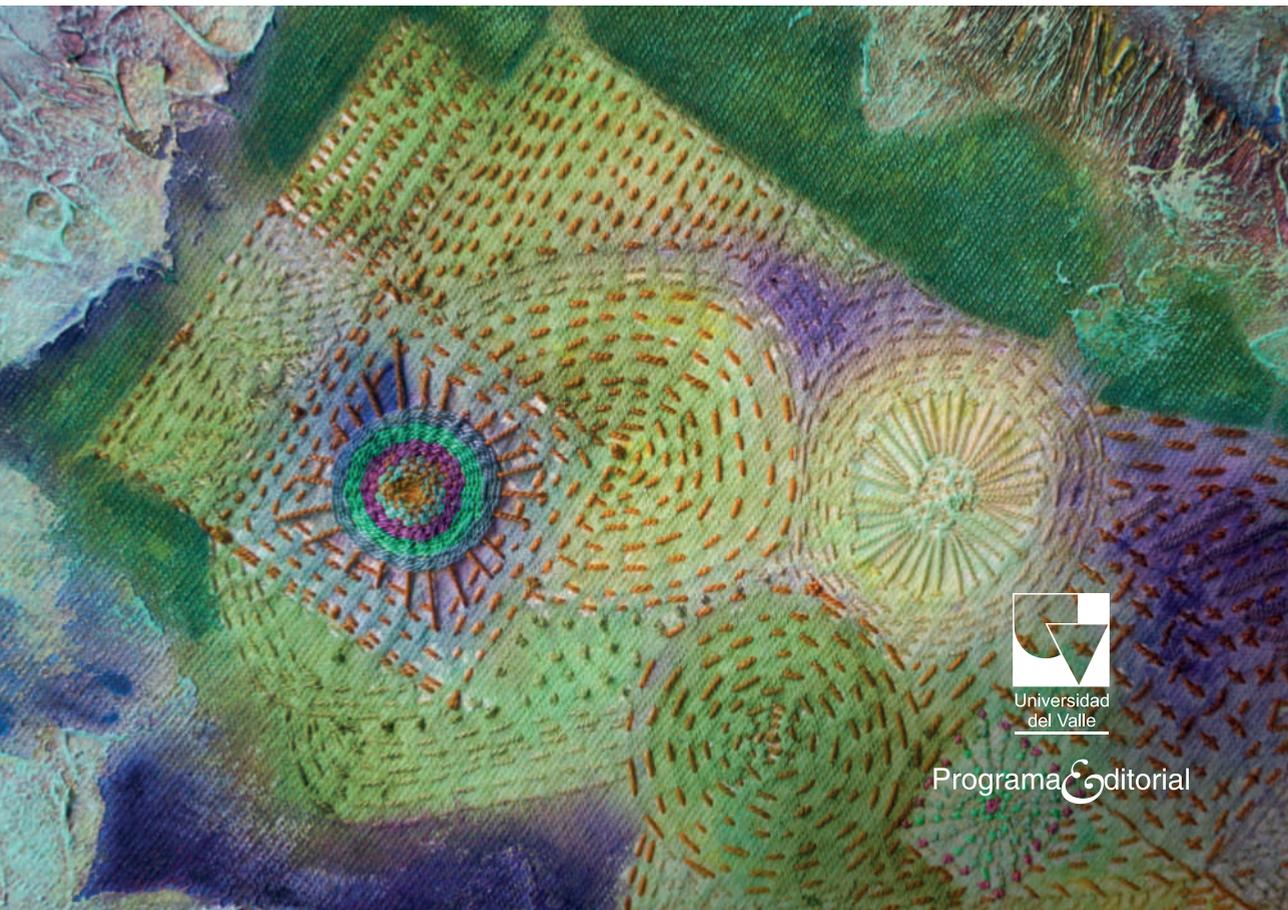


CONFORT Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL DISEÑO DE EDIFICACIONES UN ENFOQUE PRÁCTICO

MIGUEL ENRIQUE ROSILLO P.
CARLOS ALBERTO HERRERA C.



Universidad
del Valle

Programa Editorial

La climatización de edificaciones demanda, para su completo éxito, la integración de la ingeniería mecánica con la arquitectura. Cada decisión (tipo de fachada, tamaño de ventanas, tipo de techo, etc.), además de su valor estético-funcional, condiciona las necesidades de equipo y, por ende, el consumo de energía, las inversiones, los costos de operación y mantenimiento, y los impactos ambientales.

Este libro pone al alcance de sus usuarios diversas opciones para sustituir un diseño intuitivo por un diseño racional, objetivo, organizado, y evaluable en todas las áreas. Gracias a estos textos, se podrán seleccionar estrategias y equipos de climatización que conduzcan al confort, a la calidad de aire, a la inversión inteligente y moderada de recursos económicos y energéticos, y a la mitigación de efectos ecológicos negativos. Todo lo anterior no excluye la capacidad de análisis crítico en edificaciones existentes, esto es especialmente aplicable en rehabilitaciones, proyectos de mejora, acompañamiento (commissioning) o simplemente evaluación ambiental. Estas aseveraciones tienen fundamento en el hecho de que tanto el confort como la eficiencia energética son cuantificables —y manejables— desde el diseño, o sea que no son accidentes a medir en campo, sino condiciones factibles de determinar anticipadamente.



**CONFORT Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA
EN EL DISEÑO DE EDIFICACIONES
UN ENFOQUE PRÁCTICO**



Colección Ingeniería

Rosillo P., Miguel E.

Confort y eficiencia energética en el diseño de edificaciones : un enfoque práctico / Miguel Enrique Rosillo Peña, Carlos Alberto Herrera Cáceres. -- Cali : Editorial Universidad del Valle, 2019.

208 páginas ; 24 cm. -- (Colección ingeniería)

Incluye bibliografía.

1. Eficiencia energética – Edificios 2. Eficiencia energética – Indicadores
3. Edificios -- Condiciones ambientales 4. Edificios – Climatización I. Herrera Cáceres, Carlos Alberto, autor II. Tít. III. Serie
333.79 cd 22 ed.
A1648259

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel

Universidad del Valle

Programa Editorial

Título: Confort y eficiencia energética en el diseño de edificaciones. Un enfoque práctico

Autores: Miguel Enrique Rosillo Peña, Carlos Alberto Herrera Cáceres

ISBN-PDF: 978-958-5599-47-5

Colección: Ingeniería

Primera edición

Rector de la Universidad del Valle: Édgar Varela Barrios

Vicerrector de Investigaciones: Jaime Cantera Kintz

Director del Programa Editorial: Omar Diaz

© Universidad del Valle

© Miguel Enrique Rosillo Peña, Carlos Alberto Herrera Cáceres

Diseño de carátula y diagramación: Diana Lizeth Velasco D.

Corrección de estilo: Luis Jaime Ariza T.

Imagen de portada: María Ximena González, mximenagonzalez@hotmail.com

Este libro, salvo las excepciones previstas por la Ley, no puede ser reproducido por ningún medio sin previa autorización escrita por la Universidad del Valle.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión del autor y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad del Valle, ni genera responsabilidad frente a terceros. El autor es responsable del respeto a los derechos de autor del material contenido en la publicación, razón por la cual la Universidad no puede asumir ninguna responsabilidad en caso de omisiones o errores.

Cali, Colombia, octubre 2019

CONFORT Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL DISEÑO DE EDIFICACIONES UN ENFOQUE PRÁCTICO

MIGUEL ENRIQUE ROSILLO P.
CARLOS ALBERTO HERRERA C.



Colección Ingeniería

CONTENIDO

Prefacio	9
Aspectos generales del proyecto de una edificación y del diseño de climatización	11
CAPÍTULO 1	
Fundamentos	13
CAPÍTULO 2	
Confort térmico	23
Concepto de confort.	23
Indices de confort	32
Normatividad sobre confort térmico	40
Herramientas de cuantificación numérica del confort.	42
CAPÍTULO 3	
Condiciones ambientales	51
La estación meteorológica	52
Lectura de la rosa de los vientos	59
La instrumentación	61
CAPÍTULO 4	
Calidad del aire	65
Introducción	65
Glosario, abreviaturas, acrónimos	65
Calidad de aire interior y exterior	72
Contaminantes.	77
Instrumentación	86
Calidad de aire en Colombia	91
Contenido	104
Ventilación	118

CAPÍTULO 5

Carga térmica	125
Cargas calóricas	128

CAPÍTULO 6

Caso base (<i>base case</i>)	135
Caracterizaciones	135
Identificación de la hora crítica	140
Calidad de aire interior y análisis de los primeros resultados	150
Capacidad de renovación de aire por ventilación natural	150

CAPÍTULO 7

Estrategias de climatización	153
Caso base	160
Proposición de estrategias	160
Primer balance de modificaciones	163
Selección de modificaciones y balance climático final	168
Otras alternativas	170

CAPÍTULO 8

Eficiencia energética	173
Eficiencia energética de aparatos con la misma función	176
Caso base	177
Edificios energía cero, o energía cercana a cero, o energía plus	180

CAPÍTULO 9

Análisis económico e impacto ambiental	183
Vida del proyecto	183
Inversión de capital	184
Caso base	185
Costos de operación, mantenimiento, combustibles y servicios	186
Caso base	188
Elementos de ingeniería económica	190
Caso base	194
Producción de CO ₂	195
Bibliografía	197

PREFACIO

La climatización, en el marco del diseño de edificaciones, demanda para su completo éxito la integración de la ingeniería mecánica con la arquitectura. Esto se da porque cada decisión (tipo de fachada, tamaño de ventanas, tipo de techo, etcétera), además de su valor estético/funcional, condiciona las necesidades de equipo y, por ende, el consumo de energía, las inversiones, los costos de operación y mantenimiento y, consecuentemente, los impactos ambientales. Para abordar lo anterior dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje, cada profesor organiza su cátedra particular a partir de sus experiencias personales y/o referencias preferidas, encontrándose una variedad de ofertas con distintas calidades y resultados. Esta situación, informalmente estructurada, conduce a que cada docente priorice sus intereses o habilidades, dejando emerger sus inseguridades y prejuicios, resultando en ocasiones su cátedra plagada de incertidumbre, mitificada y, por ello, muchas veces deficiente.

Este libro pretende resolver el anterior problema pues pondrá al alcance de sus usuarios diversas opciones para sustituir un diseño intuitivo por un diseño racional, objetivo, organizado, y evaluable en todas las áreas. Es decir, gracias a los aspectos disponibles en este texto los equipos diseñadores podrán seleccionar las estrategias y las facilidades de climatización que conduzcan al confort, a la calidad de la construcción, a la inversión inteligente y moderada de recursos económicos y energéticos, y a la mitigación de efectos ecológicos negativos. Estas aseveraciones tienen fundamento en el hecho de que tanto el confort como la eficiencia energética son cuantificables —y manejables— desde el diseño, o sea que no son accidentes a medir en campo sino condiciones factibles de determinar anticipadamente.

ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO DE UNA EDIFICACIÓN Y DEL DISEÑO DE CLIMATIZACIÓN

Básicamente una edificación es una construcción fabricada con materiales resistentes, destinada a servir como espacio para el desarrollo de alguna actividad humana (habitación, culto, recreación, etc.). Hoy el diseño de una edificación es una tarea multidisciplinaria en la que intervienen grupos de arquitectura así como de ingenierías civil, mecánica, eléctrica, de control, sanitaria, de seguridad y de comunicaciones. La coordinación, en general efectuada por el grupo de arquitectura, es vital para que cada instalación cumpla su función sin interferir las demás. La climatización trata de proveer condiciones térmicas satisfactorias.

Como se puede advertir en el Graphical Abstract, en la *fase inicial* se hacen explícitos los objetivos obligatorios y los deseables (“musts & wants”), y se aportan, para conocimiento de todos, las restricciones y las condiciones que se hayan acordado. En este punto el grupo de arquitectura hace una propuesta base sobre la que cada uno de los otros grupos trabaja en su propia primera proposición. Durante la *fase media* se debaten, afinan y coordinan las diferentes propuestas hasta obtener un conjunto que cumpla con las expectativas del cliente, expectativas que se han venido ajustando. En la *fase final* se produce la documentación técnica que permite pasar a las fases de licitación, contratación, construcción y entrega del inmueble.

En el caso particular del diseño de climatización, la información básica debe reunir las condiciones medio-ambientales; las limitaciones físicas, topográficas, legales y presupuestales; las normativas aplicables; el proyecto base aportado por arquitectura, y el objetivo de confort a obtener (PMV o equivalente). Con estos insumos se elabora la propuesta inicial de climatización y se incorpora al proceso de antítesis/síntesis descrito anteriormente, del que se derivan las decisiones finales.

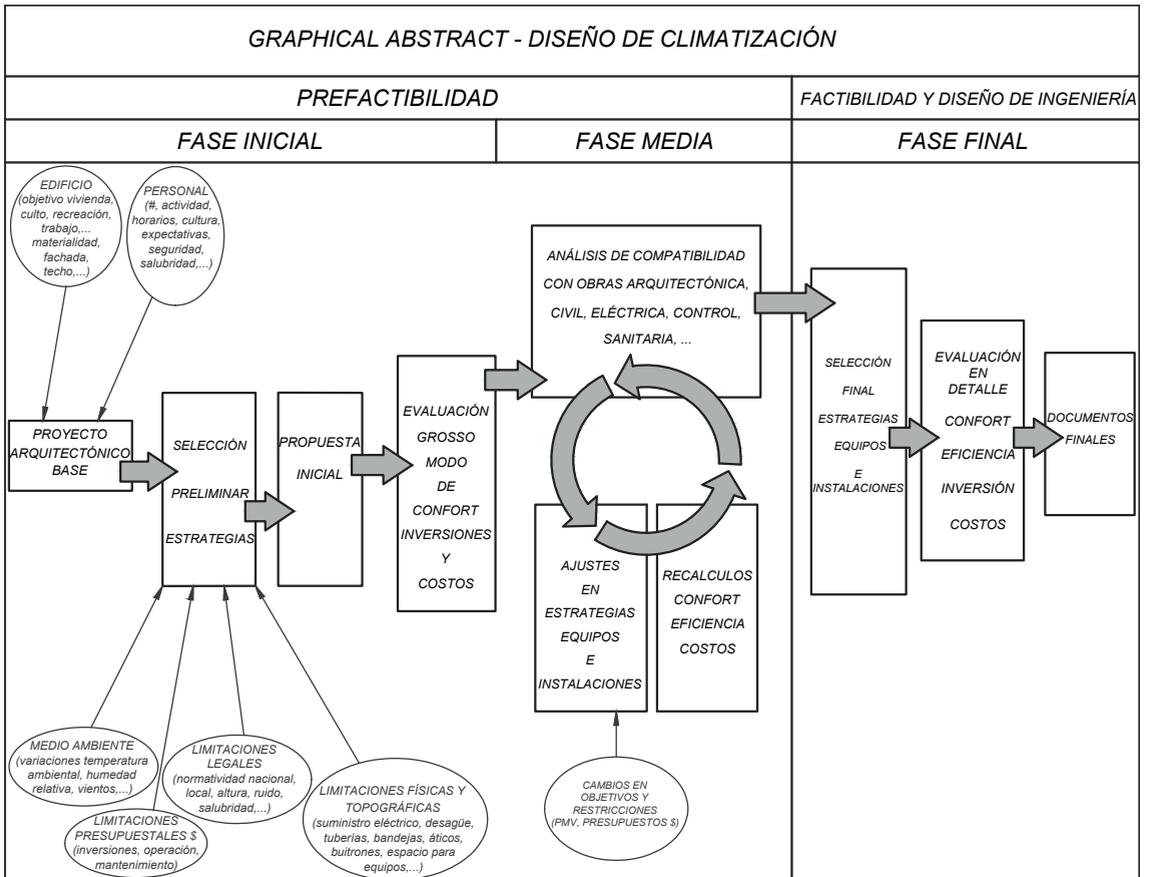


Figura 1.1. GRAPHICAL ABSTRACT - DISEÑO DE CLIMATIZACIÓN

FUNDAMENTOS

Climatización es la técnica que permite dar a un espacio las condiciones de temperatura, humedad, presión (a veces), limpieza y distribución de aire necesarias para el bienestar de las personas y/o la conservación de las cosas. La climatización pertenece al ámbito de la ingeniería mecánica porque involucra máquinas que mueven el aire, lo filtran, lo distribuyen, lo calientan o lo enfrían, lo humectan o lo deshumectan, consumen electricidad y combustibles, y usan sistemas para medición y control de distintas variables.

El arquitecto líder del proyecto de construcción y el ingeniero responsable de la climatización están obligados a comunicarse fluidamente, para lo cual, además de usar el mismo lenguaje, deben coincidir en la comprensión de las formas de funcionamiento, los efectos y las limitaciones de los procesos y los equipos climatizadores. Para unificar los conceptos básicos y que ambos profesionales se expresen en los mismos términos, se exponen a continuación —en forma muy resumida— algunos conceptos y principios de ciencias térmicas y mecánica de fluidos, cuya coincidencia en el manejo y la interpretación son vitales en la mencionada comunicación.

Sistema. Es el objeto de estudio. La edificación es el sistema cuyas condiciones ambientales deben adecuarse, lo que puede hacerse por medios naturales, artificiales, o una combinación de ambos. Para propósitos de diseño, el edificio se divide en sub-sistemas, cada uno de ellos llamado cuarto (room). La mayoría de las veces puede decirse que el aire es el vehículo para calentar o enfriar el espacio (vientos naturales o corrientes impulsadas por equipos de tratamiento de aire), pero también es posible ayudarse mediante serpentines radiadores, o radiadores eléctricos, o circuitos insertos en muros, pisos y techos, por los que circula agua fría o caliente.

Inercia térmica. La inercia se describe en general como la incapacidad de un cuerpo para variar su estado de movimiento o de reposo; la inercia térmica es, entonces, la dificultad que se experimenta para cambiar la temperatura de un sistema. Evidentemente, las inercias están relacionadas con la mayor

o menor masa del sistema. Como en un edificio se tienen del orden de 100 a 150 kg de estructuras por cada kg de aire, es claro que la inercia térmica del edificio es muy grande, mientras que la del aire es pequeña.

Conservación de la energía. La ley de la conservación de la energía, o primera ley de la termodinámica, enseña que la energía no se puede crear ni destruir. El calor (energía térmica) que entra o es generado dentro de un sistema hace que se incrementen su energía interna y su temperatura, pero si lo que se desea es que la temperatura baje o se mantenga constante es necesario evacuar calor a una tasa igual o mayor. Como se dijo, los vehículos para hacer tal remoción en un edificio son, normalmente el aire y agua corriente, en menor proporción. En invierno se trata de aportar calor al edificio, para lo cual se emplean los mismos vehículos o radiadores eléctricos.

Estado estable o estado permanente. En concordancia con lo anterior, en el balance de energía, si la suma del calor que entra más el que se genera es igual al calor que sale, la temperatura del sistema permanece constante; a este primer caso se le denomina estado estable o permanente. Si, en cambio, en el balance no se cumple la igualdad, la temperatura subirá o bajará. A este segundo caso se le denomina estado inestable o transitorio. Debido a su enorme masa, un edificio al que se le practica climatización controlada mantiene su temperatura o la cambia lentamente; por tanto, generalmente se considera como sistema en estado permanente. El aire, en cambio, teniendo una masa insignificante, puede cambiar su temperatura rápidamente. Al margen se puede añadir que, y esto es muy relevante en el diseño, si en un área habitada se tienen condiciones de temperatura o humedad variables de un sitio a otro, o inestables en períodos cortos, seguramente no hay confort.

Calor sensible y calor latente. El calor sensible es el que está asociado con un cambio de temperatura (p.e., calentamiento de agua en un calentador solar), y el calor latente es el que está asociado a un cambio de fase (p.e., la condensación de agua en un serpentín de aire acondicionado). Para complementar estas ilustraciones: en el caso de un muro soleado es visible su aumento de temperatura, por lo cual la radiación térmica recibida se clasifica como calor sensible; en cambio, en el caso del sudor que se evapora sobre la piel, el calor absorbido por el sudor en su proceso de evaporación es un calor latente. Debe tenerse en cuenta que en este último caso ese calor latente ha sido aportado por la piel, ya que la sudoración es un mecanismo natural del cuerpo humano para refrescarse.

Mecanismos de transferencia de calor. El calor se transmite siempre desde un sistema con alta temperatura a otro con baja temperatura. Ocurre mediante

tres distintas maneras, todas ellas de gran importancia en la climatización: conducción, convección y radiación.

Conducción es la forma como fluye el calor en un medio sólido o entre dos sólidos en contacto (muy rara vez en fluidos). La energía se transmite por comunicación molecular directa sin desplazamiento de las moléculas. La propiedad que determina la rapidez de esta transferencia se llama conductividad; si un medio tiene baja conductividad se conoce como material aislante.

Convección es la forma corriente de transferencia calórica entre sólidos y fluidos; en este proceso se combinan conducción, almacenamiento de energía y movimiento de masa. Es el caso que ocurre, p.e., entre una superficie sólida caliente y un gas frío: inicialmente el calor fluye por conducción desde la pared hacia las partículas fluidas adyacentes haciendo que aumenten su temperatura y su movilidad (velocidad media); después estas se desplazan hacia las regiones frías provocando mezcla y transferencia energética a otras partículas. Cuando el fluido es impulsado por medios mecánicos (bombas, ventiladores, compresores), se denomina convección forzada; cuando el fluido se mueve solo impulsado por fuerzas naturales (diferencia de densidad por diferencia de temperaturas), se denomina convección natural.

Radiación es la forma como se transmite calor entre cuerpos separados por un espacio que incluso puede ser el vacío. Por ejemplo, es la manera como nos llega calor del sol. El nombre proviene del hecho de que el calor viaja de un cuerpo a otro en forma de ondas electromagnéticas.

Todo cuerpo emite “radiación térmica” en forma continua, y la cantidad emitida depende de su temperatura superficial, su área y una propiedad superficial llamada emisividad. Se conocen como cuerpos negros ideales los que más emiten radiación a cualquier temperatura y se les asigna emisividad igual a 1 (uno); las superficies reales emiten menos, y su emisividad es menor que 1 (uno).

Todo cuerpo está sometido a radiaciones térmicas incidentes, provenientes de los cuerpos que lo pueden “ver”, y cuando esas ondas electromagnéticas inciden sobre su superficie ocurre que algunas se reflejan, algunas atraviesan el cuerpo y el resto se absorbe. Si el cuerpo es “opaco” no es atravesado por la radiación; p.e., un muro es opaco, pero un vidrio no. El porcentaje de radiación incidente reflejada por una superficie se llama “reflectividad”; el porcentaje de radiación incidente absorbida por una superficie se llama “absortividad”. En climatización, la selección de materiales atendiendo estas propiedades es muchas veces la diferencia entre el éxito y el fracaso.

El Aire. Es una mezcla mecánica de unos gases ideales (nitrógeno, oxígeno, CO_2 , argón, etc.), vapor de agua y aerosoles [ver Figura 4.1]. Estos últimos no son significativos en el comportamiento termodinámico debido a su pequeña participación en el peso total, pero son de extrema importancia en lo cuanto a la higiene y la salubridad; son tratados con total detalle en el capítulo “Calidad de Aire”. El conjunto de los gases ideales se llama **aire seco**, y el conjunto total se llama **aire húmedo**. Todo aire real contiene algún porcentaje de humedad; el contenido de vapor en un aire común está por el orden del 1% de la masa total. En el aire son claves dos aspectos: sus propiedades termodinámicas (propiedades cuantitativas) y su calidad (limpieza, higiene, esterilidad). (Ver capítulo “Calidad de Aire”). Las propiedades termodinámicas se especifican siempre respecto a la unidad de masa de aire seco. En la búsqueda del confort hay que reconocer al aire como el elemento más importante (pero no el único), pues es el medio que nos rodea y con el cual se hacen los principales intercambios calóricos. Las propiedades más importantes del aire —y las más fáciles de medir— son la temperatura y la humedad relativa; si se conocen estos dos valores se pueden hallar todas las demás condiciones del aire (en general, cualquiera de estas dos propiedades es suficiente).

Temperatura bulbo seco o, simplemente, temperatura [T_{bs}]. Es la que mide un termómetro común y corriente. En ciertas circunstancias debe tenerse en cuenta que una radiación incidente sobre el termómetro puede alterar la lectura.

Temperatura bulbo húmedo [T_{bh}]. Es la que mide un termómetro cuyo bulbo o sensor está recubierto por una mecha permanentemente humedecida, sometida a una corriente de aire con velocidad entre 5 y 10 m/s (1000 y 2000 fpm). En general, la temperatura de bulbo húmedo es menor que la de bulbo seco pero jamás mayor, pues la evaporación que se da en la mecha consume energía aportada por el bulbo o sensor. En el pasado era corriente usar un conjunto de termómetros bulbo seco-bulbo húmedo para establecer el estado termodinámico del aire.

Contenido de humedad (humedad absoluta) [w]. Es la masa de agua presente en el aire real; su magnitud se da en unidades de masa de agua por unidad de masa de aire seco (normalmente en gramos de agua/ kg de aire seco).

Humedad relativa (HR%). Es la cantidad de agua realmente presente en el aire comparada con la máxima cantidad de agua que podría contener dicho aire sin variar su temperatura. Según esto, la humedad relativa se mide en términos de porcentajes (%). Si HR es 100% quiere decir que el aire contiene la máxima cantidad de agua que le es posible retener y se

llama aire saturado. Actualmente son comunes, baratos y fáciles de adquirir los instrumentos y los dataloggers para temperatura/humedad relativa.

Entalpía [h]. Es la suma total de las energías presentes en el aire; es decir, incluye tanto la entalpía del aire seco (gases ideales) como la del vapor de agua, esto es, energías sensibles y latentes. Sus unidades son kJ/kg de aire seco.

Punto de rocío [PR]. Es la temperatura a la cual debe comenzar la condensación del vapor de agua presente en el aire real. Si vamos disminuyendo paulatinamente la temperatura del aire, sería el valor al cual aparece la primera gotita de agua.

Densidad [kg/m³]. Es la masa contenida en la unidad de volumen (su inverso, el volumen específico (v) [m³/kg], es el volumen ocupado por una unidad de masa). Como el aire se puede considerar un gas ideal, su densidad depende mucho de la presión a la que está sometido, es decir, de la presión atmosférica.

Aire saturado. Es el aire cuyo contenido de humedad es el máximo posible. Ello significa que su temperatura de bulbo seco es igual a su temperatura de bulbo húmedo y también igual a su temperatura de punto de rocío; además, que su humedad relativa es 100% y que si baja su temperatura entonces parte del vapor de agua se condensará. Un aire saturado no tiene capacidad de absorber humedad.

Aire estándar. Es el aire cuya densidad es 1.2 kg/m³. Un ejemplo de aire estándar es el aire a 20°C a nivel del mar. Es un concepto muy importante en el manejo del aire porque los catálogos tienen esta base; ignorar lo anterior es causa frecuente de graves errores en la selección de ventiladores y equipos climatizadores.

Presión positiva, presión negativa y presión diferencial. Cuando la presión del aire ambiente de un espacio es mayor que la atmosférica hablamos de presión positiva; por cualquier abertura se escapará aire del espacio hacia afuera. En caso de que la presión sea menor que la atmosférica se llama presión negativa, y por las rendijas se filtrará aire hacia adentro. Cuando se comparan las presiones de dos espacios adyacentes, si son distintas se dice que existe allí una presión diferencial (p.e., entre la entrada y la salida de un filtro). Cualquiera de los tres casos mencionados puede lograrse mediante disposición de ventiladores mecánicos. Están disponibles, a buen precio, manómetros diferenciales manuales o fijos que permiten conocer el signo y la magnitud de estos parámetros.

Esclusas. Son espacios diseñados para impedir los ingresos (o salidas) de aire indeseables a (o desde) un cuarto. Se implementan mediante una combinación de puertas y sistemas de ventilación mecánica.

La carta sicrométrica. Las propiedades cuantitativas del aire se muestran en un sencillo gráfico llamado carta sicrométrica. Como ya se dijo, solo es necesario conocer —o medir— dos propiedades del aire (p.e., temperatura y humedad relativa) para situarse en la carta y leer las demás. La Figura 1.1 ilustra cómo, situados en un punto, se pueden leer, en el eje horizontal, la temperatura de bulbo seco, T_{bs} ; en el eje vertical, el contenido de humedad, w ; en el eje diagonal, hacia la izquierda, entalpía h y temperatura bulbo húmedo T_{bh} ; en la línea inclinada, casi vertical, el volumen específico v ; en la curva, la humedad relativa HR; y trasladándose horizontalmente a la izquierda hasta la última curva, la saturación punto de rocío PR. Las líneas de entalpía y bulbo húmedo son tan próximas que, en la práctica, tienen una sola representación gráfica.

Una carta sicrométrica es válida a la altura (presión atmosférica) para la que fue manufacturada. Si la carta viene en formato duro (papel) hay que asegurarse que es la apropiada. Si se usa una carta electrónica, al desplegarla en el computador lo primero que debe hacerse es establecer (“*setear*”) la altura (o presión atmosférica) y el rango de temperatura con el que se va a trabajar; situando el cursor en un punto, en la ventana aparecen todos los valores de las distintas propiedades.

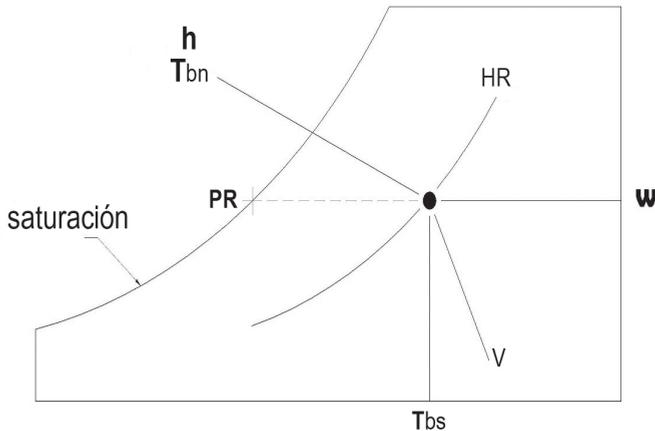


Figura 1.1. Lectura de un estado termodinámico del aire en la carta sicrométrica.

Los procesos sicrométricos. Son los procesos por medio de los cuales se cambian las propiedades del aire, es decir, sus transformaciones. Para climatización los más relevantes son:

Mezcla. Cuando dos corrientes de aire, A y B, se combinan, se obtiene una corriente de salida, C, cuyas propiedades se pueden determinar

gráficamente como se ve en la Figura 1.2. Se unen los puntos A y B y se fracciona el segmento según las proporciones máxicas de cada corriente en el flujo total [kg/s]. Las propiedades del flujo saliente son, por supuesto, más parecidas a las del flujo mayor.

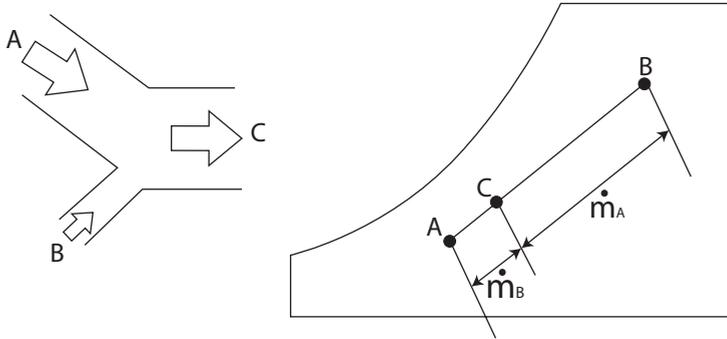


Figura 1.2. Representación y solución gráfica de la mezcla de dos caudales de aire.

Calentamiento sensible. Ocurre cuando una corriente de aire A se pone en contacto con una superficie caliente (p.e., un serpentín de vapor o unas resistencias eléctricas) con temperatura superficial promedio T_B , (Figura 1.3). Se modela considerando que una buena parte del aire A logra salir a temperatura del serpentín, mientras el resto no experimenta cambio; se mezclan las dos corrientes y a la salida la temperatura es T_C . La trayectoria es horizontal, pues el contenido de humedad original no experimenta cambio. La fracción de caudal que pasa sin cambios se denomina “factor de bypass del serpentín (BF)”, valor que depende de la configuración geométrica del serpentín (# de filas, aletas por pulgada) y es un parámetro que aparece en los catálogos.

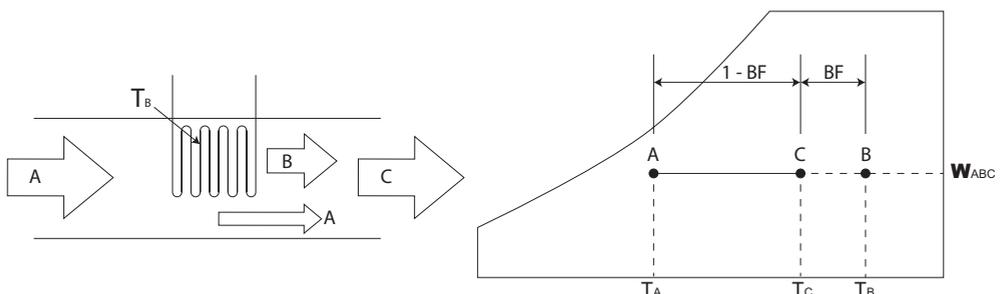


Figura 1.3. Representación gráfica del calentamiento sensible de una corriente de aire.

Enfriamiento sensible. Es el proceso exactamente inverso al de calentamiento sensible, y operan en él los mismos elementos de análisis (temperatura media del serpentín, factor de bypass BF, humedad absoluta constante, etc.). Solo es importante señalar que este proceso ocurre siempre y cuando la temperatura media superficial sea más alta que el punto de rocío (Ver Figura 1.4).

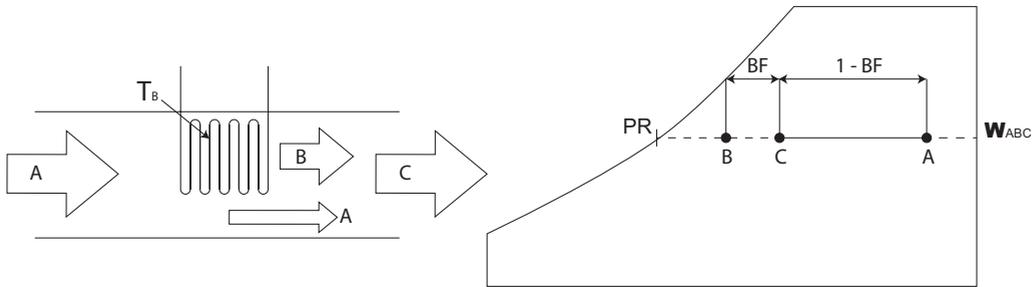


Figura 1.4. Representación gráfica del enfriamiento sensible de una corriente de aire.

Enfriamiento con deshumectación. Ocurre cuando la temperatura media superficial del serpentín es menor que el punto de rocío, y se le llama adp (apparatus dew point). Igual que en los otros análisis, una parte menor pasa sin cambios (la baypaseada) y la parte mayor logra salir a condiciones adp. El proceso seguido por esta fracción comienza con un enfriamiento sensible hasta su punto de rocío, y luego sigue bajando su temperatura hasta el valor adp; en esta última parte del proceso una porción de su humedad se condensó. Antes de salir definitivamente se mezcla con el caudal “baypaseado” (Ver Figura 1.5). Este es el proceso que ocurre en los serpentines de aire acondicionado, por lo que siempre se observa en ellos salida de condensado.

Enfriamiento evaporativo. Sucede cuando una corriente de aire es obligada a atravesar una cortina de agua (o un medio húmedo), lo que provoca que parte del agua se evapore y se incorpore al aire circulante (Ver Figura 1.6). Como la energía consumida en la evaporación proviene del mismo aire, se obtiene un descenso de temperatura; el aire sale entonces más frío y más húmedo. También es visible que al no existir aportes de energía desde el exterior, el fenómeno se da a entalpía constante. Si la cortina de agua es suficientemente extensa el aire saldrá saturado a temperatura de bulbo húmedo. El enfriamiento evaporativo, o humectación adiabática, es el único proceso natural donde se baja la temperatura del aire.

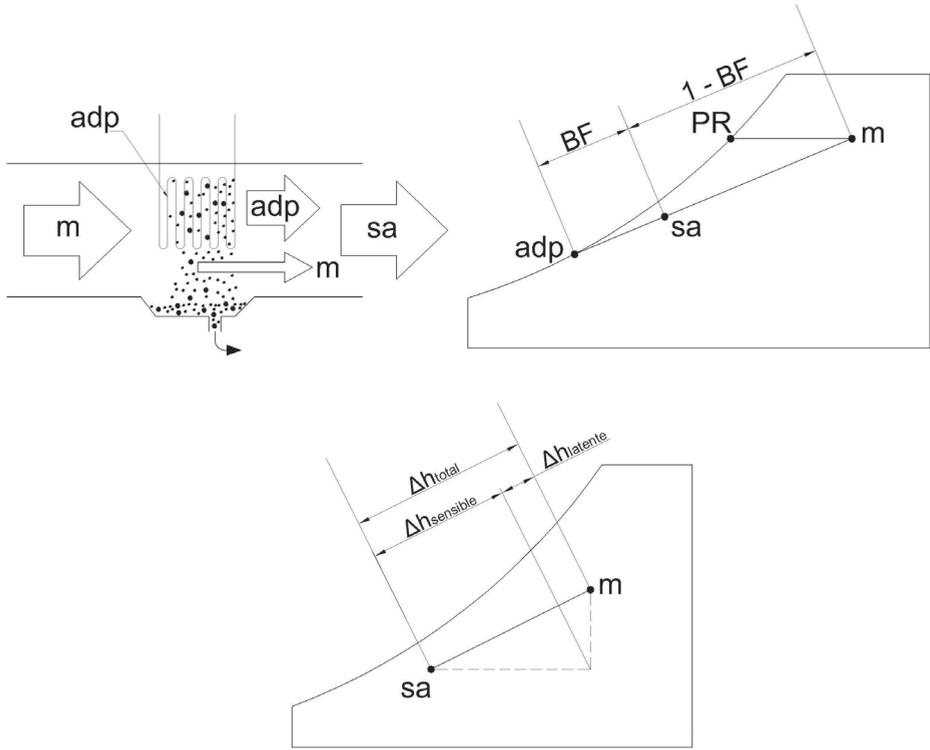


Figura 1.5. Representación gráfica del enfriamiento con deshumectación de una corriente de aire.

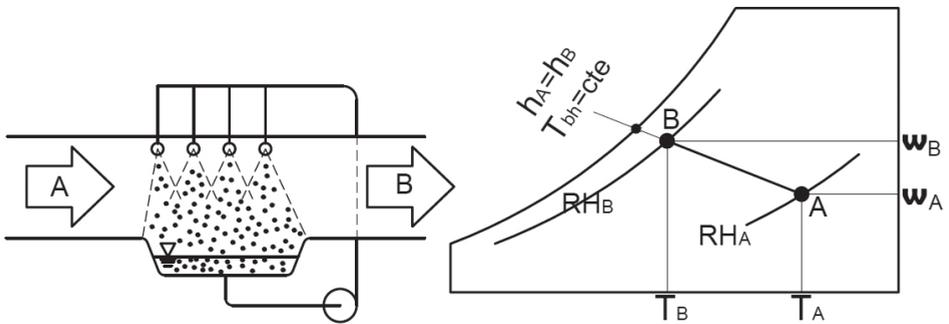


Figura 1.6. Representación gráfica del enfriamiento evaporativo de una corriente de aire.

CONFORT TÉRMICO

El confort —al mismo nivel de la calidad de aire— es una condición crucial para el ocupante de un espacio. Este capítulo expone el tema desde una perspectiva práctica y sencilla, con el fin de que el tándem ingeniero-climatizador + arquitecto-director garanticen su obtención desde el diseño o, si trabajan con edificaciones existentes, lo evalúen y lo mejoren. Para este fin se presentan secuencialmente el concepto de confort y su composición, los índices que lo cuantifican, la normatividad existente al respecto, y —muy importante— las herramientas computacionales que permiten su inmediata evaluación.

CONCEPTO DE CONFORT

El confort, en general, es un estado de bienestar del sujeto relacionado con su entorno y en el que son relevantes la acústica, la calidad de aire, la iluminación, el paisaje y las condiciones térmicas.

El confort térmico (o higrotérmico) está definido, tanto por la norma ISO 7730 como por el estándar ASHRAE 55, como “la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico y es valorada mediante evaluación subjetiva”. Algunos autores lo identifican como la situación de bienestar en la cual los mecanismos fisiológicos termorreguladores no se activan.

Para entender la naturaleza del confort individual es necesario visualizar a la persona como un sistema térmico estrechamente relacionado con el medio que la rodea. En principio, aceptemos que este “sistema” está en situación estable y, por consiguiente, su temperatura no cambia con el tiempo, de modo que las energías generadas más las entrantes están totalmente balanceadas con las energías salientes. También es necesario que no existan asimetrías considerables entre las temperaturas de pisos-cielo rasos-muros, o a diferentes alturas del aire ambiente, ni tampoco ráfagas

de aire. Cuando hay desbalances y/o asimetrías se experimentan calentamiento o enfriamiento o contrastes incómodos, procesos indeseables pues generalmente producen discomfort. Estas condiciones adversas se tratan más adelante, y están normalizadas según Ashrae Standard 55 [1].

La comodidad se da cuando la temperatura de la piel es estable dentro del rango 31.5°C-34.5°C y la del cuerpo es 37°C [2]. Temperaturas de piel mayores de 45°C o menores de 18°C causan dolor [3]; temperaturas internas del orden de 28°C conllevan arritmia cardíaca y muerte, mientras que mayores de 46°C causan daños cerebrales irreversibles [4]. Existen 6 (seis) factores que en acción conjunta determinan las temperaturas de la piel y del interior del cuerpo (y por consiguiente el confort); de ellos, cuatro pertenecen al ambiente exterior (temperatura, humedad y velocidad del aire, y temperatura radiante) y los otros dos son condiciones propias del sujeto (ropa y actividad). Las percepciones térmicas personales son fundamentalmente el resultado de la acción combinada de estos seis factores, y en mucho menor grado del aporte de la psicología individual y/o grupal.

El individuo, entonces, se caracteriza como un sistema térmico que intercambia energía calórica con sus alrededores, y que además genera calor en su interior. Se advierten entonces unos mecanismos que tienden a calentarlo y otros que tienden a enfriarlo. De que ese balance sea neutro, ya lo dijimos, depende la estabilidad de la temperatura y, claro está, la posibilidad de confort. Examinemos uno a uno cada factor.

Generación Interna de Calor o Metabolismo

Citando a Cengel [2], decimos que los bloques elementales constituyentes de los organismos vivientes son las células, fábricas en miniatura que desempeñan varias funciones indispensables en la supervivencia. El cuerpo humano contiene cerca de 100 trillones de células con diámetro promedio de una centésima de milímetro. En cada una de ellas ocurren cientos de reacciones químicas por segundo, y son de nuestro particular interés la combustión de carbohidratos, grasas y proteínas, pues mediante ellas se da la generación de calor que se conoce con el nombre de metabolismo. La tasa de metabolismo en estado de reposo se denomina *tasa de metabolismo basal*, y es la tasa de generación energética necesaria para mantener las funciones básicas de respiración y circulación sanguínea con nivel cero de actividad externa. Para un hombre promedio (30 años, 70 kg, 1.73 m, 1.8 m² de piel), la tasa de metabolismo basal es 84 W. En la medida en que la actividad personal externa aumenta, también aumenta el metabolismo; la generación interna de energía puede superar 10 (diez) veces la basal cuando se hace un ejercicio físico muy exigente. Un hombre promedio genera 108 W cuando lee, escribe, tipea un documento

o escucha una conferencia en un salón de clase; sus máximos metabolismos a los 20 y a los 70 años son 1250 W y 730 W, respectivamente. Un atleta entrenado puede exceder los 2000 W. Cuando ocurre la sensación de frío intenso, las respuestas fisiológicas del cuerpo humano son tiritar, experimentar vasoconstricción, vello erizado y disminución de la circulación superficial, lo que conlleva aumentos de resistencia térmica y del metabolismo.

Para incorporar el metabolismo en las ecuaciones de evaluación cuantitativa del confort, se creó la unidad Met. Un Met es igual a 58.15 W/m² de superficie corporal. La Tabla 2.1 muestra los metabolismos más comunes.

Tabla 2.1. Tasas de Metabolismo. Tomado de Gamboa et al [5].

Actividad	W/m ²	Met
Reclinado	46	0.8
Sentado relajado	58	1.0
Reparando relojes	65	1.1
Relajado de pie	70	1.2
Actividad sedentaria (oficina, hogar, escuela, laboratorio)	70	1.2
Manejando automóvil	80	1.4
Artes gráficas - encuadernar libros	85	1.5
De pie, actividad suave (compras, laboratorio, industria liviana)	93	1.6
Enseñanza	95	1.6
Trabajo domestico - afeitándose, lavándose y vistiéndose	100	1.7
Caminando en plano, 2 km/h	110	1.9
De pie, actividad media (asistente de compras, trabajador domestico)	116	2.0
Industria de la construcción - Pegar ladrillo (Bloque de 15.3 kg)	125	2.2
Lavando platos de pie	145	2.5
Trabajo domestico - rastrillando hojas en el patio	170	2.9
Trabajo domestico - lavando a mano y planchado (120-220 W/m ²)	170	2.9
Industria de la construcción - construyendo los roles	180	3.1
Caminando en plano, 5 km/h	200	3.4
Silvicultura - aserrando madera	205	3.5
Agricultura - arando con una recua de mulas	235	4.0
Industria de la construcción - cargando una mezcladora con piedras y mortero	275	4.7
Deportes - patinando en el hielo a 18 km/h	360	6.2
Agricultura - cavando con pala (24 paladas / min.)	380	6.5
Deportes - esquiando a nivel, Buena nieve, 9 km/h	405	7.0
Silvicultura - trabajando con un hacha (peso 2 kg. 33 golpes/min.)	500	8.6
Deportes - corriendo, 15 km/h	550	9.5

Aislamiento Térmico por Ropa

Como elemento que separa el cuerpo humano del medio que lo rodea, la ropa se constituye como un obstáculo para la transferencia de calor. En la medida en que aumente la cantidad de prendas, su grosor y su resistencia conductiva, la ropa se comporta como un aislante más efectivo, influyendo seriamente en la tasa de calor transferido, y consecuentemente, en la sensación de confort. Como consecuencia de lo anterior, la vestimenta (*clothing*) se clasifica de acuerdo con su capacidad de aislamiento y, análogo al caso anterior, su efecto en el confort se cuantifica en unidades conocidas como “Clo” y/o “m²C/W” (unidades de resistencia térmica). 1 Clo = 0.155 m²°C/W. Una persona desnuda tiene un valor de 0.0 Clo; un traje de oficina tiene un valor de 1.0 Clo.

El valor Clo para una persona vestida se calcula simplemente sumando los valores Clo individuales de las distintas prendas. La figura 21 ilustra dos ejemplos de esta operación. La Tabla 2.2 muestra el valor Clo de diferentes prendas y el valor global Clo para distintos conjuntos.

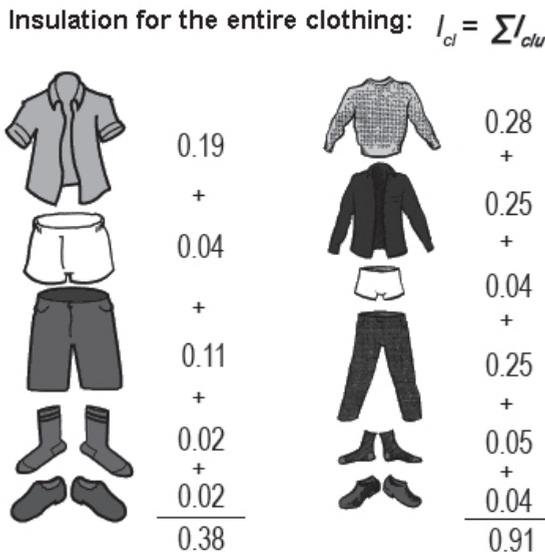


Figura 2.1. Dos ejemplos del cálculo de aislamiento por vestimenta.

Fuente: Gamboa *et al* [5].

Tabla 2.2. Valores de aislamiento para distintas condiciones y prendas de vestir [5].

El valor de aislamiento térmico de la ropa a menudo se mide con la unidad (Clo),
donde 1 (Clo) = 0.155 m² K / W

			(Clo)	Rango en (Clo)		
Nivel	0	Desnudos	0.00	0.00	a	0.30
Nivel	1	Ropa Ligera	0.50	0.30	a	0.70
Nivel	2	Ropa Media	1.00	0.70	a	1.30
Nivel	3	Ropa Pesada	1.50	más	de	1.30

Ropa		Coefficiente de Transmisión Térmica (Clo)	Resistencia Térmica m ² K / W
Ropa Interior	Tanga	0.02	0.003
	Interiores cortos	0.03	0.005
	Interiores a media pierna	0.04	0.006
	Sostenedor	0.01	0.002
Camiseta	Camiseta sin mangas	0.06	0.009
	Camiseta manga corta	0.09	0.014
	Camiseta con mangas largas	0.12	0.019
	Camisetas con mangas y cuello largo	0.06	0.009
Blusas y Camisas	Manga corta	0.09	0.029
	Blusa ligera con mangas largas	0.15	0.023
	Camisa ligera con mangas largas	0.20	0.031
	Normal con mangas largas	0.25	0.039
	Camisa con mangas largas	0.30	0.047
	Blusa mangas largas con cuello	0.34	0.053
Pantalones	Pantalones cortos	0.06	0.009
	Bermudas	0.11	0.017
	Pantalones ligeros	0.20	0.031
	Pantalones normales	0.25	0.039
	Pantalones de franela	0.28	0.043

Continúa

		Coefficiente de Transmisión Térmica	Resistencia Térmica
Ropa		(Clo)	m ² K / W
Suéteres	Suéter delgado	0.20	0.031
	Suéter fino con mangas y cuello	0.26	0.04
	Suéter grueso	0.35	0.054
	Suéter gruesa con mangas y cuello	0.37	0.057
Chaquetas o Cazadoras	Chaqueta ligera sin forro	0.13	0.02
	Chaqueta ligera de verano	0.25	0.039
	Chaqueta de etiqueta	0.30	0.047
	Chaqueta	0.35	0.054
	Chaqueta con relleno de plumas de ganso	0.55	0.085
	Abrigo	0.60	0.093
Calcetines y Zapatos	Calcetines	0.02	0.003
	Zapatos	0.02	0.003
	Zapatillas	0.03	0.005
	Zapatos altos	0.04	0.006
	Calcetines de tobillo grueso	0.05	0.008
	Botas	0.05	0.008
	Calcetines largos de lana	0.10	0.016
Faldas	Falda ligera de 15 centímetros por encima de la rodilla	0.01	0.016
	Falda ligera 15 centímetros por debajo de la rodilla	0.18	0.028
	Falda gruesa hasta la rodilla	0.25	0.039
Vestidos	Vestido ligero sin mangas	0.25	0.039
	Vestido de invierno de manga larga	0.40	0.062
	Mallas de invierno	0.10	0.016

Temperatura Media Radiante

Entre los distintos intercambios de calor del cuerpo humano con su entorno, la radiación es uno de los más importantes y de los más ignorados. La Figura 2.2, basada en [2], que ilustra una situación muy corriente, muestra el peso de su contribución. Aunque en un buen número de situaciones ignorar el fenómeno radiante es equivalente a fusionarlo con la convección, sin consecuencias para los resultados finales, existe

otro buen número de situaciones que desembocan en errores importantes, o que dejan pasar por alto magníficas oportunidades de climatizar eficientemente. Efectivamente, la experiencia enseña que situaciones de desconfort causadas por radiación incidente no pudieron resolverse al equivocarse en el diagnóstico, y también que, en otros casos, sencillas modificaciones en elementos radiantes condujeron a obtener bienestar en forma simple y a bajo costo.

En la teoría básica de transferencia de calor por radiación se conoce que el intercambio entre un sistema y sus alrededores es el resultado de un cálculo complejo, pues un objeto emite radiación en todas las direcciones a la vez que recibe radiación de todos los cuerpos que “lo pueden ver”. Además, se conoce que todos y cada uno de los involucrados absorben, reflejan y emiten radiación según su propia temperatura y sus características superficiales. Es decir, quedan implicadas todas las temperaturas, todas las propiedades superficiales, todas las geometrías y las posiciones relativas de todos los cuerpos. Para simplificar la contabilidad del balance radiante se desarrolló el concepto de “temperatura media radiante”, la cual se define como “la temperatura uniforme de un recinto negro imaginario que tuviera la misma transferencia de calor por radiación hacia la persona que el recinto real”, lo que es asimilable a un promedio ponderado de las temperaturas de las superficies vecinas (Ver Figura 2.3). No hay disponible un método simple para evaluar la temperatura media radiante; tanto en el diseño como en las edificaciones reales se debe partir de las temperaturas, áreas y propiedades de las superficies aledañas (muros, piso, techo, etcétera) y calcular su valor con las ecuaciones básicas o con software confiable disponible (Ver capítulo HERRAMIENTAS DE CUANTIFICACIÓN NUMÉRICA DEL CONFORT). Las temperaturas interiores de las superficies mencionadas se pueden medir directamente en casos de edificaciones existentes; en el caso del diseño, se pueden calcular a partir de las configuraciones y los datos ambientales, como se ilustra en el capítulo “Caso Base”. Aunque hay quienes tratan de asimilar la temperatura globo con la temperatura media radiante, estas no son equivalentes y confundirlas puede llevar a cometer serios errores (Ver la discusión de Parsons al respecto, ref [6] págs. 102-105). Ashrae Fundamentals 2017, capítulo 9, Thermal Comfort, procura una buena expresión para calcular la temperatura media radiante partiendo, eso sí, del supuesto de que la emisividad de las distintas superficies debe usarse con precaución porque es impropio en muchos casos. Otro asunto, los efectos indeseables de asimetrías en la temperatura radiante, se trata en el aparte “Normatividad para el Confort Térmico”.

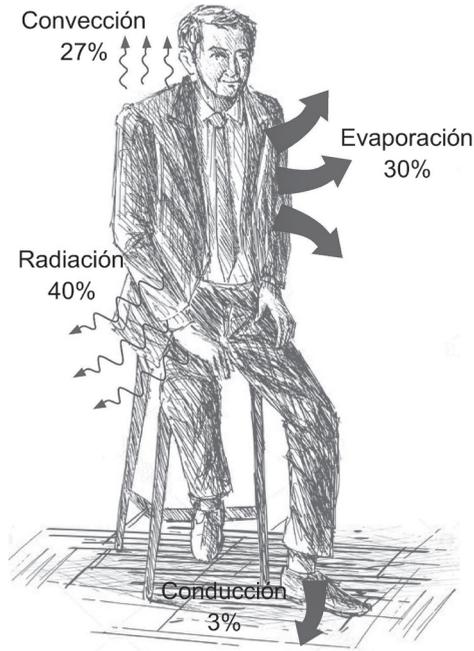


Figura 2.2. Proporciones de las pérdidas de calor en del cuerpo humano según modos, caso corriente.

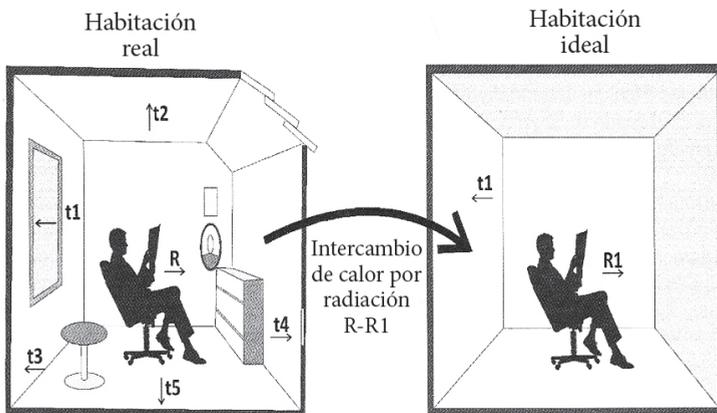


Figura 2.3. Esquema del concepto de temperatura media radiante.

Temperatura del Aire Ambiente

El parámetro de mayor importancia en el confort es, casi siempre, la temperatura del aire ambiente, pues es el fluido directamente en contacto con toda la superficie corporal y al cual se le cede calor mediante el mecanismo de la convección. La tasa de calor depende de la diferencia de temperaturas

sólido-gas (ropa-aire), pero también está involucrada la velocidad del fluido, como puede advertirse cuando se usa un ventilador para aumentar la velocidad de transferencia. Si se quiere exactitud en la medición de la temperatura del aire se debe utilizar un termómetro con sensor blindado, evitando así efectos radiantes. Para cambiar la temperatura del aire se necesita de los procesos sicrométricos explicados: calentamiento sensible, enfriamiento sensible o con deshumectación, y enfriamiento evaporativo. Los efectos indeseables de asimetrías y variaciones temporales en la temperatura del aire se tratan en el aparte “Normatividad para el Confort Térmico”.

Velocidad del Aire Ambiente

La tasa de calor transferido por convección desde el sujeto al aire ambiente depende del coeficiente de convección, el cual a su vez depende de la velocidad del fluido. A mayor velocidad del aire mayores coeficientes y tasa de calor cedido. Por lo anterior, es evidente la participación de la velocidad como factor del confort. Sin embargo, no resulta conveniente en muchos casos subir la velocidad por encima de valores que causan incomodidad, fenómeno conocido como ráfaga (draft), inconveniente que se presenta en el aparte “Normatividad para el Confort Térmico”. Una guía que orienta en la selección de velocidades de acuerdo las distintas aplicaciones es la Tabla 2.3, basada en [7] y [8], que puede aplicarse con precaución.

Tabla 2.3. Recomendaciones sobre velocidad de aire [7] y [8].

Velocidad de aire [m/s]	Percepción	Aplicación recomendada
0 - 0.08	Quejas por aire estancado	No
0.12	Favorable	Todas
0.12 - 0.25	Favorable en general	
0.35	Papeles que se mueven	No para oficinas
0.40	Aceptable para gente en movimiento moderado	Comercios
0.40 - 1.5	Grandes espacios	
La dirección es relevante. Buena: de frente. Aceptable: desde arriba. Regular: en la nuca.		

Humedad del Aire Ambiente

Otro mecanismo del cuerpo humano para equilibrar condiciones externas es la transpiración. En este caso los poros permiten la salida del sudor que, al extenderse y evaporarse al medio ambiente, extrae de la piel el calor necesario para su cambio de fase, drenaje de energía calórica que pone su

cuota en el balance energético general. Cengel [2] recuerda que una persona en reposo produce algo más de un litro diario de sudor, cuyo calor latente de evaporación significa un efecto refrigerante de 30W. Sobre una base de 100W totales, valor corriente para el nivel de actividad mencionado y ya citado en la Figura 2.2, la fracción atribuible a la sudoración es entonces de un 30%. Este porcentaje, que crece en la medida en que la actividad se vuelve más viva, evidencia la importancia del mecanismo, a menudo olvidado en los balances.

