

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO DE SIMULADOR TERMODINÁMICO DE SISTEMA DE BOMBA
DE CALOR INVERSA PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE
GEOTERMIA DE BAJA ENTALPIA PARA CONTROLAR LOS
PARÁMETROS TÉRMICOS DE MICROCLIMAS**

PRESENTADO POR:

ERASMO RAFAEL PERLA PORTILLO

JULIO JOSUE GIRÓN SEGOVIA

PABLO EDUARDO LIZAMA SOSA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :
MSc. ROGER ARMANDO ARIAS

SECRETARIO GENERAL :
ING. FRANCISCO ALARCÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :
PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :
ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :
ING. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de graduación previo a la opción al grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título: :

**DISEÑO DE SIMULADOR TERMODINÁMICO DE SISTEMA DE BOMBA
DE CALOR INVERSA PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE
GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA PARA CONTROLAR LOS PARÁMETROS
TÉRMICOS DE MICROCLIMAS**

Presentado por :

**ERASMO RAFAEL PERLA PORTILLO
JULIO JOSUE GIRÓN SEGOVIA
PABLO EDUARDO LIZAMA SOSA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Msc. e Ing. Gustavo Salomón Torres Ríos Lazo

San Salvador, junio de 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

Msc. e Ing. Gustavo Salomón Torres Ríos Lazo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios Todopoderoso por concederme vida hasta este día, por brindarme la perseverancia que me permitió culminar la carrera,

A mi madre Sonia, por su amor, calidez e invaluable consejos, a mi hermanita Andrea por brindarme tu ternura y sabiduría, a mi hermano Dany por tu confianza y ejemplo, y al resto de mi familia que me brindó el apoyo económico, sin el cual hubiera sido exponencialmente más arduo el camino.

Agradezco de manera muy afectuosa, sincera y especial a Jessica Clímaco y Elisa Díaz, quienes siempre han sido amigas leales, me brindaron su apoyo, paciencia y cariño, creyeron en mí en todo momento de manera incondicional aun cuando yo mismo no, y quienes me motivan cada día a ser un mejor hombre y ser humano.

Y finalmente debo agradecer inmensamente a todas las personas, situaciones y disposiciones que Dios puso en el camino, que de manera intencional o no, representaron un escollo, me enseñaron invaluable lecciones de vida y fueron lo que me dio la convicción de seguir adelante hasta el final

Julio Josué Girón Segovia

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecerle a Dios que sin Él nada es posible, me brindó la luz en el camino y fortaleza para alcanzar las metas que me he propuesto. Igualmente, me mantengo firme a su lado para continuar cosechando logros en mi vida con Su ayuda.

Debo mencionar a mis padres que fervientemente dieron seguimiento al desarrollo de esta tesis preguntando diariamente ¿Ya terminaste? ¿Para cuándo el título?, les agradezco inmensamente porque me alentaron a seguir mis sueños y para cuando lean este texto podré decirles: "tesis aprobada. Solo debo realizar el proceso de graduación". No puedo dejar de reconocer el amor, la paciencia y el temple que mantuvieron durante mi crecimiento. Y finalmente, les agradezco por compartirme la sabiduría que solo la experiencia brinda, esas enseñanzas de vida me acompañarán para siempre

A Marina, que su compañía e inteligencia allanaron este camino que por momentos se tornó escabroso, le agradezco que se mantuvo a mi lado durante todo este proceso académico, aprendiendo juntos, espero que sigamos cumpliendo nuestras metas y celebrando juntos los logros personales que alcanza el otro.

Finalmente, agradezco a los buenos profesores de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador que diariamente comparten sus conocimientos para formar ingenieros que aporten al desarrollo de nuestro país y no escatiman en gastar energías y recursos en el crecimiento de sus alumnos.

Pablo Eduardo Lizama Sosa

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de grado va dedicado a Dios, quien como guía estuvo presente en el caminar de mi vida, bendiciéndome y dándome fuerzas para continuar con mis metas trazadas sin desfallecer.

Agradecerles a mis padres, mi abuela Olimpia, tía Mirna y demás familia; ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, quienes estuvieron siempre a mi lado en los días y noches más difíciles durante mis horas de estudio. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Hoy cuando concluyo mis estudios, les dedico este logro a ustedes mi amada familia, como una meta más conquistada. Orgulloso de tenerlos conmigo y que estén a mi lado en este momento tan importante. Gracias por ser quienes son y por creer en mí

A Meybelin, la ayuda y compañía que me has brindado ha sido muy importante en esta etapa de mi vida, estuviste a mi lado inclusive en los momentos y situaciones más tormentosas, siempre apoyándome para seguir adelante. No fue sencillo culminar con éxito este proyecto, sin embargo, siempre fuiste muy motivadora y esperanzadora, me decías que lo lograría y que no me rindiera. Me ayudaste hasta donde te era posible, incluso más que eso.

A mis amigos y compañeros, hoy culminan esta aventura y no puedo dejar de recordar cuantas tardes y horas de trabajo nos juntamos a lo largo de nuestra formación. Hoy nos toca cerrar un capítulo maravilloso en esta historia de vida y no puedo dejar de agradecerles por su apoyo y constancia, al estar en las horas más difíciles, por compartir conocimiento además de horas de estudio.

Erasmus Rafael Perla Portillo

DEDICATORIA

Como grupo: Rafael, Julio y Pablo, dedicamos esta tesis a quienes aportaron en nuestro crecimiento personal y profesional a lo largo de nuestro periodo como estudiantes de Ingeniería Mecánica, esas personas que incansablemente dedicaron (y dedican) tiempo, esfuerzo y recursos para nuestro desarrollo, ellos quienes son enlistados a continuación:

A nuestras familias, quienes se involucraron íntegramente en nuestra formación y velaron por darnos todo lo que necesitáramos en nuestro día a día.

A nuestro amigos, compañeros y futuros colegas, quienes fueron parte de nuestro diario vivir compartiendo todas esas experiencias únicas que se viven como estudiantes universitarios.

A nuestros profesores, quienes ejecutan la importante labor de formar a los futuros profesionales de la ingeniería.

A nuestra alma máter.

CONTENIDO

CONTENIDO	ix
INDICE DE FIGURAS	xiii
INDICE DE TABLAS	xv
INTRODUCCIÓN	xv
OBJETIVOS	17
CAPITULO 1	18
1.1 Introducción A La Geotermia	18
1.1.1 Energía Geotérmica	18
1.2 Geotermia De Baja Entalpía	24
1.2.1 Definición	25
1.2.2 Aplicación De La Geotermia De Baja Entalpía	26
1.2.3 Ejemplos De La Aplicación De La Geotermia De Baja Entalpía	28
1.3 Condiciones de confort térmico	33
CAPITULO 2	38
2.1 Bomba De Calor	38
2.1.1 Conceptualización	38
2.1.2 Esquematización Del Sistema	39

2.1.3 Parámetros De Funcionamiento	41
2.1.4 Bomba De Calor Inversa Para Control De Microclimas.....	43
2.2 Cargas térmicas.....	44
2.2.1. Calculo de carga termica por el metodo CLTD/SCL/CLF	45
2.2.1.1 Metodología.....	46
2.2.1.2 Calculo del coeficiente global de transferencia de calor	56
2.2.1.3 Calculo de las cargas sensibles	66
2.2.1.4 Calculo de las cargas latentes	73
2.2.2. Ventilación y recirculación del aire interior	75
2.3 Intercambiador enterrado para sistema de bomba de calor inversa	79
2.3.1 Caracterización del sitio.....	81
2.3.2 Diseño vertical	81
2.3.3 Flujo de fluido y selección de bomba de circulación del intercambiador enterrado	91
2.4 Huella de carbono aplicado a un sistema de climatización de bomba de calor inversa.....	93
2.4.1 Conceptos generales.....	93
2.4.2 Tipos de huella de carbono.....	95
2.4.3 Metodología para cálculo de huella de carbono.....	96

2.5 Tratamiento de agua para climatizador de bomba de calor inversa.	101
.....
2.5.1 Características del agua.....	101
2.5.2 Tratamiento de aguas.....	110
2.6 Instrumentos y mediciones	124
2.6.1 Mediciones de temperatura.....	124
2.6.2. Medición de humedad	131
2.6.3 Medidores de presión.....	135
2.6.4 Medición de la velocidad del aire	143
2.6.5 Medidores de flujo volumétrico o caudal.....	154
2.7 Ahorro energético.....	160
CAPÍTULO 3.....	162
3.1 Introducción a la informática aplicada a la ingeniería mecánica. ...	162
3.2 Herramientas a utilizar	164
3.2.1 Herramientas matemáticas	164
3.2.2 Herramientas Informáticas.....	168
3.2.3 Descripción del lenguaje de programación a utilizar en programa ejemplo.....	171
3.2.2 Descripción de programa utilizado para programar	173
CAPITULO 4.....	178

4.1. Manual de usuario	178
4.1.1. Calcular carga térmica.....	179
4.1.2. Cálculo de intercambiador enterrado tipo vertical	180
CONCLUSIONES.....	184
RECOMENDACIONES	186
BIBLIOGRAFIA.....	187
ANEXOS	189

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Capacidad instalada a nivel mundial de generación geo termoeléctrica....	21
Ilustración 2. Disponibilidad de energía geotérmica en El Salvador. (Geothermics, 1988)	24
Ilustración 3. Aplicaciones del recurso geotérmico. (SICA, 2020)	26
Ilustración 4. Uso del calor geotérmico en Kirchweidach. (propia)	29
Ilustración 5. Diagrama de la planta en Kirchweidach con utilización del calor en cascada. (Bernd Kapp, 2014)	30
Ilustración 6. Esquema del sistema de calefacción geotérmica en Oserian (Mburu, 2017)	33
Ilustración 7. Carta psicrométrica.	35
Ilustración 8. Esquema bomba de calor	40
Ilustración 9. Distribución esquemática de un intercambiador de calor geotérmico tipo horizontal.....	42
Ilustración 10. Carta psicrométrica	48
Ilustración 11. identificación de los procesos en la carta psicrométrica.	50
Ilustración 12. Rango aceptable de temperatura y humedad operativa.....	56
Ilustración 17. Diagrama de las regiones de una ventana	59
Ilustración 18. Renovaciones por hora recomendadas para distintos locales.	78
Ilustración 19. Intercambiador tipo vertical con múltiple U-tubes.	80
Ilustración 25. Pantalla del editor de Visual Basic.	177
Ilustración 26. Pantalla inicial.....	178

Ilustración 27. Pantalla de toma de datos para cálculo de carga térmica.....	179
Ilustración 28. Pantalla de toma de datos para cálculo de intercambiador enterrado. ...	180
Ilustración 29. Presentación de carga térmica del sistema.....	181

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad instalada de proyectos geotérmicos en El Salvador (CNE, 2012). ..	23
Tabla 2. Aplicaciones directas del recurso geotérmico de baja entalpía en El Salvador.	27
Tabla 3. Regresiones de confort térmico.....	36
Tabla 4. Procesos en la carta psicrométrica (+) aumenta (-) disminuye (=) constante	49
Tabla 5. Valores de la tasa de metabolismo para actividades típicas.....	55
Tabla 6. Valores de aislamiento de ropa típicos.	55
Tabla 7. Propiedades térmicas del suelo y lechadas.	86
Tabla 8. Resistencias térmicas de intercambiadores verticales.....	88
Tabla 9. G- factor según número de Fourier.....	89
Tabla 10. Presión interna máxima de tuberías para sistemas GSHP.....	92
Tabla 11. Recomendaciones de sistemas de bombeo y arreglos para intercambiadores GSHP para aplicaciones residenciales.	92
Tabla 12. Técnicas o instrumentos comunes para medición de temperatura.....	125
Tabla 13. Propiedades de medidores de humedad.	132
Tabla 14. Medidores de velocidad de aire.	143
Tabla 15. Medidores de caudal y sus aplicaciones.	155

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la energía en aplicaciones de control térmico de espacios es un tema cada vez más importante debido al incremento de la demanda tanto para la industria como para el área residencial. Y debido a esto se vuelve imperativo la construcción de herramientas que faciliten su adecuada comprensión, dimensionamiento y uso.

La energía geotérmica, catalogada como natural, es principalmente explotada para generación eléctrica por lo que pozos excavados que no cumplen los requisitos de temperatura o flujo son desaprovechados. Sin embargo, existen diversos estudios que concluyen que el uso directo del calor geotérmico de baja entalpía es una alternativa viable para disminuir consumos de energía eléctrica, aunque actualmente son pocos los proyectos desarrollados que aprovechan este tipo de energía para su uso directo en los procesos.

El actual trabajo de investigación contiene de la forma más ordenada, precisa y concreta, el proceso de diseño de una herramienta digital que busca calcular en base a un conjunto de datos, la información necesaria que permita predecir y dimensionar las necesidades energéticas para controlar térmicamente en un ambiente controlado.

OBJETIVOS

General

- ✓ Desarrollar una herramienta digital que simule el comportamiento de un sistema de bomba de calor inversa que aproveche la energía geotérmica de baja entalpía para controlar los parámetros térmicos de microclimas y simule su capacidad.

Específicos

- ✓ Deducir las funciones termodinámicas que establecen el comportamiento de un recinto climatizado por un sistema de bomba de calor inversa
- ✓ Calcular las dimensiones de un sistema propuesto a partir de las condiciones climáticas, calor a evacuar y geometría del recinto mediante un simulador termodinámico

CAPITULO 1

1.1 Introducción a la Geotermia

En este primer capítulo se tratarán los conceptos básicos de geotermia que son necesarios para entender holísticamente los principios científicos con los que se desarrollan las siguientes partes. Además, se presentan los datos de aprovechamiento de la energía geotérmica en El Salvador.

1.1.1 Energía Geotérmica

La energía geotérmica ("Geos" = tierra, y de "*Thermos*" = calor) es la energía térmica que podemos extraer de la tierra mediante un intercambio de calor aprovechando el gradiente térmico entre la superficie y un determinado punto de profundidad, la temperatura media en la superficie es 14.9 °C (según el reporte anual sobre el clima anual realizado por el NOAA en el año 2020) mientras que el núcleo de la tierra tiene temperaturas de aproximadamente 5000°C.

Por la temperatura a la que está disponible el recurso, la energía geotérmica se clasifica en:

- Energía geotérmica de baja entalpía:

Es aquel recurso geotérmico que tiene una temperatura de menos de 100°C, los usos comunes para esta clasificación son deshidratadores, secadores, climatización, piscicultura, etc.

- Energía geotérmica de media entalpía

Es aquel recurso geotérmico que tiene un rango de temperatura entre los 100°C y 150°C, cotidianamente es usada en aplicaciones de generación de energía eléctrica por ciclo binario.

- Energía geotérmica de alta entalpía

Es el recurso geotérmico que presenta una temperatura mayor de 150°C, es el tipo de energía ideal para la generación de energía eléctrica a través de una turbina de vapor.

Igualmente, los sistemas geotérmicos pueden clasificarse según el tipo de fluido que se inyecta para la extracción del calor interior de la tierra:

- Sistemas convectivos:

Están constituidos por una fuente de calor, fluidos que constituyen el medio de transporte del calor, roca permeable donde se almacenan los fluidos y una capa de “roca sello”. Los fluidos se filtran en la corteza terrestre a través de poros y fracturas hasta alcanzar un yacimiento, donde se almacenan por largo tiempo. La existencia de estos yacimientos se manifiesta en la superficie por la presencia de manantiales calientes, fumarolas, géisers, lagunas de lodo hirviente o suelos calientes. Estos yacimientos pueden ser de vapor o líquido dominante de alta temperatura, o de líquido de mediana o baja temperatura.

- Sistemas de roca seca caliente:

Consisten en roca seca a muy alta temperatura (alrededor de 650 grados Celsius) localizada entre 2 y 4 kilómetros de profundidad, y con la característica particular de no contar con fluidos suficientes en el fondo para transportar el calor hacia la superficie.

- Sistemas geopresurizados:

Contienen agua y metano disuelto a alta presión (unos 700 bar, unidad de presión) y mediana temperatura (entre 90 y 200 grados Celsius). Actualmente estos recursos no se explotan.

- Sistemas marinos:

Se localizan en el fondo del mar, y se manifiestan como descargas, fumarolas o chimeneas hidrotermales.

- Sistemas magmáticos:

Consisten de roca fundida (a unos 800 grados Celsius) y están asociados con aparatos volcánicos activos. Para extraer el calor de estos sistemas se han desarrollado algunos proyectos piloto en Hawái e Islandia, pero su explotación comercial requiere la búsqueda de materiales adecuados que resistan la corrosión y las altas temperaturas.

- Sistemas súper críticos:

Se ubican a grandes profundidades (entre 5 y 6 kilómetros) y contienen fluidos en estado supercrítico (es decir: a presión y temperatura tal, que adopta un estado intermedio entre líquido y gas) con temperaturas de hasta 600 grados Celsius; se han detectado cerca de Islandia, donde actualmente se investiga la factibilidad de su explotación.

En cuanto a la explotación de la energía geotérmica podemos mencionar dos grandes grupos de igual importancia: a) Generación eléctrica; b) Uso directo, siendo éste último el menos aprovechado hasta hace algunos años donde se alcanzó una producción equivalente a 28 mil MW, según la revista *Ciencia de México* en 2005, en aplicaciones directas como acondicionamiento de espacios,

balnearios y en procesos industriales de precalentamiento (Se ampliará el uso directo en posteriores apartados).

En cambio, la generación geo termoeléctrica se ha desarrollado desde 1904 con la primera central en Larderello, Italia. Debido al desarrollo a lo largo de los años, en 2009, la capacidad mundial instalada alcanzó 10 mil MW distribuida en las centrales construidas en 24 países (Bertani, 2009). Proyectando datos a futuro, según el Sistema de la Integración Centroamericana, se estima que para el año 2050 el aprovechamiento energético de la geotermia alcanzará 200 GW (SICA, 2018), en la ilustración 1 podemos observar la capacidad instalada de aprovechamiento energético por países a nivel mundial.

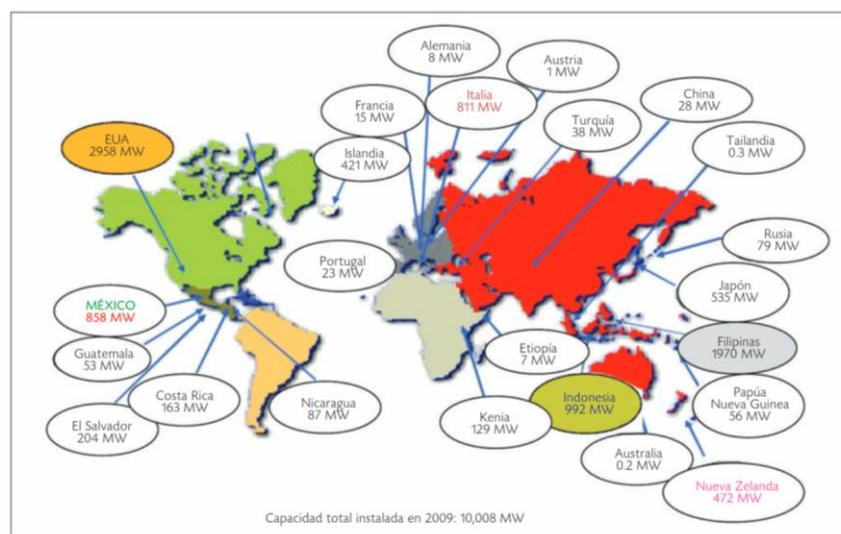


Ilustración 1. Capacidad instalada a nivel mundial de generación geo termoeléctrica.

Una ventaja esencial que debe ser tomada en cuenta al emprender proyectos de energía que le suma puntos a la geotermia es la reducción drástica de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, siendo similar a las emisiones

generadas por las perturbaciones naturales sin intervención humana (géiseres, fumarolas), con una reducción aproximadamente igual al 50%. Aunque la explotación del recurso geotérmico presenta una gran cantidad de ventajas, se deben revisar las limitantes que deben ser afrontadas por los ingenieros y científicos: 1) en fase de exploración, la tecnología actual no percibe con gran exactitud los datos del reservorio, por lo que muchas veces se gasta en perforaciones que terminan con pozos declarados como inútiles o de monitoreo para generación eléctrica, aunque con el desarrollo de las aplicaciones directas, estos pozos pueden ser aprovechados en distintas aplicaciones; 2) en fase de explotación, el problema por incrustación en tuberías y dispositivos es un tema diario en las centrales que genera problemas, además, se debe tener un pozo re-inyector o algún método de disposición del fluido geotérmico que fue utilizado en los procesos.

1.1.2 Geotermia en El Salvador

El sector energético en El Salvador es uno de los más importantes de nuestra economía, ya que abre caminos a la inversión por su diversidad generada por las abundantes fuentes naturales que pueden aprovecharse, en este aspecto, la geotermia se ha desarrollado en gran medida aportando cerca del 23% de la energía consumida en el país. Hablando de alta entalpia en la actualidad, La Geo es la única entidad que ha desarrollado la explotación de energía geotérmica en El Salvador, en la tabla 1 se muestran las centrales y su capacidad instalada.

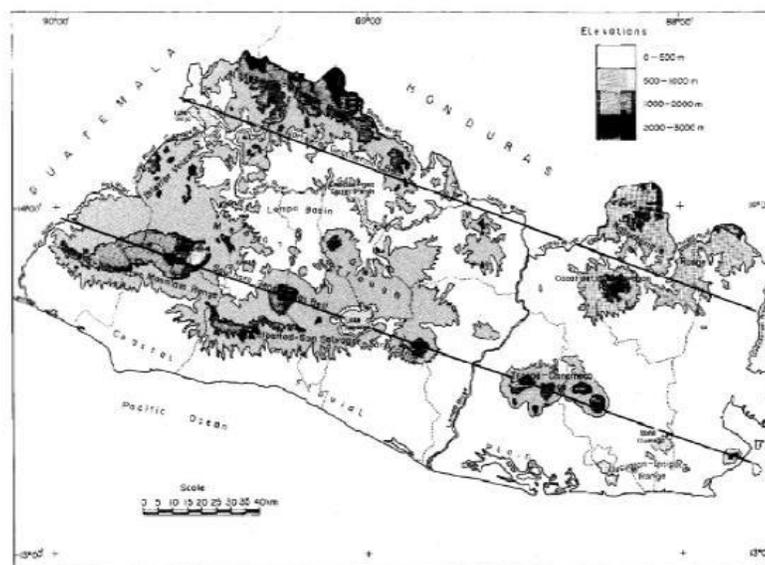
*Tabla 1. Capacidad instalada de proyectos geotérmicos en El Salvador
(CNE, 2012).*

Nº	Nombre de la central	Número de unidades	Capacidad instalada
1	Ahuachapán	(2 x 30Mw) + (1 x 35Mw)	95Mw
2	Berlín	(2 x 28.12Mw) + (1 x 44Mw) + (1 x 9.2Mw)	109.44Mw
	Total		204.44Mw

Para generación eléctrica, además, se planean ampliaciones en las centrales ya construidas y ya se iniciaron proyectos geotérmicos en Chinameca y San Vicente, lo que contribuirá al desarrollo del sector y del país en general.

Además, se debe enlistar los proyectos de aplicación directa de la energía geotérmica de baja entalpía en El Salvador:

- Secado de café en La Geo: La deshidratación es una de las formas más antiguas de procesar alimentos. Consiste en eliminar una buena parte de la humedad de los alimentos, para que no se arruinen. Se considera de mucha importancia la conservación de alimentos pues esto nos permite alargar su vida útil y mantener la inocuidad de éstos, otra de las importancias de conservar los alimentos es debido a que podremos contar con productos en épocas que normalmente no se producen, logrando así mejores precios.
- Balnearios geotermales: Destinos turísticos adecuados para la recreación y centros curativos donde se aprovecha el calor geotérmico absorbido por una masa de agua que genera confort en los usuarios.



*Ilustración 2. Disponibilidad de energía geotérmica en El Salvador.
(Geothermics, 1988)*

Como podemos observar en la ilustración 2, el país tiene un gran potencial de aprovechamiento de la energía geotérmica y con los ejemplos anteriormente expuestos podemos afirmar que El Salvador lleva el rumbo correcto para el desarrollo de pequeños proyectos de aplicación directa de la energía geotérmica de baja entalpía contribuyendo al crecimiento de nuestra economía, así, el sistema propuesto se suma como herramienta para el impulso de proyectos en la climatización de recintos aprovechando la energía geotérmica.

1.2 Geotermia de baja entalpía

Al entender los conceptos generales sobre geotermia, ahora se deben enlistar los conocimientos concernientes al uso directo de la geotermia de baja entalpía, sus aplicaciones y ejemplos de proyectos exitosos que certifiquen que su aprovechamiento energético es altamente beneficioso.

1.2.1 Definición

El principio básico del uso de la geotermia de baja entalpía es la capacidad del subsuelo para acumular calor y mantener su temperatura constante a lo largo del año. Siendo que, las temperaturas menores a los 100°C no son suficientes para producir energía eléctrica, estos pozos de profundidades menores a los 100 m pueden ser aprovechados en aplicaciones directas como producción de agua caliente sanitaria o climatización de recintos instalando un sistema de bomba de calor.

Entre los aspectos más beneficiosos de las aplicaciones directas de la energía geotérmica de baja entalpía podemos mencionar:

- 1) Como se menciona en apartados anteriores, la reducción de las emisiones de CO₂ al medio ambiente genera una clara ventaja sobre el consumo dependiente de los combustibles fósiles.
- 2) Debido a la creciente demanda de los combustibles fósiles a nivel mundial, los costos de operación de un sistema que trabaja con combustibles fósiles se elevan por sobre los sistemas que utilizan bombas de calor.
- 3) Siendo que, se considera que la energía geotérmica únicamente depende de la temperatura de la tierra, podemos inferir que este tipo de aplicaciones son completamente independientes de futuras crisis generadas por escases del petróleo.
- 4) Se ha demostrado que la utilización de bombas de calor para climatización genera una disminución considerable del consumo eléctrico comparado con los sistemas tradicionales.

1.2.2 Aplicación De La Geotermia De Baja Entalpía

Siguiendo con el aprovechamiento de la geotermia de baja entalpía se deben enlistar las principales aplicaciones donde se observa, en la Ilustración 3 se observan los procesos principales según la temperatura del reservorio geotérmico.

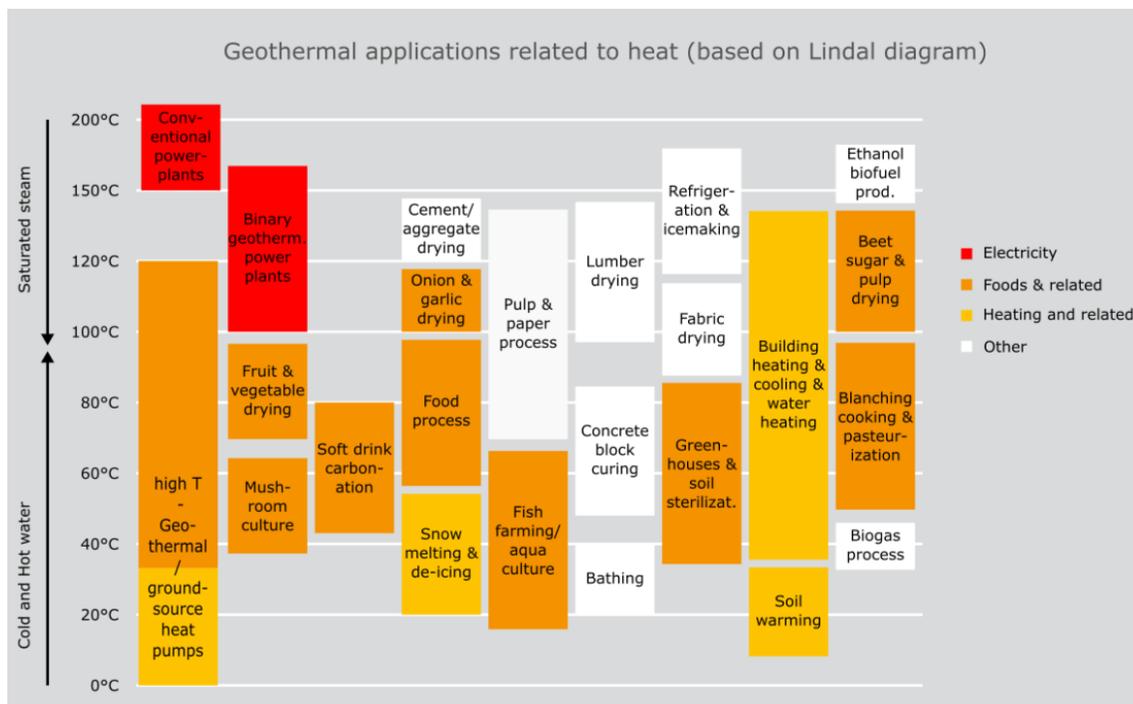


Ilustración 3. Aplicaciones del recurso geotérmico. (SICA, 2020)

Según la ilustración 3 se pueden listar los siguientes procesos para temperaturas dentro de la geotermia de baja entalpía:

- Deshidratado de frutas y vegetales.
- Climatización utilizando un sistema de bomba de calor.
- Cultivo de hongos.
- Derretimiento de nieve.
- Acuicultura.
- Aguas termales.

- Climatización de invernaderos y esterilizado de suelos.
- Calentamiento de agua.
- Pasteurización.

Como se observa, son diversas las opciones que se presentan al hablar de aplicaciones de la geotermia de baja entalpía. Este trabajo se enfoca en aplicaciones de climatización de recintos, específicamente utilizando un sistema de bomba de calor.

En nuestro país ya pueden observarse los primeros proyectos emprendidos de aprovechamiento del recurso geotérmico de baja entalpía, según tabla 2:

Tabla 2. Aplicaciones directas del recurso geotérmico de baja entalpía en El Salvador (Elaboración propia).

Aplicación	Descripción	Proyectos en El Salvador
Balnearios geotermiales	Destinos turísticos adecuados para la recreación y centros curativos donde se aprovecha el calor geotérmico absorbido por una masa de agua que genera confort en los usuarios.	Termales de Santa Teresa. Termales de Alicante.
Secado y deshidratado de frutas y vegetales	La deshidratación es una de las formas más antiguas de procesar alimentos. Consiste en eliminar una	Secado de café (La Geo).

buena parte de la humedad de los alimentos, para que no se arruinen.

Se considera de mucha importancia la conservación de alimentos pues esto nos permite alargar la vida útil de las frutas y poder tener acceso a mercados más distantes, otra de las importancias de conservar frutas deshidratadas es debido a que podremos contar con frutas en épocas que normalmente no se producen, logrando así mejores precios.

1.2.3 Ejemplos de la aplicación de la geotermia de baja entalpía

Como antecedentes del presente, expondremos algunos proyectos exitosos donde se aprovecha la energía geotérmica de baja entalpía en los procesos concluyendo con una significativa reducción del consumo energético respecto al proceso tradicional.

Primer invernadero geotérmico profundo en Alemania

Como primer caso ejemplo se presenta el proyecto por parte de GeoEnergie Bayern de utilización en cascada del agua termal, en Kirchweidach - Alemania. Con este proyecto se pretendió aumentar significativamente el grado de utilización de la energía, agregando un paso más al proceso de aprovechamiento

térmico con la aplicación directa del recurso geotérmico de baja entalpía, específicamente un invernadero de tomates y pimientos.

A continuación, se presentan los factores generales que determinaron la viabilidad del proyecto:

- Aspectos económicos: siendo una tecnología innovadora, ésta le agrega valor a la región. Además, se crean empleos directos y la producción de 7.500 toneladas de tomates y pimientos anualmente.
- Aspectos ecológicos: Principalmente se obtiene un ahorro de combustibles debido a la eliminación de la exportación de los cultivos y la utilización del calor para calefacción de hogares.

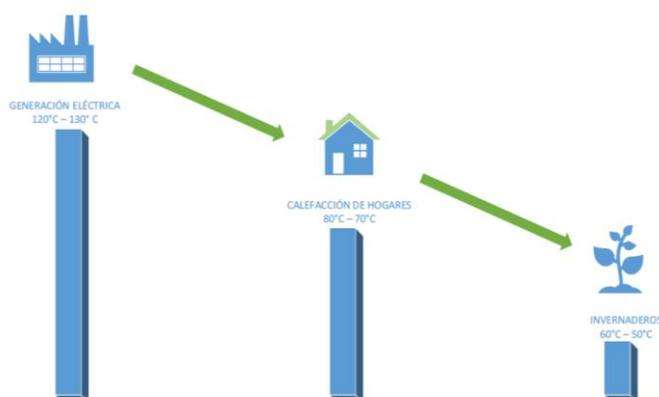


Ilustración 4. Uso del calor geotérmico en Kirchweidach. (propia)

En la figura 4 se observa el resultado final con la implementación del nuevo proceso de aplicación directa con el rango de temperaturas en la entrada de cada uno de ellos. Así, el aprovechamiento de toda la planta se resume en:

1. Generación eléctrica: el pozo provee agua geotérmica cuyo calor es utilizado en primera instancia para la producción eléctrica utilizando el ciclo Rankine.

2. Calefacción urbana: el agua geotérmica cede calor mediante intercambiadores donde un fluido transporta el calor hacia la zona urbana para calefacción de los hogares cercanos.

3. Invernadero: como último paso, el agua con temperatura aproximadamente de 60°C termina de ceder calor al sistema de absorción adecuado para climatizar aproximadamente 8 hectáreas de invernaderos. Así finalmente el agua es reinyectada al subsuelo.

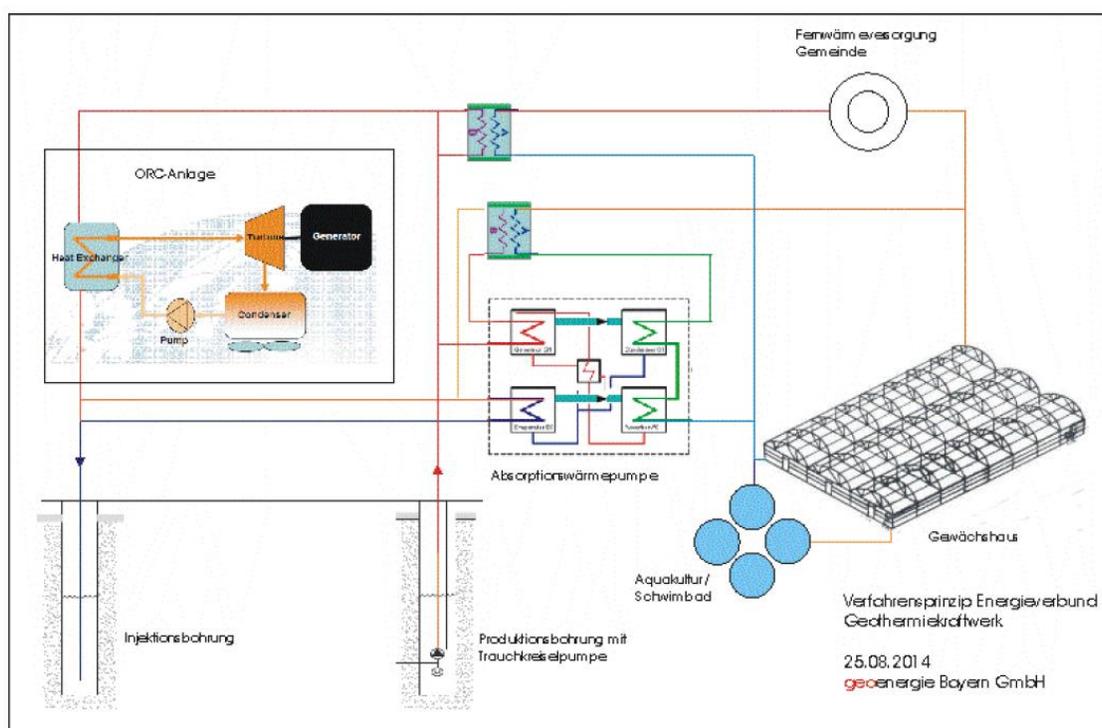


Ilustración 5. Diagrama de la planta en Kirchweidach con utilización del calor en cascada. (Bernd Kapp, 2014)

Dentro del diagrama mostrado en la ilustración 5 se observa el sistema encargado de transportar el calor del agua geotérmica hacia el fluido utilizado

dentro de los invernaderos, manteniendo el control de la temperatura: la bomba de calor. Como su nombre lo indica, es la encargada de transportar el calor de un sector a otro.

En conclusión, cualquier proyecto que utilice el recurso geotérmico debe buscar el máximo aprovechamiento de la energía sin descartar los sitios geotérmicos debido a su temperatura. En cuanto a la utilización directa para invernaderos se debe tener en cuenta una ubicación con superficie suficiente para su construcción cercano a un sitio geotérmico preferiblemente con temperaturas mayores a los 40°C.

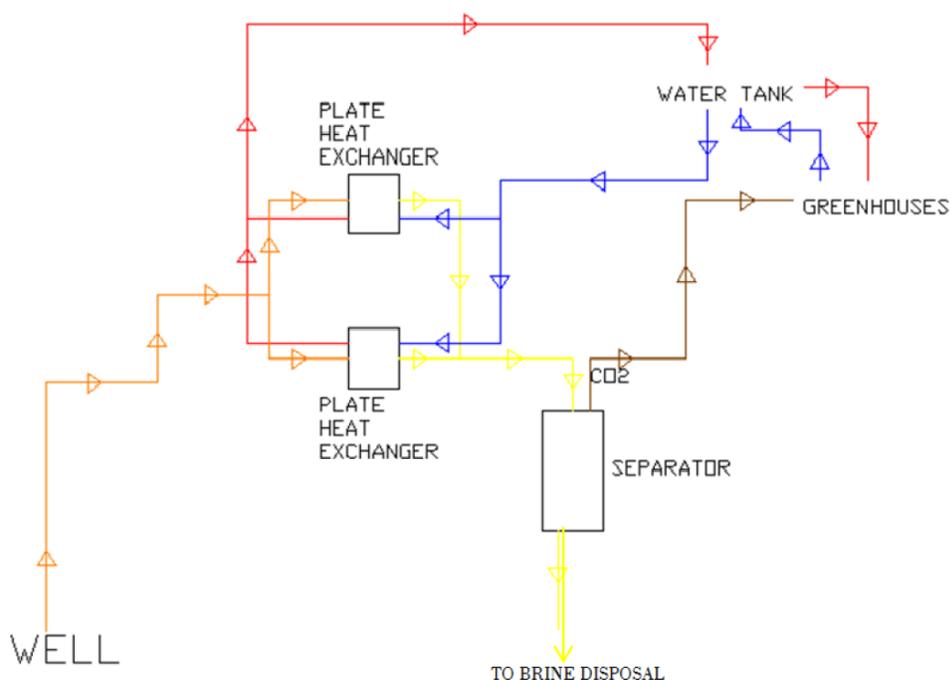
Utilización de la energía geotérmica en granja de flores de Oserian-Naivasha (Kenia)

Los invernaderos de rosas cortadas propiedad del Oserian Development Company Limited destaca por la gran superficie que alcanza de 50 hectáreas y ser de los primeros proyectos a nivel mundial de aplicación directa del recurso geotérmico, siendo en 2003 el inicio de su operación. Así, se dio lugar a una reducción de los costos de operación, a un aumento de la productividad y a una ampliación de las oportunidades de mercado por el uso de prácticas ambientales eco-amigables.

Los procesos de aplicación directa utilizados en los invernaderos de Oserian, que son el objetivo del presente documento, en los que nos centraremos son el sistema de calefacción de agua para control de temperatura de los invernaderos y el enriquecimiento de los niveles de CO₂ necesario para adecuar las condiciones operativas óptimas de producción de rosas.

La compañía KenGen, encargada de la generación eléctrica en Kenia perforó un pozo que inicialmente fue considerado como “inútil”, así fue que la granja Oserian alquiló dicho pozo específicamente para calefacción de sus invernaderos. El sistema utilizado simplemente calienta agua mediante dos intercambiadores de placas, proveniente de un tanque de 3.8 millones de litros, hasta una temperatura de 92°C, la cual se mezcla con agua fresca para obtener una temperatura aproximada de 50°C, así, luego circulará por medio de tuberías de acero dentro de los invernaderos permitiendo adecuar la temperatura óptima de crecimiento de las rosas. Además del ahorro obtenido por la no utilización de combustibles fósiles para calefacción, se obtiene la reducción de la humedad relativa dentro de los invernaderos que lograba alcanzar el 100% en ciertas horas del día, así se eliminaron las infecciones por hongos y se redujeron los costos por la utilización de fungicidas químicos.

El agua geotérmica luego de ceder calor en los intercambiadores de calor es conducida hacia un separador que mediante la acción centrífuga envía hacia la parte superior el dióxido de carbono, que luego es inyectada en los invernaderos. El agua con las sales residual debe ser eliminada de una manera ambientalmente aceptable.



*Ilustración 6. Esquema del sistema de calefacción geotérmica en Oserian
(Mburu, 2017)*

En la figura 6 se muestra el sistema de calefacción descrito en los apartados anteriores, se trata de un sistema relativamente sencillo, pero que ha permitido disminuir los costos de producción de las rosas en Kenia y reducir significativamente la huella de carbono de cada rosa, siendo una décima parte de una rosa cultivada con los métodos de calefacción tradicionales.

1.3 Condiciones de confort térmico

Para describir completamente el ambiente térmico de un recinto es necesario enlistar las propiedades del aire, las que serán medidas y controladas para

proporcionar un ambiente confortable, así los usuarios de las instalaciones, sean llamadas personas o cultivos, podrán establecerse en un ambiente climatizado y saludable para las tareas que se desean ejecutar dentro de éste.

1. Temperatura de bulbo seco: es la verdadera temperatura del aire húmedo y con frecuencia se la denomina sólo temperatura del aire: es la temperatura del aire que marca un termómetro común.
2. Temperatura de bulbo húmedo: es la temperatura de equilibrio que se alcanza cuando la mezcla de aire seco y vapor de agua pasa por un proceso de enfriamiento adiabático hasta llegar a la saturación.
3. Temperatura de punto de rocío: es la temperatura a la cual el aire húmedo no saturado se satura, es decir, cuándo el vapor agua a condensarse, por un proceso de enfriamiento, mientras que la presión y la razón de humedad se mantienen constantes.
4. Presión de vapor de agua: es la presión parcial que ejercen las moléculas de vapor de agua presentes en el aire húmedo.
5. Presión atmosférica: es la fuerza por unidad de superficie que ejerce el aire que forma la atmósfera sobre la superficie terrestre.
6. Humedad relativa: se define como la razón entre la presión de vapor de agua en un momento dado y la presión de vapor de agua cuando el aire está saturado de humedad, a la misma temperatura. La humedad relativa se puede expresar como decimal o como porcentaje.

Si recordamos las cartas psicrométricas (ver figura 7), podremos definir completamente el estado del aire y sus propiedades si medimos dos de éstas.

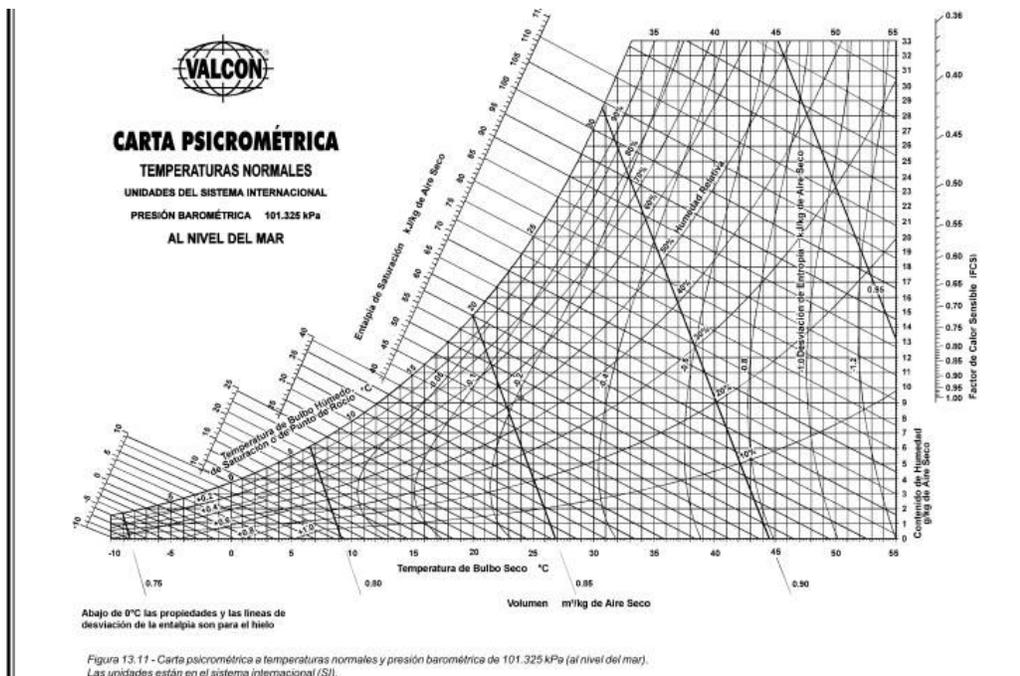


Ilustración 7. Carta psicrométrica.

