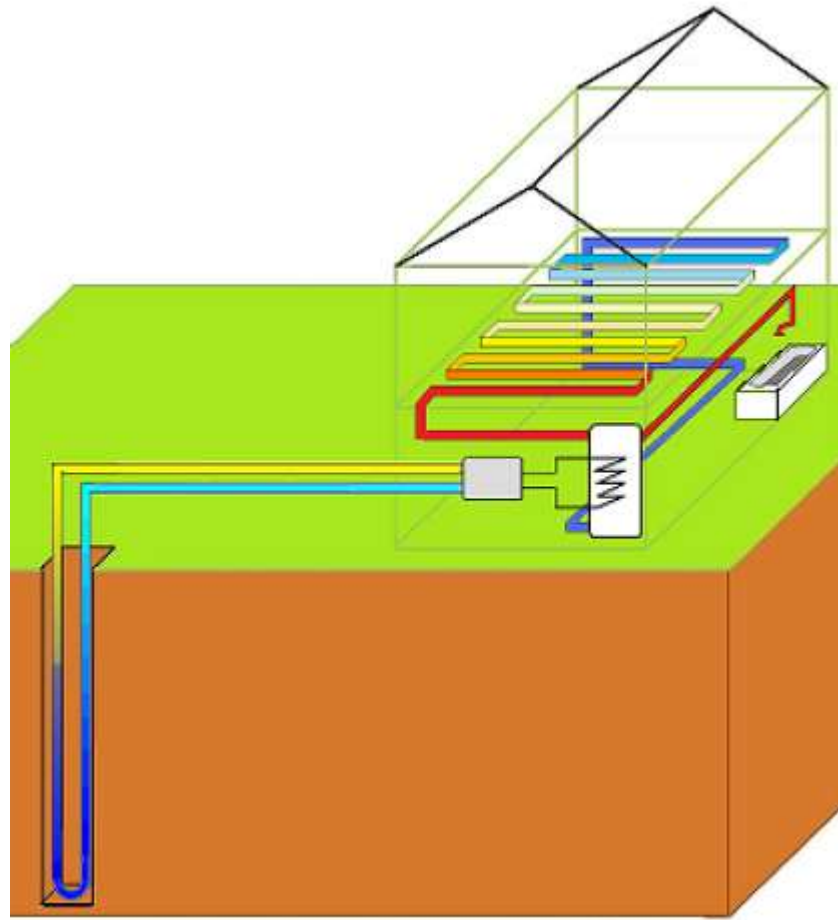


Figura 40 Esquema de una instalación geotérmica vertical. Fuente: sitiosolar

3.4.3 Sistemas hidrotérmicos

Los sistemas hidrotérmicos aprovechan la estabilidad de la temperatura del agua a grandes profundidades en el caso de pozos subterráneos o de la temperatura del mar. El esquema de instalación es el mismo que en el de un sistema geotérmico con disposición vertical solo que no es necesario colocar el conjunto de captación a tanta profundidad en el caso de usar el agua del mar como fuente de energía.

Su principal ventaja es que el agua es un excelente portador de energía calorífica, y según su emplazamiento, también ofrece una gran estabilidad térmica.

En el caso concreto de la ENM, la temperatura del agua del mar se mantiene durante todo el año entre 17 y 19°C, lo que supone una gran ventaja a la hora de optar por este sistema en este emplazamiento.

A su vez, la porción de mar contenida en la dársena militar de la ENM pertenece a la misma, por lo que para la instalación de este sistema no se requiere ningún permiso de edificación por parte de las autoridades locales.

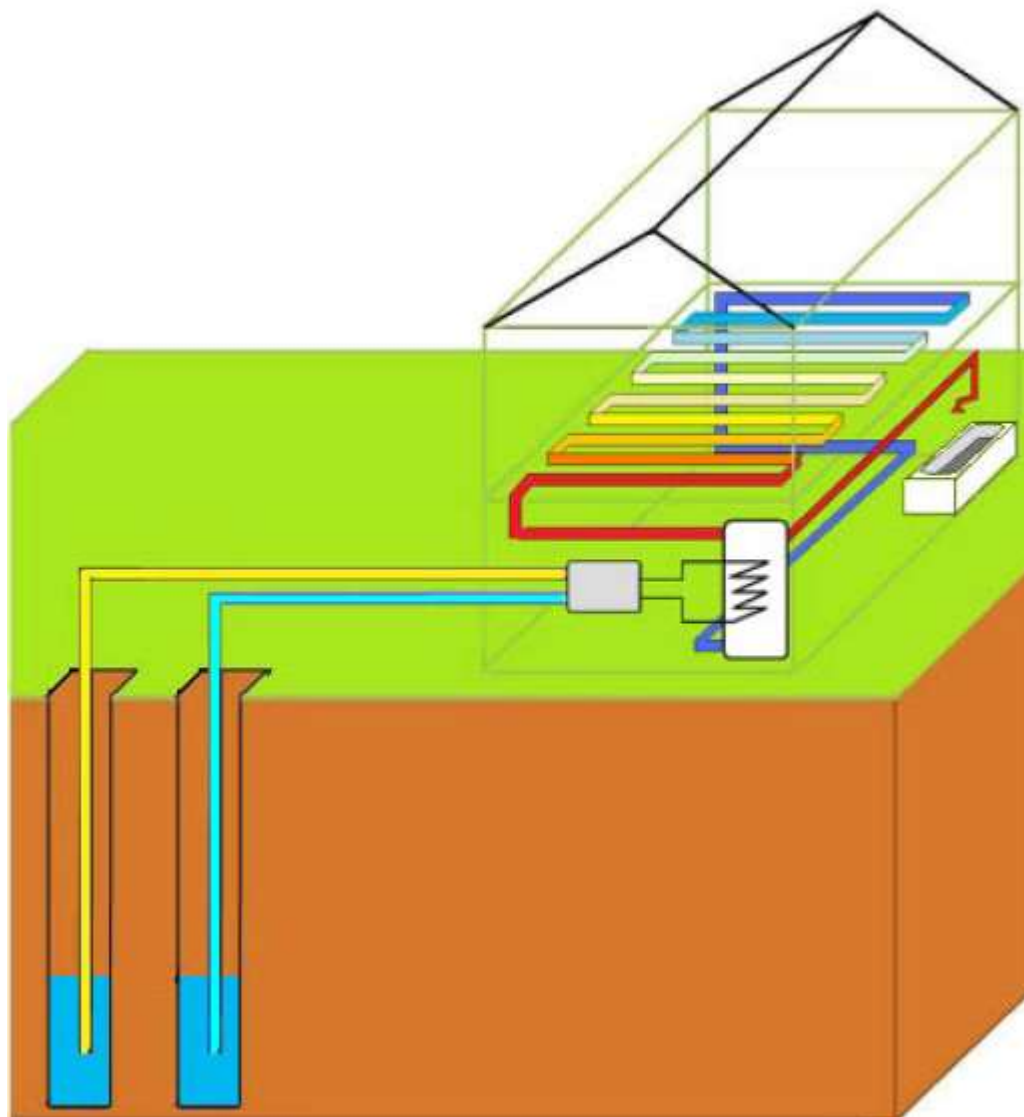


Figura 41 Esquema de una instalación hidrotérmica. Fuente: sitiosolar

3.4.4 Aspectos ecológicos

Estos sistemas sólo necesitan el aporte de la energía eléctrica suministrada tanto al compresor como a los diferentes splits o fancoils con los cuales se disipa el calor obtenido. Por tanto, suponen un gran ahorro energético y un índice de contaminación ínfimo.

Es por esto que los fabricantes suelen denominar a estos sistemas como totalmente libres de contaminantes. No obstante, la energía eléctrica con la que se suministra a los elementos citados anteriormente es posible que haya sido obtenida de centrales térmicas que queman combustibles fósiles y emiten CO₂ a la atmósfera. Este hecho significa que el foco de la contaminación simplemente se traslada de la instalación a la central de la que proviene la electricidad.

Aun así, estos sistemas suponen una buena manera de evitar la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, y si su instalación se liga con la instalación de un sistema de obtención de electricidad completamente renovable (fotovoltaica, eólica, hidráulica) se podría llegar a afirmar que el conjunto supone una instalación completamente limpia de cara a la contaminación del medio ambiente.

4 DESARROLLO

4.1 Diseño del edificio en SketchUp

Como se ha explicado en el apartado 1.5, para el estudio térmico de un edificio mediante simulación por ordenador, es necesaria la definición de la geometría del edificio. TRNBuild permite definir dicha geometría, pero no de manera gráfica, lo que dificulta mucho para el usuario la definición geométrica del edificio, teniendo que hacerse mediciones.

Por ello, para definir geométricamente el edificio de manera rápida y sencilla es necesario el uso de un software de CAD que permita hacer la construcción en tres dimensiones. SketchUp, con su plugin de TRNSYS3D es el software de CAD que se ha utilizado en el diseño en 3D del edificio Isaac Peral.

Para ello, se utilizaron los planos de la planta del edificio, con el fin de delimitar las zonas térmicas que estarían contenidas en el mismo y construirlo en base a sus dimensiones reales.

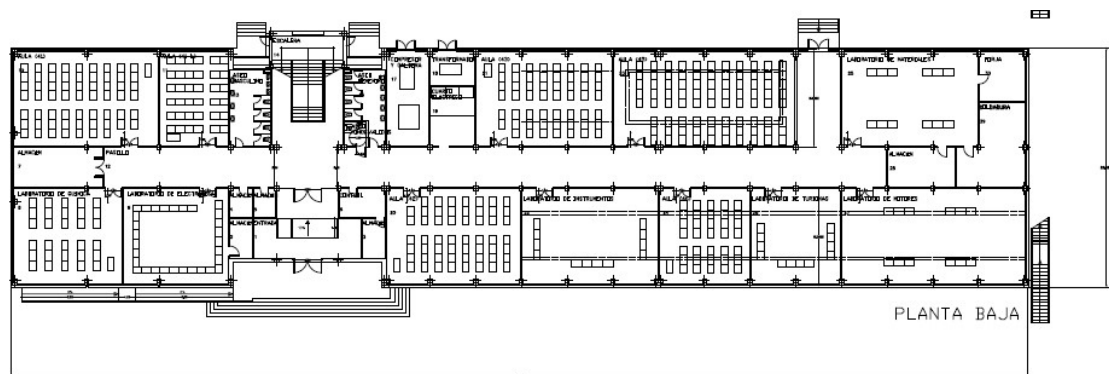


Figura 42 Planta de la planta baja del Isaac Peral. Fuente: ENM

Una vez tomadas las medidas necesarias para la construcción en 3D del edificio, se comienza a realizar la primera planta en SketchUp. Cabe destacar que, aunque se esté usando un software de CAD, este no se usa de una forma habitual, sino que el edificio se construye por módulos, que constituyen en si mismos zonas térmicas.

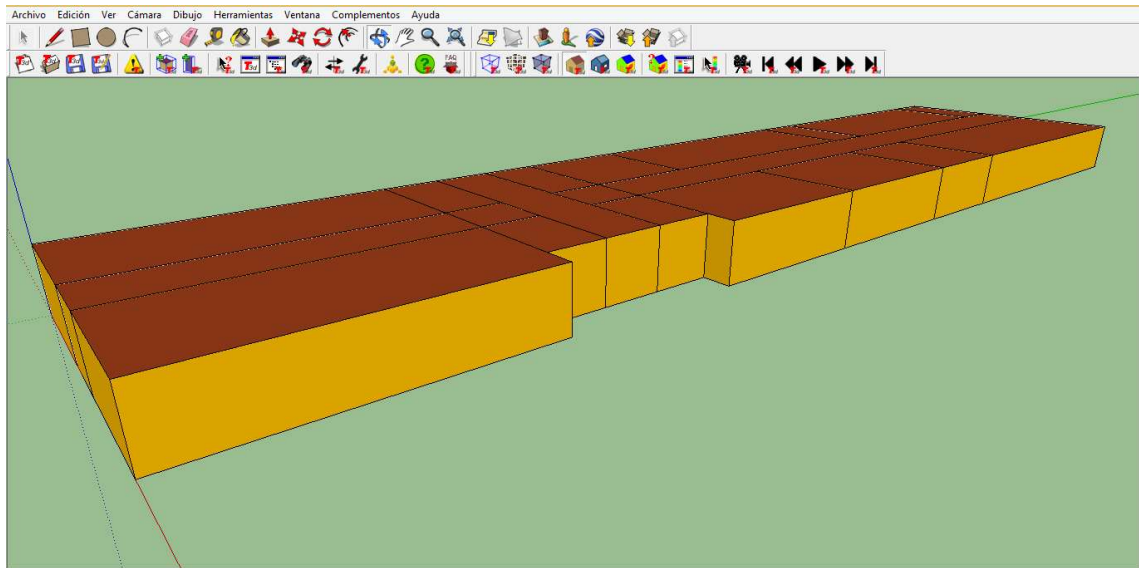


Figura 43 Primera planta del Isaac Peral modelada en TRNSYS. Elaboración propia

Cada módulo representa un aula, o como en el caso del pasillo, una partición de una zona más grande. Es importante realizar estas particiones para que cada zona abarque justo el volumen del módulo, con el fin de evitar la interposición de unas zonas con otras, lo cual provocaría fallos en la simulación en TRNBuild.

El proceso de construcción es relativamente sencillo. En primer lugar, se define una nueva zona térmica en el plano constructivo, teniendo en cuenta que la línea verde del mismo representa la dirección Norte-Sur.

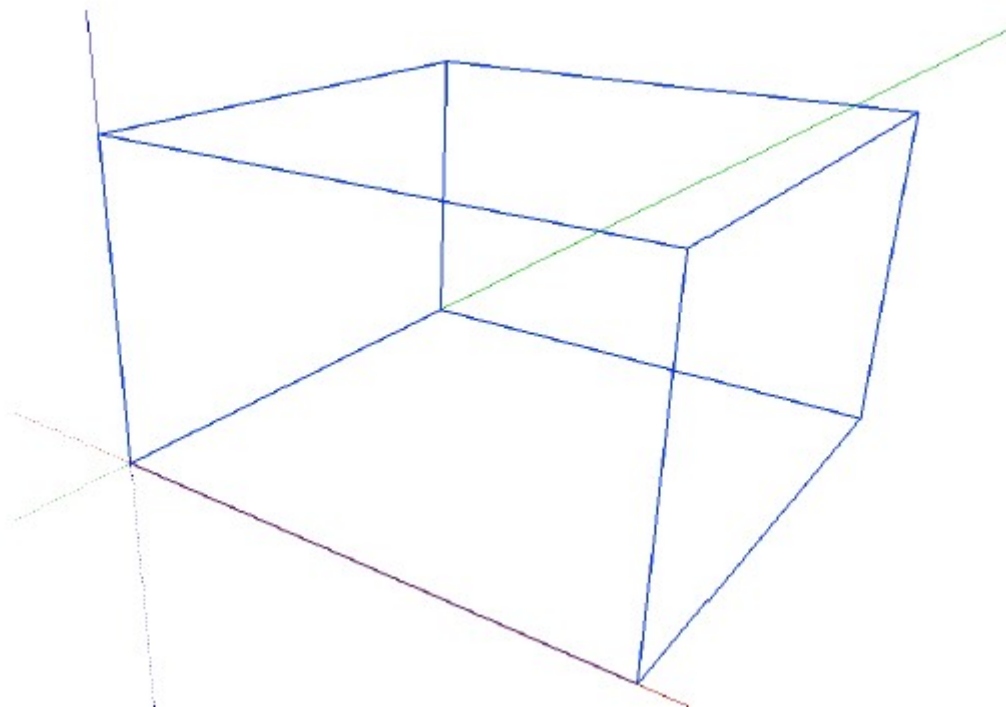


Figura 44 Zona térmica del plugin TRNSYS3D en SkethUp. Elaboración propia

Con la nueva zona térmica creada, se procede a dibujar la geometría del módulo en cuestión. En este punto, es importante simplificar al máximo las medidas obtenidas en los planos, ya que por una aproximación de centímetros los cálculos posteriores no se verán afectados, y el software agradecerá que el usuario sea lo más conciso y práctico posible dentro de unos límites que no contaminen los futuros resultados.