Para que opere la refrigeración por evaporación del sudor emanado es necesario que el ambiente circundante tenga la capacidad de recibir el vapor a producir. La propiedad termodinámica del aire relevante para este fenómeno es la humedad relativa, cuya naturaleza se explicó en el capítulo “Fundamentos”. En la medida en que este parámetro sea menor, la evaporación es más ágil; en cambio, si el aire está cerca de la saturación, esto es que la humedad relativa ronde el 100%, no se producirá el cambio de fase sino que el sudor correrá líquido, y la incomodidad será inevitable. Los trabajos al respecto han dejado en claro que los valores medios de la humedad relativa son los propios para el confort, y los valores extremos se asocian con resequedad en las vías respiratorias o con ropa y piel húmedas, ambas situaciones seriamente inconfortables.

INDICES DE CONFORT

Muy de acuerdo con [9] se reconoce que en el último siglo ha habido mucha investigación activa respecto a definir confort y cómo evaluar el stress térmico. Esos esfuerzos resultaron en varios modelos. Un gran número de índices fueron propuestos, muchos de los cuales estuvieron en uso en todo el planeta. Epstein y Moran (2006) [10] listan cuarenta, pero hay bastantes más. A continuación se presentan los índices más usados (Tabla 2.4), su descripción compacta y las referencias que pueden consultarse cuando haya algún interés particular. Sin embargo debe anotarse que para confort en interiores están prevaleciendo dos indicadores: PMV/PPD y adaptativo.

Tabla 2.4. Índices de confort históricamente más utilizados.

Método	Año, autor(es)	Descripción	Refs.
Temperatura Efectiva, ET (Effective Temperature)	1923/1924, Houghton & Yaglou [11]	ET es la temperatura de un ambiente estándar que contiene aire quieto saturado que provee la misma sensación térmica que el ambiente real. Se presentó en dos cartas: BET (Basic ET, x personas desnudas hasta la cintura) y NET (normal ET, para personas vestidas normalmente).	[13]
	1925, Yaglou & Miller [12]	Para considerar el efecto de la radiación, Vernon & Warner en 1932 introdujeron CET (Corrected ET), usando la 150mm black globe temperatura en lugar de la temperatura del aire (ver casilla correspondiente).	[14]
Temperatura Equivalente (Equivalent Temperature)	1929/36, Dufton [15]	Dufton inicialmente implementó un modelo cilíndrico negro calentado para imitar el comportamiento del cuerpo humano; Bedford, posteriormente, usando su escala de confort y encuestas en trabajadores, desarrolló la ecuación básica, después modificada por Chrenko (ver [6]) introduciendo la humedad, y por Nilsson [18]. La temperatura equivalente incluye efectos radiantes y de velocidad.	[19], [14]
	1936, Bedford [16]		
	1974, Chrenko [17]	$T_{eq} = 0.522 T_{ar} + 0.478 T_r - 0.21 \sqrt{V_{ar}} * (37.8 - T_{ar})$ donde: T_{eq} : temperatura equivalente [°C]; V_{ar} : velocidad aire[m/s]; T_r : temperatura media radiante [°C]; T_{ar} : temperatura aire [°C].	
2004, Nilsson [18]			
Temperatura resultante	1931/48, [20]	Índice de sensación térmica definido como la temperatura seca de un recinto ideal, pero con aire en reposo y muros a la misma temperatura del aire, que produce la misma sensación térmica que el recinto real con iguales presión de vapor, actividad y ropa. Engloba la temperatura seca, la temperatura radiante media y la velocidad del aire. $TR = T_s - 0.4 (T_s - 10) (1 - HR / 100)$ donde TR = temperatura resultante (°C); T_s = temperatura de bulbo seco (°C); HR = humedad relativa (%)	[21], [14]
Corrected Temperature Effective, CET	1932, Vernon & Warner [22]	Las escalas de la Effective Temperature toman en consideración la temperatura, la humedad y la velocidad de aire. Los efectos de la radiación fueron incluidos en esta valoración, al sustituir la temperatura simple por la Temperatura Globo. Este cambio, introducido por Vernon & Warner-1932 y adoptado por Bedford-1946, dio lugar al índice Corrected Temperature Effective, CET.	[9]
	1946, Bedford [23]		
Wind Chill Index WCI	1945, Siple & Passel [24]	Derivado durante la Segunda Guerra Mundial, mediante experimentos con canecas de agua en condiciones antárticas, se trató de evaluar los efectos del enfriamiento en la gente. Combina los efectos de temperatura y velocidad del aire. Es ampliamente aceptado, pero una forma derivada recientemente es más usada: la temperatura chilling t_{ch} , que es la temperatura en condiciones de calma que provee un efecto equivalente al ambiente real. Esta fórmula se diseñó específicamente para el cuerpo humano, o más específicamente para el rostro humano (la única parte desnuda del cuerpo cuando hace mucho frío).	[4], [14]
	2001, Osczevs-ki & Bluestein [25]	La base física para el cálculo del <i>windchill</i> es la relación entre la temperatura y la velocidad del aire, usado por los servicios meteorológicos estadounidenses y canadienses se calcula mediante: $T_{ch} = 13.12 + 0.6215T - 11.37V^{0.16} + 0.3965TV^{0.16}$ Donde T_{ch} es la temperatura de sensación en °C, T es la temperatura del aire, y V es la velocidad del viento en km/h con un anemómetro situado a 10 m de altura. La Tabla 2.5 también muestra las equivalencias.	
Índice de sobrecarga calórica (Heat stress index HSI)	1955, Belding & Hatch [26]	Este índice representa la relación entre la cantidad de calor que necesita evaporar por transpiración un hombre sometido a un ambiente con carga térmica determinada y la que puede eliminar como máximo en dicho ambiente. Está basado en el balance que caracteriza la tensión térmica, en el que intervienen los parámetros físicos que regulan los intercambios de calor entre el hombre y el medio ambiente. Se determina por medio de la ecuación: $HSI = (E_{req}/E_{max}) * 100\%$, en donde: HSI = Índice de tensión térmica; E_{req} = Calor de evaporación de la transpiración; E_{max} = Calor de la máxima capacidad de evaporación en el ambiente laboral. Se parte de que la evaporación requerida = M + R + C En donde: M = Metabolismo total en kcal/hora R = Energía radiante (balance) en kcal/hora C = Energía intercambiada por convección en kcal/hora. Se mide directamente con el Extech HT30 (Ver Figura 2.4)	[14]

Continúa

Método	Año, autor(es)	Descripción	Refs.
Temperatura de globo y de bulbo húmedo, WBGT	1957, Yaglou & Minard [27]	Es un índice térmico muy importante. Se desarrolló para estimar el efecto de la temperatura, la humedad, la velocidad del viento y la radiación total (usualmente del sol) en condiciones de alta y/o prolongada demanda. Se usa por los higienistas industriales, atletas, y militares para determinar niveles de exposición apropiados a altas temperaturas. Se calcula mediante $WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_d$, donde: T_w = temperatura bulbo húmedo; T_g = Temperatura Globo (también conocida como black globe temperature); T_d = temperatura aire. Cuando la radiación solar es despreciable puede usarse $WBGT = 0.7 T_w + 0.3T_d$. La <u>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</u> publica los valores umbral (threshold limit values TLVs) que han sido adoptados por muchos gobiernos; WGTB también está descrito por ISO 7243, y la <u>American College of Sports Medicine</u> basa sus guías en este índice. Se mide directamente con el Extech HT30 (Ver Figura 2.4.)	[14], [28]
Predicted Mean vote (PMV)	1970, Fanger [29]	Por su importancia se desarrolla por aparte a continuación	
New Effective Temperature ET*	1971, Gagge <i>et al</i> [30]	Es la temperatura de un ambiente estándar (RH50%, $t_a=t_r$, $v<0.15$ m/s) que da un efecto equivalente con la persona en iguales condiciones de humedad de la piel, temperatura de piel, pérdida calórica de la piel, actividad sedentaria y ropa sencilla. Este índice incorpora una corrección por humedad de la piel. Lo anterior define una zona de confort para invierno y otra para verano, que se presentan gráficamente (modular comfort envelope). ET* es equivalente a SET en casos de actividad sedentaria (1.1 met), vestimenta ligera y baja velocidad de aire.	[4], [14]
Temperatura efectiva estándar, SET o SET*	1976, Gagge [31]	Creada como una extensión del índice ET* para incluir rangos de actividad y de ropas, el índice térmico Standard Effective Temperature SET* se define como la temperatura de un ambiente isotérmico con temperatura del aire igual a la temperatura media radiante, 50% RH y aire quieto ($v<0.15$ m/s), en el cual una persona con nivel corriente de aislamiento por ropa tendría las mismas pérdidas de calor a la mismas temperatura y humedad de piel que las que tiene en el ambiente real con la ropa que está usando. Ver ecuaciones y tablas correspondientes en ref. [7]	[1], [13], [32], [14]
Adaptive Model	1998, Humphreys & Nicol [33]	Por su importancia se desarrolla por aparte a continuación	
Out Standard Effective Temperatura (OUT-SET*)	1999, Pickup & deDear [34]	El índice OUT_SET* provee representaciones fisiológicamente válidas de confort y stress en exteriores para casi infinitas combinaciones de temperaturas del aire y media radiante, humedad, velocidad del aire, aislamientos por ropa y tasas metabólicas. La gran diferencia con los espacios interiores es la radiación solar, y esta ha sido incluida en los cálculos de OUT SET* mediante un modelo separado de estimación de la temperatura media radiante para exteriores. El modelo calcula la temperatura uniforme de un encierro hipotético alrededor del sujeto parado, que intercambia la misma radiación infrarroja con el sujeto que el ambiente solar real complejo. Los detalles son accesibles en la red en la [34].	[32], [34], [35], [36]

Fuente: U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine.

Notas: Potencia de enfriamiento del ambiente expresada como temperatura equivalente bajo condiciones de calma [Ecuación (83)].

Vientos mayores de 70 km/h tienen muy poco efecto de enfriamiento incremental.



Figura 2.4. EXTECH HT30. Instrumento para medición directa Wet Bulb Globe Temperature WBGT y Heath Stress Index HSI.

“Las mediciones del HT30 Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) consideran los efectos de la temperatura, la humedad y la radiación directa del sol. También puede determinar el Heat Stress Index (HSI), el cual mide cómo se siente cuando la humedad se combina con la temperatura, el movimiento de aire, y el calor radiante. Black Globe Temperature (TG) monitorea los efectos de la radiación solar directa sobre una superficie. Una función in/out exhibe el valor WBGT con o sin exposición directa al sol.”

Tabla 2.5. Temperatura windchill equivalente en ambientes fríos [1].

Temperatura Windchill equivalente, °C													
Velocidad viento, km/h	Lectura real de termómetro, °C												
	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
calma	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40	-45	-50
10	8	2	-3	-9	-14	-20	-25	-31	-37	-42	-48	-53	-59
20	3	-3	-10	-16	-23	-29	-35	-42	-48	-55	-61	-68	-74
30	1	-6	-13	-20	-27	-34	-42	-49	-56	-63	-70	-77	-84
40	-1	-8	-16	-23	-31	-38	-46	-53	-60	-68	-75	-83	-90
50	-2	-10	-18	-25	-33	-41	-48	-56	-64	-71	-79	-87	-94
60	-3	-11	-19	-27	-35	-42	-50	-58	-66	-74	-82	-90	-97
70	-4	-12	-20	-28	-35	-43	-51	-59	-67	-75	-83	-91	-99
Peligro menor: En menos de 5 h, piel seca. Peligro máximo la falsa sensación de seguridad (WCI < 1400)					Peligro creciente: riesgo de que la piel expuesta se congele en un minuto. (1400 ≤ WCI ≤ 2000)				Peligro máximo: la carne puede congelarse en 30 s. (WCI > 2000)				

En las evaluaciones de confort métodos PMV/PPD y Adaptativo se utilizan los parámetros conocidos como Temperatura Media y Temperatura Operativa (Top). A continuación se desarrollan esos conceptos.

Temperatura Media (Mean Temperature, en inglés). Es el promedio de las temperaturas del aire, medidas propiamente por un termómetro debidamente expuesto por un determinado período, usualmente un día, un mes o un año.

Temperatura Operativa (T_{op}) (Operative Temperature, en inglés). Es un valor representativo entre la temperatura de bulbo seco y la temperatura radiante de un espacio. La ref. [203] presenta expresiones para dos casos particulares y un caso general. Para el caso general: $T_{op} = A \cdot T_a + (1-A) \cdot T_r$, siendo T_a = temperatura media del aire; T_r = temperatura media radiante; A (función de la velocidad del aire) es: 0.5 (<0.2 m/s), 0.6 (0.20-0.6m/s), 0.7 (0.6-1 m/s).

Otra expresión muy conveniente es presentada por Cengel [2] en términos de los coeficientes de convección y radiación, y los factores de forma del espacio en cuestión. Nótese que se conserva la suposición de que las superficies se comportan como cuerpos negros, lo cual, como ya se dijo, debe usarse con precaución.

Método PMV/PPD

El método PMV/PPD es el único procedimiento reconocido por el ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 para la evaluación de confort en edificios climatizados con sistemas mecánicos e híbridos. Para edificios con exclusivamente ventilación natural el estándar solo reconoce como procedimiento de evaluación de confort el Método Adaptativo.

El índice de valoración media PMV de Fanger, relata Kate [6], fue desarrollado en los años 70's con base en ensayos de laboratorio y cámaras ambientales. En algunos casos se fijaba un ambiente determinado y los participantes manifestaban cómo se sentían, y en otros casos ellos controlaban las condiciones hasta sentirse "térmicamente neutros". La calificación se hacía sobre la escala de sensación térmica ASHRAE (frío=-3, fresco=-2, ligeramente frío=-1, neutro=0, ligeramente caliente=+1, tibia=+2, caliente=+3).

El modelo matemático desarrollado, que representa el comportamiento y está basado en el balance de calor y la termorregulación, combina las cuatro variables físicas (temperatura, humedad, velocidad del aire y temperatura media radiante) y las dos personales (actividad y ropa) en un índice que, de acuerdo con la escala ASHRAE mencionada, predice la sensación de confort térmico de un gran grupo de personas. Fanger usó los datos del estudio de McNall, Jaax, Rohles, Nevins and Springer (1967) [37] y derivó una relación lineal entre actividad y sudoramiento, y la introdujo en las ecuaciones de balance térmico para finalmente crear su "ecuación de confort". Esta describe todas las combinaciones de los seis parámetros que resultan en una sensación neutra. Dicha formulación fue convalidada al contrastarse con estudios de Nevins, Rohles, Springer and Feyerherm (1966) [38] realizados en distintos campus.

Fanger también desarrolló un índice relacionado con el anterior, bautizado como Porcentaje de Insatisfechos PPD, el cual se calcula a partir del PMV y vaticina el porcentaje de gente insatisfecha con las condiciones térmicas existentes. PMV y PPD conforman una relación que gráficamente tiene forma de U, donde el porcentaje de insatisfechos se incrementa en la medida en que el PMV difiere de cero (el valor neutro). Un ejemplo se muestra en la Figura 2.5. Es de anotar que no existe una combinación de condiciones térmicas en la cual todos los involucrados se sienten satisfechos; el valor mínimo de insatisfechos esta alrededor de 5%, como también se muestra en dicha figura.

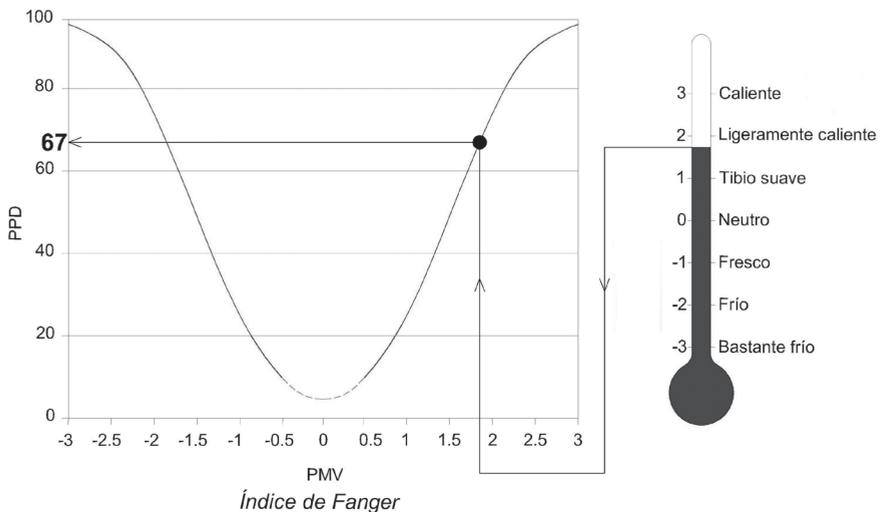


Figura 2.5. relación PMV/PPD (p.e., a PMV 1.8 corresponde a 67% insatisfechos).

Fuente: Gamboa *et al.* [207]

Desde que el modelo PMV/PPD fue desarrollado, muchos estudios fueron conducidos para verificar su validez. Kate [6] enumera 36, pero pueden ser muchos más. Con respecto a las conclusiones hay posiciones contrapuestas. Por un lado, el mismo Kate sostiene que, aunque las primeras verificaciones arrojaron buenas correspondencias, recientes estudios de laboratorio mostraron discrepancias: por ejemplo, Doherty & Arens (1988) [39] las cuantificaron tanto como 1.3 unidades de escala; un review de Humphreys (1994) [40] observó en 8 cámaras ambientales diferencias entre 0.8°C hacia abajo y 3°C hacia arriba, y también notó que había más diferencias cuando la ropa era más pesada y las actividades más fuertes. Kate concluye que el índice PMV tiende a sobreestimar las necesidades de climatización, y que “es mucho más aplicable a edificios con aire acondicio-

nado que a aquellos con ventilación natural, debido en parte a la influencia de la temperatura exterior y a las oportunidades para adaptación”. En contraposición, Hedge (2010) [13] y Howell *et al.* (1979) [41] relatan que estudios de campo de la ecuación de Fanger mostraron solo una varianza de 6% en sus estimaciones de confort respecto a los reportes, y que las variables demográficas (sexo, edad) no eran significativas mientras que las variables psicológicas podían, en cambio, afectar en mayor cuantía. Esta discusión fue, si no zanjada, por lo menos pospuesta a partir del reconocimiento y la inclusión del PMV como criterio dentro de los últimos estándares ISO 7730 y ANSI/ASHRAE 55-2013 [Parsons [14], Ashrae std. [1]]. Esto le confiere al modelo autoridad, eso sí dentro de las restricciones señaladas por tales normativas (ver subcapítulo correspondiente).

Para aplicar el índice PMV/PPD están disponibles varias herramientas computacionales de facilísimo acceso en la red. Las dos más elegantes y amigables, que no solo permiten evaluaciones sino también análisis de sensibilidad, son el “CBE Thermal Comfort Tool”, del Center for the Built Environment, University of California Berkeley, y el “PsychoTool”, del Informer Technologies, Inc. También es una buena herramienta de acceso libre el “PMVCalc_v2”, de la University of Gavle. En el subcapítulo “Herramientas Computacionales para Evaluación del Confort” se describen algunas aplicaciones.

No obstante la excelente calidad de los programas, todos ellos asumen en el cálculo de temperatura radiante que las emisividades son las del cuerpo negro, lo que conlleva alguna imprecisión.

Metodo adaptativo

El Método Adaptativo es el único procedimiento reconocido por el ANSI/ASHRAE Standard 55-2013 para la evaluación de confort en edificios con ventilación exclusivamente natural. Para edificios climatizados con sistemas mecánicos e híbridos el estándar solo reconoce como procedimiento de evaluación de confort el método PMV/PPD.

Es de anotar que una buena cantidad de autores consideran el Método Adaptativo no como una alternativa aplicable solo a edificios ventilados naturalmente sino como un nuevo paradigma para la evaluación de confort en cualquier situación (Nicol & Humphrey [42]). Su nombre se deriva de considerar a los ocupantes como componentes integrales del sistema de confort. Los procesos adaptativos, plantea Nicol & Humphrey, fueron clasificados por [43] como fisiológicos (aclimatación), de comportamiento (uso de ventanas ajustables, ventiladores, puertas, toldos, etc.), y psicológicos (ajuste de expectativas de confort según las condiciones climáticas

prevalecientes en el interior y en el exterior). Los *papers* originales del modelo adaptativo fueron publicados por Humphrey y Nicol en los años 70's; ellos encontraron y describieron una fuerte relación entre las temperaturas interiores confortables (denominadas neutralidad) y las temperaturas representativas prevalecientes en el interior y, en casos de ventilación natural, con las temperaturas representativas mensuales del exterior.

Auliciems (1981) [44] , y Humphrey (1994) [40], propusieron respectivamente las siguientes expresiones:

$$T_n = 9.22 + 0.48T_a + 0.14 T_{mmo}$$

$$T_n = 23.9 + [0.295(T_{mmo} - 22)]/e^{-[(T_{mmo}-22)/24*\text{SQRT}(2)]^2},$$

donde T_n = temperatura neutral; T_a = temperatura del aire; y T_{mmo} = temperatura exterior mensual representativa.

La versión actual de las ecuaciones se encuentra en el ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, numeral 5.4. La aproximación adaptativa cobró importancia en el contexto mundial de la práctica y la investigación en confort cuando ASHRAE comisionó a deDear y Brager, a mediados de los años 90's, para desarrollar un modelo adaptativo riguroso a partir de datos de campo totalmente confiables recopilados en todo el mundo. Una segunda intención era detallar el modelo matemático teórico, que hasta ese momento no había sido claramente presentado. El *paper* resultado de este trabajo está clasificado como el más frecuentemente citado dentro de la literatura del confort térmico (deDear y Brager, 1998 [43]). Después de incontables iteraciones y mejoras, el comité a cargo del estándar 55 de la ASHRAE (SSPC55) accedió a incluirlo en el estándar de 2004 como opción para edificios que no tuviesen instalados equipos mecánicos de enfriamiento. Lo anterior elimina la posibilidad de aplicarlo en edificios modo-mezclado (se refiere a edificios con sistemas híbridos, esto es, que combinen ventanas manuales con otros dispositivos mecanizados o automatizados). Un par de años después, un proyecto europeo llamado SCATS ([45], 2002) replicó el ejercicio descrito en un universo de 26 oficinas en Francia, Reino Unido, Grecia, Portugal y Suecia, a lo largo de un año; la intención fue proveer la base empírica de un estándar adaptativo exclusivamente europeo, el EN 15251, publicado en 2007 (CEN, 2007). Tanto EN 15251 como ASHRAE 55 contenían simples ecuaciones lineales relacionando temperaturas aceptables del interior de edificios ventilados naturalmente con temperaturas exteriores prevalecientes, con aparentemente un alto grado de coincidencia y similaridad. Sin embargo se detectaron diferencias, atribuibles al número de casos de estudio, que para el trabajo europeo no era suficientemente grande.

Implícita en el modelo adaptativo está la hipótesis de que los ocupantes de un edificio naturalmente ventilado alcanzan confort en un rango de temperaturas interiores más ancho que los ocupantes de uno con sistemas centrales de climatización, debido a los niveles incrementados del control personalizado que tienen de las ventanas. Baguer *et al.* (2004) condujeron un estudio de campo con ventanas operadas manualmente, encontrando que a diferentes grados de control personal se daban diferentes respuestas térmicas, aunque todo el personal experimentara el mismo ambiente, vistiera ropajes con equivalente aislamiento y ejecutara las mismas actividades. Este tipo de hallazgos ofrece suficiente soporte empírico sobre el papel del control de ventanas en las expectativas de confort.

Desde la publicación del año 1998 de ASHRAE (refrendada en 2013, [46]) sobre el modelo adaptativo, los defensores de este enfoque critican la cruda bifurcación de los edificios entre ‘controlados centralmente’ y ‘naturalmente ventilados’, pues dejó a los primeros (que son la gran mayoría) por fuera del alcance del método adaptativo. Numerosos autores alegan que las correlaciones de este método son estadísticamente mejores que las demás.

Para aplicar el método adaptativo hay disponible una herramienta computacional de muy fácil acceso en la red. Además de elegante y amigable, este software permite análisis de sensibilidad: se trata del “CBE Thermal Comfort Tool”, del Center for the Built Environment, University of California, Berkeley. En el subcapítulo “Herramientas Computacionales para Evaluación del Confort” se describe su aplicación.

NORMATIVIDAD SOBRE CONFORT TÉRMICO

La normatividad sobre confort humano se centra en dos estándares de reconocida calidad, cubrimiento y aceptación: el EN 15251 para Europa, y el ANSI/ASHRAE 55 para América y el resto del mundo. En razón de que nuestro entorno geográfico-técnico está muy asimilado a la cultura americana, se presenta el estándar ANSI/ASHRAE en su última versión, la de 2013 (52 págs.). El siguiente cuadro (Tabla 2.6), resume en forma sucinta pero completa la normatividad.

Tabla 2.6. Resumen estándar ANSI/ASHRAE 55, 2013.

		1. PROPÓSITO: Especificar la combinación de factores interiores y personales que producirán condiciones térmico-ambientales aceptables a la mayoría de ocupantes.				
		2. ALCANCE: el Std. Maneja 6 factores (T, HR, y Vel. aire; radiación, Met, Clo); aplica hasta 3000 m de altura; no incluye luz, ruido, limpieza, etc.				
		3. DEFINICIONES (terminología)				
		4. REQUERIMIENTOS GENERALES: documentación, espacios involucrados, ocupantes representativos, parámetros.				
ANSI/ASHRAE STD 55. 2013 Condiciones Térmicas Ambientales para Ocupación Humana	5. Condicio-nes que proveen confort térmico	5.1 Requerimientos Generales: Aplicabilidad de los métodos; 6 factores relevantes.				
		5.2 Método para determinar las características de los ocupantes	5.2.1 Tasa metabólica	5.2.1.1 Ocupantes representativos		
				5.2.1.2 Tabla 5.2.1.2		
				5.2.1.3 Promedio ponderado		
				5.2.1.4 Std. no aplica si Met >2		
		5.2.2 Aislamiento por ropa	5.2.2.1 Ocupantes representativos			
			5.2.2.2 Tablas 522A y 522B y 522C			
			5.2.2.3 Std. No aplica si Clo >1.5			
		5.3 Método General para determinar condiciones térmicas aceptables en espacios ocupados	5.3.1 Método Grafico Zona Confort		Aplica si $1 < Met < 1.3$; $.5 < Clo < 1$; $Vel < 2$ m/s y $w < 12$ g/kg	
			Zona aceptable Fig. 5.3.1 dependiendo de Tair, w, Clo			
			5.3.2 Método analítico Zona Confort		Aplica si $1 < Met < 2$ y $Vel < .2$ m/s	
			Código computador para normativa en apéndice B ref.4 Ashrae Thermal Comfort Tool (-.5 < PMV <+.5 aceptable, igual a PPD <10%)			
5.3.3 Velocidad de aire elevada	Vel >.2m/s		Resulta en temperaturas permisibles más altas (fig 533A)	usa modelo SET de ASHRAE thermal confort tool	Met >1.3 → Vel sin limite Met <1.3 +control Vel → Vmax=1.2m/s Met <1.3 sin control → si Taire <22.5°C → Vmax=.15m/s; si Taire entre 22.5 y 25.5°C → ec.5.3.3.2; si Taire >25.5°C → Vmax.8m/s	
5.3.4 Disconfort térmico local	Aplica si Clo <.7 y Met <1.3		Asimetría Tradiante: dif T cielo/piso/muros/aire según tabla 5.3.4.2	Draft: si Taire <22.5°C Vel <.15 m/s	Dif temperaturas tobillo/cara <3°C y Tpisos entre 19°C y 29°C	
5.3.5 Variaciones temporales de la temperatura	5.3.5.1 aplica cuando no hay control de Temp por ocupantes					
	5.3.5.2 amplitud Temp ciclo <1.1°C si periodo < 15 min					
	5.3.5.3 rampas de Temp aire cumplirán tabla 5.3.5.3					
5.4 Determinación de condiciones térmicas aceptables en espacios naturalmente climatizados y controlados por ocupantes	Aplica si $1 < Met < 1.3$, sin climatizadores, Clo libre entre .5 y 1, $10^{\circ}C < T_{exterior} < 33.5^{\circ}C$		Temp aceptables en Fig.5.4.2 o ecuaciones 5.4.2.2 Xingresar: $T_{pma} = f(\text{Text.media}, \text{Text } 7 \text{ a } 30 \text{ días})$; cálculos y/o gráficos límites Taire (ec.5.4.2.2 o fig.5.4.2); si .6 < Vel < 1.2 calcular cambio Tair de T5.4.2.4			
6. CONFORT-MIDAD DEL DISEÑO Documentación	Diseño		Los sistemas seleccionados deben ser capaces de mantener los rangos			
	Establecer: -a) el método (5.3.1, 5.3.2 o 5.3.4); -b) Taire, HR, Text, cargas, período aceptable fuera de condiciones; -c) Vel, Clo, Met; -d) Disconfort local; -e) equipos; -f) control Vel; -g) variaciones 5.3.4 y 5.3.5					
		7. EVALUACIÓN DEL CONFORT EN EDIFICIOS EXISTENTES. Introducción. Criterios [por encuestas; por mediciones (acondicionamiento mecánico o natural)]. Diagnóstico [por encuestas; por mediciones(acondicionamiento mecánico o natural)]				

APÉNDICES DEL ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2013 (*: son parte del standard, los otros apéndices no lo son)	
APÉNDICE A*	Determinación de temperatura operativa. $t_o = T_{aire}$ si no-paneles radiantes + $SHGC < .48 + Uw < 50 / (t_{di} - t_{de})$; $t_o = A^* - T_{aire} + (1-A)tr$, donde $A = f(Vel)$ tabla p.16; $t_o = (T_{aire} + Tr) / 2$ si Met entre 1 y 1.3
APÉNDICE B*	Programa de computador para calcular PMV/PPD. Es el mismo anexo D del ISO 7730 que dio permiso. Para información adicional y versión I-P ir a <i>Ashrae Thermal Comfort Tool</i> . Son 62 líneas + un ejemplo (los resultados que generaron la Fig. 5.3.1)
APÉNDICE C	Condiciones que proveen confort (prácticamente un resumen de 5.3)
APÉNDICE D	Uso de datos sobre metabolismo (prácticamente un resumen de 5.2.1)
APÉNDICE E	Aislamiento por ropa: métodos para cálculo de Clo y cambios en t_o . Amplía y complementa a 5.2.2
APÉNDICE F	Determinación de condiciones aceptables para interiores. 6 parámetros para establecer confortabilidad; métodos gráfico y analítico; curva relación PMV/PPD; equivalencia entre software responsabilidad del usuario; límite humedad
APÉNDICE G	Evaluando efecto enfriador de la Vel. Método SET. Explica procedimiento, da programa; aconseja sobre aproximar y diversas alturas
APÉNDICE H	Disconfort local y temporal. Ampliación de 5.3.4 y 5.3.5 (asimetría radiante, ráfaga, variación vertical, variaciones cíclicas, rampas)
APÉNDICE I	Espacios naturalmente ventilados con control por ocupantes. Cálculo de $t_{pma(out)}$ promedios normal/mensual/ponderado reciente
APÉNDICE J	Formatos sugeridos para reportar resultados de evaluación del confort en el diseño
APÉNDICE K	Mediciones, encuestas y evaluación del confort en espacios existentes. Incluye procedimientos, formatos, directrices para cálculos
APÉNDICE L	Bibliografía y referencias
APÉNDICE M	Resumen de las 18 adendas publicadas desde 2010

En Colombia aplica la NTC – 5316, “CONDICIONES AMBIENTALES TÉRMICAS DE INMUEBLES PARA PERSONAS”, 2004-12-01, I.C.S.: 23.120.00. Esta norma “es una adopción idéntica (IDT) por traducción de la norma ANSI/ASHRAE 55”. Es de resaltar que en ella se dejaron explícitas las condiciones térmicas interiores de aceptabilidad, pues en su texto se lee: “1. ALCANCE Esta norma especifica las combinaciones de factores personales y ambientales en espacios interiores, *que producirán condiciones ambientales térmicas aceptables para el 80 % o más de los ocupantes dentro de un espacio.*”

HERRAMIENTAS DE CUANTIFICACIÓN NUMÉRICA DEL CONFORT

La valoración del confort, ya sea como un pronóstico dentro de un diseño, o como la evaluación en un edificio existente, es una labor dispendiosa, que necesita obligatoriamente la asistencia de una herramienta sistematizada. Y es que *hacer evaluación del confort* no se trata solamente de tomar unos datos fijos y calcular un índice sino de explorar unos rangos donde variables y parámetros toman distintos valores y le permiten al ingeniero visualizar un universo de posibilidades técnicas y económicas. Además, dentro de una controversia general acerca de la validez de distintos métodos resulta por lo menos interesante comparar cómo diagnostican su ambiente térmico particular las distintas herramientas. Todo lo anterior solo se hace posible si se conocen, se manejan y se interpretan hábilmente los distintos softwares.

La herramienta computacional más elegante, de fácil acceso, amigable y completa es el “CBE Thermal Comfort Tool”. Esta magnífica producción, además, alerta permanentemente sobre cumplimiento o incumplimiento de las distintas normativas (ANSI/ASHRAE y/o EN-15251). Como está presentada bajo atributo de Creative Commons (CC) es totalmente gratuita (CC es una organización para compartir, sin costo, creatividad y conocimiento). Sus autores son Tyler Hoyt, Stefano Schiavon, Alberto Piccioli, Dustin Moon y Kyle Steinfeld, del Center for the Built Environment, de la University of California, Berkeley, 2013. Se puede acceder a ella en [47]. Las Figura 2.6, Figura 2.7, Figura 2.8, Figura 2.9, Figura 2.10, Figura 2.11,

Figura 2.12 y Figura 2.13 muestran distintas situaciones que son posibles de analizar: la primera corresponde al método PMV y estándar ANSI/ASHRAE 55-2013, suministrando las temperaturas del aire y media radiante; en la segunda se cambia especificando temperatura operativa; en la tercera nos trasladamos al Método Adaptativo ingresando temperatura del aire y temperatura media radiante; en la cuarta se cambia aportando temperatura operativa. Las últimas cuatro figuras siguen la misma secuencia, pero en referencia al estándar EN-15251. El cursor indica la resultante de las condiciones térmicas existentes, y si está en zona de confort.

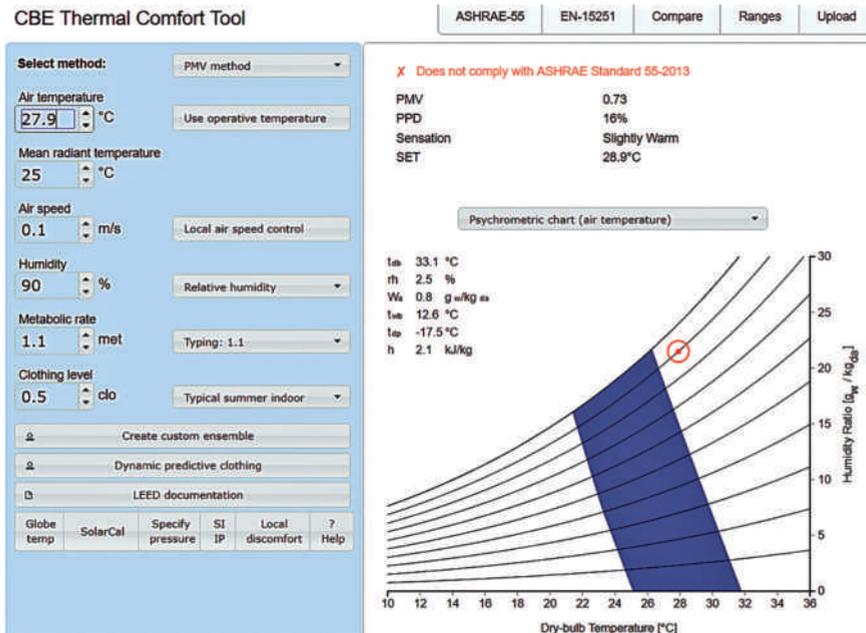


Figura 2.6. Evaluación CBE del confort. Método PMV; estándar ASHRAE; inputs: Taire, TMR, Vel. aire, HR, Met, Clo.

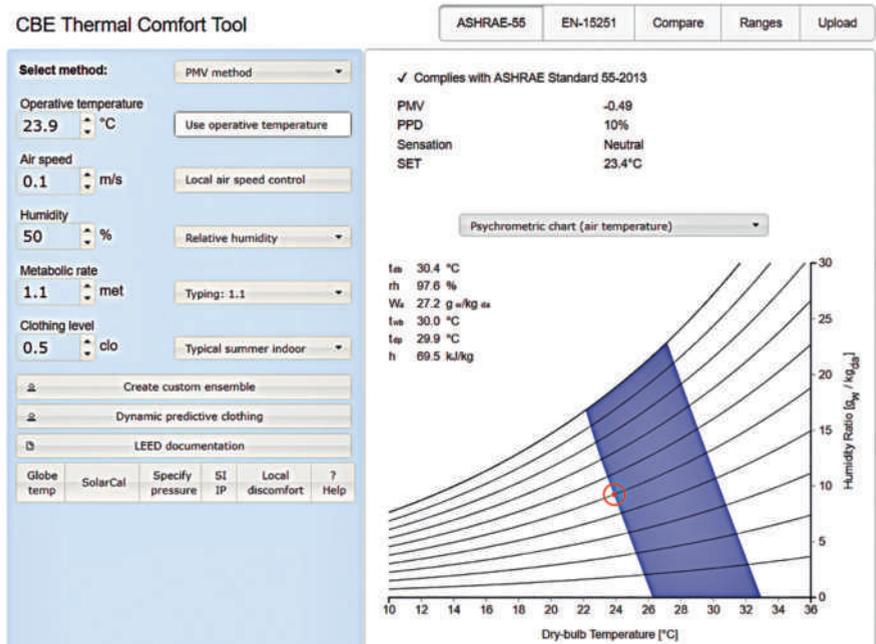


Figura 2.7. Evaluación CBE del confort. Método PMV; estándar ASHRAE; inputs: Toperativa, Vel. aire, HR, Met, Clo.



Figura 2.8. Evaluación CBE del confort. Método Adaptativo; estándar ASHRAE; inputs: Taire, TMR, T media exterior, Vel. aire.

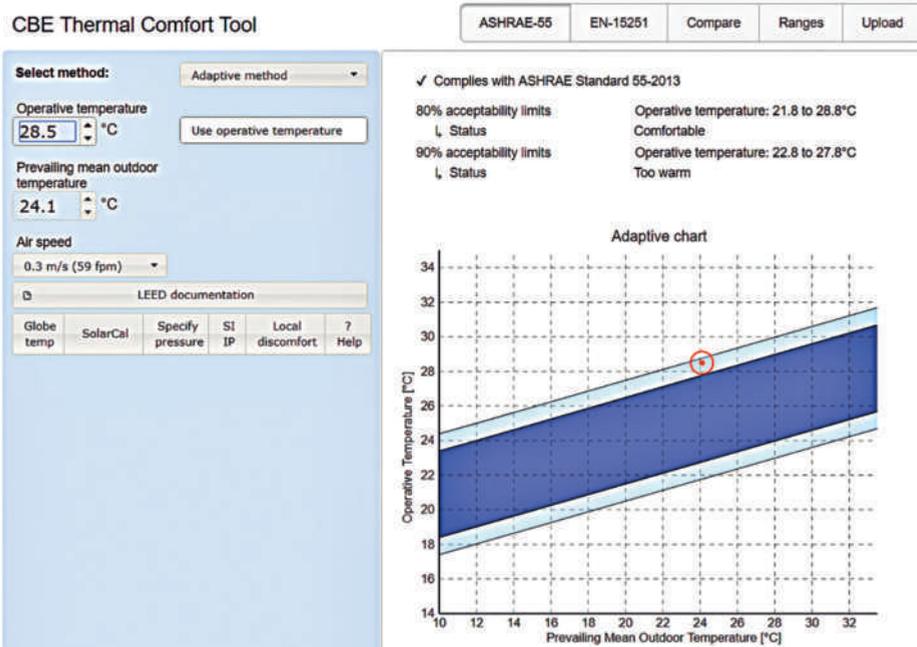


Figura 2.9. Evaluación CBE del confort. Método Adaptativo; estándar ASHRAE; inputs: Toperativa, T media exterior, Vel. aire.

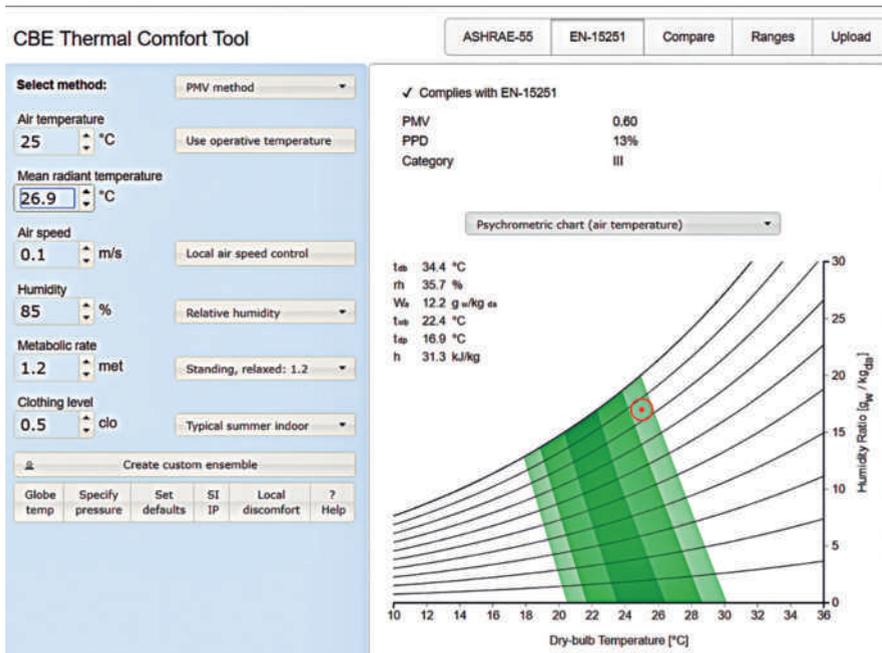


Figura 2.10. Evaluación CBE del confort. Método PMV; estándar EN-15251; inputs: Taire, TMR, Vel.aire, HR, Met, Clo.

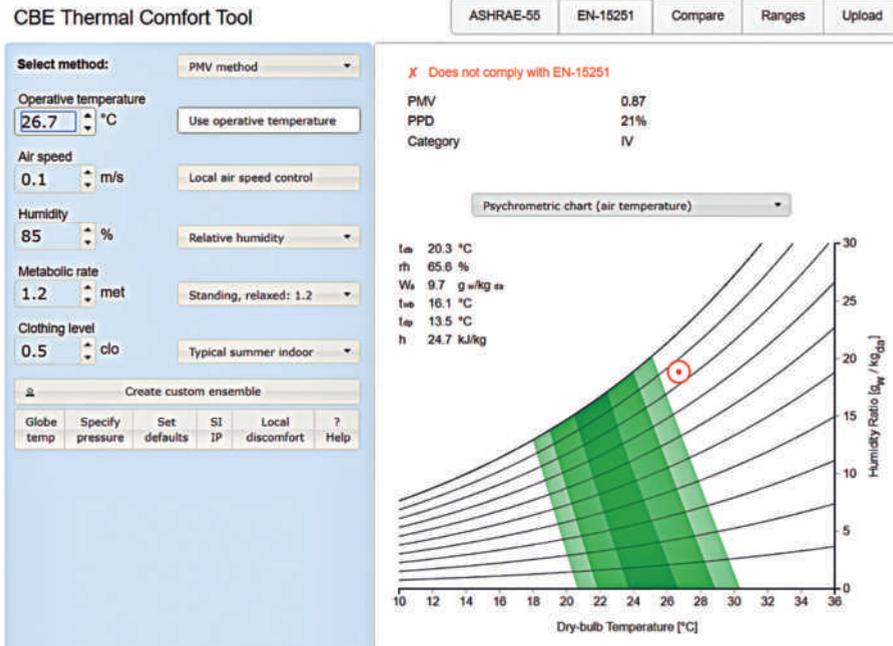


Figura 2.11. Evaluación CBE del confort. Método PMV; estándar EN-15251; inputs: Toperativa, Vel. aire, HR, Met, Clo.

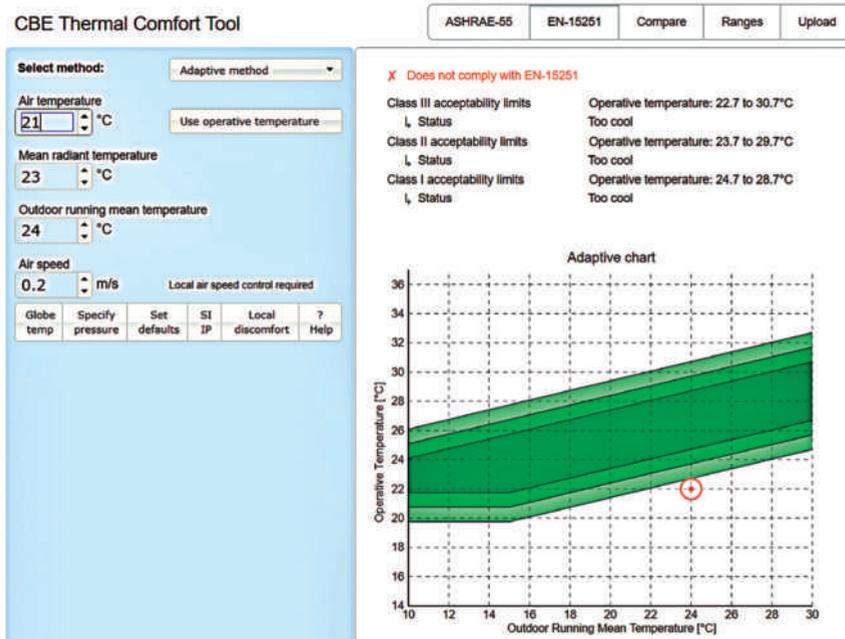


Figura 2.12. Evaluación CBE del confort. Método Adaptativo; estándar EN-15251; inputs: Taire, TMR, T media exterior, Vel. aire.

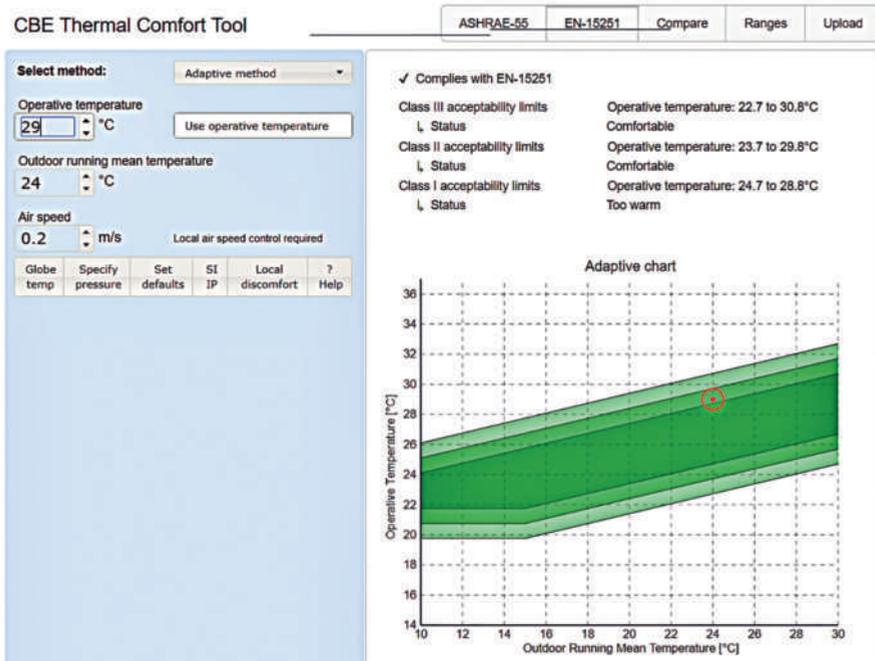


Figura 2.13. Evaluación CBE del confort. Método Adaptativo; estándar EN-15251; inputs: Toperativa, T media exterior, Vel. aire.

Otra herramienta de excelente calidad por agilidad, amistad y ayuda en los análisis de sensibilidad es el “PsychroTool”, de Informer Technologies, Inc. [48]. Como los parámetros de funcionamiento se alimentan simplemente ubicándose en la respectiva barra, e inmediatamente se despliega la descripción de la opción escogida, resulta muy fácil visualizar el efecto de cualquier cambio escogido. El psychrotool trabaja con el índice PMV/PPD. Las Figuras 2.14, Figura 2.15, y Figura 2.16 ilustran el efecto de hacer un cambio de velocidad de aire en una situación específica.

También es una buena herramienta de acceso libre, aunque su interfaz gráfica sea mucho más sencilla, el “PMVCalc_v2” de la University of Gavle. La Figura 2.17 muestra un ejercicio con este programa.

Como se expuso en la sección “FUNDAMENTOS”, la valoración de la Temperatura Media Radiante conlleva cierta dificultad, pues se depende de un buen número de parámetros. Los autores (y sus tesis) hemos desarrollado un software que evalúa la Temperatura Media Radiante para una persona en el centro de un cuarto que tiene en cuenta, distinto de otros, la emisividad de las distintas superficies. Próximamente lo compartiremos en la página web de la universidad.

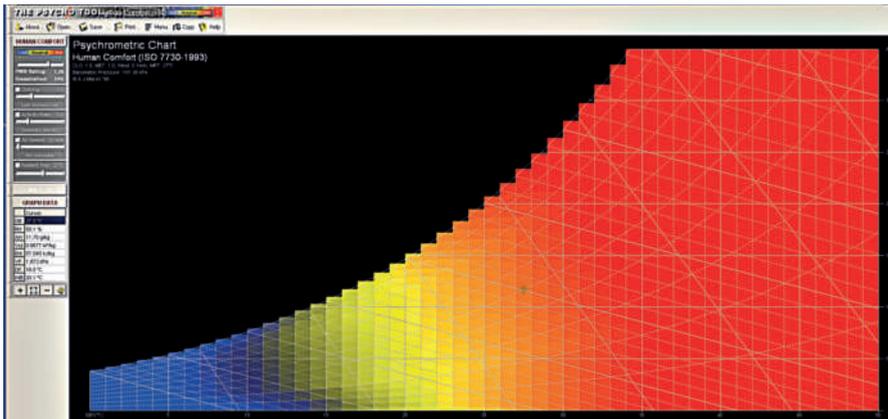


Figura 2.14. Evaluación del confort. Método PMV; estándar ISO 7730; inputs fijos: Taire, TMR, HR, Met, Clo. Input variable: Vel.aire= 0.1 m/s.

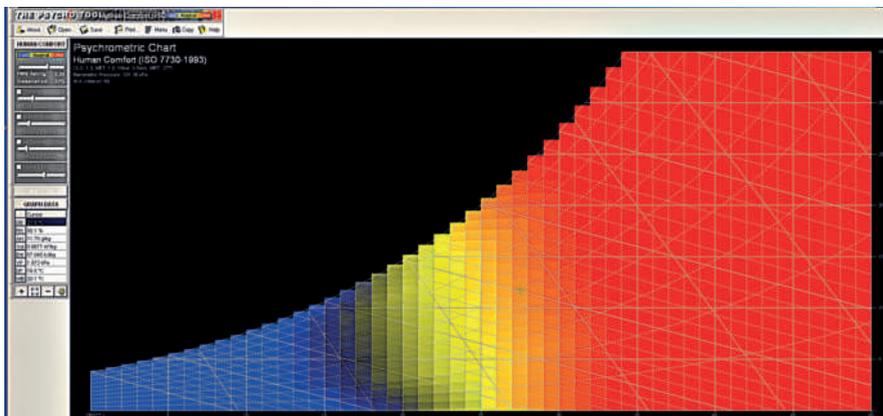


Figura 2.15. Evaluación del confort. Método PMV; estándar ISO 7730; inputs fijos: Taire, TMR, HR, Met, Clo. Input variable: Vel.aire= 0.5 m/s.

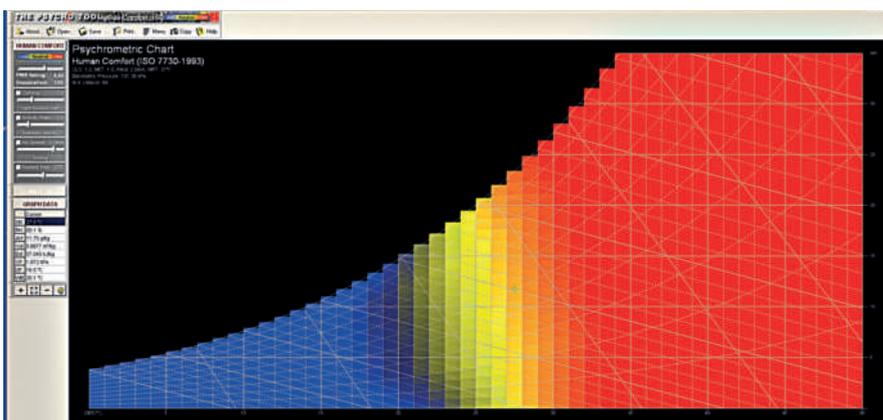


Figura 2.16. Evaluación del confort. Método PMV; estándar ISO 7730; inputs fijos: Taire, TMR, HR, Met, Clo. Input variable: Vel.aire= 2.0 m/s.

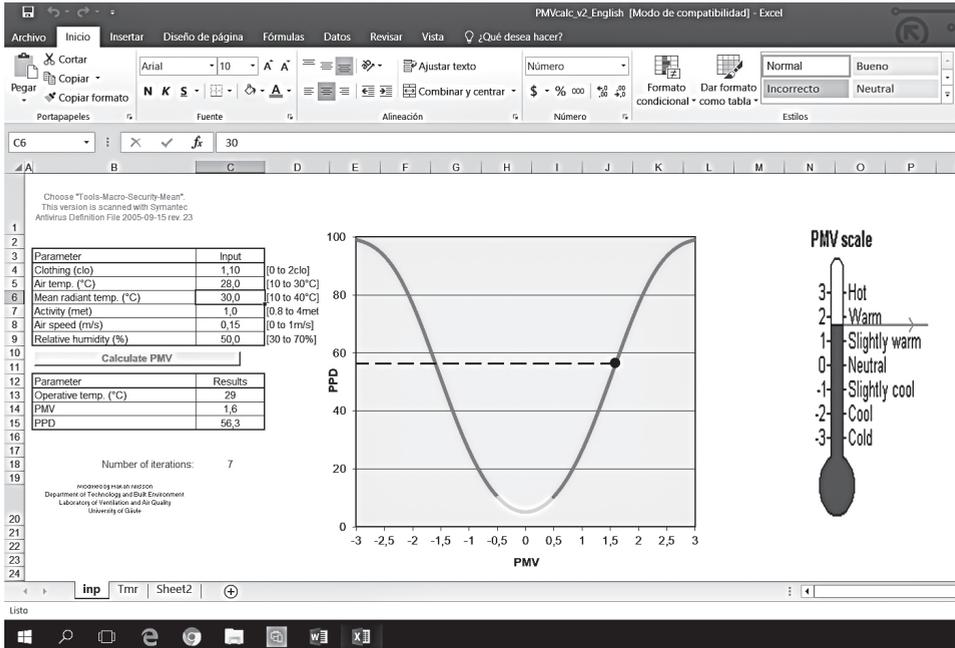


Figura 2.17. Evaluación del confort. Método PMV; programa “PMVCalc_v2” de la University of Gavle.

CONDICIONES AMBIENTALES

Dado que la climatización de edificios propugna por proveer unas condiciones térmicas interiores distintas a las de sus alrededores, es visible que el número y el tamaño de los equipos y los consumos a considerar depende de la diferencia interior-exterior. Por lo tanto, es de vital importancia conocer y manejar con toda certeza y confiabilidad la información detallada sobre las condiciones climáticas ambientales. Esta clase de información es provista por las estaciones meteorológicas. Los datos más relevantes al propósito de climatizar edificaciones son temperatura, humedad relativa, vientos y registros solares.

Dejando clara la necesidad de acertar en los inventarios del clima predominante, aparecen inquietudes sobre la forma de proyectarlos hacia el futuro. El tratamiento de algunos factores (i.e., la temperatura) involucra actualmente una sustancial polémica por cuenta del cambio climático que se experimenta. ¿Qué validez tienen promedios simples levantados sobre secuencias extremadamente largas, si en los últimos años hay claras tendencias que muestran que los valores relevantes para los próximos años serán distintos? Al respecto nuestra posición no contraviene la postura de que si se dispone de una vasta información debemos utilizarla sin rodeos; pero nos parece importante plantear que los resultados de los análisis retrospectivos deberán proyectarse hacia el período en el que van a ser utilizados. Otra situación es aquella en la cual no se tiene tal disponibilidad de datos, o en la que las tendencias dinámicas de calentamiento o de microclimas que aplican localmente requieren de manejos especiales (i.e., una isla de calor).

Microclima. Un microclima es un conjunto local de condiciones atmosféricas que difieren de las vecinas, a veces en pequeña cuantía y a veces en forma más sustancial. La dimensión del microclima puede ir desde un área mínima (como un patio o un jardín) hasta espacios de varios kilómetros cuadrados. Dado que los fenómenos climáticos varían según secuencias con

ordenamientos tanto espaciales como temporales, su tratamiento tiene que ser estadístico, esto es, que los parámetros deben ser descritos mediante valores representativos. Una región donde ocurren y persisten en el tiempo valores distintos al entorno es un microclima.

Los microclimas pueden encontrarse en muchas situaciones; por ejemplo, el espacio alrededor de una caída de agua, donde se experimenta una sensación de frescura muy distinta de los alrededores, es un microclima. Otro caso de microclima, de muy particular interés, es el de la “isla de calor”, que en las ciudades es causada por la concentración de estructuras en ladrillo, piedra o concreto expuestas a incidencia solar; al calentarse hasta temperaturas superiores a las de sus vecindades conforman una isla de calor urbana. Este tipo de microclima se ilustra en la Figura 3.1. Santamouris (2001) [49] compiló datos de diferentes islas de calor encontrando diferencias sobre el vecindario del orden entre 2.5°C y 14°C en Europa, entre 2°C y 10°C en América, entre 1°C y 10°C en Asia, y entre 1°C y 6.5°C en África. También encontró, en Atenas, en verano, en edificios urbanos, que las cargas térmicas duplicaron y los consumos eléctricos triplicaron sus valores, y que lo único benéfico fue un 30% de reducción de la calefacción durante el invierno.

El Cambio Climático. A pesar de algunas voces en contrario, probablemente con intereses económicos, los más recientes reportes del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) demuestran que el cambio climático global es innegable [50]. Esto es observable por los cambios de las temperaturas globales del aire y de los océanos, las extensas fusiones de nieve y hielo, y el aumento universal del nivel oceánico.

LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA

Una estación meteorológica es el lugar donde se realizan mediciones y observaciones puntuales de los diferentes parámetros meteorológicos (de la atmósfera) utilizando instrumentos adecuados para establecer sus comportamientos [51], [52].

