

# Ventilación natural de edificios

Fundamentos y Métodos de Cálculo  
para aplicación de Ingenieros y Arquitectos



EDITOR: Eduardo Yarke

nobuko



**Fundamentos y Métodos de Cálculo para  
aplicación de Ingenieros y Arquitectos**

# **“Ventilación Natural en Edificios”**

**Editor: EDUARDO YARKE**



[www.ARQUIFUTURA.com](http://www.ARQUIFUTURA.com)

Mermet, Alejandro Gabriel  
Ventilación natural de edificios / edición literaria a cargo de: Eduardo Yarke - 1a ed. - Buenos Aires: Nobuko, 2005.  
140 p.: il.; 30x21 cm.

ISBN 987-584-036-X

1. Edificios-Ventilación. I. Yarke, Eduardo, ed. lit. II. Título  
CDD 644

EDUARDO RICARDO YARKE  
Arquitecto – Profesor e Investigador - UNLU

FUNDAMENTOS FÍSICOS – CAP IV  
ALEJANDRO GABRIEL MERMET  
Lic en Física – UNSa – Ex Investigador - CRICYT

#### **COLABORADORES:**

INVESTIGACIÓN  
MARTÍN PABLO SEOANE  
Ingeniero Industrial – UNLU

DISEÑO de GRÁFICOS [pág. 24, 88 a 95]  
KARLA MARQS

Luján 2005

Hecho el depósito que marca la ley 11.723  
Impreso en Argentina / Printed in Argentina

La reproducción total o parcial de este libro, en cualquier forma que sea, idéntica o modificada, no autorizada por los autores, viola derechos reservados; cualquier utilización debe ser previamente solicitada.

© 2005 nobuko

ISBN 987-584-036-X

Noviembre de 2005

Este libro fue impreso bajo demanda, mediante tecnología digital Xerox en bibliográfica de Voros S.A. Av. El Cano 4048. Capital.  
Info@bibliografika.com / www.bibliografika.com

En venta en:  
LIBRERIA TECNICA  
Florida 683 - Local 13 - C1005AAM Buenos Aires - Argentina  
Tel: 54 11 4314-6303 - Fax: 4314-7135 - E-mail: ventas@nobuko.com.ar

FADU - Ciudad Universitaria  
Pabellón 3 - Planta Baja - C1428EHA Buenos Aires - Argentina  
Tel: 54 11 4786-7244

El desarrollo sustentable requiere imprescindiblemente de la vigorosa contribución de una arquitectura que sea a su vez sustentable



## Indice

<u>1 – Introducción</u> .....	7
o ¿Es necesario volver a la ventilación natural? .....	8
o Alcances de la ventilación natural .....	10
o Funciones de la ventilación natural .....	10
o Bibliografía .....	11
<u>2 - Calidad de aire interior y ventilación natural</u> .....	12
o Factores de riesgo mas comunes .....	12
o Problemas frecuentes de los edificios con aire acondicionado y bajo nivel de renovación del aire interior .....	13
o Síntomas del SEE .....	13
o El uso de la ventilación natural para el control de la calidad de aire interior .....	14
o Cálculo de flujo de aire para calidad de aire interior .....	16
o Bibliografía .....	20
<u>3 – Ventilación natural para el confort térmico en verano</u> .....	21
o El entorno de bienestar termofísico .....	22
o Los intercambios térmicos entre el ser humano y el ambiente que lo rodea .....	23
o Los intercambios térmicos entre el edificio y el ambiente que lo rodea .....	24
o El uso de la ventilación natural para el confort térmico en verano .....	25
o Ventilación directa sobre las personas .....	26
o Ventilación nocturna .....	27
o Bibliografía .....	30
<u>4 – Fundamentos físicos para Ventilación Natural</u> - A.Mermet .....	31
o El aire puro .....	31
o Aire seco y aire húmedo .....	31
o Propiedades del aire húmedo – carta sicrométrica .....	32
o Estados del aire. Aire salubre e insalubre .....	34
o Aire viciado .....	34
o Aire confinado .....	35
o Efectos de la respiración .....	35
o Bienestar termohigrométrico .....	37
o Intercambio térmico del cuerpo humano .....	38
o Calor interno a disipar .....	39
o Pérdida de calor por difusión de vapor de agua a través de la piel .....	39
o Pérdida de calor latente por la respiración .....	40
o Pérdida de calor sensible por la respiración .....	40
o Calor ganado o perdido por conducción a través de la indumentaria .....	40
o Ventilación de ambientes .....	42
o El fenómeno de la convección .....	42
o Fluidodinámica .....	46
o - Nociones de Fluidos. Propiedades .....	46

- Tipos de flujo .....	47
- Fundamentos de mecánica de fluidos .....	48
o Bibliografía .....	50
<u>5 – Las fuerzas que originan la ventilación natural</u> .....	51
o Efecto debido al viento .....	51
- Origen del viento .....	51
- Presión del viento sobre edificios .....	52
- Velocidad local del viento .....	53
- Coeficiente de presión Cp – Métodos de cálculo .....	54
o Efecto debido a la temperatura .....	70
- El efecto Snack .....	70
- Ecuación de Bernoulli .....	70
- Efecto Jet en las aberturas .....	71
- Flujo de aire debido al efecto de la temperatura .....	71
- Nivel de presión neutral .....	72
- Determinación del coeficiente de descarga .....	73
o Efecto combinado del viento y la diferencia de temperaturas .....	73
o Bibliografía .....	75
<u>6 – Modelos empíricos para el cálculo estimativo de parámetros de ventilación natural</u> .....	76
o Introducción .....	76
o Métodos de cálculo empíricos para la predicción de caudales de aire .....	78
- El método del British Standard .....	78
- El método de ASHRAE .....	80
- El método de Aynsley .....	83
- El método de De Gidds y Phaff .....	83
o Métodos de cálculo empíricos para la estimación de velocidades de aire dentro de edificios ventilados naturalmente .....	84
- El método de Givonni .....	84
- Métodos basados en datos tabulados .....	85
- La metodología CSTB .....	87
- La metodología Ernest .....	96
o Métodos de cálculo empíricos para dimensionar aberturas .....	98
- El método I del Florida Solar Energy Centre .....	99
- El método II del Florida Solar Energy Centre .....	101
- El método ASHRAE .....	103
- El método de Aynsley .....	104
- El método del British Standard .....	105
- Análisis comparativo .....	106
- Método de las ecuaciones de lazo (Looping equations) .....	108
o Bibliografía .....	110
<u>7 – Sugerencias prácticas para el diseño de sistemas de ventilación natural</u> .....	111
o Localización del edificio y sus partes componentes .....	111
o Forma y orientación del edificio .....	114
o Diseño del paisaje .....	115
o Forma del techo .....	117
o Ubicación y tamaño de aberturas .....	118

○ Forma y tipo de ventanas .....	122
- Efecto de mosquiteros en ventanas .....	123
○ Uso de aletas .....	124
○ Distribución interna del edificio .....	127
- Distribución horizontal .....	128
- Distribución vertical .....	129
○ Bibliografía .....	130
<b>8 – Factores que limitan la aplicación de la ventilación natural y estrategias de control</b> .....	<b>131</b>
○ Barreras que limitan la aplicación de la ventilación natural .....	131
- Seguridad .....	131
- Ruido .....	131
- Contaminación del aire .....	132
- Sombreo .....	132
- Ráfagas fuertes o vientos arrachados .....	133
- Compromiso de los usuarios para adecuar patrones de uso .....	133
- Regulaciones contra incendios .....	133
- Control manual o automático .....	134
- Falta de herramientas de diseño apropiadas .....	134
- Impacto estético .....	134
- Mayor riesgo profesional para los diseñadores .....	134
- El cobro de honorarios .....	135
○ Estrategias de control para edificios ventilados naturalmente .....	135
○ Bibliografía .....	138
<b>9 – Anexo : Disquette con algunos de los métodos empíricos para un cálculo rápido</b>	
- Métodos incluidos en el disquette .....	139



# 1 – INTRODUCCIÓN

Durante algunas décadas en el siglo XX la energía requerida para un desarrollo acelerado, que incrementaba su consumo en forma exponencial, estuvo disponible en cantidades aparentemente ilimitadas y a precios razonables, por lo que no se apreciaban motivos para reducir su consumo.

Con el advenimiento de la primera crisis del petróleo, en los años setenta del siglo pasado, grandes sectores de la opinión pública mundial comenzaron a tomar conciencia sobre la naturaleza finita de los recursos energéticos más empleados y la necesidad de preservarlos.

Como respuesta a esta crisis se implementan por vez primera técnicas para la racionalización en el uso de la energía, comenzando por la industria y los transportes y un poco más tarde aplicándolas también en los edificios. Estas técnicas nacieron y se probaron en los países denominados desarrollados, pero la tendencia se hizo extensiva a todo el planeta.

Desde entonces contribuyen a fortalecer esta tendencia no solo ya la escasez anunciada de los hidrocarburos, sino también la importancia que asumen los problemas ambientales derivados de la contaminación provocada por el excesivo consumo, especialmente el fenómeno denominado Calentamiento Global de la Atmósfera y el denominado Agujero de Ozono.

El relativo éxito que tuvo el Protocolo de Montreal para morigerar a largo plazo los efectos del Agujero de Ozono y la entrada en vigor de los Protocolos de Kyoto en febrero de 2005 (de una aplicación mucho más compleja), acentúan esta convicción de que racionalizar el uso de la energía y aplicar técnicas basadas en los recursos renovables es un problema y una necesidad urgentísima del hoy y no un problema que pueda seguir pateándose hacia el futuro.

Al enfocar en particular la problemática que plantean los edificios es significativo el hecho que del consumo de energía global representan (como promedio en los países de mediano desarrollo) un 30% y de ello surge la importancia de implementar técnicas propias que permitan contribuir desde este sector al desarrollo sostenible global.

La función principal de los edificios - proveer de albergue y protección de la intemperie a los seres humanos - y que como consecuencia de la expansión tecnológica y de la escala de valores que se impusieron junto al desarrollo industrial se apoya actualmente en la utilización masiva del equipamiento mecánico, debe de ser reinterpretada para dar lugar al concepto de diseño, construcción y mantenimiento sustentables en relación con el medio y los recursos naturales disponibles, planteado esto como una respuesta pragmática a los requerimientos de la época y no como una simple moda de vida efímera.

El diseño y el uso sustentable implica una manera de pensar, diseñar, construir y operar edificios acorde con esta concepción y amplía la responsabilidad ambiental y ecológica por su funcionamiento a los diseñadores, constructores, operadores y usuarios.

Se puede fundamentar filosóficamente esta postura planteando que el desarrollo de las actividades humanas debe de hacerse desde una visión económica y cultural que priorice las particularidades locales y anteponga a toda otra consideración la decisión ética de *no comprometer el desarrollo y el medio ambiente de las*



*generaciones futuras*, minimizando el uso de los recursos escasos y no renovables y evitando todo tipo de emisiones contaminantes.

Es importante, como apoyo a estos conceptos, tener en cuenta que los edificios construidos en el presente desarrollarán su vida útil durante los próximos cincuenta a ochenta años y que la incierta situación energética y política presente tiene fuertes probabilidades de extenderse en el tiempo y profundizarse en el futuro. Esta inestabilidad creciente no permite asegurar que edificios con altos consumos energéticos puedan ser mantenidos en el largo tiempo de su vida útil, sea por los costos energéticos que cada vez serán mayores, como por las normativas ambientales que se impondrán en los próximos años.

También es posible evaluar el contexto de crisis social y económica permanentes como una oportunidad que se abre para nuevas actividades y para nuevas especialidades apoyadas en saberes específicos hasta hoy poco difundidos y que es allí en donde las nuevas generaciones de ingenieros y arquitectos tendrán un campo de aplicación y desarrollo de mucha importancia.

## ¿Es necesario volver a la ventilación natural?

Si hacemos una apretada síntesis de lo ocurrido históricamente con la climatización de edificios podemos afirmar que la tecnología de climatización artificial consolidada en el período siguiente a la Segunda Guerra Mundial en el siglo pasado, permitió que se diseñaran envolventes de edificios con total independencia de la localización geográfica de los mismos, y así fue que pasaron a un segundo plano la importancia de las orientaciones en sus distintas fachadas, la resistencia de sus muros al flujo térmico, la relación entre muros opacos y vidriados o cualquier aplicación de técnicas dirigidas al uso racional de la energía consumida, o sea ignorando toda característica constructiva que mínimamente tuviera en cuenta al clima local y su influencia. El equipamiento mecánico era la panacea para superar todos los inconvenientes que por una inadecuada relación edificio-clima local se produjeran.

La primitiva reacción frente a la crisis energética de los setenta, consistió en reducir las pérdidas por renovaciones e infiltraciones de aire encerrando las estructuras dentro de envolventes herméticamente selladas.

Esto si bien provocó una baja importante del consumo energético de los edificios en los períodos fríos, fue a expensas de una cantidad significativa de inconvenientes que surgieron bajo la forma de excesiva humedad interior, formación de hongos y presencia de bacterias en los conductos de aire, sobrecalentamiento generalizado en verano, etc. entre los inconvenientes principales.

Las consecuencias perjudiciales para la salud de los ocupantes debido a estos nuevos problemas no se hicieron esperar y tuvieron su mayor manifestación en algunas tipologías particulares, como los edificios de oficinas con grandes superficies vidriadas y en donde se demostraron claros impactos negativos en la productividad de las personas que allí trabajaban como consecuencia de la mala calidad del aire interior.

En los ochenta se acentuaron las preocupaciones acerca de las consecuencias negativas que causaba la reducción de los niveles de renovación del aire interior sobre los ocupantes y nuevas investigaciones acerca de estos problemas dieron lugar a una novedosa categoría de edificios: los que presentaban el **síndrome del edificio enfermo**, denominación con la que se conoció a aquellos edificios que por sus bajos niveles de ventilación interior, contenían aire enrarecido con altos niveles de dióxido de carbono, contaminantes, virus y bacterias, etc. y que fue el motivo original para la

aparición de renovadas reglamentaciones y regulaciones como las normativas europeas posteriores a 1995 que exigen un incremento notable en los niveles de ventilación del aire confinado interior si las comparamos con las que habían regido hasta entonces.

A los problemas particulares en ciertos tipos de edificios se sumaron luego los problemas ambientales de orden general como el alarmante **Agujero de Ozono** que año a año se ampliaba sobre el continente antártico y la Patagonia sudamericana y que para mitigarlo el Protocolo de Montreal estableció la prohibición universal del uso de los CFCs (clorofluorcarbonados) como gases refrigerantes empleados en equipos de aire acondicionado.

En la actualidad el centro de las preocupaciones ambientales está enfocado al **Calentamiento Global de la Atmósfera** como consecuencia del efecto invernadero causado por la emisión de contaminantes de diferentes tipos, en el que se destaca la emisión del CO<sub>2</sub> como factor principal y que es causado por la combustión de todo tipo de combustibles fósiles.

Es precisamente este problema el que se trata de mitigar mediante la aplicación del Protocolo de Kyoto.

La sumatoria de todos estos efectos acentúa la necesidad de armonizar a los edificios con las características del clima local, desde la etapa inicial del diseño, aprovechando al máximo los recursos que la naturaleza provee y la utilización de estos recursos en sistemas pasivos para el calefaccionamiento y el refrescamiento interior.

La mayor parte del costo del consumo de un edificio se define en las fases de diseño (más del 90%) ya que en estas fases se determinan la forma, orientación y sistemas de calefacción y ventilación del mismo. De allí la necesidad de diseñar al edificio teniendo en cuenta el consumo energético desde el inicio de su concepción. La figura 1.1 muestra cómo en la fase de diseño ya se determinan la mayor parte de los costos futuros del edificio.

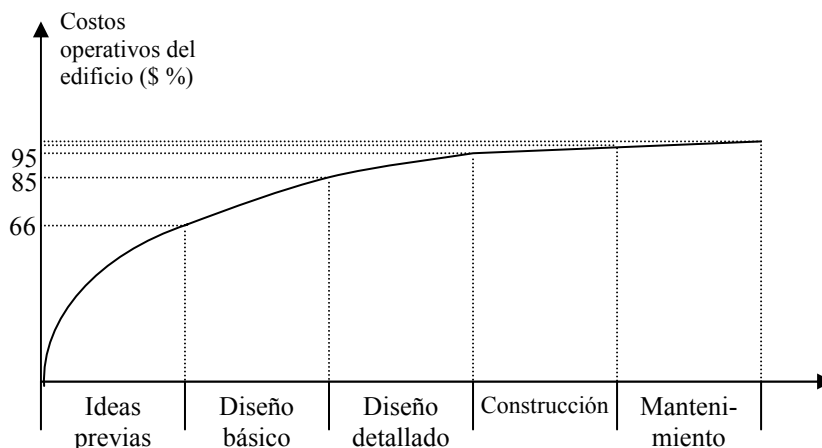


Figura 1.1. Gráfico que estima el origen de los costos operativos de un edificio (extraído de “Technical Design”, de Sullivan,R.)

Como alternativa a los sistemas mecánicos y aprovechando de los recursos que brinda la naturaleza, la ventilación natural aparece como una solución muy atractiva para brindar un confort térmico aceptable asegurando una calidad óptima de aire interior y cuya aplicación es posible en una variedad de regiones climáticas.

La ventilación natural soluciona además algunos de los problemas provocados por los distintos sistemas mecánicos de ventilación, tales como el ruido, los costos del mantenimiento y del consumo energético y es importante destacar que diferentes encuestas realizadas en los últimos años en los EEUU indicaron que ante la opción, la ventilación natural también es preferida por los usuarios.

No sería real tampoco defender que la ventilación natural pueda o deba reemplazar totalmente al aire acondicionado, ya que éste es muy útil en ciertas circunstancias donde es insuficiente la implementación de ventilación natural, pero sí que su empleo debería ser mucho mayor del que se hace en la actualidad y que para ello hay que aumentar y difundir los conocimientos acerca de este tema

## **Alcances de la ventilación natural**

La ventilación natural puede ser atractiva para los proyectistas porque ofrece adecuadas soluciones capaces de satisfacer las necesidades de confort y calidad de aire interior en un gran rango de condiciones climáticas. Aparece como una estrategia lógica para muchos tipos de edificios que por diferentes razones no pueden ser equipados con sistemas mecánicos costosos; tales como escuelas, edificios de oficinas pequeños o medianos, edificios de departamentos de nivel standard, edificios públicos y de recreación, etc.

Entre sus principales ventajas está la del bajo costo inicial de mantenimiento y operativo comparado con los sistemas de aire acondicionado, además de no ocupar espacio físico en planta. Su mayor desventaja consiste en ciertos períodos de disconfort en verano, aunque éstos podrán ser tolerables para los ocupantes del edificio si se mantienen dentro de ciertos límites.

Sin embargo, "natural" también significa que el comportamiento será aleatorio y difícil de optimizar con un control eficiente. Para la aplicación de la Ventilación Natural los fenómenos físicos a tener en cuenta no son excesivamente complejos, pero si lo es la intención de pronosticar o simular el posible funcionamiento en forma anticipada por la altísima variabilidad de los elementos que intervienen.

Otro elemento a tener en cuenta es que en muchos espacios urbanos la contaminación del aire exterior y los altos niveles de ruido vuelven inapropiada a la ventilación natural, a menos que se utilicen diseños especiales que eviten el contacto directo entre el ambiente exterior y el interior. Para que la ventilación natural sea efectiva se requiere que el edificio tenga una gran permeabilidad, es decir una gran superficie de aberturas, lo que puede provocar riesgos en cuanto a la seguridad y conflictos con las regulaciones para la prevención de incendios.

Como toda tecnología tendrá sus limitaciones, sus ventajas y desventajas, sus oportunidades de aplicación y sus situaciones de imposibilidad. Para decidir en estas contradicciones está la solvencia de los profesionales a quienes se le debe dotar de las herramientas que permitan adoptar las decisiones mas convenientes y oportunas.

## **Funciones de la ventilación natural**

Las funciones básicas de la ventilación natural son dos: asegurar una calidad óptima del aire interior mediante la ventilación sanitaria y/o brindar confort térmico en verano a los ocupantes del edificio, ya sea a través de la ventilación directa sobre las personas (ventilación de confort) o con la ventilación nocturna sobre la masa del edificio (refrescamiento convectivo). Todo esto será descripto en los siguientes capítulos.

## Bibliografía

1. "Natural Ventilation in Buildings", Capítulo 1. Editor F. Allard (1998). James & James. Londres.
2. Módulos didácticos de la asignatura Ingeniería Bioambiental (2004) en la carrera de Ingeniería Industrial de la UNLU - Eduardo Yarke y Martha Fajol.
3. Climate change and natural disasters: Will the design of buildings have to be different in the future?. Alain Maugard (2002). Artículo del CSTB(Centre Scientifique et Technique du Batiment), París, Francia.
4. Arquitectura sustentable. Reporte de las Naciones Unidas (1992) Conference on Environment and Development, Río de Janeiro.



## 2 – CALIDAD DE AIRE INTERIOR Y VENTILACIÓN NATURAL

En las últimas décadas se descubrió que el microclima de los edificios puede enfermar a sus ocupantes y si se tiene en cuenta que el 80% al 90 % de nuestro tiempo transcurre en locales cerrados con ambientes contaminados en mayor o menor grado, es fundamental adecuar los diseños de los sistemas de climatización y ventilación conforme a los últimos resultados de las investigaciones científicas en esta materia.

Muchos de esos recintos disponen de sistemas de ventilación y/o climatización forzada del aire y se trata, por lo general, de edificios herméticos cuyas ventanas no están previstas para la ventilación natural sino para la iluminación. La toma de aire se realiza desde el exterior y se distribuye hacia el interior por conductos, lo que permite regular los caudales de renovación en niveles generalmente muy bajos en relación con los volúmenes interiores

Por lo general, se trata de edificios meramente funcionales que se destinan habitualmente a oficinas y comercios, con grandes superficies en planta para un uso empresarial. Pero esta moda del acondicionamiento artificial no quedó confinada en los edificios corporativos, sino que también se extendió allí donde las condiciones económicas lo permitieron, incluyendo a escuelas, guarderías, residencias particulares, hoteles, etc. La mayoría de estos edificios son actualmente construcciones livianas y de ejecución acelerada, con las superficies interiores recubiertas de materiales textiles o sintéticos adheridos con pegamentos especiales de características volátiles.

La relación entre un edificio y sus características constructivas con las enfermedades que sus ocupantes habituales pudieran padecer vinculadas al mismo, no resultó sencilla ni fácil. Pasaron bastantes años hasta que se relacionó estadísticamente similares cuadros clínicos con la permanencia en determinados tipos de edificios. Pero la evidencia se pudo ir obteniendo, a pesar de la resistencia que muchas empresas pusieron para esta confirmación, temerosas de las consecuencias legales que pudieran iniciarse. Así se terminó por reconocer el *Síndrome del Edificio Enfermo* (SEE), que designa al conjunto de síntomas que presentan los individuos ocupantes de estos bloques.

Para poder hablar de edificios enfermos es necesario que más del 20% de sus ocupantes habituales presente alguna de las manifestaciones del SEE (escozor de ojos, sequedad de la piel, congestión nasal). Salvo en algunos casos puntuales no es una patología severa, aunque todavía no se conocen bien las consecuencias a largo plazo.

Además no es la baja renovación de aire exterior la única responsable del SEE; otros factores y circunstancias pueden originar los síntomas y los problemas: materiales volátiles, tipos de actividad, hábitos de los ocupantes, entorno donde se hace la toma exterior de aire, etc.

### Factores de riesgo mas comunes

**Contaminantes ambientales:** como compuestos químicos y biológicos pueden estar presentes en el aire y causar alguno de los síntomas. Los contaminantes más significativos son dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapores orgánicos, fibras, polvillo en suspensión.

**Los propios ocupantes se convierten en fuentes de contaminación:** el fumar origina humo que es reciclado por el sistema y distribuido por todo el edificio, un sistema de ventilación necesita al menos 3 horas para eliminar el 95 % del humo de un solo cigarrillo, y el 5 % que queda es todavía nocivo. Los filtros y los purificadores de aire electrónicos logran eliminar partículas del humo de tabaco, sin actuar sobre aquellas que se depositan sobre los alimentos, los muebles, la piel, la ropa y otras superficies. Lo mismo ocurre con los materiales usados para la limpieza y desinfección, con el ozono desprendido por las fotocopiadoras, y con otros productos que se lanzan al ambiente. No hay que olvidar los contaminantes que pueden proceder del exterior en función de la toma de aire exterior.

**Los olores, los problemas de iluminación, el ruido:** también pueden contribuir al disconfort y a la aparición de algunos síntomas. Pero son fundamentalmente **la temperatura y el grado de**

**humedad** los que más problemas generan debido a las desigualdades existentes entre unas zonas y otras del mismo edificio, ya que es difícil que su distribución sea homogénea.

También la **ionización** de la atmósfera de estos edificios se ha mencionado como causa del SEE. Los iones son moléculas del aire que contienen pequeñas cargas eléctricas. Hay iones positivos y negativos, y están en una proporción de cinco a cuatro en una atmósfera equilibrada. En las ciudades hay un exceso de iones positivos, mientras que en el campo y en las sierras abundan los negativos. La ausencia de iones negativos en un ambiente cerrado podría ser la causa de muchos síntomas según algunos expertos, pero no hay evidencia científica de ello y tampoco la utilización de generadores de iones ha evidenciado beneficios.

**La ventilación insuficiente:** es una de las causas que con más frecuencia se aduce. La medición de CO<sub>2</sub> es un buen parámetro para medir la calidad del aire: cuando las renovaciones son insuficientes, la concentración de CO<sub>2</sub> supera las 1000 ppm (partes por millón) e indica un mal funcionamiento del sistema de ventilación. El aire "preparado" es una mezcla de diferentes proporciones de aire exterior e interior que ha sido filtrado, calentado o enfriado, humidificado o deshumidificado en función de las necesidades. Un funcionamiento deficiente provoca cambios que son percibidos por los ocupantes y que además pueden ser objetivados con las mediciones oportunas: concentración de CO<sub>2</sub>, temperatura, humedad relativa y absoluta y otros parámetros que exigen técnicas más sofisticadas.

## Problemas frecuentes de los edificios con aire acondicionado y bajo nivel de renovación del aire interior

- Contaminantes procedentes del exterior que ingresan por las tomas de aire
- Contaminación generada por los ocupantes: tabaco, fotocopiadoras, operaciones de pintura, limpieza, reparación cuya renovación es insuficiente
- Contaminantes que provienen de zonas especiales: cocina, imprenta, laboratorio y que distribuyen al resto del edificio por los conductos
- Olores permanentes
- Diferencias de calidad del aire entre zonas próximas
- Presencia elevada de contaminantes biológicos (virus y bacterias) que se depositan en los conductos e instalaciones

## Síntomas del SEE

Salvo en algunos casos excepcionales, las patologías que aparecen no son severas. Los síntomas más frecuentemente descritos se pueden agrupar en cinco categorías:

- Oculares: escozor, enrojecimiento y lagrimeo.
- Cutáneos: sequedad de la piel, prurito (picazón permanente) generalizado o localizado, enrojecimientos localizados.
- Vías respiratorias altas: rinorrea (moquillo), congestión nasal, estornudos, picor nasal, hemorragias nasales, sequedad de garganta, carraspera, ronquera.
- Vías respiratorias bronquiales y pulmonares: sensación de opresión torácica, sensación de ahogo, pitidos en el pecho, tos seca.
- Generales: dolor de cabeza, dificultad para concentrarse, irritabilidad, somnolencia, mareos.

También se han descrito enfermedades más severas como neumonitis por hipersensibilidad, fiebre de los humidificadores, asma, rinitis crónica, dermatitis y, excepcionalmente, pero con carácter muy grave puede aparecer la temida Legionelosis, llamada así por una epidemia de esta enfermedad en Filadelfia, en 1976, que se diseminó entre los participantes de una convención estatal de la Legión Americana y que puede producir neumonía. La bacteria Legionella existe naturalmente en el agua y en la tierra húmeda y ha sido encontrada en grifos de agua fría y caliente, tanques de agua caliente, agua de torres de refrigeración de aire acondicionado y condensadores evaporantes.

Además, cabe destacar que estudios científicos recientes aseguran que trabajar en oficinas sin suficiente ventilación aumenta el riesgo de sufrir gripe y conjuntivitis irritativa.

## El uso de la ventilación natural para el control de la calidad de aire interior

La ventilación natural como estrategia para alcanzar niveles óptimos de calidad de aire interior (IAQ:- Indoor Air Quality – en su denominación en inglés) está esencialmente basada en la cantidad de aire fresco suministrado al espacio interior y la dilución de la concentración de los contaminantes.