Al hablar de confort térmico debemos respetar las condiciones ideales para que el usuario pueda realizar sus tareas sin inconvenientes, para el caso de aplicaciones donde los usuarios sean personas utilizaremos las regresiones sugeridas por el “2021 ASHRAE Handbook – Fundamentals (SI)” que han sido calculadas para trabajadores con 80% de actividad sedentaria y utilizando vestuario de oficina (Ver tabla 3).

Tabla 3. Regresiones de confort térmico.

Exposure Period, h	Subjects	Regression Equations ^{a, b}
		t = dry-bulb temperature, °C p = vapor pressure, kPa
1.0	Men	$Y = 0.220 t + 0.233 p - 5.673$
	Women	$Y = 0.272 t + 0.248 p - 7.245$
	Both	$Y = 0.245 t + 0.248 p - 6.475$
2.0	Men	$Y = 0.221 t + 0.270 p - 6.024$
	Women	$Y = 0.283 t + 0.210 p - 7.694$
	Both	$Y = 0.252 t + 0.240 p - 6.859$
3.0	Men	$Y = 0.212 t + 0.293 p - 5.949$
	Women	$Y = 0.275 t + 0.255 p - 8.622$
	Both	$Y = 0.243 t + 0.278 p - 6.802$

^a Y values refer to the ASHRAE thermal sensation scale.

^b For young adult subjects with sedentary activity and wearing clothing with a thermal resistance of approximately 0.5 clo, $\bar{t}_r < \bar{t}_a$ and air velocities < 0.2 m/s.

Como se puede observar la sensación térmica (Y) es dependiente de la temperatura de bulbo seco y la presión de vapor del aire en el recinto climatizado. Para los valores de Y, la ASHRAE define así:

+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
Caliente	Cálido	Ligeramente cálido	Neutral	Ligeramente frío	Frío	Helado

Como ejemplo, podemos predecir la sensación térmica de una oficina donde se planea utilizar un sistema de climatización donde se configure una temperatura de bulbo seco de 20°C y una humedad relativa del 40%.

Para conocer la presión de vapor haremos uso de la ecuación de los gases:

$$Pv = RT$$

Obteniendo datos de la carta psicrométrica y sustituyendo obtenemos:

$$P = \frac{RT}{v} = \frac{8.31434 * 293}{0.83}$$

$$P = 2.93kPa$$

Utilizaremos la regresión calculada para hombres y mujeres dentro del recinto por tres horas:

$$Y = 0.243t + 0.278p - 6.802$$

$$Y = 0.243(20) + 0.278(2.93) - 6.802$$

$$Y = -1.13$$

Podemos concluir que las personas dentro una oficina con un sistema que mantenga la temperatura a 20°C y humedad relativa de 40% sentirán un ambiente ligeramente frío. Esta guía servirá como primer paso para seleccionar los valores de diseño de cualquier sistema de climatización donde el usuario principal será el ser humano.

Es importante tomar nota de estos aspectos, además, se recomienda que la humedad relativa no exceda el 60% ya que esto podría ocasionar malestar debido a la capa de humedad que se puede alojar sobre la piel. Igualmente, en caso contrario, no se debe mantener una humedad relativa muy baja ya que puede repercutir en disconformidad térmica y aumento de afectaciones respiratorias debido a la disminución en la mucosa natural de la nariz.

CAPITULO 2

2.1 Bomba De Calor

Este capítulo se centrará en las partes fundamentales que constituyen el sistema propuesto y la determinación de las correlaciones necesarias para el cálculo de dimensiones y selección de capacidades. Este apartado en específico se enfocará en la bomba de calor y sus principios fundamentales de funcionamiento.

2.1.1 Conceptualización

La bomba de calor es un sistema térmico empleado mayoritariamente en aparatos de climatización que toma el calor de un espacio y lo transfiere a otro espacio.

Por usar la energía procedente de fuentes naturales gratuitas y el bajo consumo de electricidad de la bomba de calor, permiten reducir los costes en la factura eléctrica, además la bomba de calor contribuye al cumplimiento de los objetivos medioambientales en su actuación contra el cambio climático. Este sistema aprovecha la energía disponible en el aire ambiente, el suelo y aguas superficiales para así proporcionar temperatura a espacios. Además, juega un papel importante en la descarbonización que consisten en el proceso de reducción de emisiones de carbono.

Es por ello que la Agencia Internacional de la Energía considera en su informe de la Eficiencia energética del 2016, la bomba de calor como la Mejor Tecnología Disponible (MTD), para la calefacción de espacios.

Al usar la energía proveniente de fuentes naturales y gratuitas, se consigue multiplicar su potencia eléctrica y transportar calor de forma altamente eficiente. Por ejemplo, una bomba de calor proporciona 4 kW de energía de calefacción y

consume solo 1 kW de electricidad. Por lo tanto, las fuentes de energía naturales proporcionan 3 kW a cero costes.

2.1.2 Esquematización Del Sistema

La bomba de calor aire-agua consta de dos partes, según se observa en la figura 8: el grupo bomba de calor situado en la parte superior y el depósito de acumulación en la parte inferior. La bomba de calor está basada en el aprovechamiento de la energía que producen los cambios de estado del fluido refrigerante. Este fluido circula por el interior de un circuito cerrado que consta de:

- **Compresor**, cuyo trabajo permite el desarrollo del proceso y que requiere de electricidad para su funcionamiento.
- **Condensador**. Intercambiador de calor situado a lo largo del calderín y a través del cual el fluido refrigerante en forma de vapor cede toda su energía al agua del depósito. A medida que va cediendo la energía condensa y vuelve a estado líquido.
- **Válvula de expansión**. Componente del circuito por el que pasa el fluido refrigerante y que, por medio de su cambio de sección, supone una reducción brusca de la presión y también un descenso notable de la temperatura.
- **Evaporador**. Otro intercambiador de calor situado en la parte superior que, a través de su superficie ampliada por un sistema de aletas, permite el intercambio entre el fluido refrigerante y el aire ambiente. En este intercambiador el fluido refrigerante pasa a estado vapor.

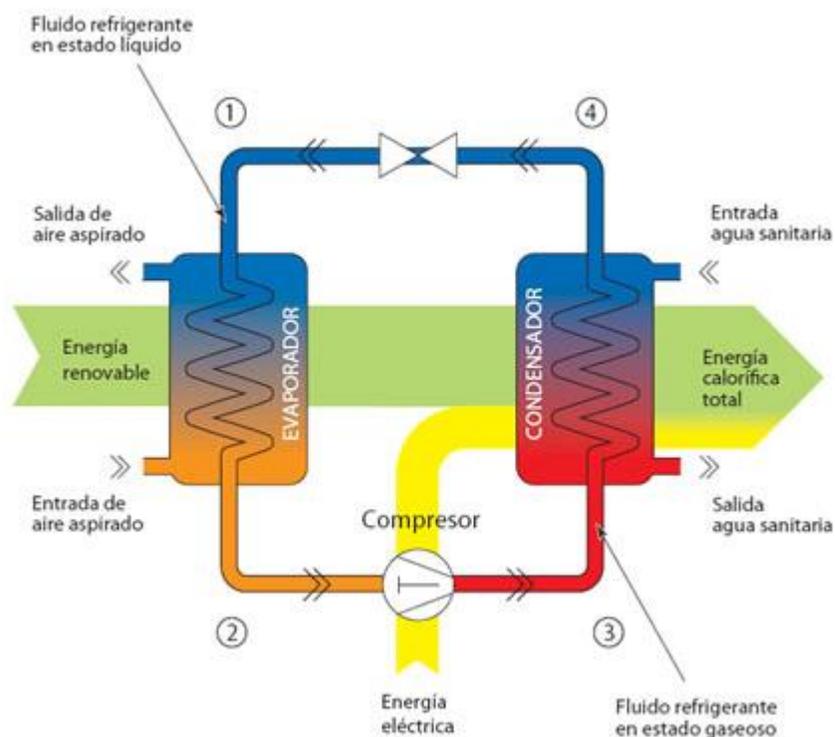


Ilustración 8. Esquema bomba de calor

Como la energía térmica solamente puede ir de un nivel de energía más alto a otro más bajo, el fluido refrigerante presente en el evaporador, necesariamente debe estar a una temperatura menor que la del aire ambiente. Por otra parte, el fluido refrigerante situado en el condensador debe tener también necesariamente, una temperatura superior a la del agua a calentar en el depósito para poder cederle energía.

Estos intercambiadores generalmente son tuberías fabricadas en polietileno de alta densidad material de gran resistencia y durabilidad, en una sola pieza. Por estos conductos circulará el fluido caloportador, en nuestro caso agua.

El dimensionamiento de estos colectores se realiza en función del rendimiento térmico del suelo, que depende de su composición, consistencia y contenido de agua. Es muy importante hacer un dimensionamiento correcto, para evitar fallos de funcionamiento y bajo rendimiento de la bomba de calor.

La capacidad de intercambio de calor depende del tipo de terreno, de la longitud y material del intercambiador, de la utilización y el tipo de material de relleno que se coloque entre las tuberías del intercambiador y el suelo, así como de la separación entre las tuberías. Es posible hacer un estudio sobre todas las variables para obtener una configuración óptima que maximice el intercambio minimizando la inversión, dependiendo de la aplicación de que se trate.

El intercambiador enterrado es generalmente el componente más caro del sistema geotérmico y es altamente dependiente del coste de mano de obra y las condiciones de perforación según el emplazamiento.

2.1.3 Parámetros De Funcionamiento

El principio de funcionamiento de la bomba de calor se basa en los principios de la termodinámica y se puede estructurar en 4 pasos:

- a) En el primer paso el fluido refrigerante se encuentra a baja temperatura y a baja presión y, por lo tanto, en estado líquido. El aire aspirado del ambiente pasa a través del evaporador, donde el fluido refrigerante absorbe la temperatura del aire ambiente y cambia de estado. Al mismo tiempo, el aire es expulsado a una temperatura más baja.
- b) El fluido refrigerante llega al paso 2 en forma de vapor, pero todavía a baja presión. Pasándolo a través del compresor se produce un aumento de la presión con el consiguiente aumento de temperatura.

- c) Como resultado se obtiene vapor en un estado elevado de energía. Este vapor situado en el paso 3 es el que circula por el condensador situado a lo largo del calderín donde va cediendo toda la energía al agua acumulada, volviendo así a estado líquido.
- d) En el último paso del proceso, el fluido refrigerante ya en estado líquido se hace pasar por la válvula de expansión para obtener de nuevo el fluido en sus condiciones iniciales, es decir, a baja presión y a baja temperatura. De esta forma se puede volver a iniciar el proceso.

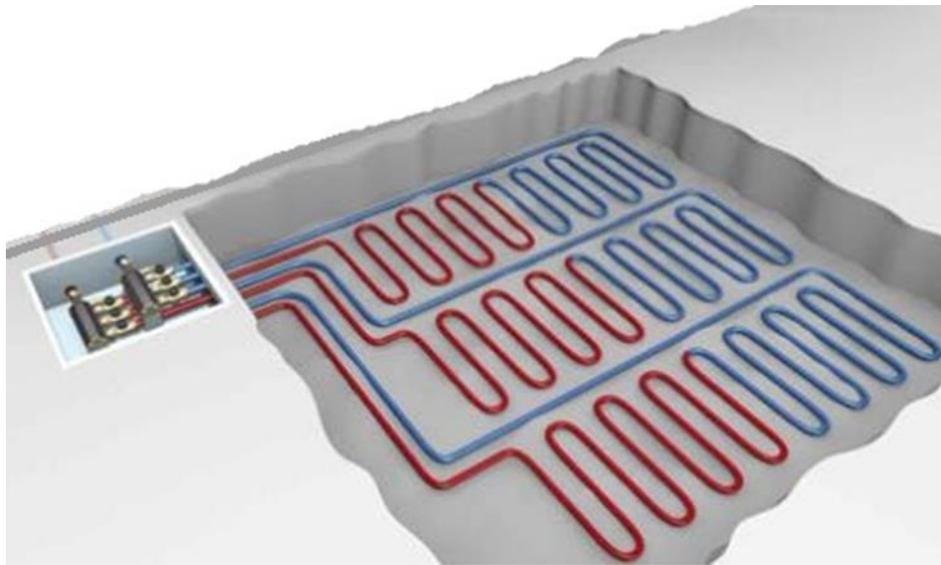


Ilustración 9. Distribución esquemática de un intercambiador de calor geotérmico tipo horizontal.

2.1.4 Bomba De Calor Inversa Para Control De Microclimas

Son muchos los sistemas de climatización de microclimas de espacios, pero la bomba de calor geotérmica inversa al obtener la energía del subsuelo (se observa en la figura 9 un ejemplo del intercambiador enterrado), las condiciones climáticas exteriores no afectan al consumo de la bomba de calor. Y esto la convierte en el sistema de calefacción más eficiente que existe en la actualidad.

La geotermia es un sistema energético 100% renovable, que consigue aprovechar la energía que se acumula bajo nuestros pies para obtener tanto calefacción y ACS (agua caliente sanitaria) como frío e incluso para calentamiento de piscinas.

Al conseguir aprovechar gran parte de la energía de forma gratuita, los sistemas con geotermia consumen en torno a un 70-80% menos que los sistemas convencionales para obtener calefacción, frío y ACS.

El presupuesto de mantenimiento de las instalaciones geotérmicas es bastante inferior al coste que supone el de una instalación de energía tradicional. Al no ser necesario ningún tipo de combustión, apenas requieren mantenimiento, lo que supone un importante ahorro asociado a estos costes.

Los sistemas de bomba de calor geotérmico tienen una vida útil muy amplia. De esta manera, podrás disfrutar de los beneficios de la instalación durante muchos años.

Si la instalación se dimensiona de manera correcta, el número de horas de funcionamiento estará en torno a las 1 200h – 2 000 h al año, en función de la zona climática en la que se encuentre. Con estos parámetros, la vida útil del equipo se situaría en condiciones normales por encima de los 15-20 años.

En las instalaciones geotérmicas no hay ningún elemento visual en el exterior del espacio a climatizar. Al no necesitar chimenea como las calderas de combustión, lo que permite evitar elementos anti estéticos o ruidosos.

La energía geotérmica es una energía limpia, sostenible e inagotable. A diferencia de otras renovables, como pueden ser la energía solar o la eólica, la energía geotérmica es perpetua e inagotable.

2.2 Cargas térmicas

Existe gran variedad de metodologías para el cálculo de carga térmica, en relación con la complejidad y cantidad de variables involucradas, dichas metodologías presentan a su vez una serie de ventajas y limitaciones, correspondientes a la simplicidad y la exactitud, objetivos que se oponen mutuamente. Por lo que, si se presenta un método simple, se pondría en tela de juicio su exactitud,

Los métodos más aceptados y revisados por CIBSE, VDI y AHSRAE, organismos e instituciones especializadas en refrigeración de Inglaterra, Alemania y Estados Unidos respectivamente son:

- El método de admitancia (CIBSE 1986)
- Método VDI (VDI 1996)
- Método CLTD/SCL/CLF (ASHRAE 1997)
- La serie de tiempo radiante (ASHRAE 2001)
- El método de balance de calor (ASHRAE 2001)

Las metodologías más actualizadas de la ASHRAE (2001), son consideradas las más exactas, debido a que toma en cuenta la mayoría de las variables, pero esta ventaja se ve reflejada a su vez en la complejidad del cálculo a realizar, para lo cual se requeriría de software especializado para su resolución, además de la exigencia de la toma de gran número de mediciones específicas que permita conocer las múltiples variables involucradas ya sea de temperatura (balance de calor) o de tiempo (tiempo radiante) además de herramientas de medición especializadas. Los métodos presentados por CIBSE y VDI, son metodologías con cálculos de dificultad moderada y de resultados válidos y reconocidos, sin embargo, solo son aplicables a condiciones específicas de las regiones de estas instituciones (Inglaterra y Alemania) , para el método de admitancia (CIBSE) se utiliza sobredimensión y se excluyen puntos importantes para la metodología ASHRAE.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizará el método CLTD/SCL/CLF debido a su equilibrio entre exactitud y complejidad de cálculo.

2.2.1. Cálculo de carga térmica por el método CLTD/SCL/CLF

En 1975 ASHRAE desarrolló un método denominado cálculo de carga por temperatura diferencial/factores de carga de enfriamiento CLTD/CLF que se derivó del TFM (Método de Función de Transferencia), el cual fue introducido en 1967. El método del CLTD/CLF depende de datos tabulados para simplificar su operación para el uso manual. Este método fue sometido a varias revisiones para acomodar los problemas que aumentaron en aproximaciones y limitaciones para

cubrir más datos tabulados precisos. Debido a esto, ASHRAE publicó el cálculo de carga por temperatura diferencial/carga solar de enfriamiento/factores de carga de enfriamiento (CLTD/SCL/CLF) (ASHRAE 1993, 1997), el cual es un método revisado del CLTD/CLF. Este método es un método simplificado, más simple que el método RTS

CARACTERISTICAS:

La temperatura del aire se asume constante

Se consideran 3 factores para calcular la ganancia de calor: por conducción, por radiación solar, ganancias internas. Estos factores se calculan por el método de función de transferencia (TFM).

SUPOSICIONES

La temperatura del aire exterior es constante

2.2.1.1 Metodología

Este método utiliza datos tabulados de CLTD (cálculo de carga de temperatura diferencial), SCL (Factor solar de carga térmica) y CLF (Factor de carga térmica) las cuales consideran los efectos de:

Intervalos de tiempo de calor generado por conducción a través de superficies exteriores opacas.

El retraso en el tiempo de almacenamiento térmico en la conversión de calor generado por radiación a carga térmica.

Los datos son generados con factores del material de diseño y coeficientes de transferencia por conducción, el cuál produce cargas térmicas en condiciones ambientales estándar y los tipos de zona. Las cargas térmicas son entonces estandarizadas para condiciones especificadas de una zona, así es que sería posible calcular las cargas térmicas para cada hora con una multiplicación simple.

Entre las desventajas más significativas están:

El ajuste si se considera una pared o techo que no corresponde a uno de los grupos listados puede considerarse una fuente error.

La inexactitud para la corrección de otras fechas y latitudes a los tabulados.

PSICROMETRIA

El cálculo de la carga térmica anteriormente desarrollada no es por sí mismo suficiente para conocer la carga que necesita un espacio para estar acondicionado, pues solo se consideró la carga generada en el espacio, por lo que hace falta tomar en cuenta las propiedades del aire por lo que hace falta aplicar la psicrometría.

Para poder diseñar un sistema de acondicionamiento de aire se debe conocer la temperatura y el contenido de humedad del aire a ser acondicionado además de otros factores a tomar en cuenta como la tasa de ventilación, etc.

Utilizando la carta psicométrica (figura 10), que es en esencia una herramienta visual que nos permite conocer las propiedades del aire, para utilizarla debemos conocer al menos 2 de los 7 puntos de la tabla:

- Temperatura de bulbo seco (TBS o DB)
- Temperatura de bulbo húmedo (TBH o WB)
- Humedad relativa (HR)
- Humedad del aire (W)
- Volumen específico (v)
- Entalpia (h)
- Caída de presión (ΔP o dp)

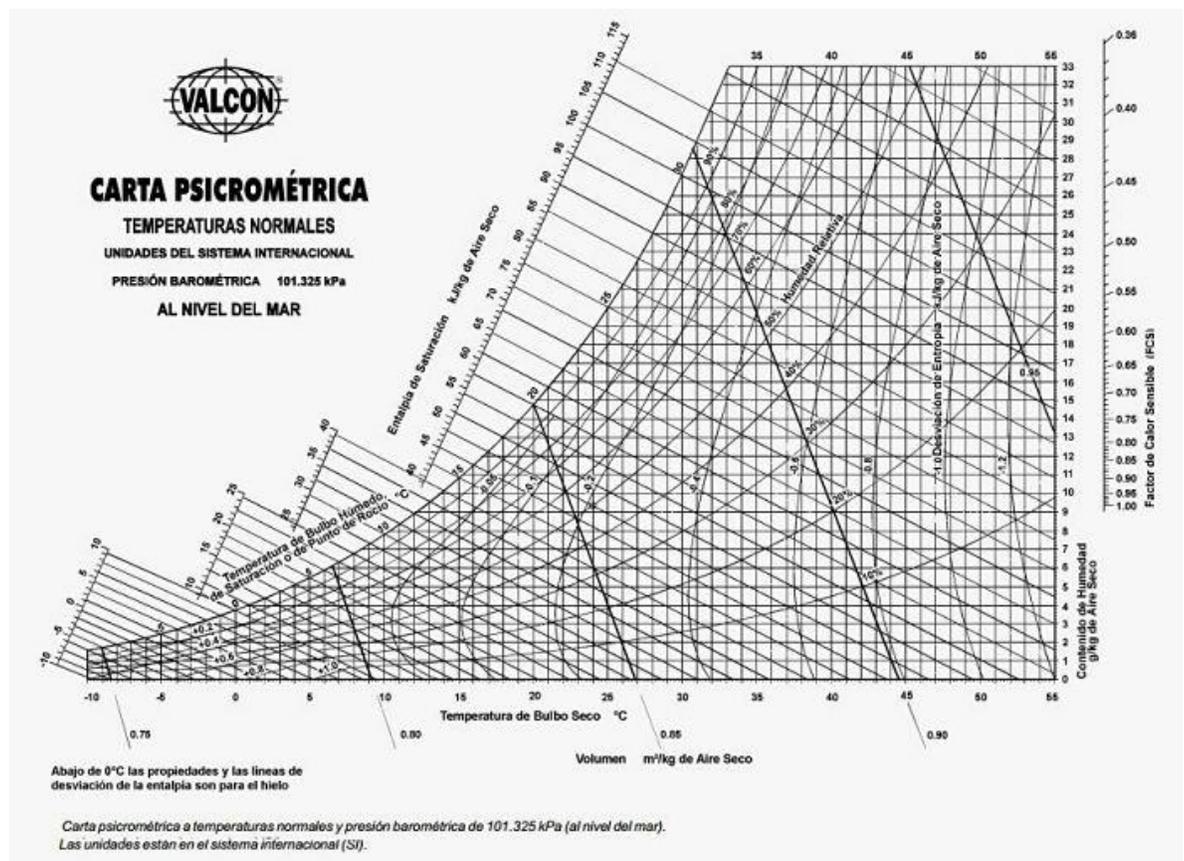


Ilustración 10. Carta psicrométrica

Si ocurren cambios en el contenido del calor o de la humedad del aire, el punto en la gráfica psicrométrica que representa la condición del aire inicial

(representada por el punto 0 en la ilustración 11), se desplazará a una posición que represente las nuevas condiciones de temperatura o de humedad del aire luego del cambio, a las líneas que unen estos desplazamientos se les denomina líneas de proceso, las cuales definen que proceso se está llevando a cabo (enfriamiento, calefacción, humidificación y/o des humidificación ejemplificados en la tabla 4).

Tabla 4. Procesos en la carta psicrométrica (+) aumenta (-) disminuye (=) constante

Proceso	Nombre	DB	WB	HR	h	W	v	Dp
0 - 1	Calentamiento sensible	+	+	-	+	=	+	=
0 - 2	Calentamiento con humidificación	+	+	+ ó -	+	+	+	+
0 - 3	Humidificación	=	+	+	+	+	+	+
0 - 4	Enfriamiento con humidificación	-	+ ó -	+	+ ó -	+	+ ó -	+
0 - 5	Enfriamiento sensible	-	-	+	-	=	-	=
0 - 6	Enfriamiento con humidificación	-	-	+ ó -	-	-	-	-
0 - 7	Des humidificación	=	-	-	-	-	-	-
0 - 8	Calentamiento con des humidificación	+	-	-	-	-	+	-

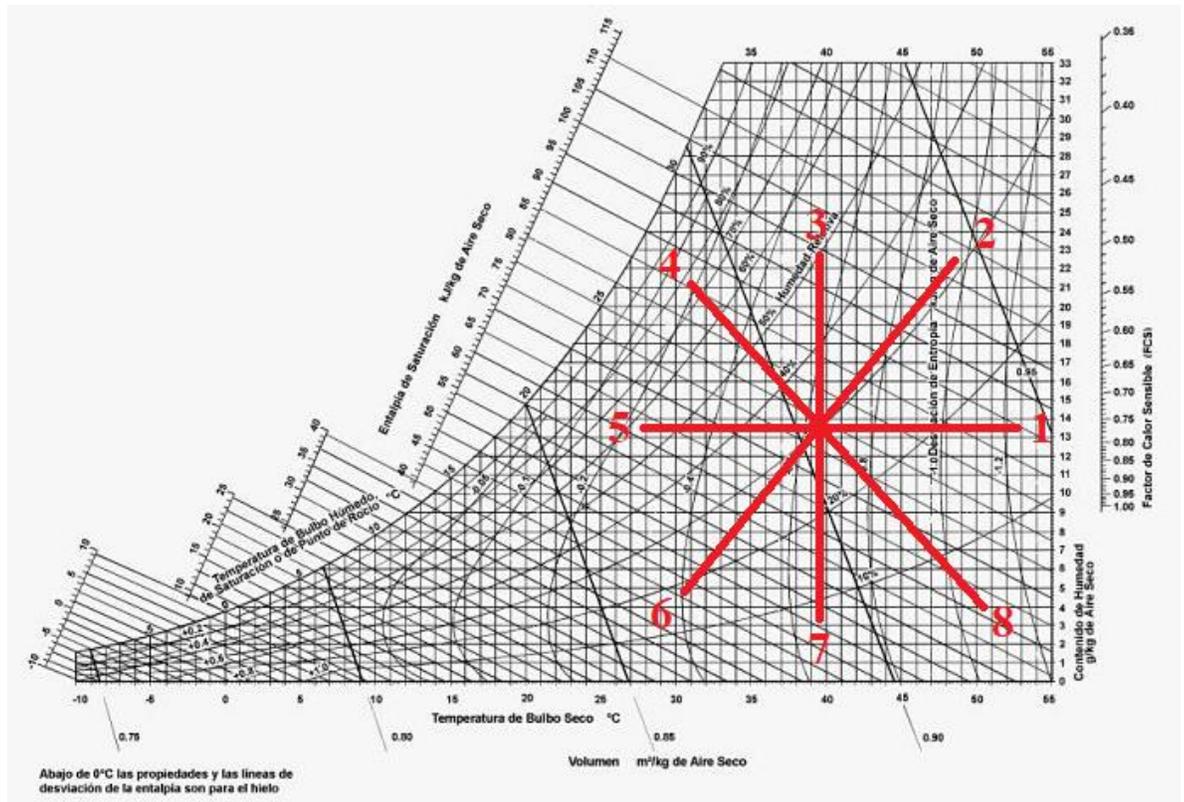


Ilustración 11. identificación de los procesos en la carta psicrométrica.

RECAMBIOS DE AIRE

Según la naturaleza del espacio es necesario tomar en cuenta la tasa de aire que ingresará del exterior, ya que esto influye directamente en la carga que el sistema de acondicionamiento de aire deba manejar, incrementando la carga en casos en los que la tasa de recambio de aire sea mayor en relación a casos que no sea necesario recambio de aire, o sea menor dicha tasa.

CONDICIONES DE DISEÑO

Para el cálculo será necesario parametrizar las características del sitio que se desea acondicionar, por lo que será necesario contar con la medición del valor de ciertas variables:

- Temperatura exterior
- % de humedad relativa del exterior
- Temperatura del interior (de diseño)
- % de humedad relativa del interior
- Mes y día de diseño: 1 de Abril (fuente: <https://es.weatherspark.com>)

Se tomará el valor extremo de la temperatura y humedad relativa exterior de la ciudad en que se localizará el recinto a acondicionar, debido a que éstas son las condiciones en que más carga térmica presenta, por lo que el sistema a diseñar estará sobredimensionado, pero bajo condiciones reales de diseño.

CONFORT TERMICO

La ASHRAE establece las condiciones térmicas aceptables para los ocupantes de un recinto (ASHRAE 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy), en base a un conjunto de factores asociados al ambiente, así como a los propios ocupantes, entre los cuales se destacan:

- Tasa metabólica
- Aislamiento de la ropa
- Temperatura del aire

- Temperatura radiante
- Velocidad del aire
- humedad

En cuanto a la temperatura de confort, la ASHRAE la define como “la sensación mental que expresa la satisfacción con el ambiente térmico”, puesto que no se puede generalizar una temperatura de confort específica para todas las personas, si se puede establecer un rango basado en el porcentaje de satisfacción e insatisfacción de las personas, la escala de sensaciones térmicas puede ser:

- +3 Caliente
- +2 Cálido
- +1 Ligeramente cálido
- 0 Neutro
- -1 Ligeramente frío
- -2 Frío
- -3 Muy frío

El modelo del voto promedio previsto (PMV) usa los principios del modelo de balance de calor para relacionar los 6 factores clave para el confort térmico, el porcentaje previsto de disgusto (PPD) está relacionado al PMV como se observa en la ilustración 12, basado en la suposición que las personas sentirán sensaciones térmicas de +2, +3, -2 ó -3, con la simplificación que el PPD es simétrico en relación al neutro PMV .

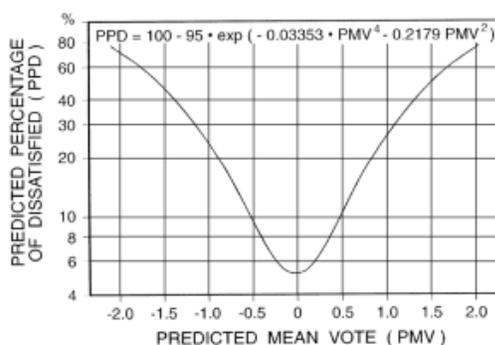


Ilustración 12. Porcentaje previsto de disgusto como función del voto promedio previsto

TABLE 5.2.1.2
Acceptable Thermal Environment for General Comfort

PPD	PMV Range
<10	-0.5 < PMV < +0.5

Ilustración 13. Ambiente térmico aceptable para confort general.

En las tablas A1 del apéndice de la norma ASHRAE 55 (tabla 5), se observan valores típicos de generación de calor debido al metabolismo para personas en actividades típicas, en la tabla B1 de misma norma se presenta valores típicos de aislamiento de ropa (tabla 6), finalmente en la figura 14 se aprecia una carta psicométrica con el rango aceptable de temperatura y humedad operativa para espacios en relación con el tipo ropa y de actividad.

Con respecto a la humedad, cuando se utiliza el Método gráfico de la zona de confort, los sistemas deben poder mantener una relación de humedad igual o inferior a 0.012, que corresponde a una presión de vapor de agua de 1,910 kPa

(0.277 psi) a una presión estándar o un punto de rocío temperatura de 16.8°C (62.2°F).

Los factores de confort no térmicos, como la sequedad de la piel, la irritación de las membranas mucosas, la sequedad de los ojos y la generación de electricidad estática, pueden poner límites a la aceptabilidad de ambientes con muy baja presión o una temperatura de punto de rocío de 16.8 °C (62.2°F).

Otro factor a tomar en cuenta son las condiciones en las cuales los hongos y ácaros se reproducen ya que esto es nocivo para los seres humanos, según “Directrices de la OMS para la calidad del aire interior: humedad y moho” estudios de laboratorio han demostrado que la mayoría de los ácaros del polvo requieren una humedad relativa superior al 45-50% para sobrevivir y desarrollarse, pero se alimentan y se multiplican más rápidamente a una humedad relativa más alta (Arlian, 1992). Por lo tanto, la humedad interior es la principal influencia en la presencia y propagación de los ácaros del polvo doméstico, como lo confirman varios estudios de campo (van Strien et al., 1994; de Andrade et al., 1995; Simpson et al., 2002; van Strien et al. al., 2004; Zock et al., 2006). Por lo tanto, las casas húmedas aumentan significativamente la exposición a los alérgenos de los ácaros del polvo, al menos en las poblaciones que viven en climas suaves y templados.

Tabla 5. Valores de la tasa de metabolismo para actividades típicas.

TABLE A1 Metabolic Rates for Typical Tasks

Activity	Metabolic Rate		
	Met Units	W/m ²	(Btu/h-ft ²)
Resting			
Sleeping	0.7	40	(13)
Reclining	0.8	45	(15)
Seated, quiet	1.0	60	(18)
Standing, relaxed	1.2	70	(22)
Walking (on level surface)			
0.9 m/s, 3.2 km/h, 2.0 mph	2.0	115	(37)
1.2 m/s, 4.3 km/h, 2.7 mph	2.6	150	(48)
1.8 m/s, 6.8 km/h, 4.2 mph	3.8	220	(70)
Office Activities			
Reading, seated	1.0	55	(18)
Writing	1.0	60	(18)
Typing	1.1	65	(20)
Filing, seated	1.2	70	(22)
Filing, standing	1.4	80	(26)
Walking about	1.7	100	(31)
Lifting/packing	2.1	120	(39)

Tabla 6. Valores de aislamiento de ropa típicos.

**TABLE B1
Clothing Insulation Values for Typical Ensembles***

Clothing Description	Garments Included [†]	<i>I_{cl}</i> , (clo)
Trousers	1) Trousers, short-sleeve shirt	0.57
	2) Trousers, long-sleeve shirt	0.61
	3) #2 plus suit jacket	0.96
	4) #2 plus suit jacket, vest, T-shirt	1.14
	5) #2 plus long-sleeve sweater, T-shirt	1.01
	6) #5 plus suit jacket, long underwear bottoms	1.30
Skirts/Dresses	7) Knee-length skirt, short-sleeve shirt (sandals)	0.54
	8) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, full slip	0.67
	9) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, long-sleeve sweater	1.10
	10) Knee-length skirt, long-sleeve shirt, half slip, suit jacket	1.04
	11) Ankle-length skirt, long-sleeve shirt, suit jacket	1.10
Shorts	12) Walking shorts, short-sleeve shirt	0.36
Overalls/Coveralls	13) Long-sleeve coveralls, T-shirt	0.72
	14) Overalls, long-sleeve shirt, T-shirt	0.89
	15) Insulated coveralls, long-sleeve thermal underwear tops and bottoms	1.37
Athletic	16) Sweat pants, long-sleeve sweatshirt	0.74
Sleepwear	17) Long-sleeve pajama tops, long pajama trousers, short 3/4 length robe (slippers, no socks)	0.96

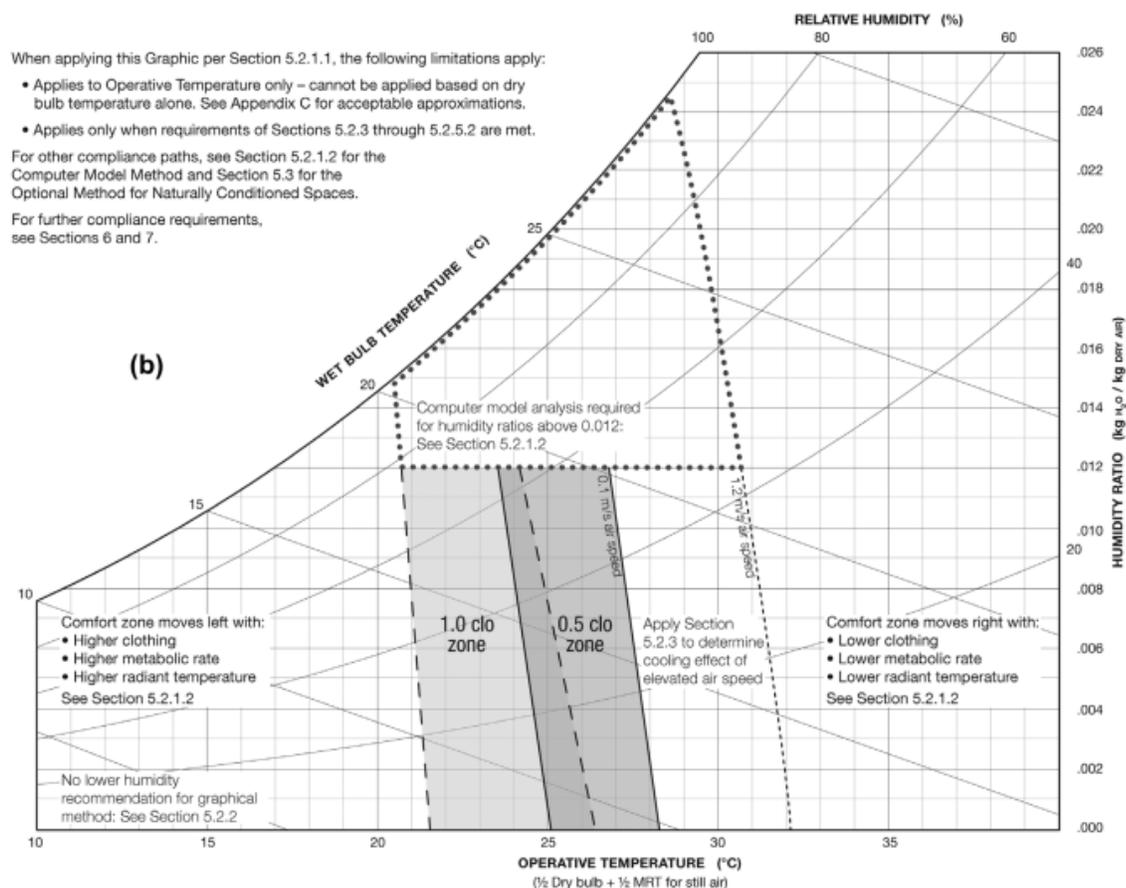


Ilustración 124. Rango aceptable de temperatura y humedad operativa

2.2.1.2 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor

En la mayoría de los problemas de transferencia de calor se incluyen, más de un modo de transferencia de calor (conducción, convección, radiación). Estos diferentes coeficientes se pueden combinar en un coeficiente global de transferencia de calor para poder determinar la razón total de transferencia de calor a temperaturas finales (T_o , T_i). La solución a esto es calculada por medio de circuitos térmicos, estos circuitos térmicos son ecuaciones análogas a los circuitos eléctricos [ASHRAE 2005 Fundamentos Cáp. 3 Pág. 18].

CIRCUITOS EN SERIE

Sucede cuando un flujo de calor debe atravesar n capas de material y estos materiales se encuentran en dirección perpendicular al flujo de calor la resistencia total equivalente para circuitos térmicos en serie es el resultado de la suma entre ellos (ver figura 15).

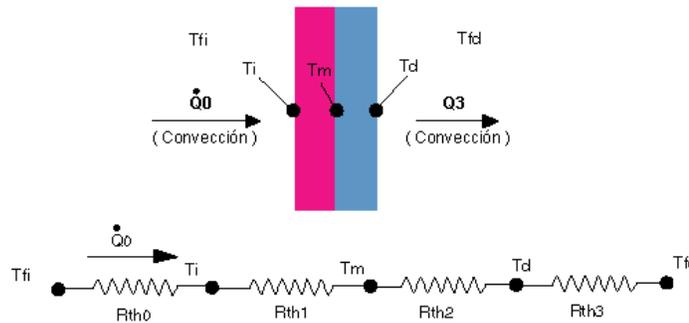


Ilustración 15. Diagrama de un circuito térmico en serie

$$R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

La resistencia térmica puede encontrarse en tablas de propiedades de materiales.

CIRCUITOS EN PARALELO

Estos casos ocurren cuando un flujo de calor debe atravesar una pared que está compuesta de n paredes de materiales diferentes, y dichas paredes se encuentran en dirección paralela al flujo de calor, la resistencia térmica total equivalente para circuitos térmicos en paralelo es la recíproca de la conductancia

total equivalente, la cual está determinada por la suma entre cada una de las conductancias de los materiales (ver Ilustración 16):

$$C_{total} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

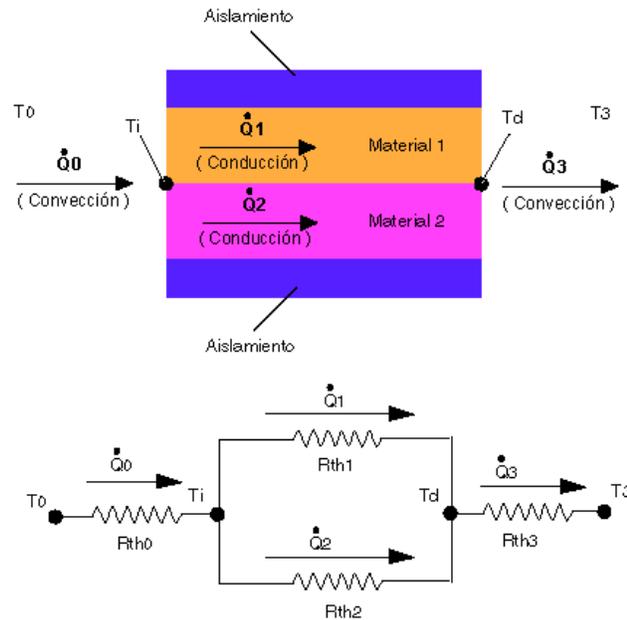


Ilustración 16. Diagrama de circuito térmico en paralelo

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U EN VENTANAS

Las trayectorias de transferencia de calor de las ventanas incluyen una contribución unidimensional (centro del cristal) y una contribución de dos dimensiones (el borde del cristal). El aporte del marco es sobre todo de dos dimensiones. Por lo tanto, el flujo de transferencia de calor a través de las ventanas se puede calcular conociendo la transferencia de calor por separados

de 3 regiones (Ilustración 17): centro de cristal, borde del cristal, y marco de la ventana (En ventanas de hojas dobles, triples, se presentan, espaciadores, tales como aisladores, fibra de vidrio, aluminio, afectan el flujo de calor, también, y su contribución se debe considerar.) El factor U total se determina usando los factores U y área para cada contribución:

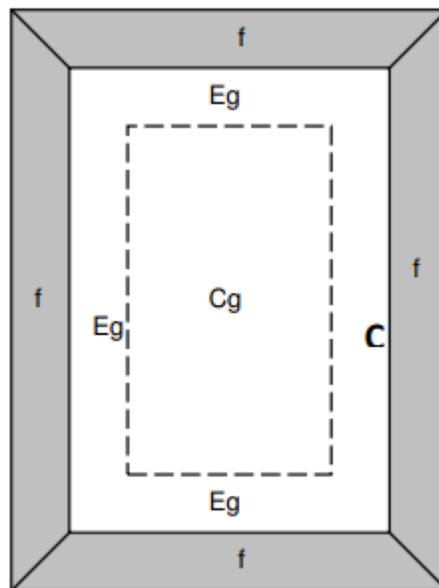


Ilustración 137. Diagrama de las regiones de una ventana

$$U_o = \frac{U_{cg}A_{cg} + U_{eg}A_{eg} + U_fA_f}{A_{pf}}$$

Donde:

U_o = *coeficiente global de transferencia de calor total de la ventana*

A_{pf} = *Area total de la ventana*

cg = *center of glass = centro del cristal*

eg = *edge of glass = borde del cristal*

f = *frame = marco de la ventana*

El borde del cristal se toma por sus valores típicos para un perímetro de 0.0635 m de ancho alrededor del cristal, para determinar el área del centro del cristal se calcula con la siguiente manera:

$$A_{cg} = (\text{ancho}_{\text{cristal}} - 0.127\text{m}) \cdot (\text{largo}_{\text{cristal}} - 0.127\text{m})$$

Para el caso de ventanas simples el efecto de borde del cristal (eg), no es tan significativo para tomarse en cuenta, por lo tanto $U_{eg} = U_{cg}$ como aparece en los libros.