Para ampliación y detalle sobre el tema se recomienda consultar la ref. [53] “Manual de Procedimientos para las Estaciones Meteorológicas” compilado por Enrique Castro Fonseca, 2008. Este documento es accesible en <http://www.ots.ac.cr/meteoro/files/manual.pdf>; contiene información acerca de conceptos de meteorología básica, a la vez que trata de explicar los procedimientos que deben de llevarse a cabo para el establecimiento de una estación de muestreo, con base en los estándares de la Organización Mundial de Meteorología (OMM).

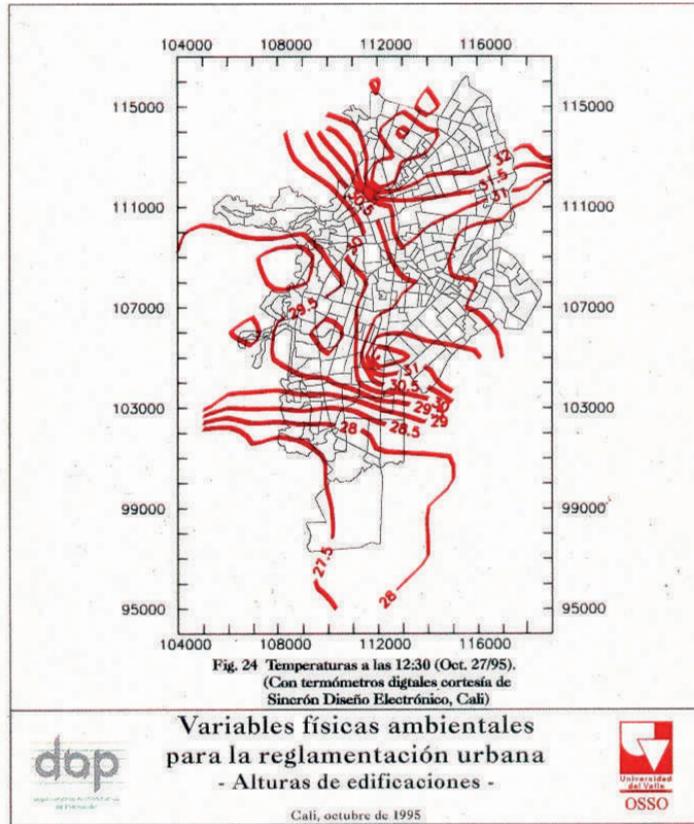


Figura 3.1. Isotermas Ciudad de Cali 12:30 p.m.

El área de validez de datos reportados por una estación, es decir su representatividad, indica cuánta área podrían representar los datos recolectados. La OMM clasifica las escalas de representatividad de los fenómenos meteorológicos de la siguiente manera:

- pequeña escala: menos de 100Km
- meso escala: de 100 a 1000Km
- gran escala: de 1000 a 5000Km
- escala planetaria: más de 5000Km

En una estación meteorológica corriente se encuentran los siguientes instrumentos:

- Termómetro: mide la temperatura del aire ambiente.
- Termómetros de subsuelo (geotermómetro): para medir la temperatura a 5, 10, 20, 50 y 100 cm de profundidad.
- Termógrafo: registra automáticamente la temperatura.
- Barómetro: mide la presión atmosférica .

- Pluviómetro: mide la cantidad de agua caída sobre el suelo por metro cuadrado .
- Psicrómetro o higrómetro: mide la humedad relativa del aire y el punto de rocío.
- Piranómetro: mide la radiación solar global (directa + difusa).
- Heliógrafo: mide las horas de luz solar.
- Anemómetro: mide la velocidad del viento.
- Veleta: instrumento que indica la dirección del viento.



Figura 3.2. Panorama de una estación meteorológica convencional [54].

Los instrumentos de medición empleados en las estaciones meteorológicas se albergan en una estructura de medidas estandarizadas conocida como abrigo meteorológico, también llamada casilla o garita. Dicha estructura protege de las inclemencias del tiempo los instrumentos de medición (ver Figura 3.2).

Emplazamiento y exposición. De acuerdo con [53], para elección del emplazamiento (lugar donde se sitúa la estación) y para cumplir los requisitos sobre la exposición de los instrumentos (Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos, OMM, sexta edición, 1996), se aplican las siguientes consideraciones: “1) los instrumentos exteriores deben instalarse en un terreno llano, aproximadamente de 10 por 7 metros (el recinto), cubierto de hierba baja, o de 15 una superficie representativa de la localidad, rodeada de una cerca para impedir el acceso a personas no autorizadas; en el recinto se reserva una parcela de 2 por 2 metros para mediciones referidas al estado del suelo. 2) No debe haber laderas inclinadas en las proximidades, y el emplazamiento no debe encontrarse en una hondonada. Si no se cumplen estas condiciones las observaciones pueden presentar peculiaridades de significación puramente local. 3) El emplazamiento debe estar suficientemente alejado de árboles, edificios, muros u otros

obstáculos. La distancia entre cualquiera de esos obstáculos (incluidas las vallas) y el pluviómetro no debe ser inferior al doble de la altura del objeto por encima del borde del aparato y preferentemente debe de cuadruplicar la altura. 4) El registrador de luz solar, el pluviómetro y el anemómetro deben encontrarse en emplazamientos con exposiciones que satisfagan sus requisitos, y en el mismo lugar que los otros instrumentos. 5) Debe señalarse que un recinto puede ser no el mejor lugar para estimar la velocidad y la dirección del viento, y conviene otro punto de observación más expuesto al viento. 6) Emplazamientos muy abiertos sin ningún tipo de obstáculos cercanos, satisfactorios para la mayoría de los instrumentos, son inapropiados para los pluviómetros. En estos lugares la captación del agua es reducida, salvo con vientos débiles, y se necesita algún grado de protección.”

Clasificación de las estaciones. Las estaciones meteorológicas se clasifican de distintas maneras, atendiendo a su tamaño o a su dedicación. En relación con su magnitud [52]:

- Estación climatológica principal: provista para realizar observaciones del tiempo atmosférico actual: visibilidad, precipitaciones, temperatura del aire, humedad, viento, radiación solar, evaporación y otros fenómenos especiales. Normalmente realiza unas tres mediciones diarias.
- Estación climatológica ordinaria: provista obligatoriamente de psicrómetro, pluviómetro, pluviógrafo, y termómetro, para medir las precipitaciones y la temperatura de manera instantánea.
- Estación sinóptica principal: realiza observaciones de los principales elementos meteorológicos en horas convenidas internacionalmente. Los datos se toman horariamente y corresponden a nubosidad, dirección y velocidad de los vientos, presión atmosférica, temperatura del aire, tipo y altura de las nubes, visibilidad, fenómenos especiales, características de humedad, precipitaciones, temperaturas extremas, capa significativas de las nubes, recorrido del viento y secuencia de los fenómenos atmosféricos. Esta información se codifica y se intercambia a través de diversos centros mundiales con el fin de alimentar los modelos globales y locales de pronóstico y para el servicio de la aviación.

De acuerdo con su función o dedicación, según [51]:

- Observatorio sinóptico de superficie
- Observatorio meteorológico aeronáutico
- Estación termopluviométrica
- Estación pluviométrica
- Estación meteorológica automática
- Estación evaporimétrica

Temperatura ambiente: Típicamente el aire exterior cambia a diario su temperatura en forma sinusoidal, registrándose la mayor pasado el mediodía y la mínima en la madrugada. En lugares calientes, como Cali, interesan las horas del mediodía, pues es cuando se presenta la mayor incomfortabilidad, en el intervalo entre las 11:00 y las 16:00 h. Para la selección de la temperatura de diseño, una buena forma es graficar las temperaturas promedio de los últimos años en el intervalo caliente, y después seleccionar el máximo de estos promedios. Téngase en cuenta que usar más de cinco años es despreciar el cambio climático. Este enfoque implica que la mitad de los días, en los alrededores de esas horas, habrá una temperatura ambiente mayor y, por ende, algún riesgo de desconfort. Una segunda alternativa —usar la temperatura máxima absoluta— implicaría manejar un diseño muy conservativo y, por tanto, costosísimo económica y ecológicamente. La mejor opción para disminuir los intervalos de desconfort a un costo razonable, en nuestro concepto, es utilizar el valor medio entre los dos anteriores. En otras palabras, es encontrar la temperatura media entre la temperatura máxima absoluta y la promedio del momento más caliente. La bondad de esta selección se ilustra en la Figura 3.3, pues la temperatura de diseño seleccionada según esta recomendación cubre muy apropiadamente el período más crítico. Según un ejercicio realizado para Cali, la temperatura ambiente por encima de la de diseño ocurre solo en 30 días, lo cual es un acierto de la racionalidad en la aplicación de la bioclimática.

Humedad relativa: La HR tiene comportamiento inverso a la temperatura, siendo mayor en la madrugada y mínima rondando el mediodía. Análogo a la temperatura, no deben usarse el promedio ni los mínimos valores de HR. Nuestra sugerencia es graficar las HR mínimas absolutas, las promedio, y las medias entre ambas; el menor valor de estas últimas corresponde a la HR de diseño. Al igual que en la temperatura ambiente, se obtiene una muy satisfactoria cantidad de días con condiciones de diseño apropiadas. En la Figura 3.4, que presenta datos para la ciudad de Cali, se muestra que la HR de diseño 42%, cubre el intervalo más importante del día en forma conveniente.

Vientos: son corrientes de aire ambiente que se producen naturalmente en virtud de los movimientos del planeta y de la radiación solar. De acuerdo con la dimensión del recorrido tenemos tres tipos de vientos: los vientos **planetarios**, los vientos **regionales**, y los **locales**, aunque hay algunos tipos, como los monzones, que son más difíciles de determinar y que ocupan variantes dentro de esta simple clasificación. Atendiendo a su velocidad, los vientos se clasifican con la numeración Beaufort, que se explica en la Tabla 3.1.

Dirección del viento: Se llama dirección del viento el punto del horizonte de donde viene o sopla una corriente de aire.

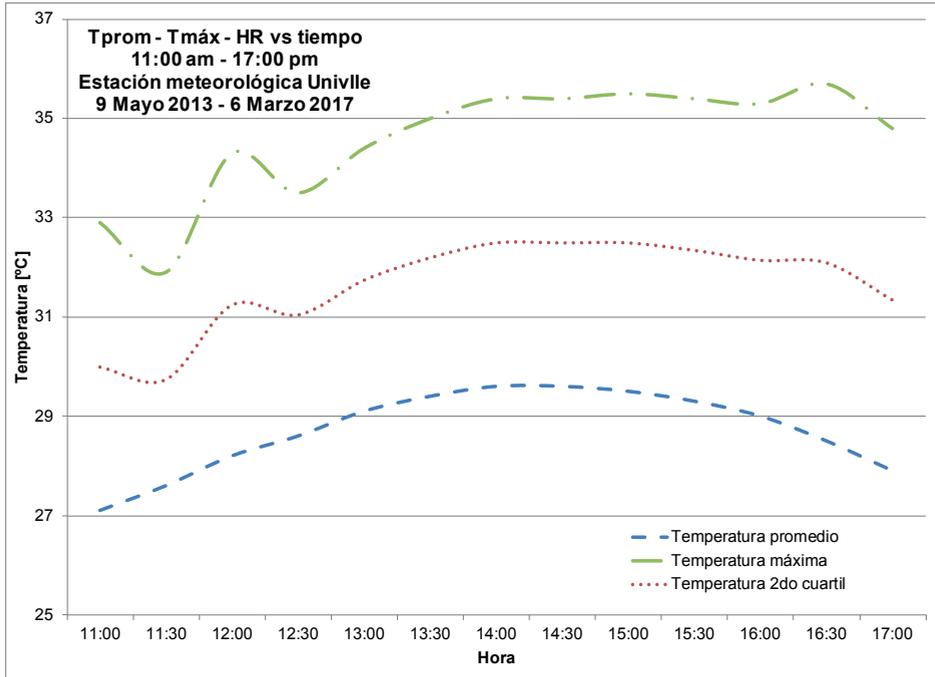


Figura 3.3. Temperaturas en horas más calientes para Cali.

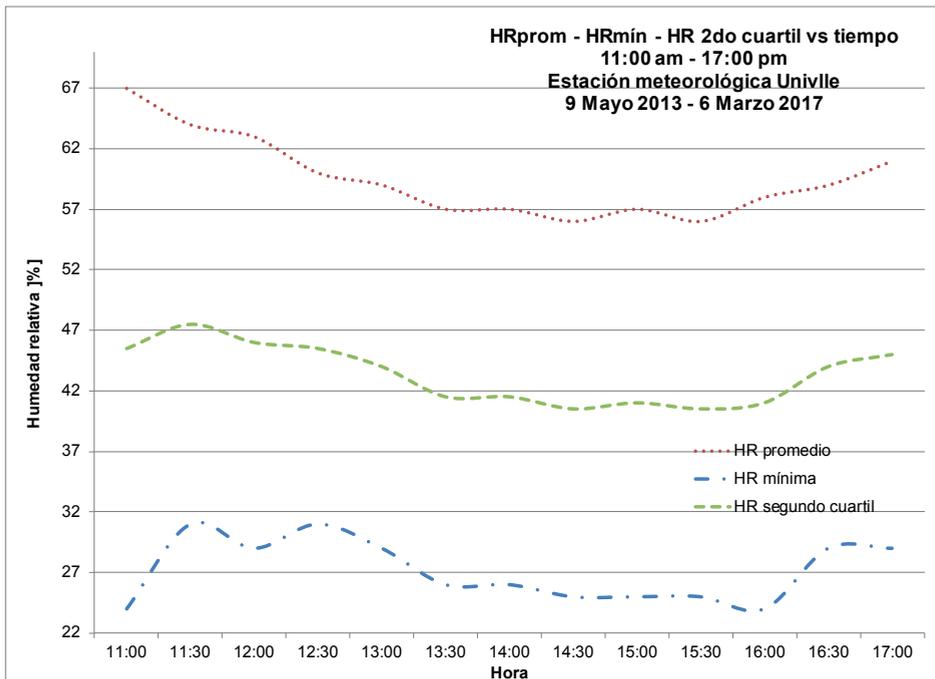


Figura 3.4. Humedad relativa en horas más calientes en Cali.

Velocidad del viento: En las estaciones la medición de la velocidad del viento se establece mediante el anemómetro. Para garantizar valores representativos, este instrumento debe ubicarse cumpliendo un protocolo estricto universal. De [53]: "...3.6.7. Condiciones de emplazamiento del anemómetro: a) Condiciones específicas por instrumento: la altura estándar de los anemómetros utilizados sobre un terreno llano y abierto es de 10 metros. b) Condiciones de los alrededores del sitio: se denomina terreno abierto a una zona donde la distancia entre el anemómetro y cualquier obstáculo es al menos 10 veces superior a la altura del obstáculo; es muy importante tratar de encontrar un emplazamiento óptimo para que el viento sea representativo para el lugar. Cuando no se puede encontrar una exposición estándar el anemómetro puede instalarse a una altura tal que sus mediciones se vean afectadas lo menos posibles por los obstáculos locales y describan lo que pudiese ser el viento si no hubiese obstáculos a 10 m., pero en general no se ha determinado una regla que funcione para estos casos [...]". En general, se conoce que la topografía influye sustancialmente: [51] recuerda que la velocidad es baja cerca del suelo y que aumenta rápidamente con la altura. Cuanto más accidentada sea la superficie del terreno, más frenará esta al viento; por ello sopla con menos velocidad en las depresiones terrestres y más sobre las colinas. El viento sopla con más fuerza sobre el mar que en la tierra.

Tabla 3.1. Clasificación de los vientos según su velocidad.

Texto derivado de Windows to the Universe® (<http://windows2universe.org>) © 2010, National Earth Science Teachers Association.

No. Beaufort	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12-17
Velocidad [km/h]	< 1	1-5	6- 11	12-19	20-28	29-38	39-49	50-61	62-74	75-88	89-102	103-117	>117
Descripción	Calma	Brisa suave	Brisa moderada		Brisa fresca		Ventarrón			Ventarrón constante	Tormenta	huracán	

La información original, el dato estadístico meteorológico, requiere ser transformado para aplicarlo al punto de interés en la edificación. Sostiene [55] que la información aerodinámica generalmente consiste en dos partes: la contribución relativa al terreno y la contribución relativa al diseño. La primera representa el cambio en las estadísticas del viento desde la ubicación de la meteorología hasta el punto de referencia en las cercanías del edificio (según Figura 3.5, es la transformación de la velocidad reportada por la estación U_{est} a la velocidad del punto de referencia U_{ref}). La contribución relativa al diseño representa el cambio en la velocidad debido al diseño urbano del entorno inmediatamente próximo al edificio; i.e. la configuración del mismo edificio (cambio U_{ref} a velocidad local U). Diferentes

procedimientos de transformación permiten determinar la contribución relativa al terreno, aunque a menudo se emplea un modelo simplificado de la capa límite atmosférica como el perfil de velocidad media logarítmica. La contribución relativa al diseño (i.e., las condiciones de flujo del viento alrededor del edificio y en su interior) puede ser obtenida por modelamiento en un túnel de viento o por CFD.

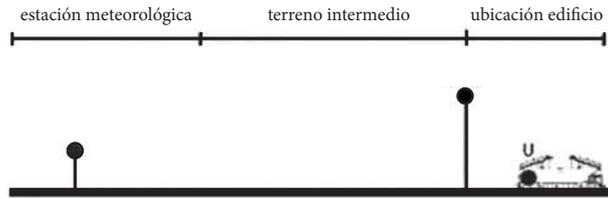


Figura 3.5. Esquema de la velocidad del viento en la estación meteorológica (U_{est}), el punto de referencia (U_{ref}), y en el sitio de interés (U). Traducido de [55].

LECTURA DE LA ROSA DE LOS VIENTOS

La Rosa de los Vientos es un gráfico que informa la dirección, la velocidad y la frecuencia diaria de los vientos monitoreados en la estación meteorológica, como se muestra en la Figura 3.6. La dirección viene mostrada en el gráfico circular central, donde se denuncian los puntos cardinales; no debe olvidarse que aquí “dirección” significa procedencia. Típicamente la velocidad se indica por medio del color y el grosor de la barra, y la tabla de la esquina inferior derecha trae las equivalencias. En la esquina inferior izquierda se asientan tiempos de cada dirección (en porcentaje) y el período en calma.

La Rosa de los Vientos de la gráfica no ilustra cómo son los vientos a las horas críticas objeto del diseño. No es posible saber, por ejemplo, cómo sopla entre las 11:00 y las 16:00 h. El procedimiento alternativo que se propone aquí prefiere un arreglo como el mostrado abajo, en la Figura 3.7. En este ejercicio se selecciona el intervalo de 12:30 a 18:00 h; se promedia la frecuencia con que sopló el viento en cada dirección por los últimos cuatro años, para cuatro velocidades representativas, y esos son los valores relevantes para fundamentar los cálculos de ventilación natural. Por ejemplo, el 9.5% del tiempo, entre las 12:30 y 18:00h, el viento sopla en dirección N, con velocidad entre 0.4 y 1.3 m/s. El diseñador podría afinar más las rosa a conveniencia propia, restringiendo las horas. Nótese, como se explicó, que el cambio climático afecta este comportamiento, así que los datos antes de cinco años deben trabajarse con suma precaución, máxime si estamos diseñando para el futuro.

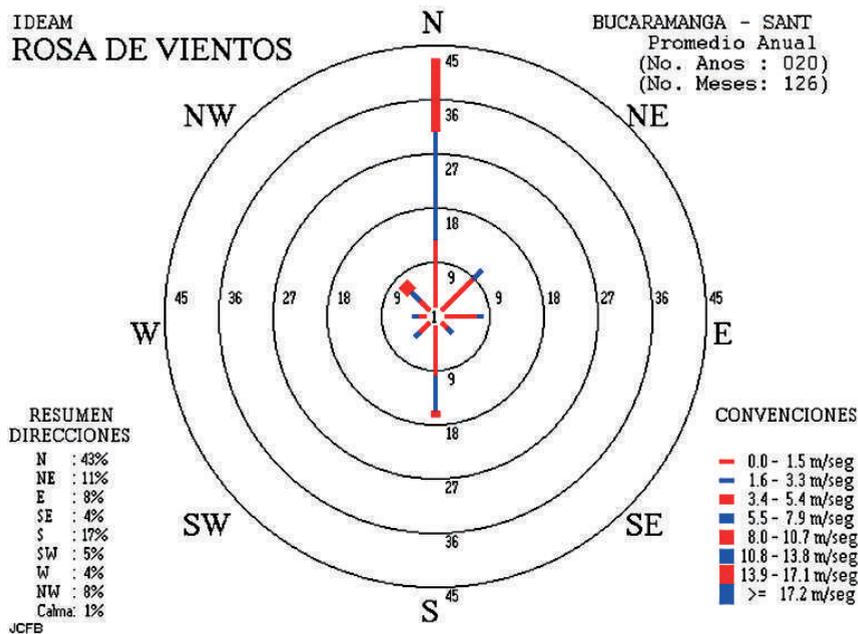


Figura 3.6. Rosa de los Vientos de Bucaramanga. Fuente: Ideam [56]

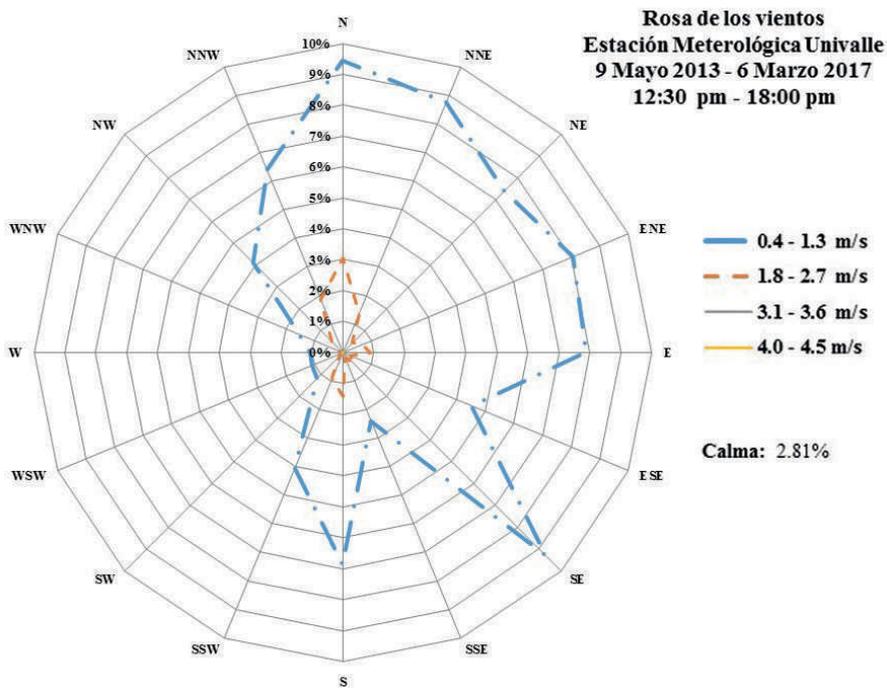


Figura 3.7. Rosa de los vientos para Cali con distribución horaria.

LA INSTRUMENTACIÓN

En razón de la disminución de precios de la instrumentación general, y de la buena calidad frecuentemente alcanzada por los fabricantes, el panorama de hacer mediciones de campo en ingeniería es cada vez más corriente. En la tarea de acondicionar espacios el beneficio de poder verificar en campo la existencia o la predominancia de un microclima es de un valor inestimable, y esta posibilidad está ahora al alcance de los profesionales. Para ilustrar a los lectores con las ofertas de instrumentación en este campo, resumimos y traducimos, del *review* de Kumar [57] en instrumentación en polución de aire, la parte correspondiente al área de meteorología.

Instrumentación para Meteorología [57].

Los instrumentos meteorológicos se clasifican como primarios, cuando son usados para medir temperatura y dirección del viento, y secundarios, cuando se ocupan de la radiación solar, la visibilidad, la humedad y la presión atmosférica. Algunas de las compañías manufactureras más importantes son Young Environmental Systems (E-mail: info@yestek.com), Belfort Instruments (www.belfort-inst.com) y Sci-Tec Instruments Inc. (www.scitec.com). La Tabla 3.2 muestra una lista de otras compañías alternativas.

Tabla 3.2. Lista de Compañías de instrumentos meteorológicos

	Nombre Compañía	Contacto para información
1	Barnant Company, IL	http://www.barnant.com/
2	Hoskin Scientific, Burlington, ON	Hoskin@direct.ca
3	Nortech Fibronic Inc., Canada	http://www.nortech.qc.ca/
4	Spectrex, Redwood City, CA	http://www.spectrex.com/
5	Wind Systems, CA	www.deif.com/marwind.htm
6	Omega Engineering Inc., CT	http://www.omega.com/
7	R.M. Young Co., MI	http://www.youngusa.com/

Spectrex Wind Sensor

El modelo SP120 Wind Sensor, manufacturado por Spectrex, tiene un amplio rango para medición de velocidad y dirección del viento. Excelente desempeño y durabilidad caracterizan este monitor estándar para vientos,

que cuenta con un transductor óptico absoluto para mediciones angulares de la veleta. Tanto la salida de la señal de velocidad como la de dirección son producidas en formato serial, el cual es ideal para interface con sistemas modernos de adquisición de datos.

Ultrasonic Wind Sensor

Diseñado para medir velocidad horizontal y dirección de viento, el modelo 425 Ultrasonic Wind Sensor, fabricado por Hoskin Scientific, usa un arreglo de solo tres transductores. El 425 no tiene partes móviles, luego es muy resistente a la corrosión y la contaminación. Está hecho para servir en trabajos pesados en localidades remotas, y solo requiere 10 mA para funcionar. Una versión calefaccionada con corriente alterna con control termostático está disponible para sitios donde el congelamiento es un problema.

Temperature Sensor

Ambas mediciones, de temperatura absoluta y diferencial, son parte esencial de todos los sistemas meteorológicos de monitor y difusión. Los sensores de temperatura Belfort Sensors - Series 818/840/896 son construidos sobre la base de un termistor dual y una red resistiva alojados en una funda de acero inoxidable. Los elementos del termistor aportan la base para obtener mediciones de temperatura muy exactas, y están disponibles en muchas aplicaciones. El circuito da una salida de resistencia lineal sobre un rango completo de -50°C a $+50^{\circ}\text{C}$. Este circuito provee un cambio de resistencia lineal con respecto a la temperatura.

HandyFlex by Nortech

Este aparato ofrece una versatilidad impresionante. Operado con baterías para máxima libertad del usuario, este instrumento de un solo canal le permite al usuario moverse libremente de un área a otra para medir temperaturas en varios puntos sensibles interesantes. Este equipo multipropósito también viene con interface RS-232 integrada y una opción de salida análoga, dos características muy convenientes que pueden usarse para interfaz remota. El HandyFlex funciona con baterías recargables de Ni-Cad con respaldo de baterías alcalinas, proveyendo potencia para por lo menos en diez horas de uso continuo.

Met Stations

Una estación meteorológica básica (MET) provee sensores que miden cinco variables básicas del ambiente, a saber: temperatura del aire, velocidad del viento, dirección del viento, humedad relativa y presión barométrica. En adición, otros tipos de sensores pueden ser parte de una estación MET tales como el de precipitación, irradiación solar (onda larga), irradiación solar (onda corta) y ráfagas máximas. Estaciones MET localizadas en boyas o en la costa también pueden suministrar mediciones de superficie marina tales como temperatura del agua, período del oleaje y altura de las olas. Una de las muchas compañías que trabaja con estaciones MET es REINAS Instrumentation (www.ipmml.cse.ucsc.edu/reinas/instrument-tour/).

CALIDAD DEL AIRE

INTRODUCCIÓN

Aunque una buena aproximación intuitiva nos dice que “aire de buena calidad” es aquel cuyas condiciones son satisfactorias para la salud y el bienestar, es fácil comprender que una definición estandarizada, exacta, legal, obligatoria, involucra la normatización justificada de algunas condiciones del aire. También es sencillo aceptar, de entrada, que esas reglas resultantes son diferentes si se aplican a ambientes interiores o exteriores, y que consecuentemente también son distintas según el país donde se formulan y emplean. Para presentar el tema de forma coherente hemos organizado secuencialmente los subcapítulos Glosario, Composición del aire, Calidad interior y exterior, Contaminantes, Calidad de aire en Colombia, y Formas de mejoramiento. Se intercala el tema Instrumentación y se añaden dos casos especiales (Síndrome de edificio enfermo y salas limpias), y se finaliza con las Referencias.

GLOSARIO, ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS

Aerosol: Suspensión de partículas diminutas de sólidos o líquidos en el aire u otro gas = Particulate air pollution. (Para detalles, ver PM en subcapítulo Contaminantes) (Ver Figura 4.1).

ANSI: La American National Standards Institute es una institución privada sin ánimo de lucro; su misión es mejorar la competitividad y la calidad de vida en USA, promocionando y facilitando consensos sobre estándares y sistemas evaluativos de conformidades. Supervisa y vigila la creación, la promulgación y el uso de miles de normas y guías en todos los campos técnico-comerciales. También es responsable en acreditación de organizaciones respecto a conformidad con estándares (<https://www.ansi.org>).

Biomasa: Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.

Calentamiento Directo: Efecto de la transferencia de calor por flama, gases de combustión, o por ambos, al entrar en contacto directo con los materiales del proceso.

Calentamiento Indirecto: Cuando el calor originado en los gases de combustión pasa primero a una sustancia intermediaria y luego al objeto final.

CFR: Code of Federal Regulations.

CO: monóxido de carbono. [Ver en subcapítulo Contaminantes]

Combustión Interna: Es aquella en la que el calor se libera en el interior del equipo debido a la combustión de los carburantes que se emplean, como en los motores de explosión.

Combustión Externa: Es el proceso en el cual el combustible es utilizado para formar vapor y en el cual posteriormente el vapor se emplea para realizar trabajo o calentamiento.

Equipo de Combustión Externa: Equipo en el cual el proceso de combustión ocurre por fuera del mismo. En estos equipos la sustancia que sirve como vehículo para el transporte de la energía es distinta de los productos de la combustión y recibe el calor después de que este atraviesa paredes de retención, como en el caso de una caldera o un horno.

Combustibles Gaseosos: Se denomina combustibles gaseosos a los hidrocarburos naturales, a los elaborados exclusivamente para su empleo como combustibles, y a aquellos que se obtienen como subproducto en ciertos procesos industriales y que se pueden aprovechar para la combustión. Por ejemplo, gas natural, metano, etano, propano, butano, gas de refinería, gas de alto horno, biogás o mezclas de estos. [Ver Inflamable, en subcapítulo Contaminantes].

Combustibles Líquidos: Se consideran combustibles líquidos el Diesel, el Fuel Oil No. 2 o ACPM, el Fuel Oil N° 6, crudo o bunker. [ver inflamable, en subcapítulo Contaminantes].

Combustibles Sólidos: Se consideran combustibles sólidos el carbón mineral, el coque, el carbón vegetal, la antracita, las hullas, los lignitos, la leña, las turbas, la madera, la biomasa, las fibras vegetales, el asfalto y la brea.

Compuestos Orgánicos Volátiles: Cualquier compuesto orgánico (que contiene carbono) que se evapora con facilidad hacia la atmósfera a temperatura ambiente (IDEAM, 2012) [58].

Concentración de una Sustancia en el Aire: Es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia y la unidad de volumen de aire en la cual está contenida. Las unidades de medida para los estándares son partes por millón (ppm) en volumen, partes por billón (ppb) en volumen, y microgramos por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Condiciones de Referencia: Son los valores de temperatura y presión con base en los cuales se fijan las normas de calidad del aire y de las emisiones, respectivamente 25 °C y 760 mm de mercurio.

Contaminantes: Son fenómenos físicos, o sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y/o la salud humana que solos, o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas. (Ver Figura 4.1 y subcapítulo Contaminantes).

Criterios air pollutants o contaminantes criterio: La EPA ha establecido el “National Ambient Air Quality Standards” para seis contaminantes principales, los cuales han sido denominados “criterios air pollutants” (CO, Pb, NO₂, O₃, PM y SO₂).

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

Dióxido de Azufre: ver SO₂, en subcapítulo Contaminantes.

Dioxinas y Furanos: Ver Dioxinas y Furanos en subcapítulo Contaminantes.

Emisión: Descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil.

EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Environmental Protection Agency).

EPE: Estación de Propósito Especial.

Formaldehído: H₂CO (Ver Formaldehído en subcapítulo Contaminantes).

Fuentes fijas: fuentes de emisión situadas en un lugar determinado e inmovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.

Fuente fija puntual: Aquella que emite contaminantes al aire por ductos o chimeneas debido a la magnitud de sus emisiones o a la complejidad de los procesos que desarrollan; p.e., refinerías, termoeléctricas, industrias de magnitud.

Fuentes fijas dispersas o difusas: Aquellas cuyos focos de emisión se dispersan en un área por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión; p.e., trituradoras, depósitos de materiales de construcción, minas, canteras, plantas de tratamiento de aguas residuales, rellenos sanitarios, quemas agrícolas controladas.

Fuentes naturales: Emisiones provenientes de fuentes naturales como la re-suspensión del polvo, las biogénicas y los volcanes en actividad.

HCT (Hidrocarburos Totales): Todos los compuestos carbonados generados en las emisiones de hidrocarburos, excepto los carbonatos, carburos metálicos, monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO₂), ácido carbónico y aldehídos.

Hg: Mercurio.

H₂CO: Ver Formaldehído, en subcapítulo Contaminantes.

H₂S: Sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico.

IE: Inventario de Emisiones.

ICA: Índice de Calidad del Aire diaria. Permite comparar los niveles de contaminación. Corresponde a una escala numérica adimensional entre 0 y 500 (a la cual se le asigna un color), según su relación con los efectos sobre la salud. Fue adoptado del documento Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality—the Air Quality Index (AQI), EPA-454/B-09-001 feb/09. Está enfocado en cinco contaminantes principales: O₃, MP, SO₂, NO₂, y CO (Ver la Tabla 3.4 del Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad de Aire SVCA, Resolución 2153 de 2010).

IDLH: Inmediatly Dangerous to Life or Health concentration (Ver IPVS).

Inflamable: Ver Inflamable, en subcapítulo Contaminantes.

Inmisión: Cantidad de contaminantes en el aire absorbido por un receptor. Transferencia de contaminantes de la atmósfera a un “receptor”. Acción opuesta a la emisión. Aire inmisible es el aire respirable a nivel de la troposfera.

IPVS = IDLH [59]: Concentración “inmediatamente peligrosa para la vida o la salud”. El límite IPVS representa la concentración máxima expresada en ppm o en mg/m³ a la cual, en caso de fallo o inexistencia de equipo respiratorio, se podría escapar en un plazo de 30 minutos sin experimentar síntomas graves ni efectos irreversibles para la salud. En España la Directriz Básica para la elaboración y homologación de los Planes Especiales del Sector Químico (Resolución de 30.1.91 M.I. BOE 6.2.91) establece el IPVS como valor umbral de toxicidad para aproximadamente

400 sustancias (Bibliografía: NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards, June, 1990).

LEL= Lower explosive limit = lower flammable limit (LFL) = Límite Inferior de Explosividad (Ver Inflamable en subcapítulo Contaminantes).

LFL= lower flammable limit (LFL) = Lower explosive limit (LEL) = Límite Inferior de Explosividad (Ver Inflamable en subcapítulo Contaminantes).

MAVDT: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (actual Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

Método Alternativo: Es el procedimiento de medición y análisis señalado en los normativos, que produce resultados similares a los del “Método de Referencia” en la determinación de la concentración de una sustancia contaminante; luego, puede reemplazar al “Método de Referencia”.

Método de Referencia: Es el procedimiento de medición y análisis probado exhaustivamente, reconocido en las normativas, que debe utilizarse para determinar la concentración de una sustancia contaminante; se realiza bajo estrictos parámetros técnicos.

NAAQS: National Ambient Air Quality Standards. El “Clean Air Act” requirió de EPA establecer el National Ambient Air Quality Standards (40 CFR Code of Federal Regulations part 50). En esa tarea los estándares quedaron clasificados en dos tipos: Primary standards, que proveen protección a la salud pública (incluyendo poblaciones “sensibles” como asmáticos, niños, y ancianos; y Secondary standards, que proveen protección al bienestar público (incluye protección contra la visibilidad decreciente y daño a animales, cultivos, vegetación y edificios).

NAFA: National Air Filtration Association.

NH₄⁺¹ (Ion amonio): También puede ser escrito sin el superíndice (valor carga eléctrica).

NILU: Norwegian institute for air research.

NO: Monóxido de nitrógeno.

Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión: Es el nivel de concentración legalmente permisible de sustancias o fenómenos contaminantes presentes en el aire. En Colombia es establecido por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, con el fin de preservar la buena calidad del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana.

NO₂: Dióxido de Nitrógeno [ver en subcapítulo Contaminantes]

O₃: Ozono [ver en subcapítulo Contaminantes]

OSHA: Occupational Safety and Health Administration. <https://www.osha.gov/>

Particulate air pollution: Mezcla, suspendida en el aire, de partículas sólidas y líquidas (definición de US EPA). (Ver Figura 4.1).

Pb: Plomo [ver en subcapítulo Contaminantes].

PCB's: Bifenilos policlorinados.

PGCA: Plan de Gestión de la Calidad del Aire.

PM# = particulate matter = urban particulate matter = material particulado [ver TSP, PM10, PM2.5 en subcapítulo Contaminantes].

PM10 (Material Particulado Menor a 10 Micras) [ver TSP, PM10, PM2.5 en subcapítulo Contaminantes].

PM2.5 (Material Particulado Menor a 2,5 Micras) [ver TSP, PM10, PM2.5 en subcapítulo Contaminantes].

ppm: Partes por millón.

PST: Partículas Suspendidas Totales=TSP [ver TSP en subcapítulo Contaminantes].

Radón: [ver Radón en subcapítulo Contaminantes].

SVCA: Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire.

SEVCA: Sistema especial de vigilancia de la calidad del aire: cualquier población con problemáticas específicas de calidad del aire (minería, alto nivel de industrialización, etc.).

SIG: Sistema de información geográfico.

SVCAI: Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire Industrial; aplicado a actividades a las que la autoridad ambiental establezca la obligación de implementar un SVCA. Podrá contar con estaciones indicativas o fijas.

SISAIRE: Sub-Sistema de Información sobre Calidad del Aire.

SO₂: Dióxido de azufre [ver en subcapítulo Contaminantes].

SOx: Óxidos de azufre.

TSP: Total Suspended Particles= PST: Partículas Suspendidas Totales [ver en subcapítulo Contaminantes].

VOC: Compuestos orgánicos volátiles.

µm: micrómetro, micra, millonésima parte del metro.

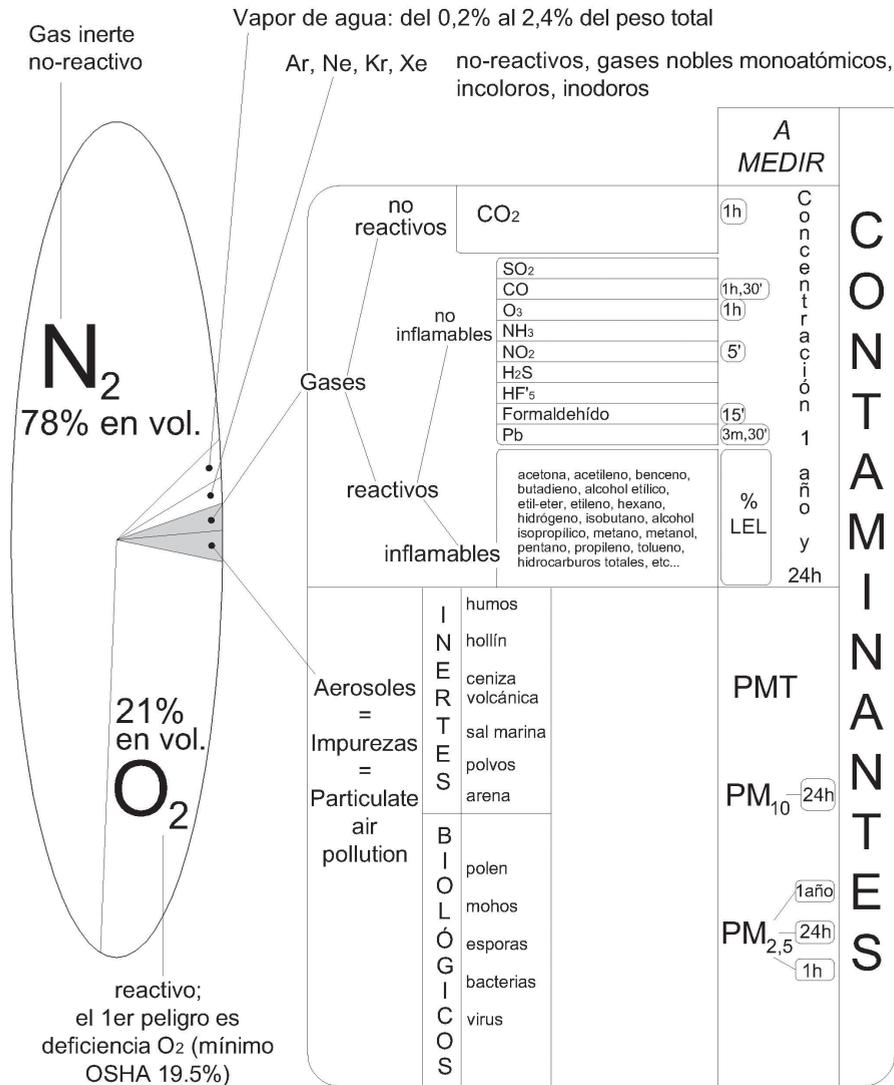


Figura 4.1. Composición del aire.
Material gaseoso y partículas sólidas..

CALIDAD DE AIRE INTERIOR Y EXTERIOR

De la mostrada composición del aire —y de acuerdo con NAFA— surge una preocupación centrada en que los gases y el material particulado pueden perjudicar nuestra salud y bienestar, así como afectar los productos que se manufacturan. Es válido entonces asegurarse de que, tanto en espacios cerrados como abiertos, el aire cumpla unos estándares mínimos que garanticen calidad. Tales estándares, producto del método científico, han sido originados, desarrollados y promulgados por los sistemas y las organizaciones responsables y capacitadas para tal fin.

Calidad del aire exterior (*outdoor air quality*)

La composición porcentual de la atmósfera experimenta continuos cambios; estas variaciones dependen de la posición geográfica (longitud, latitud, altura), la topografía y la geología del entorno, el clima (y la estación en zonas templadas), la hora, los vientos. Pero también es un factor importante la proximidad a fuentes de contaminantes, la cuales pueden ser naturales o antropogénicas. La Tabla 4.1 muestra el aporte de contaminantes de las distintas fuentes.

Tabla 4.1. Fuentes de contaminantes gaseosos del aire [60].

Gas	Fuentes		Cantidad (x10 ⁶ Ton Por Año)	
	Antropogénicas	Naturales	Contaminación	Natural
SO ₂	Combustión de carbón y petróleo, cocido de materiales sulfurados	Volcanes	146	6-12
H ₂ S	Procesos químicos, tratamiento de aguas negras	Volcanes, acción biológica en pantanos	3	30-100
CO	Combustión, principalmente escapes de automóviles	Reacciones de terpenos en incendios forestales	300	>3000
NO _x	Combustión	Acción bacteriana en suelos	50*	60-270*
NH ₃	Tratamiento de desechos	Descomposición biológica	4	100-200
N ₂ O	En forma indirecta por uso de fertilizantes nitrogenados	Acción biológica en suelos	>17	100-450
Hidrocarburos	Combustión, escapes, procesos químicos	Procesos biológicos	88	CH ₄ :300-1600; terpenos:200
CO ₂	Combustión	Descomposición biológica, liberación desde océanos	15000	150000

Nota: Énfasis agregado

La calidad de aire exterior, además de ser vital en espacios públicos, es factor clave en las obligatorias renovaciones que demandan los espacios cerrados. Por lo anterior, aunque en general se parte de la presunción de que el aire exterior vecino es sano y puro, es del caso atender las directrices que sobre el asunto existen. El ANSI/ASHRAE 62.1-2016 —referencia [61], la más importante sobre el tema— señala que proceden al respecto dos acciones: la primera es determinar la “calidad de aire regional”; la segunda es estimar la “calidad de aire local”. Para rematar, confeccionar una buena documentación sobre los resultados obtenidos es un complemento deseable; [61] appendix H p. 47 sugiere una plantilla.

Calidad de aire regional. La condición de conformidad con los estándares de calidad de aire ambiental deberá ser establecida para la región geográfica donde se ubiquen el proyecto o el sitio de interés. Esto significa cumplir o no-cumplir con el *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*, cuyos valores se pueden consultar en la Tabla 4.2 (para USA esta información regional está disponible por EPA, en el sitio www.epa.gov).

Calidad de aire local. Una inspección del entorno inmediato al sitio de interés debe hacerse para estimar la calidad del aire local; es procedente hacerla en el horario pertinente. Se deben detectar olores irritantes, fábricas vecinas, plumas de aire contaminado, fuentes potenciales de contaminación, etc.

Cuando la secuencia recomendada no pueda seguirse, probablemente por limitaciones en la información local, siempre queda la alternativa de realizar un monitoreo con instrumentación propia, o contratar el servicio. El subcapítulo “Instrumentación” orienta sobre los equipos necesarios. Es claro, además, que respecto a la calidad de aire exterior sólo es posible tratar de controlar la contaminación antropogénica, tarea que se realiza en las fuentes. La reglamentación nacional y los procesos al respecto se muestran con detalle en el subcapítulo “Calidad de Aire en Colombia”.

Calidad de aire interior (indoor air quality, IAQ)

Según SMACNA [62], IAQ puede ser definida como las condiciones del aire que tienen que ver con la salud y el bienestar de los ocupantes de un espacio interior. Por su parte, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacionales (OSHA) [63] concibe los “espacios confinados” como aquellos suficientemente grandes, construidos para que unos empleados puedan permanecer mientras realizan una tarea asignada, tienen accesos restringidos y requieren un permiso. Es posible que estos espacios contengan una atmósfera peligrosa, esto es, ambiente que puede exponer los empleados a malestares, incapacitaciones, lesiones, y riesgo de muerte.

Tabla 4.2. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS); traducido de la ref [61]. Niveles admisibles de IAQ.

Contaminante	Estándares Primarios	Tiempos para promedios	Estándares secundarios
Monóxido de carbono	9 ppm (10 mg/ m3)	8-horas ^(a)	ninguno
	35 ppm (40 mg/m3)	1- hora ^(a)	ninguno
Plomo	0.15 µg/ m3	Promedio trimestral	igual al primario
Dióxido de Nitrógeno	100 ppb	1 - hora ^(b)	-
	0.053 ppm (100 µg/ m3)	Anual (media aritmética)	igual al primario
Material particulado (PM ₁₀)	150 µg/ m3	24- horas ^(c)	igual al primario
Material particulado (PM _{2.5})	12 µg/ m3	Anual ^(d) (media aritmética)	15 µg/ m3
	35 µg/ m3	24- horas ^(b)	igual al primario
Ozono	0.075 ppm	8- horas ^(e)	igual al primario
Dióxido de azufre	75 ppb	1 - hora ^(f)	
	-	3 - horas ^(l)	0.5 ppm

(a) no exceder más de una vez por año (b) el promedio tri-anual del percentil 98° de concentraciones (c) no exceder más de una vez por año cada tres años (d) promedio en tres años (e) promedio tri-anual de los 4 valores diarios más altos de los promedios 8-horas de concentraciones de ozono (f) percentil 99° de concentraciones diarias máximas de 1-hora, promediadas en tres años

Esta tabla tiene origen en *National Primary and Secondary Ambient Air Quality Standards, Code of Federal Regulations, Title 40 Part 50 (40 CFR 50)*, modificada en Julio 30/04 y octubre 17/06. U.S. environmental protection agency. www.epa.gov/air/criteria.html

Una publicación muy específica sobre el tema, como la “Indoor Air Quality Guide: Best Practices for Design, Construction, and Commissioning” [64], emitida en conjunto por todas las agencias importantes en el área, afirma que “una buena calidad ambiental en espacios ocupados se alcanza proveyendo aire en el cual no haya contaminantes en concentraciones que puedan ser perjudiciales, ni tampoco condiciones asociables a reclamos por salud o confort; aire con el cual los ocupantes prácticamente no puedan expresar insatisfacción. Esto incluye dos consideraciones simultáneas: niveles de contaminantes y parámetros térmico-ambientales”. Añade que, primero, alta IAQ conlleva más productividad y habitantes más contentos, mejor retorno económico en negocios y altos rendimientos en procesos de enseñanza-aprendizaje, y que, segundo, los problemas IAQ que se salen de las manos significan altísimos costos en tiempo de trabajo perdido, uso parcial de instalaciones, reparaciones, problemas legales y publicidad negativa. El enfoque aquí dado, totalmente congruente con [61], aborda la

solución a problemas IAQ. El subcapítulo “Mejoramiento de IAQ” analiza el tópico.

En general, el primer peligro asociado con los espacios confinados es el de la **deficiencia de oxígeno**. El aire normal contiene 20.8 por ciento de oxígeno por unidad de volumen. El valor mínimo indicado por OSHA es de 19.5 por ciento; OSHA define el nivel máximo de seguridad en 23.5 por ciento. A un nivel de 16 por ciento las personas empiezan a desorientarse y entre 8 y 12% en general pierden el conocimiento. El oxígeno disminuye en un espacio confinado ya sea por desplazamiento o por consumo. El oxígeno es desplazado por la entrada de otras sustancias; el consumo puede ser el resultado de reacciones químicas como oxidación, descomposición, fermentación o incendio de sustancias inflamables.

El siguiente riesgo en línea es la concentración de sustancias dañinas en dosis por encima de su límite permisible de exposición. La OSHA ha establecido normativas en tal sentido y las ha hecho públicas en sus impresos “Occupational Health and Environmental Control” - Subpart G, y “Toxic and Hazardous Substances” - Subpart Z. Añade OSHA que para contaminantes sobre los cuales ella no haya determinado dosis o límites de exposición permisibles se pueden consultar otras fuentes de información, como la publicada en “Material Safety Data Sheets”, que cumple con el “Hazard Communication Standard, section 1910.1200 of this Part”, o documentación interna que puede orientar para establecer condiciones atmosféricas plausibles.

En el mismo sentido —establecer normativas sobre Calidad de Aire Interior Aceptable— se han dado pronunciamientos de prácticamente todas las asociaciones sobre el tema, algunas obligatorias y otras como guía o recomendación [65], [66], [67], [64], [68], [69]. Es claro que “obligatoriedad” es una condición relativa al régimen legal operante en el lugar de interés; por ejemplo, en nuestro caso, el colombiano, opera el marco impuesto por las resoluciones del Ministerio del Medio Ambiente, marco que se expone en detalle en el subcapítulo correspondiente. Pero también es claro que, producto del nivel de desarrollo de ciertos entornos, algunas agremiaciones son líderes evidentes y sus planteamientos son guía obligada. Para comparar las principales normativas (que también podemos contrastar con las nuestras), el estándar ANSI/ASHRAE 62.1-201, anteriormente ponderado, elaboró la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3. Comparación de Normativas
y Guías Pertinentes a Ambientes Interiores [61].**

	Exigibles y/o niveles reglamentarios			Guías no-obligatorias y niveles de referencia			
	NAAQS/EPA (Ref.C4)	OSHA (Ref. C-5)	MAK (Ref. C-2)	Canadian (Ref.C8)	WHO/Europe (Ref.C11)	NIOSH (Ref.C13)	ACGIH (Ref.C1)
CO ₂		5000 ppm	5000 ppm 10000ppm [1h]	3500 ppm [L]		5000 ppm 30,000ppm [15min]	5000 ppm 30,000ppm [15min]
CO		50 ppm			90 ppm[15 min]		25 ppm [30min]
	9 ppm ^g		30 ppm	11 ppm [8 h]	50 ppm[30 min]	35 ppm	
	35 ppm [1 h] ^g		60 ppm [30min]	25 ppm [1 h]	25 ppm [1 h]	200 ppm [C]	
Formal- dehído		0.75 ppm	0.3 ppm	0.1 ppm [L]	0.1 mg/m ³ (0.081 ppm) [30 min] ^p	0.016 ppm	0.3 ppm [C]
		2ppm [15min]	1 ppm ⁱ	0.05 ppm [L] ^b		0.1 ppm [15 min]	
Pb	1.5 µg/m ³ [3months]	0.05 mg/m ³	0.1 mg/m ³ 1 mg/m ³ [30 min]	Minimi- zar expo- sición	0.5 µg/m ³ [1 yr]	0.050 mg/ m ³	0.05 mg/m ³
N ₂ O	0.05 ppm [1 yr]	5 ppm [C]	5 ppm	0.05 ppm	0.1 ppm[1 h]	1 ppm [15 min]	3 ppm 5 ppm [15 min]
			10 ppm [5 min]	0.25 ppm [1 h]	0.02 ppm [1 yr]		
O ₃	0.12 ppm [1 h] ^g	0.1 ppm	j	0.12 ppm [1 h]	0.064 ppm	0.1 ppm [C]	0.05 ppm ^t
	0.08 ppm				(120 µg/m ³) [8 h]		0.08 ppm ⁱ
PM _{2.5}	15 µg/m ³ [1 yr] ^o	5 mg/m ³	1.5 mg/m ³ for <4 µm	0.1 mg/ m ³ [1 h]			3 mg/m ³ [C]
	35 µg/m ³ [24 h] ^o			0.040 mg/ m ³ [L]			
PM ₁₀	150 µg/m ³ [24 h] ^o		4 mg/m ³				10 mg/m ³ [C]
Radón				800 Bq/ m ³ [1 yr]			
SO ₂	0.03 ppm [1 yr]		0.5 ppm	0.38 ppm [5 min]		2 ppm	2 ppm
	0.14 ppm [24 h] ^g	5 ppm	1 ppm i	0.019 ppm	0.048 ppm [24 h]	5 ppm [15 min]	5 ppm [15 min]
TP		15 mg/m ³			0.012 ppm [1yr]		

Números entre paréntesis cuadrados [] se refieren tanto a límites superiores como a tiempos de exposición promedios menores que o mayores que

8h (min = minuto; h = hora; yr = año; C = límite superior, L = largo plazo). Donde no se especifica, el tiempo a promediar es 8h. b) nivel meta es 0.05 ppm por sus potenciales efectos carcinogénicos. Total de aldehídos limitado a 1 ppm. c) Como un ejemplo sobre el uso de valores de esta tabla, los lectores deberían considerar la aplicabilidad de las concentraciones de monóxido de carbono. Las concentraciones consideradas aceptables en ambientes no-industriales son mucho más bajas. Estos valores exigidos se establecen para proteger poblaciones sensibles. d) MMAD = mass median aerodynamic diameter, en micras. Menos que 3.0 μm se considera respirable; menos que 10 μm se considera inhalable. e) PNOC = Partículas molestas no clasificadas de otra manera, sin esperarse que contengan significativas cantidades de asbestos, plomo, sílica cristalina, carcinógenos conocidos, u otras partículas peligrosas. f) (Ver la Tabla B-2 para la directriz U.S. EPA). g) No debe ser excedido más de una vez por año. h) El U.S. Department of Housing and Urban Development adoptó normativas respecto a emisiones de formaldehídos del contrachapado (triplay) y aglomerados, intentando limitar las concentraciones de formaldehído en casas a 0.4 ppm. i) No excederlo nunca. j) Carcinógeno, sin valores máximos establecidos. k) TLV[®] para trabajo pesado. l) TLV[®] para trabajo moderado. m) TLV[®] para trabajo liviano. n) TLV[®] para volúmenes de trabajo pesado, moderado, o liviano (menor o igual a dos horas). o) 62FR38652 - 38760, Julio 16, 1997. p) Estudios epidemiológicos sugieren una relación causal entre exposición a formaldehído y cánceres nasofaríngeo y sino-nasal, pero estas conclusiones están soportadas en un número de casos relativamente bajo.

CONTAMINANTES

Como se mostró en la Figura 4.1, los contaminantes son sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso, componentes indeseables del aire. Son causantes de efectos adversos en la salud humana, los recursos naturales y/o los procesos productivos. Han sido emitidos al aire como resultado de actividades humanas, por causas naturales, o una combinación de estas (Ver Tabla 4.1, Fuentes de contaminantes gaseosos del aire). Los siguientes textos, organizados en forma alfabética, exponen con buena aproximación la naturaleza de los principales contaminantes, sus características y efectos.

CO (Monóxido de carbono) [58], [70], [71], [72], [73]: Gas inflamable, incoloro e insípido que se produce por la combustión incompleta de combustibles fósiles. Se encuentra en el humo expulsado por automóviles y camiones,

candelabros, estufas, fogones de gas y sistemas de calefacción. Como se ve en la Tabla 4.4, es altamente tóxico. Si se respira, aunque sea en moderadas cantidades, puede causar la muerte por envenenamiento al sustituir el oxígeno en la hemoglobina de la sangre. Sus valores LEL/UEL: 12.5% - 74.0%

CO₂ (Dióxido de carbono, Bióxido de carbono, Óxido de carbono, Anhídrido carbónico, Gas carbónico). Gas incoloro, inodoro, vital para la vida en la Tierra [74]. Produce un efecto invernadero (retención de calor) que ocasionó que las temperaturas del planeta fuesen aptas para la vida. Sin ese efecto el planeta sería una bola de nieve. Treinta mil (30000) millones de toneladas de CO₂ arrojamamos cada año los humanos a la atmósfera. La emisión de los volcanes no es ni el 2% de esas 30000 millones de toneladas. Charles David Keeling (1928-2005) fue el descubridor del cambio climático. Las precisas mediciones que realizó desde 1957 muestran que el CO₂ acumulado en nuestra atmósfera es cada vez mayor. Tan solo se produjo un pequeño lapso en estas investigaciones (abril 1964). Sus fuentes de financiación gubernamentales le dijeron que, efectivamente, “has mostrado que el dióxido de carbono atmosférico está aumentando; ahora busca otra investigación interesante que hacer”. Con el apoyo de muchos otros científicos, en mayo de 1964 estaba otra vez recogiendo datos. A finales de los años 50, las primeras mediciones de Keeling señalaban concentraciones de 315 partes por millón. Hoy la cifra supera las 375 partes por millón (2005), cantidad que no se ha visto desde hace 3000 millones de años. Hemos cargado la atmósfera con 400000 millones de toneladas de dióxido de carbono. Los científicos climáticos han obtenido muestras de la Antártida y Groenlandia donde hay aires de épocas anteriores. Las consecuencias inmediatas son un aumento del efecto invernadero y de la temperatura global.