La calidad de aire óptima puede ser definida como el aire libre de contaminantes que causen irritación, disconfort o enfermedades a los ocupantes. Los estándares de calidad de aire relacionados a la salud generalmente se basan en valoraciones del riesgo y especifican concentraciones máximas permitidas de contaminantes. Las altas concentraciones son usualmente permitidas durante breves períodos de exposición.

Uno de los más difundidos estándares es la normativa ASHRAE 62-2001 que trata sobre la ventilación para una calidad de aire interior aceptable y su propósito es especificar tasas de ventilación y calidades de aire interior mínimas que sean aceptables para los ocupantes e intenten minimizar los efectos potenciales adversos a la salud.

Entre los items que trata esta Norma se encuentran: calidad de aire exterior para una ventilación aceptable; tratamiento del aire externo; tasas de ventilación para espacios residenciales, comerciales, institucionales e industriales; criterios para reducir las cantidades de aire exterior cuando el aire recirculado es tratado por equipos que remueven contaminantes.

Estos estándares centran su preocupación en cómo obtener una aceptable calidad de aire interior en edificios con sistemas de aire acondicionado, por lo tanto en estas Normas se busca de reducir la entrada de aire exterior al mínimo posible para que la demanda de energía no se incremente demasiado pero sin desmedro de la calidad del aire interior.

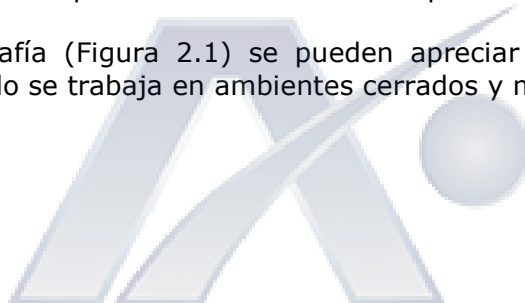
Según el estándar ASHRAE la calidad del aire interior se logra con el cuidado de cuatro elementos:

- Control de la fuente de contaminación
- Ventilación propicia
- Control de la humedad
- Filtración adecuada

El caudal de ventilación necesario para asegurar una aceptable calidad de aire depende de la cantidad y naturaleza de la fuente de contaminación dominante en el espacio. Si las características de las emisiones son conocidas, es posible calcular la tasa de ventilación necesaria para prevenir que la concentración de contaminantes exceda el límite preestablecido.

Estos problemas se van popularizando a medida que los medios se ocupan del tema y se realiza la necesaria difusión. Esto genera un efecto cascada, ya que al original interés empresario por ocultar información que pudiera perjudicarlos de alguna manera, se oponen las investigaciones realizadas por organismos de reconocida solvencia científica y las experiencias personales de las personas bajo estos efectos, así como la presión que empiezan a ejercer las compañías aseguradoras (del tipo de las Administradoras de los Riesgos del Trabajo – ART) que en muchos países se hacen cargo de los jornales caídos por enfermedad de los empleados.

En la siguiente infografía (Figura 2.1) se pueden apreciar los riesgos que medios masivos señalan cuando se trabaja en ambientes cerrados y mal ventilados:





# Defectos en los ambientes y sus consecuencias

El tipo de materiales con que están contruidos muchos edificios de oficina, las actividades que allí se realizan, y la falta de mantenimiento, contaminan el medio ambiente interior.

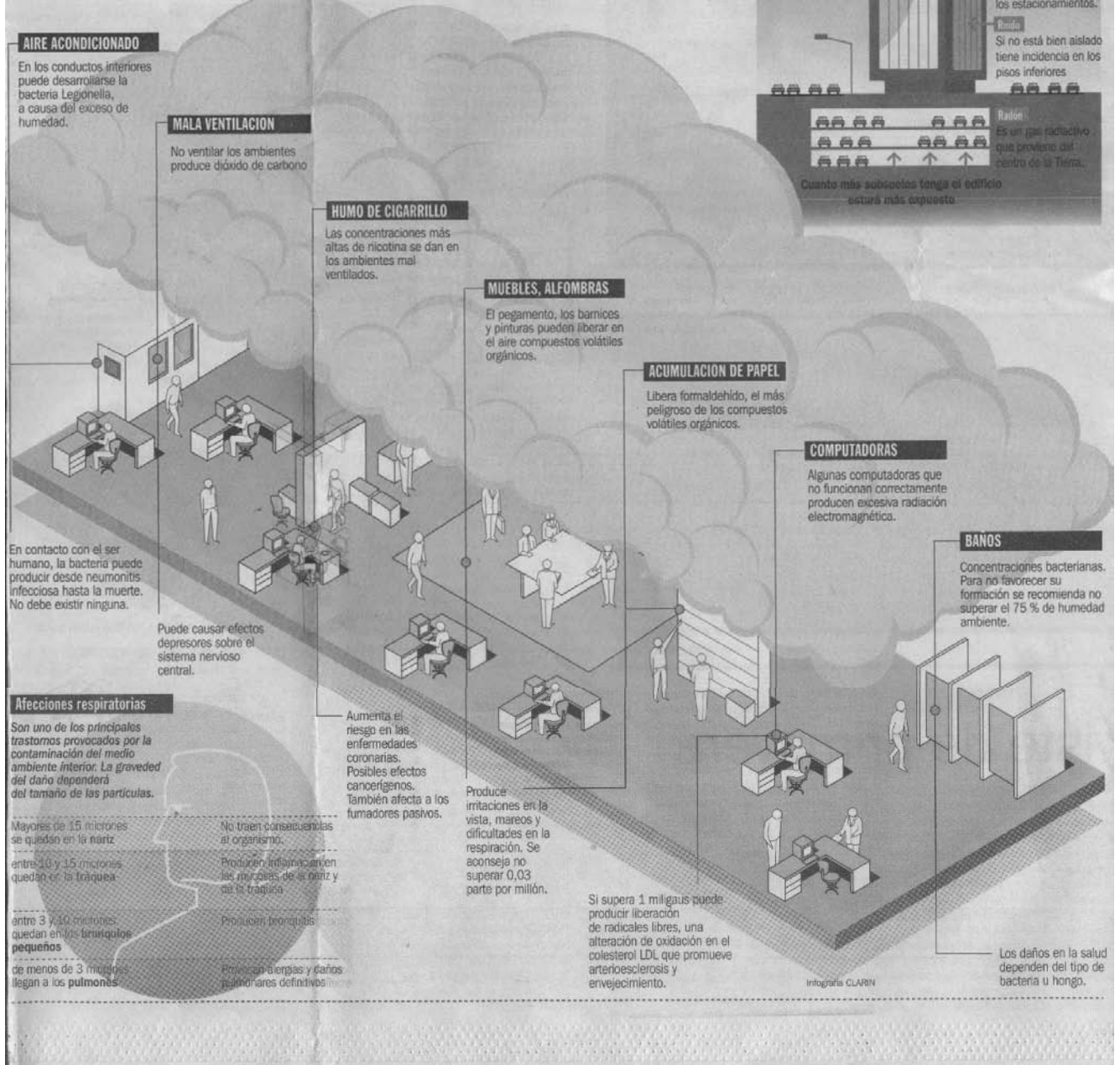


Figura 2.1. Infografía extraída del diario Clarín del 19/7/95, en la cual se describen los riesgos de los edificios sin ventilación y muestra la popularización de estos temas en los últimos tiempos.

Como ya se ha dicho, el nivel de contaminantes decrece exponencialmente con el aumento de la tasa de ventilación. Si se conoce el nivel de concentración permitido para un contaminante específico, fácilmente se puede obtener el flujo de aire recomendado para reducir dicha concentración (Ver Figura 2.2). En la práctica, es importante identificar la fuente de contaminación dominante, ya que este contaminante requerirá la mayor tasa de ventilación para controlarlo y si



se alcanza un nivel de ventilación capaz de controlar al contaminante principal, este flujo de aire será más que suficiente para mantener al resto de los contaminantes en un nivel permisible.

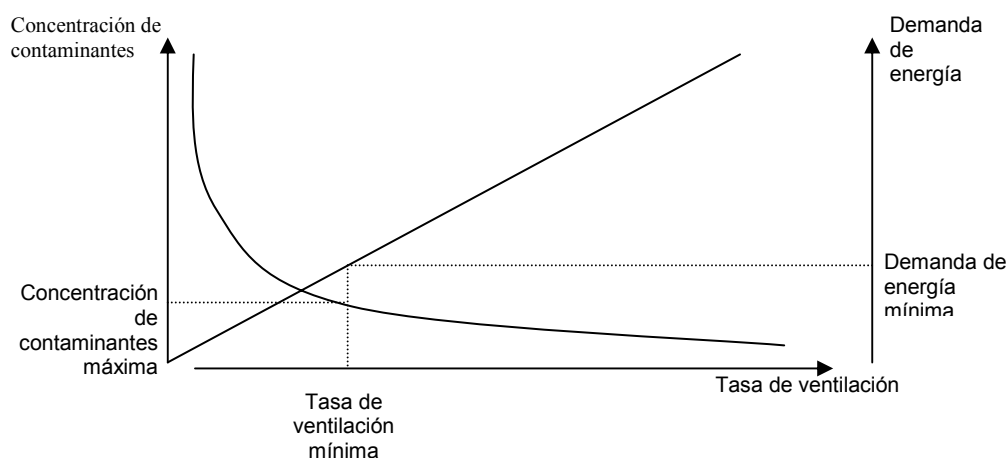


Figura 2.2. Ventilación natural para mantener la calidad del aire interior (IAQ)

## Cálculo de flujo de aire para calidad de aire interior

Existen distintas ecuaciones y criterios para el cálculo del caudal de aire necesario, para mantener una calidad de aire interior aceptable. En edificios en donde la ventilación natural cumple funciones de refrescamiento en verano, las tasas de ventilación mínimas que serían necesarias desde el enfoque de la Calidad del Aire Interior, son ampliamente superadas por el caudal de aire necesario para lograr el confort térmico de los ocupantes.

Para el diseño del sistema de ventilación natural de un edificio en verano tiene más peso el factor térmico que el sanitario, por lo que en este caso se utilizarán para el cálculo de caudales de aire, métodos numéricos que consideren los factores relacionados al confort térmico más que a la calidad de aire interior.

Distinto es el tema en invierno, donde la ventilación natural sólo debe utilizarse para renovar el aire necesario para los requerimientos sanitarios y se buscará alcanzar calidad de aire interior junto con un empleo reducido de la cantidad de energía necesaria para calentar ese aire entrante.

El estándar ASHRAE 62-2001, establece dos métodos para determinar la cantidad de aire exterior requerida para obtener una ventilación propicia de los espacios interiores ocupados. Ellos son el procedimiento de la tasa de ventilación y el procedimiento IAQ.

El procedimiento de la tasa de ventilación se ocupa de la cantidad y calidad del aire de ventilación para asegurar una dilución adecuada de los contaminantes generados en el espacio ocupado y consta de 3 pasos:

1º - Determinar la calidad del aire exterior, ya que el diseñador no puede asumir que la calidad del aire exterior es aceptable como para usarlo como aire de ventilación. Para esto el estándar cita como referencia los niveles establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU (EPA—Environment Protection Agency) (ver Tabla 2.1).

2º - Si la calidad del aire exterior es inaceptable, entonces el aire deberá ser tratado (limpiado y filtrado) para controlar los niveles de contaminantes.

3º - Determinar la cantidad de aire exterior requerido para cada recinto. Para esto el estándar provee de una tabla con las tasas de ventilación recomendadas según el uso de cada recinto. La Tabla 2.2 es un extracto de dicha tabla. Para usar la tabla primero se debe determinar el uso esperado del recinto, una vez conocido el grado de ocupación o el área del recinto, se puede calcular la tasa de ventilación requerida para ese espacio.

Tabla 2.1. Niveles de calidad de aire exterior establecidos por la EPA a través de los NAAQS (National Ambient Air Quality Standards)

<i>Contaminante</i>	<i>Período promedio</i>	<i>Standard</i>
Dióxido de Carbono	8 horas	9 ppm
	1 hora	35 ppm
Plomo	30 días	1.5 µg/m <sup>3</sup>
Dióxido de nitrógeno	1 año	0.053 ppm
Partículas respirables menores a 10 micrones (PM <sub>10</sub> )	1 año	50 µg/m <sup>3</sup>
	24 horas	150 µg/m <sup>3</sup>
Partículas respirables menores a 2.5 micrones (PM <sub>2.5</sub> )	1 año	15.0 µg/m <sup>3</sup>
	24 horas	65 µg/m <sup>3</sup>
Ozono	8 horas	0.08 ppm
	1 hora	0.12 ppm
Dióxido de azufre	1 año	0.03 ppm
	24 horas	0.14 ppm

Tabla 2.2. Tasas de ventilación extraídas del estándar ASHRAE 62-2001

Aplicación	Ocupación máxima estimada (personas/100 m <sup>2</sup> )	Requerimientos de aire externo	
		$\frac{L}{s}$ persona	$\frac{L}{s}$ m <sup>2</sup>
<b>OFICINAS</b>			
Recinto de la oficina	8	9,4	
Áreas de recepción	65	7	
Áreas de Call centers y de cómputo de datos	65	9,4	
Salas de conferencias	22	9,4	
<b>ESPACIOS PUBLICOS</b>			
Pasillos y corredores			0,25
Sala de descanso		24	
Vestuarios			2,5
Sala de fumadores	76	28	
Ascensores			5
<i>- Escuela</i>			
Salón de clases	50	8	
Auditorio	150	8	
Biblioteca	20	8	

El procedimiento IAQ (Indoor Air Quality) presenta una alternativa, basada en un mecanismo para lograr calidad de aire interior aceptable y se aplica estableciendo límites de concentración de todos los contaminantes conocidos.

Más específicamente, el procedimiento IAQ determina límites de concentración para diez contaminantes (dióxido de Carbono, Acetona, Amoníaco, Formaldehído, Ozono, dióxido de Nitrógeno, dióxido de Azufre, Fenol, Alcohol metílico y Ácido sulfhídrico), prescribe un análisis subjetivo para la determinación de niveles de olor aceptables y describe el uso y tratamiento del aire recirculado, para reducir las tasas mínimas de ventilación presentadas en el estándar. Como se dijo anteriormente, el estándar contiene las concentraciones máximas para los diez

contaminantes más comunes, por lo que la concentración de los mismos en el aire interior deberá mantenerse por debajo de estos niveles.

Para el control de olores, el procedimiento sugiere realizar una evaluación subjetiva en la cual se realicen distintas experiencias con personas sometidas a distintos niveles de olores, determinándose como niveles aceptables aquellos que soporten el 80% de las personas.

Un método parecido al procedimiento IAQ del ASHRAE 62, es presentado por Baruch Givonni. El volumen de flujo de aire fresco por persona (Q en m<sup>3</sup>/h) para mantener una concentración interior de dióxido de carbono (uno de los indicadores de calidad de aire interior más fáciles de medir) menor al 0,5%, según B.Givonni, está dada por:

$$Q = \frac{q \cdot 100}{(0,5 - 0,05) \cdot 1000} = \frac{q}{4,5} \text{ (m}^3\text{/h por persona)}$$

Donde q (L/h) es el volumen de dióxido de carbono producido por persona. Para actividades sedentarias se puede estimar q = 18 L/h, obteniéndose Q = 4 m<sup>3</sup>/h por persona y para trabajos manuales q = 54 L/h, obteniéndose Q = 12 m<sup>3</sup>/h por persona.

Pero hay que recordar que las cantidades de aire acordes a estos valores no son suficientes para eliminar olores y contaminantes industriales, por lo tanto para su uso en la práctica se recomienda utilizar una concentración máxima menor. Un nivel de dióxido de carbono de 0,2% es sugerido como criterio aceptable para especificar requerimientos mínimos de ventilación en residencias, oficinas y escuelas.

B.Givonni también establece que la concentración de un gas emitido a una tasa constante está dada por la siguiente ecuación:

$$C = \frac{q}{Q} (1 - e^{-(Q \cdot t / V)})$$

y su tasa de declive después de completada la emisión, está dada por:

$$C = C_{\max} \cdot e^{-(Q \cdot t / V)}$$

Donde:

- C = concentración del gas (%)
- q = tasa de emisión (m<sup>3</sup>/h)
- Q = tasa de ventilación (m<sup>3</sup>/h)
- V = volumen del cuarto (m<sup>3</sup>)
- t = tiempo (horas)

Usando estas ecuaciones es posible especificar la tasa de ventilación requerida para mantener la concentración de un gas dado, emitido a una tasa constante, debajo de un nivel predeterminado o bien especificar el nivel de declive requerido a un cierto tiempo después del cese de la emisión.

Con tasas de emisión y ventilación constantes y cuartos ocupados por varios horas, la primera ecuación se reduce a

$$Q = q / C$$

Cuando el aire exterior contiene en su composición gas que debe ser limitado, como en el caso del monóxido de carbono, la ecuación toma la siguiente forma:

$$Q = q / (c_i - c_o)$$

donde  $c_i$  es la concentración interior permisible y  $c_o$  es la concentración exterior.

Tomando como ejemplo un dormitorio con un volumen de  $30 \text{ m}^3$ , ocupado por dos personas y asumiendo una concentración máxima permisible de dióxido de carbono de 0,2% con una concentración exterior de 0,05%, la tasa de ventilación requerida es de (recordar que la tasa de emisión por persona es de unos 15 L/h):

$$Q = \frac{2 \cdot 0,015}{0,002 - 0,0005} = 20 \text{ m}^3/\text{h}$$

Expresándolo en términos de renovaciones por hora se convierte en:

$$n = \frac{20}{30} = 0,67 \text{ renovac./hora}$$

Muchos países han establecido requerimientos mínimos de ventilación permanente dados en términos de renovaciones por hora. La Tabla 2.3 indica el número de renovaciones por hora recomendadas para distintas actividades.

Tabla 2.3. Renovaciones por hora para diferentes actividades (Extraído del código edilicio de Madrid)

Actividad	Nº. de R/H	Actividad	Nº. de R/H
Fábricas de vidrio:		Plantas embotelladoras:	
- Hornos	30 a 50	- Lavaderos	10 a 15
- Máquinas	20 a 40	- Pasteurizado	12 a 16
Taller de pintura	30 a 50	- Fermentación	12 a 16
Tratamientos térmicos	20 a 40	Cines	10 a 15
Naves de calderas	20 a 30	Garajes	4 a 8
Forja en caliente	18 a 30	Taller mecánico	5 a 8
Centrales térmicas	12 a 30	Oficinas	6 a 8
Piscinas	15 a 25	Manufactura en general	6 a 8
Fundiciones pesadas	18 a 25	Mercados	4 a 8
Fábricas de papel	8 a 20	Polideportivos	4 a 8
Fundiciones livianas	12 a 15	Crianza de animales	3 a 9
		Almacén en general	2 a 6

La ley 19.587 de la Argentina en su capítulo XI que trata sobre ventilación establece en el art. 65 que los establecimientos en los que se realicen actividades laborales, deberán ventilarse preferentemente en forma natural. La ventilación mínima de los locales, determinado en función del número de personas se muestra en la Tabla 2.4. Además el art. 67 establece que la ventilación contribuirá a mantener permanentemente en todo el establecimiento las condiciones ambientales y en especial la concentración adecuada de oxígeno y la de contaminantes dentro de valores admisibles y evitará la existencia de zonas de estancamiento. Por lo tanto la ventilación natural es necesaria en las industrias para reducir los niveles de contaminantes o condiciones ambientales que pudieran ser perjudiciales para la salud de los trabajadores, tales como carga térmica, vapores, gases, nieblas, polvos u otras impurezas.

Tabla 2.4. Ventilación mínima requerida por persona según Ley 19.587

Cubaje del local	Caudal de aire necesario ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) x persona	
	Actividad sedentaria	Actividad moderada
3	43	65
6	29	43
9	21	31
12	15	23
15	12	18

La solución a estos problemas de calidad de aire exterior en sistemas de aire acondicionado no es fácil y muchas veces resulta costosa, pero los trastornos que afectan a los ocupantes de estos edificios justifican la adopción de medidas, como estudios de la calidad del aire, análisis de las fuentes de los problemas y prácticas correctoras para su solución.

Hay una gran preocupación acerca de mantener una buena calidad del aire interior y a la vez hacer un uso racional de la energía, esto se puede apreciar en países con un uso tremendamente extendido del aire acondicionado, como los Estados Unidos. Allí la preocupación por el IAQ es sorprendente, ya que las renovaciones por hora del aire producen grandes pérdidas de energía en los edificios climatizados artificialmente.

No hace falta decir que los sistemas de ventilación natural cuentan con una excelente ventaja en este tema con respecto al aire acondicionado, ya que en los sistemas de ventilación natural, en verano tienen mucho más peso los requerimientos para alcanzar el confort térmico que los requerimientos para obtener una calidad de aire óptima, por lo que siempre se cuenta con aire renovado y limpio.

## Bibliografía

1. "Natural Ventilation in Buildings", Capítulo 1. Editor F. Allard (1998). James & James. Londres.
2. "ASHRAE Standard 62, Ventilation for acceptable indoor air quality, analysis and recommendations". David S. Dougan (2002).
3. "Man, Climate & Architecture", Capítulo 13. B. Givoni (1976). Applied Science Publishers.
4. Suplemento "Lo Nuevo", Diario Clarín del 19 de septiembre de 1995.
5. "Ventilación natural en edificios enfermos" Proyecto UBACyT JA02. Directora: Analía Fernández
6. "Indoor Air Quality a guide to understanding ASHRAE Standard 62-2001". Artículo de [www.trane.com](http://www.trane.com) (2002).
7. "The inside story: A guide to indoor air quality". EPA document (1995).
8. Artículos y standards de [www.epa.gov](http://www.epa.gov).
9. "Natural ventilation for health, comfort and energy efficiency". F. Allard, C. Ghiaus, Y. Mansouri (2003). LEPTAB, Université de La Rochelle.
10. Distintos artículos y noticias de [www.aivc.org](http://www.aivc.org).
11. "1999 ASHRAE Handbook CD".
12. "Ley 19587, Aprobada por Decreto 351/79"
13. "Apuntes de Seguridad e Higiene Industrial". M. Ismach, H. Cordone. UNLU.



### 3- VENTILACIÓN NATURAL PARA EL CONFORT TÉRMICO EN VERANO

Los seres humanos no estamos preparados fisiológicamente para vivir a la intemperie. Esta carencia de aptitud natural debe ser compensada con la vestimenta en primer lugar, y con la utilización de edificios u otro tipo de espacios cerrados y protegidos (algo así como un segundo nivel de vestimenta) en segundo lugar.

Ambos, vestimenta y edificios nos preservan de aquellas condiciones naturales del clima que puedan ser perjudiciales a nuestra salud. A las vestimentas las podemos modificar permanentemente, sacando o poniendo aquello que nos parezca lo mas apropiado al momento, pero con los edificios no podemos hacer lo mismo.

De allí que una de las condiciones básicas que debe de cumplir el edificio es la servir de protección de las inclemencias climáticas para con las personas que los habitan, aunque estas sólo lo utilicen en forma transitoria. Algo similar debería suceder con los vehículos, aunque en este último caso es precisamente la transición de uso entre el exterior y un interior edificado, lo que hace menos exigentes sus niveles de climatización.

Cuando una persona siente comodidad termofísica en relación con el ambiente que la rodea, sea este al aire libre o en un espacio interior, se dice que su situación es de "bienestar termofísico" o que se halla en condiciones de "confort térmico".

Por el contrario, cuando se halla en situación de incomodidad termofísica, habla de "no confort o disconfort" que puede llegar a la situación de "estrés térmico".- El bienestar termofísico o el confort, pueden ser situaciones prolongadas en el tiempo, aunque tampoco deben ser permanentes.

La necesidad de tener una cierta variabilidad en las condiciones ambientales que rodean a una persona ha sido demostrada en pruebas de laboratorio, lo cual es lógico, teniendo en cuenta que en todo momento las condiciones naturales, las que se relacionan con el clima de un lugar, están en permanente variabilidad.

En cambio una persona solo puede estar sometida a estrés térmico sin que se produzcan trastornos orgánicos, solo por muy poco tiempo, cuando las condiciones de estrés son rigurosas. Si estas se prolongan, el organismo va agotando muy rápidamente las defensas naturales que posee para combatir y adecuarse a situaciones adversas y si el estrés es muy alto, las consecuencias pueden llegar a ser fatales.

La secuencia natural con que el organismo humano funciona, es la de: reposo, actividad, descanso y esto sucede en períodos que difieren de persona a persona. Esta secuencia vale también para el estrés térmico. Si una persona, por los motivos que fuera, debe estar sometida a una situación de incomodidad termofísica, deberá salir de la situación cada tanto tiempo y descansar en situación de confort, antes de volver a someterse al estrés.

En realidad el entorno dentro del cual, los seres humanos nos sentimos en condiciones de bienestar termofísico, es relativamente acotado. En la mayor parte del planeta y en la mayoría del tiempo diario o anual, las condiciones climáticas de un lugar están fuera de ese acotado entorno, lo cual convierte a este problema en un tema permanente, sobre el cual todavía hay mucho por investigar y dilucidar.

En las sensaciones de confort o disconfort térmico-físico influyen:

Parámetros físicos: que incluyen la temperatura del aire y condiciones térmicas del ambiente (temperaturas radiantes o superficiales), la humedad relativa del aire, la velocidad del aire, los olores, los colores del entorno, la intensidad de la luz y el nivel de ruido.

Parámetros fisiológicos: que incluyen la edad, el sexo y características específicas de los ocupantes.

Parámetros externos: que incluyen la actividad que desarrollan los ocupantes, vestimenta y condiciones sociales.

## El entorno de bienestar termofísico

La mejor manera de determinar cual es el entorno de confort para los seres humanos, es realizar ensayos de laboratorio con personas que se presten voluntariamente para ello. Es un método que combina la encuesta con la precisión de las condiciones higrotérmicas que nos puede ofrecer un laboratorio. Un entorno que contenga el 80% de las respuestas favorables, constituye un entorno considerado válido como “zona de confort”.

Basados en estas experiencias o en criterios de validez, diferentes normativas o autores dan también distintos límites para las condiciones de temperaturas internas, humedades relativas, tensión de vapor o velocidad en el movimiento del aire interior como indicación de cuales son los límites que no deberían superarse al utilizar ventilación natural o, en el caso del acondicionamiento mecánico en el movimiento del aire interior, para satisfacer los requerimientos de un porcentaje alto de personas.

Evidentemente no es lo mismo pensar en ventilación natural que en movimiento de aire interior producido por equipos de aire acondicionado y por ello encontramos en un extremo permisivo de estos límites del entorno de bienestar termofísico la mayor flexibilidad propuesta por Givonni cuando plantea como tolerables temperaturas internas de hasta 28,5°C con aire en movimiento a velocidades de hasta 2m/s y una humedad relativa inferior al 90% y del lado opuesto los parámetros establecidos por el estándar ASHRAE 55 para la categoría de oficinas climatizadas con aire acondicionado, donde se indican temperaturas operativas entre 24,5°C y 26°C, humedades relativas que no superen el 60% y velocidades de aire del orden de los 0,2 m/s.

Es evidente que no se puede esperar los mismos niveles de confort higrotérmico utilizando ventilación natural que cuando se utilizan equipamientos de aire acondicionado, pero recientes estudios de DeDear y Brager (2001) apuntan a que las personas están dispuestas a aceptar apartamientos de cierta importancia en los parámetros de confort normalizados – y así lo demuestran las encuestas de los PMV “Prediction Means Vote” o en los PPD “Predicted Percentage of Dissatisfied”- cuando se utiliza ventilación natural en forma explícita.

En cambio, los ocupantes de edificios acondicionados artificialmente, esperan temperaturas más frías, y rápidamente sienten desagrado si las condiciones térmicas difieren de lo esperado.

Esta diferencia en las expectativas de confort conllevan adaptaciones previas del comportamiento individual a las condiciones esperadas: los ocupantes de un edificio ventilado naturalmente usan vestimenta apropiada y abren y cierran las ventanas para controlar el caudal de aire, mientras que los ocupantes de edificios con acondicionamiento artificial, se visten con ropas livianas y esperan que el sistema se regule automáticamente. Otra de las diferencias puede deberse a factores fisiológicos, como la necesidad de cambios en las expectativas térmicas que se producen corporalmente a lo largo del año.

De Dear y Brager presentan un modelo de confort térmico adaptativo, en reemplazo del modelo fijo propuesto por el estándar ASHRAE 55. Esto podría permitir que los edificios sean diseñados y operados para optimizar el confort térmico y reducir el uso de energía bajo diferentes condiciones internas.