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVÉS DE PAREDES Y TECHOS

Las paredes y los techos de los edificios constan de varias capas de materiales; la estructura, las condiciones de operación de las paredes y los techos pueden diferir de manera significativa de un edificio a otro. La resistencia térmica total de

una placa plana de espesor L y conductividad térmica k se puede determinar a partir de $R = \frac{1}{k}$.

La transferencia de calor a través de una sección de pared o techo también se ve afectada por los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación en las superficies expuestas. Los efectos de la convección y la radiación sobre las superficies interior y exterior de las paredes y techos suelen combinarse en los coeficientes combinados de transferencia de calor h_i y h_o , respectivamente. El coeficiente de transferencia de calor de la superficie interior h_i , permanece muy constante durante todo el año, pero el valor de h_o varía de manera considerable a causa de su dependencia de la orientación y de la velocidad del viento, la cual puede variar desde menos de 1 km/h (clima tranquilo) hasta 40 km/h (clima tormentoso). Otro factor que causa la variación del coeficiente global de transferencia de calor es la emisividad (ϵ); las superficies que tienen una baja emisividad también tienen una baja conductancia artificial.

Los componentes de construcción a menudo contienen espacios con aire atrapado entre varias capas. Las resistencias térmicas de esos espacios llenos de aire dependen del espesor de la capa, la diferencia de temperatura a través de ésta, la temperatura media del aire, la orientación de la capa del aire, la dirección de la transferencia de calor y la emisividad efectiva. La emisividad efectiva de un espacio aéreo E es el efecto combinado de emisividades de las superficies de la frontera de un espacio de aire, donde las fronteras son paralelas y de una dimensión mucho mayor que la distancia entre ellas, se expresa por:

$$\frac{1}{\varepsilon_{efectiva}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1$$

Donde ε_1 y ε_2 son las emisiones de las superficies del espacio lleno de aire.

En conclusión, La resistencia térmica total de flujo de calor a través de un componente plano de edificio compuesto de capas paralelas entre los entornos en ambos lados es dado por:

$$R_t = R_i + R + R_0$$

Donde:

R_i = Resistencia térmica de la capa interior de aire [(h.m².K) / BTU]

R_0 = Resistencia térmica de la capa exterior de aire, [(h.m².K) / BTU]

R = Resistencia térmica de la pared o techo [(h.m².K) / BTU]

Para determinar R, se aplican los conceptos de circuitos térmicos en serie y/o paralelo según sea el caso. Y el factor U de un componente plano (Pared, techo) de un edificio es el recíproco de R_t .

Los materiales en este estudio tienen son materiales de superficies comunes, por lo tanto, tienen una emisividad de $\varepsilon = 0.90$, a excepción de los marcos de aluminio los cuales es una superficie reflectora y se escogerá una emisividad de $\varepsilon = 0.12$

Las tablas utilizadas son del manual de fundamentos ASHRAE 1977 cap. 25 tabla 8 y cap. 22 tabla A3 de propiedades de conductividad térmica para materiales comunes, y capítulo 22 tabla A1 para las propiedades del aire.

Tipo de clima: verano

$R_o = 0.25 [(h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F) / Btu]$, velocidad del viento 7.5mph

$R_o = 0.20 [(h \cdot m^2 \cdot K) / Btu]$, velocidad del viento 12.07 kph

$R_i = 0.54 [(h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F) / Btu]$, aire quieto

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN PUERTAS

De manera similar al caso de las ventanas para calcular el coeficiente de las puertas:

$$U_o = \frac{U_{cg}A_{cg} + U_{eg}A_{eg} + U_fA_f}{A_{pf}}$$

Los valores se toman de la tabla 4, cap. 31 ASHRAE 2005

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN PARED

Para el caso de la pared, la cual contiene varios materiales, (bloques de concretos y placas de concreto) se determina de forma independiente el factor U de los materiales que conforman la pared a partir de tablas estipuladas en el Manual ASHRAE fundamentos 1977.

- Bloque de concreto 4 in

R sup. Externa $[(h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F) / Btu] = 0.25$ (Tabla 1A, Cap. 22 ASHRAE 1977)

R sup. Externa $[(h \cdot m^2 \cdot K) / Btu] = 0.20$ (SI, Tabla 1A, Cap. 22 ASHRAE 1977)

R Bloque [(h·ft²·°F)/Btu] = 1.51 (Tabla 8, Cap. 25 ASHRAE 1977)

R Bloque [(h·m²·K)/Btu] = 1.20 (SI, Tabla 8, Cap. 25 ASHRAE 1977)

R sup. Interna [(h·ft²·°F)/Btu]= 0.68 (Tabla 1A, Cap. 22 ASHRAE 1977)

R sup. Interna [(h·m²·K)/Btu]= 0.54 (SI, Tabla 1A, Cap. 22 ASHRAE 1977)

$$U \text{ Placa} \left[\frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F}} \right] = \frac{1}{0.25 + 1.51 + 0.685} = 0.408$$

$$U \text{ Placa} \left[\frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] = 0.86$$

- Placa de Concreto de 4in

R sup. Externa [(h·ft²·°F)/Btu]= 0.25 (Tabla 1A, Cap. 22 ASHRAE 1977)

R sup. Externa [(h·m²·K)/Btu]= 0.20 (SI, Tabla 1A, Cap. 22 ASHRAE 1977)

R Placa [(h·ft²·°F)/Btu] = 0.33 (Tabla 8, Cap. 25 ASHRAE 1977)

R Placa [(h·m²·K)/Btu] = 0.261 (Tabla 8, Cap. 25 ASHRAE 1977)

R sup. Interna [(h·ft²·°F)/Btu]= 0.68 (Tabla 1A, Cap. 22 ASHRAE 1977)

R sup. Interna [(h·m²·K)/Btu]= 0.54 (SI, Tabla 1A, Cap. 22 ASHRAE 1977)

$$U \text{ Placa} = \frac{1}{0.25+0.33+0.68} = 0.234 \left[\frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{°F}} \right]$$

$$U \text{ Placa} = 0.295 \left[\frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EL SUELO

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor para el suelo, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$R_{\text{sup. Externa}} = 0.61 \text{ [(h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{°F)/Btu]} \quad (\text{tabla 1A, Cap. 22 ASHRAE 1977})$$

$$R_{\text{sup. Externa}} = 0.484 \text{ [(h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K)/Btu]} \quad (\text{SI, tabla 1A, Cap. 22 ASHRAE 1977})$$

$$R_{\text{sup. Interna}} = 0.266 \text{ [(h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{°F)/Btu]} \quad (\text{tabla 2C, Cap. 22 ASHRAE 1977})$$

$$R_{\text{sup. Interna}} = 0.21 \text{ [(h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K)/Btu]} \quad (\text{SI, tabla 2C, Cap. 22 ASHRAE 1977})$$

Elementos que conforman el piso

- Placa de Concreto de 4in

$$R_{\text{Placa}} \text{ [(h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{°F)/Btu]} = 0.33 \quad (\text{Tabla 8, Cap. 25 ASHRAE 1977})$$

$$R_{\text{Placa}} \text{ [(h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K)/Btu]} = 0.261 \quad (\text{Tabla 8, Cap. 25 ASHRAE 1977})$$

- Acabado del piso (baldosa cerámica)

$$R_{\text{baldosa}} = 0.05 \text{ [(h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{°F)/Btu]} \quad (\text{tabla 3A, Cap. 22 ASHRAE 1977})$$

$$R_{\text{baldosa}} = 0.04 \text{ [(h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K)/Btu]} \quad (\text{tabla 3A, Cap. 22 ASHRAE 1977})$$

$$R_t = R_i + R + R_o = 0.61 + 0.266 + 0.33 + 0.05 + 0.61 = 1.87 \text{ [(h}\cdot\text{ft}^2\cdot\text{°F)/Btu]}$$

$$R_t = 1.48 \text{ [(h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K)/Btu]}$$

$$U_{\text{suelo}} = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{4.808} = 0.208 \left[\frac{BTU}{h \cdot ft^2 \cdot °F} \right]$$

$$U_{suelo} = 0.262 \left[\frac{BTU}{h \cdot m^2 \cdot K} \right]$$

METODO CLTD/SCL/CLF

El procedimiento para el cálculo de la carga térmica a desarrollar es el descrito en el manual de fundamentos ASHRAE 1977, en la que se exponen los siguientes pasos.

2.2.1.3 Cálculo de las cargas sensibles

La ganancia de calor es sensible cuando hay una adición directa de calor al espacio condicionado por cualquier o todos los mecanismos de conducción, convección, y radiación. El calor sensible es calculado a partir de las siguientes secciones: Paredes externas, techos, ventanas, particiones, misceláneas (equipos, luces, personas), infiltraciones.

CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA A TRAVES DE PAREDES Y TECHOS

El cálculo de la carga a través de paredes y techos exteriores se determina a través de la siguiente ecuación:

$$q = U \cdot A \cdot CLTD_c$$

Donde:

A = área de la pared [m^2]

U = Coeficiente global de transferencia de calor [$BTU/h \cdot m^2 \cdot k$]

$CLTD_c$ = Factor de corrección que depende del tipo de construcción, orientación, mes, color de la sección y temperatura exterior e interior, se determina así:

$$CLTD_c = [(CLTD + LM)k + (78 - T_r) + (T_0 - 85)]$$

Donde:

$CLTD$ = Es la diferencia equivalente de temperatura según el grupo al cual pertenece la pared. Para determinar el grupo de la pared, se utiliza la tabla 6, cap. 25 del manual de fundamentos ASHRAE 1977, teniendo el grupo de pared, se procede a determinar el $CLTD$ a partir de la tabla 7, Cap. 25 del libro Manual ASHRAE 1977 Fundamentos.

LM = Es la corrección que se debe tener en cuenta por latitud y mes, para eso se utilizara los datos de la Tabla 32, Cap. 26 del libro ASHRAE 1989 Fundamentos.

T_r = Temperatura de diseño interior obtenidos de las consideraciones de diseño

T_0 = Temperatura promedio exterior

K = factor de corrección por color

CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA A TRAVES DE VENTANAS

Se compone de 2 elementos, la carga térmica ganada por conducción y la carga térmica ganada por radiación.

$$Carga\ térmica\ ventanas = carga\ por\ conducción + Carga\ por\ radiación$$

CARGA POR CONDUCCIÓN

Se debe a la diferencia de temperatura interior y exterior

$$q = U \cdot A \cdot CLTD_c$$

A = área de ventana [ft^2]

U = Coeficiente global de transferencia de calor [$BTU/h \cdot m^2 \cdot K$]

$CLTD_c$ = Factor de corrección que depende del tipo de ventana y material.

CARGA POR RADIACIÓN

Es debida a la energía solar transmitida y absorbida, esta carga es tomada en cuenta cuando la ventana está en contacto directo con el sol, en caso de que la ventana no esté en contacto con el sol, la carga térmica total a través de la ventana se considerará solo por conducción. Para cálculo de carga térmica por radiación se debe tener en cuenta la presencia o ausencia de sombreado interior, esta consideración es debido que el calor absorbido por las cortinas, polarizado o cualquier tipo de sombreado interior difiere del calor absorbido por el piso (si

no hay sombreado interior). Para determinar la carga térmica por radiación se utiliza la siguiente fórmula:

$$q = A \cdot SC \cdot SHGF \cdot CLF$$

Donde:

A = Área de la ventana

SC = (Shading Coefficient) Coeficiente de sombreado para vidrio. Se utiliza las Tablas 28, 33-36, 38 y 40; Cap. 26 del libro ASHRAE 1977 Fundamentos

SHGF = (Solar Heat Gain Factor) Factor de ganancia de calor solar. (Btu/hxft²)
Depende de la latitud, orientación y mes. Se utilizarán valores de la Tabla 10; Cap. 25 del libro ASHRAE 1977

CLF = (Cooling load Factor) Factor de carga de enfriamiento para vidrios.
Depende de la hora solar, tipo de construcción, presencia o no de elementos de sombreado y de la orientación. Se Seleccionará valores para construcción media de la Tabla 11 y 12; Cap. 25 del libro ASHRAE 1977 Fundamentos.

CÁLCULO DE LAS CARGAS TÉRMICAS MISCELÁNEAS

LUCES

Para calcular la carga térmica generada por luces se utilizará:

$$q = 3.41 \cdot W \cdot CLF \cdot Ful \cdot Fsa$$

Donde:

W = Potencia útil en vatios de las lámparas obtenida de las mediciones de los locales.

CLF = (Cooling Load Factor) Factor de carga de enfriamiento para luces. Depende del tiempo de uso de las luces, en casos de que el equipo funcione solamente cuando las luces estén encendidas, el CLF = 1, también es 1 cuando se utilice las luces las 24 h

Ful = Factor de uso de iluminación, depende del uso total de las lámparas en edificios o locales el factor es 1 cuando se usa y 0 cuando no se usa

Fsa = Factor especial de iluminación, este factor es introducido debido a las lámparas fluorescentes y especiales, generalmente son perdidas por balastro, para lámparas simples de 32 W y un voltaje de 230 V usar un factor de 2,19, En lámparas de arranque rápido de 40 W el factor varía de 1,18 para 2 lámparas a 230 V y 1,30 para una lámpara a 120 V. Se recomienda 1,2 para aplicaciones generales Para lámparas especiales, diferentes a las fluorescentes, como las lámparas de sodio, este factor varía entre 1,04 a 1,37 dependiendo del fabricante. En caso de que exista locales con diferentes tipos de iluminaciones (fluorescentes, incandescentes, especiales) se calculará la carga térmica por separado y después se sumarán aritméticamente para obtener una carga térmica total.

PERSONAS

La carga térmica generada por personas depende del tipo de actividad en la cual la(s) persona(s) esté(n) realizando. Para cálculo de cargas térmicas sensibles se utiliza la siguiente formula:

$$q = N^{\circ} \text{ de personas} \cdot \text{factor de actividad} \cdot CLF \cdot \text{Ganancia de calor sensible}$$

Donde:

Factor de Ocupación = Fracción del total de personas que ocupan el espacio según la hora

CLF = (Cooling Load Factor) Factor de Carga de enfriamiento para las personas, depende del tiempo en el cual la(s) persona(s) se mantiene en el espacio acondicionado y el tiempo en el cual se entró por primera vez. Si el espacio acondicionado no se mantiene constante durante las 24 horas, el CLF = 1.

Ganancia de Calor Sensible = Factor de carga sensible de las personas, depende de las actividades en la cual la(s) persona(s) este(n) realizando, se utilizará la Tabla 16; Cap. 25 del libro ASHRAE 1977.

INFILTRACIONES

El cálculo de la carga térmica sensible a través de las infiltraciones es el resultado de la diferencia de temperatura del aire saliente y entrante en condiciones estándar de la ASHRAE:

$$q = cfm \cdot 60 \cdot 0,075 \cdot (0,24 + 0,45 W) \Delta T$$

En la mayoría de los casos de aire acondicionado encontramos que $W = 0,01$, por lo tanto, de la anterior ecuación queda que:

$$q = 1,10 \cdot cfm \cdot \Delta T$$

Donde:

Cfm = es el flujo de aire que entra y sale al abrirse una puerta, ventana o una grieta.

ΔT = diferencia de temperatura exterior e interior.

FACTOR DE CORRECCION POR CARGA SENSIBLE

Al calcular los componentes de carga térmica del espacio descrito anteriormente, se asume que toda la energía se transfirió a la carga térmica. En algunos casos, sin embargo, esto no es cierto: Una fracción de la energía de aporte es perdida hacia los alrededores. Esta fracción F_C , depende de la conductancia termal entre el aire del espacio y los alrededores y es llamada Factor de corrección:

$$F_C = 1 - 0,02K_T$$

Donde K_T es la conductancia en unidades de longitud entre el espacio y los alrededores en $[BTU/h \cdot m^2 \cdot K]$ dados por:

$$K_T = \frac{1}{L_f} \cdot (U_W A_W + U_{OW} A_{OW} + U_C A_C)$$

Donde:

L_f = longitud de las paredes (espacio condicionado) realizado en medidas

U = Coeficiente de transferencia de calor $[Btu/(h \cdot m^2 \cdot K)]$ de la sección

A = Área de la sección

Los coeficientes w , ow , c , referencia la sección la cual pertenece (w = partición, ow = pared externa, c = corredor) también se deben de tener en cuenta las ventanas, puertas, techos y pisos. Teniendo este factor, se tiene que multiplicar a cada uno de los resultados de las cargas térmicas obtenidas en los puntos anteriores. El cálculo total de las cargas sensibles es, por lo tanto:

$$q_{sensible} = (q_{pared} \cdot F_c) + (q_{ventanas} \cdot F_c) + (q_{mis_sensibles} \cdot F_c) + q_{infiltrac_sensibles}$$

2.2.1.4 Cálculo de las cargas latentes

La ganancia de calor por cargas latentes es debido a la humedad que se agrega al espacio condicionado (ejemplo: por vapor emitido por los ocupantes). Para mantener una tasa de humedad constante en el espacio cerrado, El vapor de

agua en el aparato de enfriamiento debe condensarse hacia afuera en una tasa igual a su tasa de adición en el espacio. La suma total de la energía requerida para hacer esto, esencialmente es igual al producto de la tasa de condensación y el calor latente de condensación. [Manual ASHRAE 1977, Cap. 25 pg. 25]

El calor latente es calculado a partir de las siguientes secciones:

CÁLCULO DEL CALOR LATENTE DEBIDO A PERSONAS

La carga térmica generada por personas depende del tipo de actividad en la cual la(s) persona(s) esté(n) realizando. Para cálculo de cargas térmicas latentes se utiliza la siguiente fórmula:

$$q = N^{\circ} \text{ de personas} \cdot \text{factor de ocupación} \cdot CLF \cdot \text{Ganancia de calor latente}$$

Factor de Ocupación = Fracción del total de personas que ocupan el espacio según la hora.

CLF = (Cooling Load Factor) Factor de Carga de enfriamiento.

Ganancia de Calor Latente = Factor de carga sensible de las personas.

CÁLCULO DEL CALOR LATENTE DEBIDO A INFILTRACIONES

El cálculo de cargas latente es resultado de la diferencia de humedad (ΔW) entre el aire entrante y el aire saliente en condiciones estándar de la ASHRAE:

$$q = 4840 \cdot cfm \cdot \Delta W$$

Donde:

CFM = es el flujo de aire que entra y sale al abrirse una puerta, ventana o una grieta

ΔW = diferencia de humedad exterior e interior (lbw/lba) obtenidos en tablas psicométricas.

El cálculo total de las cargas latentes es, por lo tanto:

$$q_{latente} = q_{misc_latente} + q_{inf_latente}$$

CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA TOTAL EN TONELADAS DE REFRIGERACIÓN

El cálculo total de la carga térmica es la suma total de las cargas sensibles y latentes:

Cálculo total carga térmica = Cargas sensibles + Cargas latentes

Recordando, las cargas se dieron en unidades de Btu/h, para manejar estas cargas en unidades comerciales (Toneladas de refrigeración) la carga total debe ser dividida en 12000, ya que 1 Ton de Refrigeración = 12000 Btu/h.

2.2.2. Ventilación y recirculación del aire interior

Cuando los locales por acondicionar son de condiciones limpias, puede aprovecharse parte del aire interior que ya ha trabajado para volverlo a circular por el local, mezclándose con el aire exterior. Este aire exterior representa el

volumen necesario para la respiración de los ocupantes y el aire recirculado es el complemento total que se debe circular en el sistema. No siempre es posible efectuar esta recirculación debido a las características de los locales, por ejemplo, no es permitido en salas de operación, fábricas de pinturas, o aquellas donde hay desprendimiento de gases, vapores, etc. porque se contaminaría el ambiente. Por el contrario, en escuelas, tiendas, oficinas, cines, teatros, iglesias, etc. es conveniente ya que en ella se reduce considerablemente la capacidad de los equipos, lo que significa un ahorro en costo inicial como de operación y de mantenimiento.

La renovación del aire interior de las dependencias de un edificio es necesaria e imprescindible. Mediante la renovación del aire interior en los edificios se consigue mantener en niveles admisibles, la concentración de contaminantes presentes en el aire, que se genera por el desarrollo de cualquier actividad humana o de otra índole.

Para saber el número de renovaciones necesarias o caudales de aporte de aire exterior, hay que partir del uso a que se va a destinar el edificio. En función de este uso, existen multitud de tablas y recomendaciones de bibliografía especializada que indican el número de renovaciones horarias, o bien proporcionan directamente los caudales de aire por persona o metro cuadrado de superficie del edificio o de salas a acondicionar. Por ejemplo, en la siguiente tabla se indica el número de renovaciones a la hora, para cada tipo de establecimiento o local, según la norma DIN 1946 (Para el caso de oficinas utilizaremos 6 renovaciones por hora según la figura 18).

El cálculo del caudal mínimo requerido de ventilación de aire exterior es inmediato a partir de los datos de renovaciones horas de la tabla anterior. En efecto, si V es

el volumen que ocupa el local o establecimiento en m^3 ($V = A \cdot B \cdot C$, siendo A , B , C las dimensiones de largo, ancho y altura del local) y N es el número de renovaciones por hora extraído de la tabla anterior en función del uso dado al local o edificio. El caudal Q mínimo de aire exterior se calcula como:

$$Q = V \cdot N$$

Tomaremos el caudal calculado con la tabla como el total que debe circular por el sistema y calcularemos el volumen necesario para la respiración de los ocupantes como el porcentaje que deberá ser tomado por el aire externo que será calculado así:

$$V_{bz} = R_p P_z + R_a A_z$$

Donde:

V_{bz} : Caudal necesario para la respiración de los ocupantes.

R_p : Flujo de aire externo necesario por persona (igual a 2.5 L/s para oficinas según recomendación de ASHRAE Standard 62.1 – 2010).

P_z : Número de personas que ocuparán la oficina.

R_a : Flujo de aire externo necesario por unidad de área (igual a 0.3 L/(s.m²) según recomendación de ASHRAE Standard 62.1 – 2010).

Así, podemos realizar el balance de masa para comprender la relación entre flujo másico del aire de recirculación, el flujo de aire externo y el flujo que debe ser extraído:

$$\dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida} = \frac{dm}{dt}$$

Como se pretende mantener la masa de aire contenida en el recinto, manteniendo una presión adecuada para los ocupantes:

$$\dot{m}_{entrada} - \dot{m}_{salida} = 0$$

Entonces:

$$\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{salida}$$

Si separamos los flujos entre el aire que recircula, el aire que ingresa desde el exterior y se expulsa a éste, tendremos:

$$\dot{m}_R + \dot{m}_{exterior} = \dot{m}_R + \dot{m}_{expulsado}$$

Con lo que concluimos:

$$\dot{m}_{exterior} = \dot{m}_{expulsado}$$

Así, determinamos el flujo que deberán expulsar las rejillas destinadas para permitir el mantenimiento de las condiciones adecuadas de acondicionamiento del aire y permitir la adecuada renovación del aire interior.

Tipo de Local		Nº. Renovaciones de aire por hora
WC, inodoros	Privados	4-5
	Públicos	8-15
Aseos y baños		5-7
Duchas		15-25
Bibliotecas		4-5
Oficinas		4-8
Tintorerías		5-15
Cabinas de pintura		25-50
Garajes y parkings		5
Salas de decapado		5-15
Locales de acumuladores		5-10
Armarios roperos		4-6
Restaurantes y casinos		8-12
Industrias de Fundiciones		8-15
Remojos		70-80
Auditorios		6-8
Salas de cines y de teatros		5-8
Aulas		5-7
Salas de conferencias		6-8
Cocinas	Privadas	15-25
	Colectivas	15-30

Ilustración 148. Renovaciones por hora recomendadas para distintos locales.

2.3 Intercambiador enterrado para sistema de bomba de calor inversa

En este apartado nos centraremos en el intercambiador enterrado bajo tierra:

Para los sistemas de bomba de calor que utilizan energía geotérmica el diseño del intercambiador de calor enterrado se suele dividir en vertical u horizontal. Los intercambiadores verticales generalmente consisten en dos tubos estrechos hechos de polietileno de alta densidad (HDPE) instalados en un agujero que es llenado por un medio sólido para brindar firmeza a la estructura, los tubos son unidos mediante una U al fondo del agujero. Las dimensiones mas utilizadas de los tubos caen entre los 20 a 40 mm, la profundidad del agujero puede estar dentro del rango de los 15 a 120 m (Dependiendo de la facilidad de excavación y de las herramientas con las que se cuente). El diámetro del agujero normalmente ronda cercano a los 125 mm. Para efectos de diseño y evitar interferencias térmicas entre los agujeros instalados se asumirá que éstos se construirán con al menos 6 m de separación.

Ventajas del intercambiador de calor vertical son (ver ejemplo en figura 19):

1. Requiere terrenos relativamente pequeños para su construcción.
2. Al estar a gran profundidad, las variaciones de temperatura no afectan el sistema.
3. Requiere poca longitud de tubería y energía invertida en el bombeo del fluido caloportador.

Desventajas del intercambiador vertical son:

1. Mayor costo inicial debido a la excavación a mayor profundidad que se debe realizar.

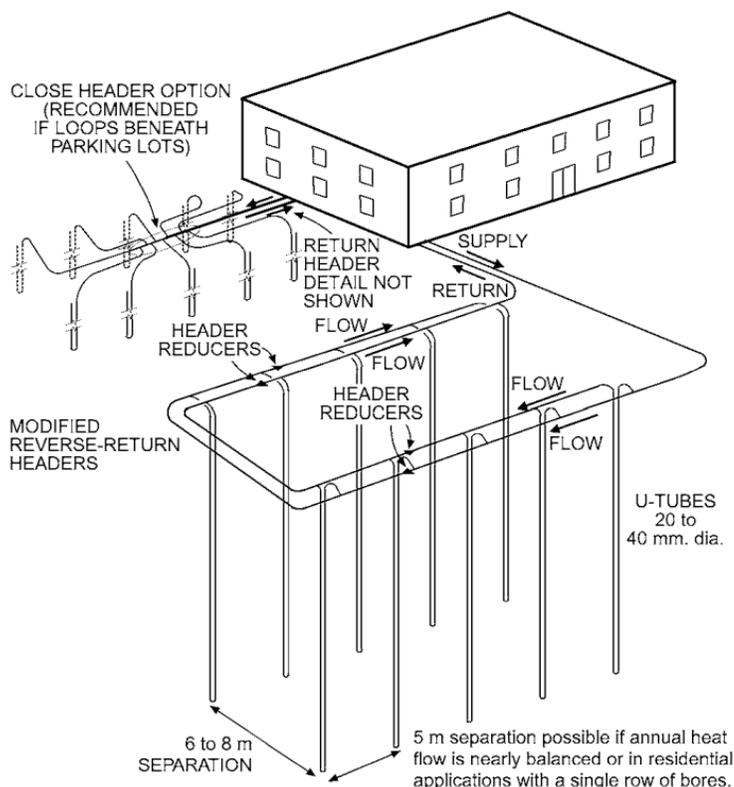


Ilustración 159. Intercambiador tipo vertical con múltiple U-tubes.

Para los intercambiadores horizontales puede optarse por una o múltiples tuberías en línea o en espiral. Los intercambiadores de línea única se instalan en zanjas de al menos 1.2 m de profundidad. Es necesario contar con una gran extensión de terreno para estos diseños, sin embargo, las configuraciones con más de una línea de tubería pueden reducir la extensión requerida, aunque esto podría repercutir en interferencia térmica por las tuberías adyacentes. En estos casos se prefiere utilizar una tubería en espiral para obtener la ventaja de una sola línea y evitar la interferencia.

Ventajas del intercambiador de calor horizontal:

1. Estas configuraciones suelen ser menos costosas frente al intercambiador vertical.
2. Construcción simple permite utilizar herramientas mas sencillas.

Desventajas del intercambiador horizontal:

1. Gran extensión de terreno requerido.
2. Funcionamiento es afectado por los cambios climáticos.
3. Mayor potencia de bombeo requerida.

En nuestro país, generalmente no se poseen amplios terrenos para construcciones comerciales o de vivienda, por lo que el diseño se decantará por un intercambiador vertical para aplicaciones de oficina y residenciales.

2.3.1 Caracterización del sitio

Las características geológicas e hidrológicas del sitio son aspectos que determinan la selección adecuada del tipo de sistema GSHP. Deben contemplarse los siguientes aspectos: 1) Presencia o ausencia de masas de agua, 2) Profundidad de la masa de agua (de existir), 3) Temperatura promedio del agua o suelo donde se planea instalar el intercambiador, 4) Tipo de suelo y rocas.

Teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados debemos realizar las pruebas para obtener los valores característicos del sistema como: conductividad térmica del suelo, densidad, temperaturas, etc. Además, antes de iniciar el proyecto debemos corroborar la ley de recursos naturales o calidad del medioambiente, y obtener los permisos necesarios para su ejecución, y prestar máxima atención cuando el sistema afectará directa o indirectamente un afluente de agua.

2.3.2 Diseño vertical

Se detallará el procedimiento de diseño sugerido para intercambiadores verticales tipo U (*U-tubes*) enterrados a tierra:

1. Calcular los valores máximos de carga térmica del recinto que se pretende climatizar y predecir el comportamiento según su uso.
2. Estimar el flujo anual de calor expulsado hacia el terreno.
3. Seleccionar variables preliminares de temperaturas y flujo para cálculo de eficiencias del sistema (Seleccionar temperaturas cercanas a la de la tierra resulta en altas eficiencias, sin embargo, se requiere mayor longitud de tubería lo que aumenta los costos).
4. Corregir las condiciones nominales de la bomba de calor a las condiciones actuales de diseño.
5. Realizar un estudio del sitio para determinar las propiedades térmicas del suelo y condiciones de perforación.
6. Determinar la óptima configuración y dimensiones del intercambiador.
7. Seleccionar bombas y sistemas de control, determinar eficiencia. La demanda de energía de la bomba no debe sobrepasar el 8% de la demanda total, la demanda del ventilador no debe sobrepasar el 12% de la demanda total de energía.

El análisis para el dimensionamiento del intercambiador tubo-U (*U-tube*) vertical se ejecutará siguiendo el método de cilindros concéntricos, que se basa en la transferencia de calor en estado estable:

$$q = \frac{L(T_g - T_w)}{R_{ov}}$$

Donde:

q: Flujo de transferencia de calor

L: longitud requerida del intercambiador

Tg: Temperatura de la tierra

Tw: Temperatura del líquido

Rov: Resistencia térmica conjunta de la tierra y el intercambiador.

El calor que será expulsado hacia la tierra puede ser calculado por:

$$\frac{q_{cond}}{q_{lc}} = \frac{COP + 1}{COP}$$

Donde q_{lc} y el COP serán variables establecidas por el fabricante de la bomba de calor seleccionada según la carga térmica calculada previamente del recinto.

Un análisis completamente certero deberá tomar en cuenta el tiempo como variable del flujo de calor en el intercambiador, para efectos de diseño y complejidad de los cálculos se trabajarán las resistencias térmicas como pulsos de flujo en distintas contribuciones según por ocurrencia (anual, mensual y picos cortos de 1 a 6 horas), donde se tomarán en cuenta las resistencias térmicas del Tubo-U y del suelo. Según recomendación del “2019 ASHRAE Handbook HVAC Applications” Podemos reescribir la ecuación del intercambio de calor para determinar la longitud requerida así:

$$L = \frac{q_a R_{ga} + (q_{lc} - W_c)(R_b + PLF_m R_{gm} + R_{gst})}{T_g - \frac{T_{wt} - T_{wo}}{2}}$$

L = Longitud total requerida de la tubería, m

PLFm = Factor de carga parcial de diseño mensual.

qa = Transferencia de calor promedio anual expulsado al suelo, W

Rga = Resistencia térmica efectiva del suelo (pulso anual), (m·K)/W

R_{gst} = Resistencia térmica efectiva del suelo (pico corto), $(m \cdot K)/W$

R_{gm} = Resistencia térmica efectiva del suelo (pulso mensual), $(m \cdot K)/W$

R_b = Resistencia térmica de la tubería enterrada, $(m \cdot K)/W$

t_g = Temperatura natural del suelo, $^{\circ}C$

t_{wi} = Temperatura del agua a la entrada de la bomba de calor, $^{\circ}C$

t_{wo} = Temperatura del agua a la salida de la bomba de calor, $^{\circ}C$

W_c = Potencia de entrada del sistema con la carga térmica de diseño, W

Debemos comprender la configuración usual (que se utilizará en el presente proyecto y se describió anteriormente) antes de adentrarnos en su análisis matemático. Como se puede observar en la Ilustración 20, se pueden asumir diferentes posiciones para el Tubo-U en relación con el agujero excavado, donde A representa el análisis mas conservador para el diseño y C el mas arriesgado que conlleva a una resistencia térmica menor en la estructura.

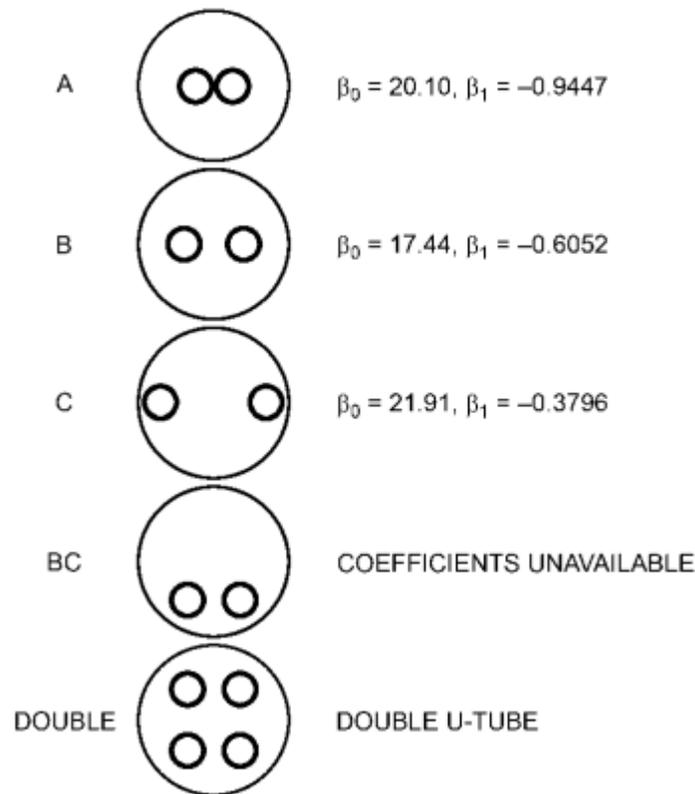


Ilustración 20. Configuraciones de intercambiadores verticales.

Para el cálculo de la resistencia térmica de la tubería enterrada sumaremos la resistencia de la tubería embebida más la mezcla que se utilizará para fijar la estructura.

$$R_b = R_p + R_{grt}$$

En la tabla 7 podremos observar las propiedades térmicas típicas de los diferentes tipos de suelos y las mezclas utilizadas para dar soporte a la tubería embebida. Históricamente se ha utilizado lechada de bentonita común para pozos de agua, sin embargo, recientemente se han obtenido mejores propiedades térmicas utilizando mezclas con suplementos como grafito o sílica.

Tabla 7. Propiedades térmicas del suelo y lechadas.

	Dry Density, kg/m ³	Conductivity,* W/(m·K)	Diffusivity, m ² /day
Soils			
Heavy clay, 15% water	1920	1.4 to 1.9	0.042 to 0.060
5% water	1920	1.0 to 1.4	0.047 to 0.060
Light clay, 15% water	1280	0.7 to 1.4	0.033 to 0.047
5% water	1280	0.5 to 0.9	0.033 to 0.056
Heavy sand, 15% water	1920	2.8 to 3.8	0.084 to 0.112
5% water	1920	2.1 to 3.3	0.093 to 1.200
Light sand, 15% water	1280	1.4 to 2.1	0.047 to 0.093
5% water	1280	0.9 to 1.9	0.056 to 0.121
Rocks			
Granite	2640	2.2 to 3.6	0.084 to 0.130
Limestone	2400 to 2800	2.4 to 3.8	0.084 to 0.130
Sandstone		2.1 to 3.5	0.065 to 0.112
Shale, wet	2560 to 2720	1.4 to 2.4	0.065 to 0.084
dry		1.4 to 2.1	0.056 to 0.074
Grouts/Backfills			
		Liquid Density, kg/m ³	Conductivity,* W/(m·K)
Bentonite (20 to 30% solids)		1106.1 to 1175.4	0.73 to 0.74
10-25% bentonite/20-50% SiO ₂ sand/ 35-55% mix water		1350.4 to 1618.8	0.99 to 1.64
8-12% bentonite/55-65% SiO ₂ sand/ 28-34% mix water		1724.2 to 1788.9	1.73 to 2.08
Low-density bentonite/graphite (plus additives)*		1198.3 to 1438.0	1.37 to 2.77
Neat cement (not recommended)		1246.2 to 1773.4	1.52 to 2.77
30% concrete/70% SiO ₂ sand (plus plasticizer)		1653.6 to 1917.2	0.69 to 0.78

*Intermediate densities and thermal conductivities can be obtained by mixing silica sand and graphite in different proportions. Contact grout manufacturer for additional information on thermal properties and density of various grout silica sand/graphite mixtures.

Dicha lechada se compone principalmente de tres partes:

1. Bentonita: provee las propiedades de sellado y mantiene suspendido el aditivo térmico para asegurar una transferencia térmica uniforme por toda la estructura.
2. Aditivos térmicos: incrementa significativamente la conductividad térmica de la mezcla, por ende, la capacidad de transferir calor al entorno.
3. Agua: el fabricante de indica la cantidad de agua necesaria para asegurar las propiedades descritas en la ficha técnica.

Retomando la ecuación de la resistencia térmica de la tubería enterrada, podemos decir que la resistencia térmica de la tubería embebida será la suma de

la parte convectiva entre el fluido y la tubería con la parte conductiva generada por las paredes de la tubería. Para un solo tubo-U, será así:

$$R_p = \frac{\frac{1}{\pi d_i h} + \frac{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2\pi k_p}}{2}$$

Donde:

R_p : Resistencia térmica de la tubería enterrada.

d_i : Diámetro interno de la tubería de HDPE.

d_o : Diámetro externo de la tubería de HDPE.

h : Coeficiente convectivo resultante entre el fluido y la tubería.

k_p : Conductividad térmica de la tubería de HDPE.

Para la resistencia térmica de la mezcla o lechada se utilizará la correlación usando el factor de forma desarrollada por Remund en 1999:

$$R_{grt} = [k_{grt} \beta_0 \left(\frac{d_b}{d_o}\right)^{\beta_1}]^{-1}$$

Donde:

R_{grt} : Resistencia térmica de la mezcla.

k_{grt} : Conductividad térmica de la mezcla.

β_0 : Coeficiente de corrección debido a configuración de los Tubos U en la instalación.

β_1 : Coeficiente de corrección debido a configuración de los Tubos U en la instalación.

d_b : Diámetro del agujero.

En la tabla 8 podemos observar los valores para la resistencia térmica de un tubo embebido con un tubo-U generados por computadora, atendiendo el diámetro de la tubería HDPE, la configuración del tubo-U (Ver ilustración 20: Configuraciones de intercambiadores verticales), diámetro del agujero cavado, número de Reynolds, y conductividad térmica de la mezcla para una conductividad térmica de la tubería HDPE igual a 0.42 W/mK.

Tabla 8. Resistencias térmicas de intercambiadores verticales.

Tube Diameter and Dimension	Tube Location	Bore Diameter, mm	Thermal Distance of Bore, (m·K)/W								
			Fluid Reynolds Number = 2000			Fluid Reynolds Number = 4000			Fluid Reynolds Number = 10 000		
			Grout Conductivity, W/(m·K)			Grout Conductivity, W/(m·K)			Grout Conductivity, W/(m·K)		
			0.70	1.40	2.10	0.70	1.40	2.10	0.70	1.40	2.10
25 mm DR 11 HDPE U-Tube	B	100	0.26	0.17	0.14	0.24	0.14	0.11	0.23	0.14	0.11
		125	0.29	0.18	0.15	0.26	0.16	0.12	0.26	0.11	0.12
	C	100	0.18	0.13	0.11	0.16	0.10	0.09	0.15	0.10	0.08
		125	0.19	0.13	0.11	0.17	0.11	0.09	0.16	0.10	0.08
Double	125	0.16	0.10	0.08	0.14	0.08	0.06	0.14	0.08	0.06	
32 mm DR 11 HDPE U-Tube	B	100	0.24	0.16	0.13	0.21	0.13	0.10	0.21	0.13	0.10
		125	0.26	0.17	0.14	0.23	0.14	0.11	0.23	0.14	0.11
		150	0.28	0.18	0.14	0.26	0.15	0.12	0.25	0.15	0.11
	C	100	0.17	0.12	0.11	0.15	0.10	0.08	0.14	0.09	0.08
		125	0.18	0.13	0.11	0.16	0.10	0.08	0.15	0.10	0.08
		150	0.19	0.13	0.11	0.17	0.11	0.09	0.16	0.10	0.08
Double	125	0.15	0.09	0.07	0.13	0.08	0.06	0.13	0.08	0.06	
		150	0.15	0.10	0.08	0.14	0.08	0.06	0.14	0.08	0.06
40 mm DR 11 HDPE U-Tube	B	125	0.24	0.16	0.13	0.22	0.13	0.11	0.21	0.13	0.10
		150	0.26	0.17	0.14	0.23	0.14	0.11	0.23	0.14	0.11
	C	125	0.17	0.12	0.11	0.15	0.10	0.09	0.14	0.09	0.08
		150	0.18	0.13	0.11	0.16	0.11	0.09	0.15	0.10	0.08
Double	150	0.14	0.09	0.07	0.13	0.08	0.06	0.13	0.08	0.06	

Para el cálculo de los pulsos aproximados para la resistencia térmica del suelo se hará evaluando diferentes tiempos (10 años, 1 mes y 4 horas) para el número adimensional de Fourier¹ (Fo), así:

$$Fo = \frac{4\alpha_g\tau}{d_b^2}$$

Donde:

α : difusividad térmica del suelo, m²/día

¹ El número de Fourier conceptualmente es la relación entre la velocidad de la conducción de calor y la velocidad del almacenamiento de energía.

τ : tiempo de operación en días.

d_b : diámetro del agujero, m.

Lo evaluaremos para:

$$\tau_1 = 3650 \quad \tau_2 = 3650 + 30 = 3680 \quad \tau_f = 3650 + 30 + 0,167 = 3680,167$$

Adecuando para obtener los valores requeridos:

$$Fo_f = \frac{4\alpha_g\tau_f}{d_b^2}$$

$$Fo_1 = \frac{4\alpha_g(\tau_f - \tau_1)}{d_b^2}$$

$$Fo_2 = \frac{4\alpha_g(\tau_f - \tau_2)}{d_b^2}$$

Calculando los valores para los números de Fourier, debemos obtener el G-factor sugerido por Philippe et al. (2010), a continuación, se presenta la tabla 9 donde serán interpolados los valores de dicho factor:

Tabla 9. G- factor según número de Fourier.

G	Fo
0.128	1
0.263	10
0.433	10 ²
0.614	10 ³
0.797	10 ⁴
0.978	10 ⁵
1.1595	10 ⁶

Con estos valores podremos calcular las resistencias térmicas equivalentes para los tres pulsos en los que la evaluaremos:

$$R_{ga} = (G_{Fof} - G_{F01})/k_g \quad R_{gm} = (G_{F01} - G_{F02})/k_g \quad R_{gst} = (G_{F02})/k_g$$

Respecto al cálculo de la transferencia de calor neta anual hacia la tierra, en etapa de diseño, se hará uso del concepto de horas equivalentes de carga completa (EFLHs: equivalente full-load hours) que es igual a la carga anual dividida entre la capacidad de la bomba de calor. Teniendo en cuenta esto, se puede calcular la tasa de transferencia de calos anual (q_a) multiplicando la capacidad máxima de la bomba de calor por el EFLH estimado correspondiente a la localización del recinto, todo esto dividido entre 8760 (horas en un año):

$$q_a = \frac{\text{capacidad} \left(\frac{COP + 1}{COP} \right) EFLH}{8760}$$

Para los siguientes cálculos se utilizará EFLH = 1660 horas sugeridas para oficinas con localizaciones cercanas al meridiano 90° con temperaturas cálidas.