*Tabla 4.4. efectos del monóxido de carbono según concentración.
Resumido de [71], [72], [73].*

Concentración en aire	Efecto del CO
55 mg/m ³ (50 ppm)	TLV-TWA: concentración correspondiente a un día (8h) o una semana (40h) en que se puede estar expuesto sin efectos adversos
0,01 %	Exposición de varias horas sin efecto
0,04-0,05 %	Exposición una hora sin efectos
0,06-0,07 %	Efectos apreciables a la hora
0,12-0,15 %	Efectos peligrosos a la hora
165 mg/m ³ (1500 ppm)	IPVS
0,4 %	Mortal a la hora

Dióxido de azufre: ver SO_2

Dioxinas y furanos [58]: Son compuestos de origen antropogénico, productos de la combustión o subproductos no deseados en diferentes reacciones químicas de procesos industriales. Veintiuno (21) de sus congéneres son clasificados como altamente tóxicos en cantidades pequeñas. Los policlorodibenzo-p-dioxinas (PCDDs) y los policlorodibenzofuranos (PCDFs) son dos familias de hidrocarburos aromáticos halogenados tricíclicos que engloban un total de 210 compuestos, 75 PCDDs y 135 PCDFs, constituidos por dos anillos bencénicos unidos entre sí que poseen entre uno y hasta ocho átomos de cloro como sustitutos de sus enlaces. Estos compuestos son comúnmente conocidos como dioxinas y furanos. Las PCDDs se encuentran unidas por dos átomos de oxígeno, y en el caso de los PCDFs por un átomo de oxígeno y un enlace carbono-carbono, y sus átomos de hidrógeno pueden ser sustituidos hasta por ocho átomos de cloro.

Factor de Equivalencia Tóxica: es el factor que indica el grado de toxicidad de cada uno de los compuestos incluidos en los grupos de Dioxinas y Furanos, comparado con el de la 2,3,7,8 TCDD, al que se le otorga un valor de referencia de 1 por ser la dioxina más tóxica.

Formaldehído (H_2CO): El formaldehído, o metanal, es un compuesto químico, específicamente el más simple de los aldehídos, altamente volátil y muy inflamable. En condiciones normales de presión y temperatura es un gas incoloro, de un olor penetrante, muy soluble en agua y en ésteres. Las disoluciones acuosas al ~40% se conocen con el nombre de formol, que es un líquido incoloro de olor penetrante y sofocante.

HCT (Hidrocarburos Totales): Todos los compuestos carbonados generados en las emisiones de hidrocarburos excepto los carbonatos, carburos metálicos, monóxido de carbono (CO), bióxido de carbono (CO_2), ácido carbónico y aldehídos.

H_2CO : ver formaldehído.

H_2S : Sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico.

Inflamable [71], [75], [76]: Inflamable es, en general, la sustancia que se enciende con facilidad. Es entendido que la combustión necesita, además del combustible, la presencia de oxígeno y una fuente de ignición (chispa,

arco eléctrico, llama, calor, etc.). Para que se produzca fuego o explosión, cuando se trata de un gas o un vapor combustible, es necesario que su concentración respecto al aire no sea muy alta ni muy baja, es decir que esté dentro de un rango. Los valores límites de tal intervalo se conocen con los nombres de Lower explosive limit (LEL) y Upper explosive limit (UEL); en español, Límite Inferior de Explosividad (o Inflamabilidad) y Límite Superior de Explosividad (o Inflamabilidad), respectivamente. LEL= Lower explosive limit = lower flammable limit (LFL) = Límite Inferior de Explosividad: la menor concentración (porcentaje) de un gas (o vapor) en aire, capaz de producir un fogonazo, una llamarada, o una explosión en presencia de una fuente de ignición (chispa, arco eléctrico, llama, calor, etc). El instrumento para medir las concentraciones de este tipo de gas y relacionarlas con estas condiciones de riesgo se llama Explosímetro; el dato que arroja señala la concentración relativa al LEL, siendo el LEL el 100%. UEL = Upper explosive limit = Límite Superior de Explosividad: la más alta concentración (porcentaje) de un gas (o vapor) capaz de producir explosión o combustión en presencia de una fuente de ignición. La Tabla 4.5 muestra LEL/UEL para combustibles corrientes.

**Tabla 4.5. Valores LEL/UEL
para combustibles corrientes [71], [75], [76].**

Sustancia	LEL/LFL en % Por volumen de aire	UEL/UFL en % Por volumen de aire
Acetona	2.6–3	12.8–13
Acetileno	2.5	100
Benceno	1.2	7.8
Butadieno	2.0	12
Butano	1.6	8.4
Alcohol butílico, butanol	1	11
Monóxido de Carbono	12 ^[142]	75
Combustible Diesel	0.6	7.5
Etano	3 ^[142]	12–12.4
Etolanol	3–3.3	19
Gasolina	1.4	7.6
Hexano	1.1	7.5
Hidrógeno	4/18.3 ^[143]	75/59
Isobutano	1.8 ^[5]	9.6
Alcohol Isopropílico, isopropanol	2 ^[5]	12
Metano (gas natural)	5.0	15
Alcohol metílico, metanol	6–6.7 ^[142]	36
Pentano	1.5	7.8
Propano	2.1	9.5–10.1
Propileno	2.0	11.1
Tolueno	1.2–1.27	6.75–7.1

LEL: Lower explosive limit (ver inflamable).

NO₂ (Dióxido de nitrógeno) [58]: Gas de color pardo rojizo, fuertemente tóxico, irritante. Se origina en la combustión a altas temperaturas; sus fuentes más importantes son el tubo de escape de los vehículos (diésel la mayor parte (NILU, 2015) y las plantas de generación eléctrica. Es la causa principal de la formación de ozono troposférico y de aerosoles de nitrato (responsables de la lluvia ácida), y contribuye en forma importante a la concentración ambiente de PM_{2,5} [77] [78]. Afecta principalmente al sistema respiratorio (asma, bronquitis, función pulmonar y mortalidad). El límite anual europeo es 40 microgramos/m³ y en Estados Unidos 100 microgramos/m³.

O₃ (Ozono) [58]: Gas de olor a tierra mojada y generalmente incoloro, pero en grandes concentraciones ligeramente azulado, que se encuentra en la estratosfera, donde protege contra la dañina radiación ultravioleta, y cerca del nivel del suelo en la troposfera, donde afecta la vegetación, la infraestructura y la salud (NILU, 2015). Desinfectante, depurador y purificador de aguas minerales, compuesto extremadamente reactivo, potente oxidante, bastante soluble, por lo que su acción irritante se manifiesta en las vías respiratorias. El límite recomendado de exposición de ozono es de ocho horas a 0,1 ppm, y a corto plazo de 0,03 ppm; para una concentración de 50-30 ppm pocos minutos de exposición pueden ser fatales; seres humanos (soldadores) expuestos a 9 ppm desarrollaron edemas pulmonares. Es un gas que no se emite directamente por fuentes primarias. Se produce a partir de las reacciones fotoquímicas en presencia de radiación solar y precursores tales como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (USEPA, 2015); se consume al reaccionar con NO₂ o ser depositado en el suelo (WHO, 2006) [77]. Las medidas encaminadas a controlar sus niveles se enfocan en las emisiones de sus precursores (WHO, 2006) [77].

Pb (Plomo) [79], [80], [81], [82], [83]: Metal pesado, con excelente resistencia a la corrosión, que rara vez se encuentra en su estado elemental. Es uno de los cuatro metales que tienen mayor efecto dañino sobre la salud humana, ya que se distribuye por el organismo hasta alcanzar el cerebro, el hígado, los riñones y los huesos y se deposita en dientes y huesos, donde se va acumulando con el paso del tiempo. No existe un nivel de exposición al plomo que pueda considerarse seguro.

Debido a la aplicación del plomo en gasolinas, un ciclo no natural tiene lugar: la combustión genera compuestos (cloruros, bromuros, óxidos) que entran en el ambiente; las partículas grandes se precipitan a los suelos y/o

a las aguas, mientras que las pequeñas permanecen en la atmósfera, hasta caer cuando llueve. Entran en el cuerpo humano a través de la comida (65%), el agua (20%) y el aire (15%), pero el mayor peligro proviene de la inhalación de vapor o de polvo.

Actualmente la mayor contaminación por plomo se produce por la atmósfera, pero su contenido está disminuyendo gracias a la prohibición de utilizar gasolina con plomo (hoy por hoy, su utilización solo sigue estando permitida en motores para la aviación y en tres países).

El tetraetilo de plomo se desarrolló en 1921 por Thomas Midgley Jr, quien trabajaba para la General Motors, como un aditivo que mejoraba notablemente el rendimiento de los motores a combustión interna (Midgley también desarrolló los clorofluorocarbonos, CFC). Durante décadas fue empleado en la gasolina a nivel mundial; pero en los años 70 el incremento en el consumo de gasolina con tetraetilo de plomo en las grandes ciudades fue detonante de serios problemas ambientales. Las emisiones de plomo y de otros metales pesados resultantes de la combustión interna de los motores alcanzaron altos niveles de concentración, nocivos para el ambiente y la salud de los seres vivos. Se reportaron numerosos problemas respiratorios, cáncer pulmonar, e incluso la muerte.

Jamie Lincoln Kitman, en *The Secret History of Lead*, relata que “General Motors, Du Pont y Standard Oil (actual Exxon) pusieron plomo —un conocido veneno— en la gasolina, sólo por beneficio económico... desde la virtual desaparición de la gasolina con plomo en USA, el nivel de plomo en la sangre ha declinado en más del 75%. Un estudio EPA de 1985 estimó que, antes de la prohibición, del orden de 5000 estadinenses murieron anualmente por problemas cardíacos causados por el plomo. De acuerdo a un reporte de Government’s Agency for Toxic Substances and Disease Registry para el Congreso, puede estimarse que la contaminación sanguínea de 2 millones de niños fue disminuida hasta el nivel no-tóxico, entre 1970 y 1987, en la medida de que el uso de gasolina con plomo disminuyó. Proyectando, se calcula conservativamente que 68 millones de niños tuvieron exposición tóxica al plomo entre 1927 y 1987”.

PM_# [77], [58], [84]= particulate matter = urban particulate matter = material particulado [ver TSP, PM₁₀, PM_{2.5}]: PM —seguido por un subíndice numérico— es la masa total de las partículas con diámetro aerodinámico menor o igual al subíndice en micras, masa contenida en el aire ambiente y compuesta siempre por una compleja mezcla de varios tamaños. Las partículas generalmente están categorizadas como se muestra en la Figura 4.2. En la mayoría de los ambientes urbanos se encuentran presentes

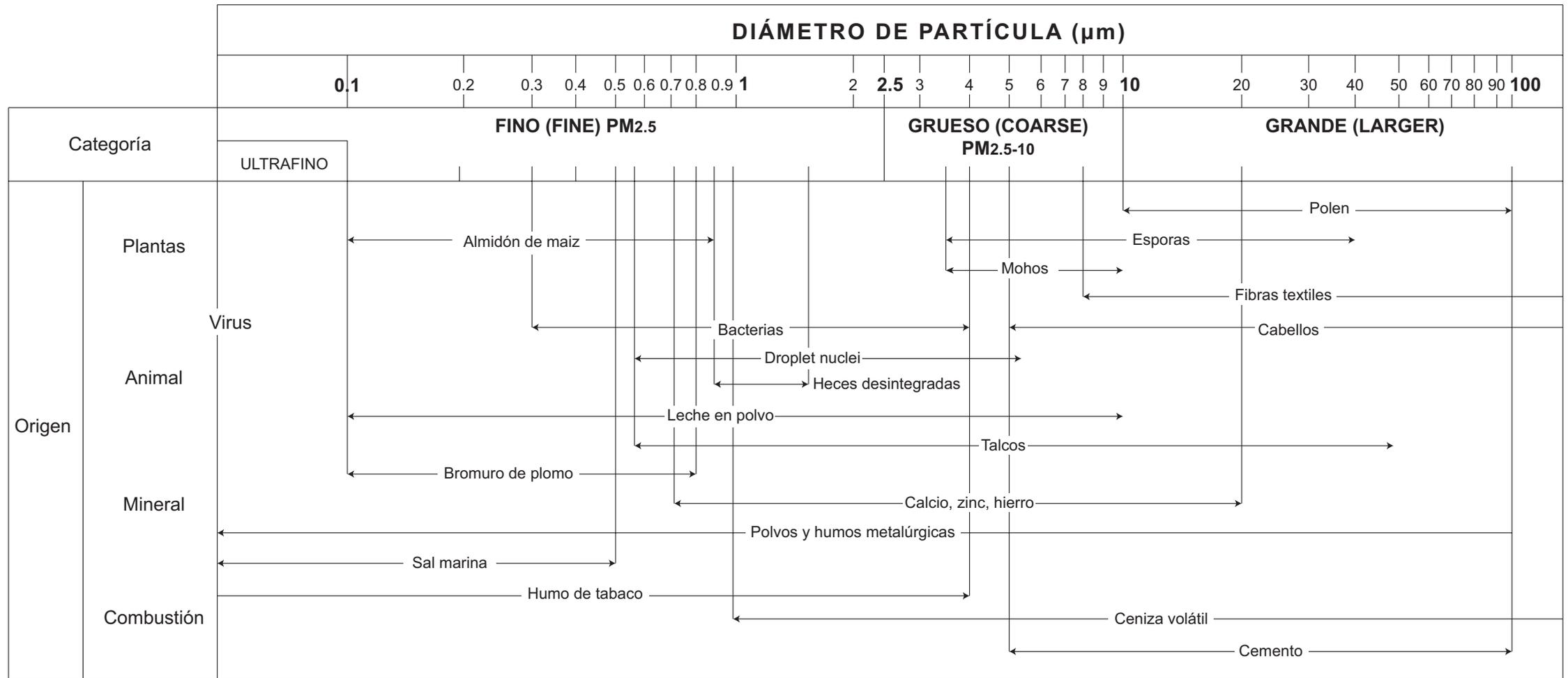


Figura 4.2. Categorías y Tamaños de las Partículas que se Encuentran en el Aire [85], [62].

tanto el material particulado fino como el grueso, pero la proporción relativa de estas dos categorías varía según la geografía local, la meteorología y las características de las fuentes de emisión. Los tamaños de algunas partículas presentes en el aire se muestran en la misma figura.

PM₁₀ (Material Particulado Menor a 10 Micras): Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros nominales, que corresponde a todas las partículas que tienen un tamaño menor a 10 micras; el PM_{2.5} está contenido dentro del PM₁₀. En este grupo están incluidos el polvo, el polen y las esporas de mohos. Las fuentes más importantes de PM₁₀ involucran procesos mecánicos como el desgaste del asfalto y de los neumáticos y los frenos de los carros, actividades de construcción, incendios forestales y algunas actividades industriales [ver PM_#, TSP, PM_{2.5}].

PM_{2.5} (Material Particulado Menor a 2,5 Micras): Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros nominales, que corresponde a todas las partículas que tienen un tamaño menor a 2.5 micras. Esto significa que el PM_{2.5} está contenido dentro del PM₁₀. Dentro de estas pequeñas partículas se incluyen partículas de la combustión, compuestos orgánicos y metales. En cuanto a las fuentes de PM_{2.5} se pueden enumerar los incendios forestales, las emisiones de escape de los vehículos y la industria (WHO - Regional Office for Europe, 2006), [ver PM_#, TSP, PM₁₀]. El Journal of the American Medical Association (JAMA), Vol. 287, No. 9: 1132-1141, en la más seria investigación realizada hasta la fecha, liga hollín diminuto con cáncer pulmonar; estas partículas tan diminutas pueden fácilmente alcanzar los alvéolos, los últimos depósitos del aire en los pulmones y, como los mecanismos de limpieza son allí lentos, los depósitos pueden causar daños graves. Las fuentes principales son motores diésel, exostos de carros, chimeneas de humo industrial, la minería y la construcción. Los investigadores calcularon que el número de muertes por cáncer pulmonar aumentó 8% por cada incremento de 10 microgramos/m³ de particulado fino.

PST (Partículas Suspendedas Totales) = TSP [ver TSP].

Radón [86], [87]: Elemento químico perteneciente al grupo de los gases nobles. En su forma gaseosa es incoloro, inodoro e insípido y es el gas más pesado conocido. Producto de la desintegración del radio, es un elemento altamente radiactivo. El peligro de una alta exposición al radón en las

minas, donde se pueden encontrar exposiciones que alcanzan 1.000.000 Bq/m³, es conocido desde hace mucho tiempo, desde cuando se identificó como causa de una enfermedad degenerativa y se señaló la importancia de la ventilación para evitar este “mal de las montañas”. Además, en una investigación efectuada por Herting y Hesse sobre los mineros de Schneeberg (Alemania) su presencia fue identificada como causante de cáncer de pulmón. En los EE.UU., los estudios y la adopción de medidas de protección solo se llevaron a cabo tras décadas de efectos perniciosos sobre la salud, aunque la presencia de radón en el aire interior de los edificios fue documentada ya en 1950. A partir de 1970 se iniciaron investigaciones para hacer frente a las fuentes de radón interiores, los factores determinantes de la concentración, efectos sobre la salud, y medidas de protección. El problema del radón en el interior de las viviendas tuvo una gran repercusión pública después de un incidente ampliamente difundido en 1984, cuando se encontró un trabajador contaminado con radiactividad, siendo una alta contaminación de radón en su domicilio identificada como la causa responsable. Cuando se inhala las partículas radioactivas se adhieren al tejido pulmonar, y emiten radiación alfa a las células broncopulmonares; la absorción de esta radiación provoca ionizaciones y excitaciones de las estructuras celulares, lo que daña directa e indirectamente el DNA y provoca mutaciones en el tejido pulmonar. En EE.UU se considera al radón la segunda causa de muerte por cáncer de pulmón, después del tabaco. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha publicado varias guías sobre el radón como, por ejemplo, la guía del radón para el comprador y el vendedor de viviendas.

SO₂ (Dióxido de Azufre) [88]: Gas incoloro, irritante, tóxico, no inflamable, que posee un fuerte olor. Es el principal causante de la lluvia ácida, ya que en la atmósfera es transformado en ácido sulfúrico. Se forma en numerosos procesos industriales, pero principalmente proviene de la combustión, pues el azufre presente en el combustible se convierte casi en su totalidad a SO₂ (WHO - Regional Office for Europe, 2006). Sus fuentes principales son las plantas de energía, las refinerías de petróleo y otros grandes complejos industriales (NILU, 2015). En relación con la salud, afecta sobre todo las mucosidades y los pulmones provocando ataques de tos; absorbido principalmente por el sistema nasal, la exposición de altas concentraciones por cortos períodos puede irritar el tracto respiratorio, causar bronquitis y congestionar los conductos bronquiales de los asmáticos. La concentración máxima permitida en los lugares de trabajo es de 2 ppm, y el valor letal es 100 ppm.

SOx: Oxidos de azufre

TSP (Total Suspended Particles) = PST (Partículas Suspensas Totales) [88], [89], [90], [84], [91]. Redefinido por la American Conference for Governmental Industrial Hygienists - ACGIH como “total dust” (polvo total), alude a una regulación arcaica mediante la cual se medía la concentración másica total de material particulado en el aire comunitario. Esto incluía tanto a la fracción inhalable como a las mayores de 10 micras que no se sedimentan en períodos cortos sino que permanecen suspendidas en el aire debido a su tamaño y densidad. Numerosos estudios alrededor del mundo han mostrado vínculos entre los niveles de material particulado en el aire ambiente y la morbilidad y mortalidad de la población; la exposición a PM, tanto en tiempos cortos como largos, está relacionada con índices de mortalidad (NILU, 2015). La OMS plantea que las partículas afectan más la salud de la población que cualquier otro contaminante; sus recomendaciones sobre niveles 24h y anual son, en PM_{10} : 20 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; y en $PM_{2.5}$: 10 y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Es necesario mencionar que las partículas mayores a $10\mu\text{m}$ no están usualmente reconocidas en la legislación sobre salud, pues al poder ser filtradas en la nariz y la garganta hacen que se consideren más un fastidio que una amenaza. En 1987 la EPA revisó el National Ambient Air Quality Standard (NAAQS) para PM, y cambió el índice PM por PM_{10} , condición del PM que penetra en el tórax y causa o exacerba dolencias del tracto respiratorio inferior como bronquitis, asma, neumonía, cáncer y enfisema. Cambiar a un índice más relacionado con la salud estimularía posteriormente estudios que condujeron a mejores estándares en la concentración de finos, como el $PM_{2.5}$ y/o sulfatos, los que mostraron aún mejores relaciones que el PM_{10} . Para 1997, en la siguiente revisión del PM NAAQS la EPA suplementó sus regulaciones sobre PM_{10} con nuevas reglas en $PM_{2.5}$. Es de recalcar que los puntos de corte no se deben asumir como perfectamente nítidos, pues limitaciones de los instrumentos de medición permiten que partículas más grandes que el corte sean capturadas, mientras que partículas más pequeñas no se retengan.

INSTRUMENTACIÓN

En la medida en que la instrumentación para distintos propósitos experimenta cambios asociados con el desarrollo de la electrónica, se visualiza que un inventario de este tipo goza de una vigencia limitada. Por lo anterior, y por el número restringido de proveedores citado, debe tenerse

en cuenta que las orientaciones señaladas aquí deben confrontarse con la oferta comercial actualizada, la cual se puede consultar en la lista de proveedores en el sitio WWW que mantiene la Air and Waste Management Association (www.awma.org).

La fuente principal aquí consultada, traducida y resumida (y complementada) es el review “Web Sites on Air Pollution Instrumentation”, elaborado por Rishi Kumar, Balaji Ramaswamy y el Dr. Ashok Kumar, ahora disponible en la red, en los sitios www.eng.utoledo.edu/~akumar/IAP1/instrumentation.htm y <http://onlinelibrary.wiley.com>, [121]. Hay que estar de acuerdo con esta fuente cuando asegura que en el ordenamiento actual están presentes, cada vez más, requerimientos crecientes, y que el proyecto ambiental de cada planta involucra mediciones de campo para asegurar el cumplimiento de las normativas vigentes. Estas regulaciones varían en mayor o menor medida. Por ejemplo, en USA es obligación tener en cuenta el ámbito local tanto como el estatal, ya sea que se trate de modificaciones menores, permiso para prevención de deterioros significativos (PSD) o reglas para revisión de nuevas macro-fuentes (NSR). Continúan Kumar *et al.* planteando que el primer paso en prácticamente cualquier análisis regulatorio respecto a calidad de aire es definir presencia de contaminantes a través de un inventario certero de fuentes de emisiones; esto determina cuáles normas y cuáles niveles permisibles aplican. Las emisiones son frecuentemente calculadas usando factores de emisión, los que pueden hallarse en varias referencias. La más común es EPA's Compilation of Air Pollutant Emission Factors, también conocida como “AP-42” (visitar el sitio EPA). La gran mayoría de fábricas sujetas a permisos ambientales deben conducir alguna clase de monitoreo para determinar el cumplimiento o el no cumplimiento con los límites vigentes; y también, sigue [57], muchos estatutos requieren monitoreos de aire antes y después de una construcción, o demostración de observancia a través de un modelamiento. En cualquier caso hay que practicar mediciones, y para el propósito existe una oferta de instrumentación para interiores y exteriores. Hay adjunto un listado de referencias que contienen los principios básicos de medición.

Los instrumentos están clasificados en cuatro grupos: medidores de concentración (gases y partículas); sistemas de monitoreo continuo (para chimeneas); dispositivos para medición de aire; y metereológicos. Estos últimos se exponen en el subcapítulo CONDICIONES AMBIENTALES. Las Tablas 46, 47, 48, 49, y 410 resumen la disponibilidad recopilada de instrumental y los posibles proveedores en las tres primeras categorías.

Tabla 4.6. Características de instrumentos para medir concentraciones en IAQ [57].

Medida	Instrumento												
	GASMANII	CEA Series U	UniMax	BC Carbon Di-oxide Detector	MiniVol Portable air sampler	YES-206Falcon	Hydrogen Sulfide monitor	Smart Max II	Gas Sentinel	GASMASTER ATX Series	Chloralert Plus	Safety Area Monitor	AQS 1
Temp.						x							
HR %						x							
TSP					x								x
PM10					x								x
PM2.5					x								x
CO	x	x	x		x	x						x	
CO2				x		x							
H2CO													
Pb													
NOx					x	xx						xx	
O3											x		x
SO2		x	x			x					x	x	
O2	x		x			x		x				x	
H2S	x	x	x			x	x	x				x	
CH4	x												
NH3		x				x					x	x	
CFC's		x											
Cl2			x								x	x	
Rn													
CnHm		x											
C2H4O		x				x							
ClO2			x										
HCN						x						x	
Gases comb.								x					
Extras	otros	low or high ppm; % LEL		Inmediato, si alto %		cambia sensores		Continuo	variedad	otros; muy rápido			PM1

Tabla 4.7. Lista de Proveedores de Instrumentos para Medir Concentraciones en IAQ [57].

Nombre Compañía	Información del contacto
Aacal Auriema Ltd., Inglaterra	http://www.aacal-auriema.co.uk/
Anglo Scientific Instruments, Devon, U.K.	http://www.a-s-i.demon.co.uk/
AquaTronix Inc. , Canadá	aquatronix@followme.com
CEA Instruments Inc., Emerson, NJ	ceainstr@aol.com
Control Instruments Corp., NJ	sales@controlinstruments.com
Control Equipment Limited, Inglaterra	http://www.controlequipment.com/

Nombre Compañía	Información del contacto
GasTech., Newark, CA	http://www.gastech-inc.com/
ISCO Process Monitoring, Lincoln, NE	Tel. 402-474-2233/1-800-228-4373
Levitt Safety, Canadá	Tel: 1-800-668-6155
Norsk Elektro Optikk A/S, Noruega	http://www.neo.no/
Nortech GSI Inc., Canadá	nortech@nortechgsi.com
UniMax or Lumidor safety Products, FL	lunchess@aol.com
Vacu med, Ventura, CA	http://www.vacumed.com/
Willer Engineering Ltd, Canadá	http://www.willereng.com/
Young Environmental Systems Inc., Canadá	info@yestek.com

Las siguientes son imágenes de los instrumentos Extech VPC 300 y FLUKE particle counter (ejemplo de la limitación de las tablas es que estos equipos/proveedores no figuran), Figura 4.3 que, como es visible, corresponde a equipos manuales y con las mismas funciones: hacer mediciones de PM's 0.3; 0.5; 1; 2.5; 5 y 10. Los costos averiguados son US\$1718 y US\$5500, respectivamente.



Figura 4.3. instrumentos Extech VPC 300 y FLUKE particle counter

Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEMS)

Informa [57] que el sitio web (www.icac.com), mantenido por el Institute of Clean Air Companies, provee una lista de proveedores de CEMS; los más importantes se relacionan en la *Tabla 4.8*. Estos sistemas son la forma más confiable y práctica para asegurarse de cumplir estándares y mantener parámetros que redundan en buen ambiente y una operación confiable y económica; un listado se muestra en la *Tabla 4.9*. El costo de estos equipos bajó un 50% en la última década.

Dispositivos para Medición de Aire

Se usan para medir velocidad del aire y caudal o tasa de flujo; generalmente clasificados como velómetros o anemómetros. Existen varios tipos según el principio de funcionamiento empleado, por ejemplo, tubo de Pitot, hilo caliente, turbina. El modelo AM03, de CPS inc., y el Series 440, de Kurz, son ejemplos de equipos manuales útiles en balanceos y pruebas en ventilación, aire acondicionado, etc. EDRA6, de AirFlow Inc., provee inmediatas lecturas de velocidad. La *Tabla 4.10* muestra los principales proveedores.

Tabla 4.8. Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones [57].

		Sistema de monitoreo continuo				
		SEC/MIR 9000	31-C-200	FTIR Air Monitoring System	TESTO 350	Scott Gas Plus-IR Model 4688 IR
		by Unimax	by Baldwin Environmental	by MIDAC Corporation	by Testo Inc.	by Scott
Características	Mide y registra bajo nivel de HCl; SO ₂ ; NO _x ; CO; CO ₂ ...			Mide y registra NO _x ; CO; CFC's	Mide y registra O ₂ ;CO;NO _x ; NO;NO ₂ ;SO ₂ ; Rh; F; fpm; eficiencia; caudal y presión	Para detección de hidrocarburos y dióxido de carbono
	Hasta siete contaminantes simultáneamente	Unidad de control muestreadora computarizada Para uso en sistemas muestreadores para datos en varios métodos ref. EPA	Detección a nivel de ppb(<i>partes por billón</i>) en cientos de químicos	portable	Mide y registra %LEL y v/v en: Butano; Etano; Hexano; Metano; Pentano; Propano; Propileno; Acetona; MEK; Alcohol Isopropílico; Metano Puro; Metanol; Tolueno; Butadieno; Etileno; Etanol; Isobutanol; Hexano; Benceno; Xileno; Dióxido de Carbono	

Tabla 4.9. Lista de Proveedores de Sistemas de Monitoreo Continuo de Emisiones (CEM's) [57].

Nombre compañía	Información del contacto
Advanced Concept and Design Inc., WA	http://www.coliwas.com/
Baldwin Environmental, Nevada	http://www.coliwas.com/
BW Technologies , Canadá	http://www.bwt.net/
Environmental Improvement Tech., AZ	JeffBillings@aristotle.com
Servomex, Norwood, MA	info.servomex.com
UniMax or Lumidor Safety Products, FL	lumchess@aol.com
Acme Engineering Products Inc.	http://www.i-factory.com/acme
Foxboro Environmental	http://www.foxboro.com/emo
Eco Physics, MI	http://ic.net/~ecophys/index.html
Monitor Labs, CO	http://www.monitorlabs.com
Testo Inc.	http://www.testo.com

Tabla 4.10. Lista de Proveedores de Dispositivos para Medición de Aire [57].

Nombre compañía	Información del contacto
Alnor Inc.	www.alnor.com
Dwyer instruments	https://www.dwyer-inst.com
Air Flow Inc	www.airflow.com
CPS Inc., FL	http://www.cpsproducts.com/
Kurz Instruments Inc., CA	http://www.kurz-instruments.com/
Omni Controls Inc., OH	http://www.omnicontrols.com/
RMG Meßtechnik, Germany	www.rmg.de/english.htm
Swoffer Instruments Inc., DC	http://www.swoffer.com/
CAFCO, OH	http://www.cafcoairfilter.com/
Airflow Inc., England	http://www.airflow.com/
Calibrated Instruments Inc., NY	www.ritter.de/usa
Testo Inc.	http://www.testo.co

CALIDAD DE AIRE EN COLOMBIA

De acuerdo con el ordenamiento jurídico nacional, recae en el gobierno la responsabilidad de la preservación del medio ambiente, parte importante de la cual concierne a la calidad del aire. En nuestro país el gobierno está dirigido por un presidente, al cual reportan los distintos ministerios, siendo el Ministerio del Medio Ambiente (Minambiente) el encargado de este trabajo. El IDEAM —Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales— es el organismo adscrito al ministerio que ejerce las tareas sobre el manejo del aire en el territorio nacional.

En el portal oficial correspondiente se plantea que la contaminación ambiental es una alteración física, química y biológica que un medio o un territorio pueden sufrir por la dinámica de medios naturales y/o antrópicos; igualmente, que el control de la contaminación comienza con la generación de datos e información a través de las caracterizaciones de diversos ecosistemas, y se concreta en las políticas públicas tomadas, ejercidas, exigidas y ejecutadas. El esquema general de tales políticas, expresadas en las resoluciones ministeriales, se ilustra en la *Figura 4.4*.

Es visible en el gráfico que los reglamentos se orientan hacia dos campos principales: el correspondiente a la calidad de aire para el ciudadano habitante, y el referente a las condiciones a cumplir por las fuentes generadoras de contaminantes. Las páginas siguientes son *resúmenes* dedicados a mostrar, de manera muy clara y compacta, los detalles y los alcances que los textos de esas normatividades traen. Las resoluciones con prácticamente todo el peso de las definiciones son las 601 de 2006, 909 de 2008, 610 de 2010, 650 de 2010, 2153 de 2010, 2154 de 2010, y 1377 de 2015. El panorama se completa

AÑO	PUBLICACIÓN	CONTENIDO		
		GENERAL	FUENTES FIJAS	OTROS
2006	Resol. 601 modificada x 610-10 9p., 15 art.	Queda casi totalmente sustituida por 610-10		
2007			Norma emisiones admisibles por fuentes fijas	
2008	Resol. 909 modificada x 1377-15 36p., 104 art.		Art 4 T1: Emisiones admisibles por toda industria MP, SO ₂ , NO _x , HF, HCl, HCT, diox/furanos, H ₂ SO ₄ , Pb, Cd, Cu [en mg/m ³ y EQT] Art. 6 T3: contaminantes a monitorear para cada industria [son 40 individuales + 1 genérica], la genérica lista todos T1 + COV, Hg, NH ₃ , H ₂ S, mercaptanos, COT. Art 7/68, T4/34: estandares (cuantificados) emisión admisibles de contaminantes para diversas industrias. Art 69/71 : obligación chimeneas según protocolo anexo 1: definiciones, 4p	
2009				
2010	Resol. 610 modifica a 601-06 8p., 7 art.	Establece la norma calidad aire = niveles máx. para contaminantes Art. 2 T1: niveles máx permisibles según tiempo exposición para PST, PM ₁₀ , PM _{2.5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , CO. Art. 3, T's 2 y 3: niveles máx permisibles por sust. carcinogénicas y para sust. olores ofensivos. 6 y 15 respectivamente. Art. 6, T4: concentración y tiempo de exposición a contaminantes para niveles de prevención, alerta y emergencia. Los de T1 excepto PM _{2.5}		
	Resol. 650 sólo remite a 2153 y 2154 Resol. 651 sólo se remite a 2153 Resol. 760 Resol. 2153 76p., 2 art. Resol. 2154 224p., 2 art., protocolo		Es el protocolo para control - vigilancia contaminación generada por fuentes fijas (manual técnico). Especificaciones técnicas detalladas sobre: 1. Medición emisiones (cumplimiento se verifica por medición directa en chimenea). 2. Estudios emisiones. 3. Monitoreo emisiones (frecuencia). 4. Buenas prácticas ingeniería para chimeneas. 5. Cantidades emisiones. 6. Contingencia por fallas controles. 7. Control emisiones molestas. 8. Pruebas por nuevos contaminantes. Es el protocolo para monitoreo calidad aire y son 2 manuales. MANUAL DISEÑO SVCA(108p): da etapas generales, revisión inicial, fase final y parámetros diseño, criterios por modificaciones recursos necesario, clasificación áreas-fuente, validez monitoreos MANUAL OPERACIÓN SVCA(116p): lineamientos para operar SVCA, sistemas tecnológicos, elementos comunes, control, reportes. Presenta además el indice nacional de calidad de aire, los contaminantes relevantes y forma de evaluarlos.	Crea subsistema de información sobre calidad de aire = SISAIRE administrado por el IDEAM.
2011 a 2014				
2015	Resol. 1377 modifica a 909-08 6p., 7art	Sólo se hace unas adiciones y correcciones.		
2016	INFORME DE LA CALIDAD DE AIRE EN COLOMBIA 2011-2015 195p.			Resultado de monitoreos de 21 SVCA's, contaminantes estudiados PST, PM ₁₀ , PM _{2.5} , O ₃ , NO ₂ , CO, SO ₂ mayores incumplimientos: PM _{2.5} y PM ₁₀ . Se intentó correlaciones PM's con vientos y con infecciones respiratorias.

Figura 4.4. Panorama General del Marco Jurídico Colombiano en Relación a la Calidad del Aire.

con el “Informe de calidad de aire nacional 2011-2015”, el cual supuestamente debe ser balance de la praxis al respecto. También se ilustra acerca del listado de laboratorios locales acreditados por el IDEAM.

RESOLUCIÓN 610 DE 2010 [92][8 págs./ 7 art.]. “Por la que se modifica [y casi la sustituye] la Resolución 601 de 2006 [93] [...] establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión (*cantidad de contaminantes absorbidos por un receptor*), para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.

ARTÍCULO SEGUNDO.- Modificar el Artículo 4 de la Resolución 601 de 2006, el cual quedará así: “Artículo 4. Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes Criterio. En la Tabla 1 se establecen los niveles máximos permisibles a condiciones de referencia para contaminantes criterio, los cuales se calculan con el promedio geométrico para PST *partículas suspendidas totales* y promedio aritmético para los demás contaminantes”.

ARTÍCULO TERCERO.- Modificar el Artículo 5 de la Resolución 601 de 2006, el cual quedara así: “Artículo 5. Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes No Convencionales con Efectos Carcinogénicos y Umbrales para las Principales Sustancias Generadoras de Olores Ofensivos. En la Tabla 2 se establecen los niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos y en la Tabla 3 se establecen los umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos”.

Tabla 1. Niveles máximos permisibles para contaminantes.

Contaminante	Nivel Máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PST	100	anual
	300	24 horas
PM10	50	anual
	100	24 horas
PM2.5	25	anual
	50	24 horas
SO2	80	anual
	250	24 horas
	750	3 horas
NO2	100	anual
	150	24 horas
	200	1 hora
O3	80	8 horas
	120	1 hora
CO	10.000	8 horas
	40.000	1 hora

Tabla 2. Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos.

Contaminante No Convencional	Nivel Máximo Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
Benceno	5	anual
Plomo y sus compuestos	0.5	anual
	1.5	24 horas
Cadmio	5×10^{-3}	Anual
Mercurio inorgánico (vapores)	1	anual
	260	1 semana
Tolueno	1000	30 minutos
Vanadio	1	24 horas

Tabla 3. Umbrales para sustancias generadoras de olores ofensivos

Contaminante	Umbral ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Acetaldehído ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$)	380
Ácido Butírico ($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)	4.0
Amoniacó (NH_3)	35.0
Clorofenol ($\text{C}_6\text{H}_5\text{ClO}$)	0.1
Dicloruro de azufre (SCl_2)	4.2
Etil mercaptano ($\text{C}_2\text{H}_5\text{SH}$)	0.5
Etil acrilato ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$)	2.0
Estireno (C_8H_8)	200
Monometil amina (CH_5N)	27.0
Metil mercaptano (CH_3SH)	4.0
Nitrobenceno ($\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$)	24.0
Propil mercaptano ($\text{C}_3\text{H}_7\text{S}$)	22.0
Butil mercaptano ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{S}$)	3.0
Sulfuro de dimetilo ($\text{C}_2\text{H}_6\text{S}$)	5.0
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	7.0

ARTÍCULO CUARTO.- Modificar el Artículo 6 de la Resolución 601 de 2006, el cual quedará así: “Artículo 6. Procedimientos de Medición de la Calidad del Aire: El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo

Territorial **adoptará** a nivel nacional el *Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire*, **el cual será elaborado** por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) dentro de los seis (6) meses siguientes a la publicación de la presente resolución. Dicho protocolo contendrá las especificaciones generales para la ubicación y el diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire... Parágrafo Tercero: **Mientras [tanto]** el IDEAM adopta los métodos de medición de contaminantes señalados en el parágrafo anterior, **se seguirán los métodos** establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA)...¹ [Ver la Resolución del Ministerio de Ambiente 650 de 2010 y luego la 2154].

ARTÍCULO QUINTO.- Modificar el Artículo 8 de la Resolución 601 de 2006, el cual quedará así: “Artículo 8. Mediciones de Calidad del Aire por las Autoridades Ambientales. Las autoridades ambientales competentes están obligadas a realizar mediciones de calidad del aire [...]”

ARTÍCULO SEXTO.- Modificar el Artículo 10 de la Resolución 601 de 2006, el cual quedará así: “Artículo 10. Declaración de los Niveles de Prevención, Alerta y Emergencia por Contaminación del Aire. La concentración a condiciones de referencia y el tiempo de exposición bajo los cuales se debe declarar por parte de las autoridades ambientales competentes los estados excepcionales de Prevención, Alerta y Emergencia, se establecen en la Tabla 4”

RESOLUCIÓN 909 DE 2008 [94] [36 págs./104 art.]. Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas...(modificada por la resolución 1377 de 2015, en muy pequeña medida).

Tabla 4. Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia.

Contaminante	Tiempo de Exposición (hrs)	Estados Excepcionales		
		Prevención (µg/m ³)	Alerta (µg/m ³)	Emergencia (µg/m ³)
PST,PM ₁₀ ,SO ₂ ,NO ₂ , O ₃ ,CO	24,24,24,1,1,8	375,300,500,400, 350,17.000	625,400,1000, 800,700,34.000	875,500,1.600,2.000, 1.000,46.000

1 El resaltado es nuestro. Enfatízase el hecho de que se orienta hacia una normatividad extranjera.

[...] ARTÍCULOS 2/3. [...] establece las normas y los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas, adopta los procedimientos de medición de emisiones para fuentes fijas y reglamenta los convenios de reconversión a tecnologías limpias [...] estas disposiciones se establecen para todas las actividades industriales, los equipos de combustión externa, instalaciones de incineración y hornos crematorios [...] y en el control de emisiones molestas, aplica además a todos los establecimientos de comercio y de servicio.

[...]

ARTÍCULO 4

[...]

Tabla 1. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para actividades industriales a condiciones de referencia (25 °C y 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 11%. [Aplica para las actividades industriales definidas en el Artículo 6].

Contaminante	Flujo del contaminante (kg/h)	Estándares de emisión admisibles de contaminantes (mg/m ³)	
		Actividades industriales existentes	Actividades industriales nuevas
Material Particulado (MP)	≤ 0,5	250	150
	> 0,5	150	50
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Todos	550	550
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	Todos	500	500
Compuestos de Flúor Inorgánico (HF)	Todos	8	
Compuestos de Cloro Inorgánico (HCl)	Todos	40	
Hidrocarburos Totales (HCT)	Todos	50	
Dioxinas y Furanos	Todos	0,5*	
Neblina Ácida o Trióxido de Azufre expresados como H ₂ SO ₄	Todos	150	
Plomo (Pb)	Todos	1	
Cadmio (Cd) y sus compuestos	Todos	1	
Cobre (Cu) y sus compuestos	Todos	8	

*Las Dioxinas y Furanos se expresan en las sig. unidades: (ng-EQT / m³), EQT: Equivalencia de Toxicidad

Parágrafos 1 a 6: Producción de pigmentos inorgánicos a base de caolín, carbonato de sodio y azufre, tendrán límite de emisión admisible de SO₂ de 2000 mg/m³ y el oxígeno de referencia será del 18%; producción de ácido sulfúrico y de azufre tendrán límite de SO₂ de 1600 mg/m³ (instalaciones existentes) y 900 mg/m³ (nuevas); producción de caprolactama tendrá un límite para SO₂ de 1600 mg/m³ y para NO_x de 1000 mg/m³; fabricación de

vidrio tendrá límite para SO_2 de 700 mg/m^3 y para NO_x de 1000 mg/m^3 ; generación eléctrica con motores de combustión interna $\geq 1 \text{ MW}$ límite MP de 50 mg/m^3 , para SO_2 de 400 mg/m^3 y para NO_x de 300 mg/m^3 ; corrección por oxígeno de referencia aplica únicamente a los procesos con combustión.

ARTÍCULO 5. Factores de equivalencia para dioxinas y furanos. Las actividades industriales a las cuales les corresponda realizar la medición de dioxinas y furanos deben utilizar los factores de equivalencia (Tabla 2) [la tabla 2 trae 5 grupos][...]

ARTÍCULO 6. Actividades industriales y contaminantes a monitorear por actividad industrial. En la Tabla 3 se establecen las actividades industriales y los contaminantes que cada una de las actividades industriales debe monitorear.

Tabla 3. Actividades industriales y contaminantes a monitorear por actividad industrial.

Actividad industrial	Procesos e instalaciones	Contaminantes
Producción de ácido nítrico	Cualquier instalación que produzca ácido nítrico débil por el proceso de presión o de presión atmosférica (con excepción de los procesos en los que se obtenga ácido nítrico con concentración superior al 70%, por medio de destilación).	NO_x
Producción de ácido sulfúrico	Cualquier instalación que produzca ácido sulfúrico por el proceso de contacto por medio del quemado de azufre elemental, ácido de alquilación...etc.	SO_2 Neblina ácida o trióxido de azufre
Producción de ácido clorhídrico	[...]donde se produzca ácido clorhídrico, incluidos los sistemas de ventilación, tanques [...] etc.	HCl
Producción de llantas y cámaras de caucho natural y sintético	Cualquier operación de cementado por debajo de la banda de rodamiento, por el costado, por la banda de rodamiento o en el sellante de la llanta y cada operación de rociado a llantas sin curar.	MP SO_2 NO_x HCT
Son cuarenta actividades industriales diferenciadas más una última genérica [...]		
Otras actividades industriales	Procesos e instalaciones que generen emisiones contaminantes a la atmósfera.	MP, SO_2 , NO_x , HF, HCl, HCT, Dioxinas y Furanos, Neblinas ácida o trióxido de azufre, COV, Pb, Cd, Cu, CO, Hg, Amoníaco (NH_3), Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) y mercaptanos, Carbono Orgánico Total (COT)

[...]Parágrafos: [...]Cuando una actividad industrial cuente adicionalmente con equipos de combustión externa con calentamiento directo o indirecto, debe cumplir con los estándares del Artículo 7[...]

La segunda parte de la Resolución 909 se condensa en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Resumen 2ª parte resolución 909 de 2008 [94]

Instalación [E]=existente [N]=nuevo/a	Combustible	Flujo contaminante (kg/h)	Estándares de emisión admisibles (mg/m³) – fuentes fijas													Temp. admisible (°C)	O ₂ ref	
			MP	SO ₂	NO _x	CO	COT	HCl	HF	Hg	HC _T	ng- TEQ/m ³	NH ₃	H ₂ S	Mer cap tanos (ppm)			
Equipos combustión externa [E] T4	Sólido		200	500	350													
	Líquido		200	500	350													
	Gaseoso		NA	NA	350													
Equipos combustión externa [N] T5	Sólido		50	500	350													
	Líquido		50	500	350													
	Gaseoso		NA	NA	350													
Centrales térmicas [E] >20 MW T6	Sólido		100	2800	760													6%
	Líquido		100	2000	650													3%
	Gaseoso		NA	NA	300													3%
Centrales térmicas [N] >20 MW T7	Sólido		50	2000	600													6%
	Líquido		50	2000	450													3%
	Gaseoso		NA	NA	300													3%
centrales térmicas con turbinas a gas [E, N] >20 MW T8	Gaseoso		NA	NA	120													
	Líquido		NA	850	300													
Centrales térmicas <20MW, plantas cogene- ración, calderas>25t/h[E] T9, art7	Sólido		100	2800	760													6%
	Líquido		100	2000	650													3%
	Gaseoso		NA	NA	300													3%
Centrales térmicas <20MW, plantas cogene- ración, calderas>25t/h[N] T10,art8	Sólido		50	2000	600													6%
	Líquido		50	2000	450													3%
	Gaseoso		NA	NA	300													3%
Centrales térmicas con turbinas a gas [E, N] <20 MW T11	Gaseoso		NA	NA	120													
	Líquido		NA	850	300													

Continúa

Instalación [E]=existente [N]=nuevo/a	Combustible	Flujo contaminante (kg/h) MP	Estándares de emisión admisibles (mg/m ³) – fuentes fijas												Temp. admisible (°C)	
			SO ₂	NO _x	CO	COT	HCl	HF	Hg	HC _T	ng- TEQ /m ³	NH ₃	H ₂ S	Mer cap tanos (ppm)		
Fabricación de productos textiles [E] T12	Gas natural	Todos	NA	NA	550											
Otros	Todos	250	550	550												
Fabricación de productos textiles [N] T13	Gas natural	Todos	NA	NA	350											
otros	Todos	50	500	350												
Equipos/combustión externa E] T14	biomasa		300		350											
Equipos/combustión externa[N] T15	biomasa		50		350											
Refinación del petróleo [E] T16	Sólido		170	2800	760											
Líquido		170	2000	650												
Gaseoso		NA	NA	300												
Refinación del petróleo [N] T17	Sólido		50	1700	600											
Líquido		50	1700	450												
Gaseoso		NA	NA	300												
Instalaciones mineras [E] T18		< 0.5	250													
	> 0.5	150														
Instalaciones mineras [N] T19		< 0.5	100													
	> 0.5	50														
Hornos cementeros [E] T20	Procesos húmedo y seco		150	550	800											

Continúa

Instalación [E]=existente [N]=nuevo/a	Combustible	Flujo contaminante (kg/h)	Estándares de emisión admisibles (mg/m ³) - fuentes fijas													Temperatura admisible (°C)		
			MP	SO ₂	NO _x	CO	COT	HCl	HF	Hg	HC _T	ng- TEQ /m ³	NH ₃	H ₂ S (ppm)	Mer cap tanos (ppm)			
Secador materias primas [E] T20			150	550	550													
Hornos cementeros [N] T21			50	500	600													
Secador materias primas [N] T21			50	500	500													
Plantas cementeras y producción de concreto sin combustión [E] T22		< 0.5	250															
		> 0.5	150															
Plantas cementeras y producción de concreto sin combustión[N] T23		< 0.5	150															
		> 0.5	50															
Fabricación productos cerámica refractaria/no refractaria/arcilla[E] T24/T26/art. 33	Sólido		250	550	550			40	8									hornos continuos <180 °C; discon- tinuos <250 °C; si no hay Cl,HCl,HF <400 °C
	Líquido		250	550	550			40	8									
	gaseoso		NA	NA	550			40	8									
Fabricación productos cerámica refractaria/no refractaria/arcilla[N] T25/T26/art. 33; res1377, art. 2	Sólido		50	500	500			40	8									
	Líquido		50	500	500			40	8									
	Gaseoso		NA	NA	500			40	8									
Tratamiento térmico subproductos de animales T27/arts. 36, 39			50										35		5		Poscomb:760 °C/.5s; T _{sal} <250 °C	

Continúa

Instalación [E]=existente [N]=nuevo/a	Promedio	Estándares de emisión admisibles (mg/m3) – fuentes fijas														Temperatura admisible (°C)		
		MP	SO ₂	NOx	CO	COT	HCl	HF	Hg	HC _T	ng- TEQ / m ³	Cd + Tl	Metales = As+P- b+Cr+ Co+Ni+- V+Cu+Mn+S- b+Sn	Tiempo retención	Benzopir. Dibenzo antraceno (µg/m ³)			
Incineración residuos/de sechos peligrosos T28/ T29/ T31/T32 arts. 44, 50, 53	> 500 kg/h	Diario	10	50	200	50		10	1	0.03	10							T _{comb} >850 T _{pos-comb} >1200
		Horario	20	200	400	100		40	4	0.05	20							
	< 500 kg/h	Diario	15	50	200	50		15	1	0.05	10							T _{comb} >800 T _{pos-comb} >1100
		Horario	30	200	400	100		60	4	0.1	20		0.05	0.5	Cámara postcom- bustión >2s		T _{comb} >750 T _{pos-comb} >1000	
> 600 kg/ mes	Diario	NA	75	250	100		30	3	0.1	30							T _{comb} >750 T _{pos-comb} >1000	
	Horario	80	250	500	200		80	8	0.2	50		2[E] 1[N]					T _{salida} <250	
Hornos cementeros con coprocesamiento residuos/desechos peligrosos T30/ T31/ T32/ art46,47,50,53	Diario	50	500	550		10	10	1	0.05		0.1	0.05	0.5	4s			T _{ingreso} >1100 T _{quemadorppal} >1800 T _{salida} <250	
Incineración residuos no peligrosos art54,57/T33	> 500 kg/h	Diario	10	50	200	50					10							
		Horario	20	200	400	100	10	10	1	0.05	20	0.1	0.05	0.5	Cámara postcom- bustión >2s		T _{comb} >800 T _{pos-comb} >1200	
	< 500 kg/h	Diario	15	50	200	50					10							T _{salida gases pos-comb} <250
		Horario	30	200	400	100					20							
Hornos crematorios art62, 63, 65/T34	Diario	NA			75						15			cámara postcom- bustión >2s			T _{comb} >750 T _{pos-comb} >900	
	Horario	50		150							30				100		T _{salida gases} <250	

T's 4/5/12/13/20/21/29/30/31/32/33/34/art65.....Estándares de emisión admisibles para equipos de combustión externa existentes a condiciones de referencia (25° C, 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 11%.

T's 6/7/9/10/16/17/18/19/22/23/art50/art57 condiciones de referencia (25° C, 760 mm Hg)

T's 8/11/ a condiciones de referencia (25° C, 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 15%.

T's 14/15/ a condiciones de referencia (25° C, 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 13%

T's 24/25/26/. a condiciones de referencia (25° C, 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 18%.

T's 27/ a condiciones de referencia (25° C, 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 6%.

ARTÍCULOS 69/70/71. Obligatoriedad de construcción de un ducto o chimenea. Toda actividad que realice descargas de contaminantes a la atmósfera debe contar con un ducto o chimenea cuya altura y ubicación favorezca la dispersión de éstos al aire, cumpliendo con los estándares de emisión que le son aplicables[...], [...]La altura de la chimenea, diámetro, localización de muestreos, etc., se determinarán con base en las estructuras cercanas y de acuerdo al “Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas” (Resolución 2153 de 2010, Capítulo 4º, Determinación Altura Descarga / Buenas Prácticas de Ingeniería).

[...]

CAPÍTULO XIX: SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIONES

[...]

CAPÍTULO XX: CONVENIOS DE RECONVERSIÓN A TECNOLOGÍAS LIMPIAS

[...]

ARTÍCULO 92. Procesos de combustión utilizando biomasa[...] industrias que utilicen biomasa como combustible [...]cumpliendo con [...] Artículo 94[...] deben realizar la corrección por oxígeno al 13% y no les aplicará los estándares de emisión admisibles para SO₂[...] Parágrafo: [...]deben controlar[...] porcentaje en peso de humedad de la biomasa, temperatura de los gases de chimenea, poder calorífico de la biomasa (en base seca) y porcentaje en volumen de exceso de oxígeno en los gases de chimenea.

ARTÍCULO 93. Procesos de combustión utilizando aceite usado. [...]por Resolución 415 de 1998 y la Resolución 1446 del 2005 ...debe cumplir con los estándares de emisión admisibles para Cadmio y Plomo establecidos en la Tabla 1[...] adicional a estándares de emisión admisibles establecidos [...]para la respectiva actividad industrial o equipo de combustión externa.

ARTÍCULO 95. Registro Único Ambiental. Están obligados a diligenciar el Registro Único Ambiental – RUA todos los establecimientos, cuyas actividades o equipos [...]

ARTÍCULO 97. Origen del carbón. [...]los que utilicen carbón como combustible, deben garantizar la legal procedencia del mismo, llevando el registro de consumo de combustibles (artículo 2 de la Resolución 623 de 1998)[...] las autorizaciones mineras de explotación, la licencia o plan de manejo ambiental, los permisos de uso, aprovechamiento o afectación de recursos naturales y los registros de compra.

ARTÍCULO 99. Competencia. Las Corporaciones Autónomas Regionales, las de Desarrollo Sostenible y las Autoridades Ambientales a que se refiere el artículo 66 de la Ley 99 de 1993, y el artículo 13 de la Ley 768 de

2002, ejercerán las funciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de acuerdo a lo dispuesto en la presente Resolución [...]

[...] ARTÍCULO 102. Transitorio. Residuos permitidos mediante tratamiento térmico en instalaciones de incineración de residuos y/o desechos peligrosos y hornos cementeros que realicen coprocesamiento... lista de 9 más los demás que el Ministerio de Medio Ambiente establezca, con base en los estudios técnicos que indiquen la necesidad de controlar otras emisiones.

RESOLUCIÓN NÚMERO 1377 DE 2015 [95]_(6 págs, 7 arts.) modifica la Resolución 909 de 2008

A la Resol. 909 solo adiciona los arts. 33, art. 60 (nueva T 33A estándares adicionales), y art. 60A; a la Resol. 760 de 2010 adiciona al numeral 3.1.3; y finalmente normatiza sistemas de gasificación y plasma para tratamiento de residuos.

RESOLUCIÓN 651 DE 2010 (Mar. 29, 3 págs., 7 arts.) [...] “Por la cual se crea el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire - SISAIRES”. El SISAIRES, administrado por el IDEAM, es la principal fuente de información para el diseño, evaluación y ajuste de las políticas y estrategias nacionales y regionales de prevención y control de la calidad del aire; las corporaciones y autoridades están obligadas a reportarle la información de calidad del aire, meteorológica y de ruido. Es un sistema bajo ambiente Web que permite la captura y revisión constante de los datos. El SISAIRES permite: 1) Recolectar información de las variables meteorológicas y de calidad del aire, facilitando la disponibilidad y la calidad de la información ambiental que se requiera por parte del ministerio para el desarrollo sostenible del país. 2) Facilitar el acceso y consulta de la información a los ciudadanos y las instituciones encargadas de la investigación en el tema ambiental.

RESOLUCIÓN 650 DE 2010 [96] (MARZO 29; 1 pág., 2 arts.). Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire” [...] dice que el **protocolo está compuesto por dos manuales: el de diseño y el de operación de SVCA** (Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire), no incluidos aquí [Estos manuales están incluidos en las Resol. 2153 y Resol. 2154].

RESOLUCIÓN NÚMERO 2153 DE 2010 [97] (Noviembre 2; 76 págs: 2 artículos y el protocolo). Por la cual se **ajusta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas**, [...] El Protocolo es parte integral de la resolución, y es el documento

con las descripciones técnicas detalladas de procedimientos de medición de emisiones, los cuidados a tener en cada caso particular, sus especificaciones técnicas, las formas aceptables de monitoreo, las indicaciones y los datos necesarios en cálculos y balances, instalaciones y equipo necesario, incertidumbre, ambientales, bibliografía, [...] luego es el **MANUAL DE OPERACIÓN DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE** que “explica los procedimientos para operar un SVCA”.

Contenido

1. **PROCEDIMIENTOS DE MEDICIÓN DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS** ([...] en cada contaminante el cumplimiento del estándar se verifica mediante medición directa de las emisiones en chimenea [...]) Para practicar esas mediciones se adoptaron los métodos del Código Federal de Regulaciones de los Estados Unidos (CFR) T's1/2/3 [...]).
2. **ESTUDIOS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS** (requeridos para establecer cumplimientos y eventual control, y para diagnósticos globales; se especifica detalladamente la forma de presentación, contenidos, anexos [...]).
3. **MONITOREO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS** (frecuencia con la cual se deberán realizar los estudios de evaluación de emisiones atmosféricas por parte de las fuentes fijas según artículo 91 de la Resolución 909 [...] T's 4/5/6/7/8/9).
4. **DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE DESCARGA. APLICACIÓN DE BUENAS PRÁCTICAS DE INGENIERÍA** (se exponen las “Buenas Prácticas de Ingeniería” para determinación de la altura de la chimenea,.. involucrando las condiciones del entorno: dimensiones estructuras propia y cercanas, la dirección del viento, influencia que pueden tener las estructuras cercanas en la dispersión [...], etc.).
5. **SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS** (se presentan los requerimientos de funcionamiento de algunos sistemas de control de emisiones atmosféricas: ciclones, precipitadores electrostáticos, quemadores de gases, incineradores, lavadores húmedo y Venturi, oxidación térmica y catalítica, carbón activado, etc.).
6. **PLAN DE CONTINGENCIA DE LOS SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS** (generales sobre requisitos de los planes contingencia cuando salen de servicio los sistemas de control).
7. **DISPOSITIVOS PARA EL CONTROL DE EMISIONES MOLESTAS** (se listan algunos sistemas de control de emisiones molestas y las variables de operación que se deben controlar para su adecuado funcionamiento).