A partir de aquí, el proceso es mecánico, cuando se termina de definir la geometría de una zona térmica, se cierra la misma y se crea otra adyacente a ella. Dado que existen dos zonas térmicas adyacentes, es necesario definir su adyacencia y las condiciones de contorno de sus muros, techos y suelos.

Para hacerle el trabajo más sencillo al usuario, TRNSYS3D incluye una herramienta denominada *Surface Matching*, con la que el propio plugin detecta las adyacencias, diferencia los muros exteriores de los interiores, y los techos de los suelos.

Se procede a parametrizar la primera planta y posteriormente se realiza la segunda sobre esta. Una vez el edificio se construye por completo, se definen las ventanas.

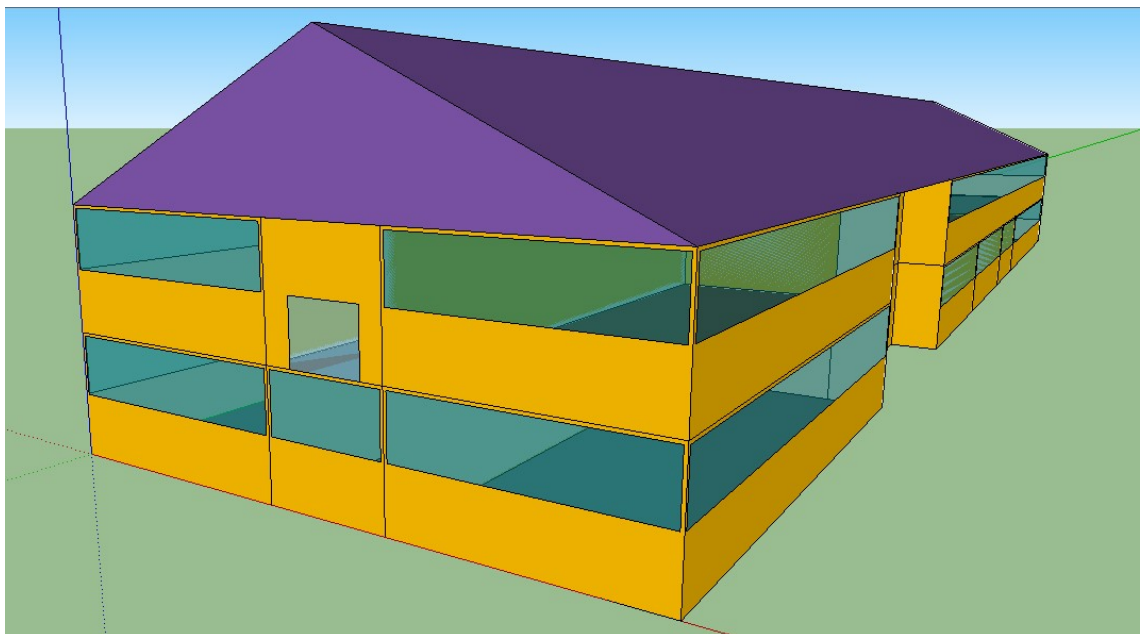


Figura 45 Isaac Peral modelado en 3D en Google SketchUp. Elaboración propia

El último paso en el diseño 3D consiste en la inclusión de zonas de sombra, que representan la fachada del edificio, y tienen un papel importante a la hora de obtener los resultados en las simulaciones posteriores en lo referido a la ganancia de temperatura por radiación solar.

Tras la definición de las zonas de sombra se da por concluida la construcción en 3D del edificio, conteniendo en su totalidad 32 zonas térmicas, las cuales posteriormente formarán parte de uno de tres posibles grupos de temperaturas de consigna.

Tras el diseño del edificio en 3D se vuelcan todos los datos en el fichero .idf que posteriormente se importa en TRNBuild.

4.2 Definición de cerramientos en TRNBuild

Tras importar los datos del fichero .idf en TRNBuild, se procede a definir los materiales de los que se componen los muros del edificio.

Para ello, a través del desplegable que el programa contiene en su interfaz de usuario, se introducen zona a zona todos los materiales que componen los cerramientos del edificio. Una de las ventajas que posee el uso de este programa es que cuando un muro es adyacente a otro, es el propio

programa el que automáticamente ajusta los materiales del muro en la otra zona térmica a la que pertenece.

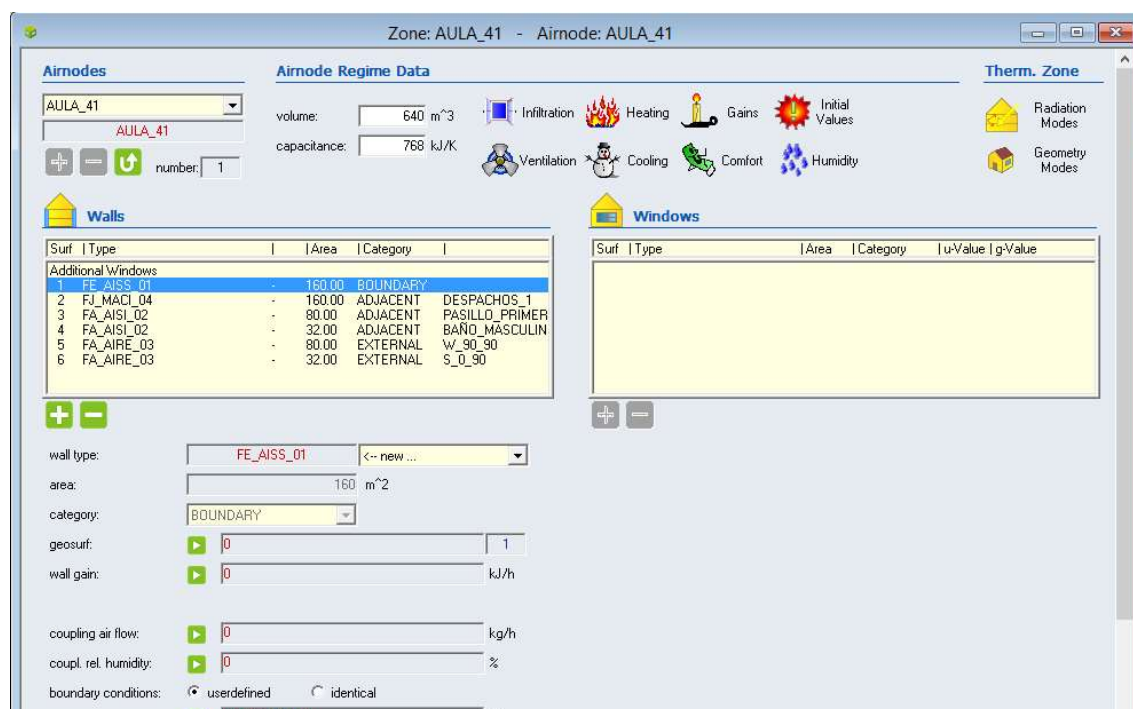


Figura 46 Ventana de configuración de una zona térmica. Elaboración propia

Los materiales que han sido fijados para formar los cerramientos parten de una librería preestablecida del propio programa, teniendo en cuenta siempre no propasar los límites de conductividad térmica que están establecidos en el Código Técnico de Edificación (CTE).

Según lo establecido en el código técnico de edificación (CTE), la zona climática de una localización se define a partir de la combinación de las severidades climáticas (CS) de invierno (A,B,C,D,E) y de verano (1,2,3,4,5), siendo A menor severidad que E y 1 menor que 4. Así, a modo de ejemplo, el caso de León, con severidad climática E1, se asociaría a inviernos muy fríos y veranos templados. En la figura X se muestra la distribución de zonas climáticas en España.



Figura 377 Zonas climáticas de España. Fuente: IDAE

Estos límites dependen de la zona climática en la que se ubique el edificio en cuestión y, para el caso concreto del edificio Isaac Peral, la zona climática a la que pertenece es la C. La categorización de las zonas climáticas es un código alfanumérico de una letra y un número, que representan respectivamente la categoría de la zona en invierno y en verano. La climatización del edificio solo se va a realizar en invierno por lo que solo es destacable la caracterización de la zona climática en invierno.

4.3 Introducción de inputs en Simulation Studio

Llegados a este punto es necesaria la introducción de los inputs al controlador del edificio en Simulation Studio. Todos estos inputs serán utilizados en la simulación y como se ha dicho, es necesario que sean introducidos en el controlador que representa al edificio, puesto que más adelante serán utilizados en TRNBuild para definir la calefacción, ocupación, ganancias, infiltraciones, etc.

4.3.1 Datos meteorológicos

Son datos climatológicos, obtenidos e importados al programa a través de un fichero TMY (Tiempo Medio del Año) con datos obtenidos de la base de datos de METEONORM. Gracias a este input, la simulación tendrá en cuenta la temperatura del aire del exterior y las ganancias de calor debidas a la radiación solar.

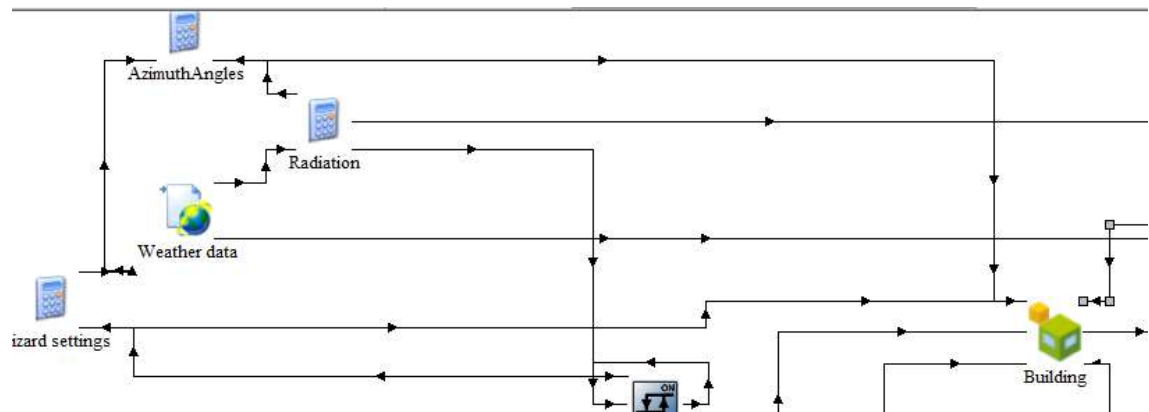


Figura 48 Detalle del controlador Weather Data y su conexión con Building. Elaboración propia

4.3.2 Modelo de infiltraciones

A continuación, se introduce el controlador type571 que representa el input del modelo de infiltraciones K_1 K_2 K_3 mencionado en el apartado 2.5. Para las primeras simulaciones y obtención de datos, se toman como muestra tres zonas térmicas distintas, cada una perteneciente a un grupo de climatización distinto, con la finalidad de observar las diferencias entre las temperaturas conseguidas en cada una de estas zonas.

Por tanto, se utilizan tres modelos type571 en Simulation Studio, ya que, como este modelo depende del volumen de la zona a climatizar, es necesario introducir al modelo el volumen manualmente para luego utilizar su output como un input del edificio, lo que desemboca en que es necesario un input de este modelo para cada zona bajo estudio de climatización.

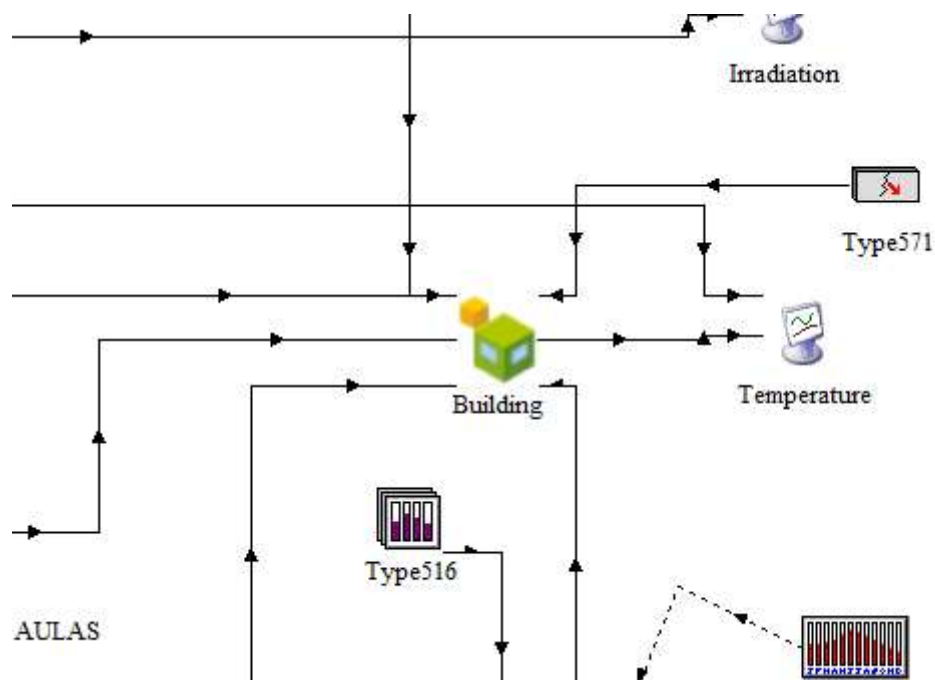


Figura 38 Detalle del modelo del type571 para el modelo de infiltraciones. Elaboración propia

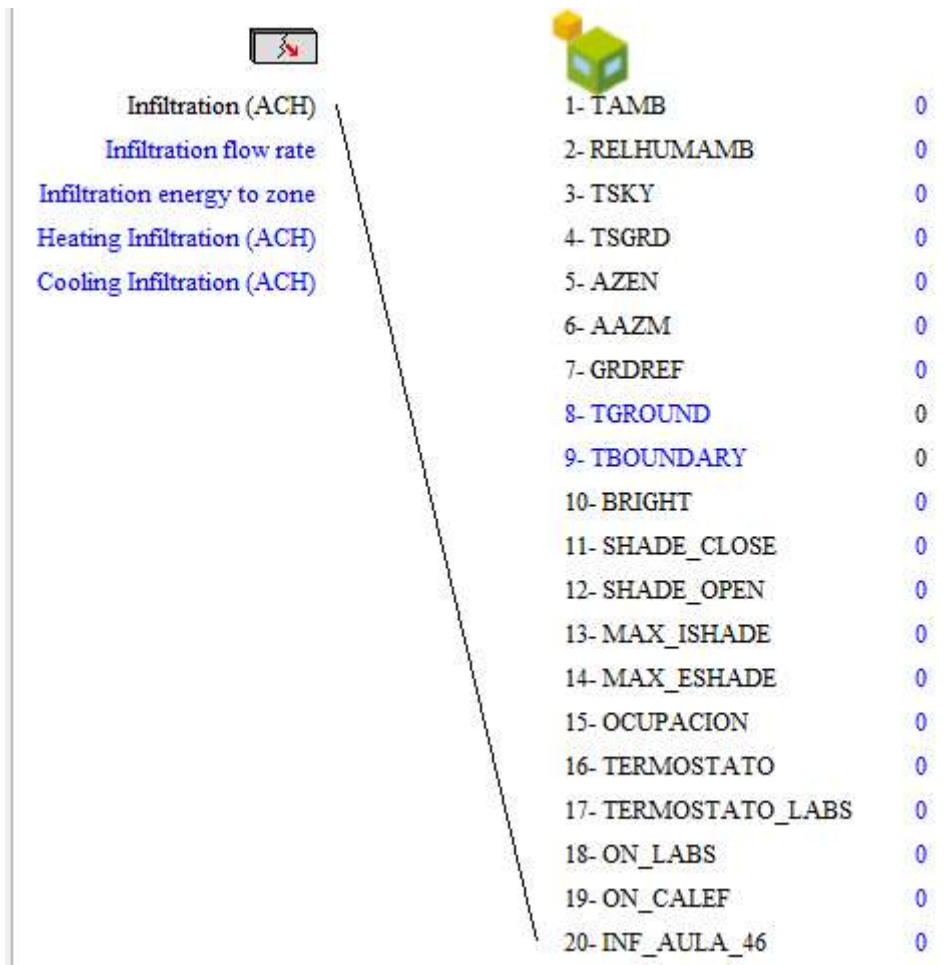


Figura 39 Unión del output de infiltraciones con el input de infiltraciones del Aula 46. Elaboración propia

Tras no obtener datos satisfactorios con el uso de este modelo de infiltraciones durante las primeras simulaciones, para la simulación final se opta por el uso de la herramienta de aplicación web basada en el programa Lider-Calener nombrada en el apartado 1.5.4. Esta aplicación es capaz de calcular la tasa de infiltraciones conforme al documento “Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética de los edificios” mediante la introducción de algunos datos relevantes de la zona a climatizar.