Este modelo es el corazón de los cambios que se le están realizando al estándar ASHRAE 55. El modelo propone que los ocupantes de edificios ventilados naturalmente puedan estar confortables a mayores temperaturas internas acompañando los aumentos en la temperatura del aire externo. (Ver la Figura 3.1).



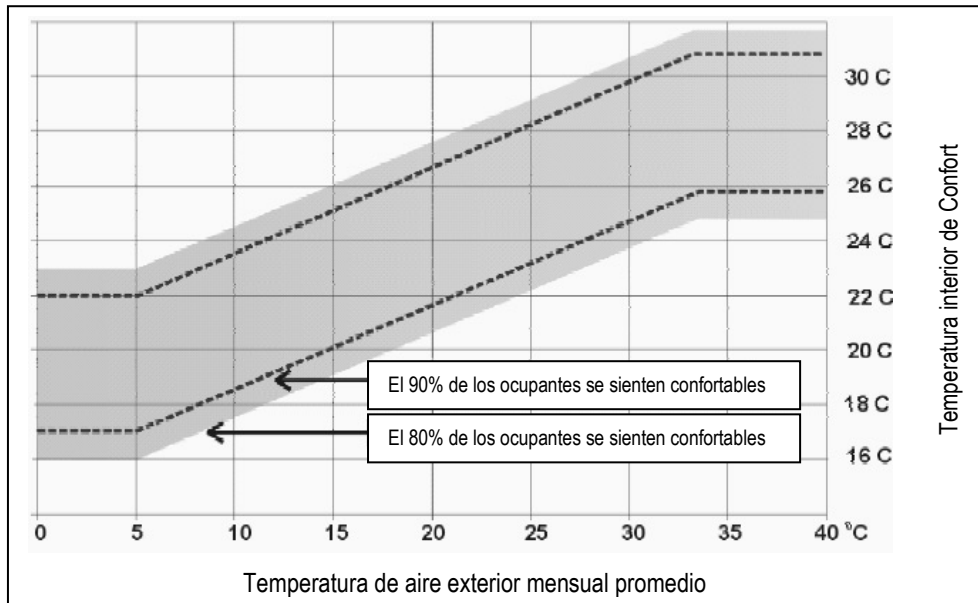


Figura 3.1. Modelo de confort térmico de De Daer y Brager

## Los intercambios térmicos entre el ser humano y el ambiente que lo rodea

El cuerpo humano disipa el calor excedente transfiriéndolo al entorno que lo rodea, ya sea el aire libre o dentro de un espacio construido. Para ello usa los siguientes mecanismos de transferencia de energía:

Transferencia por conducción: Transfiriendo calor hacia todo aquello que esté en contacto directo con el cuerpo desnudo o vestido. Por ejemplo, el piso (si la persona está parada), una silla, el colchón de la cama, una pared, etc.

Transferencia por convección: Transfiriéndole calor del cuerpo hacia el aire en movimiento que lo rodea.

Transferencia por radiación: Transfiriéndole calor bajo la forma de energía radiante hacia todos los objetos o personas que lo rodean (paredes, techos, muebles, etc.).

Transferencia por evapo-transpiración: Transfiriendo calor latente por cambio de fase por evaporación del sudor o por la respiración hacia el aire que rodea el cuerpo y que incorpora vapor de agua por este proceso.

Todo proceso de transferencia de calor se dirige del cuerpo de mayor temperatura hacia el cuerpo de menor temperatura. La piel está a una temperatura variable según las zonas del cuerpo, pero se puede considerar un valor promedio de 34°C. En el interior del cuerpo el promedio es de 37°C.

Esto significa que para que el cuerpo humano pueda disipar su exceso de calor, los elementos que lo rodean deben estar a una temperatura menor a los 34°C., tomando éste como un valor máximo

En definitiva, las posibilidades de disipar el calor excedente dependerá de las temperaturas del aire o superficiales de todos los elementos que rodean a la persona.



Para que el cuerpo se halle en equilibrio termofísico deberá cumplirse la siguiente ecuación:






$$Q_{\text{metabolismo a disipar}} \pm Q_{\text{conducción}} \pm Q_{\text{convección}} \pm Q_{\text{radiación}} - Q_{\text{evapotranspiración}} = 0$$

Si el resultado da más de cero (números positivos), la persona no está disipando lo suficiente y la temperatura del cuerpo se elevará.

Si en cambio da menos de cero (números negativos), esto quiere decir que se está enfriando más de lo necesario y que deberá corregirse esta situación en lo inmediato.

En la Tabla 3.1 se muestra el efecto de las variables ambientales sobre el confort térmico. Un nivel de confort dado puede ser alcanzado usando múltiples combinaciones de estas variables.

Tabla 3.1. Variables ambientales y su efecto en el confort térmico

Variable	Unidad	Efecto sobre el cuerpo humano
Temperatura de bulbo seco	°C	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Exagerada pérdida de calor por convección cuando está baja</li> <li>Demasiado calor cuando está cercana a la temperatura corporal</li> </ul>
Humedad	°C (bulbo húmedo) % humedad relativa	 <ul style="list-style-type: none"> <li>La pérdida de calor por evaporación aumenta o se inhibe</li> </ul>
Temperatura radiante	°C	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Pérdida o ganancia de calor por radiación</li> </ul>
Viento	Dirección y velocidad m/s	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Efecto de refrescamiento o acaloramiento dependiendo de la temperatura del aire</li> </ul>
Radiación solar	W/m <sup>2</sup>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>Acaloramiento</li> </ul>

## Los intercambios térmicos entre el edificio y el ambiente que lo rodea

El impacto que sufre un edificio desde el ambiente exterior está relacionado a:

- Radiación solar;
- Temperatura del aire exterior;
- Otras temperaturas externas del cielo, campo y superficies de los alrededores;
- Condiciones del viento;
- Humedad del aire exterior;

- Concentración de contaminantes exteriores.

El impacto desde el ambiente interior se relaciona a:

- Calor ganado desde luminarias, ocupantes y equipos;
- Fuentes de humedad y contaminantes;
- Calor sensible y latente de equipos acondicionadores.

Un edificio puede ser descrito como un sistema complejo constituido por diferentes elementos sólidos, que conforman un espacio cerrado. En este sistema se puede identificar los siguientes mecanismos de transferencia de calor y masa (Figura 3.2):

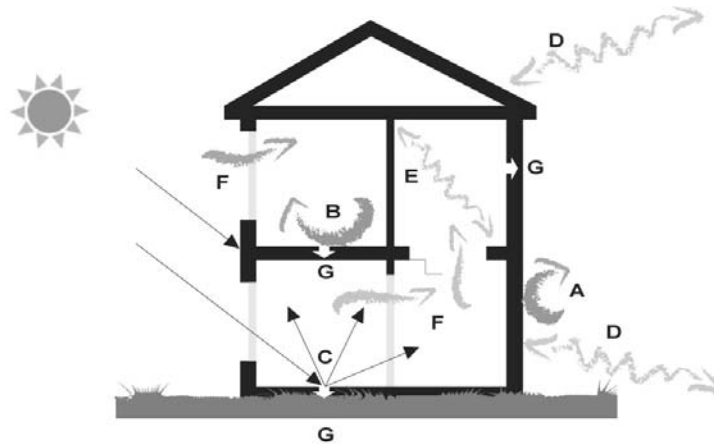


Figura 3.2. Esquema que muestra los mecanismos envueltos en el comportamiento térmico de los edificios:

- A. convección externa entre las superficies exteriores y el aire exterior;
- B. convección interna (usualmente natural o mixta) entre las superficies interiores, ocupantes, luminarias, etc y el aire interior;
- C. radiación de onda corta proveniente del sol;
- D. radiación de onda larga exterior entre las superficies del edificio y el cielo, edificios aledaños y el suelo;
- E. radiación de onda larga interna entre las superficies interiores y fuentes térmicas;
- F. flujos de aire a través de aberturas, entre diferentes recintos y entre estos y el exterior;
- G. conducción a través de los elementos del edificio (interiores y exteriores).

## El uso de la ventilación natural para el confort térmico en verano

Como se dijo anteriormente, hay dos maneras en las que la que la ventilación puede mejorar el confort: la ventilación natural directa sobre las personas (llamada también ventilación de confort) o la ventilación natural sobre la masa interna del edificio (que en función de las horas más propicias para realizarlo se llama también ventilación nocturna), ambos son considerados sistemas de refrescamiento pasivo basados en la potencial capacidad de transferencia térmica del aire en movimiento.

Diversos autores han estudiado cuales son los parámetros básicos climáticos dentro de los cuales estos sistemas alcanzan su mayor eficiencia. Si bien hay ciertas diferencias en estos parámetros si se trata de un sistema u otro, se puede afirmar que el campo de aplicación se optimiza cuando:

- Las temperaturas máximas medias a lo largo del período cálido no superen los valores entre 29° y 32°C
- La amplitud térmica diaria no sea inferior a los 10°C
- La tensión de vapor media diaria no supere los 19g/Kg
- La humedad relativa no supere el valor del 90% en ningún momento del día
- La velocidad media de los vientos no sea inferior a 7,2 km/h (2m/s)

## Ventilación directa sobre las personas

La transferencia de calor se realiza directamente desde la persona al flujo de aire en movimiento que la envuelve con resultados casi nulos sobre las temperaturas radiantes superficiales.

Esto hace muy dificultosa su evaluación, sobre todo si se tiene en cuenta que a ciertas horas del día, la temperatura del aire que ingresa al recinto puede ser sensiblemente mayor que la temperatura media radiante interior.

Mientras que la ventilación para mantener una calidad de aire interior óptima es independiente de las condiciones climáticas, la ventilación de confort depende particularmente de la temperatura y presión de vapor.

Modificando el movimiento del aire alrededor del cuerpo humano puede también ayudar a controlar el confort térmico. Introduciendo aire exterior con una cierta velocidad al edificio puede proveer un efecto fisiológico y directo de enfriamiento aún cuando la temperatura del aire interior sea elevada.

Este es particularmente, el caso cuando la humedad es alta, mayores velocidades del aire aumentan la tasa de transpiración de la piel, minimizando el disconfort que las personas sienten cuando su piel está húmeda.

Este confort es deseable, desde el punto de vista fisiológico, aún cuando la temperatura del aire exterior sea mayor a la temperatura interna, porque el límite superior de temperatura de confort es mayor con velocidades de aire mayores.

En el siguiente diagrama psicrométrico (Figura 3.3) se puede ver como se amplía la zona de confort por el aumento de la velocidad del aire interior:

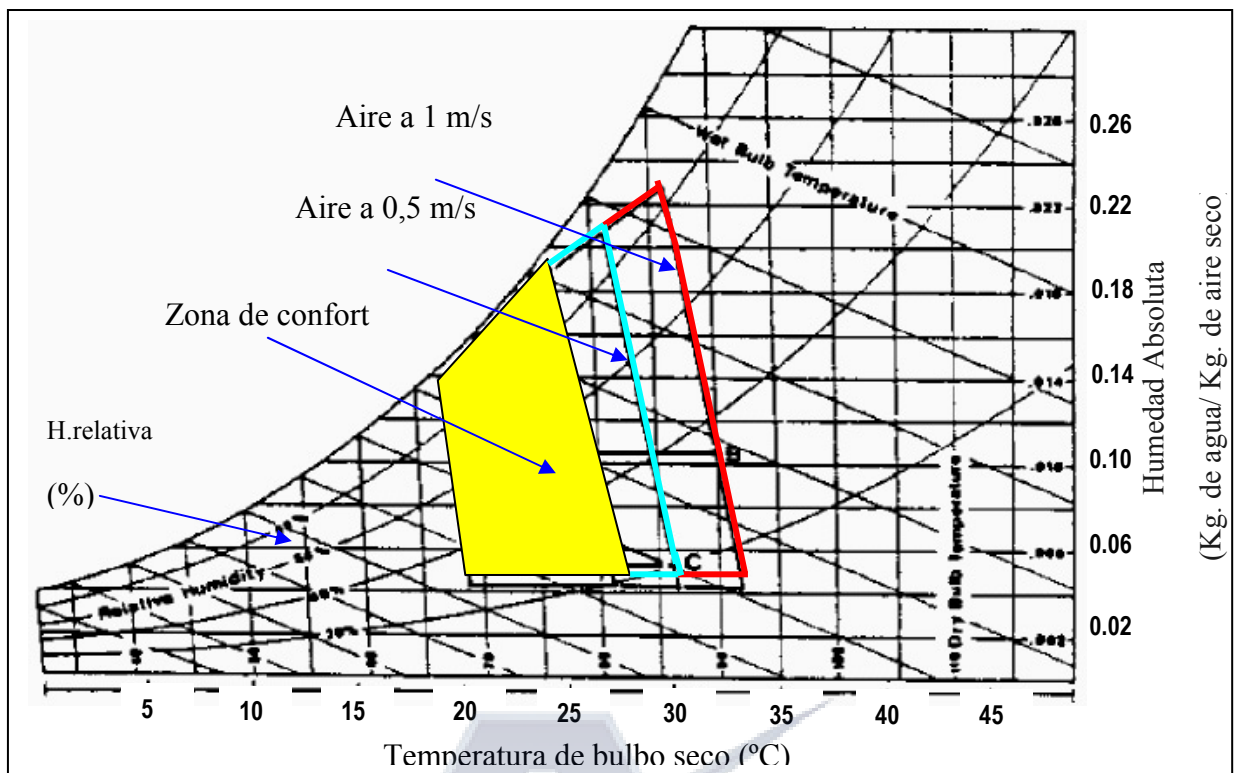


Figura 3.3. Diagrama psicrométrico en el que se muestra el efecto de la velocidad del aire interior en el confort térmico (Diagrama extraído del "Design: cooling buildings by natural ventilation")

Se debe apreciar que cuando están involucrados grandes caudales de aire, como es necesario para la ventilación de confort, la distribución de velocidades no es homogénea y notables variaciones aparecen en todo el recinto.

Por esta razón la ventilación para refrescamiento siempre debería ser especificada en términos de velocidad de aire y no en renovaciones/hora o m<sup>3</sup>/hora, ya que no hay una relación directa entre caudal y velocidad a través de un edificio.

Por ejemplo un pequeño caudal turbulento podría desarrollar velocidades promedio superiores, en el área ocupada del recinto, que un gran caudal laminar dirigido hacia el cielorraso. Esta relación también depende de la geometría del espacio y la ubicación de las aberturas.

La ventilación de confort puede ser provista en cualquier momento en que sea beneficiosa fisiológicamente, ya sea durante el día o la noche, en contraste con la ventilación nocturna sobre la masa del edificio. Con una tasa de ventilación elevada la temperatura interna tiende a igualarse con la externa.

Una estrategia que considere a la ventilación de confort, que es muy común en climas cálidos y húmedos, necesita diseños que maximicen el confort alcanzable con ventilación natural. Los factores de diseño más relevantes serán considerados en el capítulo 7.

Cuando se utiliza la ventilación en el contexto de su efecto en el confort, debe recordarse que el factor más importante es la velocidad del aire sobre el cuerpo humano, de aquí surge la necesidad de contar con métodos de cálculos que permitan obtener velocidades de aire interior.

Además de la velocidad del aire, otro factor importante son los patrones de flujo, es decir, el recorrido que hace el aire cuando circula por el local, por lo que se deberá estudiar con cuidado el tipo de aberturas a utilizar ya que están determinarán los distintos patrones de flujo. La clave está en seleccionar tipos de ventanas que dirijan el caudal de aire hacia las personas, para obtener un máximo de eficiencia en el refrescamiento pasivo, por ejemplo, en un aula el aire debería ingresar a la altura de una persona sentada, mientras que para un dormitorio el aire debería dirigirse hacia el suelo.

## Ventilación nocturna

La ventilación nocturna consiste básicamente en la estrategia de mantener el edificio cerrado (sin ventilación) durante las calurosas horas del día y ventilar la masa estructural a la noche, cuando las temperaturas son menores, por la circulación de aire exterior ya sea a través del espacio interior o a través de pasajes de aire entre los elementos de la masa estructural del edificio.

La masa enfriada actúa al día siguiente como acumulador de calor, absorbiendo el calor que entra al edificio así como el calor que se genera dentro del mismo.

El flujo de calor durante el día, desde el aire interior a la masa acumuladora fría, ocurre pasivamente por convección natural y radiación de onda larga. Durante la noche, la masa del edificio irradia calor hacia la bóveda celeste enfriando la masa estructural del edificio, esto ocurre porque existen importantes diferencias entre las temperaturas terrestres y las temperaturas de las capas de la atmósfera situadas a alturas importantes.

Para que un cuerpo terrestre, pueda irradiar hacia esas capas altas de la atmósfera, la condición esencial es que el cielo esté despejado y el clima sea seco, con bajo contenido de vapor de agua.

En caso contrario, la radiación emitida por el cuerpo calentado, es interceptada y absorbida por las nubes o el vapor de agua ubicados a alturas mucho menores, en donde el efecto es poco notable. Este efecto será mucho más evidente en horarios nocturnos, porque así se evita la interferencia que produce la radiación solar incidente sobre ese cuerpo radiante, pero como

fenómeno en general funciona en forma permanente pues sólo depende de las diferencias relativas de temperaturas.

Como se habrá notado la masa térmica es un factor muy importante en la eficiencia de la ventilación nocturna, y existen varias opciones para utilizarla como acumuladores de calor:

- Ventilando directamente la masa estructural del edificio: paredes, divisiones internas, pisos, etc, enfriados por ventilación del recinto interior.
- Haciendo pasar el aire por conductos a través de pisos, cielorrasos o paredes de manera que circule aire exterior por ellos.
- Empleando acumuladores especiales: lechos de piedra, tanques de agua, conteniendo conductos de aire empotrados, enfriados durante la noche por el aire exterior.

Recordemos que esta técnica sólo es aplicable en climas donde la temperatura exterior esté por debajo de la temperatura de confort durante varias horas por noche, y el punto de rocío del aire exterior esté siempre por debajo de la temperatura de confort.

Algunos principios básicos para asegurar una eficiente ventilación nocturna son:

- Evitar ganancias de calor, tanto como sea posible, a través de aislaciones térmicas y protección solar controlada.
- El edificio debería contar con una gran inercia térmica interna: la constante de tiempo del edificio definida como la relación entre el coeficiente de pérdida de calor y la capacidad térmica debería ser mayor a 100 horas. Esta inercia térmica debería estar en contacto directo con el aire interior.
- Las aberturas que se utilicen para la ventilación nocturna deben ser seguras (contra lluvias, insectos, ladrones, etc.) aún cuando estén abiertas.
- El caudal de aire entrante deberá ser lo mayor posible cuando la temperatura exterior es inferior a la interior.

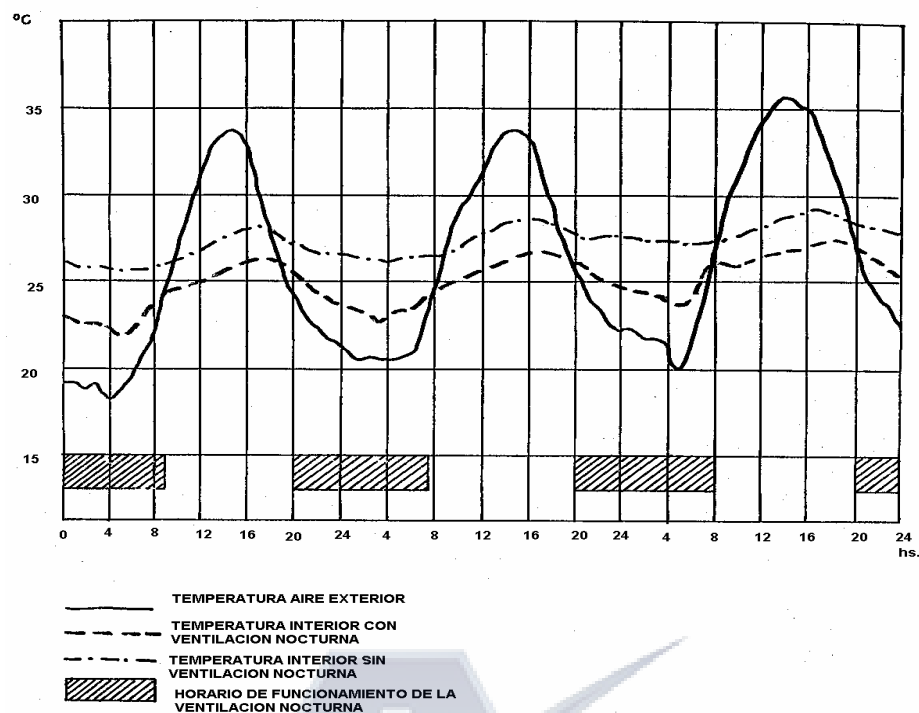


Figura 3.4. Estudio en Israel: Temperaturas interiores en un recinto con ventilación nocturna según B.Givoni

En la ventilación nocturna al igual que en la ventilación de confort, la velocidad del aire también es un factor importante. El efecto directo de la velocidad del aire aparece en los coeficientes peliculares, ya que estos dependen de la velocidad del aire cercana a las paredes.

En la Figura 3.5 se comparan los coeficientes peliculares de una pared interna para diferentes velocidades de aire. Como se puede apreciar, los coeficientes peliculares aumentan con la velocidad del aire. Este hecho mejora el enfriamiento estructural promovido por las estrategias de ventilación nocturna.

Este gráfico surge de la fórmula de transferencia de calor de Adams:

$$h_c = 5,67 + 3,8 \cdot V$$

Donde  $h_c$  es el coeficiente de transferencia pelicular [ $W/m^2K$ ] y  $V$  es la velocidad del aire [ $m/s$ ].

La ventilación nocturna es más fácil de evaluar que la ventilación de confort, ya que su efecto resultará en una disminución de la temperatura radiante de los muros o techos que tengan masa suficiente y que envuelvan al recinto.

De hecho ya se está empleando ventilación nocturna en algunas instalaciones de aire acondicionado utilizando los mismos conductos del sistema para hacer circular aire exterior y enfriar la masa interna del edificio antes de la ocupación diurna del mismo.

Su uso más extendido es en los edificios de oficina, ya que sólo son ocupados en horarios diurnos, pero también es una muy buena solución para edificios comerciales, gubernamentales y educativos.

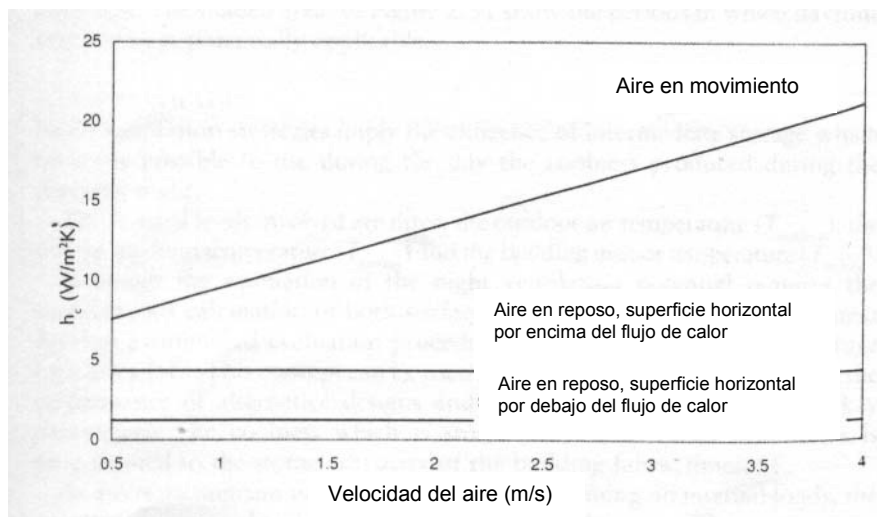


Figura 3.5. Variación de los coeficientes peliculares con la velocidad del aire para paredes interiores

Empleando ventilación nocturna también se pueden generar importantes ahorros energéticos en edificios climatizados artificialmente, lo que permite el uso de instalaciones de menor potencia produciendo un ahorro en el costo de la instalación que se suman al ahorro en costos de energía.

## Bibliografía

1. "Natural Ventilation in Buildings", Capítulo 2. Editor F. Allard (1998). James & James. Londres.
2. Módulos didácticos de la asignatura Ingeniería Bioambiental (2005). Eduardo Yarke y Martha Fajol.-UNLU
3. "Man, Climate & Architecture", Capítulo 13. B. Givonni (1976). Applied Science Publishers.
4. "Passive and low energy cooling of buildings", Capítulo 3. B.Givonni (1994).
5. "Design: cooling buildings by natural ventilation". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineering Support Agency (2004).
6. "Hawaii Commercial Building Guidelines for Energy Efficiency" Capítulo 2 Natural Ventilation Guidelines (2003).
7. " A Standard for Natural Ventilation" ASHRAE Journal, vol. 42, no. 10 (2000).
8. "1999 ASHRAE Handbook CD".
9. "Selección de Tipologías de aventanamientos con mayor eficiencia para el refrescamiento convectivo" trabajo presentado por el Arq. E. Yarke en CIAR 2001 VI Congreso Iberoamericano de aire acondicionado y refrigeración.





## 4 - FUNDAMENTOS FISICOS PARA VENTILACION NATURAL

A.MERMET

### El aire puro

El aire es un gas inodoro, incoloro e insípido; en general se puede considerar que está formado por una mezcla de distintos gases, cuyas proporciones en volumen para aire seco y puro son aproximadamente las siguientes: 78.03% de Nitrógeno, 20.98% de Oxígeno, 0.93% de Argón, entre 0.03% y 0.04% de Bióxido de Carbóno y 0.01% de Hidrógeno, además de vestigios de otros gases. En la Tabla 4.1 se presenta un detalle de la composición del Aire, en proporciones de peso y de volumen de los distintos componentes al igual que en la Figura 4.1 donde se destacan las proporciones de los componentes más importantes.

Componente	Porcentaje en Volumen (%)	Porcentaje en Peso (kg)
Oxígeno	20.98	23.20
Nitrógeno	78.03	75.50
Argón	0.93	1.29
Neón	$124 \times 10^{-5}$	$85 \times 10^{-5}$
Helio	$408 \times 10^{-6}$	$56 \times 10^{-6}$
Criptón	$49 \times 10^{-7}$	$141 \times 10^{-7}$
Xenón	$59 \times 10^{-8}$	$266 \times 10^{-8}$
Anhídrido Carbónico	0.04	0.05

Tabla 4.1 Composición del aire puro <sup>[1]</sup>.

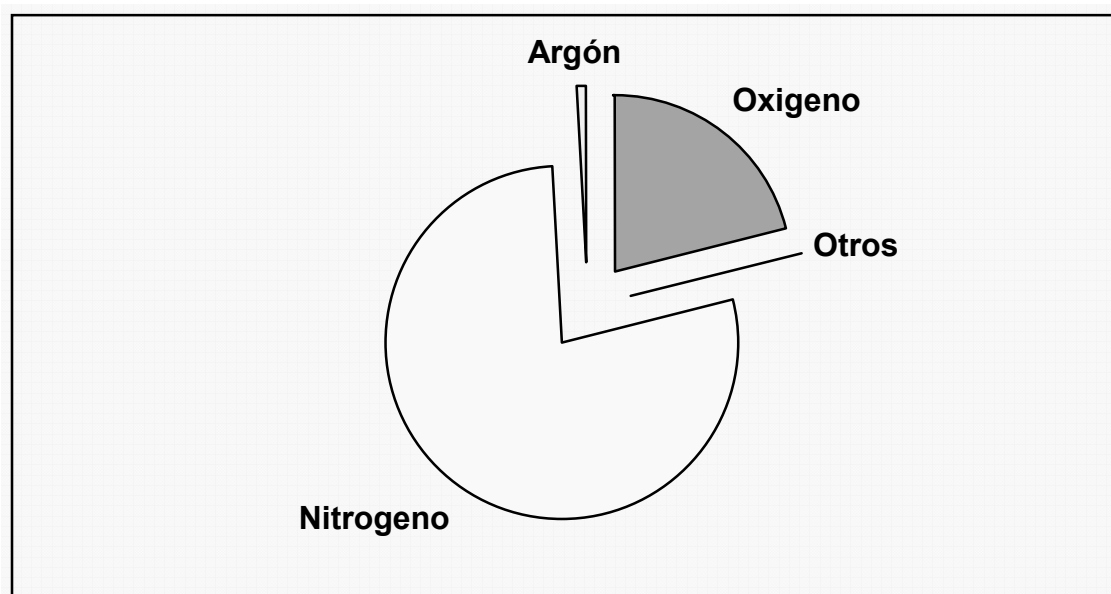


Figura 4.1 Composición del aire puro <sup>[1]</sup>.