8. PRUEBA DE QUEMADO PARA INSTALACIONES DONDE SE REALICE TRATAMIENTO TÉRMICO DE RESIDUOS PELIGROSOS (incinerador deberá realizar una prueba de quemado si desea incluir un residuo nuevo; se dan indicaciones del proceso).

Tabla 1. Métodos evaluación emisiones contaminantes.

Método	Descripción
1/1a-2/2h caudal	Determinación punto muestreo, velocidad, caudal...
3/3c	Análisis gases y concentraciones: O ₂ ,CO ₂ , CH ₄ , N ₂
4	Determinación contenido humedad gases chimenea
5/5i	Determinación emisiones material particulado
6/6c	Determinación SO ₂
7/7e	Determinación NOx
8	Determinación H ₂ SO ₄ , SO ₂
9	Determinación opacidad
10/10b	Determinación CO
11	Determinación H ₂ S
12	Determinación Pb
13/13b-14/14a	Determinación fluoruros
15/15a-16/16b	Determinación comp. azufre
17	Determinación MP
18	Determinación comp. orgánicos
19/20	Determinación SO ₂ , mat. particulado, NOx
21	Determinación orgánicos volátiles
22	Determinación emisiones fugitivas fuentes material/humos
23	Determinación dioxinas/furanos en incineradores
24/24a	Determinación material volátil/agua/densidad/sólidos en recubrimientos/rotograbado
25/25e	Determinación emisiones gaseosas orgánicas
26/26a	Determinación haluros/halógenos
29	Determinación metales

Los métodos de mediciones directas la tabla anterior serán los publicados por el

IDEAM. Si no está publicado por el IDEAM, se deberá utilizar el aprobado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos US-EPA.

Tabla 2. Matriz de análisis de contaminantes [son consideraciones técnicas que deben observarse para la toma de muestras directamente relacionadas con el contaminante: por ejemplo, tiempo mínimo, volumen mínimo, etc.].

Actividad	Contaminante	Método monitoreo	T_{min}, v_{min} y otros
Producc. ácido nítrico	NOx	Refs. 1,2,3,4 y 7 Alternat. 3A [...]	60 min; caudal método 7c
Producc. ácido sulfurico	SO ₂ , H ₂ SO ₄	Refs. 1,2,3 y 8 Alter [...]	
Producc. ácido clorhidrico	HCl	Etc [...]	
Producc. Llantas	MP,SO ₂ ,NOx,HC		
Producc. Asfalto	MP,SO ₂ ,NOx		
Fundición acero	MP,SO ₂ ,NOx,diox		
[...] son 48 actividades	[...]		

TABLA 3. Instalaciones mínimas para la realización de mediciones directas (con esquemas).

[...]

Tabla 4. Frecuencias de monitoreo de contaminantes para todas las instalaciones de incineración de residuos y/o desechos peligrosos y para todas las instalaciones donde se realice tratamiento térmico a residuos no peligrosos.

Contaminantes	Frecuencias de monitoreo
MP, SO ₂ , NOx, CO	Continuo; registro cada 5 minutos
HCT como CH ₄ , HCl, HF, Cd+Tl, metales, Hg	Cada 6 meses
Metales = As+Pb+Cr+ Co+Ni+V+Cu+Mn+Sb+Sn	

Tabla 5. Frecuencias de monitoreo de contaminantes para hornos de incineración en hospitales y municipios categorías 5 y 6 con capacidad igual o inferior a 600 kg/mes.

Contaminantes	Frecuencias de monitoreo
MP, SO ₂ , NOx, CO	Cada 6 meses
HCT como CH ₄ , HCl, HF	Cada año
Hg	Cada año
Cd+Tl, metales	Cada año
Metales = As+Pb+Cr+ Co+Ni+V+Cu+Mn+Sb+Sn	

Tabla 6. Frecuencias de monitoreo de contaminantes para hornos cementeros que realicen coprocesamiento de residuos y/o desechos peligrosos.

Contaminantes	Frecuencias de monitoreo
MP, SO ₂ , NOx, HCl, HF	Continuo; registro cada 5 minutos
Hg, Cd+Tl, metales	Cada 6 meses
COT	Cada 6 meses
metales = As+Pb+Cr+ Co+Ni+V+Cu+Mn+Sb+Sn	

Tabla 7. Frecuencias de monitoreo de contaminantes para hornos crematorios.

Contaminantes	Frecuencias de monitoreo
MP	Cada 6 meses
CO	Continuo; registro cada 5 minutos
HCT como CH ₄	Cada 6 meses
Benzopireno + dibenzoantraceno	Cada 6 meses

Tabla 8. Frecuencias de monitoreo de dioxinas y furanos en instalaciones nuevas donde se realice tratamiento térmico de residuos y/o desechos peligrosos y hornos cementeros que realicen coprocesamiento tanto nuevos como existentes.

Frecuencias de monitoreo	
Instalaciones nuevas donde se realice tratamiento térmico de residuos y/o desechos peligrosos	Cada 8 meses
Incineradores de hospitales capacidad < 600 kg/mes	Dioxinas y furanos en 1er año; luego cada 2 años
Hornos cementeros que realicen coprocesamiento tanto nuevos como existentes	Cada año

Tabla 9.. Frecuencia de monitoreo contaminantes de acuerdo con la Unidad de Contaminación Atmosférica.

UCA	Grado de significancia del aporte contaminante	Frecuencia de monitoreo (años)
<0.25	Muy bajo	3
>0.25 y <0.5	Bajo	2
>0.5 y <1.0	Medio	1
>1.0 y <2.0	Alto	0.5
>2.0	Muy alto	0.25

[...] 3.5.1. Condiciones para la solicitud de monitoreo continuo de emisiones

[...] deben realizar monitoreo continuo de sus emisiones... los que cumplan [...] alguna de las siguientes condiciones:

- La actividad desarrollada corresponde al tratamiento térmico de residuos y/o desechos peligrosos, no peligrosos u horno crematorio [...]
- Las emisiones generadas por la actividad incrementan en más de un 40% la concentración de algún contaminante en el aire [...]
- La actividad que genera la emisión de los contaminantes es la única ubicada dentro del área comprendida entre la ubicación de la fuente y 0,8 km en todas las direcciones y además [...] PM10 no exceda 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [...] y NO_x no exceda 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [...] y SO₂ no exceda 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [...] y Pb no exceda 0,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [...] y Cd no exceda 5 x 10⁻³ $\mu\text{g}/\text{m}^3$

RESOLUCIÓN NÚMERO 2154 DE 2010 [98]_(Noviembre 2; 224 págs.: 2 artículos y el protocolo). Por la cual se ajusta el **Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire** adoptado a través de Resolución 650 de 2010 [...] El Protocolo es parte integral de la resolución, y son 2 (dos) manuales: el “**MANUAL DE DISEÑO DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DE AIRE SVCA...**” y el “**MANUAL DE OPERACIÓN DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DE AIRE SVCA [...]**” [...]

MANUAL DE DISEÑO DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DE AIRE SVCA (108 PÁGS.)

1. INTRODUCCION (1pág.)[...] se dan las etapas generales, la revisión inicial, la fase final del montaje, operación y seguimiento. Además relata sobre clasificación de áreas-fuente de contaminación y validez de la información recolectada monitoreos...
2. ACRÓNIMOS (1 pág.)
3. ETAPAS DISEÑO SVCA (1 pág.) [...]diagramas de flujo para diseño de un SVCA y SVCAI..

4. REVISIÓN INICIAL (11 págs.) [...] argumentos para establecer la necesidad de un SVCA [...] su tamaño, objetivos, fase de diagnóstico (recolección información/emisiones/meteorología y modelación preliminares) [...]
5. FASE DISEÑO FINAL (27 págs.) [...] lineamientos detallados para realizar diseño detallado. Definición tipo (I, II, [...] industrial) objetivos, aplicación, número estaciones, componentes, consideraciones especiales, [...]
6. 6. PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SVCA. (42 págs.) [...] Son otros aspectos del diseño final [...] clase según área, tiempo muestreo y emisiones/contaminantes/macrolocalización estación y microlocalización puntos vigilancia/técnicas medición/infraestructura necesaria/meteorología/software/estrategia muestreos [...]
7. MODIFICACIÓN DE LAS ESTACIONES EN LOS SVCA (1 pág) ... cuándo, cómo y por qué suspender muestreadores...
8. RECURSOS NECESARIOS PARA MONTAJE, OPERACION Y SEGUIMIENTO DEL SVCA (9 págs.) [...] costo del diseño, inversión en instalación de estaciones, costos de medición, análisis, mantenimiento, repuestos e insumos, procesamiento de datos y reportes, control y aseguramiento de la calidad, administración.
9. BIBLIOGRAFÍA (11 obras citadas)

ANEXO 1. TEORÍA SOBRE CONTAMINANTES DE REFERENCIA (2 págs.) [...] Adaptado del MANUAL DE CONTROL DE LA CALIDAD DEL AIRE. ALLEY [...] fig. de posición de partículas según tamaño en sistema respiratorio. Definiciones MP's, CO, NO_x, O₃ [...]

ANEXO 2. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DETERMINACIÓN DE ÁREA-FUENTE (3págs) [...] para adelantar programas [...] las autoridades ambientales (a partir de mediciones históricas de concentración de contaminantes) deberán clasificar como áreas-fuente de contaminación las zonas [...] son cuatro clases [...] solamente se clasifican áreas-fuente de contaminación por PST, PM10, PM2.5, NO_x, y SO_x.

ANEXO 3. VALIDEZ DE MUESTRAS EN SVCA TIPO I – INDICATIVOS (3 págs.) [...] objetivo es verificar el cumplimiento normativo entonces se deben hacer mediciones según el número mínimo requerido en el presente protocolo, de acuerdo a la probabilidad de error definida [...] una confianza del 95% es ampliamente aceptada. TAMAÑO DE LA MUESTRA [...]

ANEXO 4. VALIDEZ DE MUESTRAS EN SVCAI – INDUSTRIAL (1 pág.) [...] estimación del número de días en los que se debe realizar monitoreo de calidad de aire en un SVCAI [...]

MANUAL DE OPERACIÓN DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DE AIRE SVCA (116 PÁGS.)

1. INTRODUCCIÓN (1 pág.) [...] el manual incorpora los lineamientos para operar los SVCA [...] presenta los tipos de sistemas según su tecnología (manuales, automáticos e híbridos), los elementos comunes a todos, el programa de control, el análisis de la información generada y los reportes [...]
2. ACRÓNIMOS (2 págs.)
3. TIPOS DE SISTEMAS DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE SEGÚN SU TECNOLOGÍA (2 págs.) [...] según los instrumentos muestreadores y analizadores usados pueden ser tipos manuales, automáticos o híbridos[...]SISTEMAS MANUALES DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE (9 págs.) [...] se caracterizan por requerir: un laboratorio como apoyo para el análisis y una rutina para recolección de muestras [...] Fig. 2. Etapas de operación=cuatro etapas principales + dos de apoyo (Aseguramiento/Control de la Calidad y Mantenimiento/Calibración) [...] Fig. 3. Flujo del proceso [...] Figs 4/5/6. Determinación PST, PM10, PM2.5 [...] Figs. 7/8/9. Determinación SOx, NOx [...] procesamiento información, reportes, rutinas mantenimiento, calibración [...]
4. SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE (27 págs.) [...] no requieren análisis posterior de la muestra [...] por métodos ópticos o eléctricos se analiza la muestra en tiempo real [...] y se toman acciones inmediatas [...] Fig. 12. Etapas de operación = tres etapas + dos de apoyo (aseguramiento/control calidad y Mantenimiento/Calibración) [...] Fig. 13. Analizador beta PST, PM10 y PM2.5; Fig. 14. Analizador SOx; Fig. 15. Analizador NOx; Fig. 16. Analizador O3; Fig. 17. Analizador CO; analizador HC's; otros elementos necesarios; proceso información; reporte; mantenimiento; calibración [...]
5. SISTEMAS HÍBRIDOS DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE (1 pág.) [...] Fig. 35. Etapas de operación (similar a los dos anteriores) [...] ELEMENTOS COMUNES EN TODOS LOS SVCA (69 págs.) [...] PROGRAMA ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD [todo SVCA deberá implementar un programa control/aseguramiento [...] calidad para garantizar datos representativos [...] procedimientos según textos de "Air Quality Handbook For Air Quality Measurements Systems" y de "Quality Assurance Handbook For Air Pollution Measurement Systems"] [...] MANEJO MUESTRAS Y CADENA CUSTODIA [...en SVCA manuales el principal error se debe al manejo muestras... procedimientos a seguir...] [...] ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN GENERADA

EN LOS SVCA [bases de datos y manejo estadístico...comparaciones de concentraciones obtenidas versus la norma...] [...] INDICADORES DE DESEMPEÑO DEL SVCA [análisis de captura/validez datos] [...] REPORTE DE CALIDAD DE AIRE [formatos y condiciones de presentación para reportes [...] Informe Meteorológico anual [...] Reportes Anual, trimestral y mensual de calidad de aire: ponen a disposición general, datos y análisis sobre la calidad del aire de las ciudades que poseen SVCA's, traen índices [...]

[...] 7.6.7 ÍNDICE NACIONAL DE CALIDAD DE AIRE [...] el Índice de Calidad de Aire ICA sirve para comparar los niveles de contaminación [...]

[...] 7.6.7.1. Contaminantes del índice nacional de calidad del aire: Teniendo en cuenta los contaminantes que son monitoreados en el país, las características de nuestros combustibles y los equipos que actualmente se encuentran en las SVCA, los contaminantes a tener en cuenta son: PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, O₃ y CO.

7.6.7.3. Puntos de corte del índice nacional de calidad del aire[...] según estudios EPA (2005) la relación entre los efectos sobre la salud y la calidad del aire se han clasificado por “puntos de corte del ICA”, límites correspondientes que se presentan en la Tabla 3.3 [...]

Tabla 3.3. Puntos de corte del ICA (según efectos en salud reportados EPA, 2005).

ICA	Color	Clasificación	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm(1)	PM ₁₀ 24h ppm	PM _{2.5} 24h ppm	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
0-50	Verde	Buena	0.000 0.059	-	0 54	0.0 15.4	0.0 4.4	0.000 0.034	(2)
51-100	Amarillo	Moderada	0.060 0.075	-	55 154	15.5 40.4	4.5 9.4	0.035 0.144	(2)
101-150	Naranja	Dañina x grupos sensibles	0.076 0.095	0.125 0.164	155 254	40.5 65.4	9.5 12.4	0.145 0.224	(2)
151-200	Rojo	Dañina x salud	0.096 0.115	0.165 0.204	255 354	65.5 150.4	12.5 15.4	0.225 0.304	(2)
201-300	Púrpura	Muy dañina x salud	0.116 0.374	0.205 0.404	355 424	150.5 250.4	15.5 30.4	0.305 0.604	0.65 1.24
301-400	Marrón	Peligrosa	(3)	0.405 0.504	425 504	250.5 350.4	30.5 40.4	0.605 0.804	1.25 1.64
401-500	Marrón	Peligrosa	(3)	0.505 0.604	505 604	350.5 500.4	40.5 50.4	0.805 1.004	1.65 2.04

(1)calcular 1h y 8h;
(2)sólo considerar ICA's >200; (3) ICA's >301 se calculan con concentraciones 1h

7.6.7.2. Rangos del índice nacional de calidad del aire: El ICA corresponde a un valor adimensional, que oscila entre 0 y 500. En la Tabla 3.4 se

presentan los rangos cualitativos, los efectos a la salud y el valor del ICA [adoptados para el índice nacional].

Tabla 3.4. Efectos de salud de acuerdo con el rango y valor del índice de Calidad del aire.

ICA	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm	PM10 24h µg/m ³	PM2.5 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
0-50 Buena	Ninguno		Ninguno	Ninguno	Ninguno	Ninguno	
51-100 Moderada	Individuos no sensibles pueden experimentar síntomas respiratorios		Posibles síntomas respiratorios en individuos sensibles. Posible agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Posibles síntomas respiratorios en individuos sensibles. Posible agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Ninguno	Ninguno	
101-150 Dañina a la salud para grupos sensibles	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas y molestias respiratorias en niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias, como asma		Aumento de riesgo de síntomas respiratorios en individuos sensibles, agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón y mortalidad prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Aumento de riesgo de síntomas respiratorios en individuos sensibles, agravamiento de enfermedad del corazón o de pulmón y mortalidad prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores	Incremento de la probabilidad de reducir la tolerancia al ejercicio debido al aumento de los síntomas cardiovasculares, tal como, dolores de pecho en personas con enfermedades cardiovasculares	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios, tales como opresión en el pecho y dificultades al respirar en personas con asma	
151-200 Muy dañina a la salud	Mayor probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios y dificultad para respirar en niños activos, adultos y personas con enfermedad respiratoria, como asma; posibles efectos respiratorios de la población en general		Incremento de los síntomas respiratorios y recrudecimiento de las enfermedades pulmonares tales como asma; posibles efectos respiratorios en la población en general	Incremento de los síntomas respiratorios y recrudecimiento de las enfermedades pulmonares tales como asma; posibles efectos respiratorios en la población en general	Reducción de la tolerancia al ejercicio debido al incremento de los síntomas cardiovasculares como dolor de pecho en personas con enfermedad cardiovascular	Incremento de síntomas respiratorios, tales como opresión en el pecho y jadeo en personas con asma; posible recrudecimiento de enfermedades cardíacas y pulmonares	
201-300 Muy dañina a la salud	Síntomas cada vez más severos y respiración deteriorada probablemente en niños, adultos y personas activas con enfermedad respiratoria, como asma; incremento en la probabilidad de efectos respiratorios en la población general		Aumento significativo en síntomas respiratorios y aumento a la gravedad de enfermedades pulmonares como asma; incremento de la probabilidad de ocurrencia de efectos respiratorios para la población en general	Aumento significativo en síntomas respiratorios y aumento a la gravedad de enfermedades pulmonares como asma; incremento de la probabilidad de ocurrencia de efectos respiratorios para la población en general	Recrudecimiento significativo de los síntomas cardiovasculares, como dolores en el pecho en personas con enfermedades cardiovasculares	Aumento significativo en síntomas respiratorios tales como jadeo y respiración corta en personas con asma; recrudecimiento de enfermedades cardíacas y pulmonares	Incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas respiratorios; dificultad para respirar en niños y personas con enfermedades respiratorias como asma
301-500	Efectos respiratorios severos, daños respiratorios en niños activos, adultos y personas con enfermedad respiratoria como asma; incremento de los efectos respiratorios severos probables en la población en general		Riesgo serio de síntomas respiratorios y recrudecimiento de enfermedades pulmonares como asma; probables efectos respiratorios en la población en general	Riesgo serio de síntomas respiratorios y recrudecimiento de enfermedades pulmonares como asma; probables efectos respiratorios en la población en general	Agravación seria de los síntomas cardiovasculares, tal como dolor de pecho en personas con enfermedades cardiovasculares, deterioro de las actividades energéticas en la población en general	Síntomas respiratorios severos como jadeo y disminución de la respiración en personas con asma; incremento de la gravedad de enfermedades cardíacas y pulmonares; posibles efectos respiratorios en la población general	Mayor incremento de la probabilidad de síntomas respiratorios y dificultades respiratorias en niños y personas con enfermedades respiratorias como asma

8. BIBLIOGRAFÍA (34 refs.) [...]"

INFORME DEL ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN COLOMBIA 2011–2015 [58] (195 págs.) “Cítese como IDEAM, Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015 Bogotá, D.C.” (De libre acceso en la red)

[...] En este sentido, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, pone a disposición del público, la academia, las entidades nacionales públicas y privadas, la comunidad internacional, y demás interesados, el Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia para los años 2011 a 2015; este es el tercer documento correspondiente a la actualización de dos informes previos que fueron publicados en 2007 y 2012. El informe fue elaborado con base en los resultados del monitoreo de contaminantes atmosféricos por parte de 21 Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) administrados por las Corporaciones Autónomas Regionales y las Autoridades Ambientales de los Grandes Centros Urbanos. La información base reside en el subsistema SISAIRES, [...] Los **contaminantes**² que fueron **monitoreados** en estos SVCA fueron los reglamentados como criterio en la Resolución 610 de 2010 del Minambiente y que se enmarcan en dos grupos: material particulado, el cual según su tamaño puede clasificarse como Partículas Suspendidas Totales (**PST**), Material Particulado Menor a 10 Micras (**PM10**) y Material Particulado Menor a 2,5 Micras (**PM2.5**); y gases que comprenden el ozono (**O₃**), dióxido de nitrógeno (**NO₂**), monóxido de carbono (**CO**) y dióxido de azufre (**SO₂**). Cada uno de estos contaminantes tiene límites máximos permisibles en sus concentraciones para diferentes tiempos de exposición, cuya formulación tiene un sustento científico de sus efectos potenciales en la salud pública [...] El procedimiento consistió de seis actividades principales: 1) la evaluación de la representatividad de la información reportada, pues los SVCA permanentes deben tener una cobertura mínima anual del 75% con respecto al total posible de datos válidos a obtener; 2) la determinación del cumplimiento normativo mediante la comparación de las concentraciones de los contaminantes criterio con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010; 3) el análisis de las tendencias temporales y espaciales de la calidad del aire monitoreada en los diferentes SVCA; 4) la estimación del Índice de Calidad del Aire (ICA) para cada contaminante y estación de monitoreo, el cual permite identificar los efectos potenciales adversos de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en la salud pública; 5) el cruce de información de las concentraciones

2 El resaltado es nuestro. Se desea resaltar el enfoque del trabajo.

de los contaminantes atmosféricos con información de variables meteorológicas; y 6) el cruce de información de material particulado con casos de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA). En términos generales, [...] los **mayores incumplimientos de los límites** máximos permisibles [...] y el mayor potencial de afectación a la salud pública **fueron** el material particulado **PM2.5 y PM10**, especialmente en las zonas [...] con alta densidad de población [...] y donde se desarrollan actividades especiales asociadas principalmente con la minería [...]

Figuras 6-1 a 6-29 [...] Concentraciones PST/PM10/PM2.5 promedios [...] 2011/2015 [...] estaciones de los SVCA de [...] Las líneas rojas indican límites máximos permisibles **Figuras 6-30 a 6-35** [...] Número de días de excedencias de O3 para las estaciones de los SVCA [...]

Figura 6-36 a 6-39 [...] Concentraciones promedio anuales de NO2 entre 2011 y 2014 para las estaciones de los SVCA [...]

Figura 6-40. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del Aire (ICA) para CO [...] año 2011 [...] dos estaciones [...]

Figuras 6-41 a 6-43. [...] Concentraciones promedio anuales de SO2 entre 2011 y 2015 de las estaciones de los SVCA [...]
[...]

Capítulo 7 [...] Análisis del cruce de datos de concentraciones de contaminantes atmosféricos con datos de variables meteorológicas [...] se trata de correlacionar las concentraciones MP con los vientos predominantes [...] [...] Capítulo 8 [...] Se expone un análisis comparativo (con carácter de aproximación inicial) entre las concentraciones de material particulado PM2.5 y PM10 versus número de personas atendidas por Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) para cinco ciudades [...] (desarrollado entre Estudios Ambientales del IDEAM, y Salud Ambiental y Epidemiología y Demografía del MINSALUD). Se estima que los índices de mortalidad diaria aumentan entre 0,2 y 0,6% por cada 10µg/m³ de PM10 (WHO, 2006; Samoli, *et al.*, 2008), mientras que respecto a exposición prolongada a PM2.5 se considera un aumento en los índices de mortalidad cardiopulmonar entre 6-13% por cada 10 µg/m³ de PM2.5 (Krewski, *et al.*, 2009; Pope III, *et al.*, 2002) [...] El análisis comparativo de las tendencias PM2.5 y PM10 versus personas atendidas por IRA sugiere [...] influencia de la contaminación atmosférica en la ocurrencia de efectos adversos a la salud ... Los resultados más evidentes se observaron para las ciudades más pobladas (Bogotá y Medellín).

Complementan los estudios de dos casos: [...] episodio crítico de calidad del aire del Valle de Aburrá y CORPOBOYACÁ. Cita 28 referencias [...]"

Lista de laboratorios ambientales acreditados por el ideam – matriz aire

Desde el 2003 el IDEAM realiza pruebas de evaluación de desempeño con el fin de evidenciar las competencias técnicas de laboratorios, pruebas que constituyen un requisito para acceder a una acreditación o mantenerla. Se debe participar mínimo una vez al año. La prueba de evaluación de desempeño consiste en el análisis de muestras certificadas. En la red, la lista de TODOS los laboratorios ambientales acreditados por el IDEAM, fecha de corte 31 de diciembre de 2016, relaciona doscientos (200) laboratorios (matrices agua, aire, residuos peligrosos, suelo, lodo, aceite de transformador, [...]).

El documento “LISTA DE LABORATORIOS AMBIENTALES ACREDITADOS POR EL IDEAM – MATRIZ AIRE” con fecha de corte 31 de diciembre de 2016 relaciona ochenta y seis (86) laboratorios. La tabla informa sobre los datos básicos de cada unidad (razón social, dirección, teléfono, nombre contacto, [...]) así como la vigencia y el alcance de la acreditación. En este último ítem se anotan las submatrices y algunas características (Calidad de Aire, Emisión por Fuentes Fijas o Estacionarias, Emisión de Ruido y Ruido Ambiental, Estación Móvil, [...]) así como los alcances (toma de muestras, análisis de laboratorio, determinación directa en campo, [...]), las variables y servicios (PST/PM10/PM2.5/SO₂/NO₂/O₃/Hidrocarburos/Compuestos Orgánicos Volátiles/Sulfuro de Hidrógeno/Amoniaco/Azufre Total Reducido/Dióxido de Azufre/Monóxido de Carbono/Compuestos Orgánicos Volátiles COVs/Pesticidas y Bifenilos Policlorados/Haluros de Hidrogeno y Halógenos/Metales/ Dibenzo-p-Dioxinas Policloradas y Dibenzofuranos Policlorados/Compuestos Orgánicos Gaseosos Totales/Fluoruro Total/Velocidad y Flujo Volumétrico de Gases / Contenido de Humedad [...]) y los métodos.

Mejoramiento de IAQ (Indoor Air Quality)

Mejorar IAQ significa —para un volumen de aire considerado— llevar las concentraciones de contaminantes a valores aceptables, esto es por debajo de los mínimos legales obligatorios (o los reglamentados preferidos). En la Tabla 4.3 se mostraron y compararon las mejores normativas y guías que respecto a mínimos aceptables existen. Para disminuir concentraciones están disponibles dos métodos:

- Eliminar contaminantes (es decir, retirarlos físicamente). Dentro de este primer grupo se destaca la filtración mecánica, técnica que si está bien empleada es efectiva con partículas. La filtración consiste en retenir en un medio poroso los aerosoles que sea de interés eliminar.

La *Figura 4.5* ilustra sobre distintos dispositivos usados en retención de partículas (muy útil para aplicaciones industriales obligadas a restringir descargas al ambiente, (ver [99]). En las aplicaciones IAQ lo corriente es usar un banco de filtros, que viene clasificado según su valor MERV (Minimum Efficiency Reporting Value, escala diseñada por la American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, ASHRAE) para cuantificar la efectividad de filtros de aire. En este mismo primer grupo, pero para eliminar gases, se pueden emplear “filtros sorbentes”, los cuales utilizan adsorción física o quimisorción, procesos que solo actúan en gases específicos, resultando dispositivos costosos y complejos con limitados usos prácticos. Una guía sobre esta última alternativa es [100]. Estrictamente hablando, también pertenece a este primer grupo la ventilación extractiva: una campana encierra de la mejor manera posible la fuente contaminante, un conjunto ducto-ventilador provee la succión y evacuación necesarias. La ref. [99] es la mejor guía para esta última alternativa.

- Insuflar una cantidad de aire nuevo limpio exterior que baje el valor de la concentración indeseable. Esta práctica, cuyo nombre propio es dilución, en el campo IAQ se conoce como ventilación.

Hay autores que consideran como parte de la calidad del aire otras condiciones aquí no mencionadas: temperatura, humedad, uniformidad de la distribución, presión diferencial entre espacios, etc. Como tales circunstancias son más del ámbito del confort que de la higiene, son tratadas en el capítulo correspondiente.

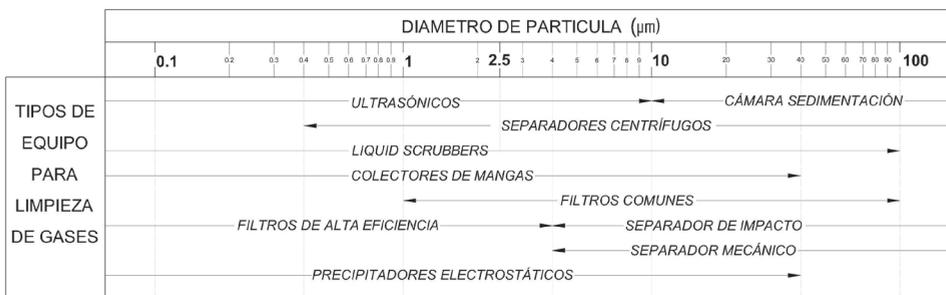


Figura 4.5. Tipos de Equipo para Limpieza de Gases [62].

FILTRACION

En los filtros mecánicos operan cinco mecanismos para captura de partículas: impacto, intercepción, atracción electrostática, difusión, y tamizado. En el primero la partícula por su inercia no rodea la fibra sino que colisiona

con ella, quedando unida; en los tres siguientes (intercepción, atracción electrostática y difusión) la partícula rodea la fibra siguiendo el flujo de aire, pero eventualmente entra en contacto y queda pegada a ella; en el tamizado la partícula es más grande que el espacio entre dos fibras contiguas y queda allí atrapada. Al contrario de la presunción general, este último mecanismo es el menos importante. En la difusión las partículas más pequeñas, al interactuar con las moléculas de aire toman trayectorias algo erráticas (movimiento browniano), lo que aumenta la posibilidad de contactar las fibras. Impacto e intercepción son los mecanismos dominantes en tamaños mayores a $0.2 \mu\text{m}$, y la difusión es dominante en partículas chicas. El efecto combinado de colección resulta en la típica curva que se muestra en la Figura 4.6.

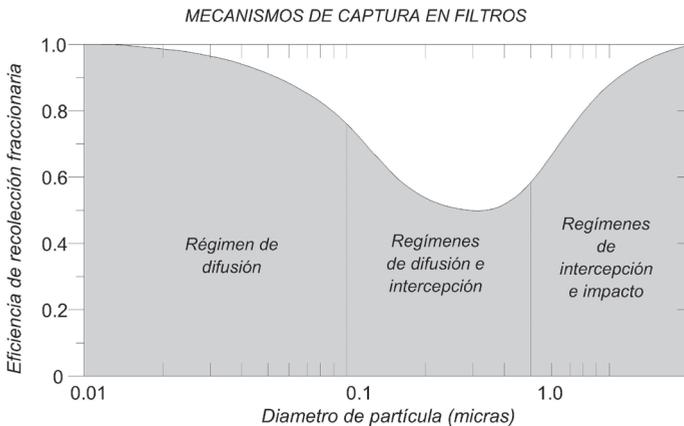


Figura 4.6. Eficiencia en la captura fraccionaria versus tamaño de partícula [100].

En la selección de la clase de filtros a utilizar lo primero que hay que considerar es el tamaño de contaminantes predominantes y el nivel de remoción que se desea; de allí se pasa a considerar la eficiencia de filtración, el flujo de aire a manejar y la caída de presión en el banco (o bancos, si se piensa en una composición). Esto, y las consideraciones de inversión y costos, permiten tomar las decisiones acertadas. La Figura 4.7 ilustra sobre el desempeño de diferentes filtros en términos de remoción de distintas partículas. HEPA significa High Efficiency Particulate Air filters que cumplen eficiencia mínima 99.97% con partículas de 0.3 microns.

La clasificación MERV (Minimum Efficiency Reporting Value) para filtros, indicativa de la capacidad de retención del filtro, actualizada en el ANSI/ASHRAE Standard 52.2-2012 [101], es reconocida como la referencia

general actual. Para entender el significado de MERV la NAFA publicó una guía [102] muy compacta, accesible en la red, donde explica el concepto. La clasificación MERV se determina a partir de conteos de partículas antes y después del filtro: seis ciclos de prueba se realizan; en cada uno se calculan eficiencias de captura para cada uno de doce rangos de tamaño de partículas, resultando setenta y dos eficiencias, de las cuales se seleccionan los menores valores de cada rango. Los doce rangos se compactan después en tres grupos (0.3 a 1 μm , 1 a 3 μm , 3 a 10 μm) y se calcula el promedio para cada uno de ellos a partir de las eficiencias menores mencionadas. Con cada uno de esos tres valores resultantes se entra a una tabla denominada “Parámetros MERV” (disponible en [102]), y se anota un MERV resultante; el menor de los tres MERV es la clasificación final del filtro.

La clasificación MERV va desde 1 hasta 16. Mientras más alto el valor MERV más grande el porcentaje de partículas capturada en cada tamaño, mayor la pérdida de presión y más altos costos de inversión, mantenimiento y reposición. La *Tabla 4.12* orienta en la selección de filtro, pero se aconseja asistencia técnica para una apropiada escogencia.

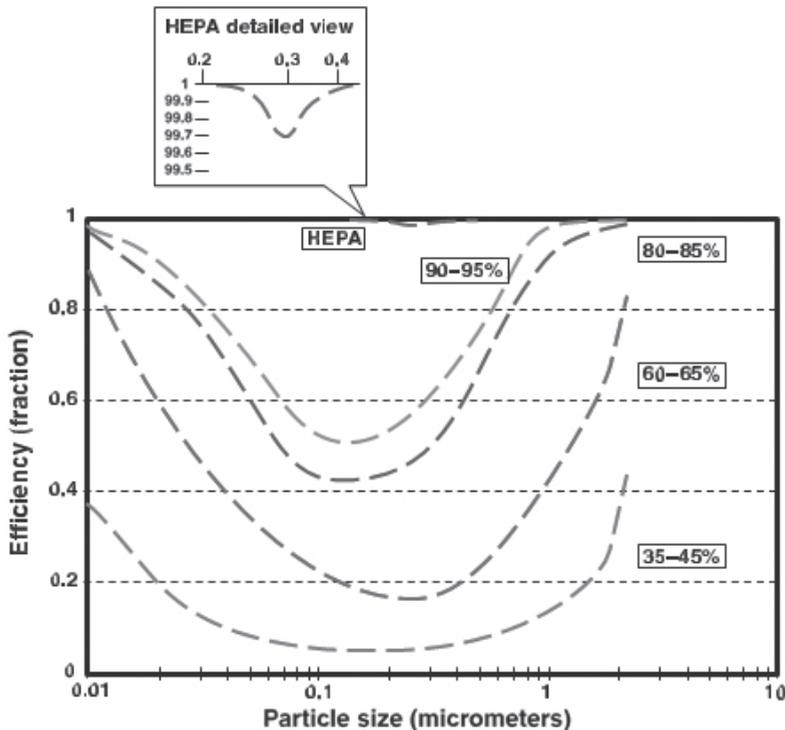


Figura 4.7. Comparación de eficiencia de captura según tamaño de partículas para diferentes filtros [100].

**Tabla 4.12. Directriz para Aplicación de los Filtros
Según su Clasificación MERV [153], [154].**

MERV Std 52.2	Dust spot* efficiency Std52.1	Average arrestance	Rango de tamaño partícula	Contaminante típico controlado	Aplicación típica
1-4	< 20%	60 a 80%	> 10.0 µm	Polen, ácaros del polvo, detritos de cucaracha, polvo de lijado, aerosol de pinturas, fibras textiles, fibras de alfombra	Aires acondicionados de ventana, mínima protección de equipos
5-8	< 20 a 60%	80 a 95%	10.0-3.0 µm	mohos, esporas, polvo de ácaros deshechos, caspa de perros y gatos, laca en spray, protectores de tejidos, polvos para limpieza, mezcla para pudín	Residencias clase preferente, comercio general, espacios de trabajo industrial
9-12	40 a 85%	>90 a 98%	3.0-1.0 µm	Legionella, niebla de humidificadores, polvo de plomo, harina molida, partículas de emisiones vehiculares	Residencias clase Superior, comercio tipo preferente, laboratorios de hospital
13-16	70 a 98%	> 95 a 99%	1.0 -0.3 µm	Bacteria, núcleos de gotitas (estornudos), aceite cocina, mayoría de humos, polvos insecticidas, polvos faciales y pigmentos de pinturas	hospital & cirugía general
Efficiency		Filtro tipo			
17-20**	99.97 - 99.9999%			HEPA ULPA	Sala limpia (cleanroom) para manufacturas electrónicas, farmacéuticas, biológicas

*Dust spot efficiency Std52.1 removido en 2009 [153]

**ASHRAE no tiene procedimiento oficial para HEPA

VENTILACIÓN

Existe abundante literatura de calidad sobre el tema de ventilación para lograr un aceptable IAQ [99], [62], [103], pero las mejores y más divulgadas directrices están dadas por el ANSI/ASHRAE Standard 62.1 de 2016, [104]. Los textos que siguen presentan en forma compacta esta referencia,

con el propósito de que los ingenieros y arquitectos involucrados en estos proyectos consulten dicho material para su apropiado trabajo. Std. 62 [104] declara que su propósito es “especificar los mínimos caudales de ventilación y demás medidas dirigidas a proveer calidad de aire interior aceptable para ocupantes, con mínimos efectos en su salud”, y advierte que este propósito no se alcanza si no se anulan las fuentes contaminantes internas o si el aire exterior aportado no es adecuadamente limpiado. Añade que “este estándar define requerimientos para el diseño, instalación, interventoría, operación y mantenimiento en sistemas de ventilación y purificación de aire”.

Enmarcados en que la ventilación es una fórmula eficaz y económica de proveer IAQ, se establecen tres condiciones: primera, que si existen fuentes interiores de producción de gases o partículas se deben eliminar o anular previamente; segunda, que el aire nuevo suplementario debe ser aire exterior, exento de gases contaminantes y filtrado antes de incorporarlo al ambiente interior; y tercera, que por razones económicas y de consumo energético se utiliza solo la cantidad de ventilación necesaria.

En edificaciones donde se ha resuelto hacer transferencia de aire entre espacios, o cuando hay recirculación, debe respetarse el criterio de que la descarga nunca se hace a un espacio donde la clase de aire es de mayor jerarquía que de donde sale. Hay cuatro clases de aire según las magnitudes de concentraciones de contaminantes, irritantes sensoriales y olores: clase 1, mínimas; clase 2, moderadas; clase 3 significativas; y clase 4, altamente objetables.

En el capítulo 5, dedicado a “Sistemas y Equipos”, se exponen criterios de diseño sobre distribución y ubicaciones, especificaciones de materiales, protecciones contra lluvia/nieve/intrusiones, cuidados acerca de equipos de combustión y similares, condiciones de humedad y deshumidificadores, drenajes, serpentines e intercambiadores, accesorios como *dampers*, accesorios de limpieza y mantenimiento, descargas al exterior, plan para balanceo y manejo adecuado de *plenums*.

El Capítulo 6, “Procedimientos”, presenta los distintos procedimientos válidos para diseño de sistemas de ventilación:

- “Tasa de Ventilación”, procedimiento fundamentado en que los volúmenes de aire exterior se determinan a partir de los tipos de espacio y sus aplicaciones, nivel de ocupación, y área de piso.
- “Procedimiento IAQ”, en el cual los caudales de aire exterior y otros parámetros de diseño se basan en el análisis de las fuentes de contaminación, los límites permisibles de contaminantes y el registro de percepciones de los ocupantes.

- “Procedimiento de Ventilación Natural”, en el cual se proveen aperturas hacia el ambiente exterior, y que normalmente se usa en conjunción con sistemas mecánicos de ventilación o climatización adicionales.
- “Ventilación Extractiva”, complementaria para cualquiera de los tres sistemas anteriores, o una combinación de ellos, se implementa cuando se identifican contaminaciones que puedan o deban ser eliminadas en sus fuentes internas. La Tabla 6.5 especifica las tasas mínimas de extracción a usar en cada caso.

En el marco del primer procedimiento, el caudal de aire exterior necesario requerido en la llamada “zona de respiración” se determina con base en el dato que se obtiene de la Tabla 6.2.2.1 de la referencia en consideración. Nuestra *Tabla 4.13* extrae los principales valores de dicha tabla.

Tabla 4.13. Tasas Mínimas de Ventilación en Zonas de Respiración [104].

Ocupación	Caudal de aire exterior		Valor por defecto		Aire clase #
	l/s por persona	l/s por m2	Densidad de ocupación # por 100m2	l/s por persona	
Instalaciones educativas					
Salón de clase	5	0.6	35	6.7	1
Laboratorio de cómputo	5	0.6	25	7.4	1
Auditorio multiuso	3.8	0.3	100	4.1	1
Servicios de comida y bebida					
Comedor	3.8	0.9	70	5.1	2
Barras, salón x coctel	3.8	0.9	100	4.7	2
Cocinas	3.8	0.6	20	7.0	2
Hoteles, resorts, dormitorios					
Cuartos/living room	2.5	0.3	10	5.5	1
Barracas dormitorios	2.5	0.3	10	5.5	1
Edificios de oficinas					
Espacios de oficina	2.5	0.3	5	8.5	1
Recepción	2.5	0.3	30	3.5	1
Espacios misceláneos					
Bancos/lobbies	3.8	0.3	15	6.0	1
Manufactura general	5.0	0.9	7	18	3
Farmacia (preparación)	2.5	0.9	10	11.5	2
Museos/galerías	3.8	0.3	40	4.6	1

Ocupación	Caudal de aire exterior		Valor por defecto		Aire clase #
			Densidad de ocupación	l/s por persona	
	l/s por persona	l/s por m2	# por 100m2		
Ventas al por menor					
Ventas general	3.8	0.6	15	7.8	2
Áreas comunes malls	3.8	0.3	40	4.6	1
Barberías	3.8	0.3	25	5.0	2
Salón de belleza	10	0.6	25	12.4	2
Área mascotas	3.8	0.9	10	12.8	2
Supermercados	3.8	0.3	8	7.6	1
Deportes y entretenimiento					
Gimnasio	10	0.9	7	23	2
Salón de baile	10	0.3	100	10.3	2
Casino, salón de apuestas	3.8	0.9	120	4.6	1
.....					
SON 78 ITEMS					

Los valores por defecto se usan cuando no se conoce la densidad de ocupación

El capítulo 7, “Construcción y Arranque”, se dedica a las rutinas a seguir en lo relativo a filtros, protección de materiales y áreas, pruebas de drenajes y de dampers. La construcción de ductos debe seguir las normas SMACNA 006-2006 HVAC Duct Construction Standards (Metal and Flexible), las SMACNA Fibrous Glass Duct Construction Standards, [105], o las NFPA 90 A y NFPA 90 B, según sea el caso. SMACNA es el acrónimo de Sheet Metal & Air Conditioning contractor’s National Association. El balanceo se hará en concordancia con el ASHRAE standard 111 u otro reconocido.

El capítulo final, “Operación y Mantenimiento”, aconseja desarrollar —bien sea en formato electrónico o en papel— un manual O&M (operación y mantenimiento) que debe ser mantenido en un sitio accesible, que incluya procedimientos O&M, agendas y planos. La Tabla 8.2 sirve como modelo y guía.

Número de Renovaciones. Una forma alterna de establecer el caudal de ventilación a aplicar, la más fácil de todas, pero desde luego la menos técnica, es aplicar al espacio el “número de renovaciones por hora recomendado” por fabricantes o asociaciones técnicas. Gran cantidad de este tipo de tablas está disponible en la red con solo citarlas. El caudal a aplicar es igual al volumen del local multiplicado por el número de renovaciones por hora seleccionado. Como una primera aproximación, se considera aceptable.

Caudal necesario para remover una carga calórica. Cuando se desea refrescar el cuarto con aire ambiente, y se conoce la ganancia calórica total, se puede fácilmente determinar el flujo másico de aire necesario (y por ende el caudal) a través de la ecuación El aumento de temperatura debe definirse previamente, decidiendo cuál valor de temperatura del aire a la salida es admisible. Si el caudal realmente aplicado es menor que el aquí calculado el aire se calentará más de lo deseado y, según la distribución, se tendrán zonas con discomfort.

Síndrome de edificio enfermo

El síndrome del edificio enfermo, SEE (Sick Building Syndrome), fue definido en 1982 por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como “el conjunto de malestares originados, o estimulados por la contaminación del aire, en espacios cerrados que se producen en al menos un 20% de los ocupantes; un conjunto de síntomas como sequedad e irritación de las vías respiratorias, piel y ojos, dolor de cabeza, fatiga mental, resfriados persistentes e hipersensibilidades inespecíficas, sin que sus causas estén perfectamente definidas”. Es característico que los síntomas desaparezcan al abandonar el edificio. Entre estos malestares también figuran las alergias y los casos de asma. Esta organización estima que uno de cada tres trabajadores puede estar sufriendo las consecuencias del edificio enfermo; un estudio de 1990 en Holanda sostiene que 24% de los empleados que laboraban en él estuvieron ausentes dos días al año por problemas de salud debido a las condiciones de sus oficinas, y que el total de días perdidos había sido de un millón, con un costo de 500 millones de dólares.

Aunque prácticamente existe pleno consenso alrededor de que las indisposiciones sufridas por los ocupantes se originan en la deficiente calidad del aire, ha persistido cierta incertidumbre sobre los orígenes de dicho deterioro, lo que se explica por el hecho que las causas son múltiples y variadas, y porque cada caso puede tener su propia composición. Las pesquisas han establecido que el principal problema de los edificios enfermos es la inadecuada ventilación. Según el National Institute for Occupational Safety, 50% de los edificios enfermos sufre de deficiente ventilación, lo que puede significar insuficiente caudal, baja calidad del aire nuevo y/o filtración deficiente. Pero sin duda otra parte importante del problema radica en la presencia de distintas fuentes de contaminación interior: superficies (paredes, suelos) recubiertas con material textil, materiales y construcciones de baja calidad, materiales sintéticos y plásticos que emiten gases y vapores perjudiciales, ductos que se llenan de bacterias, hongos y mohos. Es evidente que un diagnóstico confiable solo puede emitirse después de una

caracterización de campo llevada a cabo por expertos, quienes serían también responsables de proponer un plan correctivo. Si bien se han mencionado como causas probables mala iluminación, ruido excesivo, discomfort térmico, mobiliario poco ergonómico, etc., es mejor clasificar estas condiciones como colaboración y no como causa.

Cuartos limpios (Cleanrooms)

El Federal Standard 209E [85], describe un cuarto limpio (cleanroom) como “un cuarto donde la concentración de las partículas suspendidas está controlada para cumplir las estrictas condiciones específicas de una determinada clase de limpieza”. Otras fuentes describen un cuarto limpio como un espacio especialmente diseñado para mantener bajos niveles de contaminación y parámetros ambientales estrictamente controlados: partículas en aire, temperatura, humedad, flujo de aire, presión interior del aire, iluminación. Los cuartos limpios se adecúan para delicados procesos de manufactura y requieren garantizar, a través de costosos sistemas, la limpieza, la cantidad y la distribución del aire.

Clasificación de los cuartos limpios (Cleanrooms). Los cuartos limpios son reconocidos por su “tipo” e identificados por su “clase”. El tipo se refiere a la forma de distribución del aire, y hay dos de ellos: el convencional (o no-unidireccional o no-laminar) y el laminar (o unidireccional). En el convencional, por la posición de difusores, el movimiento de aire no está formado por líneas de flujo paralelas y el aire contaminado se mezcla con el limpio, aunque sí se rodea al producto con una atmósfera apropiada. En el laminar el flujo de aire sigue un patrón tipo pistón, de modo que el aire nuevo va desplazando al viejo.

La “clase” del cuarto limpio se relaciona con su nivel de limpieza. La *Tabla 4.14* muestra las especificaciones de limpieza para las distintas clasificaciones (seis americanas, trece métricas, nueve ISO) y su nota adjunta explica los niveles de concentración permitidos para cada tamaño de partícula.

Tabla 4.14. Clasificación de cuartos limpios (Cleanrooms) y equivalencias entre Federal Standard 209E, Sistema Internacional y Sistema Internacional Organization for Standardization (ISO) [85] , [106].

Clase			Máximo de partículas /unidad de volumen (a)										
			≥0.1 μm		≥0.2 μm		≥0.3 μm		≥0.5 μm		≥1 μm	≥5 μm	
STD 209E -USA	ISO	SI	m3	ft3	m3	ft3	m3	ft3	m3	ft3	m3	m3	ft3
	ISO1		10 b		d		d		d			e	
	ISO2		100 b		24 b		10 b		d			e	
		M1	350	9.91	75.7	2.14	30.9	0.875	10	0.283		-	-
Class 1	ISO3		1000		237		102		35 b			e	
		M1.5	1240	35	265	7.5	106	3	35.3	1		-	-
		M2	3500	99.1	757	21.4	309	8.75	100	2.83		-	-
Class 10	ISO4		10000		2370		1020		352		83	e	
		M2.5	12400	350	2650	75	1060	30	353	10		-	-
		M3	35000	991	7570	214	3090	87.5	1000	28.3		-	-
Class 100	ISO5		100000		23700		10200		3520		832	d,e,f	
		M3.5	-	-	26500	750	10600	300	3530	100		-	-
		M4	-	-	75700	2140	30900	875	10000	283		-	-
Class 1000	ISO6		1000000		237000		102000		35200		8320	293	
		M4.5	-	-	-	-	-	-	35300	1000		247	7
		M5	-	-	-	-	-	-	100000	2830		618	17.5
Class 10000	ISO7								352000		83200	2930	
		M5.5	-	-	-	-	-	-	353000	10000		2470	70
		M6	-	-	-	-	-	-	1000000	28300		6180	175
Class 100000	ISO8												
		M6.5	-	-	-	-	-	-	3530000	100000		24700	700
		M7	-	-	-	-	-	-	10000000	283000		61800	1750
Room air	ISO9								35200000		8320000	293000	

(a): Todas las concentraciones en la tabla son acumulativas. Por ejemplo, para ISO clase 5 las 10200 partículas mostradas en 0.3 μm incluyen todas las partículas iguales o mayores que este tamaño. Los valores son en general válidos para propósitos de clasificación, y no necesariamente representan la exacta distribución a ser hallada.

CARGA TÉRMICA

La carga térmica es el conjunto de las energías calóricas que instantáneamente entran y se generan en el interior, las cuales tienen que ser evacuadas con los equipos (o las formas) de climatización a proponer. Su cuantificación, tanto global como específica, ítem por ítem, da la clave, en numerosas situaciones, para postular la más apropiada estrategia. Esto es porque al conocer el peso específico de cada carga se diagnostican las causas del problema y la oportunidad de resolverlo. En este capítulo se presentan los fundamentos físicos, las descripciones y la cuantificación de las distintas cargas térmicas, permitiendo que el profesional apropie e interiorice este concepto. Mediante un ejemplo se ilustra cómo —usando apropiadas herramientas computacionales— se puede valorar ágilmente la carga térmica.

Estimación *Grosso Modo* de la Carga Térmica. Es corriente en la práctica del diseño (aunque impropio) que lo primero que la gerencia demanda es una aproximación *grosso modo* del orden de magnitud del tamaño del equipo a adquirir. Para resolver esa inquietud, dejando claro que este tipo de aproximaciones está en la frontera de la vulgaridad y la “chambonería”, se pueden hacer estimados preliminares a través de indicadores populares en el medio, o de algunas directrices y tablas disponibles. La Tabla 5.1 recopila algunos de estos índices. Por ejemplo, para AA en Cali, se maneja que oficinas normales necesitan 1 tonelada de refrigeración (TR) por cada 20 a 25 m²; 1kW por TR; 400 cfm por TR; en expansión directa 2 MM\$ por TR; en agua fría 2.4 gpm por TR y 4 MM\$ por TR. La referencia [107] sostiene que los estándares Ashrae de estimación en edificios, usando 20 cfm/persona, son:

Tabla 5.1. Índices diversos de estimación climatización

Carga de enfriamiento	.25 a .35 tons por cada 100 pies cuadrados
Carga de calentamiento	1.5 a 2.5 MBH por cada 100 pies cuadrados
Ventilación	75 a 125 cfm por cada 100 pies cuadrados
Agua helada	2.4 gpm por ton
Agua caliente	MBH/10 [gpm]

Para casos generales se incluye la siguiente Tabla 5.2, extraída de referencia [602].

Tabla 5.2. Aproximación en cargas de aire acondicionado ref. [108]

Aplicación	m ² por ton	Asientos por ton
Tiendas por departamentos	25.6	-
Tiendas minoristas	21.4	-
Oficinas privadas	37.2	-
Oficinas en general	32.5	-
Comedores	14.0	-
Bancos	27.9	-
Residencias (no aisladas/sombreadas)	37.2	-
Residencias (si aisladas/sombreadas)	46.5	-
Teatros, auditorios	-	20
Night clubs	-	8
Cafeterías	-	12
Restaurantes	-	10

Naturaleza. La carga térmica es una variable, puesto que su magnitud siempre está cambiando (depende del día, del mes, del año, del momento). Al ser instantánea, la carga térmica es potencia y sus unidades son kW (o toneladas de refrigeración, en sistema inglés). Al valor más alto se le llama “plena carga”, y a los demás valores “carga parcial”. No toda ganancia calórica es inmediatamente carga real o efectiva; la radiación, por ejemplo, se demora un poco en llegar al equipo climatizador pues experimenta almacenamiento en los elementos sólidos del espacio. En la selección de un equipo climatizador comercial se escoge el modelo cuya capacidad real es igual o mayor a la carga plena. Si el sistema climatizador es capaz de lidiar con la carga plena, será más que eficiente en cualquier otro caso.

Para cuantificar la carga plena serán relevantes la arquitectura y los detalles constructivos del edificio (techos, muros, ventanas, puertas, pisos, aleros, quiebrasoles, persianas interiores y exteriores, número y tipo de luces, número de ocupantes y su actividad, equipos, motores, estufas, extractores,

orientación, longitud y latitud, etc.), su vecindario (estructuras que le dan sombra, obstáculos para los vientos, superficies que reflejan el sol, etc.), las condiciones ambientales externas (temperatura exterior, humedad relativa, radiación solar, vientos, etc.), y también otras dos variables muy importantes: las condiciones ambientales interiores que se desean alcanzar y el momento escogido. Es menester tener plena claridad y manejo al respecto de todo lo anterior, y dejarlo explícito y por escrito en planos e informes.

Condiciones Interiores. Se deben definir las aspiraciones del proyecto en términos de temperatura de aire interior, humedad relativa, velocidad de aire y temperatura media radiante. El sistema más efectivo y seguro en confort térmico es el aire acondicionado, aunque se le pueden hacer serias objeciones respecto a higiene, costos e impacto ecológico. Un sistema de aire acondicionado obtiene y mantiene la temperatura y la humedad relativa de todo el volumen del ambiente interior en unos valores fijos, permanentes y uniformes. Por lo anterior, siempre vale la pena desarrollar la opción del aire acondicionado, así sea solo para tomarla como referencia. Al plantear otra estrategia de climatización alternativa se puede entonces hacer una comparación en todos los órdenes: temperaturas, humedad, índice de confort, inversión y gastos, consumo energético, impacto ecológico, sanidad del aire, etc.

La hora del proyecto. El primer desafío es definir “la hora del proyecto”. Esta selección es una decisión de diseño y conlleva repercusiones técnicas y económicas; en aire acondicionado no se escoge el momento más crítico de todos los posibles, pues los equipos quedan sobredimensionados para la inmensa mayoría del tiempo de servicio, lo que significa mayores inversiones iniciales, mayores gastos de operación y mantenimiento y, lo que es peor, baja eficiencia de funcionamiento del equipo.

En cualquier edificio las curvas diarias de carga tienen la misma forma sinusoidal: se sube gradualmente hasta el máximo del día y se baja gradualmente hasta el mínimo. Si se promediaran los máximos diarios proyectados en la vida útil del sistema, ese promedio sería la carga de diseño, la carga plena, y esta sería la hora del proyecto. Como este ejercicio no es factible por su extensión, se acostumbra a hacer mediante software proyecciones de carga en diferentes momentos, y sobre estos ensayos seleccionar la hora del proyecto. Para que estas aproximaciones correspondan a momentos verdaderamente representativos y conduzcan a resultados válidos se necesita experiencia del diseñador, o una extensa exploración con suficiente número de ensayos.

Condiciones Exteriores. De acuerdo con la hora del proyecto seleccionada, y según las directrices del capítulo 3, “Condiciones Ambientales”, se

registran los valores de temperatura ambiente, humedad relativa, viento y radiación solar. Si se tiene en mente evaluar con el método adaptativo se debe conocer la temperatura exterior mensual representativa.

CARGAS CALÓRICAS

Como el edificio (o el cuarto) es un sistema térmico balanceado en el momento de carga plena, la suma de todas las energías entrantes y generadas en el interior es igual a la suma de energías salientes. Para la opción de aire acondicionado es el serpentín (de la UMA, fan coil, manejadora, o como deseé llamarse) el encargado de evacuar dicha carga calórica por medio del proceso de enfriamiento y deshumectación que ejecuta sobre el aire del cuarto. En el enfriamiento se controla la temperatura deseada; en la deshumectación se controla la humedad relativa deseada. En aire acondicionado se manejan dos tipos de carga: la sensible, que se aprecia en el enfriamiento de la corriente de aire, y la latente, que se observa en la producción de condensado.

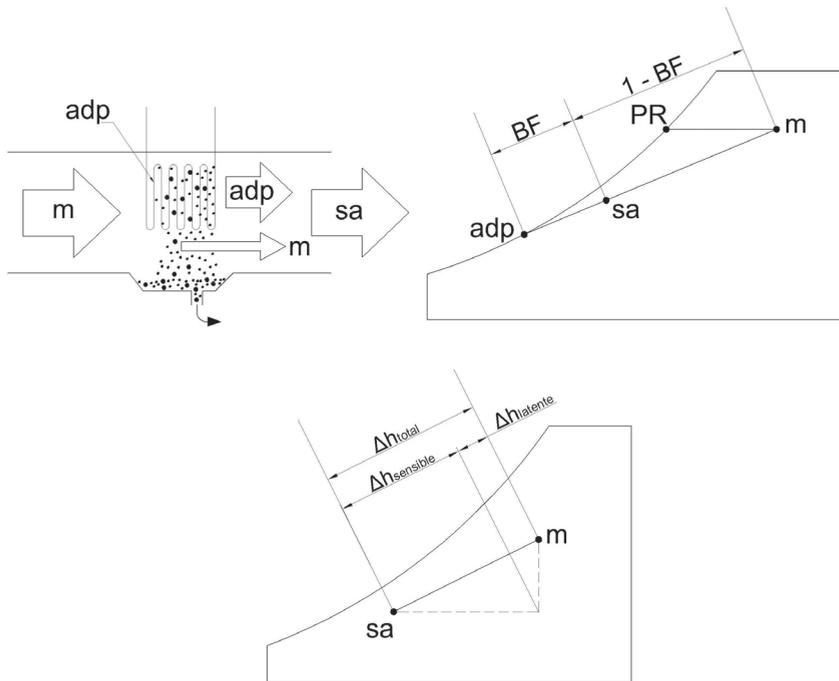


Figura 5.1 Representación gráfica del enfriamiento con deshumectación de una corriente de aire

En la Figura 5.1 se visualiza la contribución de cada una de esos dos componentes. A continuación se describen cada una de las cargas, su tipo y la forma de caracterizarla y calcularla; algunas de estas no son relevantes en alternativas distintas al aire acondicionado.