Edificio nuevo ☐ Edificio Existente ☒

Número de viviendas (0 si es terciario): Ventilación mecánica

(ren/h):

Volumen (m³): Área de fachadas (m²): Área de cubiertas

(m²):

Área de huecos (m²): Área de lucernarios (m²): Área de

puertas (m²):

Clase de permeabilidad. De los huecos: De los lucernarios:

Tasa de infiltraciones resultante (ren/h):

0.287

Figura 40 Herramienta online basada en Lider-Calener ofrecida por Aurea Design Builder. Elaboración propia

4.3.3 Modelo de ocupación

Uno de los factores a tener en cuenta a la hora de dimensionar las ganancias térmicas que estarán presentes en las diferentes zonas a climatizar es el de la ocupación de cada zona en las diferentes épocas del año y momentos del día.

Este es un cálculo estimatorio, haciendo una media entre los alumnos que reciben sus clases en las aulas del Isaac Peral y el número de alumnos por clase. A su vez, hay zonas térmicas que incluyen más de una clase por lo que la ocupación en esa zona será la suma de la de las clases que forman la misma.

Según la norma ISO 7730, una persona realizando trabajo ligero sedentario es capaz de proporcionar al ambiente el calor correspondiente a una potencia de 100W de potencia, valor que se incrementa si el trabajo deja de ser sedentario y que, obviamente, depende del rango de edad de las personas que ocupan la zona y de su tasa metabólica.

A su vez, otra de las consecuencias provenientes de la ocupación es la tasa de renovaciones de aire por hora debidas a ventilaciones momentáneas provocadas por la apertura de puertas, ventanas, etc. Este es un factor que no se ha podido tener en cuenta debido a que para conseguir un dato que fuese representativo y válido, se debería haber realizado un estudio experimental, a fin de establecer los patrones de entrada de alumnos en el edificio y la frecuencia con la que estos abren o cierran la puerta.

Rates of Heat Gain from Occupants of Conditioned Spaces - ISO 7730								
Rates of Heat Gain from Occupants of Cond								
No.	Degree of Activity	Typical Application	Total Heat Adjusted		Sensible Heat		Latent Heat	
			Watts	Btu/h	Watts	Btu/h	Watts	Btu/h
☒ 01	Seated at rest	Theatre, Movie	100	350	60	210	40	140
☐ 02	Seated, very light writing	Office, Hotels, Apts	120	420	65	230	55	190
☐ 03	Seated, eating	Restaurant	170	580	75	255	95	325
☐ 04	Seated, light work, typing	Office, Hotels, Apts	150	510	75	255	75	255
☐ 05	Standing, light work or working slowly	Retail Store, Bank	185	640	90	315	95	325
☐ 06	light bench work	Factory	230	780	100	345	130	435
☐ 07	walking 1,3 m/s (3 mph) light machine work	Factory	305	1040	100	345	205	695
☐ 08	Bowling	Bowling Alley	280	960	100	345	180	615
☐ 09	moderate dancing	Dance Hall	375	1280	120	405	255	875
☐ 10	Heavy work, lifting Heavy machine work	Factory	470	1600	165	565	300	1035
☐ 11	Heavy work, athletics	Gymnasium	525	1800	185	635	340	1165

Figura 41 Tabla de ganancias de calor dependiendo del trabajo realizado. Fuente: ISO 7730

Para introducir estos datos de ocupación en la simulación es necesario establecer unos controladores que determinen, por una parte, las horas del día de ocupación, y por otra parte los meses de ocupación. Los outputs de estos dos controladores se combinan en un controlador de ecuación de Simulation Studio para dar como resultado un output que se introduce como input en el controlador del edificio y que representa las horas del día y los meses en los que las aulas y los laboratorios están ocupados.

Como ya se ha mencionado, la zona de pasillos está siendo considerada como una zona de paso, por lo que no es necesario utilizar estos datos para introducirlos en estas zonas, ya que no se tendrán en cuenta las ganancias de las mismas.

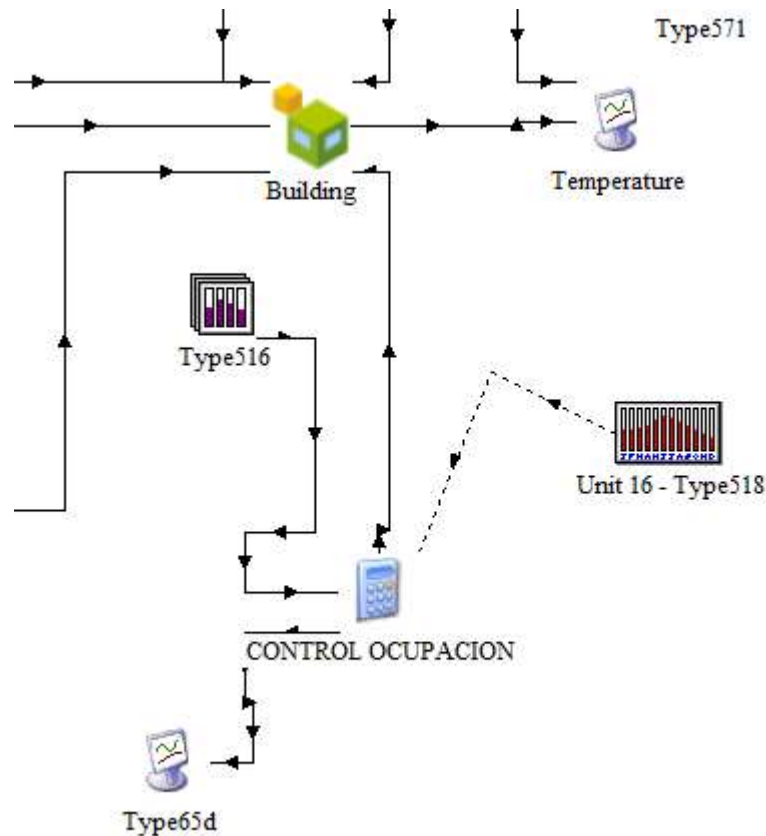


Figura 42 Detalle del controlador del modelo de ocupación. Elaboración propia

4.3.4 Controladores de las temperaturas de consigna

Para la climatización del edificio se establecen dos temperaturas de consigna distintas, lo que produce tres grandes grupos climatizados: uno a una temperatura de consigna establecida para trabajo sedentario (aulas), un segundo grupo a una temperatura de consigna inferior a la anterior por producirse en sus dependencias trabajos ligeros (laboratorios), y un tercer grupo de aquellas zonas que, por ser de paso, no se climatizarán, al menos de forma directa.

Estos grupos son representados de forma física en las aulas, los laboratorios y, por último, las zonas de pasillo y almacenes, respectivamente. En las aulas la temperatura de consigna se establece en 21°C, y en los laboratorios se establecen 18°C de consigna.

Estas temperaturas, como ya se ha mencionado anteriormente, no se mantendrán indefinidamente a lo largo de todo el año, pero, además, tampoco han de mantenerse a lo largo del día. A través de unos controladores de Simulation Studio que representan un termostato, y junto con el cruce de sus datos con el de otro controlador que acota los meses del año de operación, se obtiene un output que representa las horas y los meses en los que la calefacción estará encendida. Este output, como es lógico, habrá de obtenerse para cada una de las dos temperaturas de consigna.

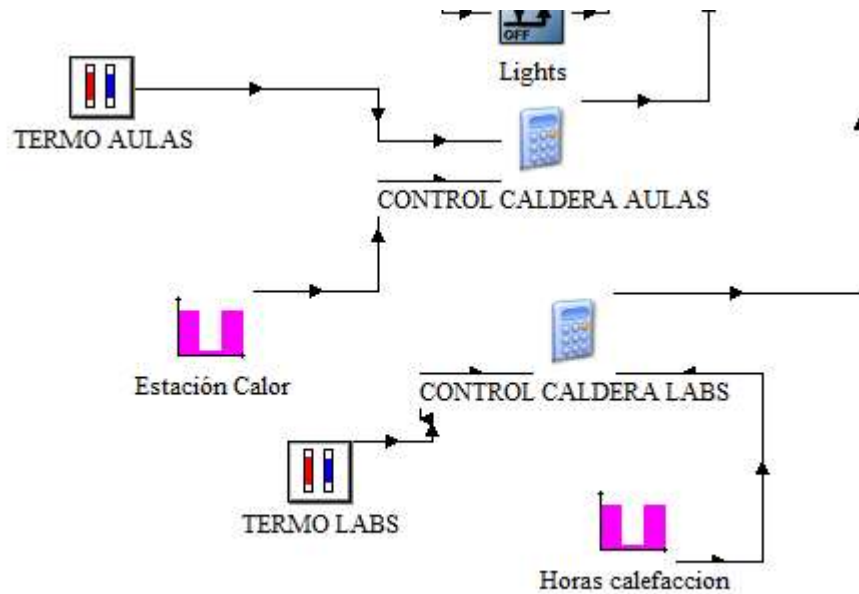


Figura 43 Detalle de los controladores de las temperaturas de consigna. Elaboración propia

De esta manera, se establecen los límites de operación diarios y mensuales de la calefacción, y el sistema será capaz de mantener la temperatura de consigna solo las horas en las que el edificio esté ocupado, ahorrando energía aquellas horas en las que no es necesario alcanzar las temperaturas de consigna.

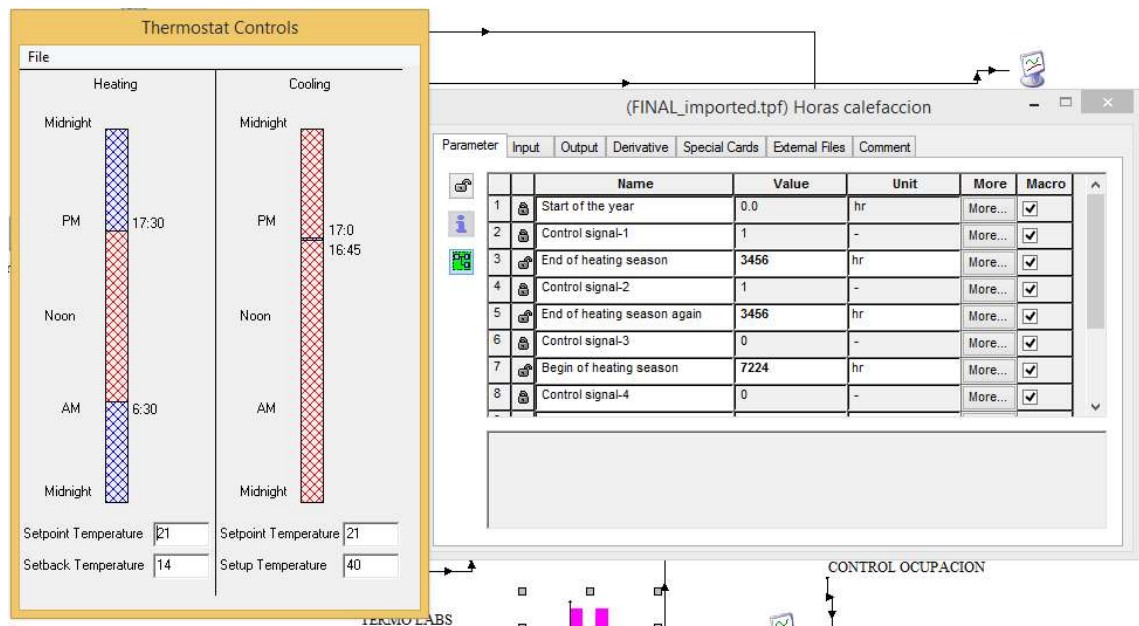
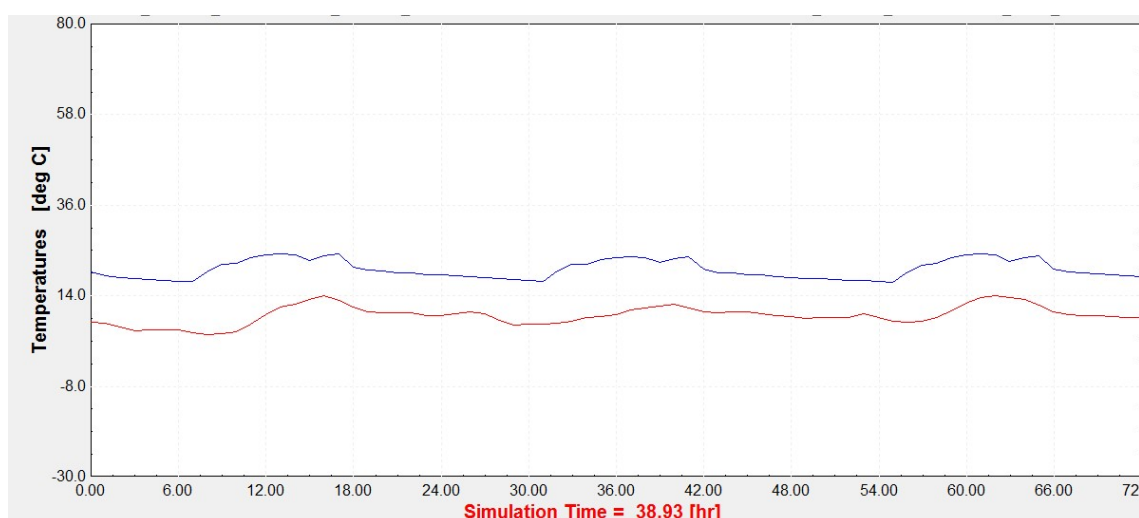


Figura 44 Componentes del controlador de la temperatura de consigna, termostato (izquierda) y control de estación (derecha). Elaboración propia

Sin embargo, es necesario un proceso de iteración para establecer la hora crítica a la que la calefacción debe ponerse en marcha por las mañanas para asegurar que una vez los alumnos entran a las aulas la temperatura de consigna ya se haya alcanzado.