Para las temperaturas necesarias para el cálculo final de la longitud necesaria del intercambiador se procederá así:

T_g : la temperatura de la profundidad del suelo deberá ser obtenida mediante mediciones en pozos cercanos al área donde se pretende instalar el intercambiador.

T_{wi} : la temperatura de entrada a la bomba de calor será un valor crítico para la efectividad del proceso de diseño. Elegir un valor cercano a la temperatura del suelo da como resultado una mayor eficiencia del sistema, pero hace que la longitud requerida de la bobina de tierra sea muy larga y, por lo tanto, excesivamente costosa. Elegir un valor lejos de T_g permite seleccionar un serpentín de tierra pequeño y económico, pero las bombas de calor del sistema tendrán una capacidad muy reducida y una mayor demanda eléctrica. En este caso deberemos seleccionar una temperatura entre 11 y 17 K mas alta que la

temperatura del suelo, así conservaremos una alta eficiencia en el sistema sin incurrir en un gasto excesivo por longitudes demasiado grandes para la tubería.

T_{wo} : la temperatura a la salida de la bomba de calor deberá ser obtenida adicionando el calor que absorberá dentro de la unidad y atendiendo el flujo de agua que estará intercambiando energía.

Siguiendo los pasos descritos obtendremos una longitud mínima equivalente con la que podremos continuar el proceso de diseño, teniendo en cuenta factores como el área de terreno disponible podremos incluir mayor cantidad de Tubos-U para reducir la profundidad de la excavación y repartir la longitud calculada. Como podemos observar, es necesario un estudio preliminar del área donde se instalará el intercambiador y previo cálculo de las cargas térmicas del recinto que climatizaremos para la selección de la unidad bomba de calor que se utilizará para obtener un diseño preliminar del intercambiador vertical necesario para incrementar la eficiencia del sistema.

2.3.3 Flujo de fluido y selección de bomba de circulación del intercambiador enterrado

Para la selección de la bomba de agua que permitirá su circulación debemos tomar en cuenta el flujo necesario para que el sistema funcione y se obtenga la mayor eficiencia sin incurrir en gastos excesivos, así debemos definir la velocidad necesaria que es necesaria para el cálculo para el número de Reynolds que necesitamos para el cálculo de la resistencia térmica del sistema enterrado. Además, es necesario no sobrepasar la presión que soporta la tubería utilizada para la construcción del intercambiador (Ver tabla 10).

Tabla 10. Presión interna máxima de tuberías para sistemas GSHP.

HDPE at 23°C	kPa (m of water)	
	DR-11	DR-9
3408/3608	1103 (112.5)	1379 (140.6)
4710	1379 (140.6)	1724 (175.8)

Source: PPI (2018).

En este caso, nos saltaremos los cálculos subyacentes a esta parte y nos apegaremos a las recomendaciones de diseño que brinda el ASHRAE handbook – Applications para la selección de sistema de bombeo que se observa en la tabla 11:

Tabla 11. Recomendaciones de sistemas de bombeo y arreglos para intercambiadores GSHP para aplicaciones residenciales.

Coil Type*	Nominal Heat Pump Capacity, kW				
	7	10.5	14	17.5	21
	Required Flow Rate, L/s				
	0.3 to 0.4	0.5 to 0.6	0.6 to 0.8	0.8 to 0.9	0.9 to 1.1
Coil Type*	Number of Parallel Loops				
Spiral (10 pt.)	3 to 4	4 to 6	6 to 9	8 to 10	8 to 10
6-Pipe	3 to 4	4 to 6	6 to 9	8 to 10	8 to 10
4-Pipe	2 to 3	4 to 6	5 to 8	6 to 9	6 to 10
2-Pipe	2 to 4	3 to 5	4 to 6	5 to 8	6 to 10
Vertical 19 mm pipe	2 to 3	3 to 5	4 to 6	5 to 8	6 to 10
25 mm pipe	2 to 3	2 to 4	3 to 5	4 to 6	4 to 6
32 mm pipe	1 to 2	1 to 2	2 to 3	2 to 3	2 to 4
Trench Length	Header Diameter (HDPE Pipe), mm				
Less than 30 m	32	32	38	38 to 51	38 to 51
30 to 60 m	32	38	38	51	51
	Size (No.) of Pumps Required				
	0.06 kW	0.12 kW	0.06 kW	0.12 kW	0.12 kW
	(1)	(1)	(2)	(2)	(2)

Source: Kavanaugh and Calvert (1995).

*Based on DR11 HDPE pipe.

Como podemos observar es necesario conocer todo el diseño preliminar según cálculos expuestos en el apartado anterior para seleccionar un sistema de

bombeo capaz de suministrar la energía necesaria para mantener la eficiencia requerida en el sistema sin incurrir en gastos excesivos.

2.4 Huella de carbono aplicado a un sistema de climatización de bomba de calor inversa.

En primer lugar, es importante definir el análisis de la huella de carbono. El análisis de la huella de carbono es la medición de los procesos emisores de GEI (gases de efecto invernadero), sus orígenes y su composición y cantidades.

2.4.1 Conceptos generales

Se utiliza el CO₂ como gas representativo porque es el GEI predominante emitido por las acciones de los seres humanos. Sin embargo, otras emisiones de gases de efecto invernadero, incluidos el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), también tienen contribuciones significativas al calentamiento global. Para tener una unidad para informar los resultados, las emisiones de estos otros gases se normalizan a la masa de CO₂ y los resultados de la huella de carbono se informan como masa de CO₂ equivalente (CO₂e) (por ejemplo, kg de CO₂e o toneladas métricas de CO₂e).

Se entiende como huella de carbono "la totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto". El análisis de huella de carbono proporciona como resultado un dato que puede ser utilizado como indicador ambiental global de la actividad que desarrolla la organización. La huella de carbono se configura, así como punto de referencia básico para el inicio de actuaciones de reducción de consumo de

energía y para la utilización de recursos y materiales con mejor comportamiento medioambiental.

El modelo de este tipo de medición se basa en la frase "Si no puede medirlo, no puede administrarlo". El propósito del modelo es cuantificar la energía y las emisiones de GEI y lograr los siguientes objetivos:

- Identificar fuentes importantes de emisiones y priorizar áreas de reducción de emisiones y aumento de la eficiencia, además, contribuyen a identificar oportunidades de ahorro de costes en las organizaciones.
- Comenzar a adaptarse a un mundo poscarbono reduciendo los GEI y la dependencia de la organización de la energía y los combustibles fósiles, es decir, contribuyen la reducción de emisiones de CO₂ en productos y organizaciones en el marco de la mitigación del cambio climático.
- Incrementar la competitividad empresarial mediante la reducción de los costes energéticos y el uso optimizado de materias primas.
- Mejorar la imagen corporativa a medida que las empresas se vuelven más ecológicas. contribuyen a la demostración ante terceros de los compromisos de la organización con la responsabilidad social a través de sus requisitos en mitigación del cambio climático.
- Contribuyen a la creación de un mercado de productos y servicios de bajo carbono que da respuesta a la demanda social actual.

2.4.2 Tipos de huella de carbono

- Huella de carbono de una organización.

Mide la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto provenientes del desarrollo de la actividad de dicha organización.

Existen países en donde a la industria se le aplica un impuesto al carbono, tal es el caso de México y Chile, en donde las empresas están obligadas a realizar reportes periódicos de sus emisiones evaluados conforme a las normas GHG Protocol e ISO 14064, algunas entidades usan la IPCC 2006 GHG Workbook, a fin de reducir a lo mínimo posible los efectos negativos sobre el ambiente.

- Huella de carbono de producto.

Esta medición se realiza para que las empresas conozcan las emisiones que se generan tanto en el proceso de fabricación de su producto o servicio, como con su uso, de manera que puedan implementar o erradicar prácticas, según sea el caso, para reducir sus niveles de emisiones de carbono al ambiente.

Mide los GEI emitidos durante todo el ciclo de vida de un producto: desde la extracción de las materias primas, pasando por el procesado y fabricación y distribución, hasta la etapa de uso y final de la vida útil (depósito, reutilización o reciclado).

La medición también sirve para colocar en la etiqueta del artículo información que ayude al consumidor a decidir entre adquirir un producto de alta o de baja emisión.

Este tipo de huella debe medirse durante toda la vida útil del artículo que se está analizando y se realiza bajo las normas: PAS2050, ISO 14067

- Huella de carbono personal

Cuando se calcula la huella de carbono de una persona, se toman en cuenta todos los aspectos de su vida cotidiana, tales como consumos relacionados con:

- Energía: relacionados con el uso de combustibles y electricidad.
- Transporte: tanto desplazos diarios como viajes de ocio y trabajo
- Alimentación: tomando en cuenta cantidades y tipos de productos.
- Consumo: Uso de muebles ropa, aparatos tecnológicos, entre otros
- Recreación: Gastos relacionados con entretenimiento, educación y cultura

Es de mencionar que aún no existe normativa para evaluar la huella de carbono personal, sin embargo, existen calculadoras para realizar esta tarea.

2.4.3 Metodología para cálculo de huella de carbono

Para el cálculo de la huella de carbono se puede establecer un plan básico para realizar el cálculo de GEI. Estos, y otros métodos, presentan estructuras básicas comunes, y es sobre esta base donde se plantea un método de cálculo. Para poder realizar los cálculos de la huella de carbono se han de realizar una serie de pasos básicos que se detallan a continuación:

- 1) Definir periodo.

Seleccionar un año como periodo de medición, el cálculo final debe contener la suma total de los consumos que se hicieron por la organización ese año.

2) Identificar fuentes de emisiones

Identificar fuentes de emisiones de carbono directas e indirectas dentro de la organización, generalmente las empresas que emiten mayor cantidad de emisiones directas son las del sector primario y secundario, las del sector terciarios podrían tener o no emisiones directas, pero la mayoría de sus actividades generan emisiones indirectas por el uso de electricidad

Una vez que se han detectado las fuentes, clasificar en:

- Combustión fija: si proviene de calderas, hornos, quemadores, turbinas, calentadores, incineradores, motores o cualquier otro tipo de fuente fija.
- Combustión móvil: si provienen de automóviles, camiones, autobuses, aviones, trenes o cualquier tipo de embarcación.
- Emisiones de procesos: cuando son productos de procesos de calcinación, petroquímicos o fundición
- Emisiones fugitivas: si son liberadas durante fugas, sellos, empaques, juntas de equipos, pilas de carbono, tratamiento de aguas residuales, torres de enfriamiento, plantas de procesamientos de gas, entre otros.

3) Selecciona un método de cálculo

Existen diversos métodos para realizar el cálculo de emisiones, algunos son:

- Monitorear el flujo y concentración de las emisiones
- Medir las reacciones químicas durante los procesos
- Calcular los factores de emisión con el uso de información documentada.

Seleccionar el que sea más accesible para la empresa y registrar los consumos de las fuentes que se detectaron en el paso 1.

4) Recolectar los datos de las actividades

De acuerdo con los recursos y alcances de la empresa, implementar un sistema para obtener todos los datos de consumo del punto 2 ya sea en una base de datos, en hojas de cálculo o reportes en papel.

5) Calcular

Al tener los datos de consumo de las fuentes, los cálculos de emisiones se pueden realizar de dos formas:

- Centralizada: los departamentos, áreas o elementos que conformen la organización envían sus datos a un responsable encargado de realizar los cálculos de todas las áreas.
- Descentralizada: se establecen los criterios y parámetros para realizar los cálculos y se envían a cada área para que cada una realice los suyos.

Se debe consultar los factores de emisión utilizados en el país ya que estos son utilizados en el cálculo para obtener la huella de carbono de acuerdo a las ecuaciones siguientes:

$$\textit{Emisiones Directas} \times \textit{Factor de Emision} = \textit{Total de Emisiones Directas}$$

$$\textit{Emisiones Indirectas} \times \textit{Factor de Emision} = \textit{Total de Emisiones Indirectas}$$

$$\textit{Total de Emisiones Directas} + \textit{Total de Emisiones Indirectas} = \textit{HUELLA DE CARBONO}$$

Existen tres parámetros de mediciones para el cálculo de huella de carbono de una organización, los cuales varían en la complejidad y alcance de la precisión en la estimación de las emisiones.

Alcance 1: Fuentes directas

Se miden y reportan las emisiones derivadas de las actividades sobre las que la empresa tiene control directo.

- Generación de electricidad, calor o vapor por medio de fuentes fijas como calderas, hornos, turbinas, etc
- La manufactura o procesamiento de materiales y químicos como cemento, aluminio, amoniaco o residuos.
- Quema de combustibles en vehículos propiedad de la empresa para transporte de materiales, productos o residuos.
Fugas, sellos de empaques para equipos, emisiones de metano, aire acondicionado, refrigeración, etc.
- Venta o transferencia de electricidad generada por la empresa.

Alcance 2: Fuentes indirectas asociadas a la electricidad

Se miden las emisiones provenientes de la generación de electricidad consumida por la empresa durante sus operaciones. En esta medición se toma en cuenta la luz que utilizan los equipos del establecimiento y del personal.

Alcance 3: Otras emisiones indirectas

En este reporte se incluyen todas las emisiones consecuencia de las actividades de la empresa sobre las que no tiene control total ya que provienen de franquicias

o actividades realizadas por empresas subcontratadas y que no se contabilizaron en el alcance 1 y 2, éstas se relacionan con:

- Extracción y producción de materiales y combustibles adquiridos.
- Estimación de las emisiones del uso que hacen los clientes de los productos y servicios vendidos por la empresa.
- Actividades relacionadas al transporte de materiales y bienes adquiridos, combustibles adquiridos, empleados (por cuestiones de trabajo), productos vendidos y residuos.
- Electricidad (no incluidas en el alcance 2). Por ejemplo, una empresa que renta plantas eléctricas deberá reportar la cantidad de combustible que se utilizó en las máquinas, así como las emisiones resultado de la electricidad generada.
- Disposición de residuos finales, incluyendo los generados en las actividades y el destino final de sus productos al final de su vida útil.

Un reporte de organización debe contener como mínimo la contabilización de emisiones de alcance 1 y 2. Si la organización desea realizar un análisis más real de los resultados de sus actividades en materia ambiental, deberá realizar una medición de alcance 3.

En el caso práctico de esta tesis, solamente se van a abordar emisiones de gases de efecto invernadero de alcance 2 ya que el periodo de tiempo abordado será de un día y dicho estudio será realizado a un equipo en funcionamiento.

Para calcular la huella de carbono del sistema de climatización propuesto se hará la sumatoria de la demanda eléctrica y se hará la comparativa con la demanda eléctrica de un sistema alternativo; cabe recordar que para obtener la huella de carbono se tendrá que multiplicar dicho consumo por el factor de emisión de

kgCO₂eq/kWh para El Salvador. El factor de emisión de gases de efecto invernadero para el salvador es 0.68 kgCO₂eq/kWh, dato obtenido del *“Informe bienal de actualización El Salvador 2018”*.

2.5 Tratamiento de agua para climatizador de bomba de calor inversa.

Este capítulo cubre los fundamentos del tratamiento y acondicionamiento del agua. Brinda orientación sobre el tratamiento del agua y los fluidos a base de agua que se utilizan en los sistemas de climatización. El tratamiento adecuado mejora el rendimiento y la eficiencia energética de estos sistemas al mismo tiempo que ayuda a proteger la salud y la seguridad de las personas. El tratamiento del agua prolonga la vida útil de los equipos tanto en sistemas de circuito abierto como cerrado. Todos estos beneficios ayudan a promover un entorno más saludable y sostenible.

2.5.1 Características del agua

El agua tiene propiedades únicas que la hacen ideal para los procesos de calefacción, refrigeración y generación de vapor; en nuestro caso será el estudio para un sistema de climatización basado en una bomba de calor inversa. El agua es la única sustancia común que existe en los tres estados de la materia (sólido [hielo], líquido [agua] y gas [vapor]) a las temperaturas terrestres normales. El agua absorbe más calor para un aumento de temperatura dado que cualquier otra sustancia inorgánica común. El agua se expande 1600 veces a medida que se evapora para formar vapor de agua y vapor a presión atmosférica. El vapor puede transportar grandes cantidades de calor. Tales cualidades posicionan al

agua como el material ideal para los procesos de calefacción, refrigeración y generación de energía.

Los suministros de agua contienen cantidades variables de impurezas que pueden provocar la formación de incrustaciones, corrosión y otros problemas en los equipos industriales. A partir de la lluvia, el agua acumula impurezas de su entorno, disolviendo minerales y recogiendo diversas sustancias del aire, suelo, vegetación y otros materiales. Por esta razón, el agua a menudo se conoce como el solvente universal. La lluvia que cae disuelve el dióxido de carbono y el oxígeno de la atmósfera. A medida que el dióxido de carbono se descompone en el agua, forma ácido carbónico (H_2CO_3). Cuando el ácido carbónico entra en contacto con el suelo o los estratos rocosos que contienen caliza (CaCO_3), disuelve lentamente el calcio para formar bicarbonato de calcio altamente soluble. Este proceso ocurre en suelos o estratos rocosos donde las temperaturas son relativamente frescas (menos de 21°C). Desafortunadamente, el bicarbonato no se mantiene estable cuando el agua se calienta, y la disolución de la piedra caliza se puede revertir rápidamente para reformar el carbonato de calcio cuando se calienta el agua dura. El carbonato de calcio que se reforma en el agua que se usa en aplicaciones de calefacción o aire acondicionado puede eventualmente convertirse en incrustaciones, lo que puede aumentar los costos de energía, el tiempo de mantenimiento y las paradas de los equipos, y eventualmente puede conducir a la necesidad de reemplazar los equipos.

La composición del agua puede cambiar a medida que se transporta por tuberías, se calienta para producir vapor o se evapora para enfriarla u otros procesos de intercambio de calor. Las impurezas en el agua pueden alcanzar un límite de solubilidad y depositarse en el camino, o las impurezas en el agua pueden actuar

para corroer el equipo metálico que la contiene. Las acciones del agua en los sistemas HVAC dependen del tipo de impurezas y de las temperaturas y presiones a las que está sometida, entre otros factores.

Las siguientes definiciones presentan los términos, propiedades o características químicas y físicas más relevantes del agua relevantes para el tratamiento del agua y que afectan su uso en HVAC y otras aplicaciones.

Partes por millón (ppm)

Es una relación adimensional, utilizada en el tratamiento del agua para expresar la concentración (p. ej., un gramo en un millón de gramos, un ml por L). Los minerales disueltos y las impurezas que se encuentran comúnmente en el agua están presentes en concentraciones muy bajas (por ejemplo, miligramos en un vaso lleno de agua). La razón más conveniente para expresar la concentración es entonces miligramos por millón de miligramos, o miligramos por litro (L), de agua (la masa de un litro de agua equivale casi a 1.000.000 de miligramos). En el tratamiento del agua, la concentración de ppm casi siempre se expresa en mg/L.

Dureza

Se refiere a la cantidad de calcio y magnesio (normalmente expresada en ppm como CaCO_3) en el agua. Es un término histórico que se refiere al potencial de formación de incrustaciones duras de carbonato de calcio y magnesio, como las que se encuentran en calderas y sistemas de agua de refrigeración tratados incorrectamente. El agua más dura contribuye a la formación de incrustaciones

porque el calentamiento fomenta la deposición de carbonato de calcio o incrustaciones de cal. La solubilidad de la mayoría de las sales de calcio y magnesio disminuye con el aumento de la temperatura, por lo que estas sales tienden a formar incrustaciones en las superficies de transferencia de calor donde la temperatura de la piel del metal es mayor que la temperatura del agua a granel. Los programas de tratamiento de agua de calderas y de refrigeración están diseñados para controlar la deposición de sales de dureza a través de la eliminación de la dureza mediante pretratamiento (p. ej., ablandamiento del agua por intercambio iónico) o acondicionamiento de aditivos químicos internos para solubilizar, eliminar o controlar de otro modo la deposición.

Alcalinidad

Es una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos y bases fuertes, definida en un procedimiento específico de análisis de agua. Este procedimiento utiliza una cantidad medible de una solución ácida diluida de concentración conocida para cambiar el color de dos indicadores específicos, fenolftaleína y naranja de metilo. La alcalinidad son los minerales de carbonato y bicarbonato medidos (calculados como carbonato de calcio $[\text{CaCO}_3]$) y se refiere a los minerales alcalinotérreos primarios. La alcalinidad también incluye el ion hidróxido (OH^-), cuando está presente. Todas las aguas naturales contienen algo de alcalinidad. La presencia de alcalinidad contribuye a la formación de incrustaciones, ya que puede aportar iones de carbonato, lo que impulsa la formación de carbonato de calcio. En aguas naturales, la alcalinidad casi siempre consiste en bicarbonato, aunque también puede estar presente algo de

alcalinidad de carbonato. Borato, hidróxido, fosfato y otros constituyentes, si están presentes, se incluyen en la medición de alcalinidad en aguas tratadas.

La alcalinidad se mide utilizando dos indicadores de punto final diferentes. La alcalinidad de la fenolftaleína (alcalinidad P) mide el álcali fuerte presente, incluidos el carbonato y el hidróxido, y la alcalinidad del naranja de metilo (alcalinidad M), o alcalinidad total, mide la alcalinidad total del agua. Tenga en cuenta que la alcalinidad total incluye la alcalinidad de fenolftaleína. Para la mayoría de las aguas naturales, la cantidad real de las especies químicas presentes se pueden estimar después de realizar dos pruebas específicas de alcalinidad. Las aguas tratadas también pueden incluir la alcalinidad del hidróxido aportada por OH^- .

pH

Es una medida de la concentración de iones de hidrógeno (la fuerza del ácido) de una solución. Matemáticamente, se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno (pH de 1 es muy ácido; pH de 14 es muy básico; un pH de 7 es neutro a temperatura ambiente). El concepto de pH es fundamental para comprender el agua. química y al control de sistemas de pretratamiento, calderas y torres de enfriamiento. Todos los sistemas de agua dependen del control del pH o del mantenimiento del pH por encima de un nivel mínimo especificado. Los cambios inesperados en el pH (~1,0 a 1,5 de aumento o disminución del pH) suelen ser una advertencia de problemas que deben corregirse.

Cloruros

Son el total de componentes de cloruro disueltos de sales tales como cloruro de sodio, cloruro de potasio, cloruro de calcio, cloruro de magnesio, etc. El cloruro de sodio y el cloruro de calcio (CaCl_2) son las sales de cloruro más comunes que se encuentran en el agua. Los cloruros normalmente no contribuyen a la formación de incrustaciones, porque son muy solubles. Sin embargo, los cloruros son corrosivos y pueden serlo en exceso cuando están presentes en altas concentraciones, como en el agua de mar, debido a su capacidad para reaccionar y debilitar las películas de óxido protectoras naturales presentes en la mayoría de los metales. La determinación de la concentración de cloruros en agua es una herramienta de medición útil en sistemas evaporativos para determinar ciclos de concentración. La concentración de la mayoría de los componentes del agua cambia cuando se agregan productos químicos de tratamiento comunes o debido a cambios químicos que tienen lugar durante el funcionamiento normal. Los cloruros no se ven afectados por tales cambios, por lo que, con pocas excepciones, solo la evaporación afecta la concentración de cloruro. Por lo tanto, la proporción de cloruros en una muestra de agua de un sistema operativo a los del agua de reposición proporciona una medida de cuánto se ha concentrado el agua. (Nota: los niveles de cloruro cambiarán si el sistema se trata con productos químicos que liberan cloruro).

Conductividad o conductancia específica

Mide la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica y actuar como electrolito. La conductividad aumenta con un aumento en el total de sólidos

disueltos (iones) presentes en el agua. La conductancia específica se puede utilizar para estimar los sólidos disueltos totales.

Sólidos disueltos

Consisten en sales, incluida la dureza del agua, y otros materiales que se combinan con el agua como una solución. Pueden afectar la formación de corrosión e incrustaciones. Los sólidos disueltos totales se denominan TDS. El contenido de sólidos disueltos se determina más comúnmente de manera instrumental en función de la conductividad eléctrica del agua o el peso del residuo después de que el agua se evapora por completo.

Sólidos suspendidos

Incluyen sólidos orgánicos e inorgánicos suspendidos en el agua (particularmente agua no purificada de fuentes superficiales o aquellas que han estado circulando en equipos abiertos). La materia orgánica en los suministros superficiales puede ser coloidal (homogéneamente suspendida). Los compuestos naturales como la lignina y los taninos suelen ser coloidales. A altas velocidades, las partículas suspendidas duras pueden desgastar el equipo. La materia suspendida sedimentada de todo tipo puede contribuir a la corrosión, ya que fomenta la microbiología corrosiva. Los sólidos suspendidos totales se conocen como TSS y no deben incluir TDS.

Sílice

Es arena disuelta o roca que contiene sílice (como el cuarzo) a través de la cual fluye el agua. La sílice es la causa de las incrustaciones muy duras y tenaces que se pueden formar en los sistemas de transferencia de calor. Estos depósitos pueden ser particularmente difíciles de eliminar si se permite que se concentren. Afortunadamente, la deposición de silicato es menos común que otros depósitos.

Hierro soluble en agua

Puede originarse a partir de la corrosión del metal en los sistemas de agua o como un contaminante en el suministro de agua de reposición. El hierro puede formar depósitos termoaislantes por precipitación como hidróxido de hierro o fosfato de hierro en presencia de tratamiento de agua a base de fosfato o fosfato en el agua de reposición.

Sulfatos

Son las sales de sulfato disueltas de sodio, potasio, calcio y magnesio en el agua. Su presencia es producto de la disolución de rocas sulfatadas, como el yeso. Las incrustaciones de sulfato de calcio y magnesio son muy duras y difíciles de eliminar e interfieren en gran medida con la transferencia de calor. Los sulfatos también contribuyen a la formación de incrustaciones en aguas con alto contenido de calcio. La incrustación de sulfato de calcio, sin embargo, se forma en concentraciones mucho más altas que la incrustación de carbonato de calcio más común. Los sulfatos altos también contribuyen a una mayor corrosión debido a su alta conductividad y soporte de corrosión influenciada microbiológicamente (MIC).

Turbiedad

Es la cantidad de opacidad causada por la materia suspendida y a menudo se describe como turbidez o turbidez en el agua. No debe confundirse con el color. El agua puede ser de color oscuro, pero todavía clara y no turbia. La turbidez es causada por materia suspendida, en un estado finamente dividido, que puede dispersar y desviar la luz entrante. La arcilla, el limo, la materia orgánica, los organismos microscópicos y materiales similares son causas comunes de turbidez. Aunque la materia en suspensión y la turbidez están estrechamente relacionadas, no son sinónimos. La materia suspendida es la cantidad de material insoluble en agua que se puede eliminar por filtración. Los niveles de materia suspendida y turbidez probablemente cambiarán según la dinámica del flujo de agua o la falta de flujo. La turbidez del agua utilizada en los sistemas HVAC debe ser lo más baja posible, en particular para el agua de alimentación de calderas de vapor. La turbidez puede concentrarse en la caldera y asentarse como lodo o lodo. También puede causar una mayor purga de la caldera, taponamiento, sobrecalentamiento, cebado y formación de espuma.

Materia biológica

Tales como bacterias, algas y hongos pueden estar presentes en el agua, y su crecimiento en los sistemas de agua puede causar problemas de operación, mantenimiento y salud. Se debe suponer que el crecimiento microbiano ocurre en la mayoría de los sistemas de agua por debajo de los 65°C. Los problemas causados por materiales biológicos van desde el crecimiento de algas verdes en torres de enfriamiento hasta formaciones de limo bacteriano. Este crecimiento

puede obstruir el equipo, reducir drásticamente la eficiencia del intercambiador de calor (transferencia) y causar corrosión microbiana.

Índice de tiempo de espera (HTI)

Se define como el tiempo necesario para cambiar completamente el volumen de un sistema mediante purga. Se calculó dividiendo el volumen del sistema por la tasa de purga o purga del sistema. HTI refleja la cantidad de envejecimiento dentro de un sistema.

Dispersante

Es un término utilizado para expresar la capacidad de un aditivo para ayudar a suspender partículas muy pequeñas, de modo que no se aglomeren, asienten o adhieran fácilmente a las superficies. Los dispersantes suelen ser compuestos en forma de cadena (polímeros) que pueden adherirse y absorber partículas muy pequeñas. Los polímeros dispersivos están diseñados para incluir un área de carga eléctrica negativa para impartir actividad repulsiva entre las partículas envueltas en polímero.

2.5.2 Tratamiento de aguas

CONTROLES

Depósitos.

Se pueden formar varios tipos diferentes de depósitos en las calderas y los sistemas de agua de refrigeración, y términos tales como incrustaciones, incrustaciones, depósitos, películas, revestimientos, precipitados y otros se usan

indistintamente en la industria para describir estos materiales. Sin embargo, es importante utilizar el término correcto al describir estos fenómenos, porque los procedimientos operativos y los tratamientos químicos utilizados para ayudar a prevenir la formación de estos diversos depósitos y eliminarlos cuando sea necesario, dependen de la composición específica de los depósitos.

Depositar

se refiere a cualquier material formado en las superficies internas o externas de los componentes en contacto con el agua.

Abordaje

Describe la condición de un sistema en el que se han formado depósitos, incluido el ensuciamiento microbiológico. El ensuciamiento microbiológico es limo o biopelícula que se acumula mediante la incorporación de partículas inorgánicas, como carbonato de calcio, sílice y productos de corrosión.

Incrustaciones

Se forma a partir de minerales, anteriormente disueltos en agua, depositados del agua sobre superficies o tuberías de transferencia de calor. A medida que el agua se evapora en una torre de enfriamiento, la concentración de sólidos disueltos aumenta y se puede exceder la solubilidad de determinadas sales minerales que causan incrustaciones. Cuando esta situación ocurre en un sistema de agua de enfriamiento sin tratar, se formarán incrustaciones en cualquier superficie en contacto con el agua, especialmente en las superficies de transferencia de calor. Los minerales incrustantes más comunes son (1) carbonato de calcio, (2) fosfato de calcio, (3) sulfato de calcio y (4) sílice, generalmente en ese orden. La

formación de incrustaciones de silicato de magnesio también es posible bajo ciertas condiciones. La mayoría de las sales, incluida la sílice, son más solubles en agua caliente que en agua fría; sin embargo, la mayoría de las sales de calcio y magnesio, incluidos el fosfato de calcio y el carbonato de calcio, son más solubles en agua fría. Esto se llama solubilidad inversa. A medida que el agua recirculante pasa por el sistema de enfriamiento, la temperatura del agua aumenta. Como resultado, se pueden formar incrustaciones de calcio y magnesio en cualquier parte del sistema, pero lo más probable es que se produzcan en superficies calentadas, como intercambiadores de calor o condensadores de superficie. La sílice se forma en áreas que tienen la temperatura del agua más baja, como en el relleno de la torre de enfriamiento. Los minerales como el calcio y el magnesio son relativamente insolubles en agua y pueden formar depósitos de incrustaciones cuando se exponen a las condiciones que se encuentran comúnmente en los sistemas de agua de refrigeración. Una capa de incrustaciones tan delgada como 0,40 mm puede reducir la capacidad del intercambiador de calor en un 15 %.

Varios factores clave influyen en la formación de escamas:

- Temperatura
- pH
- Alcalinidad
- Dureza (cantidad de sales que forman incrustaciones)
- Sólidos disueltos totales (influencia de otros materiales disueltos, que pueden o no formar escamas)

A medida que cambia cualquiera de estos factores, también lo hacen las tendencias de escala. Los cambios en el pH o la alcalinidad pueden afectar en

gran medida la formación de incrustaciones. Por ejemplo, a medida que aumenta el pH o la alcalinidad, el carbonato de calcio se vuelve menos soluble y se deposita en las superficies.

Algunos materiales, como la sílice (SiO_2), son menos solubles a alcalinidades más bajas. Cuando la cantidad de material formador de incrustaciones disuelto en agua excede su punto de saturación, pueden producirse incrustaciones. Además, otros sólidos disueltos pueden influir en las tendencias de formación de incrustaciones. En general, un nivel más alto de sólidos disueltos que forman incrustaciones da como resultado una mayor probabilidad de formación de incrustaciones.

Control de depósitos, incrustaciones y sólidos suspendidos

Ya sea que se trate de una caldera o una torre de enfriamiento, la estrategia de tratamiento está dictada por las propiedades químicas de composición y el "estrés" y las restricciones operativas impuestas al agua. El tratamiento de una torre de enfriamiento tipo HVAC alimentada con agua de reposición de dureza relativamente baja suele ser bastante diferente al de una torre de enfriamiento de proceso industrial alimentada con agua de reposición de alta dureza. En algunos casos, la conservación de los recursos hídricos locales o las regulaciones de descarga pueden afectar drásticamente la estrategia de tratamiento utilizada.

Para aplicaciones en calentamiento o producción de vapor:

- Acondicionamiento del agua de reposición:
 - Intercambio de iones (ablandamiento) para eliminar el calcio y el magnesio.

- Ósmosis inversa (RO) para eliminar casi todos los sólidos disueltos, incluidos el calcio y el magnesio.
- Desionización (DI) para eliminar todos los sólidos disueltos.
- Desaireador para ayudar a controlar las especies de carbonato y el pH.
- Tratamiento químico directo del agua de caldera:
 - Se pueden agregar varios aditivos químicos como hidróxido de sodio, carbonato de sodio, fosfatos, agentes dispersivos, etc. para “ablandar” el agua de la caldera, pero esta práctica se considera obsoleta y se favorece el acondicionamiento del agua de reposición. Los aditivos químicos generalmente se usan para tratar la dureza de bajo nivel que no se elimina con el acondicionamiento del maquillaje o debido a la contaminación externa.
- Mantenga una buena protección interna de la caldera y del condensado de vapor contra la corrosión para controlar la deposición de hierro en las superficies internas de la caldera.

Para aplicaciones de enfriamiento:

- Acondicionamiento del agua de reposición:
 - Intercambio de iones (ablandamiento) para eliminar el calcio y el magnesio.
 - Intercambio iónico para eliminar la alcalinidad utilizando resina de intercambio catiónico débil seguido de desgasificación.
 - Ósmosis inversa (RO) para eliminar casi todos los sólidos disueltos, incluidos el calcio y el magnesio.

- Desionización (DI) para eliminar prácticamente todos los sólidos disueltos.
- Agregue ácido al agua de la torre de enfriamiento para eliminar la alcalinidad y controlar la formación de iones de carbonato
- Agregue inhibidores de incrustaciones y dispersivos para reducir drásticamente la tasa de nucleación y aglomeración de partículas.

Índices de incrustaciones

Para ayudar a determinar la tendencia del agua a formar o disolver incrustaciones de carbonato de calcio, se han desarrollado varios índices de incrustaciones. Estos índices son solo para predecir la escala de carbonato de calcio, no la escala de otros compuestos de calcio (como el sulfato de calcio). Los índices se calculan utilizando el pH, la alcalinidad, la dureza del calcio, la temperatura y los sólidos disueltos totales del agua.

Índice de saturación de Langelier (LSI).

Este índice fue desarrollado para calcular las tendencias de formación y disolución de incrustaciones de carbonato de calcio del agua potable (potable) a temperatura ambiente o cerca de ella (Langelier 1936). Usando las mediciones de dureza de calcio, alcalinidad total y sólidos disueltos totales del agua, junto con los valores de pH y temperatura del agua, se calcula el pH de saturación. Restar el(los) pH(s) del agua de su pH real da como resultado el LSI. Si el pH medido del agua (pH [real]) es mayor que su(s) pH(es) (es decir, valor LSI positivo), el agua tiene una tendencia a la formación de incrustaciones. Si el pH del agua (real) es menor que su(s) pH(s) (es decir, valor LSI negativo), el agua

tendrá una tendencia a disolver las incrustaciones. El equilibrio del agua o valor neutral está en un LSI de cero. Debido a que este índice se diseñó originalmente para predecir las incrustaciones de carbonato de calcio en el agua potable, existen serias deficiencias en la precisión de este índice cuando se aplica al agua de refrigeración por evaporación, al agua de calefacción o al agua potable caliente.

El componente de temperatura en el cálculo de LSI se considera apropiado para el agua que se transporta a la temperatura ambiente del suelo a través de tuberías de distribución enterradas. Sin embargo, esto luego se consideró insuficiente para el agua de proceso utilizada para torres de enfriamiento o calderas, donde los valores tendían casi siempre a ser positivos, pero no había indicios de deposición de carbonato de calcio. La experiencia demuestra que el LSI se puede utilizar como un valor de tendencia en los sistemas de agua de proceso para indicar cambios en la estabilidad, en lugar de una condición absoluta.

Control de formación de incrustaciones y depósitos

Los métodos utilizados para controlar la formación de incrustaciones y depósitos incluyen los siguientes:

- Limite la concentración de minerales que forman incrustaciones, impurezas y contaminantes en una caldera de vapor o en un sistema de agua de enfriamiento por evaporación desperdiciando (eliminando) agua del sistema intencionalmente mediante purga (purga). Esto, en efecto, reduce la concentración que tiende a aumentar durante la continua evaporación de vapor

o agua de enfriamiento de estos sistemas. Por lo tanto, el control de escala se logra a través de la operación del sistema en condiciones de subsaturación.

- Elimine los minerales que forman incrustaciones, las impurezas y los contaminantes antes de que ingresen a la caldera o al sistema de agua de enfriamiento, utilizando sistemas externos o de pretratamiento. Esto se puede hacer usando (1) agua ablandada, mezclando agua ablandada o agua RO con otra agua de reposición para lograr el índice de saturación deseado, (2) ciclos de concentración o (3) ambos métodos.

- Realice cambios mecánicos en el sistema, como aumentar el flujo de agua o las áreas de superficie de los intercambiadores de calor, para reducir las tendencias y el potencial de formación de incrustaciones/depósitos.

- Alimente con ácido para reducir la alcalinidad y mantener en solución los minerales comunes que forman incrustaciones, como el carbonato de calcio.

- Implementar un programa de tratamiento de agua diseñado para controlar la formación de incrustaciones y depósitos en la caldera o en el sistema de agua de refrigeración.

Tiempo de retención.

El control de los ciclos de concentración también controla el tiempo que los minerales, así como los productos químicos de tratamiento y otros componentes del agua, se mantienen dentro de un sistema. Los sistemas de agua de refrigeración por evaporación tienen un tiempo de residencia o rotación del agua que depende de la carga y el volumen, denominado índice de tiempo de retención (HTI), también llamado tiempo de retención del sistema. HTI es la medida del

tiempo que tarda un analito en el sistema de agua de refrigeración en disminuir al 50 % de su valor original a través del proceso de pérdidas del sistema (purga y deriva) más la adición de agua de reposición al sistema. Cuanto mayor sea el HTI del sistema, más agua se retendrá en el sistema y mayor será la probabilidad de que los minerales formadores de incrustaciones disueltos se nuclean para producir depósitos. Al mismo tiempo, cuanto mayor es el HTI del sistema, más tiempo se mantiene una dosis de biocida en el agua del sistema para un mayor tiempo de contacto para promover la eliminación o el control microbiano.

Los inhibidores de incrustaciones químicas para el tratamiento del agua funcionan mediante los siguientes mecanismos:

- Los productos químicos de inhibición de umbral controlan la formación de incrustaciones al extender drásticamente el tiempo requerido para la nucleación del depósito. Si el tiempo de nucleación se extiende más allá del HTI de un sistema, los depósitos minerales no se forman. Los inhibidores de la escala de umbral más utilizados son los compuestos organofosforados (fosfonatos) y los polímeros de acrilato de bajo peso molecular. Ambas clases de materiales funcionan como inhibidores de umbral; sin embargo, los materiales poliméricos son más efectivos como dispersantes.

- Los acondicionadores de incrustaciones modifican la estructura cristalina de los minerales que forman incrustaciones como el nucleado, creando un lodo voluminoso y transportable en lugar de un depósito duro. Los acondicionadores de incrustaciones incluyen lignina, taninos y compuestos poliméricos.

Sólidos Suspendidos y Control de Deposición

Se pueden usar coladores, filtros y separadores para reducir los sólidos suspendidos a un nivel aceptable. Generalmente, si la malla tiene aberturas de $\square 0,076$ mm (malla 200), se le llama colador; si es más fino que la malla 200, se llama filtro.

Coladores

Un filtro es un recipiente cerrado con una pantalla limpiable diseñada para eliminar y retener partículas extrañas de hasta 0,025 mm de diámetro de los fluidos. Los coladores extraen material para proteger el equipo aguas abajo de constricciones o daños, y para permitir guardar el producto extraído si es valioso. Los filtros están disponibles como unidades de canasta simple o dúplex, unidades de limpieza manual o automática, y pueden estar hechos de hierro fundido, bronce, acero inoxidable, aleaciones de cobre-níquel o plástico. Los insertos magnéticos suplementarios están disponibles donde partículas microscópicas de hierro o acero están presentes en el fluido.

Filtros de cartucho.

Estos se utilizan normalmente como filtros finales o terciarios para eliminar casi todas las partículas suspendidas de aproximadamente 0,102 a 0,00102 mm o menos. Los filtros de cartucho suelen ser desechables (es decir, una vez tapados, deben reemplazarse). La frecuencia de reemplazo y, por lo tanto, la viabilidad económica de su uso, depende de la concentración de sólidos en suspensión en el fluido, el tamaño de las partículas más pequeñas a eliminar y la eficiencia de eliminación del filtro de cartucho seleccionado. En general, los filtros de cartucho

son ideales para sistemas donde los niveles de contaminación son inferiores al 0,01 % en masa (<100 mg/L). Están disponibles en muchos materiales y configuraciones diferentes. Los materiales de los medios filtrantes incluyen hilos, fieltros, papeles, materiales no tejidos, telas unidas con resina, telas metálicas tejidas, metal sinterizado y estructuras cerámicas. La configuración estándar es un cilindro con una longitud total de aproximadamente 254 mm, un diámetro exterior de aproximadamente 63,5 a 69,85 mm y un diámetro interior de aproximadamente 25,4 a 38,1 mm, donde el fluido filtrado se acumula en el núcleo interno perforado. Las longitudes totales de 101,6 a 1016 mm están fácilmente disponibles. Los cartuchos hechos de hilos, resinas unidas o fibras fundidas por soplado normalmente tienen una estructura que aumenta en densidad cerca del centro. Estos filtros de profundidad capturan partículas en todo el espesor del medio. Los medios delgados, como el papel plisado (tipos de membrana), tienen un diseño de distribución de tamaño de poro estrecho para capturar partículas en la superficie del filtro o cerca de ella. Los filtros de tipo superficial normalmente pueden manejar tasas de flujo más altas y proporcionar una mayor eficiencia de eliminación que los filtros de profundidad equivalentes. Los filtros de cartucho se clasifican de acuerdo con las pautas de los fabricantes. Los filtros de tipo superficial tienen una clasificación absoluta, mientras que los filtros de tipo profundo tienen una clasificación nominal que refleja su función de clasificación general. Profundidad de fusión por soplado de mayor eficiencia, los filtros están disponibles con calificaciones absolutas según sea necesario.

Filtros tipo bolsa.