Carga por el techo: El techo es una estructura que separa el ambiente interior del exterior, y que está sometida a la radiación solar. El calor que se cuela a través del techo es una carga sensible: una parte es originada por la radiación directa del sol y el resto por convección, debido a la diferencia de temperatura aire exterior-aire interior. Es claro que un rayo de sol incidente sobre el techo no tiene efecto inmediato en el interior; ese efecto se demora dependiendo de la cantidad de calor que la estructura pueda almacenar y de las propiedades conductivas o aislantes de los distintos componentes y sus materiales. Desde el punto de vista de la transferencia de calor este es un problema complejo de estado transitorio, y para resolverlo y hacerlo accesible se concibió un concepto denominado $T_{\text{sol-air}}$, modelo que simplifica enormemente la valoración del calor transferido real y que incluye los efectos de la convección y la radiación exterior. La $T_{\text{sol-air}}$ es la temperatura exterior equivalente que da la misma carga térmica a la superficie combinada por la convección desde el ambiente más la radiación desde los alrededores y el firmamento. Para evaluar la magnitud instantánea de la carga calórica del techo en la hora del diseño se deben aportar a la herramienta computacional (o manual) varios factores, a saber: la radiación solar incidente (función de ubicación geográfica, mes, día, hora); la fracción sombreada (función de la geometría de los obstáculos permanentes vecinos y sus posiciones relativas); vientos; temperatura exterior; composición física del techo (área, tipo de teja, aislamientos, espacios entre componentes, circulación del aire entre componentes, materiales y formas constructivas de los componentes, acabados superficiales de los componentes); y la temperatura interior. En el capítulo “Caso Base” se muestra un cálculo de carga por techo en versión comprimida. Las principales ecuaciones que permiten cuantificar esta carga son:

$$Q_{\text{roof}} = U_{\text{roof}} * A * \Delta T = U_{\text{roof}} * A * (T_{\text{sol-air}} - T_{\text{in}})$$

$$T_{\text{sol-air}} = T_o + \alpha_s * q_{\text{solar}} / h_o - \epsilon * \sigma * (T_o^4 - T_{\text{surr}}^4) / h_o \text{ ref. [109]}$$

$$T_{\text{surr}} = T_{\text{sky}} = (T_o + 273) * [0.711 + 0.0056 * T_{\text{dp}} + 7.3E-5 * T_{\text{dp}}^2 + 0.013 * \cos(2t/24)]^{1/4} \text{ ref. [109]}$$

donde U_{roof} = coeficiente global (inverso de resistencia total); T_{in} = temperatura interior; T_o = temperatura ambiente; α_s = absorptividad solar; q_{solar} = radiación solar incidente; ϵ = emisividad de la superficie; σ = constante

de Stephan – Boltzmann; h_o = coeficiente combinado de convección y radiación; T_{surr} = temperatura cielo (este caso); T_{dp} = punto de rocío; t = hora del día en formato 24 horas.

Carga por Muros: Se entiende por muros o paredes las estructuras verticales que separan el ambiente interior del exterior, y que pueden estar sometidas a radiación solar. Las “particiones”, en cambio, separan ambientes interiores acondicionados de los no-acondicionados. Una división física entre dos ambientes acondicionados se considera inexistente o, mejor, representa un aislamiento total, pues no hay allí transferencia de calor. El calor que se cuela a través de un muro es una carga sensible: una fracción originada por la radiación directa del sol y el resto por convección, debido a la diferencia de temperatura aire exterior-aire interior. Al igual que en los techos, es claro que el efecto de un rayo de sol incidente sobre un muro no es inmediato en el interior; ese efecto se demora dependiendo de la cantidad de calor que la pared sea capaz de almacenar y de las propiedades conductivas o aislantes de sus distintos componentes. Igual que en el caso anterior, este es un problema complejo, y para resolverlo se aplica el concepto $T_{sol-air}$. El aporte instantáneo de potencia calórica en la hora del diseño depende de varios factores, a saber: la radiación solar incidente (función de ubicación geográfica, mes, día, hora); fracción sombreada (función de obstáculos permanentes vecinos); vientos; temperatura exterior; orientación de la pared y su composición física (área, acabado y color exterior, componentes intermedios y sus materiales y formas constructivas, acabado interior); y la temperatura interior. En el capítulo “Caso Base” (*Base Case*), después de la carga por techo se muestra la correspondiente a muros. Las ecuaciones que cuantifican esta carga son las mismas que operan en el caso de techos, por su identidad funcional.

Carga por superficies acristaladas: Son superficies acristaladas aquellas expuestas a radiación solar directa y/o difusa, como ventanas, tragaluces, puertas acristaladas, etc. Igual que en los dos casos anteriores, el calor infiltrado es una carga sensible, pero a diferencia de ellos la penetración de los rayos es expedita y la demora en la conversión a carga efectiva es relativamente corta. También en ventanales y similares hay una fracción de transferencia de calor por convección, que obedece a la diferencia de temperaturas aire interior-aire exterior. La carga calórica por superficies acristaladas depende de varios elementos: radiación solar incidente (función de la ubicación geográfica, mes, día, hora); fracción sombreada (uso de persianas exteriores, cortasoles, aleros); fracción reflejada (uso de persianas interiores, cortinas); posición y orientación del vidrio, su número (sencillo, doble, triple), su tipo, espesor y color, material del marco, vientos, diferencia de temperatura interior/exterior. Toda superficie acristalada

deberá tenerse en cuenta en el software de cargas en aire acondicionado. Hay varias maneras de calcular la ganancia solar a través de las superficies acristaladas [110]; una forma condensada es mediante el empleo del “Solar Heat Gain Coefficient (SHGC)”, un conjunto de tabulados para diferentes acristalamientos, en cuyo caso la expresión de la carga es:

$$Q_{\text{cristales}} = \text{SHGC} * \text{Área} * \text{Radiación unitaria incidente.}$$

Carga por Ventilación: Por condiciones de salubridad, higiene, y para eliminación de olores, siempre es absolutamente indispensable cierta renovación del aire interior (ver capítulo “Calidad de Aire”). Para aire acondicionado este aire nuevo es caliente y húmedo, de modo que su procesamiento representa una carga sensible y otra latente, costosa en todos los órdenes. Una práctica desleal y atentatoria contra el usuario es disminuir o simplemente eliminar la renovación de aire. El problema es que, por un lado, detectar esta estafa no es fácil para una persona no familiarizada con estos sistemas, mientras que por otro lado el “ahorro” logrado en tamaño y capacidad de enfriamiento engaña al inocente, quien piensa que el equipo le salió “bueno y barato”. Los equipos minisplit recirculan el 100% del aire, es decir, no hacen renovación de aire. Los valores de caudales de aire nuevo necesario pueden buscarse en el capítulo “Calidad del aire”, en la Tabla 4.13, Tasas Mínimas de Ventilación en Zonas de Respiración, resumen extraído del ANSI/ASHRAE Standard 62.1 de 2016, o en otras referencias. Para el Caso base (ver capítulo) se utilizó una tabla del Engineering Tool Box, ref. [603], que hace sus recomendaciones en ACH’s (número de renovaciones por hora). De acuerdo con la Figura 1.5, capítulo “Fundamentos”, las cargas sensibles y latente se pueden calcular mediante $Q_s = m * \Delta h_{\text{sensible}}$ y $Q_{\text{lat}} = m * \Delta h_{\text{latente}}$. O también, con base en aire estándar (densidad 1.2 kg/m³ y Cp 1.005 kJ/kg*°C) y entalpía de evaporación del agua 2.51 kJ/gr. Las expresiones generalmente utilizadas para cuantificar dichas cargas son:

$$Q_s = 1.21 * V * \Delta T$$

$$Q_{\text{lat}} = 3.01 * V * \Delta w,$$

donde Q [kW]; V caudal [m³/s]; ΔT [°C]; Δw cambio humedad [gr/kg]

Carga por Infiltraciones: Cuando existen aberturas (rendijas, o aperturas-cierres de puertas) se dan ingresos de aire ambiente al espacio acondicionado. Al igual que el aire de renovación, este aire caliente y húmedo

significa una carga sensible y otra latente si se usa AA. En algunos casos, especialmente cuando el cinismo del instalador tiene cotas altas, se alega que estas infiltraciones cumplen el papel de la renovación necesaria. Las ecuaciones para valorar las cargas sensible y latente de las infiltraciones son las mismas que las utilizadas por la renovación, ya que los procesos son equivalentes. Para cuantificar los caudales de infiltración están disponibles tablas en los manuales de aire acondicionado, ref. [7], que necesitan las condiciones de las ranuras (tipo, longitud), viento frontal, dimensiones de las puertas y frecuencia de uso.

Carga por Iluminación: El alumbrado es una carga sensible. Las luminarias emiten calor por radiación y por convección, siendo la primera fracción sometida a almacenamiento, pues es absorbida por los objetos y materiales sólidos, lo que representa una demora en convertirse en carga efectiva. Para evaluar este aporte energético se requiere tener claro cuáles son la potencia lumínica total instalada, el factor de diversidad (% de lámparas efectivamente en uso) y el tipo de luminarias (con el factor a aplicar a la potencia nominal para tener en cuenta elementos complementarios). La ecuación que cuantifica esta carga es:

$$Q_{\text{luminarias}} = \text{Potencia nominal} * \text{factor tipo} * \text{factor diversidad},$$

donde factor tipo es 1 para incandescente y 1.25 fluorescente.

Carga por Personas: Los ocupantes de un espacio acondicionado con manejo de temperatura y humedad son carga sensible y carga latente. Al ser su temperatura alta calientan, y al sudar y respirar humectan el aire ambiente, aportando en ambos órdenes. Para cuantificar estas contribuciones es menester conocer el número de ocupantes efectivo a la hora del proyecto (ello es, valor nominal y factor de diversidad), y su ocupación (por lo del metabolismo). Los valores que muestran estos aportes están dados por la Tabla 5.3, a continuación.

Carga por Equipos Diversos: Los distintos utensilios que se manejan son fuente de ganancias sensibles y/o latentes. Una buena parte de ellos (estufas, cafeteras, planchas, freidoras, cafeteras, calentaplatos, etc.) entregan importantes cargas de ambos tipos, pero su efecto puede ser fuertemente disminuido mediante el uso de campanas de extracción bien dimensionadas. En ambientes industriales se contabilizan motores, tanques cerrados o abiertos, máquinas impulsadas desde dentro o desde fuera, tuberías y ductos aislados o no-aislados, procesos de lavado o deshidratación, lavadores, esterilizadores, alambiques, aparatos de radiografía o radioscopia,

mecheros, etc. En oficinas y viviendas se pueden inventariar equipos de cómputo, electrodomésticos, periféricos, etc. Para cuantificar sus cargas se deben usar los catálogos (si están disponibles) o las potencias nominales de placa, y/o las tablas recopiladas por los fabricantes y las asociaciones. A continuación se tabulan, en la Tabla 5.4, unos equipos de uso corriente (compendio de ref. [7] y [110]).

Tabla 5.3. Carga calórica debido a las personas [7] y [110].

Activi- dad	Carga por personas [W]									
	Temperatura local									
	21°C		24°C		26°C		27°C		28°C	
	Sensible	Latente	Sensible	Latente	Sensible	Latente	Sensible	Latente	Sensible	Latente
Sentado reposo	76	27	67	35	62	41	57	45	51	51
Sentado trabajo suave	79	37	70	47	63	53	56	60	52	64
Sentado trabajo normal	83	49	71	60	63	69	58	73	52	79
De pie quieto	85	62	74	72	64	83	58	88	52	94
Caminar lento	85	62	74	72	64	83	58	88	52	94
De pie trabajo suave	107	113	86	134	72	148	64	156	56	164
Baile	117	131	95	153	80	169	72	177	64	185
Marcha	135	158	112	181	97	197	88	205	79	214
Trabajo duro	177	248	154	271	142	283	136	288	131	293

Tabla 5.4. Cargas calóricas de aparatos diversos.

	Ganancias calóricas por aparatos diversos [W]					
	Cafetera 10 lt	Freidora 10 lt	Parrilla asar carne 25*30 cm	Secador pelo con ventilador 1500W	Horno 3.5 a 6 kW	Calientapla- tos (por m ²)
Sensible	756	1100	1134	674	1326	2686
Latente	495	1657	610	116	1326	1420

Carga por la Propia Instalación: Los sistemas electro-mecánicos adquiridos e instalados consumen energía eléctrica que generalmente termina como aporte calórico, pero además, cuando hay elementos expuestos (duc-

tos o tuberías con o sin aislante) al ambiente exterior, se capturan ganancias indeseables. Los motores eléctricos que mueven bombas y ventiladores hacen sus aportes dependiendo, tal como se explicó en el punto anterior, de si sus transmisiones van adentro o vienen desde afuera del espacio acondicionado. Aquí un inconveniente es que como apenas se está en el proceso de diseño, no se conocen las potencias a consumir, y se debe hacer un estimado de ellas, y al final, después de seleccionados los equipos, verificar que tales estimados estuvieran correctos, y rectificar, si amerita. Una primera y rápida opción para ventiladores y bombas es basarse en los valores obtenidos en la aproximación *grosso modo* que se ejecutó inicialmente. En el caso de ganancias en ductos y tuberías en exteriores, habrá que dimensionarlos y estimar la longitud expuesta, para después aplicar los catálogos del fabricante de aislamientos (los que están provistos de tablas para calcular fugas de calor). Otra posibilidad está incluida en los distintos softwares de cálculo de carga, los que siempre disponen de la herramienta para incluir estas cargas. En la literatura técnica también hay otras ofertas, (Ver ref. [7]), donde las cargas de la propia instalación se prevén como un porcentaje de las ganancias sensibles del local.

CASO BASE (*BASE CASE*)

Como ilustración de los diversos procesos paso a paso que se siguen en el desarrollo de un proyecto de climatización de un edificio, hemos seleccionado un caso minuciosamente estudiado y valorado (ref. [111], tesis de maestría de Alejandro Macías, IM, MSc.; director Carlos Herrera, PhD). La secuencia a seguir en esta presentación es: enunciar el problema y caracterizarlo; diagnosticarlo (cuantificando cargas calóricas e índice de confort); encontrar soluciones y estudiar su impacto; y cotejar alternativas a seguir mediante comparación técnico-económica. En este capítulo se presentan los dos primeros ítems; los últimos se desarrollan en los capítulos dedicados a esos temas.

El Problema

El proyecto se enfoca a solucionar el disconfort térmico (ambiente caliente) que en las horas de la tarde presenta una vivienda.

CARACTERIZACIONES

Características del inmueble, testimonios de los interesados e informaciones de campo: vivienda de 1.5 años de construida; 2 niveles; área lote 330 m²; área 1er piso 157 m²; área 2º piso 128 m²; 4 personas. Los habitantes reportan que la pared oeste se siente caliente al tacto pasando el medio día, esta pared presenta repello rústico exterior sin pintar; la fachada posterior tiene buen acabado, pero numerosos ventanales (algunos no se pueden abrir); la fachada principal no recibe sol directo, pero sí el reflejado por la calle y la vivienda vecina; tiene considerable área de ventanales y puertas. Áreas de interés: sala nivel-1 (35,4 m²); sala nivel-2 (11,7 m²); alcoba posterior nivel-2 (13,4 m²). Ver Figura 6.1.



Figura 6.1. Planos (a) Nivel 1 y (b) Nivel 2.

Datos: volumen total salas: 220 m³; volumen alcoba posterior: 46,8 m³; área pared oeste (soleada): 54,25 m²; área pared fachada salas: 1,8 m²; área ventanas fachada salas: 16,3 m²; área pared fachada alcoba posterior: 3,1 m²; área ventanas fachada alcoba posterior: 3.8 m²

Condiciones Interiores:

Observadas: clo 0.6; met 1.1; vel. 0.5 m/s (brisa suave).

A determinar: temperatura y humedad relativa del aire; temperatura media radiante; hora crítica.

Condiciones Exteriores:

Localización: Bugalagrande / Valle / Colombia.

Longitud: 76° 09' 23" W

Latitud: 4° 12' 35" N

Altura: 963 msnm / presión atmosférica: 90,28 kPa

Temperatura media anual: 23°C

Temperatura máxima absoluta: 36°C

Promedio de temperaturas a las 15:00 h: 32°C

Humedad absoluta promedio: 0,014 kg H₂O / kg Aire seco

Humedad relativa a la hora de temperatura máxima: 42%

Orientación y ubicación planimétrica: mostrada en la *Figura 6.2*

Vientos: la rosa de los vientos publicada por el IDEAM se muestra en la *Figura 6.3*; su aplicación a la edificación se ilustra en la *Figura 6.4*.



Figura 6.2. Localización del Edificio.

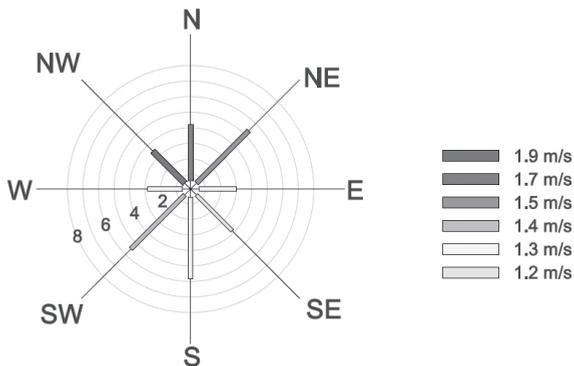


Figura 6.3. Rosa de los vientos para Bugalagrande.

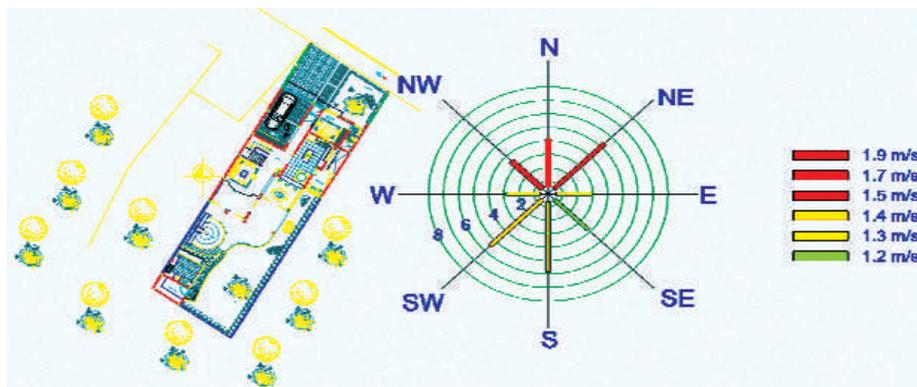


Figura 6.4. Incidencia de vientos sobre la edificación.

La configuración de las fachadas, pertinentes en el análisis solar y de vientos, se detalla en la Figura 6.5 y en la Figura 6.6.

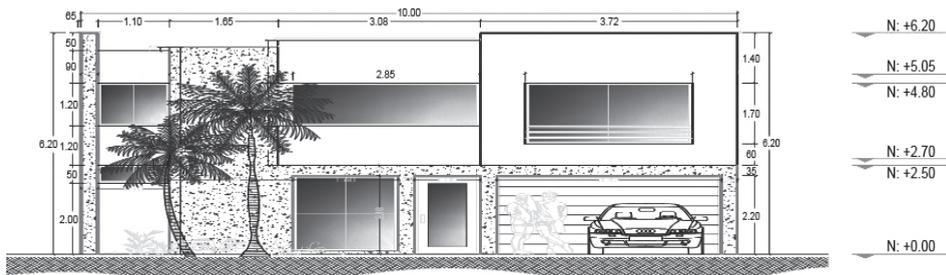


Figura 6.5. Plano fachada frontal (principal).

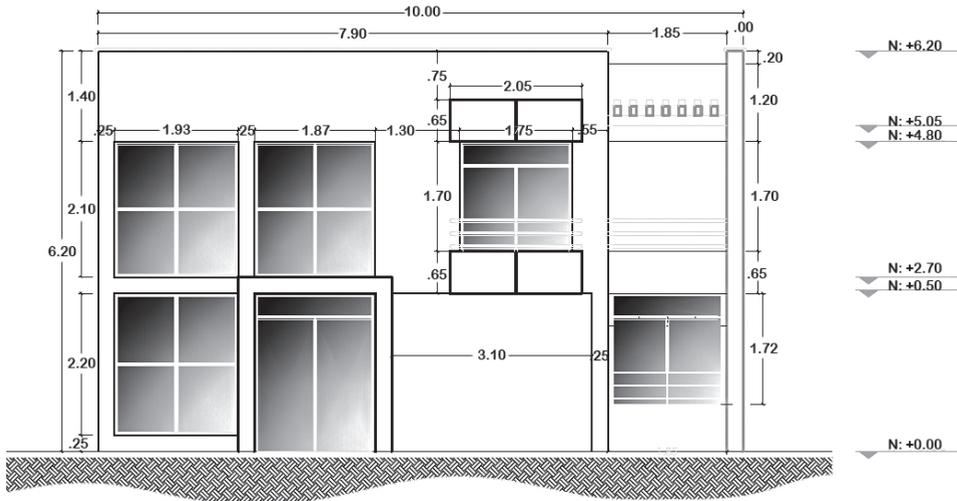


Figura 6.6. Plano fachada posterior.

Como se mencionó, la falta de confort se manifiesta en determinadas zonas o espacios de la vivienda, los cuales se ilustran en Figura 6.7.

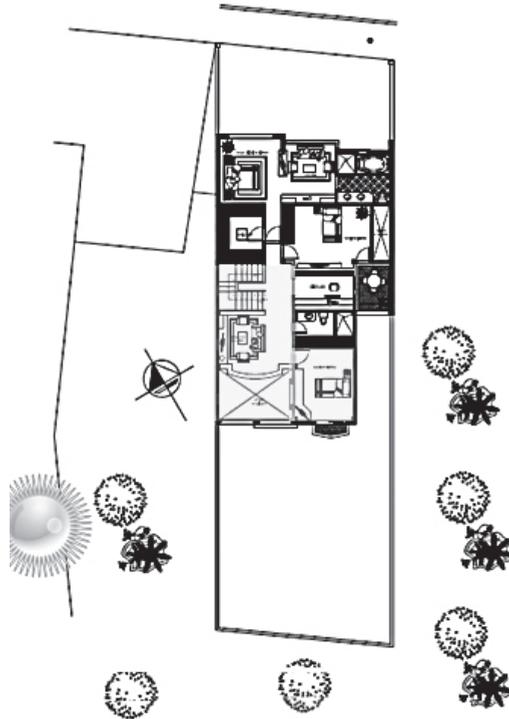


Figura 6.7. Área de Interés.

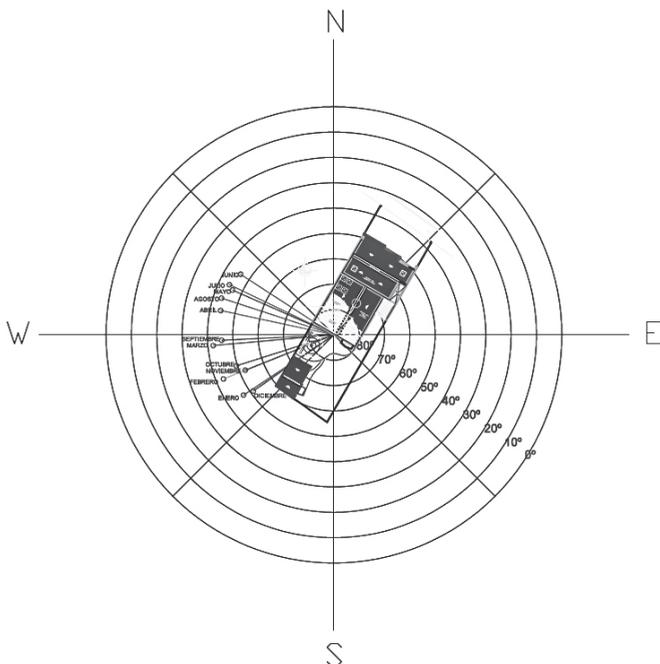


Figura 6.8. Trayectoria solar durante todo el año a las 14:00 h.

IDENTIFICACIÓN DE LA HORA CRÍTICA

Ya determinado marzo como el mes que se debe tomar como base (véase texto Figura 6.9), queda encontrar la hora crítica, la cual es también la hora de diseño del proyecto de mejoras. Esto corresponde aquí al momento en el que la carga solar es mayor, pues es visible que las demás cargas no varían. De las siguientes Tabla 6.1 y Figura 6.10 queda demostrado que la hora de diseño es marzo @ 14:00, ya que la suma total de los calores transferidos es máxima a esta hora.

Tabla 6.1. Cálculo de incidencia solar para marzo 20, entre las 14:00 y las 16:00.
Modelo de cálculo: ASHRAE 2005, Fundamentals Chapter 31, Fenestration, Solar Heat Gain and Visible Transmittance.

Superficie	Hora local	
	14:00	16:00
Pared Sur	502,65	560,99
Pared Oeste	211,67	142,78
Techo inclinación Oeste	1132,58	860,12
Techo inclinado Este	215,40	126,59
Pared Este (No soleada)	157,51	110,95
Σ	2219,82	1801,43

Presione este hipervínculo para ver hoja de calculo

Irradiación terrestre	A	1164 W/m ²
Razón adimensional	B	0,149
Razón adimensional	C	0,109

Superficie	Pared sur	
Rhora standard	14:00	16:00
Altitud solar	β	63 33
Azimuth solar	ϕ	82 88
Azimuth superficie	ψ	30 30
Azimuth solar superficie	γ	52 58
Angulo de inclinación	σ	90 90

Ecuaciones modelo

$$\gamma = \Phi - \Psi$$

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma \sin \sigma + \sin \beta \cos \sigma$$

Razón de Radicación difusa del cielo	Y	0,696596164	0,80603766
--------------------------------------	---	-------------	------------

$$Y = 0,55 + 0,43 \cos \theta + 0,13 \cos^2 \theta$$

Radiación solar directa	E_{DN}	984,7531488	885,402096
-------------------------	----------	-------------	------------

$$E_{DN} = \frac{A}{e^{B/\sin \beta}} \frac{W}{m^2}$$

Radiación solar difusa	E_d	74,77130404	77,7897502
------------------------	-------	-------------	------------

$$E_d = CYE_{DN} \frac{W}{m^2}$$

Radiación solar reflejada	E_r	152,6376682	89,7036295
---------------------------	-------	-------------	------------

$$E_r = E_{DN}(C + \sin \beta) \rho_g \frac{1 - \cos \sigma}{2} \frac{W}{m^2}$$

$$E_t = E_{DN} \cos \theta + E_d + E_r$$

Subtotal		502,6523469	560,990909
-----------------	--	-------------	------------

Sunpath para la fachada motivo de estudio en Diciembre 21, Marzo 20 y Junio 21 @ 15:00 horas para establecer el mes crítico de carga térmica por radiación solar. Aquí es visible que en Marzo la incidencia solar afecta simultáneamente las fachadas sur y occidente mientras que Diciembre y Junio solo afectan una de las fachadas

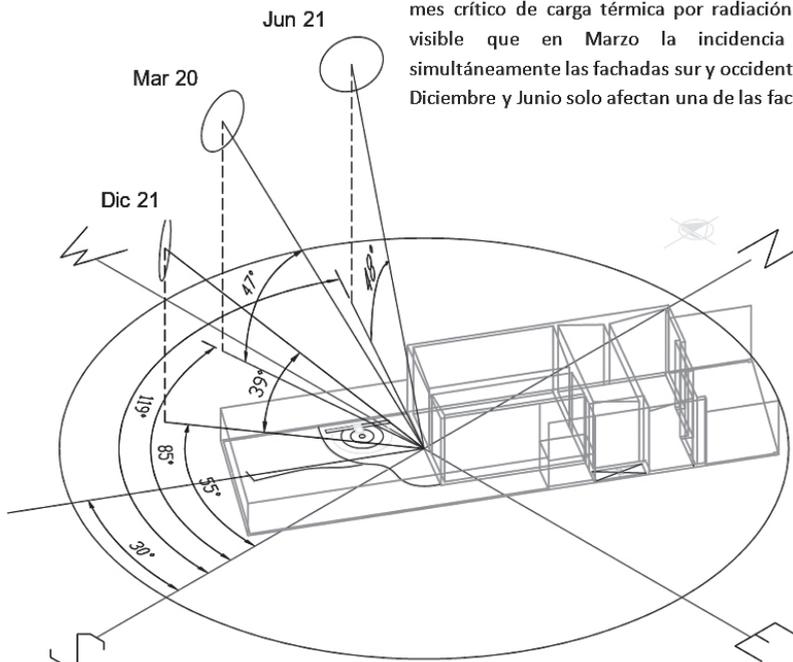


Figura 6.9. Trayectoria solar: comparativos para establecer mes crítico de carga térmica.

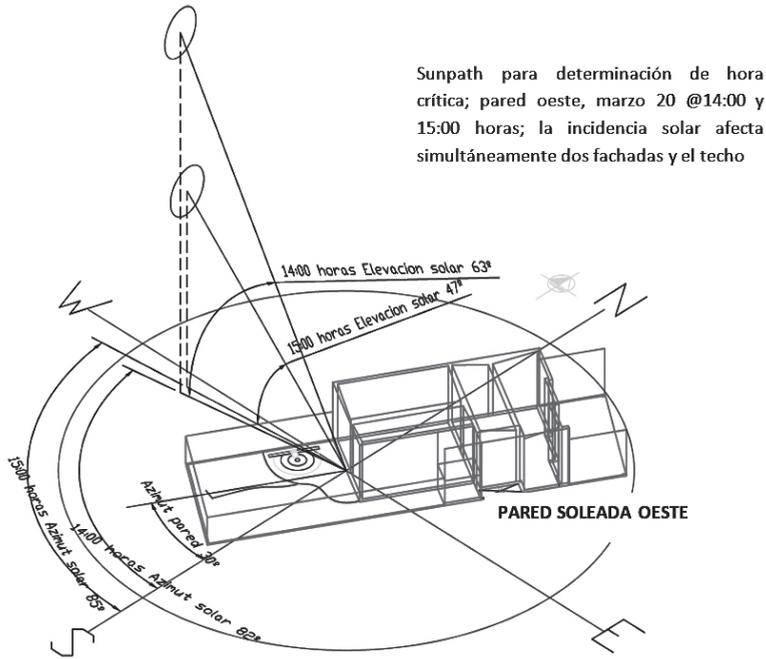


Figura 6.10. Trayectoria solar: comparativos para establecer hora crítica de carga térmica.

Tabla 6.12. Ilustración de Base de datos Engineering ToolBox [75].

The Engineering Toolbox
 www.EngineeringToolBox.com

Thermal Conductivity - k - $W/(m.K)$	
Air, atmosphere (gas)	0.024
Asphalt	0.75
Brickwork, common	0.6 - 1.0
Wood, oak	0.17

Temperature - t - ($^{\circ}C$)	Density - ρ - (kg/m^3)	Specific heat capacity - C_p - ($KJ/Kg.K$)	Thermal conductivity - k - ($W/m.K$)	Kinematic viscosity - ν - $\times 10^{-6}(m^2/s)$	Expansion coefficient - β - $\times 10^{-3}(1/K)$	Prandtl's number - P_r -
60	1.067	1.009	0.0285	18.90	.300	0.709
80	1.000	1.009	0.0299	20.94	2.83	0.708
100	0.946	1.009	0.0314	23.06	2.68	0.703
120	0.898	1.013	0.0328	25.23	2.55	0.70
140	0.854	1.013	0.0343	27.55	2.43	0.695

EL DIAGNOSTICO

El diagnóstico comprende dos aspectos: cuantificar el índice de confort (que debe corroborar el malestar de los ocupantes) y cuantificar las causas del deterioro ambiental (las cargas calóricas). Para calcular el índice falta conocer la temperatura y la humedad del interior, así como la temperatura media radiante. Esta última, función de las temperaturas interiores de muros, techo y piso, puede conocerse en el proceso de cálculo de las cargas calóricas provenientes de afuera. Para la humedad, como no hay climatizadores y los calores son sensibles, la humedad absoluta interior es la misma del exterior. La temperatura interior se considera la de diseño inicial, 27°C. Las propiedades térmicas del aire, disponibles en muchas fuentes, se muestran en la Tabla 6.2

Se procede entonces inmediatamente a determinar cargas calóricas interiores y exteriores, llamémoslas originales, de acuerdo con las directrices del capítulo correspondiente. Es visible que todos estos calores son sensibles, y provienen de techos, muros, ventanas, personas y equipos. Los primeros se ven en la Figura 6.11.

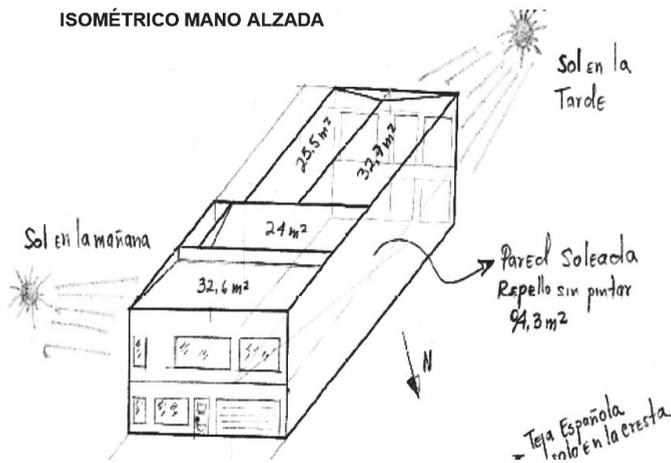


Figura 6.11. Isométrico mano alzada del edificio CASO BASE.

Carga por techos

Según el capítulo “Carga Térmica”, las ecuaciones para este cálculo son:

$$Q_{\text{roof}} = U_{\text{roof}} * A * \Delta T = U_{\text{roof}} * A * (T_{\text{sol-air}} - T_{\text{in}})$$

$$T_{\text{sol-air}} = T_o + \alpha_s * q_{\text{solar}} / h_o - \epsilon * \sigma * (T_o^4 - T_{\text{surr}}^4) / h_o$$

$$T_{surr} = T_{sky} = (T_o + 273) * [0.711 + 0.0056 * T_{dp} + 7.3E-5 * T_{dp}^2 + 0.013 * \cos(2t/24)]^{1/4},$$

donde U_{roof} = coeficiente global (inverso de resistencia total); T_{in} = temperatura interior; T_o = temperatura ambiente; α_s = absortividad solar; q_{solar} = radiación solar incidente; ϵ = emisividad de la superficie; σ = constante de Stephan - Boltzmann; h_o = coeficiente combinado de convección y radiación; T_{surr} = temperatura cielo (este caso); T_{dp} = punto de rocío; t = hora del día en formato 24 horas; A = área, ver Figura 6.11.

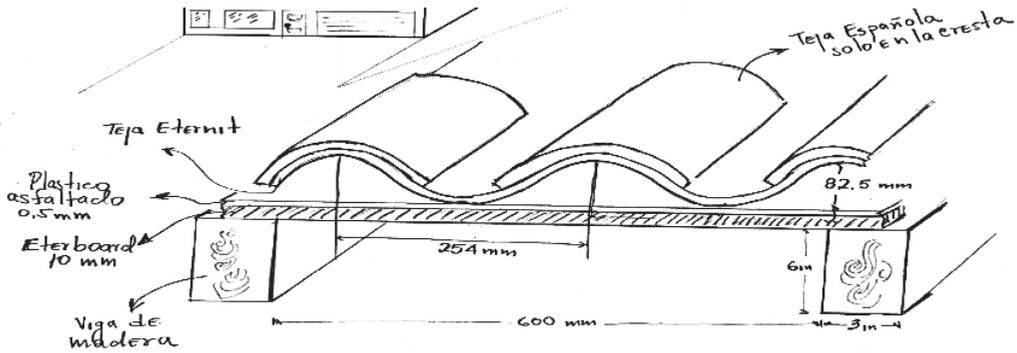


Figura 6.12. Modelamiento del techo.

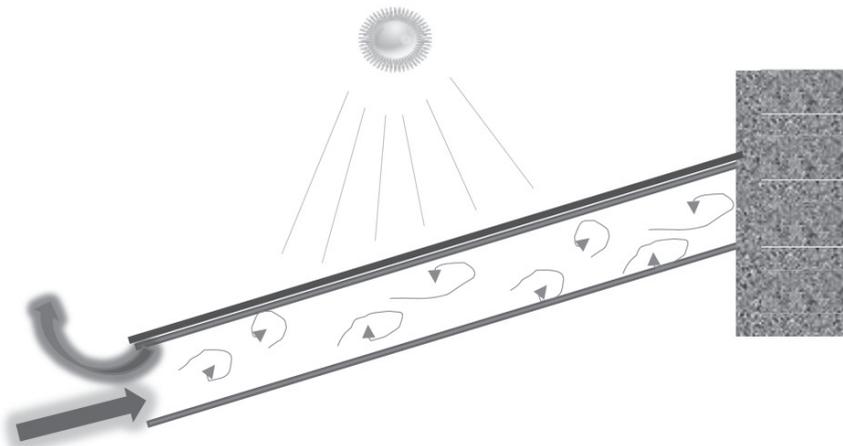


Figura 6.13. Modelamiento convección en el entretecho causado por radiación solar.

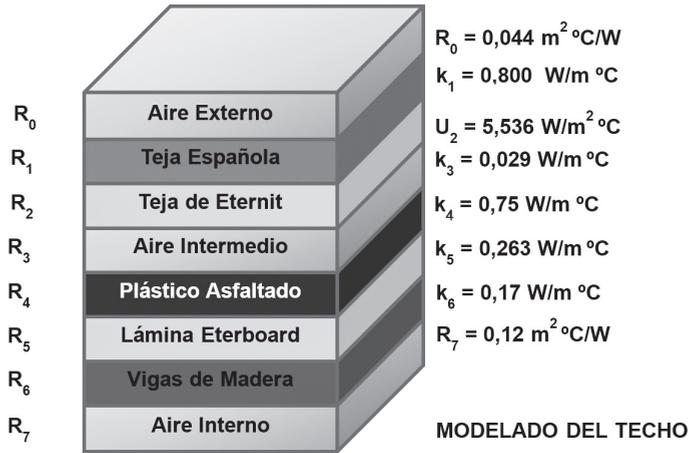


Figura 6.14. Analogía de la resistencia térmica según configuración de la cubierta.

Según la disposición de la techumbre sobre el área de interés, esta se divide en techo sala (36.3 m^2) y techo alcoba (13.4 m^2). Del procesamiento matemático basado en la modelación mostrada en las Figura 6.12, Figura 6.13, y Figura 6.14 se establece $U_{\text{roof}} = 1.619 \text{ W/m}^2\text{K}$. Por otro lado, $T_o = 32^\circ\text{C}$; $\alpha_s = 0.73$; $q_{\text{solar}} = 1132,58$ y $860,12 \text{ W/m}^2$ (techo con la normal hacia el oeste y el este respectivamente); $\varepsilon = 0.9$ (superficies comunes); $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$; $h_o = 10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ (vientos moderados); $T_{\text{dp}} = 17.5^\circ\text{C}$ (carta psicrométrica); $t = 14:00$, resultando

	Techo sala	Techo alcoba
T_{sky}	$292.4\text{K} = 19.4^\circ\text{C}$	$292.4\text{K} = 19.4^\circ\text{C}$
$T_{\text{sol-air}}$	71.5°C	127.1°C
Q_{roof}	2618.5 W	2172.4 W

Pero también, por balances interiores (para estimar la temperatura media radiante):

$$T_{\text{sup.int.techosala}} = Q_{\text{roof}sala} \cdot h_i / A_{\text{sala}} + T_{\text{in}} = 2618.5 \cdot 0.12 / 36.3 + 27 = 35.6^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{sup.int.techoalcoba}} = Q_{\text{roofalcoba}} \cdot h_i / A_{\text{alcoba}} + T_{\text{in}} = 2172.4 \cdot 0.12 / 13.4 + 27 = 46.4^\circ\text{C}$$

Carga por muros

En las figuras que ilustran las trayectorias solares se puede distinguir que, relacionadas con el sitio de interés, hay tres paredes aportando carga: pared soleada Oeste, pared soleada Sur, y pared no-soleada Este. Procediendo

como se indica en el capítulo “Carga Térmica”, estas cargas por muros se cuantifican mediante análisis y ecuaciones análogas a los realizados para los techos.

Pared soleada Oeste: su área de influencia, hacia las salas, es de 54.2 m^2 y se modelará de acuerdo con el esquema de la Figura 6.15. Todos los valores fueron tomados de las tablas 7, 21-6, 21-10 y 21-12, Capítulo 21, ref. [605]. El valor de la potencia radiante incidente, incluyendo la radiación difusa, es $211,67 \text{ W/m}^2$. Una característica de esta pared es que forma un espacio triangular con la pared vecina, y por tal motivo la temperatura de los alrededores iguala la temperatura ambiente y será la que se tome como T_{surr} . En las otras paredes se asume igual, dadas sus geometrías y ubicaciones.

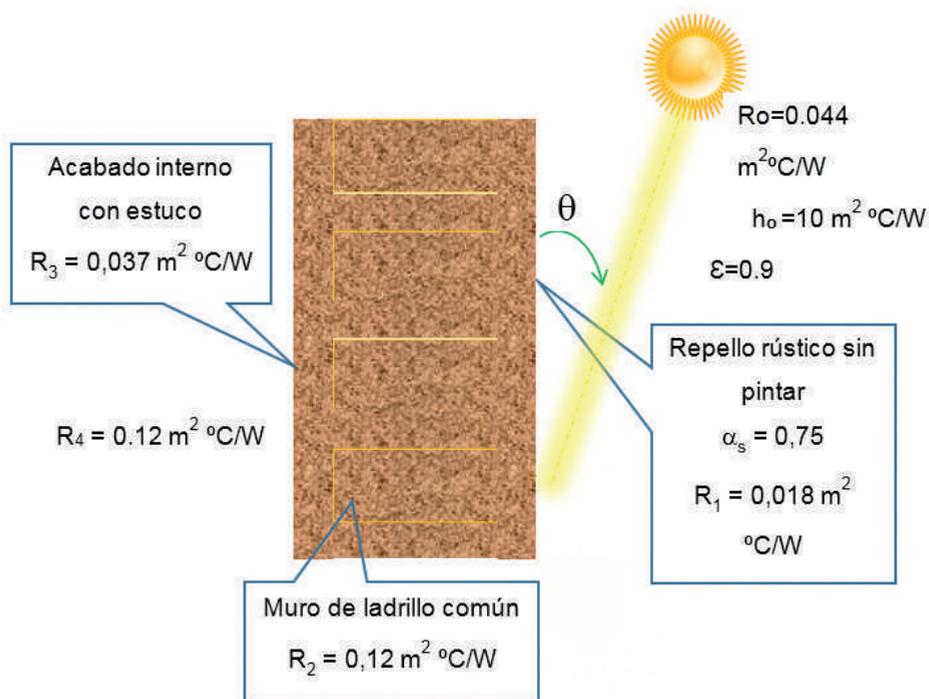


Figura 6.15. Pared Oeste.

Pared soleada Sur: la potencia radiante incidente total es $502,65 \text{ W/m}^2$. El área de esta pared, después de restar ventanas, es de 11.9 m^2 hacia las salas y 7.9 m^2 hacia la alcoba posterior.

Pared no-soleada Este: Como aquí el azimut de la pared es -60° , solo debemos tener en cuenta la radiación difusa y la reflejada, cuyo valor es $157,5 \text{ W/m}^2$. El área de esta pared, perteneciente a la alcoba, es de 14.2 m^2 .

Resultando:

Tabla 6.3. Cargas y parámetros físicos de muros.

	Soleada Oeste (salas)	Soleada Sur (salas y alcoba)	No-soleada Este (alcoba)
U [W/m ² K]	2.95	2.79	2.79
T _{sol-air} [°C]	46.5	68.5	37.7
Q _{wall} [W]	3154.7	208.4 y 364.7	422.4
T _{sup.int.muro} = Q _{muro} * hi / A + T _{in}	34°C	40.9°C	30.5°C

Carga por superficies acristaladas. Toda la ventanearía bajo estudio es radiada por el sol. El vidrio es estándar de 3 mm de espesor, para el cual es común usar un valor de SHGC (Solar Heat Gain Coefficient) de 0.87 ref. [605]. El q_{solar} para esta fachada es de 502.7 W/m², el cual se puede ver en la Tabla 6.1. La ecuación a usar entonces para este caso es: $Q_{\text{vidrio}} = \text{SHGC} * A * q_{\text{solar}}$. De la recopilación de datos recordemos que el área de la ventanearía para las salas es 16.3 m² y para la alcoba posterior de 3.8 m². Con lo anterior:

$$Q_{\text{window-sala}} = .87 * 16.3 * 502.7 = 7128 \text{ W}; \text{ y } Q_{\text{window-room}} = .87 * 3.8 * 502.7 = 1662 \text{ W}$$

Carga por personas. Según Tabla 2.1, Fundamentals ASHRAE, la carga de una persona sentada quieta es 60W/m², para una persona de 1.72 m y 70 kg de peso. Según fórmula de la misma referencia anterior, el área corporal es 1.82 m², pero la ropa incrementa el área corporal hasta en un 50%. Por tanto, en la situación original de cada local, con cuatro personas presentes, las cargas son $Q_{\text{people-sala}} = Q_{\text{people-alcoba}} = 4 * (1.82 * 1.5) * 60 = 656 \text{ W}$.

Carga por equipos. No es requerido el encendido de luces (día); no hay factores de frecuencia pues se considera uso durante la hora de análisis. Los equipos en cuestión son: televisor: 300W, decodificador: 75W, teatro en casa: 75W, computador: 250W. Total = 700W.

El resumen discriminado de cargas calóricas totales se aprecia en la Tabla 6.4.

Para el cálculo del índice de confort se inventarían las temperaturas superficiales internas de los diversos espacios, Figura 6.16, a partir de las cuales se determina la temperatura media radiante, Figura 6.17. Con estos insumos se puede ya calcular el PMV = 1.7, y PPD = 63 %, Figura 6.18. Tal como se esperaba, coherente con el testimonio de los habitantes, el ambiente interior es sofocante.

Tabla 6.4. Resumen de cargas calóricas originales totales (salas + alcoba).

	Carga (w)	Sensibles (%)	Latentes (%)
Exteriores	Techos	4791 (24%)	-
	Muros	4150 (21%)	-
	Cristales	8790 (45%)	-
	Infiltraciones	-	-
Interiores	Ocupantes	1311 (7%)	-
	Alumbrado	-	-
	Aparatos diversos	700 (3%)	-
	Instalación	-	-
Carga del local	Rsh 19742 (100%)	Rlh	
		Rth 19742 (100%)	
Carga de ventilación	Oash	Oalh	
	Oath		
Carga total	Tsh 19742 (100%)	Tlh	
	Gth 19742 vatios (100%)		

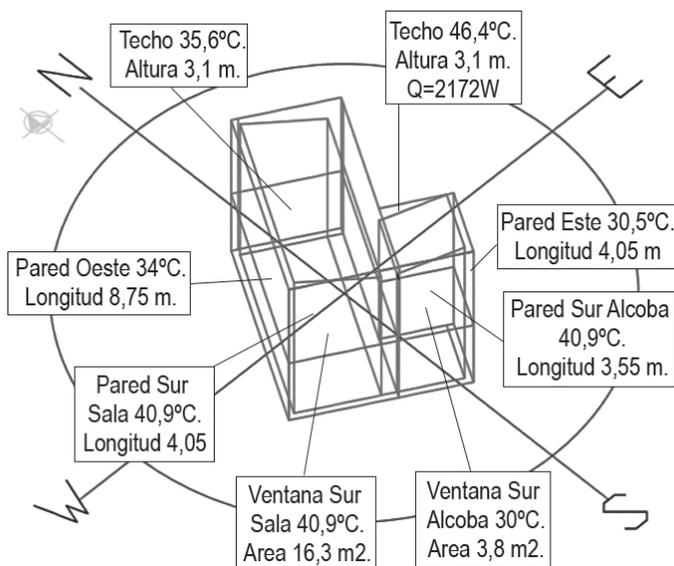


Figura 6.16. Temperaturas (originales) en las diversas superficies.

MEAN RADIANT TEMPERATURE CALCULATION

! WARNING ! Please use comma mark as a decimal separator

ROOM WIDTH a (m)	4,05
ROOM LENGTH b (m)	8,75
CEILING HEIGHT c (m)	3,1
RIGHT WALL DISTANCE d (m)	2,02
LEFT WALL DISTANCE e (m)	2,02
FRONT WALL DISTANCE f (m)	4,37
BACK WALL DISTANCE g (m)	4,37
CEILING TEMPERATURE (°C)	35,6
FLOOR TEMPERATURE (°C)	30
RIGHT WALL TEMPERATURE (°C)	34
LEFT WALL TEMPERATURE (°C)	30
FRONT WALL TEMPERATURE (°C)	40,9
BACK WALL TEMPERATURE (°C)	30

CALCULATE

MEAN RADIANT TEMPERATURE (°C)

29,55093

BACK

Figura 6.17. Cálculo de t_{mr} original.

FANGER MODEL FOR COMFORT CALCULATION

! WARNING ! Please use colon mark as a decimal separator

METABOLIC RATE (Met)	Choose Metabolic Rate Value	1
RELATIVE HUMIDITY (%)		42
AIR TEMPERATURE (°C)		32
CLOTHING INSULATION I _{cl}	Choose Clothing Insulation Value	0,6
CLOTHING FACTOR F _{cl}		1,1
INDOOR RELATIVE AIR SPEED (m/s)		0,2

PRESS TO CALCULATE MEAN RADIANT TEMPERATURE

Predicted Mean Vote PMV: 1,727665

Percentage of People Dissatisfied PPD: 63,2272

0.8 m/s is recommended as an upper limit. Above this value, loose papers may be disturbed!

MEAN RADIANT TEMPERATURE CALCULATION (°C): 28,77746

CALCULATE **CLEAR** **EXIT** **SHOW PICTURE**

Figura 6.18. Cálculo de PMV/PPD originales.

CALIDAD DE AIRE INTERIOR Y ANÁLISIS DE LOS PRIMEROS RESULTADOS

Después de esta valoración, dejemos claras las necesidades de aire nuevo para cumplir requerimientos IAQ. Los volúmenes de sala y alcoba son respectivamente 220 m^3 y 46 m^3 ; del Engineering Tool Box, [75], el número de renovaciones por hora ACH es de 5 para ambos tipos de cuarto. Luego, los caudales de renovación base ACH son:

$$\text{ACH}_{\text{salas}} = 5 \cdot 220 = 1100 \text{ m}^3/\text{h}; \text{ y } \text{ACH}_{\text{alcoba}} = 5 \cdot 46 = 230 \text{ m}^3/\text{h},$$

que suman $1330 \text{ m}^3/\text{h}$.

Por otro lado, haciendo el cálculo basado en el flujo de aire F requerido para evacuar una carga térmica tenemos:

$$F = Q/(\rho \cdot C_p \cdot \Delta T),$$

siendo $= 19742 \text{ W}$; $= 1.01 \text{ kg}/\text{m}^3$, $C_p = 1.005 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$. ΔT es el aumento de temperatura a incurrir, que se escoge como valor razonable 3°C . De acuerdo con ello:

$$F_{\text{salas}} + F_{\text{alcoba}} = 3600 \cdot 19.74 / (1.01 \cdot 1.005 \cdot 3) = 23337 \text{ m}^3/\text{h}$$

Es preocupante que los requerimientos de aire para mantener condiciones térmicas razonables en los cuartos sean más de 17 veces mayores que el ACH, o aire requerido para respiración. Otra inquietud radica en que la potencia calórica calculada roza los veinte kilovatios, lo cual es como tener veinte planchas prendidas simultáneamente en ese espacio. Así se explica que el flujo necesario para evacuar semejante cantidad de calor sea desmesurado. Y claro está, permite vislumbrar que las condiciones térmicas tenían que estar seriamente deterioradas.

CAPACIDAD DE RENOVACIÓN DE AIRE POR VENTILACIÓN NATURAL

Para calcular el flujo de aire disponible en la habitación con fuente ventilación natural, se hizo uso del método empírico NORMA, ref. [112]. Para tal fin se implementó una “macro” que solo necesitaba el ingreso de los parámetros pertinentes, a saber:

Salas: cuentan con cinco ventanas de las cuales dos no se pueden abrir. En las otras tres se tiene: Ventanas 1 y 2, con altura y ancho disponibles c/u : 2,40 m y 0,86 m; área total ingreso disponible, 4,12 m²; ventana 3, altura y ancho disponibles 2,40 m y 0,9 m; área total salida disponible: 2,16 m².

Alcoba: una ventana, con altura y ancho disponibles de 2,40 m y 0,86 m; área total disponible de 2,06 m². La salida del aire es la puerta de la alcoba, cuya altura es de 2,1 m y el ancho es de 0,75m.

Se usa el método NORMA de “Cross ventilation”, ref. [112], caso en que el área de la entrada de aire es mayor al área de salida del aire. La intensidad del viento es muy baja y proviene desde el Sur y el Sureste con una frecuencia de 6% y 1,4 m/s en promedio. Se asume una velocidad de viento de 1 m/s. La fachada es más ancha que alta, por lo que la relación de forma R es 2:1. Con estos elementos ya se puede calcular el flujo de aire disponible. La Figura 6.19 muestra el resultado para las salas.

Natural Ventilation Calculator

NORMA Single Sided | NORMA Cross Ventilation |

Due To Wind Only With 0 < Inlet Openings / Outlet Openings <= 1 | Due To Wind Only With 1 < Inlet Openings / Outlet Openings <= 2 | Only Stack Effect | Combined Wind Effect + Stack Effect |

WARNING! Please use comma mark as a decimal separator

Room Heat Load (kW)	14,1	Average Outside Temperature (°C)	32
Height Above Sea Level (m)	960	Wind Speed (m/s)	0,5
Room Volume (m3)	220		
Room Inlet Height (m)	2,4	Cp1 Windward Facade	0,4
Room Inlet Width (m)	0,86	Cp2 Leeward Facade	-0,35
Room Same Sized Inlets Quantity	2	Show Cp1 Values	
Room Outlet Height (m)	2,4	Show Cp2 Values	
Room Outlet Width (m)	0,86		
Room Same Sized Outlets Quantity	1		

Air Flow Requirement (m3/h) 15728,379836

Air Flow Available (m3/h) 2059,8842486

Air Flow Changes Per Hour Available (ACHa) 9

Additional Mechanical Air Flow Requirement (m3/h) 13668,495586

CALCULATE CLEAN EXIT

Figura 6.19. Disponibilidad de aire fresco por ventilación natural en las salas.

Como se observa, en las salas el flujo de aire disponible por ventilación natural es 2060 m³/h; el aire requerido es de 15728 m³/h. En el caso de la alcoba, la ventilación cruzada provee 2590 m³/h de flujo de aire, frente a un requerimiento de 6247 m³/h de aire. Tendríamos, pues, la necesidad

de suministrar por algún otro medio 17224 m³/h de aire (13668+3556) o las habitaciones seguirán calientes. Este requerimiento de aire, para la aplicación considerada, es inviable desde todo punto de vista ya que necesitaría de un ventilador con una demanda de potencia enorme, alrededor de 15 kW. Seguimos en lo mismo: la carga calórica es exagerada.

ESTRATEGIAS DE CLIMATIZACIÓN

Los objetivos de implementar sistemas de climatización son obtener IAQ y confort, pero la adquisición, el montaje y la operación de tales dispositivos exigen una inversión significativa de recursos. Además, por lo general siempre existen, o aparentemente existen, distintas formas para obtener lo deseado, en diferentes grados y con múltiples precios. Si a lo anterior se suman los intereses y las preferencias personales de dueños, directores de obra, consejeros, ingenieros, etc., se tiene un panorama complejo del cual solo puede derivarse una única decisión. Para la elección, parece claro, se deberá disponer de una parrilla de comparación donde las alternativas competidoras muestren sus ventajas técnicas y económicas. Este capítulo indica los fundamentos que permiten elaborar las distintas propuestas de climatización desde una perspectiva técnica. La condición de calidad de aire se presentó en el capítulo respectivo.

Conseguir un ambiente agradable es un proceso cuya secuencia comienza estableciendo con toda claridad el objetivo (grado de confort) y las restricciones (económicas, espaciales, funcionales, estéticas, de limpieza, de suministros, etc.). Esta delimitación inicial es indispensable, pues orienta correctamente los esfuerzos desde el primer momento. Por ejemplo, dentro de un mismo edificio son bien distintos los casos de un auditorio subterráneo y el de unas oficinas de un piso superior, pues en el primero podría obligarse un grado de confort más exigente, y además el número de alternativas para garantizar temperatura, humedad y limpieza del aire es mucho más restringido que el de las oficinas. Congruente con lo anterior, una ventilación cruzada no sería opción para el auditorio, aunque sí para las oficinas. Hay que comenzar, pues, descartando las opciones que parezcan inviables por una u otra razón. Este primer resultado debe registrarse y sustentarse en forma clara y explícita, pues estará emergiendo con cierta periodicidad en el debate, y será productivo que se supere esa etapa al concientizar —al grupo y a la dirección— de las inviabilidades.

El segundo paso comprende el inventario, la valoración y la comparación de cargas térmicas. Esto aplica siempre, en diseño o en mejoras, y tanto en el proceso de enfriamiento como en el de calefacción (verano e invierno en zonas templadas, tierra caliente y tierra fría en nuestro medio). Entender el edificio como un sistema térmicamente estable es clave pues, por ejemplo en verano, la tarea de evacuar los calores que se cuelan y que se producen interiormente es responsabilidad del sistema de climatización. Siendo el tamaño y la complejidad de este dispositivo proporcional a dichas cargas calóricas, se revela totalmente conveniente disminuirlas al máximo. Eso es, en palabras sencillas, reducir el problema. En invierno opera la misma lógica: es totalmente indeseable que haya fugas de calor al exterior, porque esas pérdidas deben ser repuestas por el sistema de calefacción. Se plantea, pues, la necesidad de minimizar las transferencias de calor, hacia adentro en verano y hacia afuera en invierno, entre el edificio y sus alrededores.