### Aire seco y aire húmedo.

Se denomina aire seco a aquél desprovisto de toda humedad, es decir que el contenido de vapor de agua es nulo. Se puede considerar que el aire seco se comporta como un gas perfecto, por lo tanto:



$$PV = RT$$

donde  $T$  es la temperatura absoluta en K y  $R$  es la constante de los gases, esta es la ecuación del gas perfecto.

En cambio, aire húmedo es aquél que contiene una cantidad variable de vapor de agua. Aún con igual cantidad de gramos de vapor de agua, el aire puede tener distintos grados de humedad, en porcentajes que varían en función de la temperatura. Por lo tanto, el aire húmedo es una mezcla binaria de aire seco y vapor de agua, que puede contener cantidades variables de vapor de agua desde cero hasta el 100%. Bajo estas condiciones el aire ya no se comporta como un gas perfecto, pero entre los  $-50^{\circ}\text{C}$  y los  $50^{\circ}\text{C}$ , la diferencia con un gas perfecto es de un 5%.

En un proceso muy común, como la respiración, el contenido de humedad del aire se ve sometido a distintos procesos físicos. Así, el aire que respiramos se calienta dentro del organismo hasta unos  $35^{\circ}\text{C}$  y aumenta su contenido de humedad hasta el 95%. En este proceso, las personas entregan de 33 a 36 gramos de vapor de agua en la inspiración.

Cuando el contenido de humedad llega a cierto límite, variable con la temperatura, el vapor de agua se condensa y se dice que el aire está saturado. La saturación depende de la temperatura del aire y de la tensión de vapor de agua. Para que el aire a  $100^{\circ}\text{C}$  se sature, la tensión de vapor del agua debe ser de 760mm de columna de mercurio. En la siguiente tabla se muestra la presión de saturación para distintas temperaturas de aire.

T ( $^{\circ}\text{C}$ )	Presión (mmHg)
0.00	4.60
20.00	17.50
40.00	55.30
60.00	149.00
80.00	355.00
100.00	760.00

Tabla 4.2 .Presión de saturación en función de la temperatura.

### Propiedades del aire húmedo – Carta sicrométrica

Las propiedades físicas básicas del aire están dadas por su densidad  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ), el poder calorífico o calor específico a presión constante  $C_p$  ( $\text{kJ/kgK}$ ), su conductividad térmica  $k$  ( $\text{W/mK}$ ), la viscosidad cinemática  $\mu$  ( $\text{kg/m s}$ ) y la viscosidad dinámica  $\nu$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). A continuación, en la Tabla 4.3, se presentan algunos valores de dichas propiedades a presión atmosférica para un rango de temperaturas ambiente. Todas estas magnitudes dependen de la temperatura y de la presión del aire.

$T$ (K)	$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$C_p$ ( $\text{kJ/kgK}$ )	$\mu$ ( $\text{kg/m s}$ )	$\nu$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$k$ ( $\text{W/mK}$ )	$\alpha$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	Pr
250	1.4128	1.0053	$1.488 \times 10^{-5}$	$9.49 \times 10^{-6}$	0.02227	$0.1315 \times 10^{-4}$	0.722
300	1.1774	1.0057	$1.983 \times 10^{-5}$	$15.68 \times 10^{-6}$	0.02624	$0.2216 \times 10^{-4}$	0.708
350	0.998	1.0090	$2.075 \times 10^{-5}$	$20.76 \times 10^{-6}$	0.03003	$0.2983 \times 10^{-4}$	0.697

Tabla 4.3. Propiedades del aire seco puro a presión atmosférica para temperaturas entre 250 y 350 K (temperatura ambiente) -- Referencias: T: Temperatura,  $\rho$ : densidad,  $C_p$ : calor específico,  $\mu$ : viscosidad,  $\nu$ : viscosidad dinámica,  $k$ : conductividad térmica,  $\alpha$ : difusividad térmica, Pr: número de Prandtl.

Para el rango de temperaturas ambiente, se puede considerar que estas propiedades físicas del aire varían linealmente con la temperatura de la siguiente forma:

$$\text{Viscosidad: } \eta = [1.983 + 0.00184(T_c - 27)] \times 10^{-5}$$

Densidad:  $\rho = 1.1774 - 0.00359(T_c - 27)$   
 Conductividad térmica:  $k = 0.02624 + 0.0000758(T_c - 27)$   
 Calor específico:  $C_p = 1.0057 + 0.000066(T_c - 27)$

En este caso la temperatura  $T_c$  esta dada en °C. Las propiedades y los estados del aire húmedo se definen a partir de seis variables características:

*Temperatura de bulbo seco:* es la temperatura del aire húmedo en reposo, está asociada exclusivamente con el calor sensible del aire en la mezcla vapor-aire.

*Temperatura de bulbo húmedo:* Está asociada al calor latente del aire.

*Humedad relativa:* representa el porcentaje de humedad que tiene el aire, comparado con la humedad que tendría ese mismo aire a igual temperatura de bulbo seco, si estuviera saturado de humedad.

*Humedad absoluta:* Es el peso de agua contenido en una mezcla de aire-vapor de agua, en gramos de agua por kg. de aire seco.

*Temperatura de punto de rocío:* Es aquella temperatura a la cual la humedad contenida en el aire comienza a separarse en forma de gotas de agua (condensación).

*Entalpía:* Se define como el contenido de calor total de la mezcla aire-vapor, y es la suma del calor sensible del aire más el calor sensible del agua, más el calor latente del agua evaporada.

Otro parámetro importante es el volumen específico del aire, este es el valor recíproco de la densidad y está dado en  $m^3/kg$ .

Para la descripción de los distintos estados y procesos que afectan el aire húmedo, generalmente se emplean gráficas denominadas cartas o diagramas psicrométricos, En la Figura 4.4 se presenta una carta psicrométrica donde se muestran las líneas que representan a los distintos parámetros del aire.

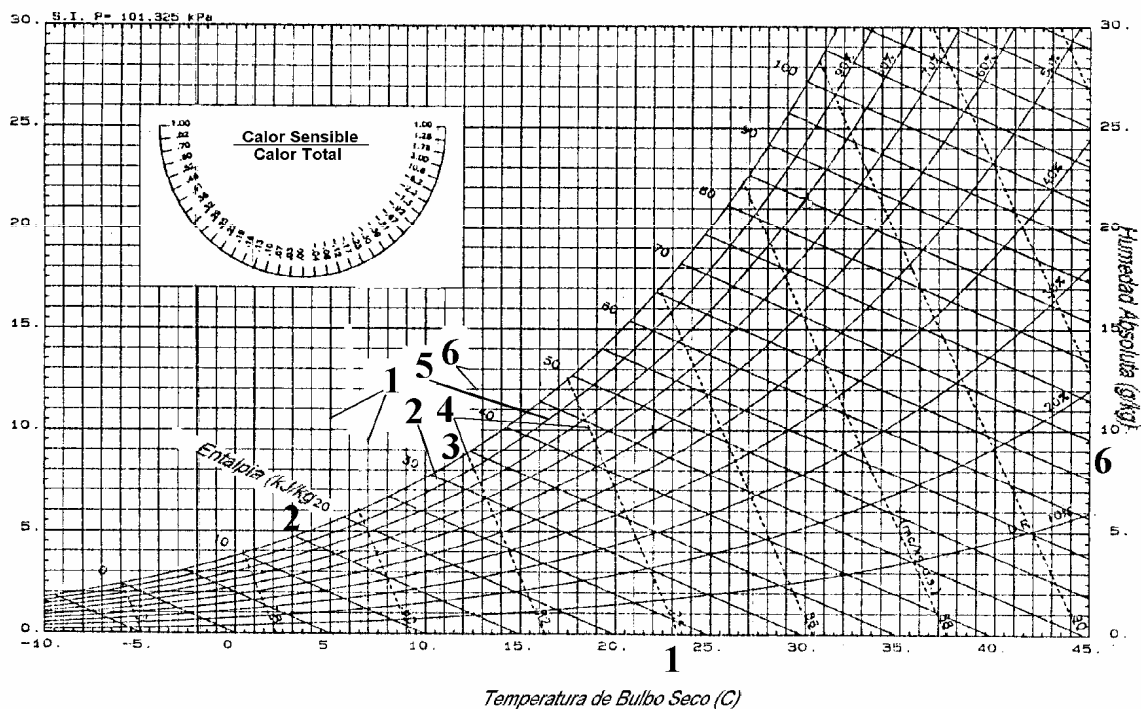


Figura 4.4. Carta Psicrométrica.

Referencias: 1) Líneas de temperatura de bulbo seco. La temperatura de bulbo seco es la temperatura del aire húmedo en reposo. 2) Líneas de entalpía. 3) Curva de saturación. Es el lugar geométrico de los puntos que representan el aire saturado, para presión estándar. 4) Líneas de volumen específico del aire, estas rectas se trazan a partir de las temperaturas considerando el valor recíproco de la densidad del aire seco y del aire saturado. 5) Líneas de humedad relativa. 6) Líneas de humedad absoluta o relación de humedad. Esta relación es el cociente entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco.

Estas gráficas presentadas por Mollier en 1923 se caracterizan por usar coordenadas oblicuas para la entalpía y rectangulares para la humedad absoluta, con esto, las líneas de temperatura de bulbo seco se representan como rectas, y la mayoría de los procesos aparecen como rectas sobre este tipo de diagrama, obteniéndose intersecciones claras y adecuadas. En estos diagramas o cartas se pueden graficar los puntos que describen un cierto estado o un proceso dado, en función de la temperatura de bulbo seco, la temperatura de bulbo húmedo, la humedad absoluta y humedad relativa.

## Estados del aire. Aire salubre e insalubre

El aire se denomina salubre cuando no está mezclado con fluidos nocivos ni impurezas (polvo, humo, bacterias, etc.) en cantidades suficientes para afectar al organismo humano<sup>[1]</sup>. El aire insalubre puede deberse a modificaciones en las cantidades de los distintos elementos que lo constituyen o de las propiedades físicas de los mismos, como presión y temperatura; o a cambios cualitativos de la composición del aire por adición de elementos extraños como gases nocivos, polvo, humo, vapores o bacterias.

La pureza del aire y por ende las concentraciones de sus componentes varían de un sitio a otro, siendo más puro en los campos, especialmente si los mismos se encuentran arbolados, en este caso las concentraciones pueden aumentar hasta un 22 ó 23%, en ciudades las concentraciones de oxígeno puede disminuir a menos de 20.90%, este es uno de los grandes problemas en muchas ciudades especialmente aquellas con gran cantidad de fábricas y vehículos con motores a combustión, estos valores se resumen en la Tabla 4.5. En lugares cerrados con aglomeraciones de personas la concentración de oxígeno puede decrecer aún más, llegando este descenso a niveles peligrosos.

Tipo de Aire	Oxígeno (%)
Aire Puro	21.00
Aire en zonas boscosas	20 al 23
Aire en ciudades	19 al 21 (20,90)

Tabla 4.5. Concentraciones de oxígeno en el aire.

No solo la disminución del oxígeno en el aire produce efectos nocivos en el cuerpo humano, el aumento de la concentración de anhídrido carbónico puede resultar muy perjudicial, hasta puede producir la muerte aún en casos en que la proporción de oxígeno sea la adecuada; se considera que hasta el 1% de anhídrido carbónico contenido en el aire no es perjudicial para la salud y que hasta el 5% puede ser tolerable sin peligro por periodos muy cortos de tiempo.

Niveles de CO <sub>2</sub>	Efectos
más de 0,07%	Mal olor
hasta 0,14 %	Máximo recomendado en la práctica
hasta 1 %	No es perjudicial para la salud
hasta 5 %	Puede tolerarse por cortos periodos
más de 5%	Muy nocivo.

Tabla 4.6. Efectos producidos por distintos niveles de anhídrido carbónico

## Aire viciado

Por efecto de todo tipo de proceso de combustión de elementos sólidos, líquidos o gaseosos, el aire va acumulando sustancias que disminuyen su pureza y pueden dar lugar a importantes problemas de salud. Por ejemplo, como consecuencia de los procesos de combustión, aumenta la presencia de anhídrido carbónico, monóxido de carbono, vapor de agua y otros elementos en el aire. Por descomposición de materiales orgánicos pueden presentarse pequeñas cantidades de amoníaco, ácido nítrico, ácido sulfuroso y otros compuestos nocivos o tóxicos.

También puede notarse en mayor o menor proporción, la presencia de polvo atmosférico, compuesto de pequeñas partículas sólidas que flotan en el aire. Estas partículas pueden ser inorgánicas, tales como sílice, carbón, sales, etc.; u orgánicas provenientes de residuos animales o vegetales pulverizados. Adherido al polvo atmosférico pueden encontrarse diversos gérmenes patógenos que pueden afectar la salud.

## Aire confinado

El aire limitado dentro de un local, especialmente si hay gran cantidad de personas, se ve alterado rápidamente, disminuyendo en él la cantidad de oxígeno y aumentando el anhídrido carbónico, el vapor de agua y la temperatura. Hasta cierto límite esto resulta imperceptible, sobrepasando este límite empieza a ser molesto para los ocupantes del local. Si el anhídrido carbónico aumenta demasiado comienza a ser peligroso.

Debido a esto, es muy importante la renovación del aire en los ambientes cerrados, produciendo una correcta circulación, la que no debe producir molestias debido a altas velocidades de aire y si es posible debe tratarse de purificar el aire modificando a la vez su temperatura y grado de humedad.

## Efectos de la respiración

Durante la respiración, el aire sufre modificaciones físicas y químicas. Este proceso comprende dos etapas: la aspiración y la inspiración o expiración.

Las modificaciones físicas más importantes son las siguientes: en ambientes con temperaturas de entre 10°C y 30°C, el aire se calienta en los pulmones y vías respiratorias donde se producen procesos de combustión constantes, a alrededor de 35°C. Además el aire se satura de vapor de agua en los pulmones, para cualquier grado de humedad del ambiente.

Entre las modificaciones químicas, las más importantes son la reducción de la cantidad de oxígeno, ya que el aire expirado contiene un 16% de oxígeno contra el 21% que tiene el aire al ser inspirado, y el aumento del anhídrido carbónico expulsado por los pulmones, ya que el aire puro contiene alrededor del 0.04% de CO<sub>2</sub> y el aire expirado contiene alrededor del 4%. Más precisamente, el aire exterior puro contiene 21% de oxígeno y entre 0.03 y 0.04% de Anhídrido carbónico, 78% de Nitrógeno y 1% de gases inertes, y entre 5 y 25 gr. de vapor de agua por m<sup>3</sup> de aire y el aire expirado contiene alrededor de 16.3% de oxígeno, 4% de CO<sub>2</sub>, 79,7% de nitrógeno y otros gases y alrededor de 45gr/m<sup>3</sup> de vapor de agua saturado a 37°C. En la Tabla 4.7 se pueden apreciar las proporciones de los componentes del aire atmosférico y el alveolar, es decir el aire expulsado durante la expiración.

Tipo de Aire	Componentes (%)		
	Oxígeno	Nitrógeno	Anhídrido Carbónico
Aire Atmosférico seco	20.98~21	78.05	0.03~0.04
Aire Alveolar seco	14~16	80.40	4~5.6

Tabla 4.7. Composición del aire Atmosférico y del aire Alveolar.

Durante cada inspiración ingresa a los pulmones aproximadamente medio litro de aire y la expiración expulsa otro tanto. La suma del aire movible en los pulmones se llama capacidad vital, esta es de 3 a 4 litros en un hombre adulto y de 2 a 3 en mujeres adultas. En la Tabla 4.8. se puede observar las variaciones de la frecuencia respiratoria en las personas de acuerdo a la edad y en la Tabla 4.9 en función de su temperatura.

Los requerimientos de oxígeno dependen principalmente del nivel metabólico o calor metabólico *M* (W ó kcal/h), también llamado potencia metabólica o tasa metabólica, que es una cantidad relacionada directamente con el tipo de actividad que realiza el individuo y representa la cantidad de calor producida por una persona al realizar un determinado tipo de actividad. Por cada litro de

oxígeno inhalado se utiliza en promedio alrededor de 20,93kJ (5 kcal), el oxígeno requerido en l/h y por persona es aproximadamente **0.172M** con **M** en W(1/5 de la tasa metabólica **M** en kcal/h). El aire de recambio necesario en l/h por persona para proveer la cantidad necesaria de oxígeno, es aproximadamente **3.657M** tomando **M** en W (**4.25M** considerando **M** en kcal/h).

El índice de producción de CO<sub>2</sub> , promedio por persona, se puede estimar considerando la frecuencia cardiaca de la persona y teniendo en cuenta su peso y contextura física, en la Tabla 4.10 , se presentan valores de CO<sub>2</sub> producidos por persona, determinados experimentalmente, en relación al ritmo cardiaco<sup>[2]</sup>.

Por otro lado la cantidad de CO<sub>2</sub> producida por el cuerpo humano se puede considerar proporcional a la tasa metabólica, con esto la tasa volumétrica de producción de CO<sub>2</sub> , **q** en l/h, se puede calcular como:

$$q = 0.1463M$$

con **M** dado en W o bien:

$$q = 0.17M$$

donde **M** está dado en kcal/h, en la Tabla 4.11 se pueden ver algunos valores indicativos de **M** en función del tipo de actividad. En la Tabla 4.12 se tienen algunos valores de referencia de niveles de anhídrido carbónico producido por persona en función del calor metabólico para distintos tipos de actividad. Como comparación se puede agregar que la combustión de 1m<sup>3</sup> de gas produce alrededor de 0.6 m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub> .

Tipo de persona	Respiraciones por minuto
Recién nacido	35~56
Lactante	45~56
Niño de 1 año	26~32
Niño de 3 años	30~40
Niño de 5 años	25.00
Después de los 6 años	20.00
Adulto	16~20

Tabla 4.8. Frecuencia respiratoria.

Temperatura corporal (°C)	Número de Pulsaciones	Número de Respiraciones
37.00	72.00	18.00
38.00	92.00	23.00
39.00	112.00	28.00
40.00	132.00	33.00

Tabla 4.9. Variación de la frecuencia respiratoria en relación a la temperatura y a las pulsaciones del individuo.

	Índice cardiaco (latidos por minuto)	Índice de Oxígeno inspirado ( m <sup>3</sup> /h)	Producción media de CO <sub>2</sub> (m <sup>3</sup> /h)
Niño	95.40	1.71x10 <sup>-2</sup>	1.368x10 <sup>-2</sup>
Adulto	71.00	2.92x10 <sup>-2</sup>	2.337x10 <sup>-2</sup>

Tabla 4.10. Producción de anhídrido carbónico determinados experimentalmente, en función de la actividad cardiaca y del oxígeno inspirado<sup>[2]</sup>.

Tipo de actividad	Tasa metabólica $M$		
	W	kcal/h	Btu/h
Metabolismo basal	69.78-81.4	60-70	240-280
Sentado descansando	77.38-116.30	90-100	360-400
Actividad sedentaria	116.3-139.56	100-120	400-480
Caminando a 4 km/h	244.23-314.01	210-270	840-1080
Caminando a 7 km/h	348.9-465.2	300-400	1200-1600
Trabajo industrial liviano	174.45-348.9	150-300	600-1200
Trabajo industrial moderado	348.9558.24	300-480	1200-1600
Trabajo industrial pesado	523.35-697.68	450-600	1800-2400
Trabajo muy pesado	697.68-872.25	600-750	2400-3000

Tabla 4.11. Niveles de calor metabólico para distintos tipos de actividad.

Tipo de actividad	Tasa metabólica $M$ (W)	Cantidad media de anhídrido carbónico producido por persona (l/h)
Metabolismo basal	80	11.50
Sentado descansando	105	16.00
Actividad sedentaria	130	19.00
Caminando a 4 km/h	280	39.00
Caminando a 7 km/h	406	60.00
Trabajo industrial liviano	260	37.00
Trabajo industrial moderado	470	66.00
Trabajo industrial pesado	610	90.00
Trabajo muy pesado	784	115.00

Tabla 4.12. Niveles de anhídrido carbónico producido por persona en función del calor metabólico y del tipo de actividad.

## Bienestar termohigrométrico

El cuerpo humano debe mantener su temperatura interna estable alrededor de los 37°C (más o menos 0.5°C). Al mismo tiempo el cuerpo produce continuamente calor como resultado de la actividad metabólica.

Se pueden considerar las siguientes definiciones:

**Sensación de comodidad:** La temperatura del cuerpo humano oscila alrededor de los 37°C, pero la temperatura de la piel en contacto con el aire ambiente tiene una temperatura cercana a los 32°C, es este el valor que nos interesa para determinar las sensaciones de "frío" y de "calor". Si la temperatura de la piel supera los 32°C, sentimos "calor" y si desciende debajo de los 32°C sentimos "frío". Por otra parte, el mecanismo de refrigeración del organismo es la transpiración, pues esa humedad acumulada en la superficie de la piel, al evaporarse nos produce sensación de "frío".



**Equilibrio Térmico:** Es la condición en la cual el cuerpo alcanza a igualar los términos correspondientes a la ganancia y pérdida de calor interno producido y el intercambiado con el ambiente, recurriendo a mecanismos de autorregulación.

**Neutralidad Térmica:** es la condición en la cual el sujeto no necesita ni más "frío" ni más "calor".

**Bienestar:** Es la condición mental que expresa satisfacción respecto del ambiente.

**Bienestar Óptimo:** Es la condición para la cual la mayor cantidad de personas expresan un juicio de bienestar.

**Sensación Térmica:** Es la sensación de "frío" o de "calor" que experimenta el cuerpo humano, función de la temperatura del aire, de la humedad relativa y de la velocidad del viento, además del tipo y cantidad de ropa.

Los mecanismos de autorregulación con los que cuenta el cuerpo humano para adaptarse a las condiciones térmicas ambientales cambiantes son fundamentalmente dos:

1-Variación de la sección de los vasos que conducen la sangre a la piel. Mediante este mecanismo el cuerpo regula el flujo de sangre a los tejidos cutáneos, y por lo tanto al calor que transporta, variando consecuentemente la temperatura media cutánea  $T_s$ .

2-Variación de la sección de los poros, con lo cual el cuerpo controla la cantidad de agua que pueda fluir a través de la piel, evaporándose, extrayendo calor del cuerpo. Esta cantidad de calor extraído se denota como  $E_{SW}$ .

## Intercambio térmico del cuerpo humano

El cuerpo humano intercambia calor con el ambiente de varios modos. En un balance térmico, los diversos términos que representan este intercambio pueden expresarse analíticamente en función de los parámetros que gobiernan los distintos procesos que generan estos intercambios de calor. Estas variables pueden ser de tipo ambiental, como la temperatura del aire y de las distintas superficies, la humedad relativa y la velocidad del aire; o bien de carácter operativo, ligado a los ocupantes, como el tipo de actividad y la vestimenta. Si la suma de todos los términos del balance es igual a cero, se dice que el cuerpo está en equilibrio térmico, de otro modo se dice que el cuerpo no está en equilibrio térmico.

Fanger ha desarrollado un método<sup>[3][4]</sup>, en el cual este balance se escribe en función de la temperatura media cutánea  $T_s$  y de la cantidad de calor extraído del cuerpo humano mediante el proceso de transpiración  $E_{SW}$ . Imponiendo valores óptimos a estas cantidades, el balance da un resultado,  $S$ , distinto de cero, que expresa el calor neto perdido o ganado si no actuaran los mecanismos de autorregulación.

Según este método, los valores que deben asumir las dos magnitudes de las cuales dependen la sensación de frío o calor,  $T_s$  y  $E_{SW}$ , para lograr una sensación de bienestar, son función del tipo de actividad o bien de  $H/A_{du}$ , donde  $H$  es el calor interno a disipar y  $A_{du}$  es la superficie cutánea en  $m^2$ .

Esta última puede calcularse mediante la expresión:

$$A_{du} = 0.202 m^{0.425} h^{0.725}$$

donde  $m$  es el peso corporal de la persona en kg y  $h$  es su altura en m, un valor típico de  $A_{du}=1.82m^2$  para una persona adulta.

**Condiciones de Bienestar:** Fanger encontró que las correlaciones para obtener los valores que deben asumir las magnitudes de las cuales dependen las sensaciones de calor y frío,  $T_s$  y  $E_{SW}$ , para alcanzar una sensación de bienestar, tienen la siguiente forma:

$$T_s = 35.7 - 0.032 (H / A_{du})$$

$$E_{sw} = 0.42 A_{du} (H / A_{du} - 50)$$

Finalmente, el balance térmico puede escribirse como:

$$H - E_d - E_{sw} - E_{re} - L = k + S$$

donde:  $H$  es el calor interno a disipar,  $E_d$  es la pérdida de calor por difusión del vapor de agua a través de la piel,  $E_{re}$  es la pérdida de calor latente por la respiración,  $E_{sw}$  es la cantidad de calor extraído del cuerpo humano mediante el proceso de transpiración,  $L$  es la pérdida de calor sensible por la respiración y  $k$  el calor perdido o ganado por conducción a través de la indumentaria.  $S$  es la energía que hay que proveer para llegar al confort. A continuación se presenta una descripción de cada uno de los términos del balance térmico propuesto.

### Calor interno a disipar

Se lo puede calcular como<sup>[3][4]</sup>:

$$H = (1 - \eta) M$$

donde el rendimiento  $\eta$  se define como  $\eta = W / M$ , siendo  $M$  el calor metabólico producido por unidad de tiempo y  $W$  es la potencia mecánica producida. Estas cantidades,  $\eta$  y  $M$ , dependen del tipo de actividad incluso pudiendo variar  $M$  sensiblemente de persona a persona, se pueden encontrar algunos valores típicos de  $M$  y de  $M/A_{du}$  en las Tablas 4.11, 4.12 y 4.13 respectivamente.

### Pérdida de calor por difusión del vapor de agua a través de la piel

Este término del balance se calcula a partir de:

$$E_d = \lambda m A_{du} (p_s - p_a)$$

en esta ecuación,  $\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua a 35°C (2407kJ/kg ó 575 kcal/kg),  $m$  es el coeficiente de permeabilidad de la piel ( $6.1 \times 10^{-4}$  kg/hm<sup>2</sup> mmHg),  $A_{du}$  es la superficie cutánea en m<sup>2</sup>.

Actividad	Tasa metabólica por unidad de superficie cutánea $M/A_{du}$	
	W/m <sup>2</sup>	met*
Recostado	46.00	0.80
Sentado, relajado	58.00	1.00
Parado, relajado	70.00	1.20
Actividad sedentaria (oficina, escuela, laboratorio, etc.)	70.00	1.20
Actividad de pie (industria liviana, laboratorio, compras, etc.)	93.00	1.20
Actividad de pie (trabajo domestico, trabajo con maquinas livianas, actividad comercial, etc.)	116.00	2.00
Actividad media (trabajo en talleres, trabajo con máquinas pesadas, etc.)	165.00	2.80
Actividad deportiva	400.00	6.80

Tabla 4.13 Valores de la tasa metabólica o calor metabólico por unidad de superficie cutánea en función del tipo de actividad (tomando  $A_{du} = 1.82$  m<sup>2</sup>).

\* 1 met. = 50 kcal/h m<sup>2</sup> = 58 W / m<sup>2</sup>.



En dicha ecuación  $p_s$  es la presión de saturación en mmHg a la temperatura cutánea  $T_s$ , que en el intervalo de temperaturas entre 27°C y 37°C puede ser expresado por  $p_s = 1.92T_s - 25.3$ .  $p_a$  es la presión parcial de vapor de agua en el aire, en mmHg, ligada a la humedad absoluta  $w_a$  y puede obtenerse como:  $P_a = P \cdot w_a / (w_a + 0.622)$ .