Estos filtros están compuestos por una bolsa de malla o fieltro sostenida por un cesto extraíble de metal perforado, colocada en un recinto cerrado con entrada y salida. La carcasa es tubular.

recipiente a presión con una tapa con bisagras o abrazadera en la parte superior para acceder a la bolsa y la cesta. La entrada puede estar en la tapa, en el lateral (encima de la bolsa) o en la parte inferior. La entrada lateral es el tipo más simple. En cualquier caso, el líquido entra por la parte superior de la bolsa. La salida está ubicada en la parte inferior del costado (debajo de la bolsa). Las conexiones de tubería pueden ser roscadas o bridadas. Las carcasas de cesta única pueden manejar hasta 14 L/s, las multicestas hasta 221 L/s. La cesta de soporte suele ser de acero inoxidable 304 perforada con agujeros de 3 mm. (También existen cestas de malla de alambre pesado). Las cestas se pueden revestir con malla de alambre fino y usarse solas como coladores, sin agregar una bolsa de filtro. Algunos fabricantes ofrecen una segunda cesta interior (y una bolsa) que cabe dentro de la cesta principal. Esto proporciona un filtrado de dos etapas: primero una etapa de filtrado grueso, luego una más fina. Los beneficios son mayor tiempo de servicio y posible eliminación de una segunda vivienda para cumplir la misma función. Las bolsas de filtro están hechas de muchos materiales: algodón, nailon, polipropileno y poliéster, con un rango de clasificación de tamaño de $<0,00102$ a $0,838$ mm. Los materiales afieltrados son los más comunes debido a su calidad de filtrado profundo, lo que brinda una alta capacidad de carga de suciedad, y sus poros finos. Las bolsas de malla son generalmente más gruesas, pero son reutilizables y, por lo tanto, menos costosas. Las bolsas tienen un anillo de soporte cosido en su apertura; esto mantiene abierta la bolsa y la asienta sobre el borde de la canasta. Se pueden configurar con asas para levantar, bordes sellados térmicamente en lugar de puntadas cosidas y acabado vidriado

(prensado térmicamente) para evitar la liberación de fibras. En funcionamiento, el líquido ingresa a la bolsa desde arriba, fluye a través de la canasta y sale de la carcasa, limpio de partículas hasta el tamaño deseado. El contaminante queda atrapado dentro de la bolsa, lo que facilita su eliminación sin derramar nada aguas abajo.

Filtros de Arena.

Un filtro de flujo descendente se utiliza para eliminar los sólidos en suspensión de una corriente de agua. El grado de eliminación de sólidos en suspensión depende de las combinaciones y grados del medio que se utilice en el recipiente. Durante el modo de filtración, el agua ingresa por la parte superior del recipiente del filtro. Después de pasar a través de una placa de impacto de flujo, ingresa al área de francobordo inactiva (en calma) sobre el medio. En los recipientes multimedia de flujo descendente, se utilizan varios tamaños de grano y tipos de medios para filtrar el agua. Este diseño aumenta la capacidad de retención de sólidos en suspensión del sistema, lo que a su vez aumenta el intervalo de retrolavado, lo que conserva el agua. Los recipientes multimedia también se pueden usar para aplicaciones con bajo contenido de sólidos en suspensión, donde se pueden requerir aditivos químicos.

Los filtros de arena para sistemas de agua de refrigeración suelen ser de alta capacidad ($13,58 \text{ L}/[\text{s} \cdot \text{m}^2]$), con medios filtrantes de $0,00051$ a $0,0102$ mm. Algunos recipientes de filtro están configurados para permitir que el agua ingrese en ángulo para crear un lecho de filtro en forma de vórtice y mejorar la eficiencia de eliminación. La tasa de filtración total está determinada por las rotaciones de volumen del sistema o por el porcentaje de la tasa de flujo de circulación. Los

recipientes de filtro generalmente se instalan junto a la corriente con una bomba de refuerzo. Cuando se instalan junto a las torres de refrigeración, se utilizan tuberías de filtro para barrer los suelos de los depósitos de las torres a una velocidad de 0,68 a 1,02 l/(s · m²) a través de boquillas de barrido. Por lo general, esto requiere una bomba de refuerzo más grande para crear la acción de barrido. Cuando el recipiente ha retenido suficientes sólidos suspendidos para desarrollar una caída de presión sustancial, la unidad debe lavarse a contracorriente (ya sea manual o automáticamente) invirtiendo la dirección del flujo. Esta operación elimina los sólidos acumulados por la parte superior del recipiente. La versión del Manual en línea de este capítulo presenta animaciones de separación.

Separadores centrífugos-gravedad.

En este tipo de separador, los líquidos ingresan tangencialmente a la unidad, lo que establece una ruta de flujo de ciclón circular. Los líquidos se aceleran hacia la cámara de separación. Las fuerzas centrífugas arrojan partículas más pesadas que el líquido al perímetro de la cámara de separación. Los sólidos caen a lo largo del perímetro y en la cámara de recolección inactiva. Luego, un líquido con bajo contenido de sólidos se introduce en el vórtice del recipiente del separador (área de baja presión) y sube a través de la salida del separador en la parte superior del recipiente. Los sólidos se purgan periódicamente mediante una purga temporizada manual o automática, o se purgan continuamente desde el separador a una cámara de filtrado/recolección de sólidos. Las ventajas de los separadores incluyen una caída de presión constante incluso cuando se recolectan los sólidos, una pérdida de agua insignificante en el ciclo de purga y sin retrolavado ni interrupción del servicio. Las desventajas son que no eliminarán

partículas con una densidad más baja que el líquido primario (por ejemplo, semillas de álamo).

Los filtros de arena para sistemas de agua de refrigeración suelen ser de alta capacidad ($13,58 \text{ L}/[\text{s} \cdot \text{m}^2]$), con medios filtrantes de $0,00051$ a $0,0102$ mm. Algunos recipientes de filtro están configurados para permitir que el agua ingrese en ángulo para crear un lecho de filtro en forma de vórtice y mejorar la eficiencia de eliminación. La tasa de filtración total está determinada por las rotaciones de volumen del sistema o por el porcentaje de la tasa de flujo de circulación. Los recipientes de filtro generalmente se instalan junto a la corriente con una bomba de refuerzo. Cuando se instalan junto a las torres de refrigeración, se utilizan tuberías de filtro para barrer los suelos de los depósitos de las torres a una velocidad de $0,68$ a $1,02 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ a través de boquillas de barrido. Por lo general, esto requiere una bomba de refuerzo más grande para crear el acción de barrido. Cuando el recipiente ha retenido suficientes sólidos suspendidos para desarrollar una caída de presión sustancial, la unidad debe lavarse a contracorriente (ya sea manual o automáticamente) invirtiendo la dirección del flujo. Esta operación elimina los sólidos acumulados por la parte superior del recipiente. La versión del Manual en línea de este capítulo presenta animaciones de separación.

2.6 Instrumentos y mediciones

2.6.1 Mediciones de temperatura

Los instrumentos para medir la temperatura se enumeran en la Tabla 12. La salida del sensor de temperatura debe estar relacionada con una escala de

temperatura aceptada al fabricar el instrumento de acuerdo con ciertas especificaciones o al calibrarlo contra un estándar de temperatura.

Tabla 12. Técnicas o instrumentos comunes para medición de temperatura.

Medios de medición	Aplicación	Rango aproximado, °C	Incertidumbre, K	Limitaciones
Termómetros de líquido en vidrio Mercurio en vidrio	Temperatura de gases y líquidos por contacto	-38/550	0,03 a 2	En gases, la precisión se ve afectada por la radiación (a menos que esté protegido adecuadamente)
fluido orgánico	Temperatura de gases y líquidos por contacto	-200/200	0,03 a 2	En gases, precisión afectada por la radiación.
Termómetros de resistencia Platino	Precisión; lecturas remotas; temperatura de fluidos o sólidos por contacto	-259/1000	Menos que 0,0001 a 0,1	Alto costo; precisión afectada por la radiación en los gases

rodio/hierro	Estándar de transferencia para aplicaciones criogénicas	-273/-243	0,0001 a 0,1	Alto costo
Níquel	Lecturas remotas; temperatura por contacto	-250/200	0.01 a 1	Precisión afectada por la radiación en los gases
Germanio	Lecturas remotas; temperatura por contacto	-273/-243	0,0001 a 0,1	
Termistores	Lecturas remotas; temperatura por contacto	-90/200	0,0001 a 0,1	
Termopares Pt-Rh/Pt (tipo S)	Estándar para termopares en IPTS-68, no en ITS-90	0/1450	0.1 a 3	Alto costo
Au/Pt	Termómetro de referencia de alta precisión	-50/1000	0,05 a 1	Alto costo

	para aplicaciones de laboratorio			
Tipos K y N	Pruebas generales de alta temperatura; lecturas rápidas remotas por contacto directo	-200/1250	0.1 a 10	Menos preciso que los termopares Pt-Rh/Pt o Au/Pt
Hierro/Constantán (tipo J)	Pruebas generales de alta temperatura; lecturas rápidas remotas por contacto directo	0 a 760	0.1 a 6	Sujeto a oxidación
Cobre/Constantán (tipo T)	Pruebas generales de alta temperatura;	-200/370	0.1 a 3	

	lecturas rápidas remotas por contacto directo, especialmen te adecuado para baja temperatu ra			
Ni- Cr/Constantán (tipo E)	Pruebas generales de alta temperatura; lecturas rápidas remotas por contacto directo, especialmen te adecuado para baja temperatu ra	-200/900	0.1 a 7	

Termómetros bimetálicos	Para temperatura aproximada	-20/660	1, generalmente mucho más	Retraso de tiempo; inadecuado para uso remoto
Termómetros de bulbo de presión (bulbo lleno de gas)	Lectura remota	-75/660	2	Tenga cuidado para asegurarse de que la instalación sea correcta.
Termómetros de bulbo de presión (bulbo lleno de vapor)	Pruebas remotas	-5/250	2	Tenga cuidado para asegurarse de que la instalación sea correcta.
Termómetros de bulbo de presión (bulbo lleno de líquido)	Pruebas remotas	-50/1150	2	Tenga cuidado para asegurarse de que la instalación sea correcta.
Pirómetros ópticos	Para intensidad de banda	800 y más	15	Generalmente requiere conocimiento

	espectral estrecha de radiación de alta temperatura (remota)			de la emisividad de la superficie
Radiómetros infrarrojos (IR)	Para la intensidad de la radiación total de alta temperatura (remota)	Cualquier rango		
termografía IR	Imágenes infrarrojas	Cualquier rango		Generalmente requiere conocimiento de la superficie. emisividad
Conos de Seger (pirómetros de fusión)	Temperatura aproximada (dentro de la fuente de temperatura)	660/2000	50	

Muestreo y promedio

Aunque la temperatura generalmente se mide dentro de un volumen relativamente pequeño y está asociada con él (dependiendo del tamaño del termómetro), también puede estar asociada con un área (por ejemplo, en una superficie o en una corriente que fluye). Para determinar la temperatura promedio de la corriente, la sección transversal debe dividirse en áreas más pequeñas y medirse la temperatura de cada área. Luego, las temperaturas medidas se combinan en un promedio ponderado de flujo másico usando (1) áreas iguales y multiplicando cada temperatura por la fracción del flujo másico total en su área o (2) áreas de tamaño inversamente proporcional al flujo másico y tomando un simple promedio aritmético de las temperaturas en cada uno. La mezcla o el muestreo selectivo pueden ser preferibles a estos engorrosos procedimientos. Aunque la mezcla puede ocurrir solo por turbulencia, la transposición es mucho más efectiva. En la transposición, la corriente se divide en partes determinadas por el tipo de estratificación, y las partes alternas se cruzan entre sí.

2.6.2. Medición de humedad

Cualquier instrumento que pueda medir la humedad o el estado psicrométrico del aire es un higrómetro, y hay muchos disponibles. Los sensores de indicación utilizados en los instrumentos responden a diferentes contenidos de propiedades de humedad. Estas respuestas están relacionadas con factores como la temperatura de bulbo húmedo, la humedad relativa, la proporción de humedad (mezcla), el punto de rocío y el punto de escarcha. La Tabla 13 enumera los instrumentos para medir la humedad.

Tabla 13. Propiedades de medidores de humedad.

Tipo de sensor	Categoría de sensores	Método de operación	Rango aproximado	Algunos usos	Aproximado Exactitud
Psicrómetro	Enfriamiento evaporativo	Medición de temperatura de bulbo húmedo	0 a 80°C	Medida, estándar	±3 a 7% h.r.
Psicrómetro de saturación adiabática	Enfriamiento evaporativo	Medición de temperatura de bulbo húmedo termodinámico	5 a 30°C	Medida, estándar	±0,2 a 2% h.r.
espejo helado	punto de rocío	Determinación óptica de formación de humedad	-75 a 95°C dpt	Medición, control, meteorología	±0,2 a 2 K
Solución salina saturada calentada	Presión de vapor de agua	Depresión de la presión de vapor en solución salina	-30 a 70°C dpt	Medición, control, meteorología	±1,5K

Cabello	Mecánico	Cambio dimensional	5 a 100% h.r.	Medición, control	$\pm 5\%$ h.r.
Nylon	Mecánico	Cambio dimensional	5 a 100% h.r.	Medición, control	$\pm 5\%$ h.r.
Hilo de dacrón	Mecánico	Cambio dimensional	5 a 100% h.r.	Medición	$\pm 7\%$ h.r.
La piel de Goldbeater	Mecánico	Cambio dimensional	5 a 100% h.r.	Medición	$\pm 7\%$ h.r.
Materiales celulósicos	Mecánico	Cambio dimensional	5 a 100% h.r.	Medición, control	$\pm 5\%$ h.r.
Carbón	Mecánico	Cambio dimensional	5 a 100% h.r.	Medición	$\pm 5\%$ h.r.
tipo dunmore	Eléctrico	Impedancia	7 a 98% hr en 5 a 60°C	Medición, control	$\pm 1,5\%$ h.r.
Higrómetro electrónico de película de polímero	Eléctrico	Impedancia o capacitancia	10 a 100% h.r.	Medición, control	± 2 a 3% hr
Resina de intercambio iónico	Eléctrico	Impedancia o capacitancia	10 a 100% hr en -40 a 90°C	Medición, control	$\pm 5\%$ h.r.

Cerámica porosa	Eléctrico	Impedancia o capacitancia	Hasta 200°C	Medición, control	±1 a 1,5% hr
Oxido de aluminio	Eléctrico	Capacidad	5 a 100% h.r.	Medición, control	±3% h.r.
Oxido de aluminio	Eléctrico	Capacidad	-80 a 60°C dpt	Medición de trazas de humedad, control	±1 K dpt
Higrómetro electrolítico	Celda electrolítica	Se electroliza debido a la humedad adsorbida	1 a 1000ppm	Medición	±1 K dpt
Diodo láser infrarrojo	Eléctrico	Diodos ópticos	0,1 a 100 ppm	Medición de trazas de humedad	±0,1 ppm
Onda acústica superficial	Eléctrico	Atenuación de sierra	85 a 98% h.r.	Medición, control	±1% h.r.
Piezoeléctrico	sensible a las masas	Cambios de masa debido a la	-75 a -20°C	Medición de trazas de	±1 a 5 K dpt

		humedad adsorbida		humedad, control	
absorción de radiación	Absorción de humedad	Absorción de humedad de la radiación UV o IR	-20 a 80°C dpt	Medición, control, meteorología	± 2 K dpt,
Gravimétrico	Medición directa de la relación de mezcla	Comparación de gas de muestra con corriente de aire seco	Proporción de mezcla de 120 a 20 000 ppm	Patrón primario, investigación y laboratorio	$\pm 0.13\%$ de leyendo
Cambio de color	Físico	Cambios de color	10 a 80% h.r.	Dispositivo de advertencia	$\pm 10\%$ h.r.

2.6.3 Medidores de presión

En términos generales, los instrumentos de presión se pueden dividir en tres categorías diferentes: estándares, medidores mecánicos y transductores electromecánicos. Los instrumentos estándar se utilizan para las calibraciones más precisas. El manómetro de columna líquida, que es el estándar más común y potencialmente el más preciso, se utiliza para una variedad de aplicaciones, incluidas aplicaciones de campo. Los manómetros mecánicos son generalmente

los menos costosos y los más comunes. Sin embargo, los transductores electromecánicos se han vuelto mucho menos costosos y más fáciles de usar, por lo que se usan con más frecuencia.

Estándares de presión

Manómetros de columna líquida

Medir la presión determinando el desplazamiento vertical de un líquido de densidad conocida en un campo gravitacional. Por lo general, se construyen como un tubo en U de material transparente (vidrio o plástico). La presión a medir se aplica a un lado del tubo en U. Si el otro lado (de referencia) está vacío (presión cero), el manómetro mide la presión absoluta; si el lado de referencia está abierto a la atmósfera, mide la presión manométrica; si el lado de referencia está conectado a alguna otra presión, el manómetro mide el diferencial entre las dos presiones. Los manómetros llenos de agua y diferentes aceites se utilizan a menudo para medir presiones diferenciales de rango bajo. En algunos instrumentos de rango bajo, un tubo del manómetro está inclinado para mejorar la legibilidad. Los manómetros llenos de mercurio se utilizan para mediciones de presión absoluta y diferencial de mayor rango. En este último caso, se evacua el lado de referencia, generalmente con una bomba de vacío mecánica. Los rangos típicos de escala completa para manómetros varían de 25 Pa a 300 kPa.

Para presiones por encima del rango de los manómetros, los estándares son generalmente del tipo medidor de pistón, balanza de presión o probador de peso muerto. Estos instrumentos aplican presión a la parte inferior de un pistón vertical, que está rodeado por un cilindro ajustado (las holguras típicas son micrómetros).

La presión genera una fuerza aproximadamente igual a la presión multiplicada por el área del pistón. Esta fuerza se equilibra con pesos apilados en la parte superior del pistón. Si se conocen la masa de los pesos, la aceleración local de la gravedad y el área del pistón (o más correctamente, el "área efectiva" del conjunto de pistón y cilindro), se puede calcular la presión aplicada. Los manómetros de pistón generalmente generan presiones manométricas con respecto a la presión atmosférica sobre el pistón. Se pueden usar para medir presiones absolutas ya sea indirectamente, midiendo por separado la presión atmosférica y añadiéndola a la presión manométrica determinada por el manómetro del pistón, o directamente, rodeando la parte superior del pistón y los pesos con una campana de vacío al vacío. Rangos de escala completa de medidores de pistón varían de 35 kPa a 1,4 GPa. A presiones absolutas muy bajas (por debajo de aproximadamente 100 Pa), se utilizan varios tipos diferentes de patrones. Estos tienden a ser instrumentos especializados y costosos que se encuentran solo en los principales laboratorios de estándares. Sin embargo, se ha utilizado un patrón de baja presión, el calibre McLeod, para aplicaciones de campo. Desafortunadamente, aunque su teoría es simple y directa, es difícil de usar con precisión y pueden ocurrir errores importantes cuando se usa para medir gases que se condensan o se adsorben (por ejemplo, agua). En general, se deben usar otros manómetros para la mayoría de las aplicaciones de baja presión o vacío.

Manómetros mecánicos

Los manómetros mecánicos acoplan un sensor de presión a una lectura mecánica, normalmente un puntero y un dial. El tipo más común utiliza un sensor

de tubo de Bourdon, que es esencialmente un tubo de metal enrollado de sección transversal circular o elíptica. El aumento de la presión aplicada al interior del tubo hace que se desenrolle. Un enlace mecánico traduce el movimiento del extremo del tubo a la rotación de un puntero. En la mayoría de los casos, el tubo de Bourdon está rodeado por presión atmosférica, por lo que los manómetros miden la presión manométrica. Algunos instrumentos rodean el tubo de Bourdon con un recinto sellado que puede evacuarse para mediciones absolutas o conectarse a otra presión para mediciones diferenciales. Los instrumentos disponibles varían ampliamente en costo, tamaño, rango de presión y precisión. Los rangos de escala completa pueden variar de 35 kPa a 700 MPa. La precisión de los instrumentos correctamente calibrados y usados puede variar de 0,1 a 10 % de la escala completa. Generalmente existe una fuerte correlación entre el tamaño, la precisión y el precio; los instrumentos más grandes son más precisos y caros. Para una mejor sensibilidad, algunos medidores mecánicos de rango bajo (a veces llamados medidores aneroides) usan diafragmas corrugados o cápsulas como sensores. La cápsula es básicamente un fuelle corto sellado con tapas en los extremos. Estos sensores son más compatibles que un tubo de Bourdon, y una determinada presión aplicada provoca una mayor desviación del sensor. El interior de una cápsula se puede evacuar y sellar para medir presiones absolutas o conectarse a un accesorio externo para permitir medir presiones diferenciales. Por lo general, estos medidores se usan para mediciones de rango bajo de 100 kPa o menos. En instrumentos de mejor calidad, las precisiones pueden ser del 0,1 % de la lectura o más.

Transductores electromecánicos

Los manómetros mecánicos generalmente están limitados por el comportamiento inelástico del elemento sensor, la fricción en el mecanismo de lectura y la resolución limitada del puntero y el dial. Estos efectos pueden eliminarse o reducirse mediante el uso de técnicas electrónicas para detectar la distorsión o tensión de un elemento de detección mecánica y convertir electrónicamente esa tensión o distorsión en una lectura de presión. Se utilizan varios sensores, incluidos tubos de Bourdon, cápsulas, diafragmas y diferentes estructuras resonantes cuya frecuencia de vibración varía con la presión aplicada. Los sensores de palanca capacitivos, inductivos y ópticos se utilizan para medir el desplazamiento del elemento sensor. En algunos casos, se pueden usar técnicas de retroalimentación para restringir el sensor en una posición nula, minimizando la distorsión y la histéresis del elemento de detección. A menudo se incluye control de temperatura o compensación. La lectura puede tener la forma de una pantalla digital, voltaje o corriente analógicos, o un código digital. El tamaño varía, pero para los transductores que usan un diafragma fabricado como parte de un chip de silicio, el sensor y la electrónica de acondicionamiento de señal pueden estar contenidos en un pequeño paquete de transistores, y la parte más grande del dispositivo es el accesorio de presión. Los mejores de estos instrumentos logran inestabilidades a largo plazo de 0,01% o menos de la escala completa y las correspondientes precisiones cuando se calibran correctamente. El rendimiento de los instrumentos menos costosos puede ser más del orden de varios porcentajes. Aunque la respuesta dinámica de la mayoría de los medidores mecánicos está limitada por el sensor y la lectura, la respuesta de algunos transductores electromecánicos puede ser mucho más rápida, lo que permite mediciones de presiones dinámicas a frecuencias de hasta 1 kHz y más en el

caso de transductores diseñados específicamente para mediciones dinámicas. . Consulte la literatura de los fabricantes como guía para la respuesta dinámica de instrumentos específicos. A medida que la presión medida cae por debajo de aproximadamente 10 kPa, se vuelve cada vez más difícil de detectar mecánicamente. Se han desarrollado varios manómetros que miden alguna otra propiedad del gas que está relacionada con la presión. En particular, los medidores de conductividad térmica, también conocidos como medidores de termopar, termistor, Pirani y convección, se utilizan para presiones de hasta aproximadamente 0,1 Pa. Estos medidores tienen un tubo sensor con un pequeño elemento calentado y un sensor de temperatura; la temperatura del elemento calentado está determinada por la conductividad térmica del gas, y la salida del sensor de temperatura se muestra en un medidor eléctrico analógico o digital contenido en una unidad electrónica adjunta. La precisión de los medidores de conductividad térmica está limitada por su falta de linealidad, dependencia de las especies de gas y tendencia a lecturas altas cuando están contaminados. La contaminación por aceite es un problema particular. Sin embargo, estos medidores son pequeños, razonablemente resistentes y relativamente económicos; en manos de un usuario típico, brindan resultados mucho más confiables que un medidor McLeod. Se pueden usar para verificar la presión base en un sistema que se está evacuando antes de llenarlo con refrigerante. Deben revisarse periódicamente para detectar contaminación comparando la lectura con la de un tubo sensor nuevo y limpio.

Consideraciones Generales

Se requieren valores precisos de presión atmosférica o barométrica para la predicción del tiempo y la altimetría de aeronaves. En los Estados Unidos, el Servicio Meteorológico Nacional, la Administración Federal de Aviación y las autoridades operativas de los aeropuertos locales mantienen una red de instrumentos calibrados, generalmente con una precisión de 0,1 % de Lectura y ubicados en los aeropuertos. Estas agencias suelen cooperar para proporcionar valores actuales de presión atmosférica que se pueden usar para verificar la calibración de los manómetros de presión absoluta o para corregir las lecturas de presión manométrica a presiones absolutas. Sin embargo, las lecturas de presión generalmente informadas con fines meteorológicos y altimétricos no son la verdadera presión atmosférica, sino un valor ajustado a una presión equivalente al nivel del mar. Por lo tanto, a menos que la ubicación esté cerca del nivel del mar, es importante preguntar por la estación o la presión atmosférica real en lugar de usar los valores ajustados que transmiten las estaciones de radio. Además, la presión atmosférica disminuye al aumentar la elevación a un ritmo (cerca del nivel del mar) de aproximadamente 10 Pa/m, y se deben realizar las correcciones correspondientes para tener en cuenta la diferencia de elevación entre los instrumentos que se comparan.

Los instrumentos de presión manométrica a veces se utilizan para medir presiones absolutas, pero su precisión puede verse comprometida por las incertidumbres en la presión atmosférica. Este error puede ser particularmente grave cuando se utilizan instrumentos de presión manométrica para medir el vacío (presiones manométricas negativas). Para todas las mediciones, excepto las más rudimentarias, se deben usar manómetros de presión absoluta para las

mediciones de vacío; para presiones inferiores a unos 100 Pa, se debe utilizar un medidor de conductividad térmica. Todos los manómetros son susceptibles a errores de temperatura. Se utilizan varias técnicas para minimizar estos errores: los materiales de los sensores generalmente se eligen para minimizar los efectos de la temperatura, las lecturas mecánicas pueden incluir elementos de compensación de temperatura, los transductores electromecánicos pueden incluir un sensor de temperatura y un circuito de compensación, y algunos transductores funcionan a una temperatura controlada. Claramente, los efectos de la temperatura son de mayor preocupación para las aplicaciones de campo, y es prudente consultar la literatura de los fabricantes para conocer el rango de temperatura en el que se puede mantener la precisión especificada. Los cambios bruscos de temperatura también pueden causar grandes errores transitorios que pueden tardar algún tiempo en decaer. Las lecturas de algunos transductores electromecánicos con un sensor resonante o vibratorio pueden depender de la especie de gas. Aunque algunas de estas unidades pueden lograr precisiones calibradas del orden del 0,01 % de la lectura, por lo general se calibran con aire seco o nitrógeno, y las lecturas de otros gases pueden tener un error de varios porcentajes, posiblemente mucho más para los refrigerantes y otros gases de alta temperatura. Se pueden mantener lecturas de alta precisión calibrando estos dispositivos con el gas a medir. Consulte la literatura de los fabricantes.

La medición de presiones dinámicas está limitada no solo por la respuesta de frecuencia del manómetro, sino también por la constante de tiempo hidráulica o neumática de la conexión entre el manómetro y el sistema a monitorear. En general, cuanto más largas sean las líneas de conexión y menor sea su diámetro, menor será la respuesta de frecuencia del sistema. Además, incluso si solo

interesa el componente estático de la presión y se usa un manómetro con una respuesta de baja frecuencia, un componente de presión pulsante u oscilante significativo puede causar errores significativos en las lecturas del manómetro y, en algunos casos, puede dañar el indicador, particularmente uno con un mecanismo de lectura mecánica. En estos casos, se debe usar un filtro o amortiguador para reducir los componentes de mayor frecuencia.

2.6.4 Medición de la velocidad del aire

A continuación, se muestra la tabla 14 con los tipos de medidores de velocidad de aire y su aplicación:

Tabla 14. Medidores de velocidad de aire.

Medios de medición	Aplicación	Rango, m/s	Precisión	Limitaciones
Soplo de humo o en el aire, trazador sólido	Bajas velocidades de aire en las habitaciones; altamente direccional	0,025 a 0,25	10 a 20%	Incómodo de usar, pero valioso para rastrear el movimiento del aire.
Anemómetro de paleta deflectora	Velocidades del aire en las habitaciones, en las salidas, etc.; direccional	0,15 a 120	5%	Requiere verificación periódica de calibración.

Anemómetro de paleta giratoria (giratoria)	Velocidades de aire moderadas en conductos y habitaciones; algo direccional	0,5 a 15	2 a 5%	Sujeto a errores significativos cuando hay variaciones en las velocidades con el espacio o el tiempo. Fácilmente dañado. Afectado por la intensidad de la turbulencia. Requiere calibración periódica.
Anemómetro térmico (hilo caliente o película caliente)	Bajas velocidades del aire; disponible direccional y omnidireccional	0,05 a 50	2 a 10%	Requiere una calibración precisa a intervalos frecuentes. Algunos son relativamente costoso. Afectado por la pluma térmica debido al
B. Velocidad transitoria y turbulencia				

				autocalentamiento.
tubo pitot-estático	Estándar (típicamente portátil) instrumento para medir velocidades de conductos de un solo punto	0,9 a 50 con micromanómetro; 3 a 50 con calado calibres; 50 arriba con manómetro	2 a 5%	La precisión cae en el extremo inferior del rango debido a la relación de raíz cuadrada entre la velocidad y la presión dinámica. También afectado por la alineación con la dirección del flujo.
Tubo de impacto y pared lateral u otro grifo estático	Altas velocidades, tubos pequeños y donde la dirección del aire puede ser variable	0,6 a 50 con micromanómetro; 3 a 50 con calado calibres; 50 arriba con manómetro	2 a 5%	La precisión depende de la constancia de la presión estática a lo largo de la sección de la corriente.

Anemómetro de copa	Meteorológico	Hasta 60	2 a 5%	Baja precisión a baja velocidad del aire (<2,5 m/s).
Ultrasónico	Instrumentos grandes: meteorológico	0,005 a 30	1 a 2%	Alto costo.
	Pequeños instrumentos: en conducto y velocidades del aire de la habitación			
Velocímetro láser Doppler (LDV)	Calibración de instrumentos de velocidad del aire	0,005 a 30	1 a 3%	El alto costo y la complejidad limitan los LDV a las aplicaciones de laboratorio. Requiere siembra de flujo con partículas y acceso óptico transparente (ventana).

Velocimetría de imagen de partículas (PIV)	Mediciones de velocidad de campo completo (2D, 3D) en habitaciones, puntos de venta	0,005 a 30	10%	El alto costo y la complejidad limitan las mediciones al laboratorio aplicaciones Requiere siembra de flujo con partículas y acceso óptico transparente (ventana).
Matriz de Pitot, presión diferencial autopromedia da, típicamente usando colectores de ecualización	En conjuntos de conductos, sondas de entrada de conductos o ventiladores	3 a 50	± 2 a $>40\%$ de leer	El rendimiento depende en gran medida de la calidad y el rango del transmisor de presión diferencial asociado. Muy susceptible a errores de medición causados por la colocación de

				<p>conductos y cambios de temperatura.</p> <p>Salida no lineal (función de raíz cuadrada).</p> <p>Errores matemáticos de promedio probablemente debido al método de muestreo. Debe mantenerse limpio para que funcione correctamente.</p> <p>Debe configurarse y calibrarse en el campo a una referencia manual o calibrarse contra el</p>
--	--	--	--	--

				estándar de boquilla.
Variaciones de piezómetro y piezoring, presión diferencial autopromediada utilizando colectores de ecualización	Cono de entrada del ventilador centrífugo	3 a 50	± 5 a $>40\%$ de leer	El rendimiento depende en gran medida de la calidad y el rango del transmisor de presión diferencial requerido. Muy susceptible a errores de medición causados por la colocación del cono de entrada, obstrucciones en la entrada y cambios de temperatura. Salida no lineal (función de raíz cuadrada). Debe

				mantenerse limpio. Debe estar calibrado en campo para referencia manual.
desprendimiento de vórtices	Conjuntos de conductos, sondas de entrada de conductos o ventiladores	2 a 30	$\pm 2,5$ a 10% de leer	Costo más alto por punto de detección. Mayor tamaño físico. Precisión a baja temperatura cuestionable. Debe configurarse y calibrarse en el campo para referencia manual.
Térmica (electrónica analógica) mediante termistores	Ensamblajes en conductos o conductos sondas	0,25 a 25	± 2 a 40% de leer	Los errores de promediación matemática pueden ser causados por circuitos

				<p>electrónicos analógicos cuando se promedian señales no lineales. Los puntos de detección pueden no ser independientes. Es posible que no pueda compensar las temperaturas más allá de un rango estrecho. Debe configurarse y calibrarse en el campo para referencia manual. Debe recalibrarse regularmente para</p>
--	--	--	--	--

				contrarrestar la deriva.
Fuerza de arrastre	Flujo en el conducto	0,1 a 50	$\pm 2\%$	Los métodos piezoeléctricos o de galgas extensiométricas se utilizan para detectar variaciones dinámicas de la fuerza de arrastre.
Dispersión térmica (basado en microcontrolador) utilizando termistores para determinar de forma independiente temperaturas y velocidades	Sondas de entrada de conductos o ventiladores, sensores de velocidad de purga	0,1 a 50	± 2 a 10% de leer	El costo aumenta con la cantidad de conjuntos de sensores en el arreglo. Algunos fabricantes recomiendan los enderezadores de aire tipo panel. Precisión verificada solo a -29°C . No apto

				para entornos abrasivos o de alta temperatura.
Térmica (electrónica analógica) mediante RTD	Ensamblados de conductos o sondas con conductos; Los RTD de acero inoxidable y platino tienen capacidades de entorno industrial	0,5 a 90	± 1 a 20% de leer	Requiere tramos largos de conductos/tuberías. Sensible a las condiciones de colocación. Los errores de promediación matemática pueden ser causados por circuitos electrónicos analógicos cuando se promedian señales no lineales. Debe recalibrarse regularmente para

				contrarrestar la deriva. bastante caro
--	--	--	--	--

2.6.5 Medidores de flujo volumétrico o caudal

Métodos de medición de flujo

Directo. Tanto el flujo de gas como el de líquido se pueden medir con precisión cronometrando una cantidad recolectada de fluido que se mide gravimétrica o volumétricamente. Este método es común para calibrar otros dispositivos de medición, pero es particularmente útil cuando el caudal es bajo o intermitente y donde se requiere un alto grado de precisión. Estos sistemas son generalmente grandes y lentos, pero por su simplicidad, pueden considerarse dispositivos primarios.

El medidor de área variable o rotámetro es un conveniente medidor de flujo de lectura directa para líquidos y gases. Se trata de un tubo cónico vertical en el que el caudal se indica mediante la posición de un flotador suspendido en el flujo ascendente. La posición del flotador está determinada por su flotabilidad y el arrastre del fluido hacia arriba. Los medidores de desplazamiento miden el flujo total de líquido o gas a lo largo del tiempo. Los dos tipos principales de medidores de desplazamiento utilizados para gases son el medidor de gas convencional, que utiliza un conjunto de fuelles, y el medidor de prueba húmedo, que utiliza un principio de desplazamiento de agua.

Indirecto. El medidor Thomas se utiliza en laboratorios para medir altos caudales de gas con bajas pérdidas de presión. El gas se calienta mediante calentadores eléctricos y el aumento de temperatura se mide mediante dos rejillas de termómetro de resistencia. Cuando se conocen la entrada de calor y el aumento de temperatura, el flujo másico de gas se calcula como la cantidad de gas que elimina el calor equivalente al mismo aumento de temperatura. Una poligonal de velocidad (hecha con un tubo Pitot u otro instrumento de medición de velocidad) mide las tasas de flujo de aire en el campo o calibra boquillas grandes. Este método puede ser impreciso a bajas velocidades e impracticable cuando se están realizando muchas pruebas. Otro método de estimación de campo mide la caída de presión en elementos con características de caída de presión conocidas, como serpentines o ventiladores de calefacción y refrigeración. Si la relación entre la caída de presión y el caudal se ha calibrado con una referencia conocida (normalmente, al menos cuatro puntos en el rango operativo), los resultados pueden ser precisos. Si el método depende de los datos de calificación, debe usarse solo con fines de verificación.

A continuación, se muestra en la tabla 15 los medidores de caudal y su aplicación:

Tabla 15. Medidores de caudal y sus aplicaciones.

Medios de medición	de	Solicitud	Rango Nominal	Precisión	Limitaciones
Sistema de medición de presión	de	Flujo a través de tuberías, conductos	Por encima del número de Reynolds de 5000	1 a 5%	Coeficiente de descarga y precisión influenciados

diferencial y de orificio	y cámaras para todos los fluidos			por las condiciones de instalación.
Boquilla y sistema de medición de presión diferencial	Flujo a través de tuberías, conductos y cámaras para todos los fluidos	Por encima del número de Reynolds de 5000	0,5 a 2,0%	Coeficiente de descarga y precisión influenciados por las condiciones de instalación.
Sistema de medición de presión diferencial y tubo Venturi	Flujo a través de tuberías, conductos y cámaras para todos los fluidos	Por encima del número de Reynolds de 5000	0,5 a 2,0%	Coeficiente de descarga y precisión influenciados por las condiciones de instalación.
Tiempo dado masa o flujo volumétrico	Líquidos o gases; utilizado para calibrar otros caudalímetros	Ningún	0,1 a 0,5%	El sistema es voluminoso y lento.

rotámetros	Líquidos o gases	Ningún	0,5 a 5,0%	Debe calibrarse para el fluido que se mide.
Coriolis	Masa o volumen; líquidos o gases de densidad variable	Hasta 907 kg/s	0,05 a 1,5%	
Medidor de desplazamiento	Flujo volumétrico relativamente pequeño con alta pérdida de presión	Hasta 500 L/s, depende del tipo	0,1 a 2,0% depende en tipo	La mayoría de los tipos requieren calibración con el fluido medido.
Gasómetro o desplazamiento de volumen	Pruebas de corta duración; utilizado para calibrar otros caudalímetros	Caudal total limitado por volumen disponible de contenedores	0,5 a 1,0%	

Medidor Thomas (aumento de la temperatura de la corriente causado por el calentamiento eléctrico)	Configuración elaborada justificada por la necesidad de una buena precisión	Ningún	1%	Velocidad uniforme; generalmente se usa con gases
Elemento de resistencia al caudal y sistema de medida de presión diferencial	Se utiliza para verificar dónde el sistema tiene un elemento de resistencia calibrado	Límite inferior establecido por caída de presión legible	1 a 5%	La lectura secundaria depende de la precisión de la calibración.
Caudalímetros de turbina	Líquidos o gases	Ningún	0,25 a 2,0%	Utiliza lectura electrónica.
Instrumento de punto único o multipunto para medir la velocidad en un punto	Principalmente para sistemas de tratamiento	Límite inferior establecido por la precisión de	2 a 10%	La precisión depende de la uniformidad del flujo y la integridad del

específico del flujo	de aire instalados sin disposición especiales para la medición de flujo	la instrumentación de medición de velocidad		recorrido. Puede verse afectado por perturbaciones cerca del punto de medición.
Aportación térmica y cambios de temperatura con batería de vapor y agua	Verifique el valor en las pruebas de calentador o enfriador	Ningún	1 a 3%	
Elemento de flujo laminar y sistema de medición de presión diferencial	Medir el caudal volumétrico de líquidos o gases; relación casi lineal con la caída de presión; Simple y	50mm ³ /s a 1 m ³ /s	1%	El fluido debe estar libre de suciedad, aceite y otras impurezas que puedan obstruir el medidor o afectar su calibración.

	fácil de usar			
Caudalímetro magnetohidrodinámico (electromagnético)	Mide fluidos conductores de electricidad, lodos; el medidor no obstruye el flujo; sin partes móviles	0,006 a 600 L/s	1%	En el estado actual de la técnica, la conductividad del fluido debe ser superior a 0,005metromh o/cm.
Caudalímetro de remolino y medidor de desprendimiento de vórtice	Mida el flujo de líquido o gas en la tubería; sin partes móviles	Por encima del número de Reynolds de 10 ⁴	1%	

2.7 Ahorro energético

Como pudimos ver en apartados anteriores, podemos calcular el calor que será expulsado hacia la tierra mediante la ecuación:

$$\frac{q_{cond}}{q_{lc}} = \frac{COP + 1}{COP}$$

Para ejemplificar la reducción en el consumo energético vamos a trabajar con una bomba de calor cuya capacidad de enfriamiento será de 3.5kW con un COP de 4:

Teniendo en cuenta estos datos, sustituimos:

$$q_{cond} = 3.5 \cdot \frac{4 + 1}{4} = 4.375kW$$

Así, podemos calcular el trabajo que será necesario suministrar para mantener los parámetros de climatización:

$$W_i = q_{lc}/COP = 0.874kW \qquad W_F = q_{cond}/COP = 1.094kW$$

Para conocer la reducción en el consumo por la instalación del intercambiador:

$$\%Reducción = \frac{W_f - W_i}{W_f} \cdot 100\%$$

$$\%Reducción = \frac{1.094 - 0.875}{1.094} \cdot 100\% = 20\%$$

Con este ejemplo podemos demostrar que se logra una reducción alrededor del 20% del consumo energético con la instalación del intercambiador vertical.

CAPÍTULO 3

3.1 Introducción a la informática aplicada a la ingeniería mecánica.

La informática ha ido ocupando un lugar cada vez más relevante en todos los ámbitos de la vida cotidiana desde actividades domésticas hasta la aplicación en las nuevas tecnologías. Su uso de manera adecuada encierra un enorme potencial. Estos avances tecnológicos han repercutido en todas las esferas de la sociedad, en particular en la formación profesional, de ahí la importancia y necesidad de un adecuado uso de estas tecnologías en los procesos formativos universitarios, de acuerdo con las exigencias de la actual sociedad de la información y el conocimiento.

Desde sus inicios la formación profesional de la carrera de Ingeniería Mecánica ha estado matizada por la necesaria e ineludible utilización de los recursos informáticos para su posterior aplicación en el campo laboral el cual da como resultado un apoyo a la sociedad.

En la actualidad la tecnología forma parte importante en la formación de todo profesional, y esta no es excepción para la carrera de ingeniería mecánica, el mismo que es un profesional integral, capaz de diseñar, emprender, dirigir y mejorar sistemas de producción generadores de bienes y servicios con el fin de incrementar la productividad y elevar así la posición competitiva de las organizaciones, respetando al ser humano y a su entorno. La relación o impacto que ha generado la informática en el mundo de la ingeniería ha coadyuvado a crear, planear, implantar, administrar, evaluar y supervisar sistemas de información integrándolos de forma sinérgica a las organizaciones con el objeto de mejorar su competitividad.

Es por esto que la informática se convierte en un instrumento cada vez más indispensable para las instituciones y empresas debido a que permite realizar infinidad de funcionalidades, facilitando y perfeccionando así actividades tales como: las Fuentes de información, medio de expresión y creación, medidas de control, entre otros.

En el campo de la ingeniería mecánica los sistemas de control y simulación que amplían el papel de los principios de la informática dentro de esta área son indispensables. Además, la mayoría de las herramientas que se utilizan en este ámbito son computarizadas ahora, con el reconocimiento de que el análisis y el diseño asistidos por computadora de los sistemas de producción tienen un nuevo potencial que se está aprovechando de alguna manera.

La importancia de la informática como herramienta competitiva en la industria es contundente, ya que permite reducir costos, aumentar la productividad, incrementar la calidad y la eficiencia de los procesos, favoreciendo con ello la fabricación sobre demanda. La informática encuentra en los procesos de manufactura un lugar idóneo para aportar ventajas competitivas que las industrias de cualquier tipo requieren. Ya sean organizaciones de fabricación discreta o de procesos, las empresas requieren el uso integral de la información en cada eslabón de la cadena de suministro: saber qué demanda el mercado, contar con lo necesario para satisfacer esos requerimientos, definir los precios, la distribución y la manufactura misma, entre muchos otros aspectos que intervienen en el diseño.

La programación juega un papel muy importante en el área de la ingeniería, así como lo es en el área del mantenimiento mecánico, lo que ayuda a llevar con eficacia un plan de mantenimiento a una empresa o equipos que forman parte de

las mismas, lo cual el conocimiento de un programa diseñado para llevar un control en un plan de mantenimiento le permite al ingeniero poder ofrecer un trabajo de calidad y eficacia en la ejecución del mismo; de igual manera es importante en el área de la simulación y control puesto que nos dará un panorama aproximado ya sea del comportamiento de algún equipo en un determinado tiempo o bajo condiciones específicas como en el diseño de elementos de máquinas, sistemas de control, climatización o procesos, con el cual podremos de terminar la manera óptima de realizar alguna actividad del proceso o del diseño de lo que se mencionó anteriormente.