Así, se formarán unos picos de temperatura que se mantendrán durante las horas de actividad en el edificio y se reducirán las horas a las que la actividad docente termine.



**Figura 45 Salida de datos de temperatura en una zona de muestra (línea azul representa temperatura interior de la zona, línea roja representa temperatura exterior de la zona).
Elaboración propia**

Con la obtención de los resultados se estudiará el porcentaje de horas en las que se mantiene la temperatura de consigna.

Además, con los controladores de la calefacción se obtiene el valor de Qsens, explicado en el apartado 1.5.3, con el que haciendo una conversión se podrán obtener los datos de demanda de potencia para llegar a alcanzar la temperatura de consigna, con lo que además se podrá calcular el consumo y el gasto de operación del sistema utilizado para su posterior comparación con el sistema actualmente instalado.

4.4 Introducción de inputs en TRNBuild

Introducir los outputs obtenidos de los controladores nombrados en el punto anterior como inputs para TRNBuild consiste en un proceso mecánico que consta de varias partes.



Figura 46 Ejemplo de configuración de salida de datos. Elaboración propia

En primer lugar, es necesario crear con anterioridad estos inputs en TRNBuild, para su posterior enlace con los outputs de los controladores en Simulation Studio. Es decir, en TRNBuild se crean los inputs que sean necesarios para que, a la hora de introducirlos en Studio, aparezcan en una lista de variables en la que se debe ligar los outputs con los inputs.

Después de introducir las variables necesarias en el controlador del edificio, se procede a editar el mismo con TRNBuild.

Si los inputs han sido introducidos correctamente, estos aparecen en una lista de inputs en la que todos ellos están mezclados, es decir, TRNBuild no hace una diferenciación entre inputs del orden de “input de calefacción” o “input de infiltraciones”, sino que es el propio usuario el que, ayudándose del nombre que le haya otorgado al propio input, debe diferenciar para qué es cada uno.

Estos inputs son la base para configurar las diferentes características del departamento a climatizar, tales como la presencia de calefacción o refrigeración, o las ganancias de la estancia.

Tras haber ligado todos los outputs de los controladores con los inputs necesarios para el diseño de las características de las zonas climatizadas, se procede, zona por zona, a configurar dichas características dependiendo de la zona en cuestión.

Por ejemplo, en una zona que esté dentro del grupo que se ha considerado no calefactar, se deberá configurar únicamente el factor de infiltraciones, mientras que una zona que se encuentre dentro del grupo “aulas”, cuya temperatura de consigna son 21⁰C, se habrán de configurar los factores de calefacción, infiltraciones, confort y ganancias.

En este punto cabe destacar que no se han introducido las ganancias provenientes de la iluminación artificial instalada en la totalidad del edificio puesto que haría falta un estudio lumínico más amplio del que se podría realizar en este proyecto y la introducción de este dato sin estar contrastado por un estudio real produciría más irregularidades en la simulación de las que se producen sin incluir este aspecto. Además, teniendo en cuenta de que se tratan de lámparas de tubos fluorescentes, el aporte calorífico es mínimo.

Una vez todas las zonas han sido configuradas, se vuelve a Studio para ejecutar la simulación y comprobar los resultados.

5 RESULTADOS

Tras realizar las simulaciones en Trnsys Simulation Studio, se obtienen los valores de temperaturas y QSens de todas las zonas a través de los plotters instalados en la interfaz virtual. Estos datos son volcados a unos ficheros .txt con texto en ASCII para su posterior tratamiento en Excel con el fin de trabajar con ellos numéricamente de una forma más precisa.

5.1 Iteración a través de los primeros resultados

Como se ha mencionado anteriormente, la primera simulación se realiza considerando un sistema de calefacción de potencia infinita. De esta manera, el usuario se asegura de que el sistema obtendrá la energía suficiente y necesaria para abastecer las necesidades caloríficas de cada zona.

Cabe destacar el hecho de que el sistema esté dimensionado a potencia infinita no significa que los resultados de potencia necesaria extraídos del tratamiento de los valores de QSens estén sobredimensionados. Por el contrario, de esta manera es posible identificar el pico de potencia máxima que se alcanza a lo largo del año para tomarlo como valor de referencia a la hora de configurar el sistema con una potencia real.

Para realizar este cálculo es necesario trabajar con los valores obtenidos del parámetro QSens, los cuales se extraen en un fichero externo para su tratamiento en Excel.

En la siguiente figura puede verse la representación gráfica que Trnsys realiza del parámetro QSens. En ella puede observarse el parón de calefacción realizado durante los meses cálidos del año, comprendidos entre junio y octubre.

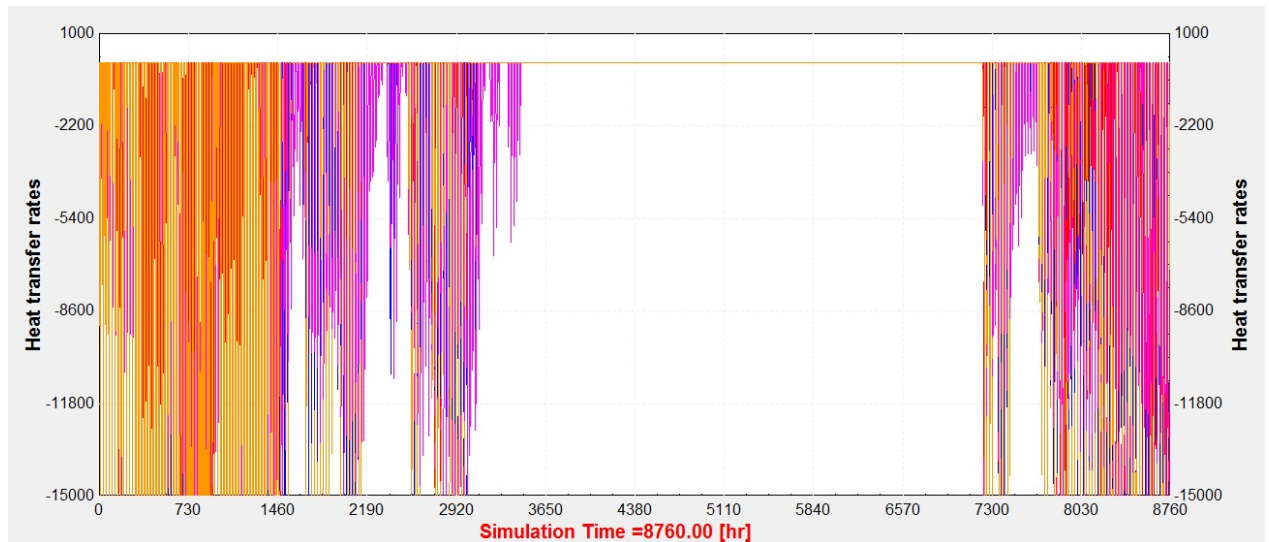


Figura 47 Obtención datos de QSens en TRNExe. Elaboración propia

Con el fin de trabajar con estos datos de manera más precisa, se vuelcan en un libro de Excel a través de un fichero creado por el plotter de Trnsys.

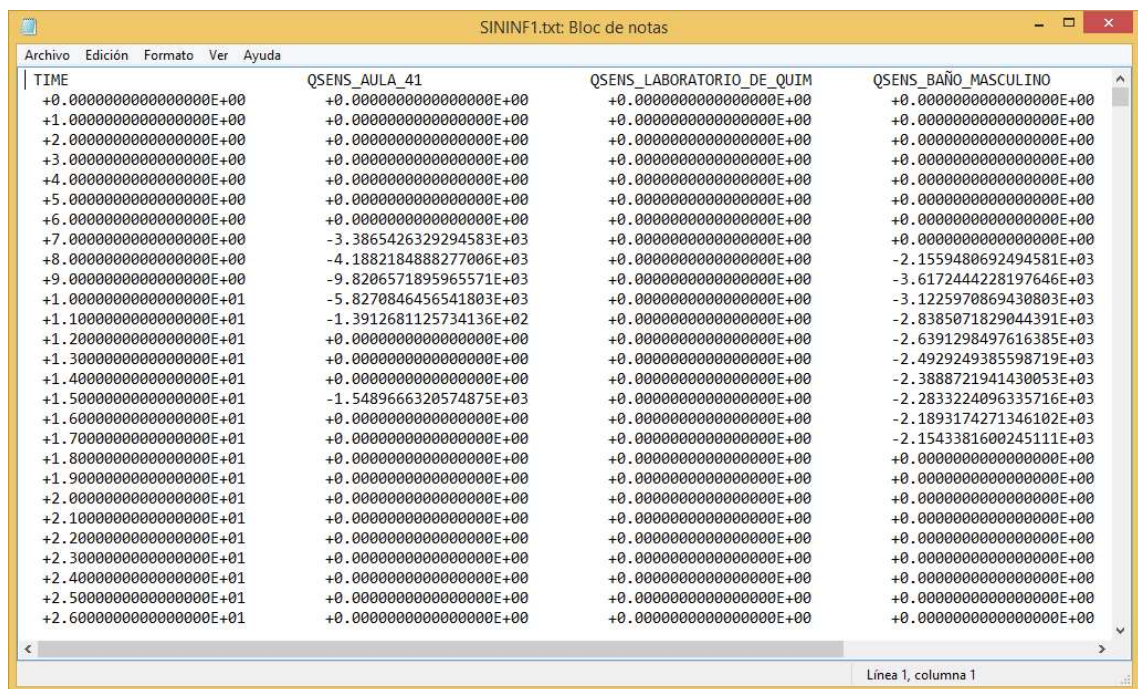


Figura 48 Datos obtenidos a través del Plotter 65c. Elaboración propia

Con los datos de este fichero se realiza un sumatorio por horas y posteriormente por meses, realizando su conversión a kWh, teniendo en cuenta que QSens es expresado en kJ/h por lo que:

$$QSens = \frac{kJ}{h} \rightarrow \frac{\frac{kJ}{h}}{3600(\frac{h}{s})} = kW$$

Horas	Consumo horario (kJ)	Potencia (kW)
0,00	0,00	0,00
1,00	0,00	0,00
2,00	0,00	0,00
3,00	0,00	0,00
4,00	0,00	0,00
5,00	0,00	0,00
6,00	0,00	0,00
7,00	-6688,56	1,86
8,00	-43964,18	12,21
9,00	-125084,79	34,75
10,00	-66513,88	18,48

Tabla 4 Tratamiento de datos en Excel para operar con ellos. Elaboración propia

A continuación, tras agrupar las horas en meses, se obtienen los resultados del consumo total de energía del mes en cuestión, en kWh.

Mes	Energía mes (kWh)
1	16566,71
2	21395,52
3	8030,20
4	6755,38
5	4273,75
6	0,00
7	0,00
8	0,00
9	0,00
10	919,05
11	6692,99
12	22554,86

Tabla 5 Consumos de energía obtenidos para los meses del año. Elaboración propia

Con todos estos datos, se construye una gráfica en Excel con la que obtener el valor exacto de la potencia pico del sistema.

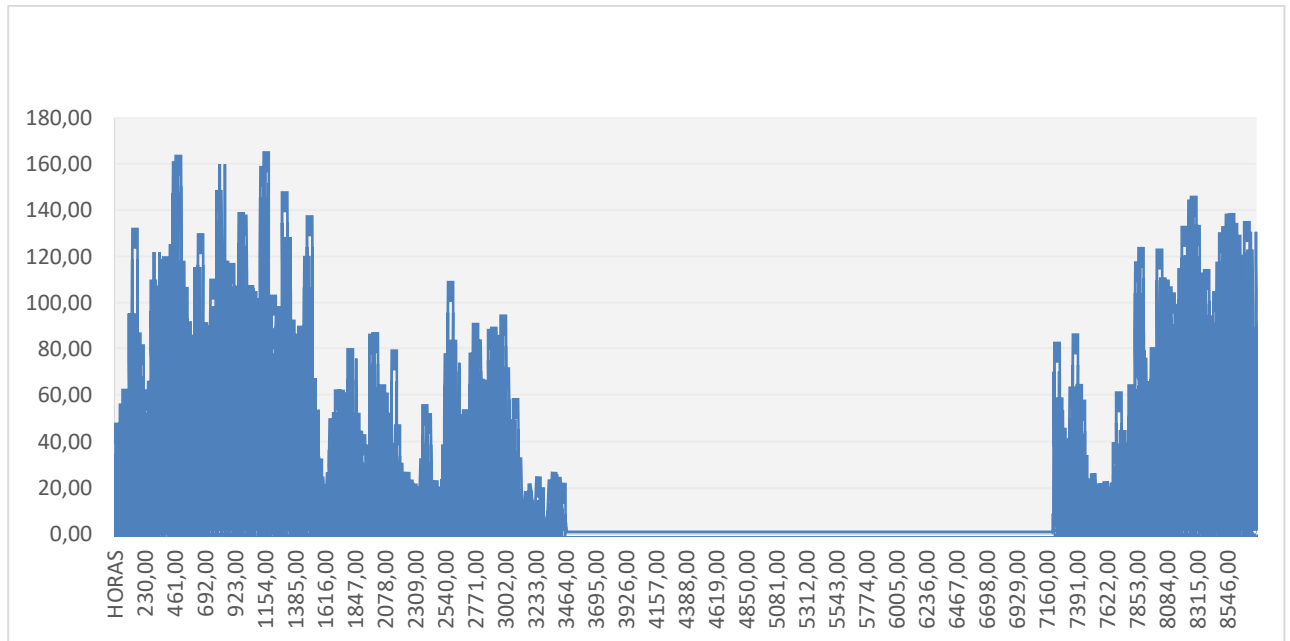


Figura 49 Representación gráfica de las potencias obtenidas. Elaboración propia

Tanto en la gráfica como en las tablas, se obtiene como potencia máxima o pico 160kW, alcanzados en el mes de febrero, lo cual tiene mucho sentido si se toma en consideración que febrero es el mes más frío del año.

Una vez obtenida esta potencia, se introduce en Trnsys Simulation Studio a través de los controladores de las temperaturas de consigna que controlan el funcionamiento del input *heating* de TRNBuild. Para ello no hay más que introducir lo siguiente en la ecuación:

$$ON_{CALEF} = Mese \cdot 160 \cdot 3600$$

“Meses” es un parámetro con el que se controla la condición de apagado de calefacción durante los meses de verano.