Sustituyendo estos términos en la ecuación anterior se tiene:

$$E_d = 0.35 A_{du} (1.92T_s - 25.3 - P_a)$$

### Pérdida de calor latente por la respiración.

Se calcula mediante la ecuación:

$$E_{re} = V \lambda (w_{ex} - w_a)$$

donde  $V$  es la ventilación pulmonar en kg/h, y se puede calcular a partir del calor metabólico  $M$  como  $V = 5.16 \times 10^{-3} M$  con  $M$  en W ( $V = 0.0060 M$  con  $M$  en kcal/h),  $\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua a 35°C (2407 kJ/kg ó 575 kcal/kg),  $w_{ex}$  es la humedad absoluta del aire expirado,  $w_a$  es la humedad absoluta del aire ambiente. Esta diferencia entre las humedades absolutas puede escribirse en función de la presión parcial de vapor  $P_a$ , como  $(w_{ex} - w_a) = 0.029 - 0.00066 P_a$ , resultando finalmente:

$$E_{re} = 0.023 M (44 - P_a)$$

### Pérdida del calor sensible por la respiración.

Se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$L = V C_p (T_{ex} - T_a)$$

en esta se define  $V$  como la ventilación pulmonar,  $C_p$  es el calor específico del aire a presión constante (1.0057 kJ/kgK ó 0.24 kcal/kgC).  $T_{ex}$  es la temperatura del aire expirado (puede asumirse igual a 34°C).  $T_a$  es la temperatura del aire ambiente. Reemplazando los valores arriba presentados se puede escribir:

$$L = 0.0014 V (34 - T_a)$$

### Calor ganado o perdido por conducción a través de la indumentaria

Este término se calcula a partir de:

$$k = A_{du} (T_s - T_{cl}) / R_{cl}$$

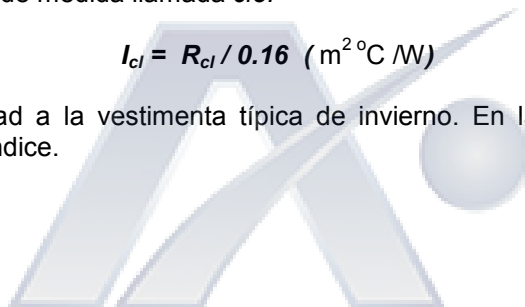
donde  $T_{cl}$  es la temperatura media absoluta del cuerpo vestido. La ropa presenta una resistencia térmica  $R_{cl}$ , que se puede expresar mediante una magnitud adimensional, el índice de abrigo  $I_{cl}$ , expresado en una unidad de medida llamada  $clo$ .

Se define:

$$I_{cl} = R_{cl} / 0.16 \text{ (m}^2\text{°C/W)}$$

Correspondiendo la unidad a la vestimenta típica de invierno. En la Tabla 4.14, se presentan algunos valores de este índice.

Por lo tanto:



$$k = A_{du} (T_s - T_{cl}) / R_{cl} = A_{du} (T_s - T_{cl}) / (0.16 I_{cl})$$

A su vez  $k$  es igual a la suma del calor que el cuerpo vestido intercambia por radiación  $R$  y por convección  $C$ , entonces:

$$k = R + C$$

El intercambio radiativo entre el cuerpo humano y las superficies que lo rodean, puede escribirse como (ver capítulo 6):

$$R = h_r A_{eff} (T_{cl}^4 - T_{mr}^4)$$

donde  $h_r$  se denomina coeficiente radiativo y se calcula como  $h_r = 4.81 \times 10^{-8} (T_{cl} + T_{mr})(T_{cl}^4 - T_{mr}^4)$ .  $A_{eff}$  es el área efectiva radiante,  $A_{eff} = A_{du} f_{cl} f_{eff}$  aquí  $A_{du}$  es la superficie cutánea en  $m^2$ , como el cuerpo vestido presenta una superficie ligeramente mayor que el cuerpo desnudo, se utiliza el índice  $f_{cl}$  (mayor o igual a 1) y no toda esta superficie participa del intercambio radiativo, ya que existen irradianciones entre partes del mismo cuerpo, que dependen de la postura dados por el índice  $f_{eff}$  (menor o igual a 1, se asume generalmente igual a 0.71).  $T_{cl}$  es la temperatura absoluta media del cuerpo vestido en K.  $T_{mr}$  es la temperatura media radiante, que se calcula partiendo de la hipótesis de que la emisividad global de los materiales, en el campo del infrarrojo lejano, es prácticamente igual a 1, por lo tanto estos cuerpos se comportan como cuerpos negros, se puede decir entonces que  $T_{mr}^4$  es igual a la sumatoria de  $F_{r-i} T_i^4$ , siendo  $F_{r-i}$  los factores de vista del cuerpo con las distintas superficies y  $T_i$  las temperaturas absolutas de las distintas superficies. Reemplazando términos, se puede escribir:

$$R = h_r A_{du} f_{cl} (T_{cl} - T_{mr})$$

El calor intercambiado por convección se calcula como:

$$C = h_c A_{du} f_{cl} (T_{cl} - T_a)$$

donde  $T_a$  es la temperatura del aire ambiente, el coeficiente convectivo  $h_c$  se puede calcular a partir de:

$$h_c = 2.05 (T_{cl} - T_a)^{0.25} \text{ si el movimiento convectivo es natural}$$

$$h_c = 10.4 v^{1/2} \text{ si es convección forzada}$$

considerando  $v$  como la velocidad relativa del aire respecto del cuerpo en m/s, que se puede escribir como  $v = v_o + 0.0058(M/A_{du} - 50)$ ,  $v_o$  es la velocidad absoluta del aire. Resumiendo:

$$k = R + C = h_r A_{du} f_{cl} (T_{cl} - T_{mr}) + h_c A_{du} f_{cl} (T_{cl} - T_a)$$

Tipo de Vestimenta	$I_{cl}$	
	( $m^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ )	(clo)
Cuerpo desnudo	0.00	0.00
Traje de baño	0.02	0.10
Ropa para clima tropical: Camisa o camiseta, shorts, medias livianas y sandalias.	0,045	0,3
Ropa de verano: Camisa, pantalón, medias y zapatos o zapatillas.	0,08	0,5
Ropa para trabajo liviano: Camiseta de algodón, camisa de mangas largas, pantalón, medias y zapatos.	0,11	0,7
Ropa de invierno para permanecer dentro de un edificio: Camiseta, camisa, pulóver o buzo de algodón frizado, pantalones, medias gruesas y zapatos.	0,16	1,0
Ropa de invierno: Camiseta, camisa, pulóver o buzo, saco de abrigo, pantalones, medias gruesas y zapatos. □	0,23	1,5 □

Tabla 4.14. Índice de abrigo en función del tipo de vestimenta.

## VENTILACIÓN DE AMBIENTES.

Una condición indispensable para mantener el confort en un recinto cerrado, se refiere a las condiciones de pureza y salubridad del aire alojado en dicho ambiente, las condiciones de dicho aire se ven afectadas por distintos procesos, lo que hace indispensable el reemplazo del aire en dicho ambiente por aire puro, esto se logra mediante la ventilación.

Existen diversos métodos de ventilación, que se pueden clasificar básicamente de la siguiente manera:

**Ventilación Forzada:** La ventilación forzada o mecánica es la provocada por agentes mecánicos de impulsión de aire (ventiladores, extractores, etc.) para mover la masa de aire. Para locales o ambientes ventilados mecánicamente donde se introduce aire limpio exterior propulsado por un elemento mecánico ( ventilador, etc.), el cálculo de los caudales se realiza a partir de la velocidad del aire dada por las características del propulsor mecánico y por las dimensiones geométricas de los ductos y bocas de las tuberías.

**Ventilación Natural:** Para la circulación y renovación del aire de un local, generalmente basta con ubicar correctamente aberturas que comuniquen con el exterior. Los sistemas de ventilación natural aprovechan hechos físicos naturales como diferencias de presión y temperatura, dirección e intensidad de vientos, etc.

## El fenómeno de la convección

Sin lugar a dudas que el mecanismo de transferencia de calor que tiene mayor importancia en la ventilación natural es la convección, por ello a continuación se desarrollan los fundamentos básicos de la convección.

La convección es el proceso en el cual la transmisión del calor está asociada al movimiento de materia. Esta se caracteriza por el movimiento de un fluido, mediante el cual se transporta calor asociado a un transporte de masa. Por lo tanto se habla de convección cuando al menos uno de los cuerpos involucrados en el intercambio calórico es un fluido.

En resumen, el intercambio de calor por convección se produce cuando un fluido a cierta temperatura barre una superficie con distinta temperatura, arrastrando una determinada cantidad de energía. Partiendo de la ley de enfriamiento de Newton es posible escribir este flujo de calor como:

$$q_c = h_c \cdot A \cdot \Delta T$$

donde  $\Delta T$  es la diferencia de temperaturas entre el fluido y la superficie, y  $A$  es el área de contacto entre el fluido y la superficie,  $h_c$  es el coeficiente convectivo, éste último no es una constante física sino un parámetro del fluido que depende de las condiciones a que se ve sometido.

Dicho coeficiente convectivo se determina generalmente en forma empírica, partiendo de su forma adimensional dada por el número de Nusselt  $Nu$  ( $Nu=h_c D/k$ ) donde  $D$  es una dimensión característica y  $k$  la conductividad térmica del fluido, con errores de hasta un 20%.

Se puede distinguir entre convección natural y forzada. La convección natural es provocada por la diferencia de densidad del fluido debida a la diferencia de temperaturas, mientras que la forzada es provocada por factores externos que imprimen movimiento al fluido, como por ejemplo bombas y ventiladores. El orden de magnitud del coeficiente convectivo varía mucho. Para convección natural de aire va de alrededor de  $2 \text{ Wm}^2/\text{K}$  hasta  $30 \text{ Wm}^2/\text{K}$  aproximadamente, y para convección forzada superando los  $30 \text{ Wm}^2/\text{K}$  hasta alrededor de  $300 \text{ Wm}^2/\text{K}$ .

En los sistemas fluidodinámicos pueden diferenciarse dos tipos de flujos, laminar y turbulento. Para velocidades suficientemente pequeñas, el movimiento se dice que es laminar y el fluido escurre paralelo a las paredes del sólido, sólo en este caso la distribución de velocidades

basada en promedios temporales puede dibujarse como una curva continua. Para el caso de velocidades altas el flujo se dice turbulento, en este caso la distribución de velocidades se basa en promedios temporales con fluctuaciones alrededor del valor promedio.

El tipo de flujo se determina principalmente por el valor de un parámetro adimensional, el número de Reynolds  $Re$ , que se define como el cociente entre las fuerzas inerciales, proporcionales a la energía cinética  $\rho w^2$  y las fuerzas viscosas de la forma  $\mu w/D$ , donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $w$  su velocidad,  $\mu$  la viscosidad dinámica y  $D$  una dimensión característica del sistema. El número de Reynolds, puede escribirse de la siguiente manera:

$$Re = wD\rho/\mu = wD/\nu$$

donde  $\nu = \mu/\rho$  es la viscosidad cinemática. Un flujo se dice laminar cuando el número de Reynolds  $Re$  es menor a 2100 y turbulento cuando  $Re$  es mayor a 6000, entre estos límites se dice que está en la zona de transición

La transmisión de calor por convección depende de la conductividad térmica del fluido  $k$ , del calor específico  $C_p$ , de la densidad  $\rho$  y de la viscosidad cinemática  $\nu$ . Otra magnitud fundamental es la difusividad térmica, que caracteriza la velocidad de variación de la temperatura en un medio, en condiciones no estacionarias, y se define:

$$\alpha = k / C_p \cdot \rho$$

La forma del cuerpo sólido en contacto con el fluido y sus dimensiones influyen en el intercambio convectivo. La ley física que describe el fenómeno de convección puede escribirse como una función de los parámetros mencionados anteriormente, tomando una forma general:

$$h_c = f(D, w, k, \mu, C_p, \rho, \beta, g, \Delta T)$$

ó

$$g(h_c, D, w, k, \mu, C_p, \rho, \beta, g, \Delta T) = 0$$

Pudiéndose hacer la siguiente distinción:

$$g_n(\beta, h_c, \nu, g, \Delta T, D, k) = 0 \quad \text{para convección natural;}$$

$$g_f(D, w, h_c, \mu, C_p, k) = 0 \quad \text{para convección forzada;}$$

donde:

- $h_c$  coeficiente convectivo ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ).
- $\beta$  coeficiente de expansión volumétrica ( $1/ K$ ).
- $\alpha$  difusividad térmica ( $m^2/s$ ).
- $w$  velocidad del fluido ( $m/s$ ).
- $D$  una dimensión característica ( $m$ ).
- $\nu$  viscosidad cinemática ( $1/s$ ).
- $k$  conductividad térmica del fluido ( $W/m^\circ C$ ).
- $C_p$  calor específico ( $J/kg^\circ C$ ).
- $\rho$  densidad ( $kg/m^3$ ).
- $g$  aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).
- $\Delta T$  diferencia de temperaturas ( $^\circ C$ ).
- $\mu$  viscosidad dinámica ( $kg/m.s$ )

Debido a la gran cantidad de variables intervinientes, estas funciones no pueden ser definidas en forma clara, ya sea por vía exclusivamente analítica o solamente por vía experimental. Generalmente, para algunos casos geoméricamente sencillos y para

reducir la complejidad ligada a la definición del coeficiente convectivo, este problema se resuelve recurriendo al análisis dimensional, de modo de establecer una forma general válida para sistemas similares, determinando experimentalmente los factores numéricos y exponentes para cada caso particular.

Este método se basa en el teorema de Buckingham, el cual afirma que una función de  $n$  magnitudes físicas, se puede expresar como función de  $m$  magnitudes fundamentales y de  $(n-m)$  parámetros adimensionales. También llamado *Teorema II*, que demuestra además que cuando una cantidad adimensional está relacionada con una función de cantidades dimensionales, estas sólo pueden presentarse en forma de productos adimensionales. Más aún, cualquier relación con significado físico entre cantidades dimensionales puede transformarse a otra entre cantidades adimensionales sin perder su significado físico.

Si bien la elección de las magnitudes fundamentales que describen el fenómeno es relativamente arbitraria, dependiendo de las condiciones del fluido y de la geometría de cada sistema en particular, considerando un caso general las magnitudes fundamentales elegidas pueden ser básicamente cinco: la masa  $m$ , una dimensión característica  $D$ , el tiempo  $\tau$ , la temperatura  $T$  y la cantidad de calor  $Q$  siempre que no se tenga conversión de calor en trabajo o viceversa. En este caso, las magnitudes derivadas, es decir aquellas indicadas en la definición de  $h_c$  y enumeradas anteriormente son nueve. A continuación en la Tabla 4.15 se presentan las dimensiones de estas nueve magnitudes derivadas respecto de las nueve magnitudes fundamentales elegidas. Por lo tanto se tienen cuatro parámetros adimensionales para definir la ley física que describe al coeficiente convectivo:

$$h_c = f(D, w, k, \mu, C_p, \rho, \beta, g, \Delta T).$$

MAGNITUDES		Dimensiones en función de:				
		longitud $D$ (m)	masa $m$ (kg)	tiempo $\tau$ (seg)	temperatura $T$ (°C)	calor $Q$ (J)
Longitud	$D$	1	0	0	0	0
Densidad	$\rho$	-3	1	0	0	0
Viscosidad dinámica	$\mu$	-1	1	-1	0	0
Conductividad térmica	$k$	-1	0	-1	-1	1
Calor específico	$C_p$	0	-1	0	-1	1
Coefficiente de dilatación térmica por aceleración de la gravedad	$\beta \cdot g$	1	0	-2	-1	0
Diferencia de temperatura	$\Delta T$	0	0	0	1	0
Velocidad	$w$	1	0	-1	0	0
Coefficiente convectivo	$h_c$	-2	0	-1	-1	1

Tabla 4.15. Dimensiones de las magnitudes que intervienen en la convección térmica

Los cuatro parámetros adimensionales utilizados normalmente son: el número de Nusselt, que representa al coeficiente convectivo adimensionalizado, el número de Reynolds que es la forma adimensional de la velocidad a partir del cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas; el número de Prandtl que es el cociente entre la difusividad de momentum y la difusividad térmica, y el número de Grashof que describe las fuerzas viscosas determinando la velocidad indirectamente en los casos de convección natural donde la velocidad es desconocida. Estos números se

pueden expresarse en función de los parámetros físicos del fluido y de una dimensión característica del sistema de la siguiente manera:

$Nu = h_c \cdot D / k$  es el número de Nusselt.  
 $Re = w D / \nu$  es el número de Reynolds  
 $Pr = Cp \mu / k = \nu / \alpha$  es el número de Prandtl.  
 $Gr = \beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot D^3 / \nu^2$  es el número de Grashof

Por lo tanto la expresión  $h_c = f(D, w, k, \mu, Cp, \rho, \beta, g, \Delta T)$ , se puede escribir considerando que la forma adimensional de  $h_c$  es el número de Nusselt :

$$Nu = f(Gr, Pr, Re)$$

En general se puede considerar que los grupos adimensionales característicos son:

- para convección natural:

$$Nu = f(Gr, Pr) \text{ ó } Nu = f(Ra, Pr)$$

$$Nu = A \cdot Gr^a \cdot Pr^b \text{ ó } Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^c$$

$$Nu = A' \cdot Ra^{a'}$$

donde  $A, a, b, C, c, A'$  y  $a'$  son constantes empíricas.

De esta forma se obtienen correlaciones que tienen en cuenta las propiedades físicas del fluido y las variaciones geométricas del sistema.

Los números adimensionales intervinientes se calculan considerando las propiedades de los fluidos para temperaturas promediadas en el espacio.

- para convección forzada:

$$Nu = f(Re, Pr)$$

$$Nu = M \cdot Re^m \cdot Pr^n$$

donde  $M, m, n$ , son constantes experimentales.

Por otro lado, la energía transportada por un fluido al moverse desde una región de temperatura  $T_1$  y densidad  $\rho_1$  hacia una región de temperatura  $T_2$  mayor que  $T_1$  y de densidad  $\rho_2$  siendo  $\Delta T = T_2 - T_1$  se puede calcular partiendo de una ecuación de la forma:

$$q_i = dm/dt \cdot Cp \cdot \Delta T \quad (1^\circ \text{ Ppio. de la Termodinámica})$$

donde:  $q_i$  es el flujo de calor,  $dm/dt$  es el caudal másico en kg/seg que se puede calcular como:

$$dm/dt = d(\rho \cdot V) / dt$$

Si el volumen de aire se mantiene constante, y las densidades  $\rho_1$  y  $\rho_2$  son distintas debido a las diferencias de temperaturas, la ecuación anterior se puede escribir como  $V \cdot d\rho/dt$ ; si en cambio las densidades se mantienen prácticamente constantes y el volumen cambia en el tiempo, se tiene  $\rho \cdot dV/dt$ .

El flujo másico, que se define como la masa de fluido que escurre por unidad de tiempo, se puede escribir como:

$$m/\Delta t = \rho \cdot V / \Delta t$$

pudiendo escribirse finalmente:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot w$$

donde:  $w$  es la velocidad del aire,  $\rho$  su densidad y  $A$  un área característica del sistema, generalmente el área transversal al flujo. Por lo tanto la energía arrastrada por el fluido es:

$$q_i = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

## Fluidodinámica

A continuación se hace un resumen de las leyes físicas fundamentales que rigen los procesos relacionados con el movimiento de fluidos y el formulismo matemático que las representa.

### ***Nociones de Fluidos. Propiedades.***

Un fluido es cualquier sustancia capaz de fluir, ya sea líquida o gaseosa. Se puede definir a un fluido como un cuerpo material que no puede soportar tensiones rasantes sin una deformación continua, esta es una característica mecánica distintiva de un fluido, mientras los sólidos sufren deformaciones bajo la acción de fuerzas rasantes que se mantienen independientes del tiempo, los fluidos continúan deformándose mientras siga aplicándosele la fuerza.

La velocidad de deformación de un fluido esta dada por la velocidad de cambio de la distancia entre dos puntos del fluido al moverse, dividido por la distancia entre los dos puntos si estuvieran fijos. El coeficiente de viscosidad cinemática  $\mu$  describe la velocidad de deformación debido a fuerzas rasantes.

Una propiedad importante del fluido es su densidad que se define como la cantidad de masa contenida en un volumen, y se expresa como  $\rho = M/V$ , donde  $M$  es la masa contenida en un volumen  $V$ . La densidad de un fluido es función de la presión y la temperatura. Para un material homogéneo, la densidad se define como su masa por unidad de volumen.

Si la densidad de un fluido sufre cambios despreciables frente a cambios de presión y temperatura, éste se define como incompresible. En cambio si se producen cambios de densidad que acompañan a la presión y a la temperatura, el fluido se llama compresible. Estas variaciones de densidad pueden producir flujos convectivos.

Aunque la densidad del fluido que produce el flujo no sea uniforme, tal flujo es llamado incompresible mientras la velocidad del fluido no exceda la velocidad del sonido. La mayoría de los flujos pueden ser tratados como incompresibles aunque el fluido sea compresible.

Dentro de una capa muy delgada contigua a las paredes en contacto con el fluido, denominada capa límite, el fluido es laminar. La velocidad en la capa límite es nula sobre las paredes y aumenta uniformemente a través de ella. Las propiedades de la capa límite son de mucha importancia para determinar la resistencia al fluir, y la transferencia de calor desde el fluido hacia las paredes en contacto con él.

Un fluido ideal es aquel incompresible y sin rozamiento interno o viscosidad, esta es una buena aproximación para líquidos. Un gas puede tratarse como incompresible siempre que el flujo sea tal que las diferencias de presiones no sean grandes.



La trayectoria seguida por un elemento de un fluido móvil se denomina Línea de flujo. En general la velocidad del volumen de fluido en movimiento varía tanto en magnitud como en dirección a lo largo de su línea de flujo, si todo elemento que pasa por un punto dado sigue la misma línea de flujo que los precedentes se dice que el flujo es estacionario, en este caso la velocidad en cada punto del espacio no varía con el tiempo si bien la velocidad de una partícula puede cambiar de punto a punto. Cabe destacar que la suma integral de las líneas de flujo forman los patrones de flujo que se verán en los próximos capítulos.

La curva tangente que coincide en cualquier punto con la dirección de la velocidad del fluido en dicho punto se denomina Línea de corriente. En estado estacionario, las líneas de flujo y las líneas de corriente coinciden.

### ***Tipos de Flujo***

Como ya se mencionó anteriormente, el cociente entre las fuerzas inerciales, proporcionales a la densidad y al cuadrado de la velocidad del fluido, y las fuerzas viscosas proporcionales a la viscosidad cinemática, es el número de Reynolds **Re**.

Este parámetro sirve para determinar el tipo de flujo bajo condiciones de temperaturas constante y velocidades del fluido conocidas que generalmente son impuestas por medios mecánicos, si el número de **Re** < 2100 el flujo se denomina laminar, un flujo laminar se caracteriza por un movimiento plano de una lamina de fluido tras otra y el fluido escurre paralelo a las paredes del sólido, generalmente esto ocurre para velocidades de fluido pequeñas, dependiendo además de las propiedades del fluido y de la geometría del sistema. Si el **Re** > 6000 se dice que el flujo es turbulento, éste tipo de flujo se caracteriza por un movimiento irregular y aleatorio, esto ocurre generalmente para velocidades altas de fluido. Cuando  $2100 < \text{Re} < 6000$  se dice que el flujo está en la zona de transición.

Si por el contrario se trata de temperaturas no uniformes y fuerzas de presión que puedan ser significativas, las características del flujo se determinan a partir del número de Rayleigh que es un parámetro adimensional definido como:

$$Ra = \frac{\beta \cdot G \cdot \rho^2 \cdot \Delta T \cdot D^3 \cdot Cp}{\mu k}$$

y es el producto entre un parámetro adimensional que representa el cociente entre la difusividad de momentum y la difusividad térmica, y el número que describe las fuerzas viscosas determinando la velocidad indirectamente en los casos de convección natural con velocidad desconocida, en este caso con una zona de transición hacia el estado turbulento de entre 10<sup>6</sup> y 10<sup>10</sup> para flujos sobre una capa límite.

Un flujo se denomina estable cuando las tres componentes de velocidad y presión son independientes del tiempo. Un flujo turbulento es esencialmente inestable, pero puede considerarse estable si las componentes de velocidad y presión promediadas en el tiempo son independientes de éste.

Aún en los casos de densidad no uniforme del fluido que produce el flujo, éste es llamado incompresible siempre que la velocidad del fluido no exceda la velocidad del sonido. La mayoría de los flujos pueden ser tratados como incompresibles aunque el fluido sea compresible.

## Fundamentos de Mecánica de Fluidos

Los principios necesarios para definir exactamente los fenómenos que rigen cualquier proceso termo-fluidodinámico son los siguientes:

1. Conservación de la Masa
2. Conservación de la Cantidad de Movimiento.
3. Conservación de la Energía.

Las ecuaciones de conservación se pueden sintetizar en una ecuación de la forma:

$$\frac{DB_V}{Dt} = \Phi_{B_V} + \Gamma_S$$

donde el operador  $\frac{D}{Dt} = \frac{\delta}{\delta t} + u\nabla$  es la derivada total,  $B_V$  es una magnitud física del sistema en consideración,  $\Gamma_S$  es el término de flujos no convectivos, que representa la difusión de la magnitud a través de una superficie y  $\Phi_B$  es el término de surgentes. Por lo tanto:

$$\frac{D_m}{Dt} = \frac{\delta_m}{\delta t} + u\nabla m = 0$$

es la ecuación que describe la conservación de la masa o ecuación de continuidad, donde  $m$  es la masa del fluido y  $u$  su velocidad. Esta ecuación en función de la densidad es:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

En esta ecuación se describe la conservación de la masa en el tiempo. Para un flujo incompresible donde la derivada total respecto del tiempo es nula, se tiene que:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

La segunda es la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento, en forma general se puede escribir:

$$\frac{Dm\vec{u}}{Dt} = -F_p + F_f + \rho Vf_m$$

en esta ecuación  $m\vec{u}$  es la cantidad de momento,  $F_p$  son fuerzas de presión,  $F_f$  es el término debido a las fuerzas de rozamiento y  $f_m$  representa las fuerzas de masa. Esta ecuación se puede escribir en función de la densidad, quedando:

$$\rho \left( \frac{\delta \vec{u}}{\delta t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -F_p + F_f + \rho Vf_m$$

En este caso, el término  $\frac{\delta \vec{u}}{\delta t}$  es la aceleración local, y el término  $\vec{u} \cdot \nabla \vec{u}$  es la aceleración convectiva. La conservación del momento comúnmente se expresa en función del tensor de tensiones  $\mathbf{T}$ :

$$\rho \frac{D\vec{u}}{dt} = \rho \mathbf{f}_m + \nabla \cdot \mathbf{T}$$

donde  $\mathbf{f}_m$  representa las fuerzas de masa. Generalmente  $\mathbf{T}$  se escribe en función del tensor de deformaciones, en base a funciones empíricas que describen la forma en que se relacionan el tensor de tensiones y el tensor de deformaciones, describiendo las variaciones de las tensiones en las caras al deformarse el material. Como en el caso de sólidos, se puede escribir la fuerza rasante como una función lineal de la deformación mediante la ley de Hooke. En el caso de los llamados fluidos Newtonianos se determina que las fuerzas rasantes son función de la velocidad de deformación en base a hechos experimentales, siendo esta su característica principal.

Se puede definir para un fluido viscoso, un tensor de tensiones de la forma:

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}$$

donde  $\mathbf{T}$  es simétrico e  $\mathbf{I}$  es simétrico y diagonal, por lo tanto los términos extradiagonales de  $\mathbf{T}$  son iguales a los del tensor  $\boldsymbol{\tau}$ , este es el tensor de tensiones viscoso y se encuentra experimentalmente que para un fluido newtoniano es:

$$\boldsymbol{\tau} = 2\lambda \mathbf{D} + \left[ \left( k - \frac{2}{3}\lambda \right) \nabla \cdot \vec{u} \right] \mathbf{I}$$

Con esto y considerando las fuerzas de masa dadas por  $g$ , la ecuación del movimiento queda:

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$$

O escrita de otra forma:

$$\rho \left( \frac{\delta \vec{u}}{\delta t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$$

Escribiendo esta ecuación para un fluido newtoniano, con un tensor de tensiones viscoso, considerando un flujo incompresible y de viscosidad constante, se tiene:

$$\rho \left( \frac{\delta \vec{u}}{\delta t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \lambda \nabla^2 \vec{u}$$

Esta última es la ecuación de Navier-Stokes. El primer término de esta ecuación es la aceleración local más el término convectivo, igual a la suma de las fuerzas de presión por unidad de volumen, la fuerza de masa por unidad de volumen y la fuerza viscosa por unidad de volumen.

La conservación de la energía está descrita por la siguiente ecuación general:

$$\frac{DmE}{Dt} = \dot{Q} - (\dot{W}_p - \dot{W}_f) + \rho u (u \cdot \mathbf{f}_m + q_e)$$

siendo  $mE$  la energía total; los términos siguientes representan el flujo de calor por unidad de tiempo, las potencias relativas a las fuerzas de presión, la potencia disipada por rozamiento, y el último término es el trabajo producido por las fuerzas de masa y el calor producido.