Antes de pasar a la concepción de propuestas sobre cómo se hacen estas disminuciones, es necesario visualizar si el total general del inventario de cargas tiene (o ha sido llevado a) una magnitud razonable (lo que puede verse mediante índices generales, o por la experiencia del diseñador); si ello se cumple, el proceso se detiene aquí. En caso contrario, si se percibe un total pasado de la cuenta, lo siguiente es comparar y jerarquizar cargas. Procede luego escoger las cargas que, por magnitud y por facilidad de tratamiento, prometan resultados interesantes, y generar un abanico de propuestas que se sustentan en sus efectos benéficos y la racionalidad de las inversiones. Han comenzado a aplicarse, en propiedad, las estrategias de climatización. Una ayuda sencilla, pero siempre efectiva, es revisar, a partir de las ecuaciones que cuantifican las cargas calóricas, cuáles son los parámetros que determinan los excesos y concentrar sobre ellos la generación de proposiciones. El *Caso Base* ilustra cómo dos cambios sencillos de acabado exterior y la adición de un obstáculo condujeron a la eliminación de las principales causas de discomfort en el edificio objeto de estudio.

Conseguido el fin de tener un inventario de cargas calóricas razonables, y recordando que solo caben las estrategias no descartadas inicialmente —no antes—, se da paso a la proposición de las distintas formas de climatización para conseguir confort. Para racionalizar el proceso propositivo y evitar en lo posible un semi-caos de “ideas que le apuntan a todo”, no se debe perder de vista que el confort depende de seis aspectos, algunos de ellos manipulables y otros no. Pregúntese, y establezca claramente para su espacio particular, ¿cuál o cuáles de los seis elementos del confort comprometen aquí la situación?, ¿cómo se elimina esta amenaza?, ¿qué valdría la

pena implementar para mejorar este elemento del confort? ¡No olvide que se puede evaluar de inmediato el cambio de una condición! Basta entrar al software, ingresar los seis parámetros y luego cambiar el que considera reformable.

Entre los seis componentes del confort hay dos personales (metabolismo y ropaje) y cuatro del entorno (temperatura/humedad/velocidad del aire y temperatura media radiante). En el método adaptativo una premisa es que la gente maneja su aislamiento personal del ropaje, pero las posibilidades de este cambio deben estimarse con precaución. El metabolismo, al depender del tipo y la intensidad de la actividad, tiene menos márgenes; no sería verosímil pretender obtener confort por esta vía. Temperatura, humedad y velocidad del aire ambiente son las condiciones más susceptibles de modificar, y a las que muchas estrategias —mecánicas y naturales— se enfocan. Ellas tres determinan el intercambio de calor por convección y por evaporación (del sudor), dos porciones importantísimas del fenómeno térmico. La temperatura media radiante es, a pesar de su importancia e influencia, la circunstancia más desconocida y la menos explotada. Se trata aquí de entender que el intercambio radiante entre el sujeto y sus alrededores es tan responsable del confort como los intercambios mencionados de convección y evaporación con el aire ambiente. Esta transferencia de calor es función de la temperatura superficial de los vecinos y de su emisividad (coeficiente de emisión), así que manipularlos puede conducir a un final feliz. Un error costoso, ya lo comentamos, es procurar solucionar un problema radiante con estrategias dirigidas a la convección. La correcta identificación de la causa del desconfort es clave en la proposición de estrategias efectivas y económicas.

A continuación se listan y se describen las principales *Estrategias Mecánicas o Artificiales* para climatización, enfatizando el tipo de influencia que cada una aporta, con el fin de orientar en su correcta selección.

Aislamientos. Son arreglos que usan materiales con bajos coeficientes de conducción, con suficiente grosor, componiendo así un conjunto que se opone al paso del calor. Ejemplos de buenos materiales aislantes son la fibra de vidrio, el poliestireno expandido, el poliuretano y también el aire. Un muro compuesto de capas múltiples, con cámara de aire y superficies reflectivas, es una buena y económica manera de oponerse al efecto calefactor del sol. Al disminuir la transferencia, las temperaturas superficiales interiores de techos y paredes son menores, lo que significa disminución de la temperatura media radiante.

Ventilación mecánica. Se utiliza tanto para climatización como para calidad de aire. En el primer caso, el sistema de ventilación debe soplar

directamente sobre los habitantes teniendo en cuenta las velocidades recomendadas en el capítulo sobre Confort. Para mejorar la calidad de aire interior se puede practicar la *dilución*, esto es reduciendo la concentración de contaminantes por aporte de grandes volúmenes de aire nuevo, o la *Extracción* (Exhaust) con un sistema de campana-ducto-ventilador-descarga. La extracción no tiene efecto en el confort pues por la naturaleza del movimiento del aire, en ese caso las velocidades son imperceptibles. La ventilación mecánica está dirigida, pues, a aprovechar el efecto de la velocidad del aire. Pero también es un vehículo para evacuar carga calórica.

Aire acondicionado convencional. El sistema de acondicionamiento de aire, si está apropiadamente diseñado y construido, garantiza control sobre temperatura, humedad, velocidad, y filtración del aire. En el caso convencional se acondiciona todo el volumen del cuarto, llevando las temperaturas superficiales a valores muy cercanos a la del aire, y entonces el grado de confort es el máximo posible. Como pago para tal beneficio esta forma de climatizar es la que más inversiones y gastos demanda, la que más energía utiliza y, por ende, la que mayor impacto ecológico tiene. Por otro lado, estas instalaciones también corren el riesgo de contaminarse y producir el síndrome del edificio enfermo, el cual se explica en el capítulo “Calidad del aire”.

Enfriadores evaporativos. Los equipos de esta categoría toman aire exterior, lo hacen pasar por un medio húmedo y lo descargan al espacio a climatizar. Es inmediatamente visible que tales sistemas quedan limitados por los valores de humedad relativa aceptables dentro del recinto y, claro, por la humedad relativa del aire ambiente. Si lo anterior no plantea limitaciones, o sea si es factible, se dispone de un método que da confort con alta eficiencia energética, bajísimos consumos de energía y buena calidad de aire, puesto que el proceso captura polvo y maneja altos volúmenes de renovación. Este método se enfoca hacia la temperatura y la velocidad del aire. Además, al ser un proceso de renovación total, se lleva carga térmica.

Pisos radiantes. Pisos, muros y techos radiantes constituyen una estrategia sana y eficiente de climatización. Consiste en insertar, dentro de dichos elementos constructivos, un sistema de mangueras por las cuales circula agua corriente (fría o caliente) a la temperatura deseada. Es un método corriente para lidiar con el frío de invierno en los países desarrollados, pero en su aplicación de enfriamiento en verano y en la zona tórrida tiene la limitación de que marca la temperatura de punto de rocío del espacio a acondicionar (se pueden causar condensaciones). Además de requerir una construcción cuidadosa, se necesita un mecanismo de

calefacción/enfriamiento y bombeo de agua que demanda manejo técnico. El piso radiante se enfoca al manejo de la temperatura media radiante y a la temperatura del aire en su vecindad.

Pinturas/recubrimientos de baja emisividad. Para disminuir el calor emitido por radiación de las superficies interiores de techos se puede optar por cubrirlas con pintura o con elementos que tengan baja emisividad. Así, a pesar de que la temperatura superficial sea alta, la cantidad de calor transmitido a los ocupantes es baja. Efectivamente, el aire directamente en contacto con la superficie se calienta, pero al disminuir su densidad por dicho calentamiento tiende a subir, y así no transporta calor por convección hacia abajo. Además, la radiación emitida hacia abajo, disminuida por la magnitud del coeficiente, hace tolerable la contribución. Un cielo raso con elementos de aluminio brillante tiene emisividades del orden de 0.05, insignificantes al compararlas con los materiales corrientes de construcción que valen entre 0.85 y 0.9. Las pinturas de baja emisividad se enfocan a cortar el efecto de la temperatura media radiante.

Al lado de las estrategias enumeradas se encuentran las Estrategias *Naturales*, que compiten más en los órdenes de economía e impacto ecológico que en el de confort. Las estrategias naturales para climatización comúnmente usadas son ventilación natural y efecto invernadero.

Ventilación natural. La ventilación natural es aquella en la que la renovación del aire se produce exclusivamente por la acción del viento o por la existencia de un gradiente de temperaturas entre el punto de entrada y el de salida (Código Técnico de Edificación, 2006). Las fuerzas motrices son las diferencias de presión creadas a través de las distintas aberturas por el viento o por diferencia de temperatura (efecto chimenea). La ventilación natural se da mediante la adecuada ubicación de pasos o conductos aprovechando las depresiones o sobrepresiones creadas en el edificio por el viento o por la convección natural, sin que sea necesario aportar al sistema trabajo mecánico. La Figura 7.1 muestra los dos principios que dan lugar a la ventilación natural.

Efecto invernadero. El efecto invernadero es el fenómeno mediante el cual la radiación solar (onda corta) que entra a un espacio cerrado, gracias a que el material del muro es transparente para ella, es absorbida por los materiales del interior, los cuales se calientan; sin embargo, al emitir radiación esta no puede salir del espacio debido a que los muros son ahora opacos para la nueva radiación (que es ahora de onda larga). De esa manera la temperatura interior se eleva. La Figura 7.2 muestra un invernadero corriente, donde se aprecia que el material de estas construcciones es vidrio (o plástico transparente).

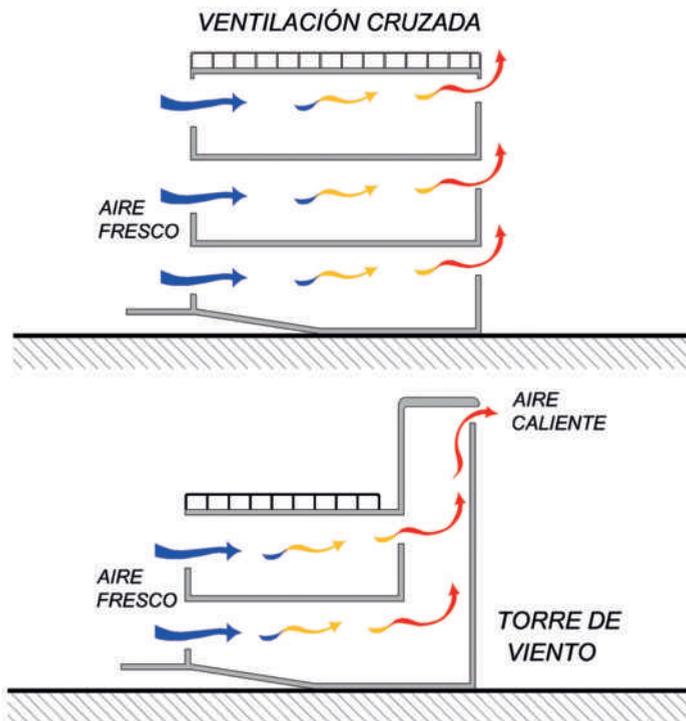


Figura 7.1. Ventilación natural con base en el viento y en el efecto chimenea [801].



Figura 7.2. Ilustración de una construcción de invernadero.

Muro trombe. Se trata de un sistema diseñado para el aprovechamiento de la energía solar con finalidad en el confort interior. Está compuesto por un muro, una superficie acristalada exterior, una cámara de aire intermedia y unos orificios de ventilación regulables, tal como se puede ver en la Figura 7.3 y la Figura 7.4. Durante el verano el sol está alto y el

muro está generalmente sombreado por el alero superior; el calor ganado calienta el aire de la cámara, que al ascender sale por la abertura superior e induce una corriente interior a nivel del piso, lo que representa una renovación en el ambiente interior. Durante el invierno el sol está bajo y la radiación directa recibida por el muro provoca un efecto invernadero: el calor queda atrapado entre el muro y el vidrio, y ahora la corriente convectiva de aire caliente es dirigida al interior, lo cual ofrece una excelente y limpia calefacción. En la noche se cierra la puertilla y se aprovecha el calor acumulado por la masa del muro. Adecuadamente dimensionado, y minimizadas las pérdidas por usar doble o triple panel de vidrio, se obtienen ambientes interiores estables y confortables aun con bajas temperaturas externas. Se ve claramente, pues, su utilidad en zonas templadas porque la incidencia del sol sobre las paredes es mayor. En la zona tórrida/climas fríos se vuelve admisible sobre las fachadas este y oeste porque reciben el sol todos los días; las caras norte y sur solo reciben el sol seis meses cada una, con una elevación tan alta que la radiación incidente no justifica el uso del muro Trombe.

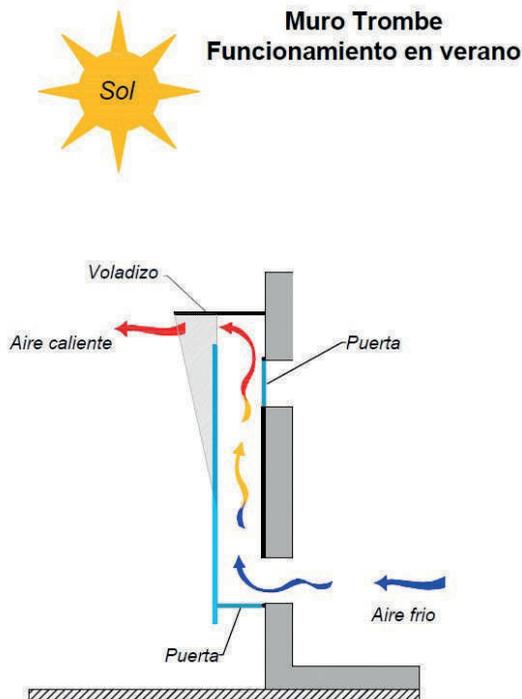


Figura 7.3. Muro Trombe, funcionamiento en verano.

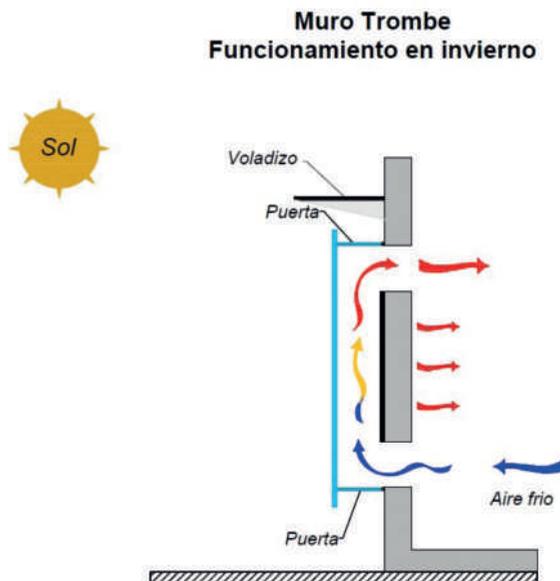


Figura 7.4. Muro Trombe, funcionamiento en invierno, período diurno.

CASO BASE

Con el propósito de conseguir un ambiente agradable para los espacios demasiado cálidos del edificio habitacional se hizo inventario de cargas calóricas, así como cálculos de índice de confort y capacidad de ventilación natural. El diagnóstico inicial muestra cargas excesivas, completa incapacidad de la ventilación natural para evacuarlas y un ambiente intolerable para la inmensa mayoría de habitantes.

PROPOSICIÓN DE ESTRATEGIAS

Los aportes relativos de las cargas que entran al volumen de las salas están representados en la Figura 7.5, comparados mediante un gráfico de Pareto. Se puede ver que el aporte por las ventanas representa el 50% del calor que entra, que sumado a la pared occidental acumula casi el 75% del total. En el caso de la alcoba, su Pareto (no ilustrado aquí) nos dice que el techo y la ventana también son responsables del 75% del total. Esto significaría que encontrada una solución para la carga de estas superficies se habría resuelto el problema.

Estrategias orientadas a evitar entrada de cargas térmicas y reducir la temperatura media radiante aparecen entonces como factores importantes para el proyecto. Calculemos el efecto de aplicar individual o simultáneamente las siguientes estrategias: pintar techo y/o pared Oeste con pintura blanca; implementar en la estructura del techo una barrera radiante en foil de aluminio; convertir la pared Oeste en muro verde mediante la siembra de hiedra; instalar blackout y/o cortasoles en las ventanas. Pero, atención, pues un factor importante del desconfort es la temperatura ambiente, y es del caso evaluar estrategias para su disminución. Se analiza implementar un enfriamiento evaporativo y considerar qué tanto caudal de renovación podría aportar una chimenea solar.

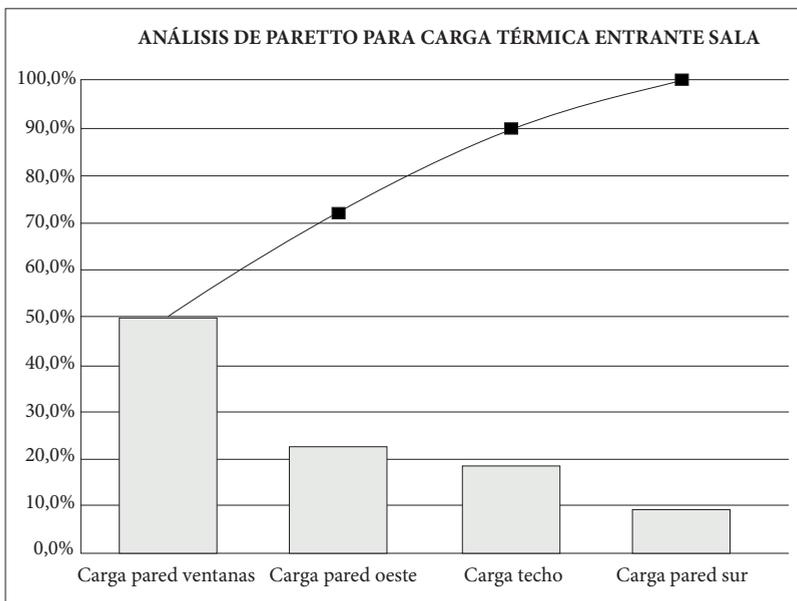


Figura 7.5. Proporción de las cargas térmicas por pared.

Pintura blanca exterior en techo y muro oeste

Al practicar recubrimiento de pintura blanca en techo y pared Oeste, el valor de la absorptividad solar baja de 0,73 a 0,26. Usando las ecuaciones y parámetros ya conocidos se tiene:

$$Q_{\text{roofsalas}} = 193 \text{ W de donde } T_{\text{r-roofsalas}} = Q_{\text{roofsalas}} * hi / A + T_{\text{in}} = 27,6^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{roofalcoba}} = 326 \text{ W de donde } T_{\text{r-roofalcoba}} = Q_{\text{roofalcoba}} * hi / A + T_{\text{in}} = 29,9^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{muroroom}} = 1484 \text{ W de donde } T_{\text{sup.int.muro}} = Q_{\text{muroroom}} * hi / A + T_{\text{in}} = 30,3^{\circ}\text{C}$$

Cubrimiento del techo con foil de aluminio

Con foil de aluminio las reducciones generalmente son efectivas, pues sus valores de absorptividad solar y emisividad son bastante bajos; sin embargo, habrá que calcular y comparar con respecto a la pintura, que ya demostró bondades.

Con $\alpha_s = 0,09$ y $\varepsilon = 0,03$ se tiene $Q_{\text{roof-salas}} = 395\text{W}$, luego aquí es mejor la pintura blanca.

Cubrimiento pared oeste con hiedra

La hiedra sembrada en la pared es una alternativa muy llamativa, porque si se obtiene buen cubrimiento podríamos aspirar a una temperatura en dicha superficie cercana a la de bulbo húmedo, esto es 21.6°C . Pero para ser conservativos (y realistas) se tomarán 25°C . Calculando:

$Q_{\text{muro-oeste}} = -320\text{ W}$; resultado que es una gran ventaja, ya que esta alternativa estaría retirando carga del sistema.

Instalación de blackout o cortasoles en ventanas

Esta condición (ver Figura 7.4) cambia el modelamiento de las ventanas, ya que deben tratarse como ventanas no-soleadas. En las salas el área del vidrio menos el marco es $16,3 - 1,95 = 14,35\text{ m}^2$; en la alcoba son $3,8\text{ m}^2$. Al tratarse de ventanas no-soleadas, las ecuaciones que rigen su modelado son:

$$Q_{\text{window}} = U_{\text{window}} * A_{\text{window}} * (T_{\text{outdoor}} - T_{\text{indoor}})$$

$$U_{\text{window}} = (U_{\text{center}} * A_{\text{center}} + U_{\text{frame}} * A_{\text{frame}}) / A_{\text{window}}$$

$$U_{\text{total}} = 1/R_{\text{total}} = 1 / (R_{\text{outdoor}} + R_{\text{window}} + R_{\text{inside}}) = 1 / (0.044 + 0.00353 + 0.12) = 5.97\text{ W/m}^2\text{C}$$

T_{indoor} es un valor afectado por la potencia solar difusa y reflejada; esta influencia hace que asumamos como 35°C dicha temperatura exterior. Así, los cálculos de las nuevas potencias en las ventanas son:

$$Q_{\text{window-salas}} = 5.97 * 16.3 * (35 - 27) = 779\text{ W}$$

$$Q_{\text{window-alcoba}} = 5.97 * 3.8 * (35 - 27) = 182\text{ W}$$

Y las temperaturas superficiales serán:

$$T_{\text{rwindow-salas}} = Q_{\text{window-salas}} * h_i / A + T_{\text{in}} = (779 * 0.12) / 16.3 + 27 = 32.7^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{rwindow-alcoba}} = Q_{\text{window-alcoba}} * h_i / A + T_{\text{in}} = (182 * 0.12) / 3.8 + 27 = 32.7^\circ\text{C}$$



Figura 7.4. Implementación de cortasoles en ventanas. Reproducido de [111].

PRIMER BALANCE DE MODIFICACIONES

La nueva carga térmica total en las salas, implementando techos y muro Oeste pintados de blanco, pared Oeste con hiedra y cortasoles en ventanas, es:

$$Q_{2salas} = Q_{\text{roof}} + Q_{\text{muro-oeste}} + Q_{\text{muro-sur}} + Q_{\text{window}} + Q_{\text{personas}} + Q_{\text{equipo}} = 193 - 320 + 208 + 779 + 656 + 350 = 1866 \text{ W}$$

Esto representa una reducción del 87% en carga en las salas.

En la alcoba fue pertinente pintar techo con pintura blanca e instalar cortasoles en ventanas. Luego, queda:

$$Q_{2alcoba} = Q_{\text{roof}} + Q_{\text{solsur}} + Q_{\text{no-soleste}} + Q_{\text{window}} + Q_{\text{personas}} + Q_{\text{equipo}} = 326 + 422 + 365 + 182 + 656 + 350 = 2300 \text{ W}$$

Esto representa una reducción del 59% en carga en las alcobas.

$$Q_{2total} = 1866 + 2300 = 4166 \text{ W (frente a 19742 W originales)}$$

En estas nuevas condiciones, y manteniendo el aumento razonable de temperatura en 3°C, los flujos de aire necesarios para la remoción de las nuevas cargas son para las salas y la alcoba, respectivamente, 2206 m³/h y 2719 m³/h, para un total de 4925 m³/h. Recordemos que los caudales de

aire suministrados por la ventilación cruzada, calculados por el Método NORMA, continúan siendo 2060 m³/h y 2590 m³/h, para un total de 4650 m³/h. La comparación sugiere que las necesidades están casi satisfechas, pues solo hay un déficit de 275 m³/h, que se puede soslayar. Sin embargo, y en pos de entregar soluciones más allá de lo satisfactorio, se puede continuar con el análisis de otras implementaciones bioclimáticas.

Implementación de chimenea solar

El flujo adicional necesario en la sala con la implementación de las estrategias es de 275 m³/h, los cuales se pueden evacuar con una chimenea solar. Tomando como parámetro de diseño una temperatura en el colector de al menos 75°C (la literatura frecuentemente cita temperaturas mayores a 110°C), la potencia requerida es:

$$Q = F \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T / 3600 = 275 \cdot 1.01 \cdot 1.0051 \cdot (75 - 32) / 3600 = 3.3 \text{ kW}$$

La chimenea debe ser instalada con un ángulo tal que a las 14:00 los rayos solares en marzo 20 estén perpendiculares; dicho ángulo es de 27° con respecto a la horizontal y con un azimuth de 82°. En esta geometría, la radiación solar incidente es de 984 W/m². Escogiendo una superficie interior en aluminio, pintada con pintura a base de Cr negro ($\alpha_s = 0,95$; $\epsilon_{IR} = 0,09$), el balance energético queda:

$$\alpha_s \cdot q_{solar} = \epsilon_{eff} \cdot \sigma \cdot (T_{plate}^4 - T_{sky}^4) + h^* (T_{plate} - T_{air})$$

siendo: $\epsilon_{ff} = 1 / (1/\epsilon_{glass} + 1/\epsilon_{plate} - 1)$; $T_{air} = T_{airout}$; $h_L = Nu_L \cdot k/L$ (h_L : coeficiente de transferencia de calor por convección natural);

$Nu_L = 0,68 + 0,67 \cdot Ra_L^{1/4} \cdot [1 + (0,492/Pr)^{1/4}]^{-4/9}$ (caso placas inclinadas Ref. [109]) con $Ra = (g \cdot \cos \theta \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3) / (\nu \cdot \alpha)$; donde $\beta = 1/\Delta T$ y $\Delta T = (T_{plate} - T_{air})$ (en gases ideales).

Las incógnitas son T_{plate} , T_{air} y las dimensiones de la chimenea. Mediante un proceso iterativo de cálculo, partiendo de un área fija de colector, se halla la solución completa. Fijando 1.5m ancho * 2.5 m largo * 0.15m de paso, el área plana es de 3.75 m² y el área transversal de flujo es de 0.22 m². Mediante el algoritmo seleccionado se converge a un valor de $T_{airout} = 57,2^\circ\text{C}$ con un coeficiente combinado de convección - radiación $h_u = 12,18 \text{ W/m}^2\text{K}$. El flujo de aire se calcula con la conocida $= 3600 \cdot (\alpha_s \cdot q_{solar} \cdot A) / (\rho_{air} \cdot C_p \cdot \Delta T) [\text{m}^3/\text{h}]$. Reemplazando todos los valores ya conocidos resulta $F = 371,6 [\text{m}^3/\text{h}]$, que sobrepasa la necesidad de 275 m³/h; por tanto, la chimenea es adecuada. Las densidades del aire son a la entrada de 1.01 kg/m³ y a la salida de 0.83 kg/m³.

Esta diferencia, y la altura de la chimenea (1,14 m), son las que producen el tiro en la chimenea según:

$$\Delta P = g \cdot \Delta \rho \cdot \Delta z \text{ [Pa]} = 9,8 \cdot 0,18 \cdot 1,14 = 2,01 \text{ Pa}$$

Ya se dijo que el área transversal es 0.22 m²; por tanto para un flujo de 371.6 m³/h resulta una velocidad del aire de 0.5 m/s.

Enfriamiento evaporativo

Aunque se han conseguido grandes logros en la disminución de cargas (la causa principal del problema), la verdad es que subsiste una amenaza al confort. De hecho, en la situación crítica, la temperatura del aire exterior es 32°C, y la del aire interior debe ser superior —en alguna medida— a dicha temperatura externa (y no 27°C, como se ha venido suponiendo). Esta condición es amenazante para el confort, pues se acerca a la temperatura de la piel, y por consiguiente es necesario plantearse una solución radical y confiable para este caso extremo. Bajar la temperatura del aire solo se logra con AA o enfriamiento evaporativo. Partiendo de que este último es sustancialmente más ecológico, más económico y más higiénico que el primero, y que la humedad relativa del aire es baja en el momento de interés, evaluemos la posibilidad de implementar enfriamiento evaporativo, inicialmente usando humidificador ultrasónico aplicado al flujo de la ventilación natural.

Se busca, en lo posible, obtener los 27°C de temperatura interna deseada, sin aumentar en demasía la humedad relativa. Para que no se amenace el confort por el lado de la humedad, se fija un valor límite —muy conservativo— de 70%. Ya se anunció que las propiedades del aire ambiente, es decir el aire en el ingreso al proceso de enfriamiento evaporativo, son 32°C y 42%HR; luego, la densidad es 1.01 kg/m³, la temperatura de bulbo húmedo 21.6°C y la humedad absoluta 0.014 kg/kg, punto 1 de la Figura 7.5 con esa densidad, y como el caudal total de aire disponible por ventilación natural fue calculado en 4650 m³/h, se tienen 4697 kg de aire/h.

Condiciones de salida del humectador adiabático: para un proceso a entalpía constante con humedad relativa de salida de 70%, representado como 1-2 en la carta psicrométrica de la Figura 7.5, en la salida la temperatura bulbo seco es 25.9°C, la densidad 0.97 kg/m³, la entalpía de aire seco 68 kJ/kg, el punto de rocío 20°C, la temperatura de bulbo húmedo 21.6°C, y la humedad absoluta 0.0165 kg/kg. La humedad adicionada (flujo de agua requerido) será entonces: $M_w = (0.0165 - 0.014) \cdot 4697 = 11.7 \text{ kg/h}$, esto es 11.7 lt/h. El aire “humidificado y frío” ahora procederá a absorber

las cargas térmicas provenientes del recinto, las personas y los equipos, es decir los 4166 W, antes de salir del local. Al hacerlo vendrá el calentamiento sensible que ya definimos en 3°C, proceso representado como 2-3 en la Figura 7.5. Entonces a la salida del espacio este aire estará a 28.9°C. Si solo se aplica ventilación cruzada ya se dijo que habría un pequeño déficit de caudal (275 m³/h), luego el aumento real de temperatura será ligeramente superior, llegando a 3.2°C. Se ha conseguido así que en la habitación haya zonas con una temperatura muy agradable de 25.9°C, y como la máxima es 28.9°C se está cumpliendo la condición de que el aire interior pueda ser considerado a 27°C.

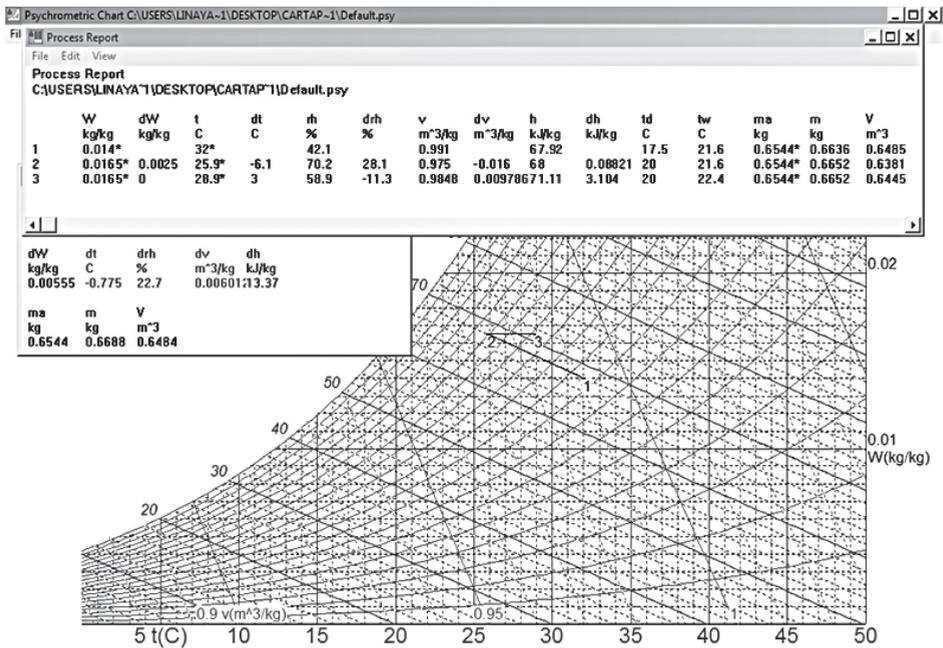


Figura 7.5. Enfriamiento evaporativo seguido de calentamiento sensible.

Existen en el mercado diversos tipos de aparatos nebulizadores no industriales con sistema de aspersión por ultrasonido. Por ejemplo, se puede citar el equipo Essick Air HD1407 Moist Air Whole House Humidifier with Automatic Humidistat, cuyas características técnicas son: LxWxH: 62.2 x 39.4 x 57 cm; 30 lbs; 120 VAC;165 W; 2.2 litros/h; área cobertura:269 m². Debe notarse que, aunque se anuncia como equipo suficiente para una gran área, la capacidad de evaporación de este nebulizador es solo 2.2 litros/h, lo que para este proyecto significa usar un tándem o cambiarse a otro modelo. La Figura 7.6 y la Figura 7.7 muestran

equipos interesantes con la capacidad demandada. Otra modalidad dentro de los enfriadores evaporativos, que puede verse en la Figura 7.8, es aquella donde la evaporación sucede por contacto aire seco/agua líquida en superficies extendidas, (como una mopa o un empacado de celdas estilo panel). En estos aparatos, efectivos desde el punto de vista del consumo energético, el aire succionado por el ventilador atraviesa el material humedecido, y al final es descargado por ducto y rejillas al espacio a acondicionar.

The Bonaire Durango is designed to easily cool today's open plan homes with areas up to 75 square metres.* It's quiet, environmentally friendly and, best of all, very economical to run. It can be easily installed into most windows and with its neutral colour, the Bonaire Durango blends in no matter what the environment.

Features

- Costs less than 25 cents per day to run*
- Cools an area up to 75 square metres*
- Easy to install
- 250mm deep low profile cabinet does not obstruct exterior area
- Powerful three speed fan motor
- Direct drive fan for higher efficiency
- Transition duct supports the unit without any need for additional structural support
- UV stabilised polymer cabinet will never rust
- Uses standard electrical and plumbing connections
- The cool and ventilation mode allows the choice of water flow cooling or just fan operation

Warranty
The Bonaire Durango is supported with a two year domestic parts and labour warranty.

IN

OUT

*Running costs from as little as 25 cents per day!

Figura 7.6. Enfriador evaporativo Bonaire Durango.

Product Specification			
Air flow	4,500 m ³ /hr		
Window section	H 550mm	W 550mm	D 260mm
External cabinet	H 1170mm	W 850mm	D 250mm
External cabinet clearance (TOP)	100mm		
Weight	40kg		
Electrical	240 Volts	1 Phase	50 Hz
Fan speeds	3		



Figura 7.7. Nebulizador Mistifier plus.

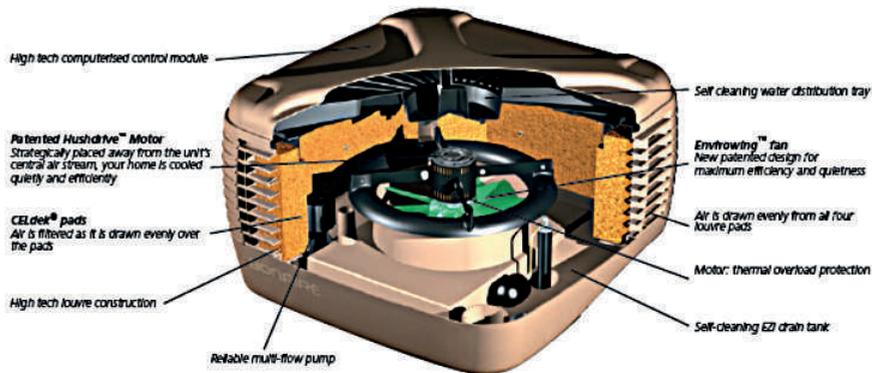


Figura 7.8. Ilustración de enfriador evaporativo con medio humedecido.

SELECCIÓN DE MODIFICACIONES Y BALANCE CLIMÁTICO FINAL

De lo anteriormente expuesto se desprende, como procedimiento más que prudente, la combinación de estrategias para garantizar resultados sin riesgos. Ellas, además, se han revelado sencillas y ecológicas. Para el ejemplo tratado se añade, entonces, enfriamiento evaporativo a los cambios antes aprobados (que eran techos y muro Oeste pintados de blanco, pared Oeste con hiedra y cortasoles en ventanas). Para el balance final la Figura 7.9 muestra las temperaturas de las superficies interiores; de ellas se desprende que la temperatura media radiante ahora imperante es 28.5°C, más moderada que 29.6°C, la original. Después, según la Figura 7.10, PMV y PPD son cero y 95% (los mejores posibles). En conclusión, desde el punto de

vista térmico, se han logrado plenamente los objetivos trazados mediante un híbrido combinación de estrategias pasivas y cuasi-pasivas.

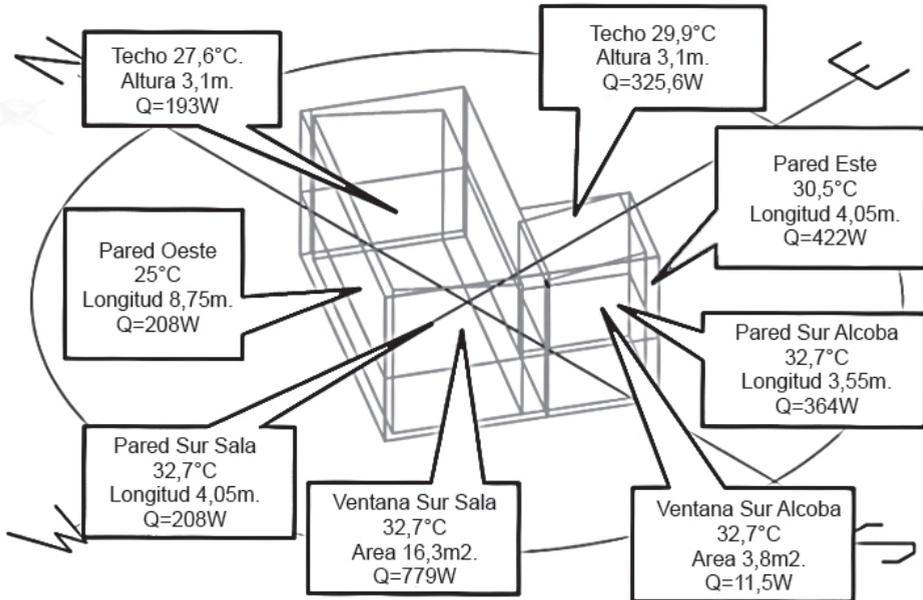


Figura 7.9. Temperaturas finales paredes superficies interiores.

FANGER MODEL FOR COMFORT CALCULATION

! WARNING ! Please use colon mark as a decimal separator

METABOLIC RATE (Met)	Choose Metabolic Rate Value	1	Predicted Mean Vote PMV	8,850382E-03
RELATIVE HUMIDITY (%)		55		
AIR TEMPERATURE (°C)		27	Percentage of People Dissatisfied PPD	5,001621
CLOTHING INSULATION I _{cl}	Choose Clothing Insulation Value	0,6		
CLOTHING FACTOR F _{cl}		1,1	! 0.8 m/s is recommended as an upper limit. Above this value, loose papers may be disturbed !	
INDOOR RELATIVE AIR SPEED (m/s)		0,5	PRESS TO CALCULATE MEAN RADIANT TEMPERATURE	
MEAN RADIANT TEMPERATURE CALCULATION (°C)			28,5	

CALCULATE CLEAR EXIT SHOW PICTURE

Figura 7.10. PMV/PPD para la situación final.

OTRAS ALTERNATIVAS

Es corriente que dentro de un proyecto se presenten múltiples opciones de diseño o de mejoras que compiten entre sí, a menudo con distintas ventajas en distintos campos, y también es probable que el diseñador encuentre que sus criterios particulares no coinciden con los de la dirección. Así ocurrirá que en unos proyectos se priorizan las políticas conservacionistas, en otros la estética, en otros lo económico, lo funcional, etc.

Entre las varias alternativas extras que se pueden plantear para resolver el desconfort por ambiente demasiado cálido en el *CASO BASE* se seleccionan dos. Es fundamento de estas nuevas propuestas partir de la total garantía del confort, ya que la solución encontrada también lo ofrece. Los planteamientos generales se ven en la Tabla 7.1, donde la alternativa No. 3 es la estrategia previamente descrita y detallada.

Tabla 7.1. Caso Base: Alternativas de Solución Climática en comparación.

Alternativa	Descripción
1. Aire acondicionado	Simple y llanamente se implementa un sistema de aire acondicionado expansión directa (AA: 24°C, 50%HR).
2. Híbrido de estrategias pasivas y convencionales: Eliminar cargas e implementar aire acondicionado (<i>minisplits</i>)	Inicialmente se aplican las estrategias para disminución de cargas ya probadas efectivas (techo pintado de blanco, pared Oeste con hiedra y cortasoles en ventanas) y se complementa con dos unidades <i>minisplit</i> de aire acondicionado expansión directa (AA: 24°C,50%HR).
3. Híbrido de estrategias pasivas y cuasi-pasivas: Eliminar cargas e implementar enfriamiento evaporativo	Se aplican las estrategias para disminución de cargas ya probadas efectivas (techo pintado de blanco, pared oeste con hiedra y cortasoles en ventanas) y se complementa con un sistema de enfriamiento evaporativo.

La primera comparación a hacer es la de cargas calóricas discriminadas, cotejo que se muestra en la Tabla 7.2. En las opciones de aire acondicionado se observan cargas sensibles y latentes; para la primera opción están todas las cargas originales, mientras que para la segunda y la tercera se ven disminuidas por aplicación de las estrategias pasivas. Aunque vuelve a visibilizarse el efecto benigno de haber eliminado causas del desconfort, lo que verdaderamente dice la tabla es el tamaño de equipo que se tiene que adquirir. Es claro que las tres opciones dan confort, pero aquí toman ventaja las del aire acondicionado, pues además de entregar las condiciones

de temperatura y humedad relativa que al usuario “le dé la gana”, prácticamente independizan el ambiente interior, garantizando ultra-confort para todo momento y para toda condición atmosférica exterior. La comparación se extiende ahora a otros campos como el económico, el de la calidad de aire y el ecológico, lo cual se considera en los capítulos posteriores.

Tabla 7.2. Comparativo de Cargas calóricas para tres opciones de climatización en Caso Base.

Carga (W)	AA		Pasivas + AA		Pasivas + Enfriam.Evap.		
	Sensibles	Latentes	Sensibles	Latentes	Sensibles	Latentes	
Exteriores	Techos	5305	-	519	-	519	-
	Muros	4781	-	1772	-	1772	-
	Cristales	8790	-	961	-	961	-
	Infiltraciones	0	0	0	0	0	-
Interiores	Ocupantes	518	279	518(7%)	279	518(7%)	-
	Alumbrado	-	-	-	-	-	-
	Aparatos diversos	700	-	700	-	700	-
	Instalación	514	-	115	-	115	-
Carga del local	<i>RSH20608</i>	<i>RLH279</i>	4585	279	4585	-	
	<i>RTH20887</i>		4864		4585		
Carga de ventilacion	<i>OASH 917</i>	<i>OALH 1010</i>	917	1010	-	-	
	<i>OATH 1927</i>		1927		-		
Carga total	<i>TSH 21525</i>	<i>TLH 1289</i>	5502	1289	4585	-	
	<i>GTH 22814W (6.5tr)</i>		6791W (2tr)		4585W (1.3tr)		

EFICIENCIA ENERGÉTICA

La primera aproximación al diseño eficiente conecta al interesado con la idea de que un recurso invertido (energía, en este caso) obtenga efectos benéficos y que no se desperdicie en absoluto, esto es, obtener máxima utilidad con el mínimo de gastos. Para volver aplicable ese principio en un proyecto de climatización es necesario contar con algún indicador que permita decidir entre alternativas que compiten o, a veces, simplemente determinar si la incorporación de un determinado cambio se justifica. Los textos subsiguientes pretenden resolver tal necesidad. Al considerar el “*Edificio Energía Cero*” como opción relevante para el tema, se incluyen su descripción y análisis al final del capítulo.

Concepto de eficiencia energética. Siendo la termodinámica la ciencia que estudia la energía en sus diversas formas y transformaciones, y las leyes y limitaciones de sus procesos, resulta natural apoyarse en sus principios para introducir el concepto de eficiencia energética en edificaciones. Según la termodinámica clásica existen dos formas de definir eficiencia energética: desde la primera ley y desde la segunda ley.

Eficiencia energética de primera ley. Siendo eficiencia en ingeniería, y en muchas otras disciplinas, la comparación de los resultados obtenidos contra las inversiones causadas, se podría aplicar este concepto al edificio como sistema térmico donde se busca confort mientras se consume energía en los procesos ejecutados para obtenerlo. Esta primera aproximación podría ser adecuada, después de acordar las unidades y la forma de comparación entre los distintos niveles de confort alcanzado. Si el confort se cuantifica en porcentaje de personas satisfechas, se tiene una base de comparación simple que permite calificar dos propuestas de climatización de un espacio. Se define eficiencia I:

$$\eta_{I-ed} = (100 - \text{PPD}) / (W_{EE} + Q) \text{ [% satisfechos/kW]},$$

donde PPD es porcentaje de gente insatisfecha según índice de Fanger; W_{EE} es la potencia eléctrica consumida [kW] y Q el flujo de calor gastado [kW].

EFICIENCIA DE SEGUNDA LEY. Atendiendo al hecho de que dos sistemas pueden causar el mismo efecto y gastar los mismos recursos, pero uno de ellos en condiciones mucho más exigentes que el otro, se da paso en termodinámica al concepto de eficiencia energética de segunda ley. Para hacer diferencia entre los dos sistemas descritos se pasa a comparar cada uno de ellos con el sistema ideal. Se entiende como sistema ideal aquel que no contiene irreversibilidades y, por consiguiente, puede ejecutar las tareas sin incurrir en ningún tipo de desperdicio. Se define entonces como eficiencia II:

$$\eta_{II-ed} = \eta_{I-ed} / \eta_{I-ideal},$$

donde la eficiencia del sistema ideal debe ser implementado para el caso particular que atañe, teniendo en cuenta que los procesos energéticos involucrados no presenten irreversibilidades térmicas (fricción, transferencia a diferentes niveles de temperatura, expansiones).

Para el caso simple de enfriamiento, es decir para el caso básico de climatización en verano o en clima cálido mediante enfriadores, el problema se reduce a establecer el nivel de temperatura interior a mantener, el nivel de temperatura exterior, la carga calórica a remover y la potencia eléctrica a consumir para cada solución. Los datos anteriores permiten calcular η_{I-ed} para cada equipo, mientras que para la referencia ideal se utiliza la eficiencia de refrigerador ideal, la cual es;

$$\eta_{I-ideal} = (T_L + 273) / (T_H - T_L),$$

donde T_L es la temperatura media [°C] del ambiente exterior y T_H la temperatura [°C] interior.

Para el caso simple de calefacción, es decir para el caso básico de climatización en invierno o en clima frío mediante bombas de calor, el problema se reduce a establecer el nivel de temperatura interior a mantener, el nivel de temperatura exterior, la carga calórica a suministrar y la potencia eléctrica a consumir para cada solución. Los datos anteriores permiten calcular

η_{T-ed} para cada equipo, y para la referencia ideal se utiliza la eficiencia de la bomba de calor ideal, la cual es;

$$\eta_{T-ideal} = (T_H + 273) / (T_H - T_L),$$

donde T_L es la temperatura media [°C] del ambiente exterior y T_H la temperatura [°C] interior.

El problema de evaluar la eficiencia se vuelve algo más complejo cuando se trata de evaluar una determinada modificación al sistema básico. Se trata de que, frecuentemente, se pregunta si la introducción de un cambio se justifica desde el punto de vista energético. Por ejemplo, el agregar uno (o varios) elementos que alteran la carga (aislamientos, barreras contra la radiación), aberturas para facilitar corrientes de aire naturales, improvisar un ventilador, implementar un tragaluz para iluminación natural, etc., o combinaciones de tales alteraciones. En tales casos lo que corresponde es evaluar el efecto benéfico del cambio o la combinación de cambios a introducir, frente a los costos en que se podrá incurrir. Lo anterior, si se mira a la luz del concepto introducido inicialmente de eficiencia energética, no es otra cosa que la eficiencia energética del cambio particular. Sin embargo, de una rápida revisión de la ecuación propuesta salta a la vista que no aplica a una modificación particular, pues está diseñada para espacios o edificaciones. Procede entonces comparar dos alternativas: sistema original versus sistema modificado. Para hacer simple esta comparación, pues el tiempo es un recurso muy valioso, se parte que el PPD no se altera por razones obvias, que la potencia eléctrica W_{EE} y el calor de aporte Q se cambian según:

$$\Delta W_{EE} = \Delta \text{carga} / \text{EER} \text{ o}$$

$$\Delta Q = \Delta \text{carga} / \text{COP},$$

donde $\text{EER} = \text{Potencia frigorífica} / \text{Potencia eléctrica consumida en refrigeración}$ (parámetro propio del equipo de acondicionamiento de aire, viene especificado claramente en su placa), normalmente en [TR/kW], que puede ser expresado adimensionalmente, pues $1 \text{ TR} = 3.517 \text{ kW}$; $\text{COP} = \text{Potencia calorífica} / \text{Potencia eléctrica consumida en calefacción}$ (parámetro propio del equipo de acondicionamiento de aire, viene especificado claramente en su placa); $\Delta \text{carga} =$ disminución en la carga calórica introducida por los cambios implementados.

EFICIENCIA ENERGÉTICA DE APARATOS CON LA MISMA FUNCIÓN

Como en cualquier caso de dispositivos electromecánicos que ejecutan las mismas tareas, se presentan ofertas de distinta calidad y duración. En la actualidad será siempre del caso estar atentos a los valores reportados de EER (ya explicado) y SEER. El párrafo a continuación es la traducción de una publicación de una compañía de gran trayectoria en el mercado del aire acondicionado (Trane): "...SEER, por sus siglas en inglés (**Seasonal Energy Efficiency Rating**) representa la *Relación de Eficiencia de Energía de Estación*. Al igual que los kilómetros por litro en un automóvil, SEER mide la eficiencia general de un sistema completo de calefacción y enfriamiento con base en temporada estacional. A mayor SEER, mayor será la eficiencia energética, y menor será la huella ecológica que usted genere. La mejor eficiencia proviene de sistemas acoplados, es decir, sistemas en que todos los componentes están balanceados para trabajar conjuntamente y lograr la optimización de la eficiencia y del desempeño. Entre mayor SEER tenga un equipo más elevado será su precio, pero menor será su consumo energético. De inicio pensar en pagar un 30% más que un equipo convencional puede parecer mucho, sin embargo, el ahorro en consumo de energía se verá reflejado mes con mes en su recibo de luz, en algunos casos en 7 meses se recupera el excedente. A continuación se muestra un grafica para su mejor comprensión."

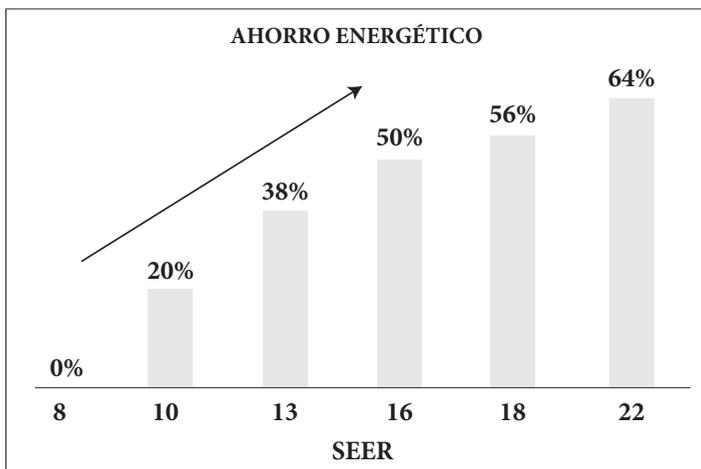


Figura 8.1. Ahorro energético.

CASO BASE

Para hacer ilustración del análisis de eficiencia energética en el caso base se seleccionan:

- a) Para los cambios pasivos aprobados en techos y muros, y
- b) Para las tres soluciones generales planteadas como sistemas de climatización.

Los parámetros de comportamiento disponibles son: $EER_{AA} = 0.87$ [TR/kW] (catálogo del equipo de aire acondicionado), $EER_{minisplits} = 0.80$ [TR/kW] (catálogo del equipo minisplits), $EER_{enfriam.evap.} = 5.2$ [TR/kW] (deducido del catálogo equipo), $PPD_{AA} = PPD_{minisplits} = PPD_{enfriador evap} = 5\%$ (propio de AA y calculado para enfriamiento evaporativo), $W_{EE-AA} = 7.5$ kW (catálogo equipo AA), $W_{EE-Minisplits} = 2.5$ kW (catálogo equipo minisplits), $W_{EE-enfriador evap} = 0.25$ kW (catálogo equipo)

a) *Modificaciones exteriores de techo y muros*

Carga original_{TECHOS-MUROS} = 5.305+4.781=10.086 kW = 2.87 TR (Tabla 7.2)

Carga Nueva_{TECHOS-MUROS} = 519+1.772= 2.291 kW = 0.65 TR (Tabla 7.2)

Entonces las potencias eléctricas consumidas en cada opción son:

$$W_{EE-AA} = \text{carga original} / EER_{AA} = 2.87/0.87 = 3.30 \text{ kW}$$

$$W_{EE-minisplits} = \text{carga nueva} / EER_{minisplits} = 0.65/0.8 = 0.81 \text{ kW}$$

$$W_{EE-enfriam.evap} = \text{carga nueva} / EER_{enfriam.evap.} = 0.65/5.2 = 0.13 \text{ kW}$$

En consecuencia

$$\eta_{AA} = (100-5) / 3.3 = 29 \text{ [satisfechos/kW]}$$

$$\eta_{minisplits} = (100-5) / 0.81 = 117 \text{ [satisfechos/kW]}$$

$$\eta_{enfriam.evap} = (100-5) / 0.13 = 731 \text{ [satisfechos/kW]},$$

que muestran, sin lugar a dudas, unas bondades, en términos de eficiencia energética, más que grandes.

B) *Soluciones generales de climatización*

$$\eta_{led-AA} = (100-5) / 7.5 = 9.4 \text{ [satisfechos/kW]}$$

$$\eta_{\text{Ied-minisplits}} = (110-5) / 2.5 = 38 \text{ [satisfechos/kW]}$$
$$\eta_{\text{Ied-enfriam.evap}} = (100-5) / 0.25 = 380 \text{ [satisfechos/kW]},$$

índices que también corroboran las bondades recién mencionadas.

Es muy visible que desde el punto de vista exclusivamente energético resultaron ampliamente justificadas las decisiones tomadas, pues los índices de eficiencia crecieron en gran modo. Llegados a este punto es necesario dejar en claro que una justificación desde el punto de vista simplemente energético no es definitiva, pues este recurso, aunque importante, está su-peditado al recurso económico; dicho de otra manera: aunque importante, no basta por sí misma la mejora en la eficiencia energética.

El software comercial que hace análisis energético (mas no análisis de eficiencia energética) se reconoce como herramienta útil en el desarrollo de proyectos de climatización. A continuación se citan los más conocidos.

Ecotect: Software de Diseño de Construcción Sustentable

Autodesk® Ecotect® Analysis, software de análisis de diseño sustentable, es una de las posibilidades a elegir dentro de las herramientas de diseño para una construcción sustentable. Ofrece una amplia gama de simulaciones y análisis de funcionamiento energético que permite mejorar el rendimiento de los edificios existentes o en el diseño de otros nuevos, siendo una útil herramienta al momento de diseñar, ya que va desde modelos generales del edificio hasta el detalle. Permite integrar los análisis de energía, agua y emisiones de carbono con herramientas que permiten visualizar y simular el comportamiento del edificio en el contexto de su medio ambiente.

Herramientas y funciones del software:

- Análisis energético del edificio: Calcula el total de energía utilizada y las emisiones de carbono en el modelo del edificio. El cálculo puede hacerse anual, mensual, diario y horario, a partir de una base de datos global de información meteorológica.
- Comportamiento térmico: Calcula las cargas y requerimientos de enfriamiento y calentamiento y analiza los efectos de los ocupantes, las ganancias internas, infiltraciones y equipos.
- Uso del agua y evaluación de costos: Calcula una estimación del uso de agua dentro y fuera del edificio.
- Radiación Solar: Permite visualizar la incidencia solar y la radiación en ventanas y otras superficies, en cualquier período de tiempo.
- Luz día: Calcula los factores de luz día y niveles de luminosidad en cualquier punto del modelo.

- Sombras y reflejos: Muestra la posición solar y el recorrido relativo con respecto al modelo, en cualquier fecha, hora y ubicación.

Con todas estas herramientas podemos realizar variados análisis durante la fase de diseño del proyecto. Utilizando Ecotect, decisiones sobre forma, orientación, elección de materiales, tamaño y ubicación de ventanas, que tienen el mayor impacto sobre la eficiencia energética del proyecto, son evaluables y, por consiguiente, optimizables. Por último, Ecotect permite a los arquitectos y diseñadores trabajar fácilmente en 3D aplicando todas las herramientas necesarias.

ESP-r es un código abierto de modelado de rendimiento energético del edificio creado por la *University of Strathclyde* [113]. ESP-r calcula el desempeño del edificio con base en un análisis de elemento finito en donde se resuelve un conjunto de ecuaciones de conservación. Desarrollado en 1974 y convertido en 2002 en licencia pública, GNU-ESP-r [114] está diseñado para trabajar en sistema operativo Unix y se puede ejecutar en plataforma Windows utilizando un modulador de Unix, o funcionar con la versión de Windows directamente. El actual administrador de ESP-r es Ian Beausoleil Morrison.

DOE2.com Home Page. *doe2.com/eQUEST*[®] [115] es un software de libre acceso, sofisticado pero pero fácil de usar, para análisis de uso de energía en el edificio. Esta herramienta provee resultados a nivel profesional con un nivel de esfuerzo muy razonable. Dentro de sus herramientas se cuentan:

- DOE-2. Herramienta para uso de energía y análisis de costos en edificaciones.
- eQUEST: the QUick Energy Simulation Tool.
- DOE-2. SUPPLEMENT. Version 2.1E. P.C. Winkelmann, B.E
- PowerDOE: Comparación de DOE-2.1E, DOE-2.2.
- Weather files: Archivos descargables de condiciones ambientales.
- +L: Lokmanhekim: Desarrollo conceptual.

TRNSYS (A TRAnSient SYstems Simulation Program)

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Winsconsin (<http://www.wisc.edu/>) . TRNSYS [116] es un programa de simulación transitoria con estructura modular. La biblioteca TRNSYS incluye muchos de los componentes comúnmente hallados en sistemas de energía eléctrica y térmica, así como rutinas para manejar ingreso de datos climáticos o funciones de variables dependientes del tiempo, y salida de resultados de la simulación. TRNSYS está muy bien adaptado para análisis detallados de cualquier sistema cuyo desempeño depende del paso del tiempo.

Por lo anterior se ha vuelto un software de referencia para ingenieros e investigadores de todo el mundo. Dentro de sus principales aplicaciones se cuentan sistemas solares (térmicos y fotovoltaicos), edificios de bajo consumo energético, sistemas HVAC, sistemas de energías renovables, co-generación y celdas de combustible.

EDIFICIOS ENERGÍA CERO, O ENERGÍA CERCANA A CERO, O ENERGÍA PLUS

Dada la naturaleza propia de un edificio, su funcionamiento implica necesariamente el consumo de distintas formas de energía. *Edificio Energía Cero* es aquel que cuenta con medios propios para generar toda la energía que consume; *Edificio Energía Cercana a Cero*, aquel cuya generación propia es un algo menor que sus consumos, y *Edificio Energía Plus* es el que produce más energía que la que gasta, es decir que cuenta con excedentes.