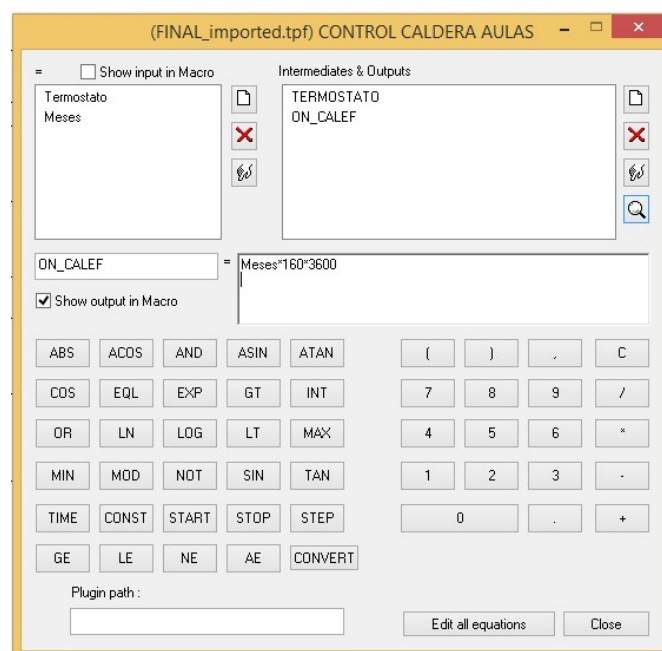


Figura 50 Operador de TRNSYS Simulation Studio. Elaboración propia

A continuación, se realiza de nuevo la simulación utilizando como potencia base 160kW.

5.2 Obtención de temperaturas

Los aspectos indicativos de que la instalación funciona como se desea, son los siguientes:

- Como se ha mencionado con anterioridad, los laboratorios deben estar a menor temperatura que las aulas.
- La temperatura debe oscilar alrededor de la temperatura de consigna, y debe ser superior durante los meses de invierno a la temperatura del aire del exterior.
- Si la temperatura asciende o desciende sin control durante los meses estivales significa que el controlador de la estación climática funciona correctamente.
- Teniendo en cuenta que hay zonas sin climatizar, estas deberían encontrarse a menor temperatura que las climatizadas.

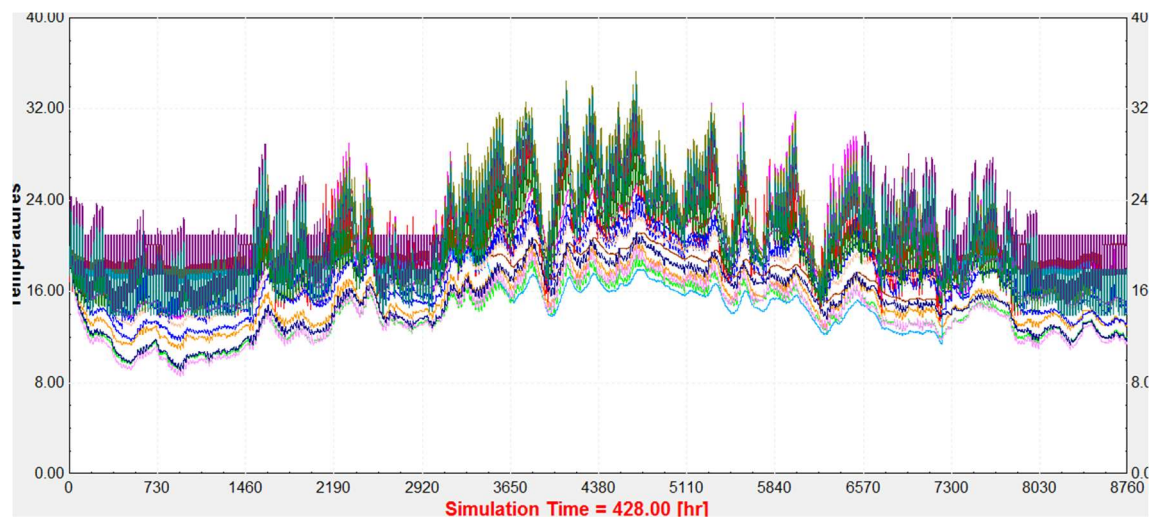


Figura 51 Obtención de temperaturas en TRNExe. Elaboración propia

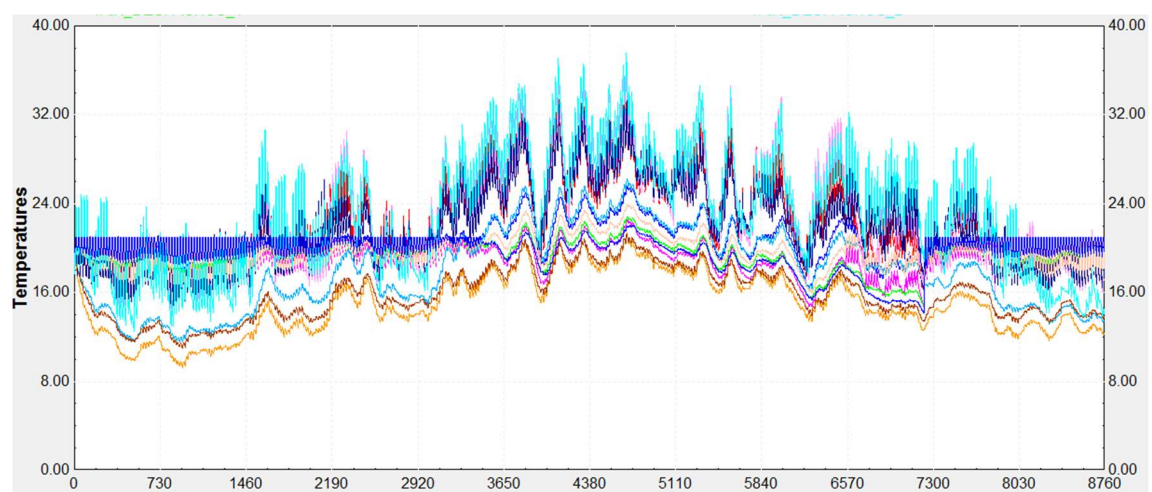


Figura 52 Obtención de las temperaturas restantes en TRNExe. Elaboración propia

De los resultados de temperaturas se obtiene que durante el periodo de climatización, todas los locales se encuentran en la temperatura de consigna salvo en casos puntuales donde la temperatura exterior supera la media mensual, produciendo un pico de temperatura que, aun así, en ningún caso supera los valores admisibles de trabajo.

A su vez, las altas temperaturas alcanzadas durante la época estival, no son objeto de observación de este proyecto ni de la instalación a proponer, puesto que durante este periodo no tiene lugar ninguna actividad y tampoco existen equipamientos que puedan ver comprometida su integridad debido a estas temperaturas.

5.3 Selección de la instalación

Como se ha ido adelantando a lo largo del proyecto, se optará por la instalación de una bomba de calor hidrotérmica, debido a que ofrece grandes ventajas con respecto a las otras opciones disponibles, como, por ejemplo, suponer una fuente de energía renovable.

Además, al contrario que otras fuentes de energía renovable, la extracción de energía calorífica del agua del mar ofrece una incertidumbre prácticamente nula. Es decir, en el caso de la energía eólica, por ejemplo, su captación energética depende de las condiciones del viento a lo largo del año, el mes o incluso del día, por lo que la incertidumbre de su producción es relativamente alta debido a la imprevisibilidad del viento. En el caso de la captación de energía del agua del mar, la única variable que provoca cierto nivel (nimio) de incertidumbre, es su temperatura.

La temperatura del agua del mar en la ría de Pontevedra oscila de 2 a 3°C hacia arriba o hacia abajo centrándose en una media de 16-17°C. A parte de que esta variación es mínima, el aumento a la disminución de la temperatura se realiza de manera gradual a lo largo de un período específico del año, ya sea verano o invierno, por lo que no afecta al funcionamiento del conjunto de captación de la bomba de calor.

Otro factor importante para inclinarse por la instalación de este sistema es el hecho de que la porción de ría delimitada por la dársena militar de la ENM pertenece a la propia ENM, por lo que, para la instalación, que a su vez es relativamente sencilla, no son necesarias las licencias de obra que de otra manera tendrían que ser solicitadas.

Con respecto a la instalación, simplemente serían necesarios el conjunto de transporte del fluido refrigerante, la zona de captación (evaporador), la válvula de expansión, el compresor y los elementos terminales de disipación del calor extraído.

5.3.1 Elementos de la instalación hidrotérmica

Las instalaciones hidrotérmicas tienen una serie de características especiales, por las cuales incluyen más elementos que una instalación geotérmica, por ejemplo.

En primer lugar, es necesario el conjunto de captación, el cual se basa en un intercambiador de calor. Es en este conjunto donde el fluido caloportador absorberá el calor extraído del agua del mar para ser transportado hasta el compresor y el conjunto de emisión o de disipación.

También es necesario el conjunto generador, compuesto por la bomba de calor. En ella se introducen todos los elementos del ciclo sufrido por el refrigerante para obtener el calor a través del calor latente del agua de mar.

A su vez, es necesario el conjunto de emisión por el que se calentarán las zonas climatizadas. Estos pueden consistir en fancoils, radiadores, etc.

La principal diferencia de la instalación hidrotérmica frente a la geotérmica es que, al estar la obtención de energía hidrotérmica menos extendida que la geotérmica, se suelen adaptar las bombas geotérmicas del mercado para que operen con el agua del mar.

El principal problema es que estas bombas no están preparadas para trabajar con el agua del mar, por lo que se hace necesaria la instalación de un sistema de captación que separe el agua del mar del fluido caloportador, y obtener la temperatura del mar mediante un intercambiador de calor.

Es decir, que la instalación de captación constará de dos circuitos diferenciados, uno externo por el que circule el agua del mar, y otro interno por el que circule el fluido caloportador, con un

intercambiador de calor conectando ambos circuitos, para obtener el calor del agua del mar sin contaminar el circuito de la bomba de calor con el agua salada.

Resumiendo, un sistema de climatización hidrotérmica contiene:

- Elemento de potencia, es decir, la bomba de calor.
- Elementos conductores, los cuales transportan todos los fluidos necesarios para la obtención del calor en la zona climatizada.
- Elementos terminales, aquellos que transmiten el calor del fluido caloportador a los diferentes locales climatizados.
- Elemento de captación, basado tanto en las bombas y conductos que formarán parte del circuito exterior e interior, como en el evaporador en el que se obtiene el calor extraído.
- Elemento de disipación, o el condensador en el que el refrigerante aporte el calor al fluido caloportador, que posteriormente transportará a los diferentes elementos terminales.

5.4 Diseño de la instalación

En el apartado anterior se ha realizado una aproximación a los elementos que se necesitarían de forma generalizada. En este apartado, se pretende sondear el mercado en busca de los elementos necesarios y combinarlos de forma que la totalidad de la instalación sea capaz de abastecer la demanda energética del edificio y sus demandas caloríficas en los diferentes departamentos.

5.4.1 Bomba de calor

Tras sondear en el mercado diferentes alternativas se decide coger el testigo del trabajo realizado por el AF Díaz del Río Oleaga en su TFG “Estudio de alternativas de climatización en el cuartel Francisco Moreno” durante el curso 2014/2015, en el que destaca un fabricante de bombas de calor frente a otros.

Dicho fabricante es *Ecoforest*, el cual no solo fabrica bombas de calor, sino que también comercializa fancoils. Entre su alta gama de productos se encuentran diferentes bombas de calor con diferentes ofertas de potencia.

Tras el estudio de los resultados obtenidos en el apartado 5.1, se constata que es necesaria una instalación que sea capaz de cubrir al menos 160kW de potencia, la cual supone la potencia pico de la instalación a lo largo del año.

La bomba de calor de alta potencia que más potencia ofrece Ecoforest es la denominada *ecoGEO HP1/3*, la cual posee una potencia de entre 25 y 100 kW. La diferencia entre la *ecoGEO HP1* y la *HP3*, es la inclusión por parte de esta última de un modo de funcionamiento denominado “frío activo”, por lo que la elegida es la *HP1*.



Figura 53 Bomba de calor ecoGEO HP1. Fuente: ecoForest

El modo de funcionamiento de esta bomba es el habitual, solo que el líquido refrigerante y el caloportador son distintos, transfiriéndose el calor entre ellos tras la captación del fluido caloportador en la fuente de energía y tras la condensación del refrigerante.

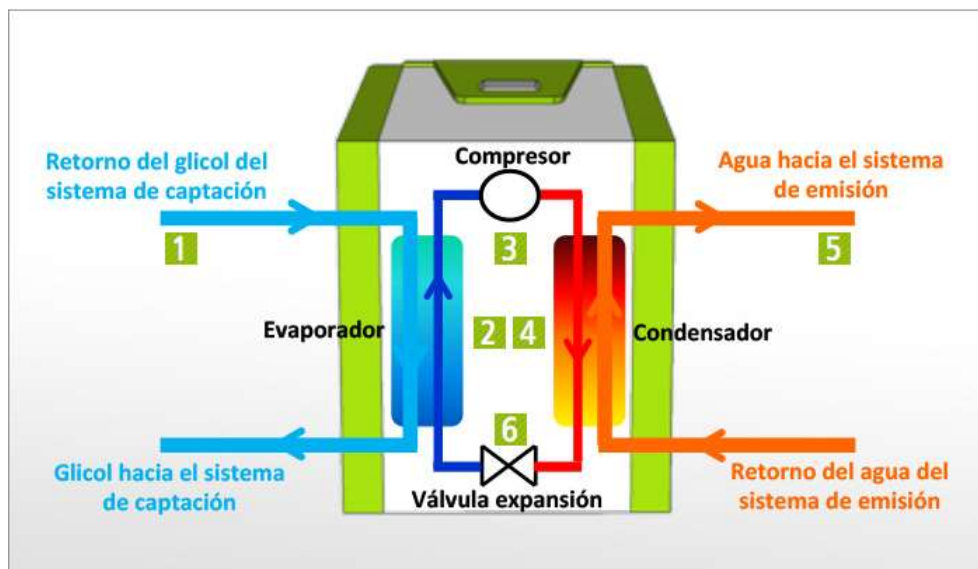


Figura 54 Funcionamiento de la bomba de calor ecoGEO HP1. Fuente: ecoForest

En concreto, usa dos fluidos caloportadores, uno para la fase de captación y otro para la fase de disipación en los locales climatizados. El primero, supone una mezcla de agua con propilenglicol, la cual tiene un punto de fusión inferior a 0°C . El segundo, es agua dulce. El líquido refrigerante usado por la bomba de calor es el R410A.

Como la potencia necesaria es de 160kW, con una sola bomba de calor no conseguimos el aporte suficiente para abastecer la demanda del edificio, por lo que será necesaria la adquisición de dos de estas bombas de hasta 100kW, para poder llegar a alcanzar una potencia pico de 200kW.

El motivo por el cual no se utiliza un mayor margen de potencia es que la potencia pico obtenida de los datos de simulación solo llega a darse en contadas ocasiones a lo largo del año, por lo que los 200kW de potencia serán perfectamente suficientes para atender a la demanda del edificio sin ningún problema.

5.4.2 Conjunto de captación

Con el fin de evitar corrosión en el circuito que transporta el glicol (mezcla de agua y propilenglicol) se realizará la extracción de calor mediante un intercambio de calor entre dos circuitos distintos: uno de agua salada y otro de agua dulce.

Por lo tanto, es necesaria la adquisición de elementos impulsores que aporten la presión necesaria al circuito para hacer circular el glicol y para absorber el agua de mar con una determinada altura de impulsión. En este sentido, el fabricante de la bomba de calor recomienda el uso de las bombas de circulación comercializadas por el fabricante *EBARA*, habiendo que obtener dos bombas distintas.