Suponiendo un flujo incompresible, escurrimiento isocórico y un tensor de tensiones para un fluido newtoniano, despreciando efectos viscosos y considerando que los procesos de transmisión de calor son superficiales descritos por la ley de Fourier, y desechando el término de generación interna de calor, la ecuación que describe la conservación de la energía es:

$$\frac{\delta T}{\delta t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \alpha \nabla^2 T$$

En el caso del movimiento convectivo de aire en locales, el fenómeno se describe conociendo la distribución de *temperatura, velocidad y humedad*, utilizando las ecuaciones fundamentales de la fluidoestática y la fluidodinámica, estas son las ecuaciones de *Conservación de la masa, Conservación de la cantidad de movimiento y Conservación de la energía*.

Generalmente este tipo de ecuaciones son de muy difícil solución por vía analítica, en la actualidad, se diseñan programas computacionales que obtienen estas soluciones a través de métodos numéricos en forma precisa y relativamente veloz. Estas simulaciones a través de computadoras arrojan, en algunos casos, resultados muy cercanos a la realidad.

El tratamiento de este tipo de problemas, mediante modelos diferenciales, se hace resolviendo en forma numérica las ecuaciones de continuidad para flujo incompresible, la ecuación de Navier-Stokes, utilizando la aproximación de Boussinesq, y la conservación de la energía, estas ecuaciones se escriben en su forma adimensional y se resuelven numéricamente sobre un dado dominio geométrico, dando condiciones de borde e iniciales.

Por otro lado con el advenimiento de nuevas tecnologías y grandes avances en el campo tanto del hardware como de herramientas para el diseño de software, permitiendo una cada vez más rápida evolución dando lugar al surgimiento de nuevas teorías y técnicas de simulación.

En este punto, la Fluidodinámica Computacional (CFD: Computational Fluid Dynamics), es una ciencia en rápido desarrollo que permite generar soluciones aproximadas en forma relativamente rápida con un error aceptable.

Esta teoría se basa en el desarrollo de modelos físico-matemáticos para predecir el movimiento de los fluidos en forma computacional y está siendo empleada en la simulación del movimiento de aire en locales y sistemas de ventilación con gran éxito.

Por supuesto que no todas son rosas, ya que estos modelos de CFD como se verá más adelante cuentan con una serie de desventajas que hacen que su uso esté fuera del alcance de un Ingeniero medio.

## Bibliografía

1. Lic. Alejandro Mermet; *"Estudios preparatorios para Tesis de doctorado sobre CFD"*
2. Duffie, J. A.; Beckman, W. A.; *"Solar Engineering of Thermal Processes"*; Wiley-Interscience Publications, USA, 1991.
3. Kreith, F.; Kreider, J.; *"Principles of Solar Engineering"*; Mc Graw - Hill, New York, USA, 1981.
4. Kreith, F.; Kreider, J.; *"Solar Energy Handbook"*; Mc Graw - Hill, New York, USA, 1986.
5. Lippa, P.; Rispoli, F.; *"Richiami di Fluidodinamica"*; Corso Superiore sulle fonti Energetiche Alternative. ENEA - Sogesta SpA, Urbino, Italia 1990-1991.



## 5 – LAS FUERZAS QUE ORIGINAN LA VENTILACIÓN NATURAL

En todos los casos de ventilación natural, las fuerzas impulsoras del aire en movimiento son atribuidas a las diferencias de presión creadas a través de las distintas aberturas de la estructura del edificio. Estas diferencias de presión son causadas por el efecto combinado de dos mecanismos: el viento y la diferencia de temperatura.

### Efecto debido al viento

#### *Origen del viento*

El viento es simplemente aire en movimiento con respecto a un punto fijo de la tierra, y así es como se lo mide habitualmente en todas las estaciones meteorológicas del mundo.

En principio se puede decir que las diferencias térmicas generadas por calentamientos no uniformes en el suelo, originan diferencias de presión entre puntos que se encuentran sobre la superficie terrestre. La compensación de estas diferencias de presión causan el flujo de enormes cantidades de aire desde las regiones de alta presión hacia las de baja presión.

La dirección del flujo de aire, es decir el viento depende de:

- **Gradiente de presión**

Como se dijo anteriormente las diferencias de calentamiento originan diferencias de presión. Estos valores de presión se suelen identificar en los mapas por medio de isobaras, las que de una manera sinóptica señalan la existencia de zonas de alta presión (anticiclones) y de baja presión (ciclones). Por convención, el viento soplará en dirección perpendicular a las isobaras desde la alta hacia la baja presión y lo hará con mayor intensidad cuando mayor sean las diferencias de presión en una dirección determinada. Es decir que el viento será tanto más fuerte cuanto menor sea la separación entre las isobaras marcadas en la carta.

- **Fuerza de Coriolis**

Una vez puesto en movimiento el aire, a causa de la rotación terrestre, se produce una desviación inercial del viento hacia la izquierda en el Hemisferio Sur y hacia la derecha en el Hemisferio Norte. La acción de dicha fuerza tiende a crear una concentración de aire hacia la izquierda del movimiento (Hemisferio Sur) y una depresión hacia la derecha. De esta forma el viento tiende a ser paralelo a las isobaras. En este caso teórico el viento es denominado geostrófico y su intensidad es inversamente proporcional a la distancia entre isobaras. Esta condición no se cumple en los niveles superficiales de la atmósfera donde por efecto de la fricción se produce a su vez una atenuación del viento hacia bajas presiones, tanto mayor cuanto mayor sea la rugosidad del terreno y cuanto menor sea la latitud ya que en regiones tropicales hay un debilitamiento de la fuerza de Coriolis.

- **Fricción superficial**

El viento por encima de los 1000 metros puede considerarse perpendicular a las isobaras, pero en los niveles más bajos actúa la fricción superficial debida a la rugosidad del suelo. Dicha fricción causa dos efectos en el viento; en primer lugar una reducción en su magnitud y en segundo lugar una desviación del mismo hacia las bajas presiones. De tal forma aparece una divergencia del viento de los anticiclones y una convergencia hacia las bajas presiones. El grado de desviación va variando con la altura estableciéndose un perfil vertical del viento en las capas bajas de la atmósfera. Generalmente la intensidad del viento aumenta con la altura. De tal forma cuando hay un calentamiento superficial ello determina turbulencia y las porciones de aire descendente provocan un aumento superficial del viento, claramente visible en los mediodías soleados. Durante la noche el enfriamiento superficial produce la acumulación de aire frío cerca del suelo y si el mismo es muy plano la fricción tiende a frenar todo movimiento.

## Presión del viento sobre edificios

Cuando el viento sopla contra un edificio, el movimiento del aire es perturbado y desviado por encima y alrededor del edificio. La presión del aire, en la fachada que da el viento, es mayor que la presión atmosférica (zona de presión positiva) y en la fachada opuesta la presión es negativa (zona de succión), ver Figura 5.1.

De este modo se crean diferencias de presión sobre el edificio. Estas diferencias provocan que haya una circulación de aire a través de las aberturas del edificio. Generalmente hay un flujo entrante en la fachada que está a favor del viento y un flujo saliente en la fachada opuesta.

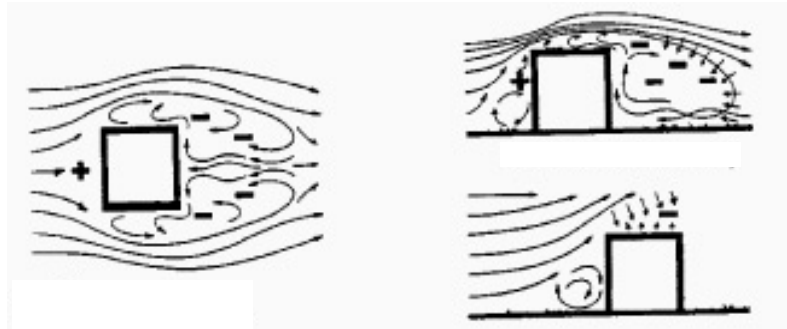


Figura 5.1. Presión del viento sobre las fachadas del edificio

Cuando el viento sopla perpendicularmente sobre un edificio rectangular, la fachada estará sujeta a presión mientras que los laterales y la cara posterior estarán bajo succión.

Si la dirección del viento es oblicua, las dos caras donde actúe el viento estarán bajo presión y las otras dos bajo succión. El techo estará bajo succión en todos los casos.

La presión no es uniformemente distribuida sobre la cara donde actúa el viento, va disminuyendo desde el centro de la zona de presión hacia fuera. Las variaciones de presión sobre la pared sujeta a un viento perpendicular son pequeñas, pero cuando el viento es oblicuo hay una caída de presión desde el rincón donde actúa el viento hasta el rincón opuesto. Cuando el ángulo de incidencia es de 45°, la presión en el rincón opuesto es casi nula.

La diferencia de presión entre dos puntos de la envoltura de un edificio determina las potenciales fuerzas impulsoras para la ventilación cuando las aberturas están ubicadas en esos puntos. La contribución del viento sobre la diferencia de presión a través de una abertura exterior es calculado por la siguiente expresión general:

$$\Delta P_w = 0.5 C_p \rho U^2$$

Donde:

$\Delta P_w$  es la presión inducida por el viento [Pa]

$C_p$  es el coeficiente de presión [adimensional]

$\rho$  densidad del aire [Kg./m<sup>3</sup>]

$U$  velocidad del viento a la altura de referencia, usualmente tomada como la altura del edificio [m/s]

Es interesante remarcar que las variaciones de la presión del aire en la zona de succión son menores que en la zona bajo presión. Estos efectos pueden apreciarse en la Figura 5.2.

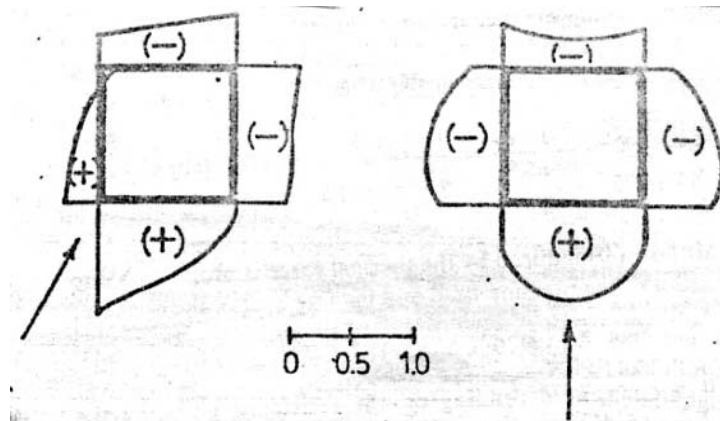


Figura 5.2. Distribución esquemática de la presión alrededor de un edificio

Tanto la determinación de la velocidad del viento en el entorno local del edificio como el coeficiente de presión en las distintas fachadas del edificio son de especial importancia para los modelos empíricos que se describirán más adelante.

En situaciones reales, ambas variables son difíciles de evaluar y provocan un gran impacto en los resultados de los distintos modelos, pero afortunadamente distintas investigaciones fueron aproximando los resultados empíricos que se recomiendan aplicar a las mediciones de casos reales, de manera que el grado de incertidumbre queda reducido a un valor entre el 10% y el 15%.

Es importante destacar que es inútil esforzarse en la obtención de un  $C_p$  preciso sino se hizo un esfuerzo suficiente para predecir las velocidades locales del viento.

### Velocidad local del viento

Las velocidades del viento generalmente son medidas en aeropuertos a una altura de 10m por sobre el suelo.

Como se mencionó anteriormente, el perfil de velocidades del viento depende principalmente de la fricción de la superficie que rodea al edificio y la velocidad del viento se incrementa con la altura, por lo que para utilizar las velocidades de viento medidas en los aeropuertos para el diseño de edificios ventilados naturalmente se deberá realizar una corrección.

El perfil de velocidades puede ser calculado según la siguiente ecuación:

$$v(z) = v(z_0) \left[ \frac{z}{z_0} \right]^\alpha$$

Donde:

$v(z)$  = velocidad del viento a una altura  $Z$  [m/s],

$v(z_0)$  = velocidad del viento a una altura de referencia  $Z_0$  [m/s]

$\alpha$  = exponente que depende del terreno.

Esta ecuación asume que el flujo de viento es isotérmico y horizontal y que no cambiará de dirección por resultado de las irregularidades del terreno.

El valor del exponente  $\alpha$  incrementa con el aumento de la rugosidad del terreno, en la tabla 5.1 se pueden ver valores para distintos tipos de terrenos y en la Figura 5.3 el perfil de velocidades para tres tipos de rugosidades del terreno.



Clase	Entorno	Exponente de perfil de velocidades $\alpha$
I	Edificio expuesto	0.17
II	Campo con algunos obstáculos	0.20
III	Urbanizado	0.25
IV	Centro de la ciudad	0.33
V	Area urbana de muy alta densidad	0.45

Tabla 5.1. Valores del exponente  $\alpha$  extraídos del British Standard BS 5925:1991

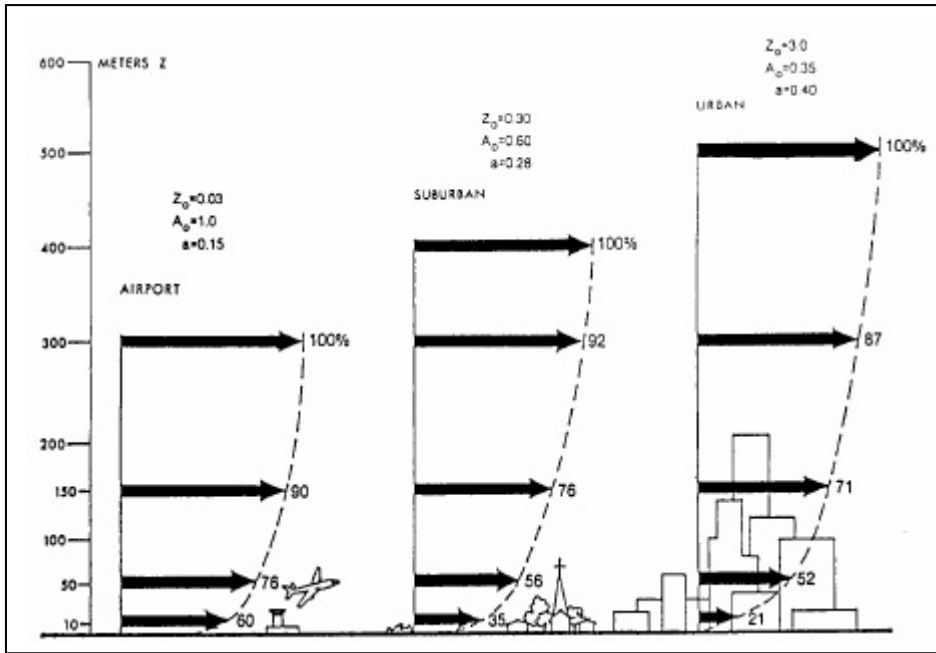
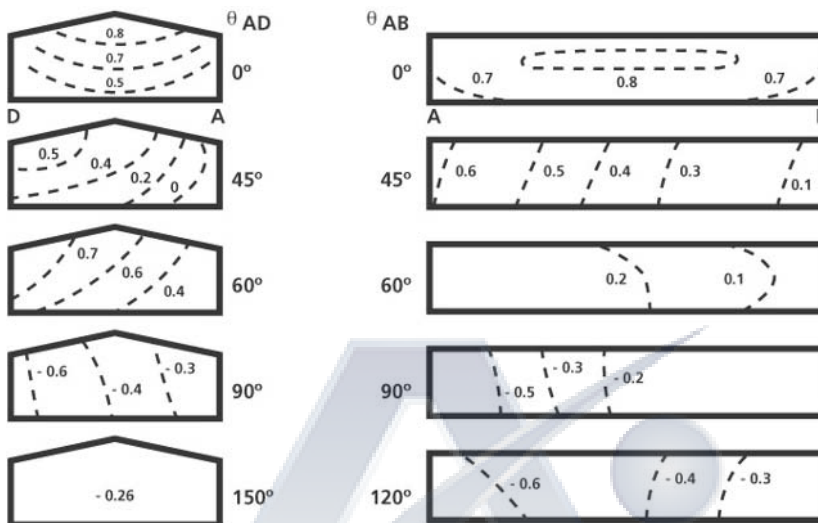


Figura 5.3. Perfiles de velocidades para distintos tipos de terrenos

## Coeficiente de presión $C_p$

El coeficiente de presión adimensional es un parámetro empírico que toma en cuenta los cambios en la presión inducida por el viento causada por la influencia de las obstrucciones del entorno sobre las características del viento local prevaeciente. Su valor cambia acorde a la dirección del viento, orientación del edificio y topografía y rugosidad del terreno en la dirección del viento. La figura 5.4 muestra la distribución del  $C_p$  en un edificio obtenido experimentalmente.



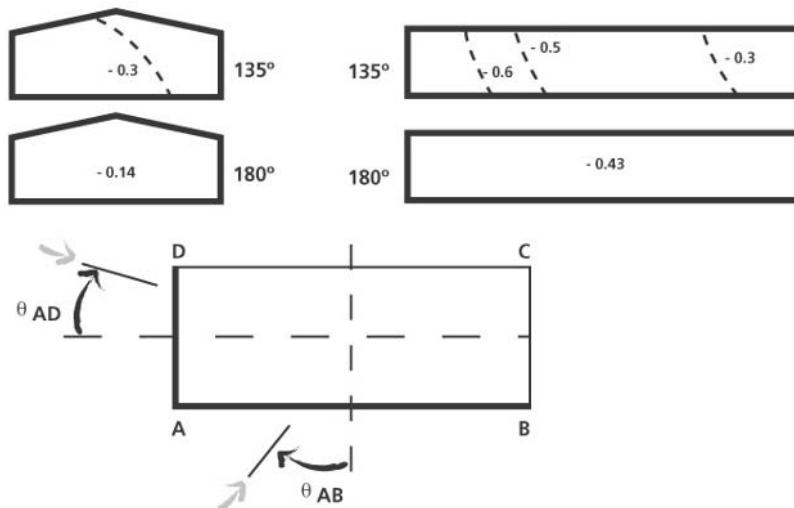


Figura 5.4. Distribución de la presión del viento sobre las fachadas de un edificio para distintos ángulos de incidencia del viento

Numerosos artículos sobre el coeficiente de presión han sido publicados en los últimos años, pero muy pocos presentan un método preciso para calcular el  $C_p$ , ya que la mayoría son resultados experimentales que determinan  $C_p$  bajo circunstancias puntuales.

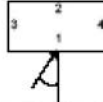
1 - El AIVC (Air Infiltration & Ventilation Center) desarrolló una serie de tablas, basadas en pruebas con túneles de viento, para ayudar a los diseñadores en la elección del  $C_p$ . Estas tablas fueron desarrolladas para edificios de baja altura, hasta 3 pisos y para los siguientes casos:

- Relación entre largo y ancho: 1:1 y 2:1
- Condición del entorno local del edificio: Al edificio se lo considera expuesto, rodeado de obstrucciones equivalentes a la mitad de la altura del edificio o rodeado de obstrucciones equivalentes a la altura del edificio.

Los valores de  $C_p$  están correlacionados con la velocidad local del viento que fuera medida a la altura del edificio. Están dados para las cuatro fachadas del edificio, tres tipos de inclinación de techos ( $<10^\circ$ ,  $11-30^\circ$ ,  $>30^\circ$ ) y ocho direcciones del viento.

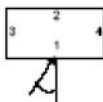
	Relación entre largo y ancho: 1:1								Relación entre largo y ancho: 2:1							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1	0.7	0.36	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	0.36	0.5	0.25	-0.5	-0.8	-0.7	-0.8	-0.5	0.25
Face 2	-0.2	-0.4	-0.5	0.35	0.7	0.35	-0.5	-0.4	-0.7	-0.8	-0.5	0.25	0.5	0.25	-0.5	-0.8
Face 3	-0.5	0.36	0.7	0.35	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.8	0.2	0.6	0.2	-0.9	-0.6	-0.35	-0.6
Face 4	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	0.35	0.7	0.35	-0.9	-0.6	-0.35	-0.6	-0.9	0.2	0.6	0.2
<10° Front	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
<10° Rear	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
<10° Avg.	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.8	-0.7
<30° Front	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7
<30° Rear	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6
<30° Avg.	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.65	-0.7	-0.65	-0.6	-0.65	-0.7	-0.65
>30° Front	0.3	-0.4	-0.6	-0.4	-0.5	-0.4	-0.6	-0.4	0.25	0	-0.6	-0.9	-0.8	-0.9	-0.6	0
>30° Rear	-0.5	-0.4	-0.6	-0.4	0.3	-0.4	-0.6	-0.4	-0.8	-0.9	-0.6	0	0.25	0	-0.6	-0.9
>30° Avg.	-0.1	-0.4	-0.6	-0.4	-0.1	-0.4	-0.6	-0.4	-0.18	-0.45	-0.6	-0.45	-0.18	-0.45	-0.6	-0.45

Tabla 5.2. Valores de  $C_p$  para un edificio expuesto



	Relación entre largo y ancho: 1:1								Relación entre largo y ancho: 2:1							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	0.25	0.08	-0.35	-0.8	-0.5	-0.6	-0.35	0.08
Face 2	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.5	-0.8	-0.35	0.08	0.25	0.08	-0.35	-0.8
Face 3	-0.3	0.1	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.8	0.2	0.4	0.2	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5
Face 4	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	0.4	0.1	-0.8	-0.5	-0.3	-0.5	-0.6	0.2	0.4	0.2
<10° Front	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
<10° Rear	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
<10° Avg.	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6	-0.6
<30° Front	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.8	-0.6	-0.55	-0.55	-0.45	-0.55	-0.55	-0.6
<30° Rear	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.45	-0.55	-0.55	-0.6	-0.6	-0.6	-0.55	-0.55
<30° Avg.	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.5	-0.6	-0.55	-0.6	-0.5	-0.6	-0.55	-0.6
>30° Front	0.3	-0.5	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	0.15	-0.08	-0.4	-0.75	-0.6	-0.75	-0.4	-0.08
>30° Rear	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	0.3	-0.5	-0.6	-0.5	-0.6	-0.75	-0.4	-0.08	0.15	-0.08	-0.4	-0.75
>30° Avg.	-0.1	-0.5	-0.6	-0.5	-0.1	-0.5	-0.6	-0.5	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-0.4	-0.4	-0.4

Tabla 5.3. Valores de Cp para un edificio rodeado por obstrucciones equivalentes a la mitad de la altura del edificio

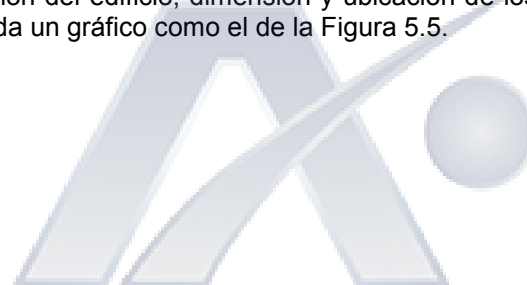


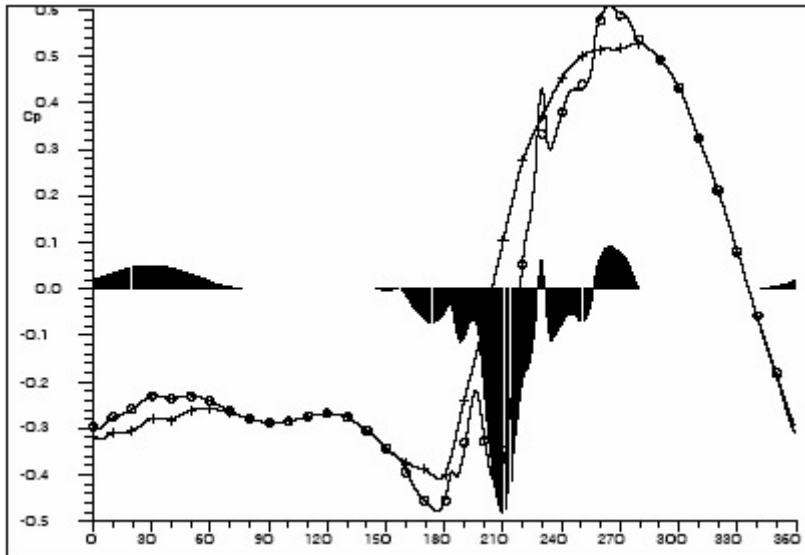
	Relación entre largo y ancho: 1:1								Relación entre largo y ancho: 2:1							
	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
Face 1	0.2	0.05	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3	-0.25	0.05	0.08	-0.12	-0.2	-0.38	-0.3	-0.38	-0.2	-0.12
Face 2	-0.25	-0.3	-0.25	0.05	0.2	0.05	-0.25	-0.3	-0.3	-0.38	-0.2	-0.12	0.08	-0.12	-0.2	-0.38
Face 3	-0.25	0.05	0.2	0.05	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3	-0.3	0.15	0.18	0.15	-0.3	-0.32	-0.2	-0.32
Face 4	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3	-0.25	0.05	0.2	0.05	-0.3	-0.32	-0.2	-0.32	-0.3	0.15	0.18	0.15
<10° Front	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46
<10° Rear	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46
<10° Avg.	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46
<30° Front	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46	-0.4	-0.46	-0.41	-0.46
<30° Rear	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.4	-0.46	-0.41	-0.46	-0.49	-0.46	-0.41	-0.46
<30° Avg.	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.45	-0.46	-0.41	-0.46	-0.45	-0.46	-0.41	-0.46
>30° Front	0.25	-0.3	-0.5	-0.3	-0.4	-0.3	-0.5	-0.3	0.06	-0.15	-0.23	-0.6	-0.42	-0.6	-0.23	-0.15
>30° Rear	-0.4	-0.3	-0.5	-0.3	0.25	-0.3	-0.5	-0.3	-0.42	-0.6	-0.23	-0.15	0.06	-0.15	-0.23	-0.6
>30° Avg.	-0.08	-0.3	-0.5	-0.3	-0.08	-0.3	-0.5	-0.3	-0.18	-0.4	-0.23	-0.4	-0.18	-0.4	-0.23	-0.4

Tabla 5.4. Valores de Cp para un edificio rodeado por obstrucciones equivalentes a la altura del edificio

**Nota para el techo:** "<10°" es aplicable para techos con una inclinación de menos de 10°, "<30°" es aplicable para techos con una inclinación de entre 11° y 30° y ">30°" es aplicable a techos con una inclinación de más de 30°. "Front" significa frente, "Rear" hace referencia a la parte trasera y "Avg." Significa promedio.

2 - Un programa de computación, llamado TNO Cp-Generator, fue desarrollado en Holanda para predecir los valores de Cp en fachadas y techos de distintos edificios. Este programa se basa en datos extraídos de experiencias en túneles de viento, y su mayor virtud es la de requerir pocos datos de ingreso: dimensión del edificio, dimensión y ubicación de los obstáculos y rugosidad del terreno. El programa brinda un gráfico como el de la Figura 5.5.