Aunque en la práctica estos tipos de edificaciones se conocen desde siempre, el término “*Zero Energy House*” se popularizó a partir del trabajo de Esbensen & Korsgaard [117], publicado en *Solar Energy* (1977) y desarrollado en la Universidad Técnica de Dinamarca. Aquí se construyó una casa de dos alas (60 m^2 c/u) separadas por un atrio cubierto (70 m^2), especialmente diseñada para clima frío, considerando la climatología propia del país. El primer cuidado fue proveer un aislamiento térmico impresionante, que disminuyó la carga típica de calefacción de 20000 kWh/año a 2300 kWh/año , esto es rebajar un 88.5%. El siguiente paso fue implementar un gran sistema calefactor con colector solar ($42 \text{ m}^2 = 12\text{m} \times 3.5\text{m}$) y su respectivo tanque de almacenamiento ($30 \text{ m}^3 = 2.5\text{m D} \times 6.5\text{m L}$), con resistencias eléctricas de 5 kW que respaldaban el conjunto. El aire de renovación se proveyó mediante un sistema de ventilación ($200 \text{ m}^3/\text{h}$ en general y $100 \text{ m}^3/\text{h}$ al mediodía), con recuperador de calor 90% eficiente. El consumo de agua caliente se limitó a 350 l/día en períodos soleados y 175 l/día en períodos nublados (29% del tiempo), y se instaló un recuperador de calor 50% eficiente a las salidas de duchas/lavadora/lavaplatos. El suministro de energía eléctrica fue de tipo convencional, es decir de la red local, y se contabilizó un consumo en bombas, válvulas y ventiladores del orden de 330 kWh/año . En este ejemplo, energía cero solo se refería a la térmica.

En la actualidad la generación de energía eléctrica en *Edificios Energía Cero* se da mayoritariamente mediante paneles fotovoltaicos, y algunas veces por turbinas de viento. Para lidiar con las fluctuaciones de producción y demanda se puede optar por almacenar en rack de baterías y/o conectarse

a la red pública a través de un controlador de carga automático que inyecte los sobrantes y tome los faltantes. El análisis económico deberá considerar las diferencias entre las tarifas por venta a la red y las tarifas por compras más el cargo mínimo o, en el caso de independizarse de la red, el costo de reponer el rack de baterías cada tres años, aproximadamente.

La producción de energía térmica puede tomar varias formas, pero la más sencilla y eficaz es el aprovechamiento de la energía solar: colectores solares térmicos de agua caliente (o vapor a baja presión), chimeneas solares de aire caliente, acumulación en la masa térmica del edificio, muros Trombe-Michel, y muros de agua. También se pueden mencionar el aprovechamiento de combustibles residuales, biocombustibles y biomasa. Con estas técnicas puede brindarse calefacción, refrescamiento y hasta refrigeración a los ambientes de la casa o el edificio. Entre otros desarrollos se encuentran la calefacción geotérmica y el pozo canadiense (aire acondicionado natural), pero es importante recordar que esta última técnica solo es aplicable en regiones donde operan las cuatro estaciones, y no en nuestra zona tórrida.

ANÁLISIS ECONÓMICO E IMPACTO AMBIENTAL

Un proyecto de climatización no puede considerarse terminado hasta no tener una confiable y completa información sobre los desembolsos económicos y los gastos que deban realizarse; pero lo anterior no debe interpretarse solo como una necesidad de información puntual-final sino como un insumo que permanentemente está en la mesa de discusiones, y que a veces orienta las tendencias del proyecto. Fundamentalmente las inquietudes a resolver tienen que ver con vida útil de los equipos, inversiones de capital para adquisiciones, costos de operación y mantenimiento, y sobre cuál, entre varias alternativas, es la más atractiva desde el punto de vista económico (renglón en el que cabe estimar si un cambio específico se justifica contablemente). Aunque rara vez se ha tenido en cuenta, adquiere mayor importancia el impacto ecológico que un proyecto causa; una buena medida de ese impacto está relacionado con las toneladas de CO₂ producidas por las actividades y los consumos incurridos. Este capítulo repasa los principios de ingeniería económica aplicables a la solución de estas necesidades, y enseña cómo cuantificar de una manera sencilla el CO₂ producido.

VIDA DEL PROYECTO

Como “el proyecto” es el edificio, habrá necesidad de diferenciar entre la vida del proyecto general (el edificio) y la vida de las facilidades de climatización. Aunque alguien pueda alegar que son iguales, pues no se concibe un edificio hoy climatizado y mañana no, es claro que un equipo de climatización, que tiene por lo general una duración entre corta y media, puede ser reemplazado por equipos distintos (por ejemplo, por obsolescencia) y hasta por sistemas distintos.

Vida del edificio. La duración de un edificio se proyecta dependiendo de su función. La Tabla 9.1 da razón de la permanencia de los inmuebles.

Tabla 9.1. Vida útil de diseño (VUD) por categoría o tipo de edificios.

Categoría de edificios	Vida útil de diseño por categoría (años)	Ejemplos
Temporales	Hasta 10	Construcciones no-permanentes, oficinas de ventas, edificios de exhibición temporal, construcciones provisionales
Vida media	25 - 49	La mayoría de los edificios industriales y la mayoría de las estructuras para estacionamientos
Vida larga	50 - 99	La mayoría de los edificios residenciales, comerciales, de oficinas, de salud, de educación
Permanentes	Más de 100	Edificios monumentales, de tipo patrimoniales (museos, galerías de arte, archivos generales, etc.)

Fuente: Canadian Standards Association, 2001; Australian Building Codes Board, 2006; International Standards Organization, 2000, Ref. [118].

Vida del sistema climatizador. La duración de los equipos climatizadores (AA por expansión directa, chillers, paquetes, enfriamiento evaporativo, ventiladores, etcétera) y de sus complementos (ductería, tuberías, aislamientos, ruedas entálpicas, deshidratadores, humectadores, controles automatizados, etcétera) depende de varios factores: la calidad seleccionada (marca), la dedicación de uso a la que se someta (# de horas de funcionamiento diario), el ambiente de trabajo (polvo, intemperie, calidad del suministro eléctrico...), y el mantenimiento que se le preste. La percepción general es que la vida media de esta clase de equipo está entre 6 y 10 años, Ref. [119], [120].

INVERSIÓN DE CAPITAL

La mejor información sobre la inversión a realizar es la que ofrece una cotización formal. Sin embargo este documento solo está disponible inmediatamente antes de comenzar la fase de ejecución, mientras que la referida información, el monto de la inversión, vital para la toma de decisiones, se necesita —así sea aproximada— desde la primera fase del proyecto. De acuerdo con [121] los estimados iniciales tienen incertidumbres del orden de 50% o superiores, y en la medida en que se afinan detalles este valor se reduce hasta el rango 10% a 30%.

El primer y más elemental estimado, ya lo relatamos, se manufactura con los índices globales que el medio local maneja al respecto. Por ejemplo, para el entorno técnico local colombiano una alternativa de AA en expansión directa está en el orden de 2 MM\$/TR, mientras en agua fría alcanza 4 MM\$/TR; un sistema de enfriamiento evaporativo completo instalado cae entre 2 y 2.5 MM\$ por cada 1500 cfm; un ventilador centrífugo nacional cuesta entre 7 y 7.5 MM\$ por cada 5000cfm; etcétera.

En la medida en que el diseño se perfila más claramente, se dispone de un conocimiento más definido no solamente respecto del número y la naturaleza de los equipos, sus capacidades y sus dimensiones, sino también de las preferencias relativas a marcas, acabados y especificaciones, y también de los sistemas auxiliares de suministro de servicios, seguridad y control. Por ejemplo, en una solución de aire acondicionado sistema agua-agua se deben inventariar para contabilidad de inversiones: 1. Obra mecánica: chiller(s), torre(s) de enfriamiento, tanque(s), manejadora(s) o *fancoils*, bombas, tuberías, ducterías, rejillas, filtración, aislamientos; 2. Obra civil: cimientos o fundaciones, estructuras, casetas de alojamiento; 3. Obra eléctrica: tableros, *breakers*, contactores, protecciones, conduits, conductores, tierras, iluminación; 4. Obra hidráulica y sanitaria: suministro de agua, *sprinklers*, drenajes; 5. Obra de seguridad y control: instrumentos de medición (flujo, amperaje, temperatura, presión, nivel, humedad, etc.), unidad de control (con su lógica de control y comunicaciones), alarmas visuales y sonoras, *conduits* y cableados. Cada uno de los ítems anteriores se debe cuantificar (así sea aproximadamente) según su tipo (#unidades, m², gpm@ftH₂O, cfm@pgca, etcétera) y especificar la calidad o marca. Sobre la base anterior, y de acuerdo con una base de datos (precios) actualizada, se liquida un presupuesto que deberá tener en cuenta los aumentos por AIU (administración, imprevistos (10 a 15%), utilidad (15 a 20%)), IPC, e IVA. Un cuidado a observar es que no se contabilice doblemente un desembolso; por ejemplo, el suministro de agua puede haber sido asignado al proyecto sanitario, y no debe contabilizarse en este balance.

CASO BASE

Las inversiones de capital para las tres alternativas del *Caso Base* comienzan por evaluar las modificaciones locativas para evitar cargas que aplican a las dos últimas: pintura, hiedra y cortasoles. Otras adquisiciones importantes son los equipos climatizadores. La Tabla 9.2 muestra las inversiones iniciales de las tres alternativas.

Pintura. Área a pintar: techo sala 36.3 m²; techo alcoba 13.4 m²; pared soleada oeste hacia salas: 54.2 m²; pared soleada sur: 11.9 m² hacia salas y 7.9 m² hacia alcoba posterior; pared no-soleada este: 14.2 m². Total: 36.3+13.4+54.2+11.9+7.9+14.2=138 m². Rendimiento pintura: 8.5 m²/litro; aumentar al doble pues son dos manos. Entonces, pintura necesaria: 138*2/8.5=33 lts (9 gal); costo litro: 11 \$; costo pintura: 33*11=363 \$³. Mano de Obra: maestro y ayudantes, 6 días de trabajo, salarios y prestaciones para un total de \$1'000. Alquiler de andamios, 6 cuerpos por 6 días para un total de \$240. Insumos (brochas, limpiadores) \$300. Con imprevistos del 20% Mano de Obra tiene un costo de \$1'849. Inversión obra pintura (sin AIU)= pintura + MdeO = 363 + 1'849 = 2'212 \$. *PARED VERDE (HIEDRA)*: Pared oeste 94.2 m², costo siembra y materiales, sin incluir AIU: 448 \$. *CORTASOLES*: la cotización actualizada para el sistema de cortasoles mostrado, sin AIU es 3'021 \$.

Aire acondicionado y enfriamiento evaporativo. Estos equipos, de las mejores marcas, fueron cotizados y son de consecución local. Tandem una condensadora con dos *fancoils*: 6'600 \$; *minisplit* de 1TR: 1'125 \$; enfriador evaporativo: US \$188 (FOB); en sitio = 1'150 \$.

COSTOS DE OPERACIÓN, MANTENIMIENTO, COMBUSTIBLES Y SERVICIOS

Los egresos periódicos en que se incurre para tener procesos industriales funcionando pueden dividirse en costos fijos y costos variables. La magnitud de estos últimos, a diferencia de los primeros, depende del *factor de planta* (fracción del tiempo en que se trabaja a carga plena). Como costos fijos se clasifican: mano de obra operarios producción, mano de obra operarios mantenimiento, materiales para mantenimiento, administración, distribución y mercadeo, desarrollo e investigación. Como costos variables están: materias primas, materiales de consumo diversos para operación (no llegan a formar parte del producto), disposición de sobrantes. En los costos de combustibles y servicios deben incluirse los consumos de energía eléctrica, agua corriente y comunicaciones.

3 Costos en miles.

Tabla 9.2. Inversiones iniciales en las distintas alternativas.

		AA (6.5tr)	Pasivas+mi- ni-splits AA(2tr)	Pasivas+ Enfriador Evaporativo (1.3tr)	
Obras acondicionamiento pasivo (pintura, hiedra, cortasoles) AIU sumado al final			5'681	5'681	
Obra mecánica	Chillers				
	Torres de enfriamiento				
	Tanques				
	Manejadoras, fancoils, condensadoras	2 fancoils, 1 con- dens. = 6'600	2 minisplits = 2'250	2 enfriadores evap. = 2'300	
	Bombas				
	Tuberías	12m, 1/4Cu= 240	10m, 1/4Cu=200	12m, 1/2pvc= 180	
	Ducterías + rejillas	14m ² , fbr- glass=1'700			
	Filtros y limpieza	12 ³ , 4u= 300			
Aislamientos					
Obra civil	Cimientos+ fundaciones	Global= 350	Global= 350	Global= 350	
	Estructuras	2u= 280	2u= 280	2u= 280	
	Casetas de alojamiento				
Obra eléctrica	Tableros	1u= 120	1u= 120	1u= 120	
	Breakers	2u= 220	2u= 220	2u= 220	
	Contactores	2u= 160	2u= 160	2u= 160	
	Protecciones				
	Conduits, conductores, tierras	24mx3#12+ 18m, 1/2pvc= 620	20mx3#12+ 14 m, 1/2pvc= 550	24mx3#12+ 18m, 1/2pvc= 620	
	Iluminación				
Obra hidráulica y sanitaria	Suministro de agua			Ya contabilizado	
	Sprinklers				
	Drenajes		6m, 1" pvc= 160		
Obra de seguridad y control	Instrumentos de medición	Flujo			
		Amperaje			
		Temperatura			
		Presión			
		Nivel			
		Humedad			
	Otros				
	Unidad de control	2u= 300	2u=300	2u= 300	
	Alarmas	Visuales			
		Sonoras			
Otros 6m= 120	Conduits				
	Cableados	6m= 120			
SUBTOTAL \$		11'010	10'231	10'491	
AIU \$		2'753	2'558	2'623	
TOTAL \$		13'763	12'789	13'114	

En el campo de la climatización de edificios lo más corriente es tener un contrato de mantenimiento con una firma especializada, la que periódicamente revisa y ajusta los elementos mecánicos como transmisiones, lubrica chumaceras, chequea niveles de vibración, hace limpieza de serpentines, cambia filtros, comprueba amperajes y cambia por daño o por prevención elementos sujetos a desgaste. El costo anual de estos contratos incluyendo repuestos puede estar entre el 10% y el 20% del precio de adquisición del equipo. En los casos de edificios grandes y complejos, por ejemplo grandes clínicas, se justifica la contratación de personal encargado para operación y mantenimiento, luego se contabiliza igual al caso industrial. Para cuantificar confiablemente los costos de consumo eléctrico se debe medir el amperaje en el totalizador y calcular de acuerdo con el número de horas diarias de funcionamiento y la tarifa operante. En otra modalidad, la forma aproximada, se pueden sumar las potencias nominales de componentes y aplicar un factor de diversidad que puede estar entre 0.7 y 0.85.

CASO BASE

Para las tres alternativas del *Caso Base* los costos periódicos incurridos en cada modalidad se muestran en la Figura 9.1. Los precios de los contratos de mantenimiento se cotizaron con firmas locales; las potencias se extrajeron de los catálogos de los equipos seleccionados (que en cada caso son: AA 7.5 [kW], minisplits 2.5 [kW], y enfriador 0.25 [kW]); el funcionamiento es 8 [h/día] = 2920 [h/año]; la tarifa EPSA para el estrato es 408 [\$/kW-h].

Figura 9.2. El gasto correspondiente es: Costo anual electricidad = Potencia [kW] * 2920 [horas por año] * 408 [\$/kW-h] (tarifa).

Tabla 9.3. Comparación evaluación de proyectos para diferentes alternativas.

	AA [\$/año]	Pasivas + minisplits AA [\$/año]	Pasivas+enfriador evaporativo [\$/año]
Costos fijos	Mano de obra operarios producción		
	Mano de obra operarios mantenimiento		
	Materiales para mantenimiento		
	Administración		
	Distribución y mercadeo		
	Desarrollo e investigación		
	Otros: contrato de mantenimiento	1'000	500

Continúa

		AA [\$/año]	Pasivas + minisplits AA [\$ /año]	Pasivas+enfriador evaporativo [\$/año]
Costos variables	Materias primas que no son parte del producto			
	Materiales de consumo diversos para operación			
	Disposición de sobrantes			
	Otros			
Combustible y servicios	Combustibles			
	Energía eléctrica	8'935	2'978	299
	Agua corriente			
	Comunicaciones			
Otros				
TOTAL [\$/año]		9'935	3'478	899

Se puede apreciar gran diferencia en un ítem tan importante!

EPSA hogares

Inicio Nosotros Oficina para inversionistas Clientes Proveedores Responsabilidad social Fundación EPSA Ruta de la energía Sala de prensa Servicios

Informes Tarifas Residenciales

Tarifas EPSA Abril 2012

La Empresa de Energía del Pacífico S.A. E.S.P. EPSA E.S.P informa a sus clientes en el VALLE DEL CAUCA, conectados a sus redes, las tarifas de prestación del servicio de energía eléctrica vigentes, calculadas con base en las resoluciones CREG 031 y 079 de 1997, 112 y 159 de 2001, 108 de 2003, 001, 019 y 119 de 2007, 017, 058, 068, 070, 097 y 133 de 2008, 010 DE 2009, 024, 116, 149 y 186 de 2010 y Resoluciones UPME 0355 de 2004 y 013 de 2005.

CS Consumo de Subsistencia es 173 kWh/mes en municipios con altura inferior a 1000 msnm y 130 kWh/mes en otros. En Barrios Subnormales CS es 184 kWh/mes en municipios con altura inferior a 1000 msnm y 138 kWh/mes en otros.

Estrato	1.1. Clientes con tensión primaria a 13.2 kv, propiedad de EPSA (CU1-2 con Inv.)		1.2. Clientes con tensión primaria a 13.2 kv, propiedad del Cliente (CU1-2 sin Inv.)	
	0-CS kWh/mes (\$/kWh)	Consumo mayor a CS kWh/mes (\$/kWh)	0-CS kWh/mes (\$/kWh)	Consumo mayor a CS kWh/mes (\$/kWh)
1	163,36	408,39	146,96	367,40
2	204,20	408,39	183,70	367,40
3	347,13	408,39	312,29	367,40
4	408,39	408,39	367,40	367,40
5 y 6	490,07	490,07	440,88	440,88

Barrios subnormales : el costo de la energía subsidiada es \$197,52 /kWh y \$229,67 /kWh para el consumo restante. Mediciones comunitarias en tensión 2 y estrato 1 : el costo de la energía subsidiada es \$137,41 /kWh Para mediciones comunitarias en tensión 2 y del estrato 1, el costo de la energía subsidiada es y para el resto es \$35,83 /kWh.

Figura 9.1. Tarifas de electricidad en el Occidente Colombiano.
Junio 2017.

ELEMENTOS DE INGENIERÍA ECONÓMICA

El valor del dinero en el tiempo

Siempre que se realizan proyecciones económicas a lo largo de un período prolongado es necesario tener muy en cuenta el poder adquisitivo del dinero a lo largo del tiempo. Un préstamo que se hace para cubrir una inversión inaplazable se refleja en una serie de pagos que suman considerablemente más que la cantidad recibida originalmente. Y es que el prestamista ha tenido claro que el servicio oportuno que ha proporcionado tiene que rendirle una ganancia. Entonces, para poder hacer apropiadas evaluaciones económicas de largo plazo se necesitan los métodos que permiten conocer los significados de los diversos ingresos y egresos hechos a través de toda la vida útil del proyecto en consideración. Para el caso de las facilidades de climatización en una edificación serán suficientes los conceptos de interés compuesto, valor presente, valor futuro, anualidad, costo capitalizado, e inflación. La nomenclatura aquí empleada es la de la ref. [121].

Tasa de Interés, o simplemente **Interés**, o **Tasa de Retorno**, es la compensación pagada por el uso del dinero prestado. Aunque en el lenguaje coloquial el interés es referido como un porcentaje, en las fórmulas se toma como un decimal (11% es 0.11).

Valor Futuro. Si P pesos (\$) [**Valor Presente**] se depositan hoy en una cuenta que rinde un interés i en cada período, y este interés es compuesto a lo largo de n períodos, ver la

Figura 9.2, la cuenta tendrá al final un valor futuro F según:

$$F = P \cdot (1 + i)^n$$

Frecuencia del Interés. En la práctica más usual de mercados, el interés se liquida con base anual, pero también ocurre que puede cobrarse p veces en el año. En este caso la ecuación anterior se escribe:

$F = P \cdot (1 + i/p)^{np}$ donde: np es el número total de períodos; i/p es la tasa de retorno del período; i es la tasa nominal de retorno (ver

Figura 9.2)

Interés Efectivo Anual. Es la tasa de retorno anual que entrega los mismos resultados que el interés cobrado p veces en el año. Así definida resulta mayor que la nominal. Ver

Figura 9.2. De las ecuaciones anteriores queda:

$$i_{\text{eff}} = (1 + i/p)^p - 1 \text{ o también}$$

$i_{eff} = e^i - 1$ cuando se usa *interés compuesto continuo* ($p \rightarrow \infty$)

Período menor que un año. En ese caso el valor futuro se calcula mediante:

$$F = P * (1 + n i_{eff}) \text{ donde } n \text{ es fracción de } 1$$

(ver Figura 9.2)

Valor Presente P. Frecuentemente en evaluaciones económicas lo más significativo y deseable de conocer es el valor actual de todos los ingresos y/o egresos que se tendrán a lo largo de la vida del proyecto. Ver

Figura 9.2. Según las ecuaciones mostradas, el valor equivalente actual de una cantidad futura es:

$$P = F * (1 + i_{eff})^{-n}$$

Anualidad A. Anualidad es una serie de transacciones de igual valor que ocurren en intervalos iguales (períodos). Esta modalidad es frecuente, y se usa por ejemplo para pagar una deuda, o para contabilizar los costos fijos, etc. Se clasifica como:

Anualidad Ordinaria. La más común, es aquella en donde las transacciones ocurren al final de cada período. Ver

Figura 9.2. Su equivalencia con el valor futuro está dada por:

$$F = A * [(1 + i_{eff})^n - 1] / i_{eff}$$

Anualidad con ejecuciones al principio de los períodos. Ver

Figura 9.2. En este caso la equivalencia con el valor futuro se expresa mediante:

$$F = A * [(1 + i_{eff})^{n+1} - (1 + i_{eff})] / i_{eff}$$

Costo Capitalizado (C_K). Un activo con costo inicial C_{FC} y vida económica de n años se desea reemplazar a perpetuidad. Ver

Figura 9.2. El **Costo Capitalizado** C_K es el costo inicial más el Valor Presente de los egresos periódicos que permite el reemplazo del activo cada n años por toda la eternidad. Si el valor de salvamento S es cero se tiene:

$$C_K = C_{FC} * \{ (1 + i_{eff})^n / [(1 + i_{eff})^n - 1] \} + C_Z / i$$

Inflación. La inflación es el aumento en los precios de los productos del mercado, cuyo origen está en los incrementos en la moneda circulante y en el crédito, sin los incrementos que debían corresponder en bienes y servicios disponibles, ref. [122]. La inflación se registra mediante el Índice de Precios al Consumidor IPC, que es publicado periódicamente.

La inflación no es la única causante en el cambio de precios; factores como el incremento de la demanda, el agotamiento de recursos naturales y el desarrollo tecnológico también influyen, pues los dos primeros los aumentan y el último los disminuye. El efecto de la combinación de estos tres elementos se llama **escalamiento**.

La **Tasa de Interés Real** es el dinero pagado por el uso del capital sin incluir el ajuste general de precios debido a la inflación, pero sí incluye el interés nominal. Un análisis económico puede hacerse en *pesos corrientes* si se tiene en cuenta la inflación, o en *pesos constantes*, cuando se excluye la inflación y se consideran solo el escalamiento y el costo real del dinero en el tiempo. Ambos análisis tienen ventajas y desventajas.

Supuestos en el Tiempo. En todo análisis económico cada movimiento financiero debe ser escalado a la fecha en que es ejecutado. Para cumplir con ese postulado en el proyecto de climatización será necesario ubicar los distintos desembolsos, que naturalmente deben ser definidos para cada caso particular. Para el proyecto ejemplo *CASO BASE* que se desarrolla hemos hecho los siguientes supuestos:

- El período de diseño se estima en un año: el primero.
- La fase de construcción en obra negra se da en el segundo año.
- Las inversiones en equipo se dan en el comienzo del tercer año.
- Los gastos de operación y mantenimiento se ubican en la mitad de cada año de vida útil.
- El valor de salvamento es cero.

Comparación de Alternativas de Inversión

Cuando se trata de proyectos en donde se dan ingresos y egresos, y donde compiten alternativas mutuamente excluyentes, antes de tomar decisiones es necesario identificar cuál opción es la que produce mejores rendimientos. Aunque riesgos e incertidumbres son parte constitutiva de estas actividades, el análisis que se da a este nivel es de tipo determinístico, esto es asumiendo certeza y estabilidad en los datos y los procesos. Existe para estos casos un abanico de métodos de comparación aproximados y exactos, como el Período de Reembolso, la Tasa Interna de Retorno, el Valor Presente Neto, etcétera.

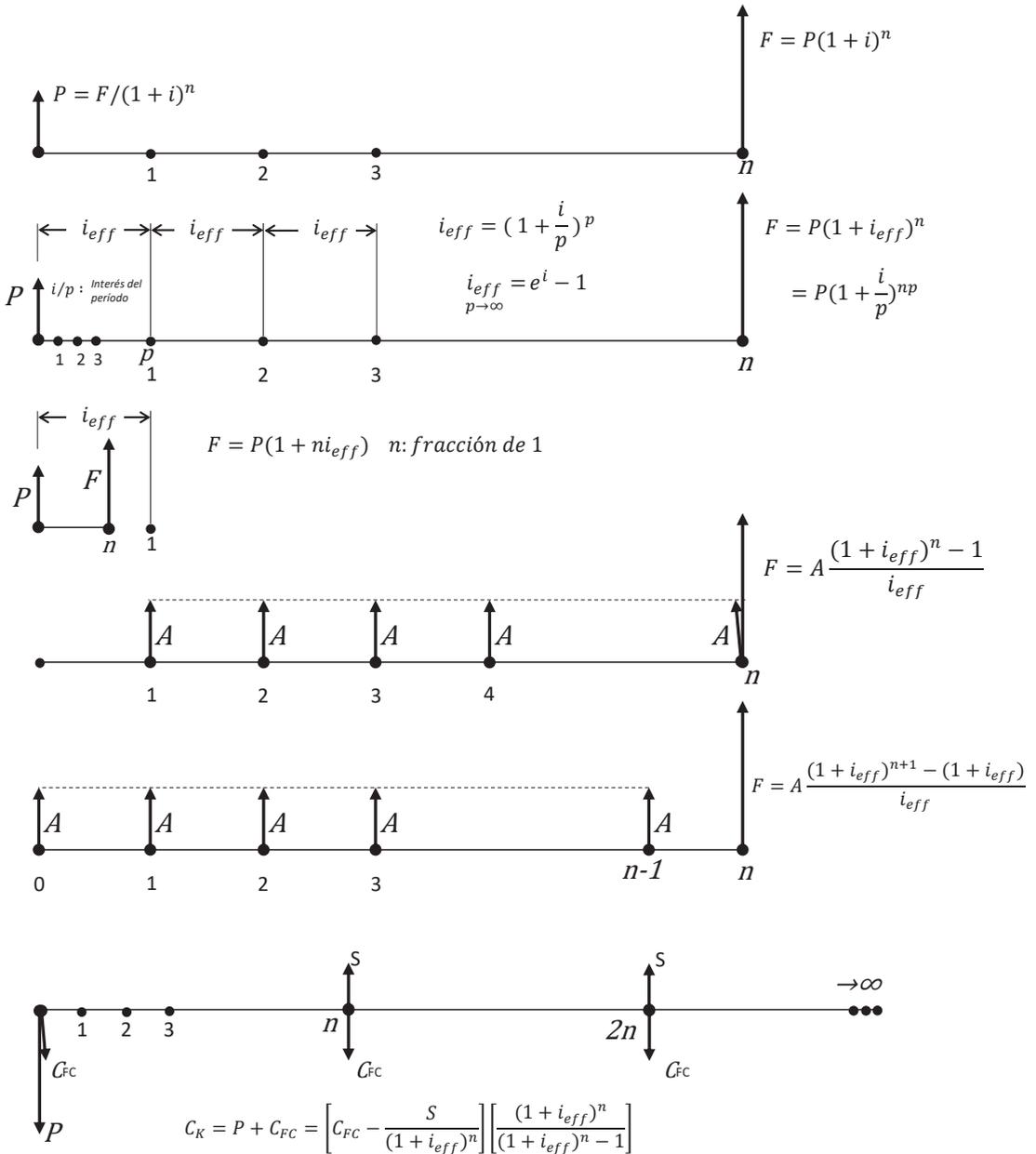


Figura 9.2. Distintas equivalencias del dinero en el tiempo.

En proyectos de climatización la comparación se simplifica en gran medida pues al no existir ingresos las pesquisas se limitan a enfocarse en identificar la alternativa que represente menores erogaciones. Es de anotar que se presentan dos posibilidades: instalaciones con vidas iguales e instalaciones con vidas diferentes.

Vidas Iguales. Dentro de varios sistemas climatizadores la mejor alternativa, desde el punto de vista meramente económico, es aquella cuyo **Valor Presente Neto** de egresos sea el menor de todos.

Vidas Distintas. Cuando existen alternativas compitiendo con diferentes vidas, se hace necesario llevarlas todas a una misma base u horizonte de planificación. Esto puede darse mediante la **Aproximación por Repetición**, la **Aproximación por Co-terminación** o la **Aproximación por Vida Infinita**. Una vez reducidas al escenario común se aplica el criterio del **Valor Presente Neto**.

Aproximación por Repetición. Consiste en definir un horizonte cuya duración es igual al mínimo común múltiplo de las vidas de las alternativas. En cada caso particular las magnitudes de los egresos se repiten en las sucesivas nuevas vidas de toda la extensión. Este método puede ser demasiado laborioso y no siempre realista.

Aproximación por Co-terminación. En esta propuesta se escoge arbitrariamente un horizonte cualquiera (por ejemplo, menor o igual que la vida más corta, mayor o igual que la más larga, intermedio, etc.). Posteriormente se calcula el valor de salvamento de las instalaciones al final del horizonte como ingreso económico de la alternativa, y se aplica el método de evaluación, Valor Presente Neto en este caso. El valor de salvamento puede ser el valor en libros, como costo inicial menos depreciación.

Aproximación por Vida Infinita. En esta modalidad todas las alternativas se repiten a perpetuidad, y en cada una de ellas se calcula el **Costo Capitalizado Total (TCC)**, el cual es la suma del **Costo Capitalizado** C_K del equipo original más el Valor Presente de los gastos anuales. Para el caso donde el valor de adquisición original es C_{FC} , el salvamento es cero y los gastos anuales C_Z son constantes, por lo que se tiene:

$$TCC = C_{FC} * \{ (1 + i)^n / [(1 + i)^n - 1] \} + C_Z / i$$

CASO BASE

Como en el *Caso Base* se trata de comparar alternativas de diferente vida económica, se usará el método de Aproximación por Vida Infinita. El valor de adquisición inicial C_{FC} se tomará, en cada uno de los tres casos, igual a la

inversión inicial, pues se supone que todas las instalaciones y adecuaciones deberán renovarse en prácticamente su totalidad; la tasa de retorno se escoge como 10% anual, pues es un valor accesible del mercado; C_z son los gastos anuales particulares; y las vidas serán 8 años para el AA expansión directa, y 6 años para *minisplits* y enfriadores evaporativos.

De acuerdo con lo anterior se obtiene:

$$TCC_{AA} = 13'763 * \left\{ \frac{(1+0.1)^8}{(1+0.1)^8 - 1} \right\} + (9'935/0.1) = 25'798 + 99'350 = 125'148$$

$$TCC_{minisplits} = 12'789 * \left\{ \frac{(1+0.1)^6}{(1+0.1)^6 - 1} \right\} + (3'478/0.1) = 29'365 + 34'780 = 64'145$$

$$TCC_{enfr.evap} = 13'114 * \left\{ \frac{(1+0.1)^6}{(1+0.1)^6 - 1} \right\} + (899/0.1) = 30'111 + 8'990 = 39'101,$$

en donde son muy visibles la ventaja económica del enfriador evaporativo y la desventaja de la solución aire acondicionado simple.

PRODUCCIÓN DE CO₂

Cada país tiene su propio “factor de emisión del margen combinado”, que indica la cantidad de CO₂ producida en su proceso particular de generación eléctrica. Este valor depende de los orígenes que tenga la generación eléctrica local —térmico (según combustible), hidráulico, nuclear, alternativos—, y también está incluido por las eficiencias de planta. En Colombia el índice es 0.401 [kg_{CO2}/kWh] (referencia del MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA FACTORES DE EMISION DEL S.I.N. SISTEMA INTERCONECTADO NACIONAL COLOMBIA 2015, p. 22, Bogotá, dic. 2016. http://www.siame.gov.co/siame/documentos/2016/Documento_calculo_del_FE_SIN_2015_dic_2016.pdf).

La producción de CO₂ de un consumo energético dado se calcula mediante:

$$\dot{m} = \frac{T * W_{EE} * FE}{1000},$$

donde: = producción CO₂ [TON_{CO2}/año]; W_{EE} = Potencia eléctrica equipo; FE = factor de emisión del margen combinado.

Aplicando a las tres alternativas del caso base se obtienen:

- $\dot{m}_{AA} = 8.8$ [TON_{CO2}/año]
- $\dot{m}_{minisplits} = 2.9$ [TON_{CO2}/año]

- $m_{Enf-*evap*} = 0.3$ [TON CO₂/año]

En conclusión, como se puede apreciar en la Tabla 9.4, tanto desde los puntos de vista de eficiencia energética, económico y ecológico, la alternativa más ventajosa es la de modificaciones bioclimáticas complementada con enfriamiento evaporativo. Hay que destacar que las diferencias resultaron muy amplias, permitiendo concluir, sin vacilación alguna, que esta es la alternativa a implementar.

Tabla 9.4. Resumen final de comparación entre alternativas

	ALTERNATIVA			
	Original	A.A.	Modificaciones bioclimáticas + <i>Mimisplits</i>	Modificaciones bioclimáticas + Enfrto. evap.
Confort PPD [%]	63	5	5	5
Eficiencia Energética [satisfechos/kWh]		9.4	38	380
Comparación Económica TCC [MM\$]		125´148	64´145	39´101
Contaminación producida [TON _{CO₂} /año]		8.8	2.9	0.3

BIBLIOGRAFÍA

- 1 ANSI/ASHRAE American National Standards Institute & American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc, «ANSI/ASHRAE STANDARD 55-2013 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy» 2013.
- 2 Y. A. Cengel, «Heath Transfer A Practical Approach», NY, (1998).
- 3 J. Hardy, J.D., H. Wolf y H. Goodell , «Pain sensations and Reactions», Baltimore, 1952.
- 4 ASHRAE American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, «ASHRAE Fundamentals» de 2005.
- 5 J. Gamboa , O. Lopez, V. Iglesias, C. Herrera y M. Rosillo, Confort ambiental en vivienda de interés social en Cali, Cali: Universidad del Valle, 2011.
- 6 K. Charles, «Fanger ´s thermal comfort and draught models», 2003.
- 7 Carrier, «Manual de AIRE ACONDICIONADO», México, 2009.
- 8 Soler & Palau ficha técnica, «Velocidad del aire», 2017.
- 9 K. Blazejczyk, . Y. Epstein, G. Jendritz, H. Staiger y B. Tinz, «Comparison of UTCI to selected thermal índices», *International Journal of Biometeorology*, vol. 56, nº 3, pp. 515-535, 2012.
- 10 Y. EPSTEIN y D. Moran, «Thermal Comfort and the Heat Stress Indices», *Ind Health*, vol. 44, nº 3, pp. 388-398, 2006.
- 11 F. Houghton FC, y C. Yaglou, «Determining equal comfort lines», *J Am Soc Heat Vent Eng.*, vol. 29, pp. 165-176, 1923.
- 12 C. Yaglou y W. Miller, «Effective temperature with clothing», *Tranm. Amer. Soc. Heat. Vent. Engrs.*, vol. 31, nº 89, 1925.
- 13 H. Alan, «Thermal Comfort», 2010. [En línea]. Available: <http://me.emu.edu.tr/hacisevki/ASHRE%20Thermcomfort.pdf>. [Último acceso: 2017].
- 14 K. Parsons, Human Thermal Environments, Boca Raton FL USA : CRC Press, 2002.

- 15 A. Dufton, «The Measurement of Equivalent Temperature», *J. Hyg (Lond)*, vol. 33, n° 4, pp. 474-475, 1933.
- 16 T. Bedford, *Industr. Hlth. Res. Bd. Report No. 76*, n° 76, 1936.
- 17 F. Chrenko, *Bedford's Basic Principles of Ventilation and Heating*, London.: H.K. Lewis, 1974.
- 18 H. Nilsson, *Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*, National Institute for Working Life, 2004, p. 37.
- 19 V. Barbosa Felix, D. de Moura, L. Pereira y A. Tribess, «Evaluation of thermal comfort in surgical environments using Fanger's method and equivalent temperatures», *Ambiente Construido*, vol. 10, n° 4, 2010.
- 20 M. FA, «Température effective d'une atmosphere Généralisation température résultante d'un milieu», In: *Encyclopédie Industrielle et Commerciale, Etude physiologique et technique de la ventilation. Librairie de l'Enseignement Technique*, Paris, 1933, pp. 131-185.
- 21 . J. Paulo y E. Galvani, «“ÍNDICE DE TEMPERATURA RESULTANTE (TR) NO ZONEAMENTO DO CONFORTO TÉRMICO DO RIO GRANDE DO SUL”», Joao Paulo, 2012,» *Geonorte*, vol. 1, n° 5, 2012.
- 22 H. Vernon y C. Warner, «The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures», *J. Hyg*, 1932.
- 23 T. Bedford, «Environmental warmth and its measurement», *Med Res Council Memo 17. HMSO*, , 1946.
- 24 P. Siple y C. Passel, «Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures», *Proc. Amer. Philos. Soc.*, vol. 89, pp. 177-199., 1945.
- 25 R. OSCZEWSKI y M. BLUESTEIN, «THE NEW WIND CHILL EQUIVALENT TEMPERATURE CHART», *AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY*, pp. 1453-1458, 2005.
- 26 H. Belding HS y T. Hatch, «Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain», *Heat Pip Air Condit*, vol. 27, pp. 129-36, 1955.
- 27 C. YAGLOU y D. MINARD, «Control of heat casualties at military training centers. YAGLOU CP, MINARD D», *AMA Arch Ind Health.*, vol. 16, n° 4, pp. 302-16, Oct 1957.
- 28 R. Kirchner Amor, «Determinación del índice de estrés térmico WBGT durante la celebración del 20º Campeonato Europeo de Atletismo en Barcelona», Universitat de Barcelona, 2010. [En línea]. Available: <http://studylib.es/doc/6232185/determinaci%C3%B3n-del-%C3%ADndice-de-estr%C3%A9s-t%C3%A9rmico-wbgt>. [Último acceso: 2017].
- 29 O. Fanger, *Thermal Comfort*, Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

- 30 A. Gagge, J. Stolwijk y Y. Nishi, «An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response», *ASHRAE Transactions*, vol. 77, pp. 247-262., 1971.
- 31 A. Gagge y Y. Nishi, «Physical indices of the thermal environment», *ASHRAE J.*, vol. 18, pp. 47-51, 1976.
- 32 P. Moonen, T. Defraeye, V. Dorer, B. Blocken y J. Carmeliet, «Urban Physics: Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand», *Frontiers of Architectural Research*, vol. 1, nº 3, pp. 197-228, 2012.
- 33 M. Humphreys y J. Nicol, «Understanding the adaptive approach to thermal comfort», *ASHRAE Transactions*, vol. 104, nº 1b, pp. 991-1004, 1998.
- 34 J. Pickup y R. de Dear, An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT_SET*) - Part I - The Model and its Assumptions. In *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium. WCASP 50: WMO/TD No.1026*. Edited by R.J. de Dear, J.D. Kalma, T.R.Oke and A. Auciliems., Geneva: WMO, 2000, pp. 279-283.
- 35 Pickup y de Dear, «An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT_SET*) - Part II - Applications», de *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium. WCASP 50: WMO/TD No.1026.*, Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium. WCASP 50: WMO/TD No.1026., Chapter: «An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT_SET*) - Part II - Applications», Publisher: WMO: Geneva, Editors: RJ de Dear, JD Kalma, TR Oke, A Auciliems, pp., 2000, pp. 284-290.
- 36 L. Marques Monteiro y M. Peinado Alucci, «Theoretical issues on outdoor thermal comfort: historical review, state of the art discussion and proposal for model clasification», *Ambiente construido*, vol. 7, nº 3, pp. 43-58, 2007.
- 37 P. McNall, J. Jaax, F. Rohles, R. Nevins y W. Springer, «Thermal comfort (thermally neutral) conditions for three levels of activity, Part I», *ASHRAE Transactions*, vol. 73, nº 2014, pp. 1.3.1.-I.3.14, 1967.
- 38 R. Nevins, F. H. Rohles, W. Springer y A. Feyerherm, «Temperature-humidity chart for thermal comfort of seated persons», *ASHRAE Transactions Part I*, vol. 72, pp. 283-291., 1966.
- 39 T. Doherty y E. Arens, «Evaluation of the physiological bases of thermal comfort models», *ASHRAE Transactions*, vol. 94, nº 1, p. 15, 1988.
- 40 M. Humphreys, «Field studies and climate chamber experiments in thermal comfort research», de *Thermal Comfort : Past Present and Future*, Garston, UK: Building Research Establishment, 1994, pp. 52-72.
- 41 W. Howell y P. Kennedy, «Field validation of the Fanger thermal comfort model», *Human Factors*, vol. 21, nº 2, pp. 229-239, 1979.
- 42 J. Nichol y M. Humphreys, «Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings», *Energy and Buildings*, vol. 34, pp. 563-572, 2002.

- 43 R. de Dear, G. Brager y D. Cooper, «Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. FINAL REPORT ASHRAE RP- 884», 1997.
- 44 D. AULICIEMS y J. D. KALMA, «Human thermal climates of Australia», *Geographical Research*, vol. 19, n° 1, pp. 3-24, 1981.
- 45 K. McCartney y J. Nicol, «Developing an adaptive control algorithm for Europe», *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 6, pp. 623-635, 2002.
- 46 R. de Dear, T. Akimoto, E. Arens, G. Brager y C. Candido, «Progress in thermal comfort research over the last twenty years», *Indoor Air*, vol. 23, n° 6, pp. 442-461, 2013.
- 47 T. Hoyt, S. Schiavon , A. Piccioli , D. Moon y K. Steinfeld , «CBE Thermal Comfort Tool», Center for the Built Environment, University of California Berkeley, 2013. [En línea]. Available: <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>. [Último acceso: 10 2017].
- 48 A. Marsh, «psychrometric cart Human Comfort», Square One Research PTY LTD, 1999. [En línea]. Available: <https://psychotool.informer.com/>.
- 49 M. Santamouris, *Energy and Climate in the Urban Built Environment*, Routledge, 2013.
- 50 S. e. a. “. C. 2. t. P. S. B. - . C. o. W. G. I. t. t. F. A. R. o. t. I. P. o. C. C. Solomon y N. U. 9. Cambridge University Press, Solomon, S., *et al.* “Climate Change 2007 the Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- 51 Wikipedia, «<https://es.wikipedia.org/wiki/Meteorolog%C3%ADa>», [En línea].
- 52 «Nimbus weather servicess», 2001. [En línea]. Available: <http://nimbus.com.uy/weather/pdf/cap2.pdf>.
- 53 E. Castro Fonseca, «Manual de Procedimientos para las Estaciones Meteorológicas», Organización para estudios Tropicales, 2008. [En línea]. Available: <http://www.ots.ac.cr/meteoro/files/manual.pdf?pestacion=1>.
- 54 SAGARPA Mexico, «Colegio Posgraduados - estación meteorológica», [En línea]. Available: <http://www.cm.colpos.mx/meteoro/>. [Último acceso: 2017].
- 55 B. Blocken y J. Persoon, «Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard», *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 97, n° 5-6, pp. 255-270, 2009.
- 56 IDEAM, «Rosa de los vientos Bucaramanga,» Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales, MinAmbiente, Colombia, 10 1999. [En línea]. Available: <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/rosas/viento.htm>.

- 57 R. Kumar, B. Ramaswamy y A. Kumar, «Air Pollution Instrumentation (A Review of Web Sites on Air Pollution Instrumentation)», Global Education and Consulting Services, Missisauga, Ontario, Canada; Department of Civil Engineering, University of Toledo, OH», [En línea]. Available: www.eng.utoledo.edu/~akumar/IAP1/instrumentation.htm.
- 58 IDEAM, «Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010», 2012. [En línea]. Available: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe_del_Estado_de_la_Calidad_del_Aire_en_Colombia_2011-2015_vfinal.pdf.
- 59 T. Piqué Ardanuy, «Concentración inmediatamente peligrosa para la vida o la salud. Nota técnica de prevención NTP 292», Madrid.
- 60 W. Strauss y S. Mainwaring, «W. Strauss, S. J. Mainwaring», de *Contaminación del aire: causas, efectos y soluciones*, Trillas, 1995, p. 177.
- 61 ASHRAE, ANSI/ASHRAE STANDAR 62.1- 2016. Ventilation for acceptable indoor air quality, Atlanta: ASHRAE, 2016.
- 62 SMACNA, iNDOOR AIR QUALITY, 1998.
- 63 OSHA, «OSHA Labor Department USA», [En línea]. Available: <https://www.osha.gov/Publications/3214-10N-05-spanish-07-05-2007.html>. [Último acceso: 11 2017].
- 64 AENOR, «Norma UNE 171330: Calidad ambiental en interiores», Madrid, 2008.
- 65 AENOR, «UNE 100012, 'Higiene en la red de conductos'», 2005.
- 66 AENOR, «UNE 171330, 'Calidad ambiental en interiores'», Madrid.
- 67 AENOR, «UNE 171340:2012: Validacion y cualificación de salas de ambiente controlado en hospitales», Madrid, 2012.
- 68 MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO, «REGLAMENTO DE INSTALACIONES TERMICAS EN LOS EDIFICIOS», 2013.
- 69 EPA, «Reviewing National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)», Washington, 1997.
- 70 Chemical Abstracts Service, «CAS», [En línea]. Available: <https://www.cas.org/>. [Último acceso: 2017].
- 71 Matheson Gas Products, Matheson Gas Data Book. Lower and Upper Explosive Limits for Flammable Gases and Vapors (LEL/UEL), p. 443.
- 72 D. T. Teitelbaum, «Capítulo 56: Introducción a la toxicología ocupacional y ambiental», de *Farmacología básica y clínica.*, L. m. b. (. e. edición), Ed. Mexico, McGraw-Hill-Lange, 2009.
- 73 Sistemas Quimicos, Sistemas Químicos. Chemical Bond Approach Project, Barcelona: Editorial Reverté, 1966.

- 74 B. Pope, Dirección, *Cosmos: Una odisea en el espacio-tiempo. Capitulo el mundo liberado*. [Película]. USA: Cosmos Studios, 1980.
- 75 The Engineering toolbox, «Gases - Explosive and Flammability Concentration Limits», The Engineering toolbox, [En línea]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/explosive-concentration-limits-d_423.html. [Último acceso: 11 2017].
- 76 Environmental Chemistry, «Environmental, Chemistry & Hazardous Materials News, Careers & Resources», Environmental Chemistry, [En línea]. Available: <http://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/H.html>. [Último acceso: 11 2017].
- 77 WHO, «WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen, dioxide and sulfur dioxide», 2006.
- 78 EPA, «Integrated Review Plan for the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter», Washington, 2008.
- 79 Lenntech, «Efecto del plomo sobre la salud», Lenntecvh, 11 2017. [En línea]. Available: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/pb.htm#ixzz-4fOAm68CT>.
- 80 R. Nevin, «Understanding international crime trends: The legacy of preschool lead exposure», *Environmental Research*, vol. 104, n° 3, pp. 315-336, 2007.
- 81 F. Burriel Martí, F. Lucena Conde, S. Arribas Jimeno y J. Hernandez Mendez, *Química analítica de los cationes: Plomo*. Química analítica cualitativa, 18ª ed., Thomson., 2006, pp. pp. 426-435..
- 82 Car and Driver, «Plomo baja su índice atmosférico gracias a la prohibición», *Car and Driver*, 2017.
- 83 J. Lincoln y J. Lincoln Kitman, «The Secret History of Lead By Jamie Lincoln Kitman», *The Nation*, 2 3 2000.
- 84 L. Liu, B. Urch, R. Poon, M. Szyszkowicz, M. Speck, D. R. Gold, A. J. Wheeler, J. A. Scott, J. R. Brook, P. S. Thorne y F. Silverman, «Ling Liu, *et al.* “Effects of Ambient Coarse, Fine, and Ultrafine Particles and Their Biological Constituents on Systemic Biomarkers: A Controlled Human Exposure Study” Environmental health perspectives june 2015 volume 123 issue 6», *Environ Health Perspect*, vol. 123, 2015.
- 85 NAFA ; National Air Filtration Association, *NAFA GUIDE TO AIR FILTRATION*, 2º ed., Washington DC, 1996.
- 86 Radon Toxicity: Who is at Risk?, Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2000., «ATSDR; Agency for Toxic Substances and Disease Registry», 2000. [En línea]. Available: <https://www.atsdr.cdc.gov/csem/csem.asp?csem=8&po=7>.

- 87 J. M. Samet, «Indoor radon and lung cancer. Estimating the risks», *Samet, J. M. (1992). «Indoor radon and lung cancer. Estimating the risks». The Western journal of medicine 156 (1): 25-9. PMC 1003141. PMID 1734594*, vol. 156, nº 1, pp. 25–29, 1992.
- 88 IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «INFORME DEL ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN COLOMBIA 2011–2015», Bogotá, 2015.
- 89 The Gale Group Inc., *Encyclopedia of Public Health*, 2002.
- 90 J. R. Brook, T. F. Dann y R. Burnett, , «The Relationship Among TSP, PM10, PM2.5, and Inorganic Constituents of Atmospheric Particulate Matter at Multiple Canadian Locations», *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 47, nº 1, 2011.
- 91 TSI, *MEASURING TOTAL SUSPENDED PARTICULATES (TSP) WITH AEROSOL PHOTOMETERS*.
- 92 IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, *RESOLUCIÓN 610 DE 2010 Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006*”, Bogotá, 2006.
- 93 IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, *RESOLUCIÓN 601 DE 2006. Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia*, Bogotá, 2006.
- 94 IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, *RESOLUCIÓN 909 DE 2008, normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas*, Bogotá, 2008.
- 95 IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, *Resolución 1377 de 2015 (por el cual se modifica la Resolución 909 de 2008)*, Bogotá, 2015.
- 96 Presidencia de la República, «RESOLUCIÓN 650 DE 2010. Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire”», *Diario Oficial de la Republica de Colombia*, 2010.
- 97 IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, *RESOLUCIÓN 2153 DE 2010 (Noviembre 2) Por la cual se ajusta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas*, Bogotá, 2010.
- 98 IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, *RESOLUCIÓN 2154 de 2010. Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones*, Bogotá, 2010.

- 99 ACGIH ; American conference of Governmental Industrial Hygienists, Industrial Ventilation A Manual of Recommended Practice, Cincinnati, Ohio, USA, 1998.
- 100 NIOSH, The National Institute for Occupational Safety and Health, Guidance for Filtration and Air-Cleaning Systems to Protect Building Environments from Airborne Chemical, Biological, or Radiological Attacks, 2003.
- 101 ANSI/ASHRAE, «Std. 52.2-2012: Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle Size (ANSI Approved)», 2012.
- 102 NAFA; National Air Filtration Association, «NAFA Understanding MERV 2014», 2014. [En línea]. Available: <https://www.nafahq.org/wp-content/uploads/52-2-Brochure-November-2014-BW.pdf>.
- 103 A. M. A. AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS, BUILDING OWNERS, SMACNA, US GREEN BUILDING COUNCIL, EPA y ASHRAE, Indoor Air Quality Guide. Best practices for design, construction and commissioning, 2010.
- 104 ANSI/ASHRAE, «Standard 62.2-2016. Ventilation and Acceptable Air Indoor Quality in Residential Buildings», 2016.
- 105 SMACNA; Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association, «HVAC Duct Construction Standards», 2003.
- 106 ISO 14644-1:2015, «Cleanrooms and associated controlled environments -- Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration», de ISO 14644-1, 2015.
- 107 Drexel University, «<http://www.pages.drexel.edu/~jef22/myweb4/hcalc.htm>», [En línea]. Available: <http://www.pages.drexel.edu/~jef22/myweb4/hcalc.htm>. [Último acceso: 4 Enero 2018].
- 108 F. Hutchinson, Design of heating and ventilating systems, N.Y.: The Industrial Press, 1955.
- 109 J. H. Lienhard IV y J. Lienhard V, A Heat Transfer textbook, Cambridge Massachusetts: Phlogiston Press, 2017.
- 110 Y. Cengel y A. Ghajar, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, NY: Mc Graw Hill, 2015.
- 111 A. Macías, *Proyecto Mejoramiento Bioclimático Vivienda Urbana*, Cali, 2012.
- 112 M. Santamouris y D. Asimakopoulos, Passive Cooling of Buildings, London, UK: James & James, 2001.
- 113 University of Strathclyde, «<http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>», [En línea]. Available: <http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>. [Último acceso: enero 2018].

- 114 University of Strathclyde, «http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_overview.htm», Enero 2018. [En línea]. Available: http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r_overview.htm.
- 115 Department of Energy, USA, «<http://www.doe2.com/>», Enero 2018. [En línea]. Available: <http://www.doe2.com/>.
- 116 University of Wisconsin, «<http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>», Enero 2018. [En línea]. Available: <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>.
- 117 T. Esbensen, T.V. y V. Korsgaard, «Dimensioning of the solar heating system in the Zero Energy House in Denmark», *Solar Energy*, vol. 19, pp. 191-200, 1977.
- 118 S. Hernandez Moreno, «Cómo se mide la vida útil de los edificios?», *Revista Ciencia*, vol. 67 , nº 4, 2016.
- 119 Climaexpress, «<https://climaexpress.cl/>», Julio 2017. [En línea]. Available: <https://climaexpress.cl/>.
- 120 J. L. Ramirez Pajuelo, «AA de precision vs AA de confort», *Mundo HVACR*, Enero 2014.
- 121 A. Bejan, G. Tsatsaronis y M. Moran, *Thermal Design & Optimization*, N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
- 122 Electric Power Research Institute, *Technical Assessment Guide (TAG-TM)*, Vols. %1 de %23, Rev 6, TER-100281, 1991.
- 123 P. R. Mondelo, E. G. Torada, S. Comas, E. Castejón y B. Esther, *Ergonomía 2 Confort y Estrés Térmico*, 2013.
- 124 F. T. Jose, *La Ciudad y el Medio Natural*”, Siglo XXI, 2007.
- 125 R. J. de Dear, T. Akimoto, G. Brager, C. Candido, K. Cheong, N. Nishihara, S. Shekhar, S. Tanabe, J. Toftum, H. Zhang y Y. Zhu, «Progress in thermal confort research over the last twenty years», *Indoor air*, vol. 23, nº 6, pp. 442-61, 2013.
- 126 World Health Organization, «WHO guidelines for indoor air quality. Selected Pollutants», WHO - Regional Office for Europe, 2006. [En línea]. Available: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf.
- 127 IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «LISTA LABORATORIOS AMBIENTALES ACREDITADOS IDEAM – MATRIZ AIRE», 2016. [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/596001/6.+Listado+completo+laboratorios+Acreditados+a+31+de+marzo+de+2016.pdf/9947cade-e885-490a-9b53-7ff8b8409c4a>.
- 128 M. Lippmann, *Environmental Toxicants*, N.Y.: Wiley, 2009.
- 129 EPA, U.S. Environmental Protection Agency, *Air Quality Criteria for Particulate Matter*, . EPA 600/p.99/002. Washington, DC., 2001.
- 130 EPA, US Environmental Protection Agency, «Residential Air Cleaners: A Summary of Available Information», 2008.

- 131 EPA; US Environmental Protection Agency, «US Environmental Protection Agency», 2017. [En línea]. Available: <http://www.epa.gov>.
- 132 J. Pickup y R. deDear, «An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT_SET*) – Part 1 -The model and its assumptions, and Part 2- applications», de *Biometeorology and Urban Climatology at the Turn of the Millennium. WCASP 50: WMO/TD No.1026, Chapter: “An Outdoor Thermal Comfort Index (OUT_SET*) - Part I - The Model and its Assumptions*, WMO: Geneva, Editors: RJ de Dear, JD Kalma,, 2000.

LOS AUTORES*

Miguel Enrique Rosillo Peña

Profesor titular de Ingeniería Mecánica en la Universidad del Valle, Colombia. Ingeniero mecánico de la Universidad del Valle y maestro en Ingeniería en Energías Alternativas, de la Universidad de Andalucía, España. Su interés se ha centrado en las áreas de refrigeración y aire acondicionado, eficiencia energética, ventilación y transporte neumático, termodinámica teórica y aplicada, y arquitectura bioclimática.

Fue directivo de la Asociación Colombiana de Ingenieros Electricistas y Mecánicos, ACIEM; ha sido consultor de las principales industrias regionales, y ha realizado numerosos proyectos de ingeniería arquitectónica, climatización y calidad de aire.

Carlos Alberto Herrera Cáceres

Profesor titular de Ingeniería Mecánica y de Arquitectura de la Universidad del Valle, Colombia. Cursó su pregrado en la Universidad del Valle, su Maestría en Termofluidos en la Universidad Nacional Autónoma de México, y su Doctorado en Lehigh University, Pennsylvania. Sus áreas de trabajo son eficiencia y valoración energética, flujo de fluidos, termodinámica, climatización y arquitectura bioclimática.

Miembro de ASHRAE y ACAIRE, consejero del capítulo estudiantil de ASHRAE en la Universidad del Valle, y participante en numerosos proyectos industriales de eficiencia energética y diseño de arquitectura sostenible.

* Los profesores Herrera y Rosillo son coautores de varios libros de investigación en el campo de arquitectura ecológica aplicada (Confort ambiental en vivienda interés social en Cali y Confort ambiental en escuela públicas de Cali), y han publicado numerosos artículos en revistas reconocidas en el área de ciencias térmicas. La obra Hundimiento de la Avenida Colombia les ha merecido compartir honores, siendo reconocidos con el Premio Obras CEMEX Internacional, edición XXIII, 2014, tercer lugar; el Premio Obras CEMEX Colombia, 2014, primer lugar, categoría Infraestructura y Urbanismo, y el Premio CEMEX Colombia, 2014, categoría Premio Especial Sostenible. Y por la obra Plaza de la Caleñidad fueron acreedores del Premio CEMEX Colombia, 2015, primer lugar, categoría Infraestructura y Urbanismo.



Universidad
del Valle

Programa ditorial

Ciudad Universitaria, Meléndez

Cali, Colombia

Teléfonos: (+572) 321 2227

(+572) 321 2100 ext. 7687

<http://programaeditorial.univalle.edu.co>

programa.editorial@correounivalle.edu.co