Los programas informáticos que se especializan en todos estos procesos tienen un nombre común que es software de gestión del ciclo de vida del producto (PLM). La familia de software de gestión del ciclo de vida del producto (PLM) incluye una gran cantidad de tipos de software y, por lo general, cuanto más grande y compleja es la aplicación, más tipos de software PLM necesita. Los softwares más utilizados en la familia PLM son CAD (Diseño asistido por computadora), CAM (Fabricación asistida por computadora), CAE (Ingeniería asistida por computadora) y PDM (Gestión de datos de productos).

3.2 Herramientas a utilizar

3.2.1 Herramientas matemáticas

Una de las partes más importantes para el desarrollo de la programación en la aplicación que se trata en esta tesis es la formulación matemática. El software realizará cálculos y operaciones referentes a la carga térmica y su posterior solución al dimensionamiento del sistema.

La formulación matemática desarrollada permite dimensionar los componentes de la bomba de calor inversa. Dichas ecuaciones se mencionan a continuación:

CARGAS TÉRMICAS

Coeficientes globales de transferencia de calor

- Ventanas

$$U_o = \frac{U_{cg}A_{cg} + U_{eg}A_{eg} + U_fA_f}{A_{pf}}$$

- Paredes y techos

Cálculo de cargas térmicas sensibles

- Paredes y techos

$$q = U \cdot A \cdot CLTD_C$$

$$CLTD_C = [(CLTD + LM)k + (78 - T_r) + (T_o - 85)]$$

- Ventanas

$$q \text{ conducción} = U \cdot A \cdot CLTD_C$$

$$q \text{ radiación} = A \cdot SC \cdot SHGF \cdot CLF$$

- Cargas misceláneas

$$q = 3.41 \cdot W \cdot CLF \cdot Ful \cdot Fsa$$

- Personas

$$q = \text{°N de personas} \cdot \text{factor de actividad} \cdot CLF \cdot \text{Ganancia de calor sensible}$$

Factor de corrección de carga sensible

$$F_C = 1 - 0.02K_T$$

$$K_T = \frac{1}{L_f} \cdot (U_W A_W + U_{OW} A_{OW} + U_C A_C)$$

Cálculo de cargas térmicas latentes

- Personas

$$q = \text{°N de personas} \cdot \text{factor de actividad} \cdot CLF \cdot \text{Ganacia de calor latente}$$

Calculo total carga térmica = Cargas sensibles + Cargas latentes

Para el cálculo de las cargas térmicas identificamos:

Entradas	Salidas
<ul style="list-style-type: none"> • Área de ventanas [m²]. • Dimensiones del recinto [m]. • Orientación del recinto. • Temperatura interior deseada [°C]. • Temperatura exterior [°C]. • Tonalidad de paredes. • Número de luminarias. • Tipo de luminarias. • Potencia de luminarias [W]. • Número de personas. • Número de computadoras. • Potencia de computadoras [W]. • Suma de potencias de equipos adicionales [W]. 	<ul style="list-style-type: none"> • Carga térmica total. • Carga térmica sensible. • Carga térmica latente.

Así, tenemos todos los datos necesarios de nuestra caja negra donde se incluyen los datos que serán ingresados por el usuario, los cálculos y acondicionamiento

de los datos, y finalmente, las salidas que nos dará nuestro programa (ver figura 21).

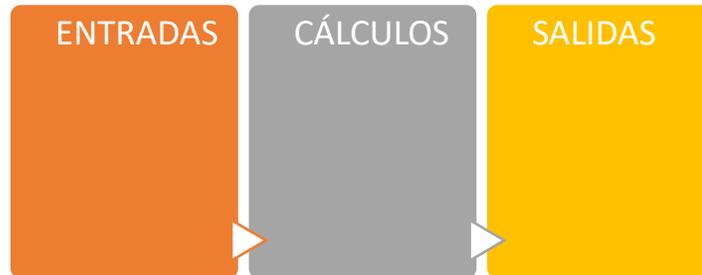


Ilustración 21. Esquema de las etapas del programa a diseñar.

En consecuencia, de los datos de las cargas térmicas, podremos proceder con el cálculo del intercambiador enterrado.

INTERCAMBIADOR ENTERRADO

Longitud de tubería

$$L = \frac{q_a R_{ga} + (q_{lc} - W_c)(R_b + PLF_m R_{gm} + R_{gst})}{T_g - \frac{T_{wi} - T_{wo}}{2}}$$

- Resistencia térmica del suelo

$$Fo = \frac{4\alpha_g \tau}{d_b^2}$$

$$R_{ga} = (G_{Fof} - G_{F01})/k_g$$

$$R_{gm} = (G_{F01} - G_{F02})/k_g$$

$$R_{gst} = (G_{F02})/k_g$$

Transferencia de calor anual neta al suelo

$$q_a = \frac{\text{capacidad bomba de calor} \cdot \left(\frac{COP + 1}{COP}\right) EFLH}{8760}$$

De las ecuaciones anteriores, resumimos los datos que deben ser proporcionados por el usuario:

Entradas	Salidas
<ul style="list-style-type: none"> • COP (coeficiente de rendimiento). • Capacidad de la bomba de calor [W]. • Tipo de suelo. • Temperatura promedio del suelo [°C] 	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de la tubería enterrada [m].

3.2.2 Herramientas Informáticas

Sistema Informático

Un sistema informático (conocido también como sistema de cómputo), se define como un conjunto de elementos organizados, que interactúan unos con otros, para lograr ciertos objetivos operando sobre la información como se observa en la ilustración 22. Estos elementos son componentes físicos (Hardware), los programas (Software), los usuarios (Humanware), algunos autores incluyen en esta organización los datos. Todos estos componentes son importantes y cada uno de ellos juega un papel fundamental para el correcto funcionamiento del sistema, de tal manera que ellos deben complementarse, ser compatibles y evolucionar a la par

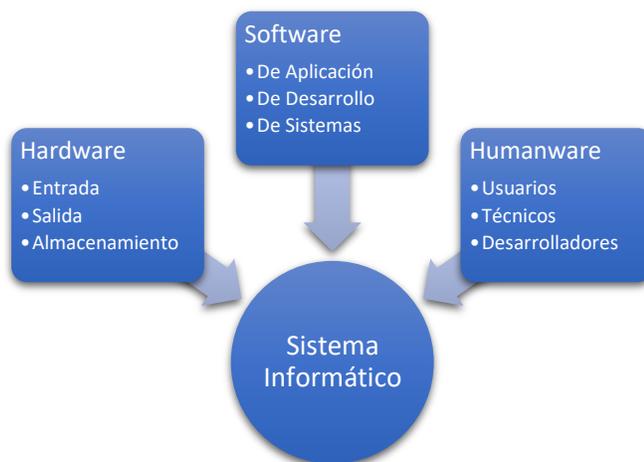


Ilustración 22. Componentes de un sistema informático.

Software

Corresponde a la parte intangible de un computador, la palabra software se refiere a las instrucciones que se incorporan a un sistema informático para que este lleve a cabo una determinada función, se enlistan las categorías en la figura 23.

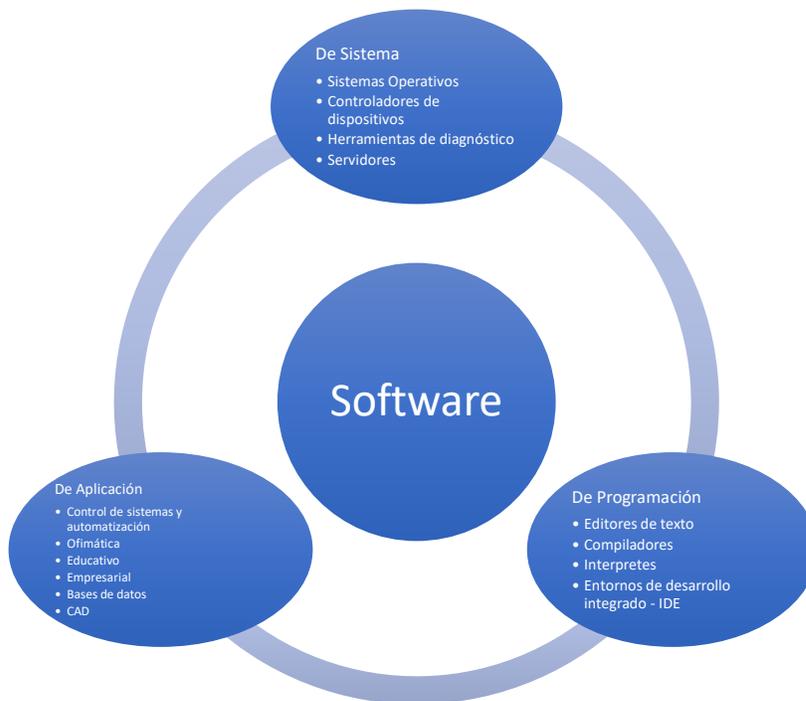


Ilustración 23. Clasificación de Software.

Programación

Es el proceso de diseñar, codificar, depurar y mantener el código fuente de un programa computacional, el cual fue desarrollado en un lenguaje de programación, con el propósito de solucionar o automatizar algún proceso específico. Puede orientarse a un funcionamiento netamente a nivel de software, inclusive en forma multiplataforma, de la misma manera puede implementarse para controlar y/o recibir información de otros programas o dispositivos hardware, para trabajar con los datos recibidos.

3.2.3 Descripción del lenguaje de programación a utilizar en programa

ejemplo

Se utilizará el programa Excel debido a su versatilidad y extenso uso en muchas áreas de la ingeniería en El Salvador, siendo una herramienta imprescindible para ingresar al mercado laboral. Excel es un programa que forma parte de la suite de Office desarrollado por Microsoft del tipo hoja de cálculo que permite organizar información y realizar cálculos numéricos básicos y avanzados, además, admite la generación de reportes mediante gráficos y tablas dinámicas lo que lo convierte en la herramienta ideal para análisis de datos. Así, seremos capaces de realizar los cálculos correspondientes para el diseño de nuestro sistema para continuar el análisis correspondiente mediante gráficas de comportamiento.

Para el desarrollo del programa ejecutable se utilizarán las macros de Excel las cuales son un conjunto de comandos que están disponibles para ser ejecutadas, debido al tipo de programa que se desea crear, donde siempre se realizarán los mismos cálculos con los datos de entrada que proporcionará el usuario. Las macros se escriben en un lenguaje de computadora especial que es conocido como Visual Basic for Applications (VBA). Este lenguaje permite acceder a prácticamente todas las funcionalidades de Excel y con ello también ampliar la funcionalidad del programa.

Para acceder a todas las funcionalidades necesarias para la creación del programa debemos ingresar al Editor de Visual Basic, así se podrá diseñar la interfaz de usuario donde se ingresarán las entradas y permitirá visualizar las salidas (datos de diseño y gráficas).

Aspectos básicos de visual basic

Un Programa realizado en dos es un conjunto de sentencias que se ejecutan de arriba a abajo más o menos, en el orden que el programador ha diseñado. Una aplicación en Windows presenta todas las opciones posibles en uno o más Formularios para que el usuario elija entre ellas. La secuencia en la que se ejecutarán las sentencias no puede ser prevista por el programador. Esto da lugar a la programación orientada a eventos.

Para programar una aplicación en Windows hay que escribir código separado para cada objeto en general, quedando la aplicación dividida en pequeños procedimientos, conducido cada uno de ellos por un suceso. Un suceso es una acción reconocida por un objeto (formulario o control) el suceso puede ser causado por el usuario o, indirectamente por el código.

En Visual Basic cada formulario y cada control tienen predefinidos un conjunto de sucesos. Cuando ocurren estos sucesos, Visual Basic invoca al procedimiento asociado con el objeto para ese suceso. Para desarrollar una aplicación en Visual Basic, los pasos que se seguirán son:

1. Crear la interfaz de usuario.
2. Modificar las propiedades de cada objeto.
3. Escribir el código asociado a los eventos de cada objeto.

Enlazando Visual Basic a Excel

Es importante comprender que cada elemento de Excel es representado en VBA como un objeto. Por ejemplo, existe el objeto Workbook que representa a un libro

de Excel. También existe el objeto Sheet que representa una hoja y el objeto Chart para un gráfico. Continuando con los conceptos, debemos mencionar que cada objeto tiene sus propiedades y métodos.

Las propiedades nos ayudan a describir mejor los objetos como ActiveSheet (*Hoja activa*), Name (*Nombre*), ReadOnly (*Solo Lectura*), Saved (*Guardado*) que son propiedades del objeto Workbook. En cambio, los métodos son las acciones que podemos realizar con el objeto, ejemplo de estos para el objeto Workbook son: Save (*Guardar*), Close (*Cerrar*), PrintOut (*Imprimir*), Protect (*Proteger*), Unprotect (*Desproteger*).

3.2.2 Descripción de programa utilizado para programar

El editor de Visual Basic puede identificarse como un IDE (Entorno de desarrollo integrado por sus siglas en inglés) empaquetado como un programa de aplicación, es decir, presenta cuatro partes complementarias para el desarrollo de aplicaciones: 1) un editor de código donde se escriben las instrucciones de la aplicación; 2) un depurador que se encarga de la revisión y corrección de errores en el código fuente; 3) un compilador que realiza la traducción del código fuente a lenguaje de máquina y; 4) un GUI o constructor de interfaz gráfica que permite diseñar la parte gráfica del programa de forma visual facilitando su desarrollo. Se accede por medio del botón "Visual Basic" del entorno de MS Excel (Ver ilustración 24).

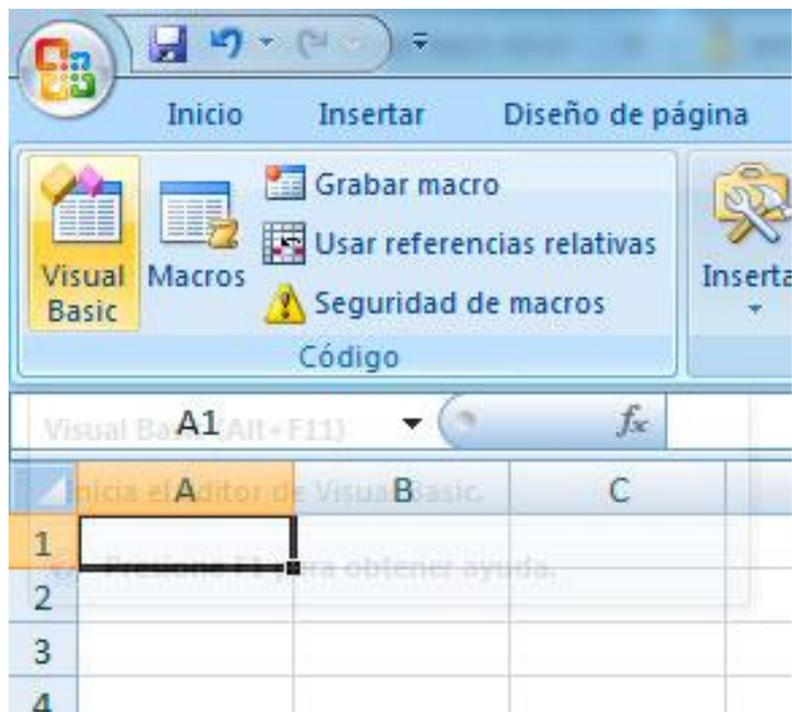


Ilustración 24. Acceso al editor de Visual Basic en Excel.

Los elementos que componen la pantalla de Visual Basic son (Ver figura 25):

Barra de menús. Visualiza las órdenes que se utilizan para desarrollar, probar y archivar una aplicación. Los menús que nos encontramos son:

- Archivo: contiene las órdenes para trabajar con archivos.
- Edición: contiene las herramientas que ayudan a escribir el código.
- Ver: da acceso rápido a todas las partes del Programa.
- Insertar: permite incluir nuevos módulos y formularios en la aplicación.
- Ejecutar: permite verificar la aplicación mientras se desarrolla.
- Herramientas: controla el aspecto y propiedades del entorno.
- Complementos: contiene las utilidades para el manejo de bases de datos.

- Ayuda: proporciona una valiosa, cómoda y potente ayuda, muy bien pensada y elaborada, con la cual, el principiante puede aprender muchas cosas y el programador experimentado puede auxiliarse cuando le sea necesario.

Ventana o barra de herramientas. Facilita el uso a las órdenes más comunes.

De izquierda a derecha los iconos que aparecen permiten:

- Formulario: crear un nuevo Formulario.
- Modulo: crear un nuevo módulo. Se utiliza para crear fragmentos de código independiente del formulario.
- Abrir Project: abrir un proyecto.
- Guardar Proyecto: guardar un proyecto.
- Bloquear Controles: impedir que se muevan los controles del formulario involuntariamente.
- Editor de Menús: visualizar la ventana de diseño de menús.
- Propiedades: visualizar la ventana de propiedades de los distintos objetos.
- Examinador de Objetos: mostrar las clases, métodos, propiedades, etc. de los objetos disponibles en la aplicación.
- Proyecto: visualizar la Ventana de proyecto.
- Inicio: ejecutar la aplicación diseñada y así poder probar su funcionamiento.
- Interrumpir: realizar una pausa en la ejecución de la aplicación bajo prueba, que puede reiniciarse cuando se desee con el botón continuar.

- Terminar: terminar la ejecución de la aplicación bajo prueba para volver a la etapa de diseño.
- Alternar Puntos de Ruptura:
- Inspección Instantánea: visualizar el valor del elemento seleccionado en la ventana de código.
- Llamadas: visualizar la estructura de llamadas activas.

Caja de herramientas. Provee de un conjunto de herramientas que permiten colocar los controles en el formulario durante el diseño del proyecto. Ventana de proyecto. En esta ventana están especificados los ficheros (formularios, módulos, etc.) que forman la aplicación y, dónde se seleccionarán para crearlos o modificarlos. Esto se debe a que hay ficheros que pueden utilizarse en más de una aplicación. Además, contiene dos botones: Ver Formulario que visualiza el formulario seleccionado y; Ver Código que visualiza el código del fichero seleccionado.

Ventana del formulario. Es la ventana que da lugar a la interfaz de usuario. Es la ventana que se personalizará. Los puntos que aparecen sobre el formulario, forman una rejilla que ayuda a la hora de alinear los controles que se sitúan sobre el mismo. Esta rejilla desaparece en tiempo de ejecución. Para eliminarla en tiempo de diseño se accederá a la opción Herramientas/Opciones/Ficha Entorno/Mostrar Cuadrícula.

Ventana de propiedades. Especifica las propiedades de cada uno de los objetos. En cada momento mostrará las propiedades del objeto seleccionado en el formulario. Está formada por dos partes: la lista desplegable de objetos que

visualiza el nombre del objeto seleccionado y, la lista de propiedades del objeto seleccionado.

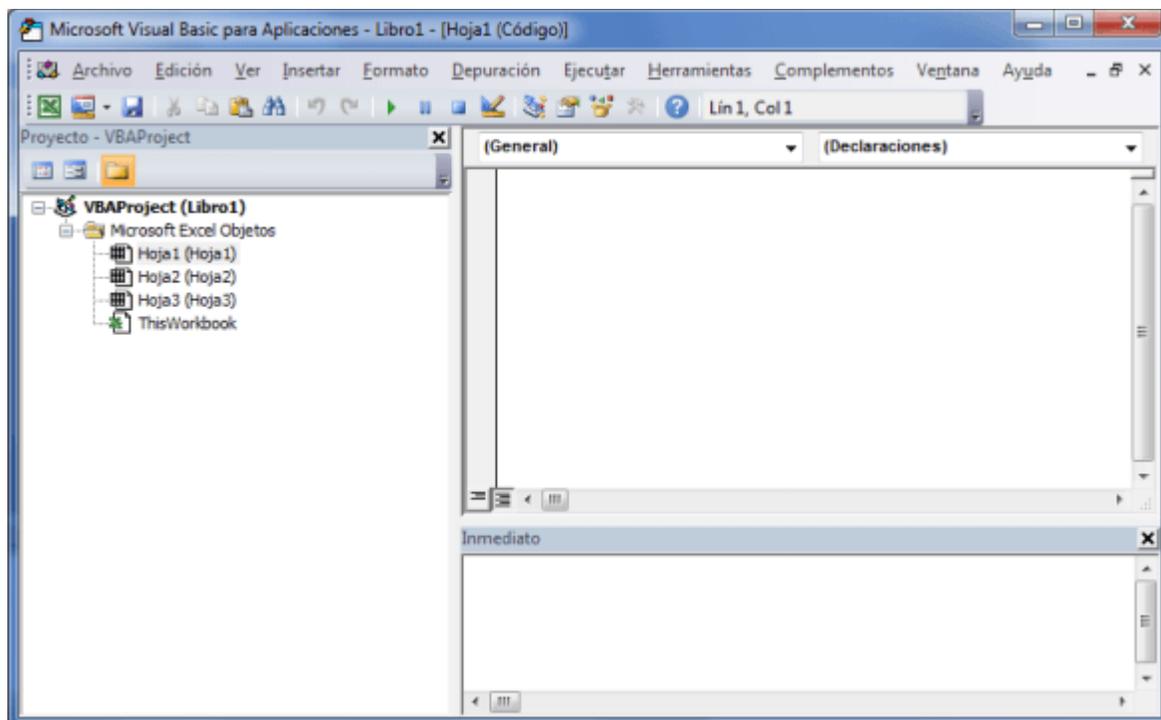


Ilustración 165. Pantalla del editor de Visual Basic.

CAPITULO 4

4.1. Manual de usuario

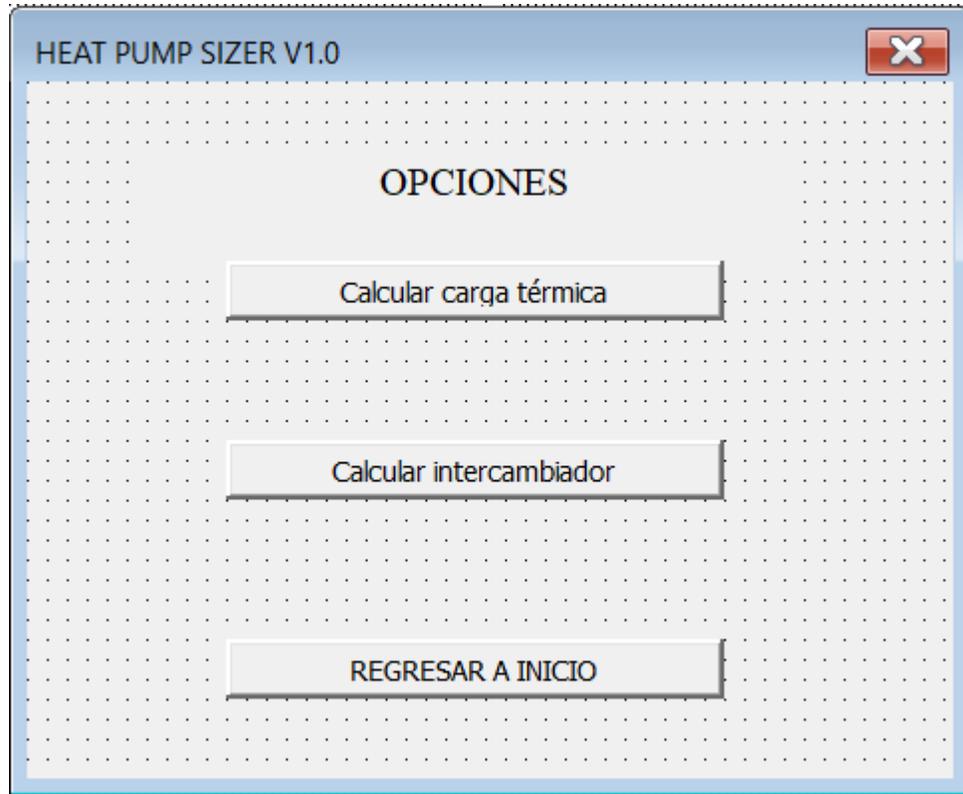


Ilustración 176. Pantalla inicial.

En la pantalla de inicio (Ilustración 26) el software consulta la acción a realizar, esta puede ser de 2 tipos:

1) Calcular carga térmica:

Esta aplicación considera los parámetros termodinámicos propios de un espacio que será climatizado, se obtendrán los datos necesarios para la selección de la bomba de calor.

2) Calcular intercambiador:

Este formulario corresponde a los cálculos necesarios para el dimensionamiento del intercambiador enterrado, toma en cuenta la carga térmica calcula en el formulario anterior o puede ser

modificada, además, incluye las opciones comerciales para tuberías de sistemas GSHP.

4.1.1. Calcular carga térmica

The screenshot shows the 'HEAT PUMP SIZER V1.0' software window. The title bar includes the text 'HEAT PUMP SIZER V1.0' and a close button. The main window title is 'CÁLCULO DE CARGA TÉRMICA' with an 'Info' button next to it. The interface is divided into two main sections: 'Características del área a climatizar' and 'Temperaturas'. The 'Características del área a climatizar' section includes input fields for 'Ancho' (m), 'Largo' (m), 'Alto' (m), 'Área de ventanas' (Metros cuadrados), 'Área del marco de ventanas' (Metros cuadrados), 'Área de puerta' (Metros cuadrados), 'Tipo de puerta' (dropdown), 'Orientación de la habitación' (dropdown), and 'Tono de las paredes' (dropdown). The 'Temperaturas' section includes input fields for 'Temperatura interior deseada' (°C) and 'Temperatura ambiente' (°C). Below these sections is the 'Ocupación y equipos' section, which includes input fields for 'Número de personas', 'Tipo de luminarias' (dropdown), 'Número de luminarias', 'Potencia de luminarias' (W), 'Número de computadoras', 'Potencia de computadoras' (W), and 'Suma de potencia de equipos adicionales' (W). At the bottom of the window, there are three buttons: 'Página de inicio', 'Regresar', and 'Calcular carga térmica'.

Ilustración 187. Pantalla de toma de datos para cálculo de carga térmica.

En la pantalla de inicio de toma de datos (Ilustración 27) se consultan datos relativos a los parámetros del recinto y su ocupación.

4.1.2. Cálculo de intercambiador enterrado tipo vertical

The screenshot shows a software window titled "HEAT PUMP SIZER V1.0" with a close button in the top right corner. The main title is "DISEÑO DE INTERCAMBIADOR TIPO VERTICAL". The interface is divided into two main sections: "Datos de la bomba de calor" and "Datos de la instalación".

Datos de la bomba de calor (Heat pump data):

- Includes an "Info" button.
- Field: "CAPACIDAD DE LA BOMBA DE CALOR SELECCIONADA:" with a text input box and unit "W".
- Field: "COP DE LA BOMBA DE CALOR:" with a text input box.

Datos de la instalación (Installation data):

- Includes an "Info" button.
- Field: "DIÁMETRO DE LA TUBERÍA:" with a dropdown menu.
- Field: "DIÁMETRO DEL AGUJERO:" with a dropdown menu.
- Field: "TEMPERATURA PROMEDIO DEL SUELO:" with a text input box and unit "°C".
- Field: "CARGA TÉRMICA:" with a text input box and unit "W".

At the bottom, there are three buttons: "Página de inicio", "Regresar", and "Continuar".

Ilustración 198. Pantalla de toma de datos para cálculo de intercambiador enterrado.

En la pantalla de inicio de toma de datos (Ilustración 28) se consulta datos concernientes a los parámetros del suelo, tuberías y cargas para el diseño del intercambiador.

Resultados

Dentro del cuadro de dialogo de resultados (Ilustración 29), se puede observar el resultado del cálculo de la carga térmica para el sistema.



The image shows a software window titled "HEAT PUMP SIZER V1.0" with a close button in the top right corner. The main content area has a light gray background with a dotted grid pattern. At the top center, the text "Carga térmica" is displayed. Below this, there is a label "Carga térmica:" followed by a white rectangular input field. To the right of the input field, the unit "kW" is shown. At the bottom of the grid, there are two gray buttons: "Regresar" on the left and "Continuar" on the right.

Ilustración 209. Presentación de carga térmica del sistema.

La interfaz de la ilustración 30 muestra los resultados propuestos para la elección del sistema de bomba de calor, con los datos recomendados para la instalación del intercambiador enterrado y la bomba de calor inversa.

HEAT PUMP SIZER V1.0

INTERCAMBIADOR ENTERRADO

Selección de bomba hidráulica

Material de la tubería

Diametro de la tubería mm

longitud de la tubería m

Diámetro del agujero mm

Tipo de lechada recomendada

BOMBA DE CALOR INVERSA

Potencia W

COP

Recirculación de aire recomendada cfm

Flujo de aire en el recinto cfm

Nuevo Cálculo CERRAR CÁLCULO Gráfica de comportamiento

Ilustración 30. Cuadro de dialogo de resultados.

La grafica de comportamiento mostrada en la ilustración 31 presenta los valores de consumo eléctrico del sistema de bomba de calor en relación con la hora del día a la que sucede, es decir, la energía necesaria para evacuar el calor en el interior en cada hora del día.

HEAT PUMP SIZER V1.0

✕

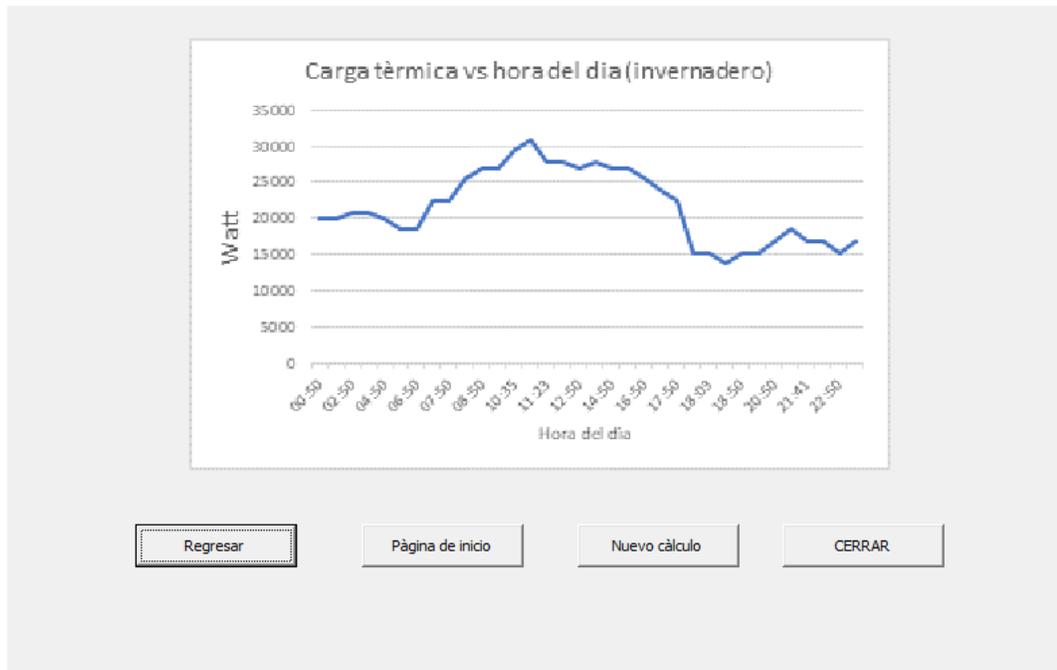


Ilustración 31. Comportamiento de la carga térmica por hora en el lapso del día.

CONCLUSIONES

- Como se pudo observar en la comparación de resultados, la utilización de un software para dimensionar un equipo, en este caso una bomba de calor inversa, nos ayuda a obtener resultados más confiables ya que tenemos mayor precisión con los datos obtenidos debido a las aproximaciones. La implementación de este tipo de tecnologías en los recursos renovables, en este caso, a la geotermia de baja entalpía, nos proporciona una ventaja sumamente importante a la hora de dimensionar los sistemas que aprovechen este recurso para climatizar ya que nos permitirá reducir tiempo en el diseño, además con ciertas mejoras, predecir además de su comportamiento termodinámico, los efectos de esto a nivel económico y energético.
- El desarrollo tecnológico ha permitido correlacionar distintas áreas de la ingeniería, es importante que el ingeniero moderno salga de su área y desarrolle habilidades “ajenas” de su especialidad. La ingeniería mecánica, siendo ésta la especialidad que cubre más áreas del conocimiento, tiene que ser capaz de ejecutar proyectos apoyada de herramientas propias de otras especialidades. En este caso, se utilizan herramientas de programación desarrolladas por la ingeniería de sistemas informáticos para simplificar el proceso de diseño de un sistema de climatización cuyos cálculos corresponden al ingeniero mecánico. Así, la correlación de la ingeniería mecánica con la ingeniería de sistemas informáticos ha concluido en el

desarrollo de un programa capaz de calcular las dimensiones y capacidades de los componentes principales de un sistema de climatización con bomba de calor inversa que aproveche el recurso geotérmico.

- La geotermia debe ser una energía mayormente explotada en El Salvador debido al potencial que presentan diversas investigaciones. Además, se debe fomentar la ejecución de proyectos que utilicen directamente la energía geotérmica de baja entalpía para disminuir consumo de energía eléctrica, aprovechando directamente la energía contenida en el terreno o ambiente en algunos procesos industriales o no industriales.

RECOMENDACIONES

- Para obtener mejores resultados se recomienda tener un mejor panorama del entorno al que estará expuesto el sistema de climatización mediante datos obtenidos directamente del sitio en que se va a instalar la bomba de calor inversa. Estos datos pueden ser obtenidos mediante sensores instalados en el lugar cuyas mediciones sean proporcionadas en periodos de tiempo suficientemente cortos para tener una proyección mas clara del microclima que se quiere alcanzar.
- Todo sistema debe desarrollarse con la posibilidad de mejorarse continuamente, así, exponemos ideas de mejora para nuevas versiones de nuestro programa “*HEAT PUMP SIZER*”: 1) El programa tendrá la posibilidad de pronosticar costos de funcionamiento, agregando dentro de su programación el cálculo de costos atendiendo el precio local de la energía utilizada y ser capaz de ser visualizada mediante gráficas; 2) Para precisar con mayor exactitud la carga térmica y los futuros costos de funcionamiento, el sistema se enlazará con el pronóstico climático local, agregando datos de temperatura ambiente a los cálculos dentro del sistema; 3) Se realizará una *APP* que permita a los usuarios realizar sus diseños preliminares desde su dispositivo móvil.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. Santoyo & R. Barragán, (2010) Energía geotérmica [Revista, Academia mexicana de ciencias]

- [2] R. Bertani (2007) World geothermal generation in 2007 [boletín trimestral del centro GEO-HEAT]

- [3] B. Kapp, (2013) primer invernadero geotérmico profundo en Alemania

- [4] M. Mburu (2014) Geothermal Energy utilization at Oserian Flower Farm Naivasha [UNU-GTP & LaGeo]

- [5] Y. Cengel (2007) Transferencia de calor y masa (3ª ed.) [McGraw Hill]

- [6] P. Ellis & M. Conover (1981) Materials selection guidelines for geothermal energy utilization systems

- [7] G. Llopis (2008) Guía de la energía geotérmica [Dirección general de la industria, Madrid: España]

- [8] F. Incropera (2007) Fundamentals of heat and mass transfer 6ª ed. Mexico: Pearson education, inc.

- [9] K. Ochsner (2008) Geothermal heat pumps, a guide for planning & installing [Earthscan, Londres]

- [10] S. Kakac & H. Liu (2002) Heat exchangers selection, rating, and thermal design 2ª ed. Florida, U.S.A.: CRC press

- [11] A. Ragnarsson & M. Ágústsson, (2014) Geothermal Energy in Horticulture [UNU-GTP & LaGeo]

- [12] G. Llopis (2008) Guía de la energía geotérmica. [Madrid, España, Fundación de la energía de la comunidad de Madrid]
- [13] E. Tarbuck, F. Lutgens y D. Tasa (2005) Ciencia de la tierra una introducción a la geología física 8ª ed. [Madrid, España]
- [14] I. Arnabat (2015) Funcionamiento de la bomba de calor para calefacción y agua caliente [Blog web, CALORYFRIO] rescatado 3/03/2021 de: <https://www.caloryfrio.com/calefaccion/bomba-de-calor/bomba-de-calor.html>
- [15] Estadísticas energéticas (Página de transparencia gubernamental) consultada 10/10/2021 de: <http://estadisticas.cne.gob.sv/>
- [16] Ventajas y desventajas de la geotermia para viviendas [Blog web, Energanova] rescatado 17/04/2021 de: <https://energanova.es/ventajas-y-desventajas-de-la-geotermia-para-viviendas/#>
- [17] Bomba de calor geotérmica (2016) [página web, Geotermia vertical instalaciones, Madrid: España] rescatado 17/04/2021 de: <https://www.geotermiavertical.es/bomba-calor-geotermica/>
- [18] M. Seisdedos (2012) Climatización de edificios por medio del intercambio de calor con el subsuelo y agua subterránea aspectos a considerar en el contexto local [Tesis de grado, Universidad de Chile]
- [19] D. Banks (2012) An Introduction to thermos geology, ground source heating and cooling 2ª ed.

ANEXOS

1. Código en Visual Basic.

```
Private Sub Workbook_Open()
```

```
Application.Visible = False
```

```
Presentacion.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_QueryClose(Cancel As Integer, CloseMode As Integer)
```

```
    If CloseMode = vbFormControlMenu Then
```

```
        Cancel = True
```

```
        MsgBox "¡Usar los botones de formulario!"
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CargaTerIn_Change()
```

End Sub

Private Sub CargaTerDo_Change()

End Sub

Private Sub CargaTerDo_Click()

End Sub

Private Sub CommandButton1_Click()

Unload Me

Datos_domiciliar.Show

End Sub

Private Sub Continuar_Click()

Range("D41") = CargaTerDo

Unload Me

Resultados.Show

End Sub

Private Sub UserForm_Click()

End Sub

Private Sub UserForm_Initialize()

CargaTerDo = Range("J67")

End Sub

Private Sub UserForm_QueryClose(Cancel As Integer, CloseMode As Integer)

If CloseMode = vbFormControlMenu Then

Cancel = True

```
MsgBox "¡Usar los botones de formulario!"
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CargaTer_Enter()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CargaTerIn_Change()
```

```
CargaTerIn.Value = Cells(20, 4)
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CargaTerIn_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Unload Me
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Continuar_Click()
```

```
Range("D41") = CargaTerIn
```

```
Unload Me
```

```
Resultados.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

```
CargaTerIn = Range("J67")
```

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Unload Me

Tipo_Aplicacion.Show

End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()

Unload Me

Presentacion.Show

End Sub

Private Sub Conti_Click()

If IsNumeric(Grosor.Value) Then

 If Grosor.Value > 0 Then

 Range("J5") = Grosor.Value

 Else

 MsgBox (Grosor.Value & ": Grosor de pared debe ser positivo")

 Grosor.SetFocus

 Exit Sub

End If

Else

 MsgBox (Grosor.Value & ": Grosor de pared debe ser número")

 Grosor.SetFocus

 Exit Sub

End If

```
If IsNumeric(TempIn.Value) Then

    If TempIn.Value > 0 Then

        Range("J6") = TempIn.Value

    Else

        MsgBox (TempIn.Value & ": Temperatura al interior del recinto debe ser
positivo")

        TempIn.SetFocus

        Exit Sub

    End If

Else

    MsgBox (TempIn.Value & ": Temperatura al interior del recinto debe ser número")

    TempIn.SetFocus

    Exit Sub

End If
```

```
If IsNumeric(TempAm.Value) Then
```

```
    If TempAm.Value > 0 Then
```

```
        Range("J7") = TempAm.Value
```

```
    Else
```

```
        MsgBox (TempAm.Value & ": Temperatura ambiente debe ser positivo")
```

```
        TempAm.SetFocus
```

```
    Exit Sub
```

```
End If
```

```
Else
```

```
    MsgBox (TempAm.Value & ": Temperatura ambiente debe ser número")
```

```
    TempAm.SetFocus
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If IsNumeric(AreaVen.Value) Then
```

```
    If AreaVen.Value > 0 Then
```

```
        Range("J10") = AreaVen.Value
```

Else

MsgBox (AreaVen.Value & ": El àrea de la superficie de la ventana debe ser positivo")

AreaVen.SetFocus

Exit Sub

End If

Else

MsgBox (AreaVen.Value & ": El àrea de la superficie de la ventana debe ser nùmero")

AreaVen.SetFocus

Exit Sub

End If

If OpSur.Value = True Then

Range("J11") = 0.49

Else

If OpSuEO.Value = True Then

```
Range("J11") = 0.54
```

```
Else
```

```
    If OpEO.Value = True Then
```

```
        Range("J11") = 0.57
```

```
    Else
```

```
        Range("J11") = 0.57
```

```
    End If
```

```
End If
```

```
End If
```

```
If IsNumeric(Personas.Value) Then
```

```
    If Personas.Value > 0 Then
```

```
        Range("J13") = Personas.Value
```

```
    Else
```

```
        MsgBox (Personas.Value & ": Numero de personas debe ser positivo")
```

```
        Personas.SetFocus
```

```
    Exit Sub
```

End If

Else

MsgBox (Personas.Value & ": Numero de personas debe ser número")

Personas.SetFocus

Exit Sub

End If

If IsNumeric(Luminarias.Value) Then

If Luminarias.Value > 0 Then

Range("J15") = Luminarias.Value

Else

MsgBox (Luminarias.Value & ": Numero de luminarias debe ser positivo")

Luminarias.SetFocus

Exit Sub

End If

Else

MsgBox (Luminarias.Value & ": Numero de luminarias debe ser número")

Luminarias.SetFocus

Exit Sub

End If

If IsNumeric(PotLum.Value) Then

If PotLum.Value > 0 Then

Range("J16") = PotLum.Value

Else

MsgBox (PotLum.Value & ": Potencia de luminaria debe ser positivo")

PotLum.SetFocus

Exit Sub

End If

Else

MsgBox (PotLum.Value & ": Potencia de luminaria debe ser número")

PotLum.SetFocus

Exit Sub

End If

If IsNumeric(Computadoras.Value) Then

 If Computadoras.Value >= 0 Then

 Range("J18") = Computadoras.Value

 Else

 MsgBox (Computadoras.Value & ": Numero de computadoras debe ser positivo")

 Computadoras.SetFocus

 Exit Sub

End If

Else

 MsgBox (Computadoras.Value & ": Numero de computadoras debe ser número o cero en caso que no se tengan computadoras o televisores en el recinto ")

 Computadoras.SetFocus

 Exit Sub

End If

```
If IsNumeric(PotCom.Value) Then
```

```
    If PotCom.Value >= 0 Then
```

```
        Range("J19") = PotCom.Value
```

```
    Else
```

```
        MsgBox (PotCom.Value & ": Potencia del dispositivo debe ser positivo o cero  
en caso que no tenga computadora o televisor")
```

```
        PotCom.SetFocus
```

```
    Exit Sub
```

```
End If
```

```
Else
```

```
    MsgBox (PotCom.Value & ": Potencia del dispositivo debe ser número")
```

```
    PotCom.SetFocus
```

```
    Exit Sub
```

```
End If
```

Unload Me

TipoSueloDo.Show

End Sub

Private Sub UserForm_Click()

End Sub

Private Sub UserForm_QueryClose(Cancel As Integer, CloseMode As Integer)

If CloseMode = vbFormControlMenu Then

Cancel = True

MsgBox "¡Usar los botones de formulario!"

End If

End Sub

Private Sub CalcularCarga_Click()

If Seco = True Then

Range("F48") = Range("D31")

Range("F58") = Range("F31")

Else

 If Humedo = True Then

 Range("F48") = Range("D32")

 Range("F58") = Range("F32")

 Else

 If Saturado = True Then

 Range("F48") = Range("D33")

 Range("F58") = Range("F33")

 Else

 Range("F48") = Range("D32")

 Range("F58") = Range("F32")

 End If

End If

End If

If IsNumeric(TempAm.Value) Then

 If TempAm.Value > 0 Then

 Range("F8") = TempAm.Value

 Else

 MsgBox (TempAm.Value & ": Temperatura ambiente debe ser positivo")

 TempAm.SetFocus

 Exit Sub

End If

Else

 MsgBox (TempAm.Value & ": Temperatura ambiente debe ser número")

 TempAm.SetFocus

 Exit Sub

End If

```
If IsNumeric(TempIn.Value) Then
```

```
    If TempIn.Value > 0 Then
```

```
        Range("F9") = TempIn.Value
```

```
    Else
```

```
        MsgBox (TempIn.Value & ": Temperatura interna debe ser positivo")
```