1. Una bomba para el circuito exterior en el que se absorbe el agua de mar y, tras hacerla pasar por el intercambiador de calor se vuelve a retirar al mar.
2. Una bomba para el circuito interior que haga circular el glicol a lo largo de los conductos de la instalación.

En concreto, la bomba seleccionada es una Monobloc normalizada (DIN 24255) – modelo 65-125/4.0.



Figura 55 Bomba de circulación EBARA modelo 65/Serie 3. Fuente: EBARA

Cabe destacar que no se ha optado por una bomba sumergible en el circuito exterior debido a que, pese a que ofrece la ventaja de no tener que cebarse para su funcionamiento desde la parada, su acceso sería más complicado y la bomba escogida ofrece una presión de impulsión suficiente como para aspirar el agua del mar desde la altura máxima de aspiración, que sería de unos 3 metros. La presión máxima de trabajo de la bomba es de 10 bar y permite un rango de temperaturas del circuito vehiculado de entre -10 y 90°C, lo suficiente para cubrir las necesidades del sistema.

El sistema de captación debe tener, además, un intercambiador de calor para permitir al glicol el transporte de la energía calorífica obtenida del agua del mar hasta la bomba de calor. El fabricante de la bomba de calor recomienda el uso del intercambiador de calor de la casa *Alfa Laval*.

Tras contactar con Alfa Laval y explicarles las necesidades de la posible instalación junto con los datos de potencia necesaria y de las bombas que se utilizarían junto con su intercambiador, su recomendación fue el uso del intercambiador de placas soldadas *AC120EQ/ACH120EQ*, especialmente diseñado para su uso como intercambiador de calor en instalaciones con bomba de calor.



Figura 56 Intercambiador de calor Alfa Laval AC120EQ. Fuente: Alfa Laval

5.4.3 Conjunto de disipación

El conjunto de disipación consta de todos aquellos fancoils por los que se circula el agua caliente obtenida del intercambio de calor producido en las bombas de calor. Estos tienen la misión de calentar el aire de los locales climatizados para aumentar su temperatura.

Los fancoils escogidos forman parte de la misma casa que las bombas de calor, Ecoforest, por ser altamente recomendados por ellos mismos y disponer de un amplio catálogo que se atiene a las necesidades de la instalación.

Haciendo un análisis de las demandas energéticas de las zonas térmicas del edificio, se obtiene que el pico de demanda de potencia calorífica por habitación es de unos 12kW, por tanto, se opta por obtener los fancoils *ecoGEO FC-W4* por ofrecer una potencia de 4,34kW, a fin de poder utilizar los fancoils de manera multiplicativa en aquellas zonas que requieran de mayor poder calorífico, sin provocar por ello la instalación de un gran número de fancoils.



Figura 57 Fancoil ecoGEO FC-W4. Fuente: ecoForest

Posteriormente, en el estudio del esquema de instalación, se reseñará el número de fancoils por habitación.

5.4.4 Elementos intermedios

Los elementos intermedios se ven representados en la sección de tuberías que habrá de transportar el fluido caloportador a través de todos los fancoils del edificio.

El dimensionamiento de estas tuberías depende de diversos factores tales como las pérdidas de carga que se producen en la instalación o el caudal de aire necesario en los fancoils. El Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios, o RITE, establece cinco criterios posibles para el cálculo de este diámetro.

Estos cálculos siempre tienen la premisa de que una red de tuberías debería ser descartada si sus pérdidas de carga superan los 40mmca/m (milímetros columna de agua / metro) [1]. En este proyecto, los cálculos se basan en unas tablas con valores tabulados ofrecida por la Guía técnica de instalaciones de climatización por agua.

Potencia (kW)	Caudal (l/h)	Caudal (l/s)	Diametro nominal	Velocidad (m/s)	DP (mmca/m)
1	172	0.048	12x1.0	0.61	59.6
			15x1.0	0.36	17.2
1.5	258	0.072	12x1.0	0.91	121.1
			15x1.0	0.54	34.7
2	344	0.096	15x1.0	0.72	57.4
			18x1.0	0.48	21.4
2.5	430	0.119	15x1.0	0.9	85
			18x1.0	0.59	31.6
3	516	0.143	18x1.0	0.71	43.5
			22x1.0	0.46	15
4	688	0.191	18x1.0	0.95	72.3
			22x1.0	0.61	24.9
5	860	0.239	18x1.0	1.19	107.3
			22x1.0	0.76	36.9
6	1032	0.287	22x1.0	0.91	51
			25x1.5	0.75	32.3
7	1203	0.334	25x1.5	0.88	42.5
			28x1.5	0.68	23

Tabla 6 Relación de características de las tuberías para su dimensionamiento en instalaciones de bombas de calor operando con agua. Fuente: IDAE

En esta tabla se relacionan, la potencia del fancoil con su caudal, con sus pérdidas de carga y sus medidas.

Así, de la tabla se obtiene que, si el fancoil escogido tiene 4,36kW de potencia, tomando como referencia los 5kW de la tabla, para tener unas pérdidas de carga inferiores a 40mmca/m es necesario que la tubería sea de 22x1,0.

5.4.5 Instalación de las dos bombas de calor en cascada

Gracias a la modularidad de la bomba de calor escogida, es posible realizar una instalación con hasta 6 equipos en cascada, lo cual permite que se puedan alcanzar hasta 600kW de potencia con una instalación.

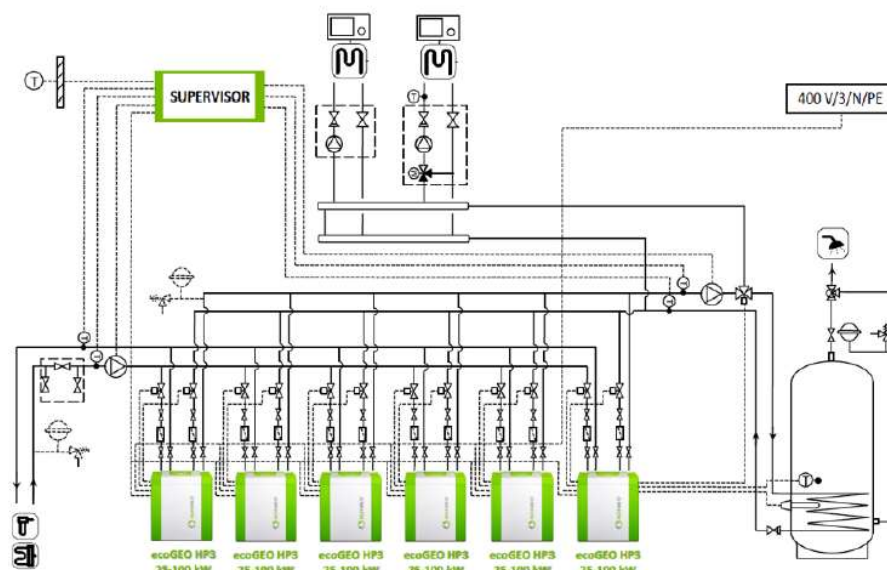


Tabla 7 Ejemplo de esquema de instalación con 6 bombas de calor en cascada. Fuente: ecoForest

En el caso de este proyecto son necesarios dos equipos, para así lograr alcanzar la potencia requerida de 200kW. Las bombas estarían controladas por una centralita que tomaría las decisiones de operar con una o con las dos dependiendo de la demanda calorífica del edificio.

5.5 Esquema de la instalación

Con los elementos seleccionados anteriormente, se procede a aproximar el diseño del esquema de la instalación. Para ello se usará el modelo en 3D del edificio en SketchUp y los planos del mismo en CAD.

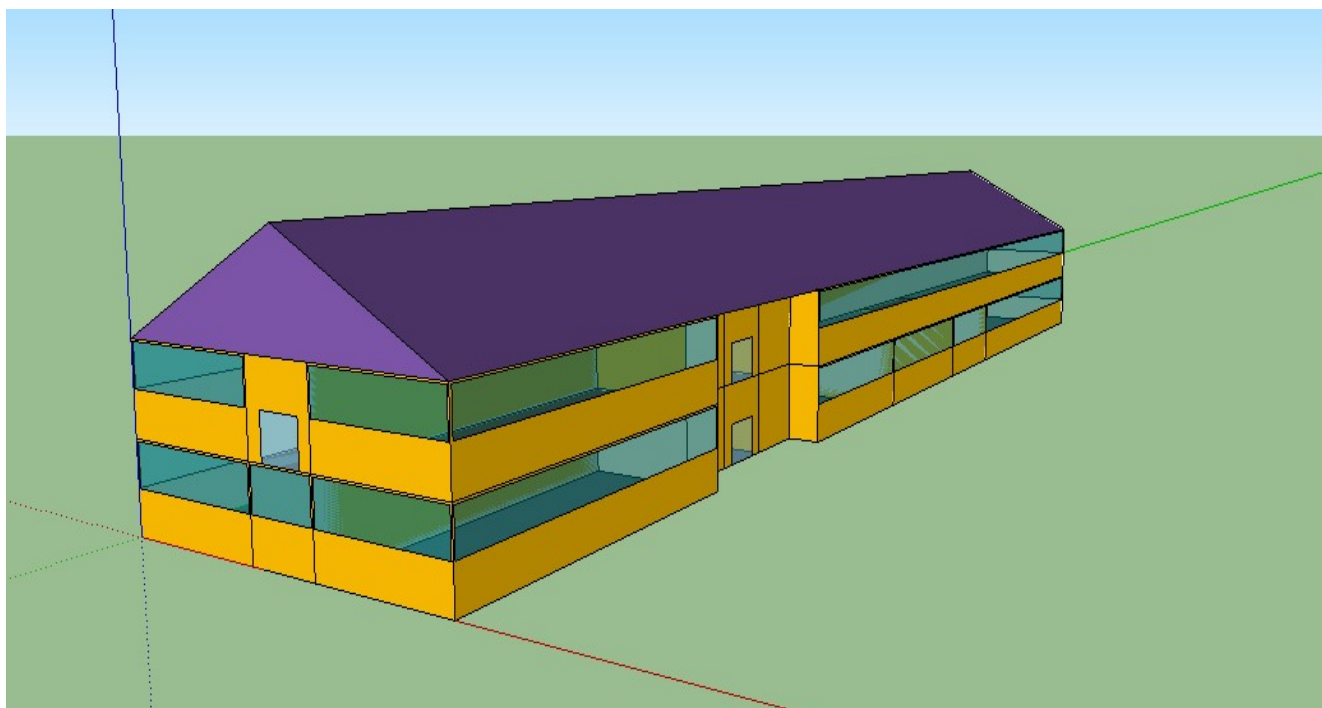


Figura 58 Vista de la fachada principal del Isaac Peral en 3D

En la figura superior se representa el circuito exterior de la instalación, con las bombas de circulación de los circuitos de agua dulce y agua salada y el intercambiador de calor de placas soldadas como punto de unión entre los dos circuitos.

Se empieza por realizar el esquema en la primera planta, colocando las bombas de calor en cascada en el actual cuarto de calderas. Para posteriormente, suponiendo una toma de agua caliente desde la sala de calderas al piso superior, esquematizar el circuito de la planta superior.

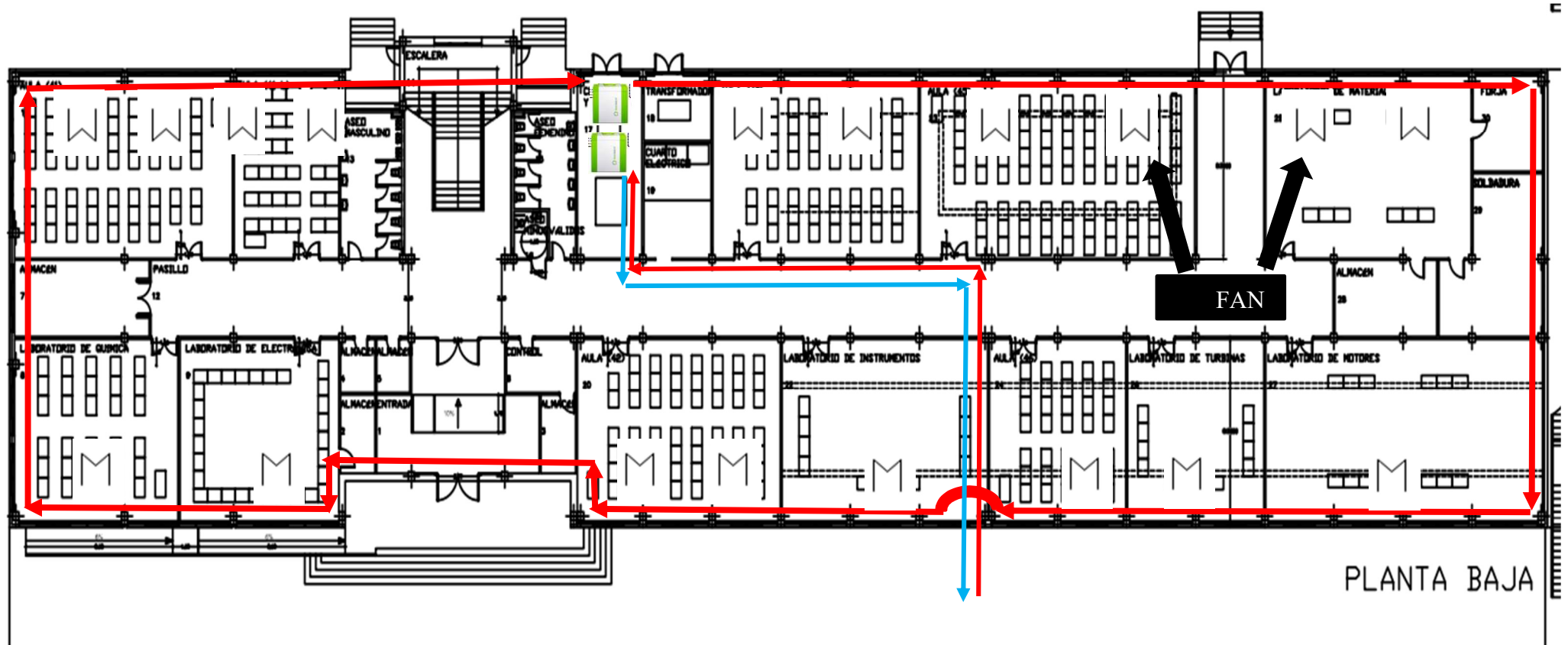


Figura 59 Esquema de instalación del sistema de climatización hidrotérmico en primera planta. Elaboración propia

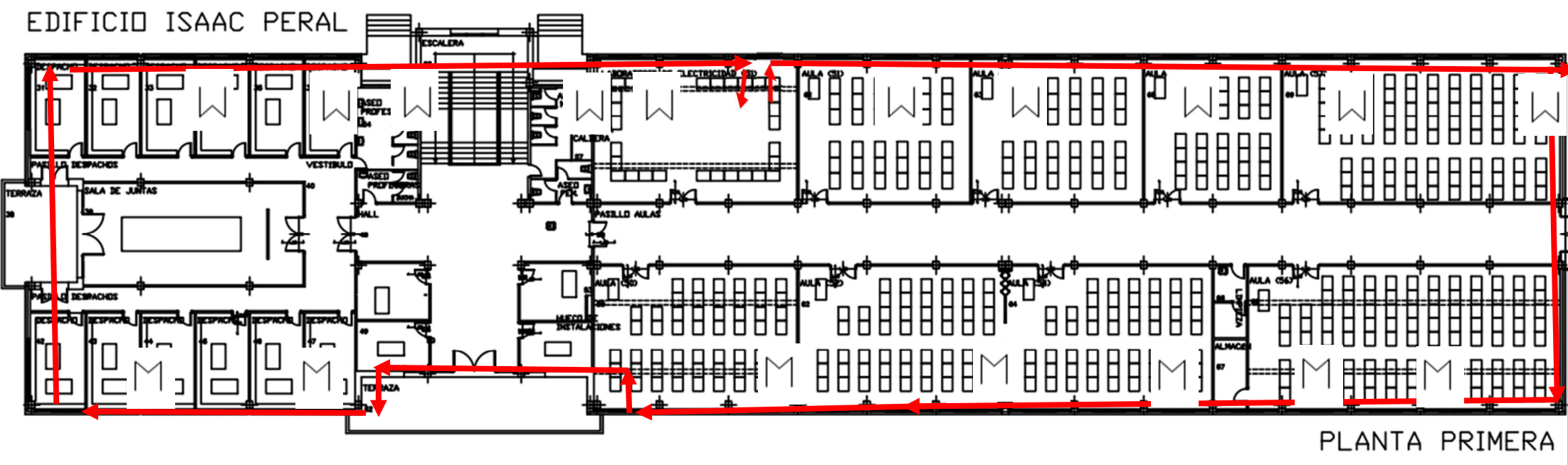


Figura 60 Esquema de instalación en primera planta. Elaboración propia

El criterio de colocación de los fancoils es sencillo. Las zonas cuya temperatura de consigna es igual a 21°C son las más demandantes, por ello si se trata de un aula se colocarán 2 fancoils, que serán suficientes para abastecer al aula. Las zonas que demandan hasta un pico de 12kW en una hora, son zonas que agrupan varias aulas por lo que ya estarían cubiertas con el criterio anterior.