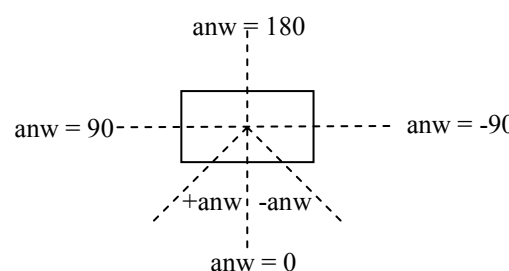


- La línea --+-- da valores de  $C_p$  para una situación imaginaria en la cual el edificio estaría totalmente expuesto.
- Las líneas verticales representan la influencia de los obstáculos.
- El resultado final es el expresado por la línea --○--

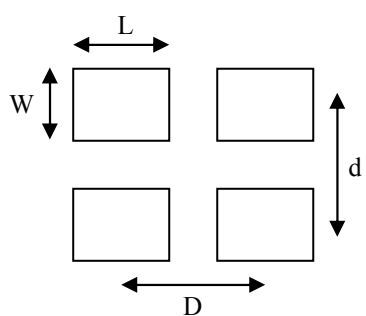
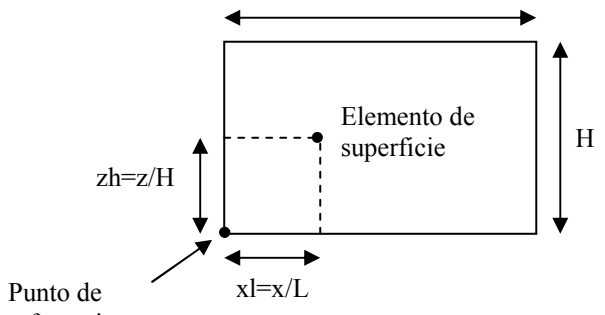
Figura 5.5. Resultado típico del TNO Cp-Generator:  $C_p$  versus dirección del viento

3 - Si se requiere contar con una herramienta, sin necesidad de adquirir un software específico que permita calcular el valor del  $C_p$  en cualquier posición de la fachada del edificio, la herramienta indicada es el modelo paramétrico de Mario Grosso. Este modelo fue desarrollado en el marco del PASCOOL/Joule Project realizado en Europa. Está basado en un análisis paramétrico de distintas pruebas en túneles de viento y en recientes investigaciones se contrastó sus resultados con mediciones en edificios reales, obteniéndose una gran concordancia de los mismos. El modelo consiste en un número de relaciones entre el coeficiente de presión en edificios de forma rectangular y varios parámetros influyentes agrupados en tres categorías:

Tabla 5.5. Parámetros considerados en el modelo paramétrico de Mario Grosso

Parámetros climáticos	Exponente de perfil de velocidades ( $\alpha$ )	En la tabla 5.6 se pueden encontrar valores para distintas características del entorno
	Angulo de incidencia del viento ( $\alpha_{nw}$ )	<p>Fachada donde actúa el viento: <math>0 &lt; \alpha_{nw} &lt; 90</math></p> <p>Fachada opuesta a la acción del viento: <math>90 &lt; \alpha_{nw} &lt; 180</math></p> 



Parámetros del entorno del edificio	Densidad de área de planta ( $pad$ )	<p>Debe ser calculado para un radio de entre 10 y 25 veces la altura del edificio</p>  $Pad = \frac{L \cdot W}{D \cdot d} \cdot 100\%$
	Altura relativa del edificio ( $rbh$ )	$Rbh = \frac{\text{Altura del edificio}}{\text{Altura de los edificios aledaños}}$ <p>Nota: Se asume que los edificios aledaños son rectangulares y de la misma altura</p>
Parámetros del edificio	Proporción de la fachada frontal ( $far$ )	$Far = \frac{\text{Largo de la fachada bajo consideración}}{\text{Altura del edificio}}$
	Proporción de la fachada lateral ( $sar$ )	$Sar = \frac{\text{Largo de la fachada adyacente}}{\text{Altura del edificio}}$
	Posición vertical relativa ( $zh$ )	
	Posición horizontal relativa ( $xl$ )	

El rango de parámetros mencionados anteriormente son usados como referencia y se corresponden con el perfil del  $C_p$  en la línea vertical del centro de la fachada donde actúa el viento y con el  $C_p$  en el centro de la opuesta suponiendo que el viento actúa en forma normal a las fachadas y el edificio se localiza en un área suburbana.

El modelo asume que la distribución horizontal del  $C_p$  no cambia con la densidad del área suburbana, ni con la altura relativa de edificio.

Los perfiles de referencia, como función de la posición vertical relativa  $zh$ , son polinomios de tercer o quinto grado:

$$C_{p,ref}(zh) = a_0 + a_1(zh) + a_2(zh)^2 + \dots + a_n(zh)^n$$

Donde  $n=3$  para las fachada donde actúa el viento y  $n=5$  para las fachadas opuestas.

Los perfiles de referencia están definidos por los siguientes parámetros:  
 $\alpha=0,22$ ;  $pad=0,0$ ;  $rbh=1,0$ ;  $far=1,0$ ;  $anw=0^\circ$  (fachada donde actúa el viento);  
 $anw=180^\circ$  (fachada opuesta).

El resto de los datos del Cp están normalizados para cada parámetro, con respecto al Cp correspondiente al valor de referencia. El valor normalizado de Cp para n, m y t valores de los parámetros i, j y d respectivamente, es:

$$Cp_{norm\ i_n, j_m, d_t} = \frac{Cp_{i_n, j_m}(d_t)}{Cp_{i_n, j_m}(d_{ref})}$$

Los valores de Cp normalizados están dados como funciones de los distintos parámetros en polinomios de distinto grado. Los coeficientes de los polinomios están dados en las tablas X para las fachadas donde actúa el viento y Tablas X2 para las fachadas opuestas.

El coeficiente de presión para un elemento k con coordenadas xl y zh sobre la fachada de un edificio con su forma definida por los valores de far y sar y condiciones ambientales definidas por valores específicos de  $\alpha$ , pad, rbh, y anw se calcula por:

$$Cp_k = Cp_{ref}(zh) \cdot CF$$

Donde CF es el factor de corrección global definido como:

$$CF = Cf_{zh}(\alpha) \cdot Cf_{zh}(pad) \cdot Cf_{zh,pad}(rbh) \cdot Cf_{zh,pad}(far) \cdot Cf_{zh,pad}(sar) \cdot Cf_{zh,pad}(xl)$$

Donde

$$Cf_{in,jm(dt)} = Cp_{norm\ in,jm,dt}$$

Si los valores n y m de los parámetros i y j no se encuentran en las tablas, entonces el factor de corrección se calcula por interpolación lineal.

La aplicación de este método está restringido a causa de la variación del rango definido para cada parámetro. En particular el modelo no puede ser aplicado a:

- altas rugosidades del terreno ( $\alpha < 0,33$ ) y/o alta densidad de edificios aledaños ( $pad > 50$ );
- edificios aledaños distribuidos de una manera alternada o irregular;
- edificios aledaños con  $pad > 12,5$ , cuando el edificio considerado tiene una altura diferente a los de su entorno o su forma es distinta a la de un cubo;
- edificios cuatro veces más altos que los de su entorno, más bajos que la mitad de la altura de los edificios aledaños;
- edificios con forma irregular o con aleros;
- edificios regulares con relaciones de aspecto menores a 0,5 o mayores a 4.

Los resultados del modelo son simples valores de Cp, para una posición bidimensional específica de un elemento superficial sobre la pared de un edificio para una cierta dirección del viento.

A continuación se presentan las tablas necesarias para el uso del modelo de Mario Grosso:

**Fachada donde actúa el viento**

Función polinómica para el Cp de referencia.

$$Cp_{ref}(zh) = -2,381082(zh)^3 + 2,89756(zh)^2 - 0,774649(zh) + 0,745543$$

Los coeficientes para la ecuaciones del Cp normalizado como función de parámetros ambientales y geométricos, están dados en las Tablas 5.6 a 5.13.



zh	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0,1	-10,820106	2,312434	1,014958
0,3	-10,42328	1,268783	1,225354
0,5	-8,531746	0,688492	1,261468
0,7	-0,939153	-1,691138	1,417505
0,9	5,10582	-3,350529	1,489995

Tabla 5.6. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la rugosidad del terreno:  
 $Cp_{normzh}(\alpha)=a_0+a_1(\alpha)+a_2(\alpha)^2$

zh	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0,0-0,65	-2,14966E-05	2,37444E-03	-0,089797	0,979603
0,66-0,75	-1,775637E-05	2,034996E-03	-0,081741	0,995399
0,76-0,85	-1,523628E-05	1,788998E-03	-0,074881	1,00378
0,86-0,95	-1,571837E-05	1,693211E-03	-0,06647	0,994355
0,96-1,0	-1,987115E-05	1,968606E-03	-0,067063	0,966038

Tabla 5.7. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la densidad de los edificios aledaños:  $Cp_{normzh}(pad)=a_0+a_1(pad)+a_2(pad)^2+a_3(pad)^3$

zh	pad	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0,07	0	0	0	0,111687	0,848151
	5,5	0	0	0,303608	0,693641
	12,5	0	0	0,665827	0,450229
	25	-0,354662	1,416299	3,925792	-3,814382
0,2	0	0	0	0,152862	0,78183
	5,5	0	0	0,35057	0,60962
	12,5	0	0	0,691757	0,407027
	25	0	1,534332	-17,32797	14,40045
0,5	0	0	0	0,251497	0,705467
	5,5	0	0	0,661656	0,348851
	12,5	0	0	1,601127	-0,4244487
	25	2,743878	-18,09787	13,731616	2,08857
0,7	0	0	0	0,280233	0,697339
	5,5	0	0	0,693236	0,3469922
	12,5	0	0	1,566717	-0,325088
	25	-1,2113787	6,301881	4,370901	-6,988637
0,8	0	0	0	0,338131	0,637794
	5,5	0	0	0,719554	0,349286
	12,5	0	0	1,373569	-0,175915
	25	-0,403791	1,579764	5,205654	-4,533334
0,9	0	0	0	0,436478	0,555708
	5,5	0	-0,155809	1,5233391	-0,266623
	12,5	0	-0,217166	2,2467	-0,855572
	25	0	-0,733177	6,203364	-3,94136
0,93	0	0	0	0,464299	0,535423
	5,5	0	-0,17031	1,579231	-0,294406
	12,5	0	-0,235091	2,28368	-0,853961
	25	0	-0,62338	5,154261	-3,165345

Tabla 5.8. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la altura de los edificios aledaños:  $Cp_{normzh,pad}(rbh)=a_0+a_1(rbh)+a_2(rbh)^2+a_3(rbh)^3$



pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0	0,07	0,21	0,79
	0,2	0,166	0,834
	0,4	0,102	0,898
	0,6	0,066	0,934
	0,8	-0,04	1,04
	0,93	-0,292	1,292
5	0,07	0,286	0,714
	0,2	0,21	0,79
	0,4	0,148	0,852
	0,6	0,156	0,844
	0,8	0,028	0,972
	0,93	-0,364	1,364
7,5	0,07	0,134	0,866
	0,2	0,12	0,88
	0,4	0,054	0,946
	0,6	6,245004E-16	1
	0,8	0,038	0,962
	0,93	-0,352	1,352
10	0,07	0,182	0,818
	0,2	0,046	0,954
	0,4	-0,12	1,12
	0,6	-0,166	1,166
	0,8	-0,052	1,052
	0,93	-0,428	1,428
12,5	0,07	0,1	0,9
	0,2	-0,068	1,068
	0,4	-0,058	1,058
	0,6	-0,044	1,044
	0,8	0,032	0,968
	0,93	-0,334	1,334

Tabla 5.9. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la proporción de la fachada frontal  $far < 1.0$ :  $C_{p_{normpad,zh}}(far) = a_0 + a_1(far)$



pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0	0,07	-0,022	1,022
	0,2	0,056	0,944
	0,4	-0,03	1,03
	0,6	6,245004E-16	0,1
	0,8	-0,02	1,02
	0,93	-0,166	1,166
5	0,07	0,172	0,828
	0,2	0,19	0,81
	0,4	0,334	0,666
	0,6	0,438	0,562
	0,8	0,31	0,69
	0,93	-0,09	1,09
7,5	0,07	0,266	0,734
	0,2	0,298	0,702
	0,4	0,46	0,54
	0,6	0,436	0,564
	0,8	0,324	0,676
	0,93	-0,118	1,118
10	0,07	0,328	0,672
	0,2	0,318	0,682
	0,4	0,8	0,2
	0,6	0,66	0,334
	0,8	0,206	0,794
	0,93	-0,286	1,286
12,5	0,07	0,75	0,25
	0,2	1,104	-0,104
	0,4	1,428	-0,428
	0,6	1,2	-0,2
	0,8	0,634	0,366
	0,93	6,245004E-16	1

Tabla 5.10. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la proporción de la fachada lateral sar<1.0:  $C_{p_{normpad,zh}}(sar)=a_0+a_1(sar)$

Tabla 5.11. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado: distribución horizontal vs. Dirección del viento:  $C_{p_{normzh,anw}}(xl)=a_0+a_1(xl)+a_2(xl)^2+a_3(xl)^3$

zh	anw (°)	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0,5	0	0	-3,04662	3,04662	0,268462
	10	0	-3,142447	2,873329	0,38632
	20	0	-2,001162	1,398438	0,693916
	30	0	-1,275862	0,278803	0,935081
	40	0	-1,058275	-0,01627	0,871259
	50	0	-0,891626	0,247508	0,428414
	60	0	-1,560755	1,496049	-0,257573
	70	0	-1,990676	2,614312	-0,994965
	80	0	-1,651067	2,530479	-1,359928
	90	-5,984848	10,036713	-3,883683	-0,778811
	0	0	-2,501166	2,501166	0,401189
10	0	-2,665435	2,355141	0,523287	
20	0	-1,674825	1,008462	0,802867	
30	0	-0,869048	-0,176541	1,051723	

	anw (°)	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
	40	0	-0,635198	-0,46752	0,973357
	50	0	-0,667077	3,841881E-03	0,485571
	60	0	-1,415846	1,367316	-0,231142
	70	0	-2,064103	2,719557	-1,005524
	80	0	-1,842775	2,788363	-1,37687
	90	-4,015152	6,670746	-2,319231	-0,836434
0,9	0	0	-2,456876	2,456876	0,451469
	10	0	-2,681034	2,335446	0,581156
	20	0	-1,724942	0,981305	0,888531
	30	0	-0,832512	-0,270429	1,118564
	40	0	-0,547786	-0,547786	0,992378
	50	0	-0,88711	0,279757	0,426546
	60	0	-1,85509	1,935973	-0,375921
	70	0	-2,815851	3,659487	-1,236923
	80	0	-2,449507	3,577449	-1,585214
	90	-6,959984	10,745338	-3,502826	-0,877273

pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>
0	0,07	-0,070887	0,335565	0,741492
	0,2	-0,061746	0,39232	0,670057
	0,4	-0,071734	0,370249	0,700161
	0,6	-0,075213	0,280472	0,799646
	0,8	-0,081452	0,261036	0,821341
	0,93	-0,05991	0,441293	0,620374
5	0,07	-0,625867	-3,31499	4,938818
	0,2	-0,700802	-3,691923	5,39902
	0,4	-0,551417	-2,657088	4,2088561
	0,6	-0,394759	-1,857109	3,243966
	0,8	-0,384892	-1,582766	2,964682
	0,93	-0,471534	-1,938719	3,408053
7,5	0,07	-0,464735	-4,370468	5,827134
	0,2	-0,484764	-4,700937	6,175447
	0,4	-0,357666	-3,421083	4,761667
	0,6	-0,430568	-3,272576	4,686477
	0,8	-0,538978	-3,080677	4,608249
	0,93	-0,295157	-2,106807	3,39147
10	0,07	-0,445623	-5,965503	7,414155
	0,2	-0,562911	-8,352512	9,919405
	0,4	-0,303556	-5,104654	6,409214
	0,6	-0,396287	-4,685712	6,096834
	0,8	-0,326486	-3,146084	4,485651
	0,93	-0,491857	-3,607476	5,109896
12,5	0,07	0,39952	-6,357705	6,938206
	0,2	0,560605	-10,512008	10,939653
	0,4	0,460531	-5,146305	5,668398
	0,6	1,052937	-4,346084	5,273574
	0,8	-0,17023	-3,285382	4,448491
	0,93	-0,489256	-4,363034	5,840238

Tabla 5.12. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la proporción de la fachada frontal far>1.0:  $C_{p_{normpad,zh}}(far)=[a_1far+a_2/far+a_3]^{1/2}$

pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>
0	0,07	0,102648	0,307944	0,589408
	0,2	-0,044242	-0,132726	1,176968
	0,4	-0,02005	-0,06025	1,0802
	0,6	-2,751206E-10	-5,399712E-10	1
	0,8	-0,127266	-0,101574	1,22884
	0,93	0,175931	0,527814	0,296255
5	0,07	-0,61983	-2,745612	4,364542
	0,2	-0,455586	-2,714454	4,17004
	0,4	0,01539	-1,522998	2,507608
	0,6	8,495999E-03	-1,108008	2,099512
	0,8	0,03363	-0,665862	1,632232
	0,93	-0,83599	-2,639028	4,475018
7,5	0,07	-0,672534	-4,465068	6,137602
	0,2	-0,589638	-4,571604	6,161242
	0,4	0,44127	-2,377428	2,935258
	0,6	0,313214	-2,334822	3,021608
	0,8	0,53643	-1,011222	1,474792
	0,93	-0,32829	-2,984262	4,312552
10	0,07	-1,31805	-7,924662	10,242712
	0,2	-2,14576	-11,416512	14,562272
	0,4	0,0608	-6,2016	7,1408
	0,6	0,699422	-3,950934	4,251512
	0,8	0,51795	-2,521878	3,003928
	0,93	-1,627836	-6,191754	8,81959
12,5	0,07	1,15625	-5,8125	5,65625
	0,2	0,811914	-10,848372	11,036458
	0,4	3,144588	-2,954106	0,809518
	0,6	3,525422	-0,048534	-2,476888
	0,8	1,802288	-0,832296	0,030008
	0,93	-0,384444	-4,326666	5,71111

Tabla 5.13. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la proporción de la fachada lateral sar>1.0:  $C_{p\text{normpad, zh}}(sar)=[a_1sar+a_2/sar+a_3]^{1/2}$

#### Fachada opuesta a la acción del viento

Función polinómica para el Cp de referencia.

$$C_{p\text{ref}}(zh) = -0,079239(zh)^3 + 0,542317(zh)^2 - 0,496769(zh) + 0,331533$$

Los coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de parámetros ambientales y geométricos, están dados en las Tablas 5.14 a 5.21.

zh	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0,1	-14,368685	4,520431	0,0667639
0,3	-13,490491	4,101437	0,706052
0,5	-8,775919	1,322245	1,088822
0,7	-4,662405	-0,929782	1,395398
0,9	2,382908	-4,837467	1,940878

Tabla 5.14. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la rugosidad del terreno:  $C_{p\text{normzh}}(\alpha)=a_0+a_1(\alpha)+a_2(\alpha)^2$

zh	a <sub>5</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0,07	9,118209E-08	-1,050363E-05	3,932533E-04	-4,734698E-03	-0,015304	1,047295
0,2	5,934754E-08	-6,708652E-06	2,340744E-04	-1,943067E-03	-0,031483	1,043295
0,4	5,052791E-08	-5,537346E-06	1,722449E-04	-3,926684E-04	-0,046517	1,034663
0,6	5,595805E-08	-6,121612E-06	1,889700E-04	-3,177597E-04	-0,051446	1,032759
0,8	5,553558E-08	-5,931215E-06	1,719758E-04	3,013991E-04	-0,059971	1,037969
0,93	6,211419E-08	-6,759794E-06	2,024378E-04	1,182029E-04	-0,065764	1,033975

Tabla 5.15. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la densidad de los edificios aledaños:  $C_{p_{normzh}}(pad)=a_0+a_1(pad)+a_2(pad)^2+a_3(pad)^3+a_4(pad)^4+a_5(pad)^5$

zh	pad	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0,07	0	0	0,547959	0,465538
	5	0	0,625743	0,308268
	6,25	0	0,859533	0,107587
	12,5	0	1,710552	-0,681624
0,2	0	0	0,473757	0,527487
	5	0	0,636732	0,294108
	6,25	0,123639	0,432008	0,44064
	12,5	0,080203	1,471191	-0,547645
0,4	0	-0,043739	0,599345	0,427938
	5	0,054539	0,299349	0,645489
	6,25	0,100427	0,35117	0,483096
	12,5	0,175853	0,568029	0,223168
0,6	0	-0,069086	0,793503	0,287883
	5	0,029377	0,402683	0,594877
	6,25	0,066082	0,524015	0,376383
	12,5	0,145046	0,567979	0,264523
0,8	0	-0,036376	0,781825	0,258777
	5	0,011009	0,55164	0,435343
	6,25	-1,58012E-03	1,127839	-0,084281
	12,5	0,09395	1,114736	-0,111437
0,93	0	2,138076E-03	0,655048	0,38064
	5	0,03126	0,526521	0,418668
	6,25	0,102993	0,946754	-0,122071
	12,5	0,202243	1,119405	-0,353569

Tabla 5.16. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la altura de los edificios aledaños:  $C_{p_{normzh,pad}}(rbh)=a_0+a_1(rbh)+a_2(rbh)^2$

Tabla 5.17. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la proporción de la fachada frontal  $far < 1.0$ :  $C_{p_{normpad,zh}}(far)=a_0+a_1(far)$

pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0	0,07	0,77	0,23
	0,2	0,694	0,306
	0,4	0,624	0,376
	0,6	0,6	0,4
	0,8	0,666	0,334
	0,93	0,55	0,45
5	0,07	1,31	-0,31
	0,2	1,096	-0,096

Tabla 5.17 (cont.)

pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
7,5	0,4	1,048	-0,048
	0,6	1,096	-0,096
	0,8	1,142	-0,142
	0,93	1,042	-0,042
	0,07	1,32	-0,32
	0,2	1,17	-0,17
	0,4	1,142	-0,142
	0,6	1,17	-0,17
	0,8	1,292	-0,292
10	0,93	1,25	-0,25
	0,07	1,302	-0,302
	0,2	1,166	-0,166
	0,4	1,12	-0,12
	0,6	1,25	-0,25
	0,8	1,428	-0,428
	0,93	1,428	-0,428
	0,07	1,336	-0,366
	0,2	1,174	-0,174
12,5	0,4	1,166	-0,166
	0,6	1,244	-0,244
	0,8	1,4	-0,4
	0,93	1,412	-0,412

Tabla 5.18. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la proporción de la fachada lateral  $sa_r < 1.0$ :  $C_{p_{normpad,zh}}(sa_r) = a_0 + a_1(sa_r)$

pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0	0,07	-0,462	1,462
	0,2	-0,444	1,444
	0,4	-0,5	1,5
	0,6	-0,6	1,6
	0,8	-0,666	1,666
	0,93	-0,986	1,986
5	0,07	0,62	0,38
	0,2	0,484	0,516
	0,4	0,286	0,714
	0,6	0,322	0,678
	0,8	0,358	0,642
	0,93	0,124	0,876
7,5	0,07	0,56	0,44
	0,2	0,416	0,584
	0,4	0,358	0,642
	0,6	0,378	0,622
	0,8	0,416	0,584
	0,93	6,245004E-17	1
10	0,07	0,418	0,582
	0,2	0,374	0,626
	0,4	0,28	0,72
	0,6	0,334	0,666
	0,8	0,286	0,714
	0,93	0,058	0,942



Tabla 5.18 (cont.)

pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
12,5	0,07	0,586	0,414
	0,2	0,392	0,608
	0,4	0,208	0,792
	0,6	0,088	0,912
	0,8	0,2	0,8
	0,93	-0,118	1,118

zh	anw(°)	a <sub>4</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>0</sub>
0,5	90	0	9,325952	-16,031002	6,08061	2,162909
	110	0	2,526807	-5,145221	3,28289	1,400238
	130	0	0,200855	-1,520047	1,734472	1,275364
	160	0	0,861888	-1,966841	1,561282	0,923007
	180	0	4,145989E-16	-0,107692	0,107692	0,975846
0,7	90	0	11,862859	-19,086364	6,79763	2,204853
	110	0	1,79934	-2,526981	1,326103	1,631755
	130	0	-0,069542	0,404196	0,124611	1,506259
	160	0	1,003108	-0,873077	0,398465	1,093671
	180	0	3,88578E-16	0,449883	-0,449883	1,102028
0,9	90	-13,234266	47,482906	-48,637238	13,933178	2,493133
	110	-18,269231	38,486402	-24,083741	4,338003	1,973497
	130	-9,985431	17,831974	-8,056789	0,346156	1,844014
	160	-8,458625	17,902681	-10,191521	1,433689	1,232881
	180	-6,555944	13,106061	-7,364394	0,809767	1,244049

Tabla 5.19. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado: distribución horizontal vs. Dirección del viento:  $C_{p_{normzh,anw}}(x) = a_0 + a_1(x) + a_2(x)^2 + a_3(x)^3 + a_4(x)^4$

pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>
0	0,07	0,391319	0,275277	0,305879
	0,2	0,208852	0,045117	0,727577
	0,4	0,176644	0,135403	0,657545
	0,6	0,222872	0,219437	0,5177
	0,8	0,352525	0,51124	0,095033
	0,93	0,409298	0,101415	0,461285
5	0,07	0,313066	1,29096	-0,679717
	0,2	0,262845	1,187068	-0,511316
	0,4	0,198393	0,852449	-0,107538
	0,6	0,202255	0,824728	-0,109405
	0,8	0,266436	0,989084	-0,34636
	0,93	0,378433	0,831703	-0,27258
7,5	0,07	0,355636	1,865418	-1,293254
	0,2	0,256393	1,501845	-0,83996
	0,4	0,195066	1,248485	-0,513001
	0,6	0,179345	1,132885	-0,406631
	0,8	0,248347	1,426085	-0,79038
	0,93	0,286457	1,200878	-0,562477
10	0,07	0,162696	1,401255	-0,650645
	0,2	0,14259	1,382313	-0,611037



Tabla 5.20 (cont.)

pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>
12,5	0,4	0,072493	1,036706	-0,199349
	0,6	0,062272	0,956828	-0,131138
	0,8	0,116832	1,191314	-0,445541
	0,93	0,111723	0,959598	-0,190495
	0,07	0,187639	1,532033	-0,830662
	0,2	0,113114	1,30869	-0,518821
	0,4	0,090391	1,096843	-0,281639
	0,6	0,058215	0,921987	-0,086177
	0,8	0,138563	1,304438	-0,561468
	0,93	0,115601	1,108345	-0,337801

Tabla 5.20. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la proporción de la fachada frontal  $far > 1.0$ :  $C_{p_{normpad,zh}}(far) = [a_1 far + a_2 / far + a_3]^{1/2}$

pad	zh	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>
0	0,07	1,549121	4,008955	-4,558076
	0,2	1,293432	3,376296	-3,669728
	0,4	0,818276	2,757414	-2,575691
	0,6	0,622491	2,463733	-2,086225
	0,8	0,431822	2,206986	-1,638808
5	0,93	1,15475	3,567738	-3,722488
	0,07	1,234668	3,821814	-4,056482
	0,2	1,086419	3,381557	-3,467976
	0,4	1,110227	3,330677	-3,440903
	0,6	1,248462	3,745386	-3,993848
7,5	0,8	1,158504	3,817008	-3,975512
	0,93	0,924129	3,214321	-3,13845
	0,07	1,6176	4,7352	-5,352801
	0,2	1,405914	4,082196	-4,48811
	0,4	1,39227	4,047642	-4,439912
10	0,6	1,446764	4,209078	-4,655842
	0,8	1,541118	4,623354	-5,164472
	0,93	1,395	4,185	-4,58
	0,07	1,728091	5,065453	-5,793544
	0,2	1,675056	4,762584	-5,437641
12,5	0,4	1,632	4,6368	-5,2688
	0,6	1,623354	4,746708	-5,370063
	0,8	2,133661	5,767382	-6,900996
	0,93	2,099225	5,670099	-6,769291
	0,07	2,249115	6,239501	-7,488376
12,5	0,2	2,121972	5,826368	-6,948252
	0,4	1,99874	5,578012	-6,576709
	0,6	2,373076	6,268238	-7,641063
	0,8	2,133851	5,94792	-7,081692
	0,93	2,204859	6,021059	-7,225708

Tabla 5.21. Coeficientes para las ecuaciones del Cp normalizado como función de la proporción de la fachada lateral  $sar > 1.0$ :  $C_{p_{normpad,zh}}(sar) = [a_1 sar + a_2 / sar + a_3]^{1/2}$

### Ejemplo

Se desea calcular el coeficiente de presión para dos puntos de la envolvente de un edificio: punto (1) sobre la fachada (1) y el punto (2) sobre la fachada (2) (Figura 5.22).