```
        TempIn.SetFocus
```

```
    Exit Sub
```

```
End If
```

```
Else
```

```
    MsgBox (TempIn.Value & ": Temperatura interna debe ser número")
```

```
    TempIn.SetFocus
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If IsNumeric(AreaCubierta.Value) Then
```

```
    If AreaCubierta.Value > 0 Then
```

```
        Range("D14") = AreaCubierta.Value
```

Else

MsgBox (AreaCubierta.Value & ": Area de la cubierta del invernadero debe ser positivo")

AreaCubierta.SetFocus

Exit Sub

End If

Else

MsgBox (AreaCubierta.Value & ": Area de la cubierta del invernadero debe ser número")

AreaCubierta.SetFocus

Exit Sub

End If

If IsNumeric(AreaTer.Value) Then

If AreaTer.Value > 0 Then

Range("D15") = AreaTer.Value

Else

```
MsgBox (AreaTer.Value & ": Area de terreno cubierto por la cosecha debe ser  
positivo")
```

```
AreaTer.SetFocus
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
Else
```

```
MsgBox (AreaTer.Value & ": Area de terreno cubierto por la cosecha debe ser  
número")
```

```
AreaTer.SetFocus
```

```
Exit Sub
```

```
End If
```

```
If IsNumeric(AreaCosecha.Value) Then
```

```
    If AreaCosecha.Value > 0 Then
```

```
        Range("D16") = AreaCosecha.Value
```

```
    Else
```

```
        MsgBox (AreaCosecha.Value & ": Area de la cosecha debe ser positivo")
```

AreaCosecha.SetFocus

Exit Sub

End If

Else

MsgBox (AreaCosecha.Value & ": Area de la cosecha debe ser número")

AreaCosecha.SetFocus

Exit Sub

End If

If IsNumeric(IndiceArea.Value) Then

If IndiceArea.Value > 0 Then

Range("D17") = IndiceArea.Value

Else

MsgBox (IndiceArea.Value & ": Indice de área foliar debe ser positivo")

IndiceArea.SetFocus

Exit Sub

End If

Else

MsgBox (IndiceArea.Value & ": Indice de àrea foliar debe ser nùmero")

IndiceArea.SetFocus

Exit Sub

End If

Range("D41") = Range("D21")

Range("J66") = Range("D21")

Unload Me

CargaInv.Show

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Unload Me

Tipo_Aplicacion.Show

End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()

Unload Me

Presentacion.Show

End Sub

Private Sub CommandButton4_Click()

End Sub

```
Private Sub UserForm_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_QueryClose(Cancel As Integer, CloseMode As Integer)
```

```
    If CloseMode = vbFormControlMenu Then
```

```
        Cancel = True
```

```
        MsgBox ";Usar los botones de formulario!"
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

```
    Application.Visible = False
```

```
    Dim CurrentFileName As String
```

```
    Dim CurrentChart As ChartObject
```

```
For Each CurrentChart In ActiveSheet.ChartObjects
```

```
    Dim cht As Chart
```

```
    Dim wks As Worksheet
```

```
    Set wks = ActiveWorkbook.Sheets(1)
```

```
    Set cht = wks.ChartObjects(CurrentChart.Name).Chart
```

```
    cht.SeriesCollection("Series1").Select
```

```
        CurrentFileName = ThisWorkbook.Path & "\" & CurrentChart.Name & ".gif"
```

```
        CurrentChart.Chart.Export Filename:=CurrentFileName, FilterName:="GIF"
```

```
    Next CurrentChart
```

```
If Range("G15") = 1 Then
```

```
    CurrentFileName = ThisWorkbook.Path & "\Chart 1.gif"
```

```
    GraCar.Image1.Picture = LoadPicture(CurrentFileName)
```

```
Kill ThisWorkbook.Path & "\Chart 2.gif"
```

```
Else
```

```
CurrentFileName = ThisWorkbook.Path & "\Chart 2.gif"
```

```
GraCar.Image1.Picture = LoadPicture(CurrentFileName)
```

```
Kill ThisWorkbook.Path & "\Chart 1.gif"
```

```
End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Unload Me
```

Tipo_Aplicacion.Show

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Unload Me

ActiveWorkbook.Save

Application.Quit

End Sub

Private Sub Label1_Click()

End Sub

Private Sub Label2_Click()

End Sub

```
Private Sub Label4_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Initialize()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_QueryClose(Cancel As Integer, CloseMode As Integer)
```

```
    If CloseMode = vbFormControlMenu Then
```

```
        Cancel = True
```

```
        MsgBox "¡Usar los botones de formulario!"
```

```
    End If
```

End Sub

Private Sub CommandButton1_Click()

Unload Me

ActiveWorkbook.Save

Application.Quit

End Sub

Private Sub CommandButton2_Click()

Unload Me

Tipo_Aplicacion.Show

End Sub

Private Sub CommandButton3_Click()

Unload Me

GraCar.Show

End Sub

Private Sub Label7_Click()

End Sub

Private Sub Label8_Click()

End Sub

Private Sub UserForm_Initialize()

Material = Range("J40").Value

Diametro = Range("F48").Value

Longitud = Range("J63").Value

Caudal = Range("J62").Value

Perdidas = Range("J64").Value

```
Flujo = Range("J65").Value
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Terminate()
```

```
Application.Visible = True
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_QueryClose(Cancel As Integer, CloseMode As Integer)
```

```
    If CloseMode = vbFormControlMenu Then
```

```
        Cancel = True
```

```
        MsgBox "¡Usar los botones de formulario!"
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
Range("G15") = 1
```

```
Unload Me
```

```
Datos_Invernadero.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
Range("G15") = 2
```

```
Unload Me
```

```
Datos_domiciliar.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton3_Click()
```

```
Unload Me
```

```
Presentacion.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Click()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_QueryClose(Cancel As Integer, CloseMode As Integer)
```

```
    If CloseMode = vbFormControlMenu Then
```

```
        Cancel = True
```

```
        MsgBox "¡Usar los botones de formulario!"
```

```
    End If
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton1_Click()
```

```
    If Seco1 = True Then
```

Range("F48") = Range("D31")

Range("F58") = Range("F31")

Else

 If Humedo1 = True Then

 Range("F48") = Range("D32")

 Range("F58") = Range("F32")

 Else

 If Saturado1 = True Then

 Range("F48") = Range("D33")

 Range("F58") = Range("F33")

 Else

 Range("F48") = Range("D32")

 Range("F58") = Range("F32")

 End If

 End If

End If

```
Range("D41") = Range("J22")
```

```
Range("J66") = Range("J22")
```

```
Unload Me
```

```
CargaDo.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub CommandButton2_Click()
```

```
Unload Me
```

```
Datos_domiciliar.Show
```

```
End Sub
```

```
Private Sub UserForm_Click()
```

End Sub

Private Sub UserForm_QueryClose(Cancel As Integer, CloseMode As Integer)

 If CloseMode = vbFormControlMenu Then

 Cancel = True

 MsgBox "¡Usar los botones de formulario!"

 End If

End Sub

2. Tablas

Table 1 Surface Conductances and Resistances for Air

Position of Surface	Direction of Heat Flow	Surface Emittance, ϵ					
		Non-reflective $\epsilon = 0.90$		Reflective $\epsilon = 0.20$ $\epsilon = 0.05$			
		h_i	R	h_i	R	h_i	R
STILL AIR							
Horizontal	Upward	9.26	0.11	5.17	0.19	4.32	0.23
Sloping—45°	Upward	9.09	0.11	5.00	0.20	4.15	0.24
Vertical	Horizontal	8.29	0.12	4.20	0.24	3.35	0.30
Sloping—45°	Downward	7.50	0.13	3.41	0.29	2.56	0.39
Horizontal	Downward	6.13	0.16	2.10	0.48	1.25	0.80
MOVING AIR (Any position)		h_o	R				
Wind (for winter)	Any	34.0	0.030	—	—	—	—
6.7 m/s (24 km/h)							
Wind (for summer)	Any	22.7	0.044	—	—	—	—
3.4 m/s (12 km/h)							

Notes:

1. Surface conductance h_i and h_o measured in $W/(m^2 \cdot K)$; resistance R in $m^2 \cdot K/W$.
2. No surface has both an air space resistance value and a surface resistance value.
3. For ventilated attics or spaces above ceilings under summer conditions (heat flow down), see [Table 5](#).
4. Conductances are for surfaces of the stated emittance facing virtual blackbody surroundings at the same temperature as the ambient air. Values are based on a surface-air temperature difference of 5.5°C and for surface temperatures of 21°C.
5. See [Chapter 3](#) for more detailed information, especially [Tables 3](#) and [6](#) and see [Figure 1](#) for additional data.
6. Condensate can have a significant impact on surface emittance (see [Table 2](#)).

Table 2 Emittance Values of Various Surfaces and Effective Emittances of Air Spaces^a

Surface	Average Emittance ϵ	Effective Emittance ϵ_{eff} of Air Space	
		One Surface Emittance ϵ ; Other, 0.9 Emittance ϵ	Both Surfaces
Aluminum foil, bright	0.05	0.05	0.03
Aluminum foil, with condensate just visible ($> 0.5 \text{ g/m}^2$)	0.30 ^b	0.29	—
Aluminum foil, with condensate clearly visible ($> 2.0 \text{ g/m}^2$)	0.70 ^b	0.65	—
Aluminum sheet	0.12	0.12	0.06
Aluminum coated paper, polished	0.20	0.20	0.11
Steel, galvanized, bright	0.25	0.24	0.15
Aluminum paint	0.50	0.47	0.35
Building materials: wood, paper, masonry, nonmetallic paints	0.90	0.82	0.82
Regular glass	0.84	0.77	0.72

^aThese values apply in the 4 to 40 μm range of the electromagnetic spectrum.

^bValues are based on data presented by Bassett and Trethoven (1984).

Table 3 Thermal Resistances of Plane Air Spaces^{a,b,c,e}, K·m²/W

Position of Air Space	Direction of Heat Flow	Air Space		13 mm Air Space ^c					20 mm Air Space ^c						
		Mean Temp. ^d , °C	Temp. Diff. ^d , °C	Effective Emittance $\epsilon_{eff}^{d,e}$					Effective Emittance $\epsilon_{eff}^{d,e}$						
				0.03	0.05	0.2	0.5	0.82	0.03	0.05	0.2	0.5	0.82		
Horiz.	Up	32.2	5.6	0.37	0.36	0.27	0.17	0.13	0.41	0.39	0.28	0.18	0.13		
		10.0	16.7	0.29	0.28	0.23	0.17	0.13	0.30	0.29	0.24	0.17	0.14		
		10.0	5.6	0.37	0.36	0.28	0.20	0.15	0.40	0.39	0.30	0.20	0.15		
		-17.8	11.1	0.30	0.30	0.26	0.20	0.16	0.32	0.32	0.27	0.20	0.16		
		-17.8	5.6	0.37	0.36	0.30	0.22	0.18	0.39	0.38	0.31	0.23	0.18		
		-45.6	11.1	0.30	0.29	0.26	0.22	0.18	0.31	0.31	0.27	0.22	0.19		
		-45.6	5.6	0.36	0.35	0.31	0.25	0.20	0.38	0.37	0.32	0.26	0.21		
		32.2	5.6	0.43	0.41	0.29	0.19	0.13	0.52	0.49	0.33	0.20	0.14		
		10.0	16.7	0.36	0.35	0.27	0.19	0.15	0.35	0.34	0.27	0.19	0.14		
		10.0	5.6	0.45	0.43	0.32	0.21	0.16	0.51	0.48	0.35	0.23	0.17		
45° Slope	Up	-17.8	11.1	0.39	0.38	0.31	0.23	0.18	0.37	0.36	0.30	0.23	0.18		
		-17.8	5.6	0.46	0.45	0.36	0.25	0.19	0.48	0.46	0.37	0.26	0.20		
		-45.6	11.1	0.37	0.36	0.31	0.25	0.21	0.36	0.35	0.31	0.25	0.20		
		-45.6	5.6	0.46	0.45	0.38	0.29	0.23	0.45	0.43	0.37	0.29	0.23		
		32.2	5.6	0.43	0.41	0.29	0.19	0.14	0.62	0.57	0.37	0.21	0.15		
		10.0	16.7	0.45	0.43	0.32	0.22	0.16	0.51	0.49	0.35	0.23	0.17		
		10.0	5.6	0.47	0.45	0.33	0.22	0.16	0.65	0.61	0.41	0.25	0.18		
		-17.8	11.1	0.50	0.48	0.38	0.26	0.20	0.55	0.53	0.41	0.28	0.21		
		-17.8	5.6	0.52	0.50	0.39	0.27	0.20	0.66	0.63	0.46	0.30	0.22		
		-45.6	11.1	0.51	0.50	0.41	0.31	0.24	0.51	0.50	0.42	0.31	0.24		
Vertical	Horiz.	-45.6	5.6	0.56	0.55	0.45	0.33	0.26	0.65	0.63	0.51	0.36	0.27		
		32.2	5.6	0.44	0.41	0.29	0.19	0.14	0.62	0.58	0.37	0.21	0.15		
		10.0	16.7	0.46	0.44	0.33	0.22	0.16	0.60	0.57	0.39	0.24	0.17		
		10.0	5.6	0.47	0.45	0.33	0.22	0.16	0.67	0.63	0.42	0.26	0.18		
		-17.8	11.1	0.51	0.49	0.39	0.27	0.20	0.66	0.63	0.46	0.30	0.22		
		-17.8	5.6	0.52	0.50	0.39	0.27	0.20	0.73	0.69	0.49	0.32	0.23		
		-45.6	11.1	0.56	0.54	0.44	0.33	0.25	0.67	0.64	0.51	0.36	0.28		
		-45.6	5.6	0.57	0.56	0.45	0.33	0.26	0.77	0.74	0.57	0.39	0.29		
		32.2	5.6	0.44	0.41	0.29	0.19	0.14	0.62	0.58	0.37	0.21	0.15		
		10.0	16.7	0.47	0.45	0.33	0.22	0.16	0.66	0.62	0.42	0.25	0.18		
45° Slope	Down	10.0	5.6	0.47	0.45	0.33	0.22	0.16	0.68	0.63	0.42	0.26	0.18		
		-17.8	11.1	0.52	0.50	0.39	0.27	0.20	0.74	0.70	0.50	0.32	0.23		
		-17.8	5.6	0.52	0.50	0.39	0.27	0.20	0.75	0.71	0.51	0.32	0.23		
		-45.6	11.1	0.57	0.55	0.45	0.33	0.26	0.81	0.78	0.59	0.40	0.30		
		-45.6	5.6	0.58	0.56	0.46	0.33	0.26	0.83	0.79	0.60	0.40	0.30		
				Air Space	40 mm Air Space ^c					90 mm Air Space ^c					
		Horiz.	Up	32.2	5.6	0.45	0.42	0.30	0.19	0.14	0.50	0.47	0.32	0.20	0.14
				10.0	16.7	0.33	0.32	0.26	0.18	0.14	0.27	0.35	0.28	0.19	0.15
				10.0	5.6	0.44	0.42	0.32	0.21	0.16	0.49	0.47	0.34	0.23	0.16
				-17.8	11.1	0.35	0.34	0.29	0.22	0.17	0.40	0.38	0.32	0.23	0.18
-17.8	5.6			0.43	0.41	0.33	0.24	0.19	0.48	0.46	0.36	0.26	0.20		
-45.6	11.1			0.34	0.34	0.30	0.24	0.20	0.39	0.38	0.33	0.26	0.21		
-45.6	5.6			0.42	0.41	0.35	0.27	0.22	0.47	0.45	0.38	0.29	0.23		
32.2	5.6			0.51	0.48	0.33	0.20	0.14	0.56	0.52	0.35	0.21	0.14		
10.0	16.7			0.38	0.36	0.28	0.20	0.15	0.40	0.38	0.29	0.20	0.15		
10.0	5.6			0.51	0.48	0.35	0.23	0.17	0.55	0.52	0.37	0.24	0.17		
45° Slope	Up	-17.8	11.1	0.40	0.39	0.32	0.24	0.18	0.43	0.41	0.33	0.24	0.19		
		-17.8	5.6	0.49	0.47	0.37	0.26	0.20	0.52	0.51	0.39	0.27	0.20		
		-45.6	11.1	0.39	0.38	0.33	0.26	0.21	0.41	0.40	0.35	0.27	0.22		
		-45.6	5.6	0.48	0.46	0.39	0.30	0.24	0.51	0.49	0.41	0.31	0.24		
		32.2	5.6	0.70	0.64	0.40	0.22	0.15	0.65	0.60	0.38	0.22	0.15		
		10.0	16.7	0.45	0.43	0.32	0.22	0.16	0.47	0.45	0.33	0.22	0.16		
		10.0	5.6	0.67	0.62	0.42	0.26	0.18	0.64	0.60	0.41	0.25	0.18		
		-17.8	11.1	0.49	0.47	0.37	0.26	0.20	0.51	0.49	0.38	0.27	0.20		
		-17.8	5.6	0.62	0.59	0.44	0.29	0.22	0.61	0.59	0.44	0.29	0.22		
		-45.6	11.1	0.46	0.45	0.38	0.29	0.23	0.50	0.48	0.40	0.30	0.24		
Vertical	Horiz.	-45.6	5.6	0.58	0.56	0.46	0.34	0.26	0.60	0.58	0.47	0.34	0.26		
		32.2	5.6	0.89	0.80	0.45	0.24	0.16	0.85	0.76	0.44	0.24	0.16		
		10.0	16.7	0.63	0.59	0.41	0.25	0.18	0.62	0.58	0.40	0.25	0.18		
		10.0	5.6	0.90	0.82	0.50	0.28	0.19	0.83	0.77	0.48	0.28	0.19		
		-17.8	11.1	0.68	0.64	0.47	0.31	0.22	0.67	0.64	0.47	0.31	0.22		
		-17.8	5.6	0.87	0.81	0.56	0.34	0.24	0.81	0.76	0.53	0.33	0.24		
		-45.6	11.1	0.64	0.62	0.49	0.35	0.27	0.66	0.64	0.51	0.36	0.28		
		-45.6	5.6	0.82	0.79	0.60	0.40	0.30	0.79	0.76	0.58	0.40	0.30		
		32.2	5.6	1.07	0.94	0.49	0.25	0.17	1.77	1.44	0.60	0.28	0.18		
		10.0	16.7	1.10	0.99	0.56	0.30	0.20	1.69	1.44	0.68	0.33	0.21		
45° Slope	Down	10.0	5.6	1.16	1.04	0.58	0.30	0.20	1.96	1.63	0.72	0.34	0.22		
		-17.8	11.1	1.24	1.13	0.69	0.39	0.26	1.92	1.68	0.86	0.43	0.29		
		-17.8	5.6	1.29	1.17	0.70	0.39	0.27	2.11	1.82	0.89	0.44	0.29		
		-45.6	11.1	1.36	1.27	0.84	0.50	0.35	2.05	1.85	1.06	0.57	0.38		
		-45.6	5.6	1.42	1.32	0.86	0.51	0.35	2.28	2.03	1.12	0.59	0.39		

^aSee Chapter 22 section Factors Affecting Heat Transfer across Air Spaces. Thermal resistance values were determined from the relation, $R = 1/C$, where $C = h_c + \epsilon_{eff} h_r$, h_c is the conduction-convection coefficient, $\epsilon_{eff} h_r$ is the radiation coefficient $\approx 0.227 \epsilon_{eff} [(t_m + 273)/100]^3$, and t_m is the mean temperature of the air space. Values for h_c were determined from data developed by Robinson et al. (1954). Equations (5) through (7) in Yarbrough (1983) show the data in this table in analytic form. For extrapolation from this table to air spaces less than 12.5 mm (as in insulating window glass), assume $h_c = 21.8(1 + 0.00274 t_m)/l$ where l is the air space thickness in mm, and h_c is heat transfer in $W/(m^2 \cdot K)$ through the air space only.

^bValues are based on data presented by Robinson et al. (1954). (Also see Chapter 3 Tables 3 and 4 and Chapter 36.) Values apply for ideal conditions, i.e., air spaces of uniform thickness bounded by plane, smooth, parallel surfaces with no air leakage to or from the space. When accurate values are required, use overall U-factors deter-

mined through calibrated hot box (ASTM C 976) or guarded hot box (ASTM C 236) testing. Thermal resistance values for multiple air spaces must be based on careful estimates of mean temperature differences for each air space.

^cA single resistance value cannot account for multiple air spaces; each air space requires a separate resistance calculation that applies only for the established boundary conditions. Resistances of horizontal spaces with heat flow downward are substantially independent of temperature difference.

^dInterpolation is permissible for other values of mean temperature, temperature difference, and effective emittance ϵ_{eff} . Interpolation and moderate extrapolation for air spaces greater than 90 mm are also permissible.

^eEffective emittance ϵ_{eff} of the air space is given by $1/\epsilon_{eff} = 1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1$, where ϵ_1 and ϵ_2 are the emittances of the surfaces of the air space (see Table 2).

Table 29 Shading Coefficients for Single and Insulating Glass with Draperies

Glazing	Glass Transmission	Glass Alone SC (No Drapes)	Shading Coefficient Index Letter									
			A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Single glass												
3 mm Clear	0.86	1.00	0.87	0.82	0.74	0.69	0.64	0.59	0.53	0.48	0.42	0.37
6 mm Clear	0.80	0.95	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
13 Clear	0.71	0.88	0.74	0.70	0.66	0.61	0.56	0.52	0.48	0.43	0.39	0.35
6 mm Heat absorbing	0.46	0.67	0.57	0.54	0.52	0.49	0.46	0.44	0.41	0.38	0.36	0.33
13 mm Heat absorbing	0.24	0.50	0.43	0.42	0.40	0.39	0.38	0.36	0.34	0.33	0.32	0.30
Reflective coated	—	0.60	0.57	0.54	0.51	0.49	0.46	0.43	0.41	0.38	0.36	0.33
(see manufacturers' literature for exact values)	—	0.50	0.46	0.44	0.42	0.41	0.39	0.38	0.36	0.34	0.33	0.31
	—	0.40	0.36	0.35	0.34	0.33	0.32	0.30	0.29	0.28	0.27	0.26
	—	0.30	0.25	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23	0.22	0.21	0.21	0.20
Insulating glass, 6-mm air space (3 mm out and 3 mm in)												
	0.76	0.89	0.75	0.71	0.65	0.63	0.57	0.53	0.48	0.45	0.38	0.36
Insulating glass 13 mm air space clear out and clear in												
	0.64	0.83	0.66	0.62	0.58	0.56	0.52	0.48	0.45	0.42	0.37	0.35
Heat absorbing out and clear in												
	0.37	0.55	0.49	0.47	0.45	0.43	0.41	0.39	0.37	0.35	0.33	0.32
Reflective coated	—	0.40	0.38	0.37	0.37	0.36	0.34	0.32	0.31	0.29	0.28	0.28
(see manufacturers' literature for exact values)	—	0.30	0.29	0.28	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.25	0.24	0.24
	—	0.20	0.19	0.19	0.18	0.18	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15	0.15

Shading Coefficient Index Letter

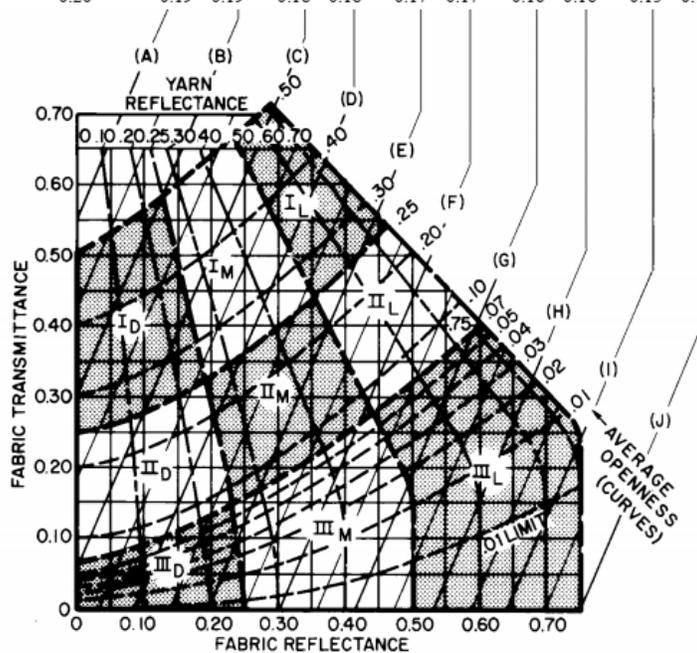
Notes:

1. Shading coefficients are for draped fabrics.
2. Other properties are for fabrics in flat orientation.
3. Use fabric reflectance and transmittance to obtain accurate shading coefficients.
4. Use openness and yarn reflectance or openness and fabric reflectance to obtain the various environmental characteristics, or to obtain approximate shading coefficients.

Classification of Fabrics

- I = Open weave
- II = Semiopen weave
- III = Closed weave

- D = Dark color
- M = Medium color
- L = Light color



To obtain fabric designator (III_L, I_M, etc.). Using either (1) Fabric Transmittance and Fabric Reflectance coordinates, or (2) Openness and Yarn Reflectance coordinates, find a point on the chart and note the designator for that area. If properties are not known, the classification may be approximated by eye as described in the note in Figure 42. Table 3 lists appropriate classifications for various applications.

To obtain shading coefficient (SC). (1) Locate drapery fabric as a point using its known properties, or approximate using its fabric classification designator. For accuracy, use fabric transmittance and fabric reflectance; (2) follow diagonal SC lines to lettered columns in the table. Find SC on line with glazing used. For example, SC is 0.45 for 6-mm clear single glass with III_L drapery (Column H).

Note: Shading coefficients are for 45° incident angle. For 30° or less, add 5% to the number found in the table.

Table 5 U-Factors for Various Fenestration Products in $W/(m^2 \cdot K)$

Product Type	Glass Only		Vertical Installation									
			Operable (including sliding and swinging glass doors)					Fixed				
			Aluminum without Thermal Break	Aluminum with Thermal Break	Reinforced Vinyl/Aluminum Clad Wood	Wood/Vinyl	Insulated Fiberglass/Vinyl	Aluminum without Thermal Break	Aluminum with Thermal Break	Reinforced Vinyl/Aluminum Clad Wood	Wood/Vinyl	Insulated Fiberglass/Vinyl
Frame Type ID Glazing Type	Center of Glass	Edge of Glass										
Single Glazing												
1 3.2 mm glass	5.91	5.91	7.24	6.12	5.14	5.05	4.61	6.42	6.07	5.55	5.55	5.35
2 6.4 mm acrylic/polycarb	5.00	5.00	6.49	5.43	4.51	4.42	4.01	5.60	5.25	4.75	4.75	4.58
3 3.2 mm acrylic/polycarb	5.45	5.45	6.87	5.77	4.82	4.73	4.31	6.01	5.66	5.15	5.15	4.97
Double Glazing												
4 6.4 mm airspace	3.12	3.63	4.93	3.70	3.25	3.13	2.77	3.94	3.56	3.19	3.17	3.04
5 12.7 mm airspace	2.73	3.36	4.62	3.42	3.00	2.87	2.53	3.61	3.22	2.86	2.84	2.72
6 6.4 mm argon space	2.90	3.48	4.75	3.54	3.11	2.98	2.63	3.75	3.37	3.00	2.98	2.85
7 12.7 mm argon space	2.56	3.24	4.49	3.30	2.89	2.76	2.42	3.47	3.08	2.73	2.70	2.58
Double Glazing, $e = 0.60$ on surface 2 or 3												
8 6.4 mm airspace	2.95	3.52	4.80	3.58	3.14	3.02	2.67	3.80	3.41	3.05	3.03	2.90
9 12.7 mm airspace	2.50	3.20	4.45	3.26	2.85	2.73	2.39	3.42	3.03	2.68	2.66	2.54
10 6.4 mm argon space	2.67	3.32	4.58	3.38	2.96	2.84	2.49	3.56	3.17	2.82	2.80	2.67
11 12.7 mm argon space	2.33	3.08	4.31	3.13	2.74	2.62	2.28	3.28	2.89	2.54	2.52	2.40
Double Glazing, $e = 0.40$ on surface 2 or 3												
12 6.4 mm airspace	2.78	3.40	4.66	3.46	3.03	2.91	2.56	3.66	3.27	2.91	2.89	2.76
13 12.7 mm airspace	2.27	3.04	4.27	3.09	2.70	2.58	2.25	3.23	2.84	2.49	2.47	2.35
14 6.4 mm argon space	2.44	3.16	4.40	3.21	2.81	2.69	2.35	3.37	2.98	2.63	2.61	2.49
15 12.7 mm argon space	2.04	2.88	4.09	2.93	2.55	2.43	2.10	3.04	2.65	2.31	2.29	2.17
Double Glazing, $e = 0.20$ on surface 2 or 3												
16 6.4 mm airspace	2.56	3.24	4.49	3.30	2.89	2.76	2.42	3.47	3.08	2.73	2.70	2.58
17 12.7 mm airspace	1.99	2.83	4.05	2.89	2.52	2.39	2.07	2.99	2.60	2.26	2.24	2.13
18 6.4 mm argon space	2.16	2.96	4.18	3.01	2.63	2.51	2.17	3.13	2.74	2.40	2.38	2.26
19 12.7 mm argon space	1.70	2.62	3.83	2.68	2.33	2.21	1.89	2.75	2.36	2.03	2.01	1.90
Double Glazing, $e = 0.10$ on surface 2 or 3												
20 6.4 mm airspace	2.39	3.12	4.36	3.17	2.78	2.65	2.32	3.32	2.93	2.59	2.56	2.45
21 12.7 mm airspace	1.82	2.71	3.92	2.77	2.41	2.28	1.96	2.84	2.45	2.12	2.10	1.99
22 6.4 mm argon space	1.99	2.83	4.05	2.89	2.52	2.39	2.07	2.99	2.60	2.26	2.24	2.13
23 12.7 mm argon space	1.53	2.49	3.70	2.56	2.22	2.10	1.79	2.60	2.21	1.89	1.86	1.76
Double Glazing, $e = 0.05$ on surface 2 or 3												
24 6.4 mm airspace	2.33	3.08	4.31	3.13	2.74	2.62	2.28	3.28	2.89	2.54	2.52	2.40
25 12.7 mm airspace	1.70	2.62	3.83	2.68	2.33	2.21	1.89	2.75	2.36	2.03	2.01	1.90
26 6.4 mm argon space	1.87	2.75	3.96	2.81	2.44	2.32	2.00	2.89	2.50	2.17	2.15	2.03
27 12.7 mm argon space	1.42	2.41	3.61	2.48	2.15	2.02	1.71	2.50	2.11	1.79	1.77	1.67
Triple Glazing												
28 6.4 mm airspace	2.16	2.96	4.11	2.89	2.51	2.45	2.16	3.10	2.73	2.38	2.33	2.25
29 12.7 mm airspace	1.76	2.67	3.80	2.60	2.25	2.19	1.91	2.76	2.39	2.05	2.01	1.93
30 6.4 mm argon space	1.93	2.79	3.94	2.73	2.36	2.30	2.01	2.90	2.54	2.19	2.15	2.07
31 12.7 mm argon space	1.65	2.58	3.71	2.52	2.17	2.12	1.84	2.66	2.30	1.96	1.91	1.84
Triple Glazing, $e = 0.20$ on surface 2,3,4, or 5												
32 6.4 mm airspace	1.87	2.75	3.89	2.69	2.32	2.27	1.98	2.86	2.49	2.15	2.10	2.03
33 12.7 mm airspace	1.42	2.41	3.54	2.36	2.02	1.97	1.70	2.47	2.10	1.77	1.73	1.66
34 6.4 mm argon space	1.59	2.54	3.67	2.48	2.13	2.08	1.80	2.61	2.25	1.91	1.87	1.80
35 12.7 mm argon space	1.25	2.28	3.40	2.23	1.91	1.86	1.59	2.32	1.96	1.63	1.59	1.52
Triple Glazing, $e = 0.20$ on surfaces 2 or 3 and 4 or 5												
36 6.4 mm airspace	1.65	2.58	3.71	2.52	2.17	2.12	1.84	2.66	2.30	1.96	1.91	1.84
37 12.7 mm airspace	1.14	2.19	3.31	2.15	1.84	1.78	1.52	2.23	1.86	1.54	1.49	1.43
38 6.4 mm argon space	1.31	2.32	3.45	2.27	1.95	1.90	1.62	2.37	2.01	1.68	1.63	1.56
39 12.7 mm argon space	0.97	2.05	3.18	2.03	1.72	1.67	1.41	2.08	1.71	1.39	1.35	1.29
Triple Glazing, $e = 0.10$ on surfaces 2 or 3 and 4 or 5												
40 6.4 mm airspace	1.53	2.49	3.63	2.44	2.10	2.05	1.77	2.57	2.20	1.86	1.82	1.75
41 12.7 mm airspace	1.02	2.10	3.22	2.07	1.76	1.71	1.45	2.13	1.76	1.44	1.40	1.33
42 6.4 mm argon space	1.19	2.23	3.36	2.19	1.87	1.82	1.55	2.27	1.91	1.58	1.54	1.47
43 12.7 mm argon space	0.80	1.92	3.05	1.90	1.61	1.56	1.30	1.93	1.57	1.25	1.21	1.15
Quadruple Glazing, $e = 0.10$ on surfaces 2 or 3 and 4 or 5												
44 6.4 mm airspaces	1.25	2.28	3.40	2.23	1.91	1.86	1.59	2.32	1.96	1.63	1.59	1.52
45 12.7 mm airspaces	0.85	1.96	3.09	1.94	1.65	1.60	1.34	1.98	1.62	1.30	1.26	1.19
46 6.4 mm argon spaces	0.97	2.05	3.18	2.03	1.72	1.67	1.41	2.08	1.71	1.39	1.35	1.29
47 12.7 mm argon spaces	0.68	1.83	2.96	1.82	1.54	1.48	1.23	1.84	1.47	1.16	1.11	1.05
48 6.4 mm krypton spaces	0.68	1.83	2.96	1.82	1.54	1.48	1.23	1.84	1.47	1.16	1.11	1.05

Notes:

1. All heat transmission coefficients in this table include film resistances and are based on winter conditions of -18°C outdoor air temperature and 21°C indoor air temperature, with 24 km/h outdoor air velocity and zero solar flux. With the exception of single glazing, small changes in the indoor and outdoor temperatures will not significantly affect overall U-factors. The coefficients are for vertical position except skylight values, which are for 20° from horizontal with heat flow up.

2. Glazing layer surfaces are numbered from the outdoor to the indoor. Double, triple and quadruple refer to the number of glazing panels. All data are based on 3 mm glass, unless otherwise noted. Thermal conductivities are: $0.917\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for glass, and $0.19\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for acrylic and polycarbonate.

3. Standard spacers are metal. Edge-of-glass effects assumed to extend over the 65 mm band around perimeter of each glazing unit as in [Figure 3](#).

Table 11 Thermal Properties and Code Numbers of Layers Used in Wall and Roof Descriptions for Tables 12 and 13

Code Number	Description	Thickness and Thermal Properties					
		L	k	ρ	c_p	R	Mass
A0	Outside surface resistance	0	0.000	0	0.00	0.059	0.00
A1	25 mm Stucco	25	0.692	1858	0.84	0.037	47.34
A2	100 mm Face brick	100	1.333	2002	0.92	0.076	203.50
A3	Steel siding	2	44.998	7689	0.42	0.000	11.71
A4	12 mm Slag	13	0.190	1121	1.67	0.067	10.74
A5	Outside surface resistance	0	0.000	0	0.00	0.059	0.00
A6	Finish	13	0.415	1249	1.09	0.031	16.10
A7	100 mm Face brick	100	1.333	2002	0.92	0.076	203.50
B1	Air space resistance	0	0.000	0	0.00	0.160	0.00
B2	25 mm Insulation	25	0.043	32	0.84	0.587	0.98
B3	50 mm Insulation	51	0.043	32	0.84	1.173	1.46
B4	75 mm Insulation	76	0.043	32	0.84	1.760	2.44
B5	25 mm Insulation	25	0.043	91	0.84	0.587	2.44
B6	50 mm Insulation	51	0.043	91	0.84	1.173	4.88
B7	25 mm Wood	25	0.121	593	2.51	0.207	15.13
B8	65 mm Wood	63	0.121	593	2.51	0.524	37.58
B9	100 mm Wood	100	0.121	593	2.51	0.837	60.02
B10	50 mm Wood	51	0.121	593	2.51	0.420	30.26
B11	75 mm Wood	76	0.121	593	2.51	0.628	45.38
B12	75 mm Insulation	76	0.043	91	0.84	1.760	6.83
B13	100 mm Insulation	100	0.043	91	0.84	2.347	9.27
B14	125 mm Insulation	125	0.043	91	0.84	2.933	11.71
B15	150 mm Insulation	150	0.043	91	0.84	3.520	14.15
B16	4 mm Insulation	4	0.043	91	0.84	0.088	0.49
B17	8 mm Insulation	8	0.043	91	0.84	0.176	0.49
B18	12 mm Insulation	12	0.043	91	0.84	0.264	0.98
B19	15 mm Insulation	15	0.043	91	0.84	0.352	1.46
B20	20 mm Insulation	20	0.043	91	0.84	0.440	1.95
B21	35 mm Insulation	35	0.043	91	0.84	0.792	2.93
B22	42 mm Insulation	42	0.043	91	0.84	0.968	3.90
B23	60 mm Insulation	62	0.043	91	0.84	1.408	5.86
B24	70 mm Insulation	70	0.043	91	0.84	1.584	6.34
B25	85 mm Insulation	85	0.043	91	0.84	1.936	7.81
B26	92 mm Insulation	92	0.043	91	0.84	2.112	8.30
B27	115 mm Insulation	115	0.043	91	0.84	2.640	10.74
C1	100 mm Clay tile	100	0.571	1121	0.84	0.178	113.70
C2	100 mm low density concrete block	100	0.381	609	0.84	0.266	61.98
C3	100 mm high density concrete block	100	0.813	977	0.84	0.125	99.06
C4	100 mm Common brick	100	0.727	1922	0.84	0.140	195.20
C5	100 mm high density concrete	100	1.731	2243	0.84	0.059	227.90
C6	200 mm Clay tile	200	0.571	1121	0.84	0.352	227.90
C7	200 mm low density concrete block	200	0.571	609	0.84	0.352	123.46
C8	200 mm high density concrete block	200	1.038	977	0.84	0.196	198.62
C9	200 mm Common brick	200	0.727	1922	0.84	0.279	390.40
C10	200 mm high density concrete	200	1.731	2243	0.84	0.117	455.79
C11	300 mm high density concrete	300	1.731	2243	0.84	0.176	683.20
C12	50 mm high density concrete	50	1.731	2243	0.84	0.029	113.70
C13	150 mm high density concrete	150	1.731	2243	0.84	0.088	341.60
C14	100 mm low density concrete	100	0.173	641	0.84	0.587	64.90
C15	150 mm low density concrete	150	0.173	641	0.84	0.880	97.60
C16	200 mm low density concrete	200	0.173	641	0.84	1.173	130.30
C17	200 mm low density concrete block (filled)	200	0.138	288	0.84	1.467	58.56
C18	200 mm high density concrete block (filled)	200	0.588	849	0.84	0.345	172.75
C19	300 mm low density concrete block (filled)	300	0.138	304	0.84	2.200	92.72
C20	300 mm high density concrete block (filled)	300	0.675	897	0.84	0.451	273.28
E0	Inside surface resistance	0	0.000	0	0.00	0.121	0.00
E1	20 mm Plaster or gypsum	20	0.727	1602	0.84	0.026	30.74
E2	12 mm Slag or stone	12	1.436	881	1.67	0.009	11.22
E3	10 mm Felt and membrane	10	0.190	1121	1.67	0.050	10.74
E4	Ceiling air space	0	0.000	0	0.00	0.176	0.00
E5	Acoustic tile	19	0.061	481	0.84	0.314	9.27

 L = thickness, mm k = thermal conductivity, W/(m·K) ρ = density, kg/m³ c_p = specific heat, kJ/(kg·K) R = thermal resistance, (m²·K)/WMass = mass per unit area, kg/m²

Table 4 Typical Thermal Properties of Common Building and Insulating Materials—Design Values^a

Description	Density, kg/m ³	Conductivity ^b (k), W/(m·K)	Conductance (C), W/(m ² ·K)	Resistance ^c (R)		Specific Heat, kJ/(kg·K)
				1/k, K·m/W	For Thickness Listed (L/C), K·m ² /W	
BUILDING BOARD						
Asbestos-cement board.....	1900	0.58	—	1.73	—	1.00
Asbestos-cement board..... 3.2 mm	1900	—	187.4	—	0.005	—
Asbestos-cement board..... 6.4 mm	1900	—	93.7	—	0.011	—
Gypsum or plaster board..... 9.5 mm	800	—	17.6	—	0.056	1.09
Gypsum or plaster board..... 12.7 mm	800	—	12.6	—	0.079	—
Gypsum or plaster board..... 15.9 mm	800	—	10.1	—	0.099	—
Plywood (Douglas Fir) ^d	540	0.12	—	8.66	—	1.21
Plywood (Douglas Fir)..... 6.4 mm	540	—	18.2	—	0.055	—
Plywood (Douglas Fir)..... 9.5 mm	540	—	12.1	—	0.083	—
Plywood (Douglas Fir)..... 12.7 mm	540	—	9.1	—	0.11	—
Plywood (Douglas Fir)..... 15.9 mm	540	—	7.3	—	0.14	—
Plywood or wood panels..... 19.0 mm	540	—	6.1	—	0.16	1.21
Vegetable fiber board						
Sheathing, regular density ^e 12.7 mm	290	—	4.3	—	0.23	1.30
..... 19.8 mm	290	—	2.8	—	0.36	—
Sheathing intermediate density ^e 12.7 mm	350	—	5.2	—	0.19	1.30
Nail-base sheathing ^e 12.7 mm	400	—	5.3	—	0.19	1.30
Shingle backer..... 9.5 mm	290	—	6.0	—	0.17	1.30
Shingle backer..... 7.9 mm	290	—	7.3	—	0.14	—
Sound deadening board..... 12.7 mm	240	—	4.2	—	0.24	1.26
Tile and lay-in panels, plain or acoustic.....	290	0.058	—	17.	—	0.59
..... 12.7 mm	290	—	4.5	—	0.22	—
..... 19.0 mm	290	—	3.0	—	0.33	—
Laminated paperboard.....	480	0.072	—	13.9	—	1.38
Homogeneous board from repulped paper.....	480	0.072	—	13.9	—	1.17
Hardboard^d						
Medium density.....	800	0.105	—	9.50	—	1.30
High density, service-tempered grade and service grade.....	880	0.82	—	8.46	—	1.34
High density, standard-tempered grade.....	1010	0.144	—	6.93	—	1.34
Particleboard^d						
Low density.....	590	0.102	—	9.77	—	1.30
Medium density.....	800	0.135	—	7.35	—	1.30
High density.....	1000	0.170	—	5.90	—	1.30
Underlayment..... 15.9 mm	640	—	6.9	—	0.14	1.21
Waferboard.....	590	0.01	—	11.0	—	—
Wood subfloor..... 19.0 mm	—	—	6.0	—	0.17	1.38
BUILDING MEMBRANE						
Vapor-permeable felt.....	—	—	94.9	—	0.011	—
Vapor-seal, 2 layers of mopped 0.73 kg/m ² felt.....	—	—	47.4	—	0.21	—
Vapor-seal, plastic film.....	—	—	—	—	Negl.	—
FINISH FLOORING MATERIALS						
Carpet and fibrous pad.....	—	—	2.73	—	0.37	1.42
Carpet and rubber pad.....	—	—	4.60	—	0.22	1.38
Cork tile..... 3.2 mm	—	—	20.4	—	0.049	2.01
Terrazzo..... 25 mm	—	—	71.0	—	0.014	0.80
Tile—asphalt, linoleum, vinyl, rubber.....	—	—	113.6	—	0.009	1.26
vinyl asbestos.....	—	—	—	—	—	1.01
ceramic.....	—	—	—	—	—	0.80
Wood, hardwood finish..... 19 mm	—	—	8.35	—	0.12	—
INSULATING MATERIALS						
<i>Blanket and Batt^e</i>						
Mineral fiber, fibrous form processed						
from rock, slag, or glass						
approx. 75-100 mm.....	6.4-32	—	0.52	—	1.94	—
approx. 90 mm.....	6.4-32	—	0.44	—	2.29	—
approx. 90 mm.....	19-26	—	0.38	—	2.63	—
approx. 140-165 mm.....	6.4-32	—	0.30	—	3.32	—
approx. 140 mm.....	10-16	—	0.27	—	3.67	—
approx. 150-190 mm.....	6.4-32	—	0.26	—	3.91	—
approx. 210-250 mm.....	6.4-32	—	0.19	—	5.34	—
approx. 250-330 mm.....	6.4-32	—	0.15	—	6.77	—
<i>Board and Slabs</i>						
Cellular glass.....	136	0.050	—	19.8	—	0.75
Glass fiber, organic bonded.....	64-140	0.036	—	27.7	—	0.96
Expanded perlite, organic bonded.....	16	0.052	—	19.3	—	1.26
Expanded rubber (rigid).....	72	0.032	—	31.6	—	1.68
Expanded polystyrene, extruded (smooth skin surface) (CFC-12 exp.).....	29-56	—	—	—	—	—