Para los laboratorios con un fancoil por laboratorio se consigue climatizar los mismos, ocurriendo la misma compensación que en el caso anterior en el supuesto de que una zona comprenda más de un laboratorio.

Aun así, existen excepciones por las cuales, si el espacio de un aula es considerablemente mayor al de otra adyacente a ella, el aula de menor superficie recibirá un fancoil mientras que el aula mayor recibiría un tercero o se quedaría con dos.

Así, aproximadamente las características de la instalación son:

- 35 fancoils ecoGEO FC-W4
- 2 Bombas de calor ecoGEO HP1
- 2 bombas de circulación EBARA modelo 65
- 1 intercambiador de calor de placas soldadas Alfa Laval AC120EQ
- Aproximadamente 440 metros de tuberías de cobre 22x1,0

5.6 Estudio energético

A continuación, se resumen los consumos obtenidos del histórico de la caldera de gas del Isaac Peral junto con los consumos estimados que se obtendrían con el sistema de climatización hidrotérmico.

	GAS ISAAC PERAL (MWh)	BOMBA DE CALOR (MWh)	BALANCE	AHORRO ENERGÉTICO
ENERO	14.06	16.57	-2.51	-17.85%
FEBRERO	29.51	21.4	8.11	27.48%
MARZO	20.44	8.03	12.48	60.71%
ABRIL	7.26	6.76	0.5	6.89%
MAYO	7.26	4.27	2.99	41.18%
JUNIO	0	0	0	0%
JULIO	0	0	0	0%
AGOSTO	0	0	0	0%
SEPTIEMBRE	0	0	0	0%
OCTUBRE	1.11	0.92	0.19	17.12%
NOVIEMBRE	13.15	6.69	6.46	49.13%
DICIEMBRE	24.6	22.55	2.05	8.33%
ANUAL	117.39	87.19	35.22	30%

Tabla 8 Comparación de consumo actual con el de la instalación hidrotérmica. Elaboración propia

Tras comparar los datos de consumo energético, se puede observar que el ahorro producido por la sustitución del sistema de climatización es sustancial, especialmente en los meses de marzo y noviembre. A su vez, debido al modelo de control de la estación invernal en la simulación, el sistema permanece en funcionamiento durante la época de Navidad, periodo durante el cual la actual caldera es apagada. Este hecho justifica el balance energético negativo en el mes de enero.

5.7 Estudio económico

5.7.1 Coste de instalación

Equipo	Unidades	Precio/Ud	Coste total
Bomba de calor ecoGEO HP1	2	23500€	47000€
Intercambiador de calor Alfa Laval	1	4278.3€	4278.3€
Bomba de circulación Ebara	1	400€	400€
Fancoil ecoGEO FC-W4	35	595€	20825€
Tubería de cobre 22x1,0	440	5.5€	2420€
			74923,3€

Tabla 9 Relación de costes de equipamientos de la instalación. Elaboración propia

Los precios medios han sido obtenidos de los diferentes fabricantes tras solicitar presupuestos, además, cabe destacar que estos podrían verse reducidos por ofertas en caso de contratar la obra conjuntamente. Además, se ha considerado que la mano de obra puede ser aportada por el personal de mantenimiento de la ENM.

5.7.2 Tiempo de amortización

Se entiende por tiempo de amortización el tiempo necesario para que la inversión económica realizada sea rentable. Esto depende de dos factores:

- En primer lugar, depende de la inversión inicial, que supone un gasto acumulado instantáneo justo al comenzar a operar el nuevo sistema.
- Además, depende del precio del gas natural de calefacción, así como de la electricidad

El edificio Isaac Peral, por poseer unos consumos mayores que 5000kWh al año, se encuentra dentro del grupo de Tarifas de Último Recurso 2, para los cuales, aquellos edificios con consumos de entre 5000 y 50000kWh, el precio del gas de calefacción es de 0,05039908€/kWh. Este valor no es constante, pues el precio del gas y los derivados del petróleo está en continuo cambio.

En cuanto al precio del kWh en términos de energía eléctrica, su precio actual ronda los 0.14€/kWh, aunque es un precio que puede variar en función de la configuración del contrato con la compañía eléctrica (por ejemplo, la contratación que diferencia entre horas punta y horas valle, con respecto al consumo). A su vez se debe tener en cuenta que se ha tomado como referencia un Coeficiente de Operación de 4 (el peor de los casos) para la bomba de calor.

A su vez, se ha supuesto, en esta primera estimación, valores constantes tanto del precio de la energía, así como del consumo del edificio. Posteriormente se analizará el efecto que produce la modificación del parámetro de producción en el periodo de amortización.

Los precios de mantenimiento no se incluyen en este balance económico ya que se ha supuesto que el coste de mantenimiento de ambas instalaciones es similar.

	Consumo Gas Natural		Consumo sistema hidrotérmico		
	Anual	Acumulado	Anual	Acumulado	Balance
AÑO 0	0€	-	-	74923,3€	-74923,3€
AÑO 1	5916,35€	11832,70€	1525,83€	76449,13€	-66142,25
AÑO 2	5916,35€	17749,04€	1525,83€	77974,95€	-61751,73
AÑO 3	5916,35€	23665,39€	1525,83€	79500,78€	-57361,21
AÑO 4	5916,35€	29581,74€	1525,83€	81026,60€	-52970,68
AÑO 5	5916,35€	35498,09€	1525,83€	82552,43€	-48580,16
AÑO 6	5916,35€	41414,44€	1525,83€	84078,25€	-44189,64
AÑO 7	5916,35€	47330,78€	1525,83€	85604,08€	-39799,12
AÑO 8	5916,35€	53247,13€	1525,83€	87129,90€	-35408,59
AÑO 9	5916,35€	59163,48€	1525,83€	88655,73€	-31018,07
AÑO 10	5916,35€	65079,83€	1525,83€	90181,55€	-26627,55
AÑO 11	5916,35€	70996,18€	1525,83€	91707,38€	-22237,02
AÑO 12	5916,35€	76912,52€	1525,83€	93233,20€	-17846,50
AÑO 13	5916,35€	82828,87€	1525,83€	94759,03€	-13455,98
AÑO 14	5916,35€	88745,22€	1525,83€	96284,85€	-9065,45
AÑO 15	5916,35€	94661,57€	1525,83€	97810,68€	-4674,93
AÑO 16	5916,35€	100577,92€	1525,83€	99336,50€	-284,41
AÑO 17	5916,35€	106494,26€	1525,83€	100862,33€	4106,11

Tabla 10 Evaluación del tiempo de amortización de la instalación. Elaboración propia

Como se observa en la tabla, el punto de equilibrio se sitúa entre el año 16 y 17 desde el comienzo de la inversión. Este hecho tampoco es una gran desventaja en sí, puesto que se parte de la base de que la Escuela Naval Militar seguirá formando a los futuros oficiales de la Armada durante las próximas décadas.

5.7.3 Estudio de sensibilidad

En el apartado anterior se ha visto el tiempo de amortización con respecto a unos consumos y precios energéticos permanentes. No obstante, existen algunos factores, que por su nivel de estabilidad son más sensibles que otros, y podrían afectar positiva o negativamente a dicho periodo de amortización.

El factor más sensible para el cálculo del precio de amortización es el precio del gas natural de consumo de calefacción. Predecir con exactitud su precio en años futuros es una tarea imposible, sin embargo, es posible hacer un balance con respecto a su evolución a lo largo de los años pasados, con la finalidad de distinguir aquellos patrones por los que se puedan delimitar los picos máximos y mínimos de su precio razonablemente.

Si se compara el precio del gas natural en 2005 y en 2013, se observa que se produjo una subida del 35% durante esos años. Por otra parte, el precio desde 2013 se ha mantenido, con sus subidas y bajadas de menor calibre, hasta la actualidad. Es decir, desde una acusada subida entre los

años 2005 y 2013, se ha producido un valle en la subida del precio del gas, asentándose en los 0,05039€/kWh actuales.

De este dato también se puede extraer que el precio del gas a lo largo de 7 años puede llegar a incrementarse hasta un 35%, lo que es un dato importante desde el punto de vista optimista del análisis de sensibilidad.

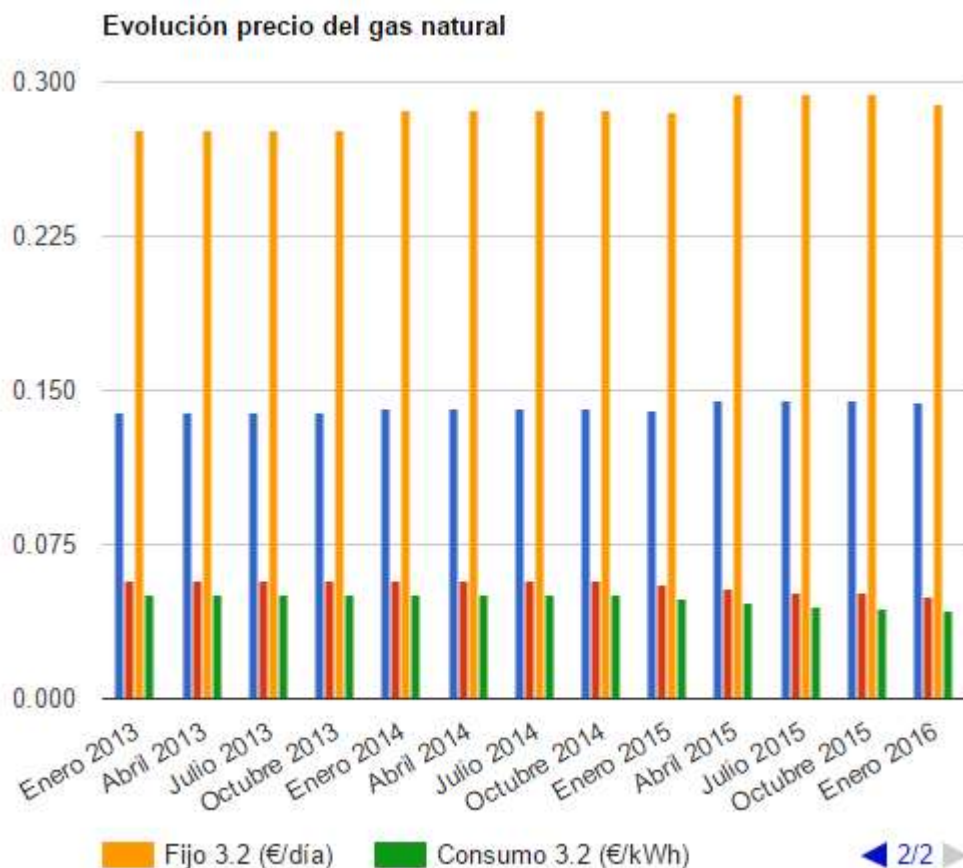


Figura 61 Evolución del precio del gas natural de consumo (en verde). Fuente: Preciogas

Predecir el precio del gas es prácticamente imposible si no se hace desde el punto de vista financiero. El precio del gas en los mercados del mundo afecta directamente al precio de consumo que los usuarios deben pagar a las compañías distribuidoras de gas natural. Una caída en bolsa del precio del gas, por históricos, está caracterizada por una subida del precio fijo del gas ligada a una reducción del precio variable del mismo.

Por lo tanto, en este proyecto y teniendo en cuenta lo que se ha mencionado anteriormente, se va a tomar la tendencia de los últimos 10 años en el precio del gas natural tanto positivamente como negativamente, es decir, para el estudio de sensibilidad se supondrá que desde este momento hasta el punto de amortización de la instalación el gas puede experimentar una subida o bajada en su precio de no más del 35%.

Si tomamos la visión pesimista del estudio de sensibilidad, es decir, aquella en la que el precio del gas natural desciende un 35% (hasta los 0,03432900€/kWh), se obtiene que el punto de amortización se traslada hasta los 29 años.

	Consumo de Gas		Consumo Sistema Hidrotérmico		Balance
	Anual	Acumulado	Anual	Acumulado	
AÑO 27	4029,88€	108806,80€	1525,83€	116120,58€	-4809,72€
AÑO 28	4029,88€	112836,68€	1525,83€	117646,40€	-2305,67€
AÑO 29	4029,88€	116866,56€	1525,83€	119172,23€	198,39€
AÑO 30	4029,88€	120896,44€	1525,83€	120698,05€	2702,45€

Tabla 11 Análisis de sensibilidad desde el punto de vista pesimista. Elaboración propia

Por el contrario, si se opta por la posibilidad de una subida del precio del gas hasta los 0,07039908€/kWh, se obtiene que el tiempo para amortizar la inversión inicial se reduce hasta los 11 años.

	Consumo de Gas		Consumo S. Hidrotérmico		Balance
	Anual	Acumulado	Anual	Acumulado	
AÑO 10	8264,15€	82641,48€	1525,83€	90181,55€	-801,75€
AÑO 11	8264,15€	90905,63€	1525,83€	91707,38€	5936,58€
AÑO 12	8264,15€	99169,78€	1525,83€	93233,20€	12674,90€
AÑO 13	8264,15€	107433,92€	1525,83€	94759,03€	19413,22€

Tabla 12 Análisis del tiempo de amortización desde el punto de vista optimista. Elaboración propia

Así, el tiempo de amortización estudiando el precio del gas como factor sensible dejando fijo el precio de la electricidad quedaría de la siguiente manera.