Table 32 July Cooling Load Temperature Differences for Calculating Cooling Load from Sunlit Walls 40°North Latitude

Wall Number 1																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	1	0	-1	-1	-2	-1	4	6	6	7	9	12	14	15	16	16	16	16	15	9	6	4	3	2
NE	1	0	-1	-1	-2	1	13	23	26	24	19	16	15	16	16	16	15	13	11	8	6	4	3	2
E	1	0	-1	-1	-1	1	16	28	34	36	33	27	20	17	17	17	16	14	11	8	6	4	3	2
SE	1	0	-1	-1	-2	0	8	18	26	31	32	31	27	22	18	17	16	14	11	8	6	4	3	2
S	1	0	-1	-1	-2	-1	0	2	6	12	18	24	28	29	28	24	19	15	11	8	6	4	3	2
SW	1	0	-1	-1	-1	-1	0	2	4	7	9	14	22	29	36	39	38	34	25	13	7	4	3	2
W	1	1	-1	-1	-1	-1	1	2	4	7	9	12	15	23	33	41	44	44	34	18	9	5	3	2
NW	1	0	-1	-1	-1	-1	0	2	4	7	9	12	14	16	21	28	34	36	31	16	8	5	3	2

Wall Number 2																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	3	2	1	0	-1	-1	-1	2	4	5	6	8	10	12	13	14	15	16	16	15	12	9	7	4
NE	3	2	1	0	-1	-1	1	7	14	20	22	21	18	17	16	16	16	16	14	13	10	8	6	4
E	3	2	1	0	-1	-1	1	8	18	26	31	32	29	24	21	19	18	17	15	13	11	8	6	4
SE	3	2	1	0	-1	-1	0	4	11	18	24	28	29	28	25	22	19	17	16	13	11	8	6	4
S	3	2	1	0	-1	-1	-1	1	4	8	13	18	23	26	27	26	22	18	15	12	8	6	4	
SW	4	2	1	1	0	-1	-1	0	1	3	5	7	11	17	23	29	34	36	34	29	22	15	9	6
W	4	3	2	1	0	-1	-1	0	1	3	5	7	9	13	18	26	33	38	41	37	28	19	12	8
NW	4	2	1	1	-1	-1	-1	1	3	5	7	9	12	14	18	23	28	32	30	23	16	11	7	

Wall Number 3																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	4	3	2	1	1	0	1	3	4	4	6	8	9	11	13	13	14	14	15	13	11	9	7	6
NE	4	3	2	1	0	0	4	9	14	17	18	17	17	16	16	16	16	16	14	12	10	8	7	5
E	4	3	2	1	1	1	4	12	18	23	26	26	24	22	21	19	18	17	16	13	11	9	7	6
SE	4	3	2	1	1	0	2	7	12	18	22	24	26	24	23	21	19	18	16	13	11	9	7	6
S	4	3	2	1	1	0	0	1	2	5	9	13	17	21	23	23	22	20	17	14	12	9	8	6
SW	7	5	3	2	1	1	1	1	2	3	5	8	12	17	22	27	31	32	30	25	20	16	12	9
W	8	6	4	3	2	1	1	1	2	3	5	7	9	13	19	25	31	35	35	30	24	18	14	11
NW	7	4	3	2	1	1	0	1	2	3	5	7	9	11	14	18	22	27	28	24	19	15	12	9

Wall Number 4																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	6	4	3	2	1	0	0	1	2	3	4	6	7	9	11	12	13	14	15	15	14	12	11	8
NE	6	4	3	2	1	0	0	2	7	12	16	18	18	18	17	17	17	16	16	14	13	11	9	7
E	6	4	3	2	1	1	1	3	8	15	21	25	27	26	24	22	21	19	18	16	14	12	9	8
SE	6	4	3	2	1	1	0	1	4	9	15	20	24	26	26	24	23	21	19	17	14	12	10	8
S	6	4	3	2	1	1	0	1	0	1	3	7	11	16	19	23	24	23	22	19	17	13	11	8
SW	10	7	5	3	2	1	0	0	0	1	3	4	7	10	15	20	26	29	32	32	28	23	18	14
W	12	8	6	4	2	1	1	0	1	1	3	4	6	8	12	17	22	28	33	36	33	28	22	17
NW	10	7	5	3	2	1	0	0	0	1	2	4	6	8	11	13	17	21	25	27	27	23	18	14

Wall Number 5																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	7	6	4	3	3	2	1	2	3	3	4	5	7	8	9	11	12	13	13	13	12	10	8	
NE	7	6	4	3	3	2	2	4	8	11	14	15	16	16	16	16	16	16	15	14	13	12	10	8
E	8	6	5	4	3	2	2	4	9	14	18	22	22	22	21	21	19	19	18	16	14	13	11	9
SE	8	7	5	4	3	2	2	3	6	10	14	18	21	22	22	21	21	19	18	17	15	13	11	9
S	8	7	5	4	3	2	2	1	2	2	4	7	11	14	17	19	20	20	19	18	16	13	12	10
SW	12	10	8	6	4	3	3	2	2	3	3	5	7	9	14	18	22	26	27	27	24	21	18	14
W	14	11	9	7	6	4	3	2	2	3	4	5	6	8	11	16	21	25	29	30	28	24	21	17
NW	12	9	7	6	4	3	2	2	2	2	3	4	6	8	9	12	15	19	22	23	22	19	17	14

Wall Number 6																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	7	6	5	4	3	3	2	3	3	4	4	6	7	8	9	10	11	12	12	13	12	11	9	8
NE	8	7	6	4	3	3	3	6	8	11	13	14	14	14	15	15	15	14	14	13	12	10	9	8
E	9	7	6	5	4	3	4	6	10	14	17	19	20	20	19	19	19	18	17	16	14	13	12	10
SE	9	8	6	5	4	3	3	4	7	10	13	16	18	19	20	19	19	18	18	16	15	13	12	10
S	9	7	6	5	4	3	3	2	2	3	5	7	10	13	16	17	18	18	17	16	15	13	12	10
SW	13	11	9	8	6	5	4	3	3	4	4	6	7	10	13	17	21	23	24	24	22	19	17	15
W	14	12	10	8	7	6	4	4	4	4	4	6	7	8	11	15	19	23	26	27	25	22	19	17
NW	12	10	8	7	6	4	4	3	3	3	4	5	6	8	9	12	14	18	20	21	20	18	16	14

Table 32 July Cooling Load Temperature Differences for Calculating Cooling Load from Sunlit Walls 40°North Latitude (Continued)

Wall Number 7																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	7	7	6	5	4	3	3	4	4	4	5	6	7	8	9	9	10	11	11	11	11	10	9	8
NE	8	7	6	6	5	4	5	7	9	11	12	13	13	13	13	14	14	14	13	13	12	11	10	9
E	9	8	7	7	6	5	6	9	12	14	17	18	18	18	18	18	17	17	16	15	14	13	12	11
SE	9	8	7	7	6	5	5	7	9	12	14	16	17	18	18	18	17	17	16	15	14	13	12	11
S	9	8	7	6	6	4	4	4	4	5	7	8	11	13	14	16	16	16	16	14	13	12	11	10
SW	13	11	10	9	7	7	6	6	6	6	6	7	8	11	14	17	19	21	22	21	19	17	16	14
W	14	12	11	9	8	7	7	6	6	6	7	7	8	9	12	16	19	22	23	23	21	19	17	16
NW	11	10	9	8	7	6	5	5	5	5	6	6	7	8	9	12	14	17	18	18	17	16	14	13

Wall Number 9																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	9	8	7	6	5	4	3	2	2	2	3	4	4	6	7	8	9	11	12	12	13	13	12	11
NE	10	8	7	6	5	4	3	3	3	6	9	11	13	14	14	15	15	16	16	15	14	14	13	11
E	11	9	8	7	6	4	3	3	4	7	11	14	18	20	21	21	21	20	19	18	17	16	14	13
SE	11	9	8	7	6	4	3	3	3	5	7	11	14	17	19	20	21	20	19	19	18	16	14	13
S	12	10	8	7	6	4	3	3	2	2	2	3	6	8	11	14	16	18	19	19	18	17	15	13
SW	17	14	12	10	8	7	5	4	3	3	3	3	4	6	8	11	14	18	22	24	25	24	22	20
W	19	17	14	12	9	8	6	4	4	3	3	4	4	6	7	9	12	17	21	24	27	27	25	23
NW	16	14	12	9	8	6	5	4	3	3	3	3	4	5	6	8	10	12	16	19	21	21	20	18

Wall Number 10																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	9	8	7	6	5	4	3	3	3	3	3	4	4	6	7	8	9	10	11	12	12	12	12	11
NE	10	9	7	6	5	4	3	3	4	7	9	11	12	13	14	14	15	15	15	15	14	13	12	11
E	11	9	8	7	6	4	4	4	6	8	11	14	17	19	19	20	20	19	19	18	17	16	14	13
SE	12	10	8	7	6	4	4	3	4	6	8	11	14	17	18	19	19	19	19	18	17	16	14	13
S	12	10	8	7	6	5	4	3	2	2	3	4	6	8	11	13	16	17	18	18	17	16	14	13
SW	17	15	13	11	9	7	6	4	4	3	3	4	4	6	8	11	14	18	21	23	23	23	21	19
W	19	17	14	12	10	8	7	5	4	4	4	4	4	6	7	9	13	17	21	23	25	25	23	22
NW	16	13	12	10	8	7	6	4	3	3	3	3	4	6	7	8	10	13	16	18	19	20	19	17

Wall Number 11																									
Wall Face	Hour																								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
N	9	8	7	7	6	5	4	4	4	4	4	5	6	6	7	8	8	9	10	11	11	11	10	9	
NE	10	9	8	7	7	6	5	5	6	8	9	11	12	12	13	13	13	13	13	14	14	13	13	12	11
E	12	11	9	9	8	7	6	6	7	9	12	14	16	17	17	17	17	17	17	17	16	15	14	13	
SE	12	11	9	9	8	7	6	6	6	8	9	12	13	15	16	17	17	17	17	17	16	15	14	13	
S	11	10	9	8	7	6	6	5	4	4	4	6	7	9	11	13	14	15	16	16	15	14	13	12	
SW	16	14	13	11	10	9	8	7	6	6	6	6	7	8	9	12	14	17	18	20	20	19	18	17	
W	17	16	14	12	11	10	9	8	7	7	6	7	7	7	8	11	13	16	18	21	22	21	20	18	
NW	14	13	11	10	9	8	7	6	6	5	5	6	6	7	7	8	10	12	14	16	17	17	16	15	

Wall Number 12																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	9	8	7	7	6	6	4	4	4	4	4	5	6	6	7	8	8	9	9	10	11	11	10	9
NE	10	9	8	8	7	6	6	6	7	8	9	11	12	12	12	13	13	13	13	13	13	12	12	11
E	12	11	10	9	8	7	7	7	8	9	12	14	16	16	17	17	17	17	17	16	16	15	14	13
SE	12	11	10	9	8	7	7	6	7	8	9	12	13	14	16	16	17	17	17	16	16	15	14	13
S	11	11	9	8	8	7	6	6	5	5	5	6	7	9	11	12	13	14	14	14	14	14	13	12
SW	15	14	13	12	11	9	8	8	7	7	7	7	7	8	9	11	13	16	18	19	19	19	18	17
W	17	16	14	13	12	11	9	8	8	7	7	7	7	8	9	11	13	15	18	19	21	20	19	18
NW	13	12	11	11	9	8	7	7	6	6	6	6	6	7	7	8	10	12	14	16	16	16	16	14

Table 32 July Cooling Load Temperature Differences for Calculating Cooling Load from Sunlit Walls 40°North Latitude (Concluded)

Wall Number 13																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	9	8	7	7	6	6	4	4	4	4	4	5	6	6	7	8	8	9	9	10	11	11	10	9
NE	10	9	8	8	7	6	6	6	7	8	9	11	12	12	12	13	13	13	13	13	13	12	12	11
E	12	11	10	9	8	7	7	7	8	9	12	14	16	16	17	17	17	17	17	16	16	15	14	13
SE	12	11	10	9	8	7	7	6	7	8	9	12	13	14	16	16	17	17	17	16	16	15	14	13
S	11	11	9	8	8	7	6	6	5	5	5	6	7	9	11	12	13	14	14	14	14	14	13	12
SW	15	14	13	12	11	9	8	8	7	7	7	7	7	8	9	11	13	16	18	19	19	19	18	17
W	17	16	14	13	12	11	9	8	8	7	7	7	7	8	9	11	13	15	18	19	21	20	19	18
NW	13	12	11	11	9	8	7	7	6	6	6	6	6	7	7	8	10	12	14	16	16	16	16	14

Wall Number 14																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	8	8	8	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	8	8	8	9	9	9	9	9
NE	11	10	9	9	8	8	7	7	8	8	9	10	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	11
E	13	12	12	11	10	9	9	8	9	10	12	13	14	14	15	15	16	16	16	16	15	14	14	13
SE	13	12	11	11	10	9	8	8	8	9	10	11	12	13	14	14	15	15	15	15	14	14	14	13
S	11	11	10	9	9	8	8	7	7	7	7	7	8	8	9	11	12	12	13	13	13	13	12	12
SW	14	14	13	12	12	11	10	9	9	8	8	8	8	9	9	11	12	14	15	16	17	17	16	16
W	16	15	14	13	13	12	11	10	9	9	9	9	9	9	11	12	13	15	17	18	18	17	17	
NW	13	12	12	11	10	9	9	8	8	7	7	7	7	8	8	8	9	11	12	13	14	14	14	13

Wall Number 15																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	11	10	9	8	7	6	5	4	3	3	3	3	4	4	5	6	7	8	9	11	11	12	12	11
NE	12	11	9	8	7	6	5	4	4	5	6	8	10	11	12	13	14	14	14	14	14	14	14	13
E	14	12	11	9	8	7	6	5	5	6	8	10	13	15	17	18	19	19	19	18	18	17	16	15
SE	14	12	11	9	8	7	6	5	4	4	6	8	10	12	14	17	18	18	19	18	18	17	17	15
S	14	12	11	9	8	7	6	5	4	3	3	3	4	6	7	9	12	14	16	17	17	17	16	15
SW	19	18	16	14	12	10	9	7	6	5	4	4	4	5	6	8	10	13	16	18	21	22	22	21
W	22	19	18	16	13	12	10	8	7	6	5	4	4	5	6	7	9	12	14	18	21	23	23	23
NW	17	16	14	13	11	9	8	7	6	4	4	4	4	4	5	6	7	9	11	14	16	18	18	18

Wall Number 16																								
Wall Face	Hour																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	10	9	9	8	7	6	6	5	4	4	4	4	4	5	6	6	7	8	9	9	10	11	11	11
NE	12	11	10	9	8	7	6	6	6	6	7	8	9	11	12	12	13	13	13	14	14	13	13	13
E	14	13	12	11	9	8	7	6	6	7	8	11	12	14	16	17	17	17	18	18	17	17	16	15
SE	14	13	12	11	9	8	7	6	6	6	7	8	10	12	14	15	16	17	17	17	17	17	16	15
S	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	4	4	5	6	8	9	11	13	14	15	15	15	15	14
SW	18	17	16	14	13	11	10	8	7	7	6	6	6	6	7	8	10	12	15	17	18	19	19	19
W	20	18	17	16	14	12	11	9	8	7	7	6	6	6	7	8	9	11	14	17	19	21	21	21
NW	16	15	14	13	11	10	9	8	7	6	6	5	5	6	6	7	8	9	11	13	15	16	17	17

Note 1. Direct application of data

- Dark surface
- Indoor temperature of 25.5°C
- Outdoor maximum temperature of 35°C with mean temperature of 29.5°C and daily range of 11.6°C
- Solar radiation typical of clear day on 21st day of month
- Outside surface film resistance of 0.059 m²·K/W
- Inside surface resistance of 0.121 m²·K/W

Note 2. Adjustments to table data

- Design temperatures

$$\text{Corr. CLTD} = \text{CLTD} + (25.5 - t_r) + (t_m - 29.4)$$

where

t_r = inside temperature and

t_m = maximum outdoor temperature - (daily range)/2

- No adjustment recommended for color

Table 33A Wall Types, Mass Located Inside Insulation, for Use with [Table 32](#)

Secondary Material	R-Value m ² ·K/W	Principal Wall Material**														
		A1	A2	B7	B10	B9	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C17	C18
Stucco and/or plaster	0 to 0.35	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0.35 to 0.44	*	5	*	*	*	*	*	*	*	5	*	*	*	*	*
	0.44 to 0.53	*	5	*	*	*	3	*	2	5	6	*	*	5	*	*
	0.53 to 0.62	*	5	*	*	*	4	2	2	5	6	*	*	6	*	*
	0.62 to 0.70	*	5	*	*	*	4	2	3	6	6	10	4	6	*	5
	0.70 to 0.84	*	6	*	*	*	5	2	4	6	6	11	5	10	*	10
	0.84 to 0.97	*	6	*	*	*	5	2	4	6	6	11	5	10	*	10
	0.97 to 1.14	*	6	*	*	*	5	2	5	10	7	12	5	11	*	10
	1.14 to 1.36	*	6	*	*	*	5	4	5	11	7	16	10	11	*	11
	1.36 to 1.59	*	6	*	*	*	5	4	5	11	7	*	10	11	*	11
	1.59 to 1.89	*	6	*	*	*	5	4	5	11	7	*	10	11	4	11
	1.89 to 2.24	*	6	*	*	*	5	4	5	11	11	*	10	11	4	11
	2.24 to 2.64	*	10	*	*	*	10	4	5	11	11	*	10	11	9	12
	2.64 to 3.08	*	10	*	*	*	10	5	5	11	11	*	11	12	10	16
	3.08 to 3.52	*	11	*	*	*	10	5	9	11	11	*	15	16	10	16
3.52 to 4.05	*	11	*	*	*	10	9	9	16	11	*	15	16	10	16	
4.05 to 4.76	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	16	*	15	*	
Steel or other light-weight siding	0 to 0.35	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0.35 to 0.44	*	3	*	*	*	*	*	2	3	5	*	*	*	*	*
	0.44 to 0.53	*	5	*	*	*	2	*	2	5	3	*	*	5	*	*
	0.53 to 0.62	*	5	*	*	*	3	1	2	5	5	*	*	5	*	*
	0.62 to 0.70	*	5	*	*	*	3	2	2	5	5	6	3	5	*	5
	0.70 to 0.84	*	6	*	*	*	4	2	2	5	5	10	4	6	*	5
	0.84 to 0.97	*	6	*	*	*	5	2	2	6	6	11	5	6	*	6
	0.97 to 1.14	*	6	*	*	*	5	2	3	6	6	11	5	6	*	6
	1.14 to 1.36	*	6	*	*	*	5	2	3	6	6	11	5	6	*	10
	1.36 to 1.59	*	6	*	*	*	5	2	3	6	6	12	5	6	*	11
	1.59 to 1.89	*	6	*	*	*	5	2	3	6	6	12	5	6	4	11
	1.89 to 2.24	*	6	*	*	*	5	2	3	6	7	12	6	11	4	11
	2.24 to 2.64	*	6	*	*	*	5	2	4	6	7	12	10	11	5	11
	2.64 to 3.08	*	10	*	*	*	6	4	4	10	7	*	10	11	9	11
	3.08 to 3.52	*	10	*	*	*	10	4	4	10	11	*	10	11	10	11
3.52 to 4.05	*	11	*	*	*	10	4	5	11	11	*	10	11	10	16	
4.05 to 4.76	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	10	*	11	16	
Face brick	0 to 0.35	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0.35 to 0.44	3	*	*	*	*	*	*	*	*	11	*	*	*	*	*
	0.44 to 0.53	5	11	*	*	*	*	*	6	11	12	*	*	*	*	*
	0.53 to 0.62	5	12	5	*	*	11	*	11	12	12	*	*	12	*	*
	0.62 to 0.70	5	12	6	*	*	12	6	12	12	13	*	*	12	*	*
	0.70 to 0.84	6	13	6	10	*	13	10	12	12	13	*	11	*	*	16
	0.84 to 0.97	6	13	6	11	*	*	11	12	13	13	*	16	*	*	*
	0.97 to 1.14	6	13	6	11	*	*	11	12	13	13	*	*	*	*	*
	1.14 to 1.36	6	13	6	11	*	*	11	13	*	13	*	*	*	*	*
	1.36 to 1.59	6	13	10	16	*	*	11	13	*	13	*	*	*	*	*
	1.59 to 1.89	6	14	10	16	*	*	11	13	*	14	*	*	*	16	*
	1.89 to 2.24	6	14	10	16	*	*	11	13	*	14	*	*	*	16	*
	2.24 to 2.64	6	*	11	16	*	*	12	13	*	*	*	*	*	*	*
	2.64 to 3.08	10	*	11	*	*	*	12	13	*	*	*	*	*	*	*
	3.08 to 3.52	10	*	11	*	*	*	16	*	*	*	*	*	*	*	*
3.52 to 4.05	11	*	15	*	*	*	16	*	*	*	*	*	*	*	*	
4.05 to 4.76	*	*	*	*	*	*	16	*	*	*	*	*	*	*	*	

*Denotes a wall that is not possible with the chosen set of parameters.

**See [Table 1](#) for definition of Code letters

Table 33B Wall Types, Mass Evenly Distributed, for Use with [Table 32](#)

Secondary Material	R-Value m ² ·K/W	Principal Wall Material**															
		A1	A2	B7	B10	B9	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C17	C18	
Stucco and/or plaster	0 to 0.35	1	3	*	*	*	*	*	1	3	3	*	*	*	*	*	
	0.35 to 0.44	1	3	1	*	*	2	*	2	4	4	*	*	5	*	*	
	0.44 to 0.53	1	4	1	*	*	2	2	2	4	4	*	*	5	*	*	
	0.53 to 0.62	1	*	1	*	*	2	2	*	*	*	10	4	5	*	4	
	0.62 to 0.70	1	*	1	2	*	*	4	*	*	*	10	4	*	*	4	
	0.70 to 0.84	1	*	1	2	*	*	*	*	*	*	10	4	*	*	4	
	0.84 to 0.97	1	*	1	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	0.97 to 1.14	1	*	2	4	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	1.14 to 1.36	1	*	2	4	11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	1.36 to 1.59	1	*	2	4	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	1.59 to 1.89	1	*	2	4	16	*	*	*	*	*	*	*	*	4	*	
	1.89 to 2.24	1	*	2	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	4	*	
	2.24 to 2.64	2	*	2	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	2.64 to 3.08	2	*	2	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	3.08 to 3.52	2	*	2	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
3.52 to 4.05	2	*	4	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
4.05 to 4.76	*	*	*	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
Steel or other light-weight siding	0 to 0.35	1	3	*	*	*	*	*	1	3	2	*	*	*	*	*	
	0.35 to 0.44	1	3	1	*	*	2	*	1	3	2	*	*	3	*	*	
	0.44 to 0.53	1	4	1	*	*	2	1	2	4	4	*	*	3	*	*	
	0.53 to 0.62	1	*	1	*	*	4	1	*	*	*	5	2	4	*	4	
	0.62 to 0.70	1	*	1	2	*	*	2	*	*	*	5	2	*	*	4	
	0.70 to 0.84	1	*	1	2	*	*	*	*	*	*	10	4	*	*	4	
	0.84 to 0.97	1	*	1	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	0.97 to 1.14	1	*	1	2	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	1.14 to 1.36	1	*	1	4	11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	1.36 to 1.59	1	*	2	4	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	1.59 to 1.89	1	*	2	4	16	*	*	*	*	*	*	*	*	2	*	
	1.89 to 2.24	1	*	2	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	4	*	
	2.24 to 2.64	1	*	2	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	2.64 to 3.08	1	*	2	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	3.08 to 3.52	1	*	2	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
3.52 to 4.05	2	*	4	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
4.05 to 4.76	*	*	*	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		
Face brick	0 to 0.35	3	6	*	*	*	*	*	*	*	6	*	*	*	*	*	
	0.35 to 0.44	3	10	*	*	*	*	*	5	10	10	*	*	*	*	*	
	0.44 to 0.53	4	10	5	*	*	5	*	5	10	11	*	*	10	*	*	
	0.53 to 0.62	*	11	5	*	*	10	5	5	11	11	15	10	10	*	10	
	0.62 to 0.70	*	11	5	10	*	10	5	5	11	11	16	10	16	*	10	
	0.70 to 0.84	*	11	*	11	*	10	5	5	16	11	*	10	16	*	16	
	0.84 to 0.97	*	11	*	11	*	10	5	10	16	16	*	10	16	*	16	
	0.97 to 1.14	*	16	*	*	*	10	9	10	16	11	*	11	16	*	16	
	1.14 to 1.36	*	16	*	*	*	11	9	10	16	16	*	16	16	*	*	
	1.36 to 1.59	*	16	*	*	*	15	9	10	16	*	*	15	16	*	*	
	1.59 to 1.89	*	16	*	*	*	15	10	10	*	16	*	16	*	10	*	
	1.89 to 2.24	*	16	*	*	*	16	10	10	*	*	*	16	*	15	*	
	2.24 to 2.64	*	16	*	*	*	16	10	10	*	16	*	*	*	15	*	
	2.64 to 3.08	*	*	*	*	*	16	10	15	*	*	*	*	*	16	*	
	3.08 to 3.52	*	*	*	*	*	16	15	15	*	*	*	*	*	16	*	
3.52 to 4.05	*	*	*	*	*	15	16	*	*	*	*	*	*	*	*		
4.05 to 4.76	*	*	*	*	*	15	*	*	*	*	*	*	*	*	*		

*Denotes a wall that is not possible with the chosen set of parameters.

**See [Table 11](#) for definition of Code letters

Table 33C Wall Types, Mass Located Outside Insulation, for Use with [Table 32](#)

Secondary Material	R-Value, m ² ·K/W	Principal Wall Material**														
		A1	A2	B7	B10	B9	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C17	C18
Stucco and/or plaster	0 to 0.35	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0.35 to 0.44	*	3	*	*	*	*	*	2	3	5	*	*	*	*	*
	0.44 to 0.53	*	3	*	*	*	2	*	2	4	5	*	*	5	*	*
	0.53 to 0.62	*	3	*	*	*	2	2	2	5	5	*	*	5	*	*
	0.62 to 0.70	*	3	*	*	*	2	2	2	5	5	10	4	6	*	5
	0.70 to 0.84	*	4	*	*	*	4	2	2	5	5	10	4	6	*	9
	0.84 to 0.97	*	4	*	*	*	4	2	2	5	6	11	5	10	*	10
	0.97 to 1.14	*	5	*	*	*	4	2	2	5	6	11	5	10	*	10
	1.14 to 1.36	*	5	*	*	*	4	2	2	5	6	11	5	10	*	10
	1.36 to 1.59	*	5	*	*	*	5	2	4	5	6	16	10	10	*	10
	1.59 to 1.89	*	5	*	*	*	5	4	4	5	6	16	10	10	4	11
	1.89 to 2.24	*	5	*	*	*	5	4	4	10	6	16	10	10	9	11
	2.24 to 2.64	*	5	*	*	*	5	4	4	10	10	*	10	11	9	11
	2.64 to 3.08	*	5	*	*	*	5	4	4	10	10	*	10	11	10	16
	3.08 to 3.52	*	5	*	*	*	9	4	4	10	10	*	10	15	10	16
3.52 to 4.05	*	9	*	*	*	9	9	9	15	10	*	10	15	15	16	
4.05 to 4.76	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	15	*	15	16	
Steel or other light-weight siding	0 to 0.35	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0.35 to 0.44	*	3	*	*	*	*	*	2	3	2	*	*	*	*	*
	0.44 to 0.53	*	3	*	*	*	2	*	2	3	2	*	*	*	*	*
	0.53 to 0.62	*	3	*	*	*	2	1	2	4	3	*	*	4	*	*
	0.62 to 0.70	*	3	*	*	*	2	2	2	4	3	5	2	5	*	4
	0.70 to 0.84	*	3	*	*	*	2	2	2	4	3	10	3	5	*	5
	0.84 to 0.97	*	3	*	*	*	2	2	2	5	3	10	4	5	*	5
	0.97 to 1.14	*	4	*	*	*	2	2	2	5	3	10	4	5	*	5
	1.14 to 1.36	*	4	*	*	*	2	2	2	5	4	11	5	5	*	6
	1.36 to 1.59	*	5	*	*	*	2	2	2	5	4	11	5	5	*	6
	1.59 to 1.89	*	5	*	*	*	2	2	2	5	4	11	5	5	4	10
	1.89 to 2.24	*	5	*	*	*	4	2	2	5	5	11	5	5	4	10
	2.24 to 2.64	*	5	*	*	*	4	2	2	5	5	11	5	10	5	10
	2.64 to 3.08	*	5	*	*	*	4	2	4	5	5	16	9	10	9	10
	3.08 to 3.52	*	5	*	*	*	4	4	4	9	5	16	9	10	10	10
3.52 to 4.05	*	9	*	*	*	4	4	4	9	9	16	10	10	10	11	
4.05 to 4.76	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	16	10	*	10	15	
Face brick	0 to 0.35	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	0.35 to 0.44	3	*	*	*	*	*	*	*	*	11	*	*	*	*	*
	0.44 to 0.53	3	10	*	*	*	*	*	5	10	11	*	*	*	*	*
	0.53 to 0.62	3	11	5	*	*	10	*	5	11	11	*	*	11	*	*
	0.62 to 0.70	3	11	5	*	*	10	5	6	11	11	*	*	11	*	*
	0.70 to 0.84	3	11	5	10	*	10	5	10	11	11	*	10	11	*	16
	0.84 to 0.97	3	12	5	10	*	10	9	10	11	12	*	11	16	*	16
	0.97 to 1.14	4	12	5	10	*	10	10	10	12	12	*	15	16	*	16
	1.14 to 1.36	4	12	5	10	*	11	10	10	12	12	*	16	*	*	16
	1.36 to 1.59	5	12	5	15	*	11	10	10	16	12	*	16	*	*	*
	1.59 to 1.89	5	12	9	15	*	11	10	10	16	12	*	16	*	15	*
	1.89 to 2.24	5	12	10	15	*	11	10	10	*	12	*	16	*	15	*
	2.24 to 2.64	5	*	10	16	*	11	10	11	*	*	*	16	*	15	*
	2.64 to 3.08	5	*	10	16	*	15	10	11	*	*	*	16	*	*	*
	3.08 to 3.52	5	*	10	16	*	16	15	15	*	*	*	*	*	*	*
3.52 to 4.05	9	*	15	16	*	16	15	15	*	*	*	*	*	*	*	
4.05 to 4.76	*	*	*	*	*	*	15	*	*	*	*	*	*	*	*	

*Denotes a wall that is not possible with the chosen set of parameters.

**See [Table 11](#) for definition of Code letters

Table 15 Solar Irradiance (E_{DN}) and Solar Heat Gain Factors (SHGF) for 16° North Latitude

Date	Solar Time	Direct Normal W/m ²	Solar Heat Gain Factors, W/m ²																Solar Time	
			N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW		Hor.
Jan	7	445	17	19	138	291	390	424	396	303	155	19	17	17	17	17	17	17	43	5
	8	827	45	48	174	463	662	756	734	596	359	79	45	45	45	45	45	45	249	4
	9	948	67	67	102	384	630	770	791	690	481	183	69	67	67	67	67	67	472	3
	10	1001	82	82	86	209	474	658	736	704	563	321	97	82	82	82	82	82	640	2
	11	1025	91	91	91	96	242	467	614	663	611	462	236	96	91	91	91	91	745	1
12	1032	95	95	95	95	100	228	438	580	628	580	438	228	100	95	95	95	781	12	
HALF DAY TOTALS			348	352	618	1452	2398	3153	3457	3216	2465	1344	666	401	350	348	348	348	2539	
Feb	7	575	24	55	265	435	531	544	474	326	113	26	24	24	24	24	24	24	80	5
	8	862	53	60	304	567	729	778	706	524	244	56	53	53	53	53	53	53	319	4
	9	961	74	77	202	482	675	763	733	592	347	96	74	74	74	74	74	74	549	3
	10	1006	90	91	104	291	508	636	664	593	423	193	93	90	90	90	90	90	721	2
	11	1027	99	99	102	118	262	428	527	542	471	323	154	103	99	99	99	99	831	1
12	1033	103	103	103	104	108	189	336	448	487	448	336	189	108	104	103	103	868	12	
HALF DAY TOTALS			390	431	1013	1922	2728	3226	3262	2790	1835	906	547	417	392	390	390	390	2932	
Mar	7	633	35	167	392	543	605	578	457	259	46	33	33	33	33	33	33	33	126	5
	8	857	63	157	441	647	752	740	614	389	111	61	61	61	61	61	61	61	380	4
	9	942	83	110	342	564	688	708	622	435	180	85	82	82	82	82	82	82	605	3
	10	983	98	103	191	378	519	575	542	424	240	106	99	98	98	98	98	98	777	2
	11	1002	107	110	113	166	273	361	394	365	280	173	113	110	107	107	107	107	884	1
12	1007	111	111	112	114	117	149	215	273	294	273	215	149	117	114	112	111	918	12	
HALF DAY TOTALS			443	712	1556	2381	2924	3074	2771	2026	1005	588	483	447	440	438	437	437	3230	
Apr	6	44	7	24	37	43	43	37	24	7	2	2	2	2	2	2	2	2	4	6
	7	622	75	297	482	589	604	528	369	141	45	42	42	42	42	42	42	42	169	5
	8	806	85	312	543	681	717	644	473	217	74	70	70	70	70	70	70	70	412	4
	9	884	97	248	468	609	657	608	465	244	97	90	90	90	90	90	90	90	622	3
	10	923	111	171	320	444	498	476	380	231	118	108	105	105	105	105	105	105	784	2
11	942	120	126	169	228	270	276	245	188	136	121	118	115	115	115	115	118	881	1	
12	948	123	123	124	125	125	129	135	141	143	141	135	129	125	125	124	123	910	12	
HALF DAY TOTALS			565	1271	2126	2709	2907	2682	2058	1111	547	583	494	491	489	489	489	491	3331	
May	6	138	43	94	128	141	134	106	59	11	9	9	9	9	9	9	9	10	17	6
	7	607	157	378	531	602	583	474	289	76	49	49	49	49	49	49	49	52	195	5
	8	770	165	415	597	689	677	564	362	121	78	76	76	76	76	76	76	80	424	4
	9	844	156	365	539	625	621	525	344	141	100	96	96	96	96	96	96	100	620	3
	10	882	149	281	409	477	473	397	264	139	116	111	111	111	111	111	111	111	771	2
11	901	147	198	248	273	262	220	165	130	126	123	120	120	120	122	124	128	861	1	
12	906	146	144	139	134	132	131	130	129	129	129	130	130	130	132	134	139	144	889	12
HALF DAY TOTALS			892	1811	2534	2888	2826	2358	1553	684	541	528	526	526	526	528	532	556	3335	
Jun	6	168	64	124	163	175	162	123	64	13	12	12	12	12	12	12	13	24	6	
	7	593	194	403	542	598	565	445	252	63	52	52	52	52	52	52	52	57	203	5
	8	750	209	449	611	683	653	526	313	98	79	79	79	79	79	79	79	84	425	4
	9	823	199	408	560	626	601	487	294	118	98	98	98	98	98	98	98	105	613	3
	10	860	187	329	440	486	459	363	222	124	116	113	113	113	113	113	113	121	759	2
11	879	181	241	283	290	258	200	146	130	126	121	121	121	121	125	128	136	846	1	
12	885	179	173	158	142	134	132	130	129	129	129	130	132	134	142	158	173	873	12	
HALF DAY TOTALS			1122	2042	2682	2930	2762	2207	1356	612	548	540	539	540	542	545	555	599	3307	
Jul	6	128	43	90	122	134	127	99	55	11	9	9	9	9	9	9	9	10	17	6
	7	579	161	373	518	584	564	456	277	74	51	51	51	51	51	51	51	55	194	5
	8	743	173	415	590	676	661	549	349	118	78	78	78	78	78	78	78	83	419	4
	9	818	165	370	537	618	610	513	334	138	102	99	99	99	99	99	99	104	611	3
	10	857	157	289	413	475	467	389	257	138	118	113	113	113	113	113	113	120	759	2
11	876	154	207	255	277	262	218	164	132	128	125	122	122	122	125	128	131	848	1	
12	882	154	151	145	138	135	134	133	132	132	132	133	134	135	138	145	151	875	12	
HALF DAY TOTALS			933	1829	2520	2847	2769	2298	1506	680	554	541	539	539	540	542	547	575	3288	
Aug	6	36	7	21	31	37	36	31	20	6	2	2	2	2	2	2	2	4	6	
	7	569	81	289	458	555	566	493	343	131	48	45	45	45	45	45	45	45	167	5
	8	757	94	315	531	660	691	617	451	206	79	74	74	74	74	74	74	74	404	4
	9	838	104	258	467	598	640	589	448	235	103	95	95	95	95	95	95	95	608	3
	10	879	118	183	327	443	490	464	368	224	122	114	110	110	110	110	110	110	765	2
11	899	127	136	180	235	271	273	240	185	138	127	124	120	120	120	120	123	860	1	
12	905	129	130	130	131	132	134	139	143	145	143	139	134	132	131	130	130	888	12	
HALF DAY TOTALS			603	1294	2099	2639	2809	2577	1969	1069	568	528	519	516	515	514	515	518	3257	
Sep	7	565	38	157	360	497	554	529	419	140	48	35	35	35	35	35	35	35	122	5
	8	796	67	156	424	617	716	705	586	374	113	64	64	64	64	64	64	64	367	4
	9	887	87	114	335	547	665	684	602	423	181	90	86	86	86	86	86	86	585	3
	10	831	101	107	193	372	506	560	529	415	240	111	103	101	101	101	101	101	752	2
	11	951	111	114	118	169	272	356	388	360	279	176	118	114	111	111	111	111	856	1
12	957	114	114	116	118	121	153	217	293	272	217	153	121	118	116	114	114	889		

Table 3 Rates of Heat Gain from Occupants of Conditioned Spaces

Degree of Activity		Total Heat, W		Sensible Heat, W	Latent Heat, W	% Sensible Heat that is Radiant ^b	
		Adult Male	Adjusted, M/F ^a			Low V	High V
Seated at theater	Theater, matinee	115	95	65	30		
Seated at theater, night	Theater, night	115	105	70	35	60	27
Seated, very light work	Offices, hotels, apartments	130	115	70	45		
Moderately active office work	Offices, hotels, apartments	140	130	75	55		
Standing, light work; walking	Department store; retail store	160	130	75	55	58	38
Walking, standing	Drug store, bank	160	145	75	70		
Sedentary work	Restaurant ^c	145	160	80	80		
Light bench work	Factory	235	220	80	140		
Moderate dancing	Dance hall	265	250	90	160	49	35
Walking 4.8 km/h; light machine work	Factory	295	295	110	185		
Bowling ^d	Bowling alley	440	425	170	255		
Heavy work	Factory	440	425	170	255	54	19
Heavy machine work; lifting	Factory	470	470	185	285		
Athletics	Gymnasium	585	525	210	315		

Notes:

1. Tabulated values are based on 24°C room dry-bulb temperature. For 27°C room dry bulb, the total heat remains the same, but the sensible heat values should be decreased by approximately 20%, and the latent heat values increased accordingly.

2. Also refer to Table 4, Chapter 8 for additional rates of metabolic heat generation.

3. All values are rounded to nearest 5 W.

^aAdjusted heat gain is based on normal percentage of men, women, and children for the application listed, with the postulate that the gain from an adult female is

85% of that for an adult male, and that the gain from a child is 75% of that for an adult male.

^bValues approximated from data in Table 6, Chapter 8, where v is air velocity with limits shown in that table.

^cAdjusted heat gain includes 18 W for food per individual (9 W sensible and 9 W latent).

^dFigure one person per alley actually bowling, and all others as sitting (117 W) or standing or walking slowly (231 W).

Table 9A Rate of Heat Gain from Selected Office Equipment

Appliance	Size	Maximum Input Rating, W	Standby Input Rating, W	Recommended Rate of Heat Gain, W
Check processing workstation	12 pockets	4800	2460	2460
Computer devices				
Card puncher	—	800 to 1800	640 to 1410	640 to 1410
Card reader	—	2200	1520	1520
Communication/transmission	—	1800 to 4600	1640 to 2810	1640 to 2810
Disk drives/mass storage	—	1000 to 10000	1000 to 6570	1000 to 6570
Magnetic ink reader	—	960 to 4700	760 to 4220	760 to 4220
Microcomputer	16 to 640 Kbyte ^a	100 to 600	90 to 530	90 to 530
Minicomputer	—	2200 to 6600	2200 to 6600	2200 to 6600
Optical reader	—	3000 to 6000	2350 to 4980	2350 to 4980
Plotters	—	75	37	63
Printers				
Letter quality	30 to 45 char/min	350	175	292
Line, high speed	5000 or more lines/min	1000 to 5300	500 to 2550	730 to 3810
Line, low speed	300 to 600 lines/min	450	225	376
Tape drives	—	1200 to 6500	1000 to 4700	1000 to 4700
Terminal	—	90 to 200	80 to 180	80 to 180
Copiers/Duplicators				
Blue print	—	1150 to 12500	500 to 5000	1150 to 12500
Copiers (large)	30 to 67 ^a copies/min	1700 to 6600	900	1700 to 6600
Copiers (small)	6 to 30 ^a copies/min	460 to 1700	300 to 900	460 to 1700
Feeder	—	30	—	30
Microfilm printer	—	450	—	450
Sorter/collator	—	60 to 600	—	60 to 600
Electronic equipment				
Cassette recorders/players	—	60	—	60
Receiver/tuner	—	100	—	100
Signal analyzer	—	60 to 650	—	60 to 650
Mailprocessing				
Folding machine	—	125	—	80
Inserting machine	3600 to 6800 pieces/h	600 to 3300	—	390 to 2150
Labeling machine	1500 to 30000 pieces/h	600 to 6600	—	390 to 4300
Postage meter	—	230	—	150
Wordprocessors/Typewriters				
Letter quality printer	30 to 45 char/min	350	175	292
Phototypesetter	—	1725	—	1520
Typewriter	—	80	—	67
Wordprocessor	—	100 to 600	—	88 to 530
Vending machines				
Cigarette	—	72	15 to 25	72
Cold food/beverage	—	1150 to 1920	—	575 to 960
Hot beverage	—	1725	—	862
Snack	—	240 to 275	—	240 to 275
Miscellaneous				
Barcode printer	—	440	—	370
Cash registers	—	60	—	48
Coffee maker	10 cups	1500	—	1050 sens., 450 latent
Microfiche reader	—	85	—	85
Microfilm reader	—	520	—	520
Microfilm reader/printer	—	1150	—	1150
Microwave oven	28 L	600	—	400
Paper shredder	—	250 to 3000	—	200 to 2420
Water cooler	30 L/h	700	—	1750

^aInput is not proportional to capacity.