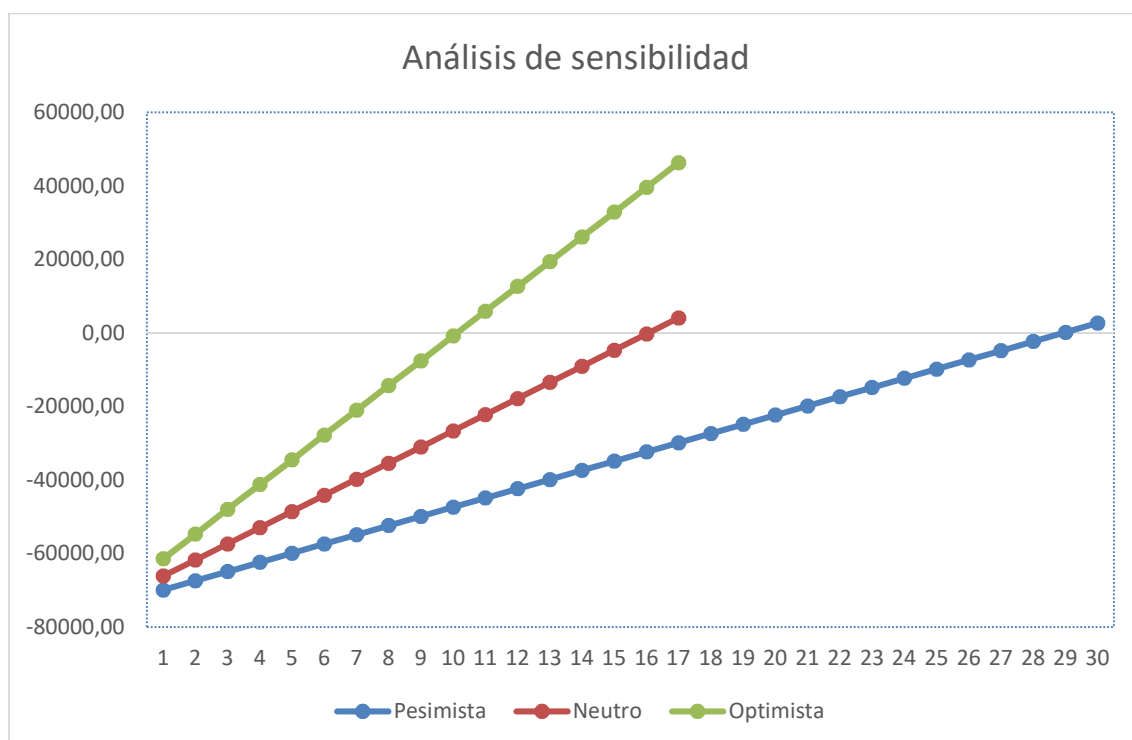


Figura 62 Representación gráfica de las tres predicciones del precio del gas natural. Elaboración propia

Tras estudiarlos, no existe ninguna evidencia de que puedan llegar a producirse cambios sustanciales en los factores internos del sistema, como el precio de los equipos. A lo largo de los años tanto las bombas de calor como los elementos mecánicos del sistema se han mantenido en un precio estable, por lo que son descartados como factores sensibles para el periodo de amortización.

Para concluir, si bien es cierto que el precio de la electricidad históricamente ha subido en la última década en España de manera indefinida, en la actualidad ha detenido ese crecimiento y se iguala con los precios existentes en Europa. Además, el Coeficiente de Operación de la bomba de calor hace que este factor no sea tan determinante con su consumo económico como lo es una caldera con el consumo del gas natural.

6 CONCLUSIONES

La fase de delineación y diseño en 3D consumió gran parte del tiempo para la realización del trabajo por las dificultades que el plugin Trnsys3D acarrea en SketchUp. Sin embargo, la resolución de los errores alertados por la plataforma supuso una buena manera de aprender a manejar las herramientas de Trnsys en cuanto a sus ficheros y posibles errores por fallos en la metodología.

En cuanto a Trnsys, con su conjunto completo de programas, supuso un reto para un usuario que no lo había manejado nunca puesto que se caracteriza por ser un software complejo para los nuevos usuarios. Sin embargo, las posibilidades que Trnsys ofrece han hecho posibles la obtención de unos resultados correctos.

El sistema propuesto se ha demostrado válido y viable. Gracias a la diferenciación de distintos grupos de temperatura de consigna no sólo se ha conseguido aumentar la sensación de confort para las personas que allí estuvieran, sino también se ha conseguido un ahorro energético y económico importante.

Cabe destacar que el modelo de ocupaciones utilizado no tiene en cuenta si en algún momento del día un aula o un laboratorio se encuentra vacío, por lo que climatiza según el horario tipificado independientemente de si se encuentra alguien dentro de la zona o no. En este sentido una posible vía de mejora sería optimizar el modelo de ocupación para lograr que se tengan en cuenta sólo las dependencias del edificio en las que se encuentren los alumnos cada el momento del día.

El balance energético es muy positivo, constatando el hecho de que la opción del uso de estos sistemas de climatización es muy positiva en cuestiones de ahorro energético y económico. Desde el punto de vista económico, además, se han obtenido resultados de amortización acordes con lo que en un principio se esperaba de una instalación de esta magnitud.

Los valores entre los que se mueve el análisis de sostenibilidad son perfectamente factibles. Aunque es poco probable que se llegue a dar un caso tan extremo, son lo suficientemente amplios como para ofrecer una visión realista de un escenario futuro adverso o favorable. Además, comprenden un amplio rango de posibilidades tanto positivas como negativas.

Como conclusión, reseñar que, este proyecto constituye una prueba científica de la utilidad que ofrecen estos sistemas a la hora de instalar un método de climatización cuya fuente de energía sea limpia, ilimitada y fiable.

6.1 Líneas futuras

Aunque durante la realización de este proyecto se ha intentado aproximarse a datos reales y precisos, aún quedan aspectos que deberían ser sometidos a estudio con el fin de ofrecer una línea de investigación complementaria a la aquí desarrollada.

El único límite que posee el desarrollo de los proyectos futuros es la imaginación de quien los emprenda, por ello, cabe destacar algunas de las posibles líneas de investigación que podrían seguir a este proyecto:

- Estudio de la huella de carbono de un sistema de climatización hidrotérmica en el edificio Isaac Peral, teniendo en cuenta todas las emisiones de gases nocivos a la atmósfera, es decir, tanto las emitidas por los sistemas in situ como las emitidas por las fábricas generadoras de electricidad en su producción.
- Instalación de un sistema de climatización hidrotérmico en una de las dependencias del Isaac Peral, mediante una bomba de calor compacta, para la evaluación de su Coeficiente de Operación y resultados de confort.
- Estudio del PMV y el PPD de los alumnos que reciben sus clases en el Isaac Peral, mediante aproximaciones de Fanger y encuestas, utilizando así métodos empíricos y teóricos.
- Estudio sobre la posible instalación de un sistema de climatización geotérmica en aquellos edificios de la Escuela Naval que no estén tan próximos al mar.

7 BIBLIOGRAFÍA

- 1] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Comentarios RITE 2007: Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios, Madrid: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2007.
- 2] Preciogas, «Evolución del precio del gas natural,» 21 Junio 2013. [En línea]. Available: www.preciogas.com.
- 3] Y. Cengel, Thermodynamics: An engineering approach, McGraw-Hill, 2002.
- 4] S. Fernandez Salinas, «Geotermia,» Vaillant, 2010.
- 5] J. M. García de María, Apuntes de la asignatura de climatización, Departamento de Física aplicada: UPM, 2007.
- 6] R. W. Haines, HVAC systems design handbook, McGraw-Hill, 1994.
- 7] Á. J.F., «El cumplimiento de la sección HE4 del CTE sustituyendo las placas solares térmicas por bombas de calor geotérmicas y aerotérmicas,» *Obras Urbanas*, nº 16, pp. 72-75, 2009.
- 8] Á. J.F. y A. J., «Rendimiento de una instalación geotérmica para calefacción y ACS.,» de *II Congreso de energía geotérmica en la edificación y la industria*, Madrid, 2010.
- 9] A. Miranda Barreras, Aire acondicionado, Ediciones CEAC, 2000.
- 10] E. D. d. R. Oleaga, Estudio de alternativas de climatización en el cuartel Francisco Moreno, Marín, 2015.
- 11] J. A. d. A. Rodriguez-Pomatta, S. A. Lastra y L. G. Díez, Climatización: acondicionamiento de aire II, Fundación Escuela de la Edificación, 1995.
- 12] G. S. y M. G., «Energía aerotérmica aplicada a la bomba de calor,» *Ecoconstrucción*, pp. 32-33, 2010.
- G. S., «Energía aerotérmica: una verdad a voces es por fin considerada oficialmente,» *Obras*

- 13] *Urbanas*, pp. 92-94, 2009.
- 14] J. C. P. Sampieri, Acondicionamiento geotérmico de fluidos, Veracruz: Universidad Veracruzana, 2010.
- 15] Ministerio de Fomento, Código Técnico de Edificación, Documento Básico HE con comentarios del Ministerio de Fomento, Madrid: Ministerio de Fomento, 2016.
- 16] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Prestaciones medias estacionales de las bombas de calor para producción de calor en los edificios, Madrid: Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2014.
- 17] AENOR-INSHT, UNE-EN ISO 7730, Madrid: AENOR, 2006.
- 18] P. E. Boyer, J. M. L. Suarez, A. Q. Costas y L. M. L. Ochoa, Simulación de edificios con TRNSYS 17, Vigo: 1ª Edición , 2012.
- 19] D. Meadows, D. Meadows, J. Randers y W. Beherens, Los límites del crecimiento: informe al Club de Roma sobre el predicamento de la Humanidad, 1972.

8 ANEXOS



AC120EQ / ACH120EQ

Brazed plate heat exchanger

General information
Alfa Laval introduced its first brazed plate heat exchanger in 1977 and has since continuously developed and optimized its performance and reliability.

Brazing the stainless steel plates together eliminates the need for gaskets and thick frame plates, which makes the heat exchanger compact and saves material. The brazing material seals and holds the plates together at the contact points ensuring optimal heat transfer efficiency and pressure resistance. Using advanced design technologies and extensive verification guarantees the highest performance and longest possible service lifetime.

The AlfaChill (AC) brazed plate heat exchangers are specifically designed for heat transfer in air conditioning, refrigeration and heat pump applications.

Innovative features for this single circuit heat exchanger include the patented EquinoxTM System for efficient distribution of the refrigerant throughout the plate pack.

Typical applications

- Evaporator and condenser in chillers and heat pumps
- Economizer in chillers and heat pumps

The standard design supports a wide variety of HFC refrigerants such as R407C, R404A, R507, R134a. The high-pressure version is suitable for R410A and natural refrigerants (CO₂ - propane).

Capacity range
AC120EQ / ACH120EQ cover capacities from 20 up to 300 kW. Based on standard components and a modular concept, each unit is custom-designed for each specific installation.

Request for quotation
To receive a quotation for brazed plate heat exchangers that meet your requirements, please provide Alfa Laval representatives with:

- Required flow rates or heat load
- Temperature program (inlet and outlet)
- Brine and refrigerant type
- Desired working pressure
- Maximum permitted water/brine pressure drop
- Connection types



Figura 63 Hoja de especificaciones 1-2 de Intercambiador de calor. Fuente: Alfa Laval

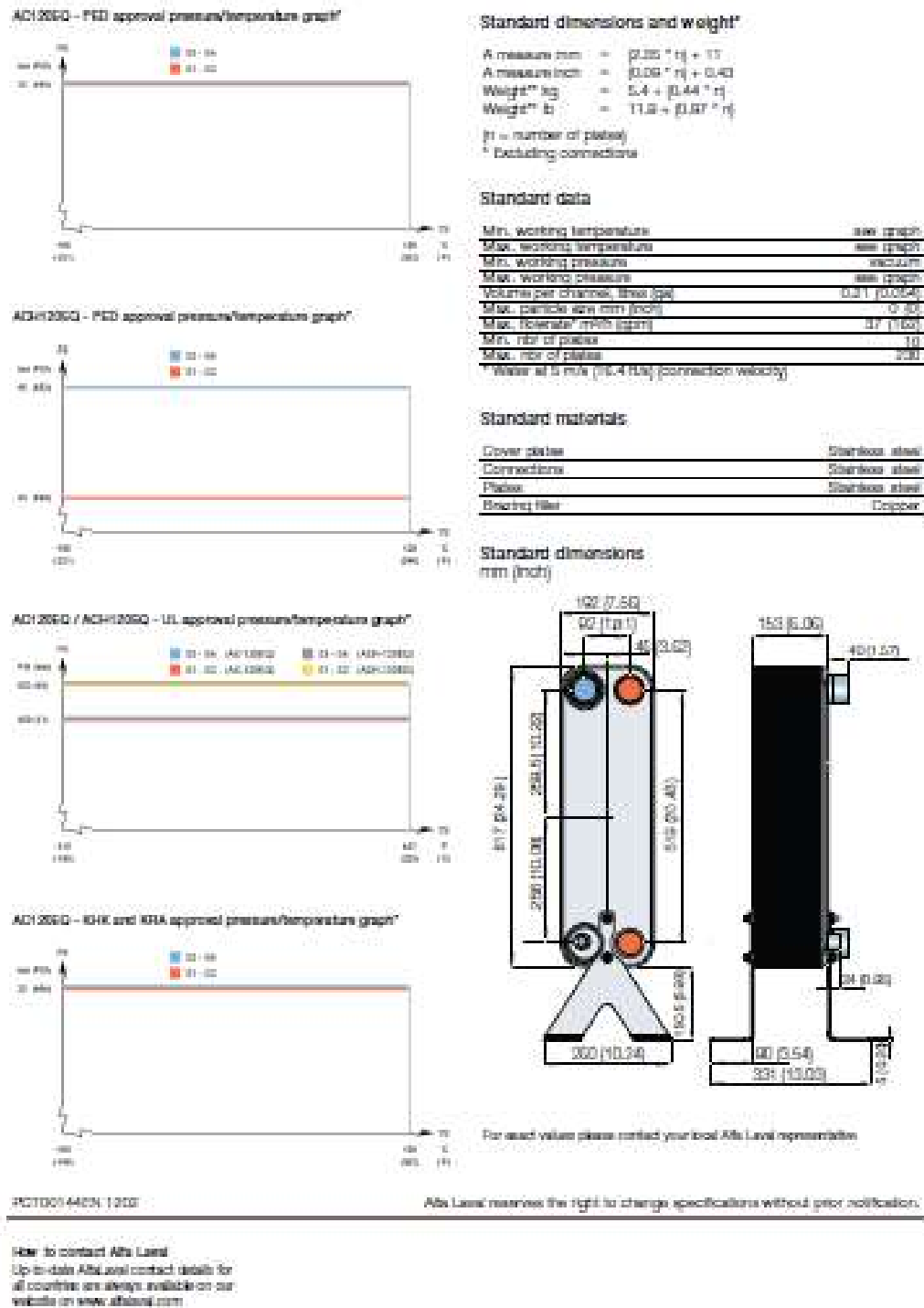


Figura 64 Hoja de Especificaciones de intercambiador de calor 2-2. Fuente: Alfa Laval



Figura 65 Hoja de especificaciones de bomba de calor ecoGEO HP1. Fuente: ecoForest