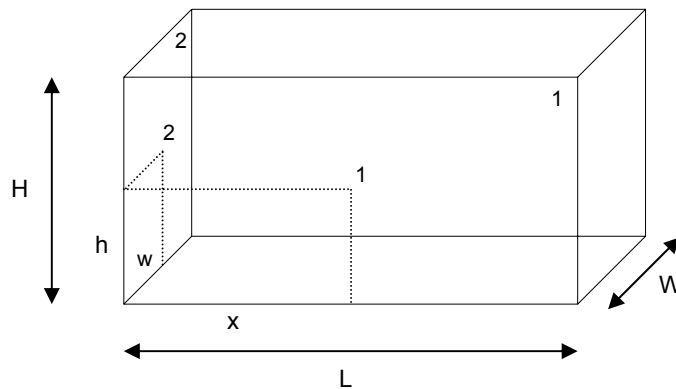


Figura 5.22. Vista esquemática de la fachada del edificio

Los parámetros ambientales y geométricos tienen los siguientes valores:

$pad = 0,0$ ;  $rbh = 1$ ;  $\alpha = 0,22$ ;  $L = 6\text{m}$ ;  $H = 3\text{m}$ ;  $W = 3\text{m}$ ;  $x = 3\text{m}$ ;  $w = 1,5\text{m}$ ;  $h = 1,5\text{m}$ ;  
 $anw(1) = -45^\circ$ ;  $anw(2) = -135^\circ$

La relación de aspecto frontal para las fachadas (1) y (2) es:

$far(1) = L/H = 2$ ;  $far(2) = W/H = 1$

La relación de aspecto lateral para las fachadas (1) y (2) es:

$sar(1) = W/H = 2$ ;  $sar(2) = L/H = 2$

La posición relativa de los puntos (1) y (2) es:

$xl(1) = x/L = 0,5$ ;  $xl(2) = w/W = 0,5$

$zh(1) = zh(2) = h/H = 0,5$

Lado 1 – Fachada donde actúa el viento

$C_{p_{ref}}(zh=0,5) = -2,381082 \cdot (0,5)^3 + 2,89756 \cdot (0,5)^2 - 0,774649 \cdot 0,5 + 0,745543 = 0,78$

$C_{p_{norm0,5}}(\alpha=0,22) = 0,999$  (de la Tabla 5.6)

$C_{p_{norm0,5}}(pad=0) = 0,979$  (de la Tabla 5.7)

$C_{p_{norm0,5;0}}(rbh=1) = 0,957$  (de la Tabla 5.8)

$C_{p_{norm0;0,5}}(far=2) = 0,874$  por interpolación lineal (de la Tabla 5.12)

$C_{p_{norm0;0,5}}(sar=1) = 1$  (de la Tabla 5.13)

$C_{p_{norm0,5;45}}(xl=0,5) = 0,464$  (de la Tabla 5.11)

$C_p(1) = C_{p_{ref}}(zh=0,5) \cdot C_{p_{norm0,5}}(\alpha=0,22) \cdot C_{p_{norm0,5}}(pad=0) \cdot C_{p_{norm0,5;0}}(rbh=1) \cdot C_{p_{norm0;0,5}}(far=2) \cdot C_{p_{norm0;0,5}}(sar=1) \cdot C_{p_{norm0,5;45}}(xl=0,5) = \boxed{0,296}$

Lado 2 – Fachada opuesta a la acción del viento

$C_{p_{ref}}(zh=0,5) = -0,079239 \cdot (0,5)^3 + 0,542317 \cdot (0,5)^2 - 0,496769 \cdot 0,5 + 0,331533 = 0,21$

$C_{p_{norm0,5}}(\alpha=0,22) = 0,954$  (de la Tabla 5.14)

$C_{p_{norm0,5}}(pad=0) = 1,034$  (de la Tabla 5.15)

$C_{p_{norm0,5;0}}(rbh=1) = 0,998$  (de la Tabla 5.16)

$C_{p_{norm0;0,5}}(far=1) = 1$  (de la Tabla 5.20)

$C_{p_{norm0;0,5}}(sar=2) = 0,645$  por interpolación lineal (de la Tabla 5.21)

$C_{p_{norm0,5;135}}(xl=0,5) = 1,707$  (de la Tabla 5.19)

$C_p(2) = C_{p_{ref}}(zh=0,5) \cdot C_{p_{norm0,5}}(\alpha=0,22) \cdot C_{p_{norm0,5}}(pad=0) \cdot C_{p_{norm0,5;0}}(rbh=1) \cdot C_{p_{norm0;0,5}}(far=1) \cdot C_{p_{norm0;0,5}}(sar=2) \cdot C_{p_{norm0,5;135}}(xl=0,5) = \boxed{0,228}$

# EFECTO DEBIDO A LA TEMPERATURA

## El efecto Stack

El movimiento de aire por efecto Stack ocurre cuando las diferencias de temperaturas causan diferencias de densidad en el aire y provocan diferencias de presión entre el interior y el exterior. Cuando la temperatura interior del edificio es mayor que la externa, la distribución de presiones sobre el edificio puede tomar las formas mostradas en la Figura 5.23.

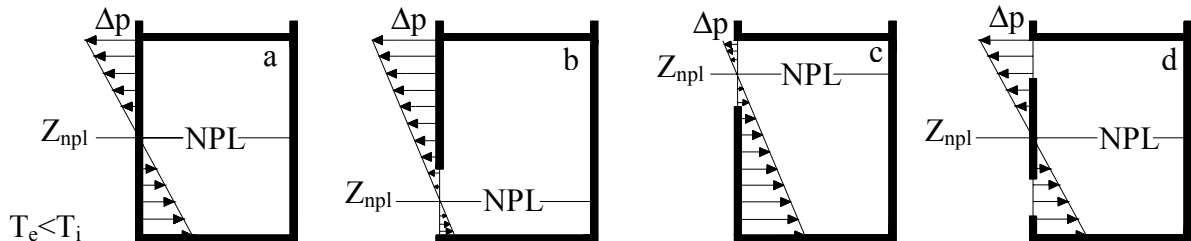


Figura 5.23. Distribución de la diferencia de presiones Stack,  $\Delta P$  y posición del NPL para diferentes configuraciones de aberturas en ausencia del viento.

En estos casos el aire fluye hacia dentro a través de las aberturas por debajo del nivel neutral de presión (NPL=neutral pressure level) y hacia fuera por encima de él. El nivel neutral de presión es la altura en la que las presiones interiores y exteriores se igualan.  $Z_{npl}$  es la distancia del NPL del nivel de referencia.

En un edificio uniforme, con ausencia de viento el NPL se encuentra cerca de la mitad de la altura del edificio (Figura 5.23a). El tamaño y la posición de las aberturas determinan la ubicación del NPL (Figura 5.23b,c,d). Una abertura al nivel del piso baja el NPL (Figura 5.23b), una abertura cercana al techo incrementa la altura del NPL (Figura 5.23c). De acuerdo con el principio de conservación de masas, la masa de flujo de aire que entra a través de las aberturas por debajo del NPL es igual a la masa de flujo de aire que sale por encima del mismo. (Figura 5.23d).

La diferencia de presión hidrostática interior/exterior para un recinto se expresa como:

$$(1) \Delta p_s(z) = (\rho_e - \rho_i)g(Z - Z_{npl}) = \rho_i g(Z - Z_{npl}) \frac{(T_i - T_e)}{T_e}$$

donde la ecuación del gas ideal es usada y se considera que no hay estratificación de la temperatura y que la densidad del aire es constante.

## Ecuación de Bernoulli

La aplicación del principio de conservación de energía entre la sección horizontal del edificio al nivel del NPL y la sección vertical de la abertura  $A_1$  (Figura 5.24) da la ecuación de Bernoulli. El área de la sección del edificio es más grande que el área de la abertura, por lo tanto la velocidad en esta sección es baja y la energía cinética en la sección del NPL puede ser despreciada.

La caída de presión entre dos secciones es la suma de la caída de presión local en la abertura (coeficiente  $\xi$ ) y la caída de presión debida a la fricción en el camino del aire desde  $A_1$  hasta NPL (coeficiente  $\zeta$ ). Pueden ser normalizados con la velocidad del aire  $u_1$  como:

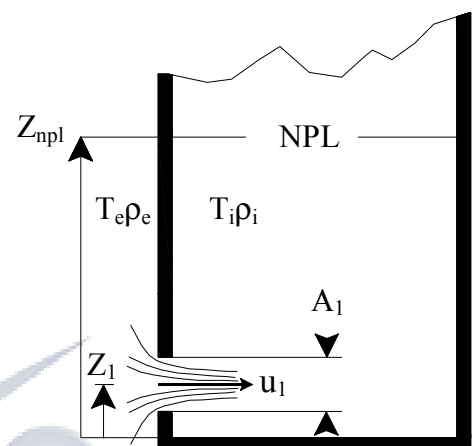


Figura 5.24. Flujo de aire a través de una abertura debido al efecto Stack cuando  $T_i > T_e$

$$(2) \Delta p_{local} = \frac{1}{2} \zeta \rho_e u_1^2$$

$$(3) \Delta p_{friccional} = \frac{1}{2} \zeta \rho_e u_1^2$$

Bajo estas condiciones la ecuación de Bernoulli se convierte en:

$$(4) \Delta p_s(z_1) - \frac{1}{2} \rho_e \zeta u_1^2 - \frac{1}{2} \rho_e \xi u_1^2 - \frac{1}{2} \rho_e N_1 u_1^2 = 0$$

Combinando las ecuaciones (1) y (4), la velocidad del aire puede ser expresada como:

$$(5) u_1 = \varphi \sqrt{2g(Z - Z_{npl}) \frac{\Delta T}{T_e}}$$

donde fue usada la aproximación  $\rho_i \approx \rho_e$  (válido para pequeños  $\Delta T$ ). El coeficiente de velocidad  $\varphi$  se puede expresar como:

$$(6) \varphi = \frac{1}{\sqrt{\zeta + \xi + N_1}}$$

donde  $N_1$  es el coeficiente de energía cinética que depende de la uniformidad de la distribución de la velocidad en la sección de la abertura,  $\xi$  es el coeficiente de la caída de presión local para la abertura y  $\zeta$  es el coeficiente de la caída de presión debida a la fricción.

$\varphi$  es determinado experimentalmente y depende del número de Reynolds, de la naturaleza de las aberturas y de los obstáculos en el camino del flujo de aire. Es difícil distinguir el efecto de cada parámetro incluido en  $\varphi$ , pero un valor total puede ser encontrado.

### Efecto JET en las aberturas

El flujo unidireccional de aire pasando a través de una abertura provoca un efecto de Jet. Las líneas de flujo se curvan cerca del borde de la abertura y el área efectiva de la abertura es menor que la geométrica, debido a la contracción de las líneas de flujo. La contracción Jet depende del número de Reynolds y en la geometría de los bordes de la abertura.

El área efectiva de la abertura depende en como el efecto Jet llena la sección de la abertura.  $\varepsilon$  es el coeficiente del efecto Jet y está definido por:

$$(7) \varepsilon = \frac{A_{efectiva}}{A_{geométrica}}$$

### Flujo de aire debido al efecto de la temperatura

La integración sobre la altura de la abertura establece que el flujo de aire a través de una abertura es:

$$(8) \quad v = \int_{Z_1}^{Z_2} W u dz$$

Para una sola abertura la ecuación queda de la siguiente forma:

$$(9) \quad v = \frac{1}{3} \varepsilon \varphi A \sqrt{gH \frac{\Delta T}{T}} = \frac{1}{3} C_d A \sqrt{gH \frac{\Delta T}{T}}$$

Para dos aberturas la velocidad del aire puede ser considerada constante a lo largo de toda la altura de la abertura si la misma está lejos del NPL. La velocidad principal del aire puede ser tomada en el centro de la abertura, en este caso el flujo de aire es:

$$(10) \quad v = A C_d \sqrt{2g(Z - Z_{npl}) \frac{\Delta T}{T}}$$

$C_d$  es el coeficiente de descarga. Es el producto entre el coeficiente de velocidad  $\varphi$  y el coeficiente de contracción  $\varepsilon$ .

$$(11) \quad C_d = \varepsilon \varphi$$

El coeficiente de descarga puede ser determinado experimentalmente cuando el flujo de aire es medido directamente. Del mismo modo, puede ser determinado el coeficiente de velocidad, midiendo las velocidades del aire.

### Nivel de presión neutral

El principio de conservación de masas es aplicado, usando ec. (10) a una entrada ajustada de aire en un recinto con dos aberturas, una arriba y la otra abajo (Figura 5.25). Con  $Z_{NPL}$ , la distancia del NPL por encima del nivel de referencia y  $H$ , la distancia vertical entre los centros de gravedad de cada abertura se deriva que:

$$(12) \quad Z_{NPL} - Z_1 = \frac{H}{1 + \left[ \left( \frac{A_{bot}}{A_{top}} \right)^2 \left( \frac{T_{in}}{T_{out}} \right) \right]}$$

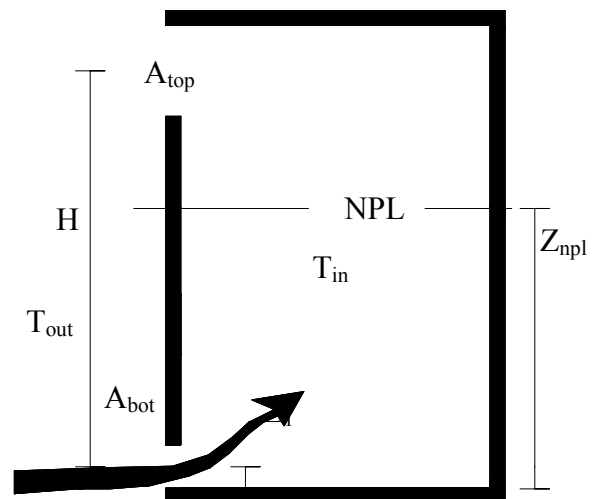


Figura 5.25. Recinto con dos aberturas

$Z_1$  es la distancia vertical entre el centro de gravedad de la abertura inferior y el nivel de referencia. Por conveniencia el nivel de referencia fue tomado como  $Z_1=0$ .

Para recintos con una sola abertura rectangular, el NPL está situado cerca de la mitad de la altura de la abertura, cuando las diferencias de temperatura son pequeñas y las densidades tanto del aire interior como exterior son similares, el error es menor al 0,3% para un  $\Delta T$  de 10K°. Para más de dos aberturas se complica el cálculo del NPL lo que obliga al uso de métodos de solución numérica.

## Determinación del coeficiente de descarga

Una importante fuente de incertidumbre en los modelos de ventilación para predecir el refrescamiento pasivo, ya sean simples o complejos, se debe a la determinación del coeficiente de descarga.

Infinidad de fórmulas y experimentos se han llevado a cabo para la determinación de este coeficiente, pero afortunadamente se puede determinar un valor de este bastante preciso.

Uno de los experimentos más serios realizado en el tema fue el de F.Flourentzou, J. Van der Maas y C.A.Roulet. Ellos se basaron en la Ec. 11 que establecía que el coeficiente de descarga era igual al producto entre el coeficiente de velocidad  $\phi$  y el coeficiente de contracción  $\varepsilon$  y realizaron distintas mediciones de los mismos en un edificio ventilado naturalmente de tres pisos durante noches sin viento para que el flujo sólo se deba a la acción del efecto Stack.

Los resultados de estas experiencias determinaron los siguientes valores:  $\phi=0,7\pm 0,1$  y  $\varepsilon=0,85\pm 0,1$  que están de acuerdo con los valores aceptados generalmente para el coeficiente de descarga:  $C_d=\phi\cdot\varepsilon=0,6\pm 0,1$  dando una mayor justificación para su uso en los modelos empíricos.

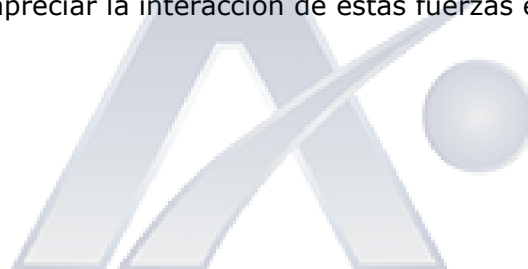
Es de esperarse que en presencia del viento se incremente la fricción y contracción (reduciendo el valor del  $C_d$ ), se encontró que la incertidumbre en las mediciones del flujo aumenta demasiado, por lo que los efectos del viento no pudieron ser determinados.

La imprecisión del modelo debería ser de poca importancia si el modelo de ventilación natural da una respuesta cualitativa correcta, especialmente con la incertidumbre que poseen los datos de entrada.

## EFECTO COMBINADO DEL VIENTO Y LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS

Como ya se vio anteriormente, el flujo de aire a través de un edificio es inducido por gradientes de presión sobre el mismo y la diferencia de presión se genera de dos fuentes: flujo externo del viento (fuerza debida al viento) y gradientes de temperatura entre el aire exterior e interior (fuerza térmica).

El gradiente de presiones a través de una abertura dada es la suma algebraica de las diferencias de presión generadas por cada fuerza por separado. Las dos fuerzas pueden operar en la misma o en direcciones opuestas; dependiendo de la dirección y magnitud del viento, y de qué temperatura es mayor si la interna o la externa. En la Figura 5.26 se puede apreciar la interacción de estas fuerzas en distintos casos.



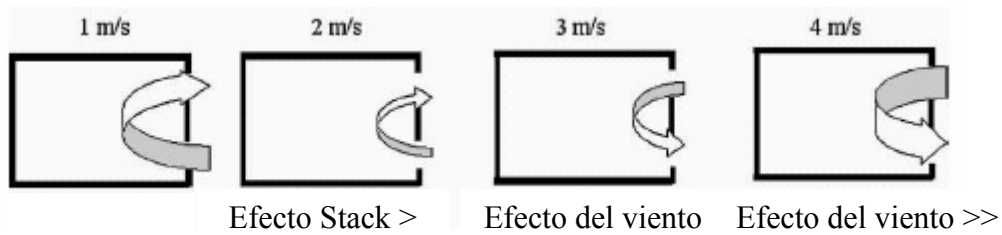


Figura 5.26. Interacción entre el efecto del viento y de la temperatura sobre una progresión de la velocidad del viento

Como la fuerza térmica de ventilación depende del producto entre la diferencia de temperaturas y la altura del camino de la ventilación (por ej. Distancia vertical entre aberturas), es de importancia práctica sólo cuando uno de los factores es de suficiente magnitud.

En edificios residenciales, la altura efectiva del camino de la ventilación es muy pequeña, generalmente menor de 2 metros, por lo que para usos prácticos para que un flujo de aire sea inducido por fuerzas térmicas se deberá contar con una apreciable diferencia de temperaturas.

Esas diferencias sólo se consiguen en invierno, por lo que en verano el efecto de las fuerzas térmicas es usualmente muy pequeño como para considerarlo. Hay dos excepciones una son los baños y cocinas que utilizan para su ventilación conductos verticales de gran altura, por lo que la fuerza térmica puede ser efectivamente utilizada para ventilación natural, la otra son los edificios generalmente de oficina, especialmente diseñados para utilizar el efecto de las diferencias de temperatura, algunos ejemplos se muestran en la Figura 5.27.

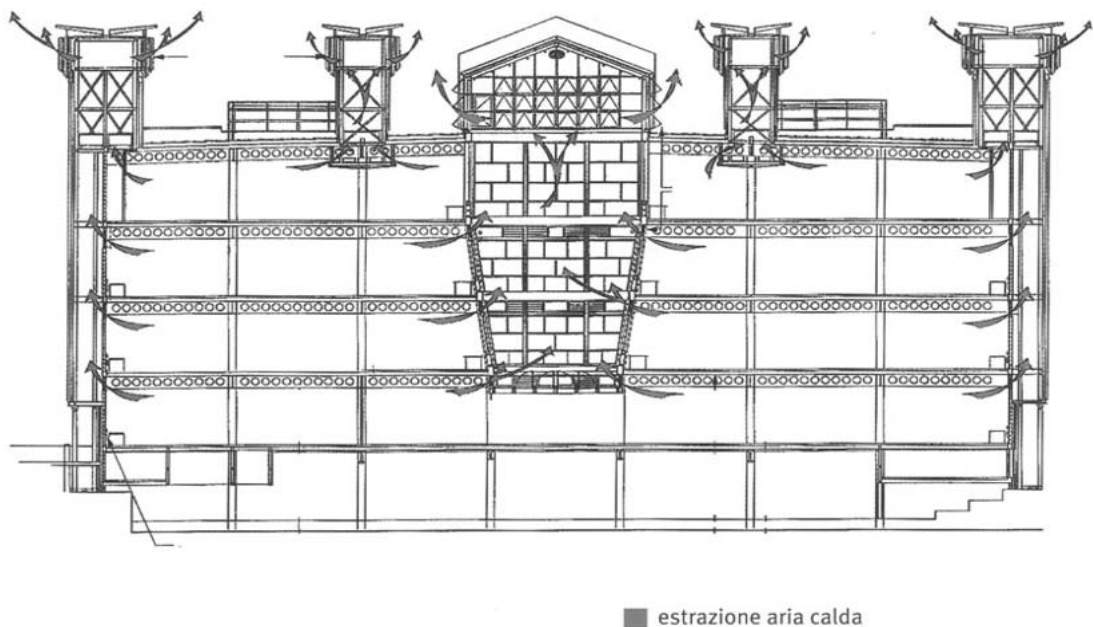


Figura 5.27. Edificios diseñados especialmente para el aprovechamiento de la fuerza térmica (efecto Stack)

Teniendo en cuenta esto, los modelos empíricos seleccionados, que serán explicados en la siguiente sección, en su gran mayoría consideran principalmente el efecto del viento más que el efecto de la temperatura.



## Bibliografía

1. Boletín informativo N° 29 "Viento". Fuerza Aérea Argentina Comando de Regiones Aéreas Servicio Meteorológico Nacional (1986).
2. "Man, Climate & Architecture", Capítulo 14. B. Givoni (1976). Applied Science Publishers.
3. "Passive Cooling", Capítulo 2, Chandra. Editor Jeffrey Cook.
4. "Design: cooling buildings by natural ventilation". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineering Support Agency (2004).
5. "Natural Ventilation in Buildings", Capítulo 2. Editor F. Allard (1998). James & James.
6. "Wind pressure distribution around buildings: a parametric model". Mario Grosso (1990). Artículo de Energy and Buildings.
7. "Natural Ventilation for passive cooling: measurement of discharge coefficients". F. Florentzou, J. Van Der Mass y C. A. Roulet (1997). Artículo de Energy and Buildings.
8. "1999 ASHRAE Handbook CD".
9. Apuntes de Ingeniería Bioambiental de cursada 2005. Eduardo Yarke y Martha Fujol.
10. "Impact of the uncertainties on wind pressures on the prediction of thermal comfort performances". N. Heijmans y P. Wouters (2003). Technical Report de la IEA (International Energy Agency) para el Annex 35 HybVent (Hybrid Ventilation in New and Retrofitted Office Buildings).
11. BS 5925:1991 "Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation". British Standards Institute (1991).
12. "Bioclimatic design & analysis courses notes". Preparado por M. Mc Kenna de la RMIT University. Seminario 2001.
13. "Design analysis of single-sided natural ventilation". C. Allocca, Q. Chen y L. Glicksman (2002). Artículo de Energy and Buildings.



## 6 - MODELOS EMPIRICOS PARA EL CALCULO ESTIMATIVO DE PARAMETROS DE VENTILACION NATURAL

### Introducción

Una evaluación completa sobre un problema específico que se quiera resolver empleando Ventilación Natural, requiere del abordaje simultáneo y complementario de tres diferentes técnicas:

- 1) La realización de pruebas (generalmente empleando humo) sobre modelos a escala
- 2) La verificación y estimación de ciertos parámetros con modelos de cálculo de mayor o menor complejidad.
- 3) La realización de mediciones sobre los espacios bajo estudio en escala y tiempo real

Ninguno de estos métodos es completo y exhaustivo por si solo y aún las mas modernas técnicas de análisis numérico (como son los programas que aplican la metodología del CFD sobre modelos de redes) aseguran resultados totalmente confiables. De allí la conveniencia del abordaje simultáneo.

Los estudios sobre los modelos a escala tienen la ventaja sobre las otras técnicas que permiten visualizar con gran claridad los patrones de flujo (debido a las configuraciones geométricas del espacio, la ubicación y tipología de las aberturas y el tamaño de las mismas) que se producen en el movimiento del aire interior.

También posibilitan estimar correlaciones de velocidades entre la velocidad del viento actuante y la velocidad del desplazamiento del aire interior en diferentes puntos del interior del espacio.

En la figura 6.1 se muestran patrones de flujo obtenidos sobre el modelo a escala del Laboratorio de Ingeniería Bioambiental de la Universidad Nacional de Luján los que varían según desde donde incida el viento y la posición relativa de las aberturas abiertas o cerradas.

a)

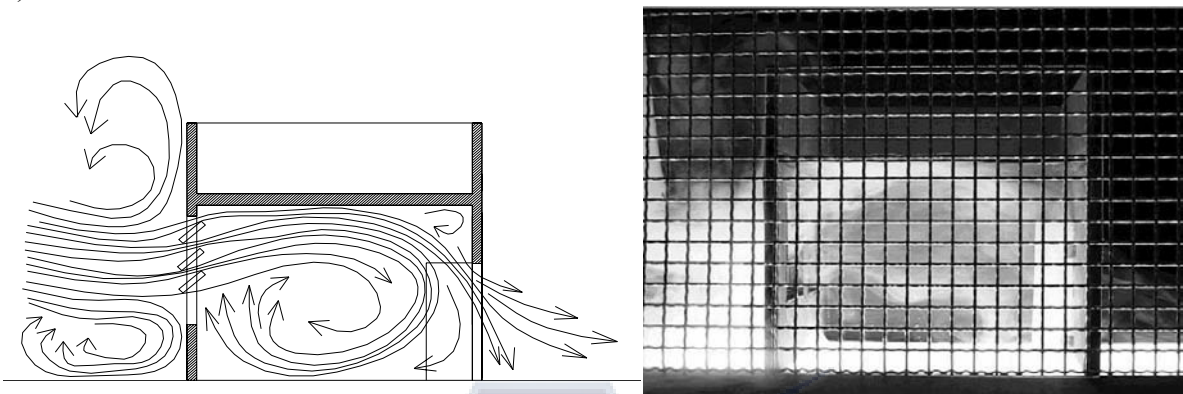
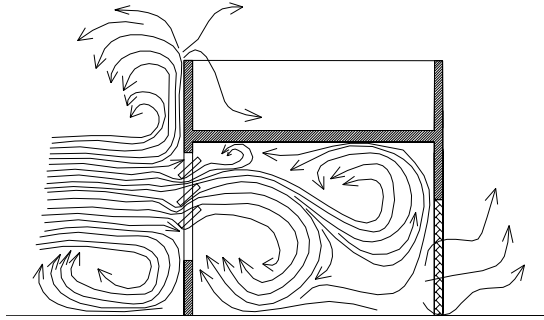


Figura 6.1. Patrón de flujo característico para el caso del humo incidiendo sobre:

- a) las aberturas y puerta entreabierta a 45°
- b) las aberturas y puerta cerrada

b)



Además de los patrones de flujo, es necesario conocer o estimar los caudales de aire que atraviesan el espacio interior y los valores reales en las velocidades del aire y su distribución para que puedan dimensionarse las aberturas, elegir su mejor ubicación, calcular las pérdidas de energía y su efecto en el confort térmico y en la calidad del aire interior.

Esta información solo puede ser obtenida en tiempo real sobre los propios espacios bajo estudio, pero ello es posible en muy contadas oportunidades, lo que lleva necesariamente a complementar los análisis sobre modelos a escala con cálculos numéricos empíricos o simulaciones.

De acuerdo al tipo de información requerida, varios modelos y herramientas pueden ser usados. Los modelos van desde algoritmos empíricos simples para calcular el caudal de aire, las velocidades del aire interior y las superficies de aberturas requeridas, hasta los modelos computacionales.

Los modelos computacionales más sofisticados resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes y generalmente el nivel de complejidad que puede encarar cada modelo viene indicado en función de la cantidad de espacios vinculados entre sí que puede resolver y/o en la densidad de la trama de red dentro de la cual se calculan las variaciones de todas las variables intervinientes nodo por nodo.

Los *modelos empíricos* están basados en fórmulas simplificadas generalmente obtenidas de manera experimental bajo ciertas condiciones que hacen que su uso sea restringido dentro de ciertos límites de validez. Sin embargo estas herramientas son muy útiles porque ofrecen una primera estimación rápida de caudales de aire o velocidades, ideales para la fase de diseño del sistema. En esta sección se describirán exhaustivamente los modelos empíricos para ventilación natural más reconocidos y validados.

Los *modelos de CFD* son las herramientas de cálculo más avanzadas, y como se dijo anteriormente, se basan en la solución de las complejas ecuaciones de Navier-Stokes, es decir resuelve las ecuaciones de conservación de masa, energía y momento. Da como resultados campos de distribución de velocidad del aire y temperatura interior así como también campos de distribución de la presión exterior sobre el edificio. Una simulación CFD se realiza como un experimento, en forma análoga a un experimento real llevado a cabo en un laboratorio real, pero en un "laboratorio CFD" vía un modelo matemático y algoritmos que describan los procesos (Ver Figura 6.2).

Si bien el CFD es una herramienta potente, versátil y se ha demostrado su utilidad en estudios paramétricos sobre distintas experiencias en edificios acondicionados naturalmente, los modelos de CFD requieren de expertos para su utilización y análisis, ya que su complejidad es elevada, necesitan de computadoras potentes para correr las simulaciones e insumen mucho tiempo de proceso inclusive horas. Además los modelos CFD cuentan con la doble desventaja de que la precisión de los resultados dependen fuertemente de la precisión con que se hayan determinado las variables físicas utilizadas como condiciones de borde para la resolución de las ecuaciones y que la validez de los resultados de la simulación se torna dificultosa. Como es de sospechar, las herramientas de CFD no son precisamente económicas, por lo que su uso se restringe a experimentaciones y todavía se encuentran muy alejadas del alcance del ingeniero medio

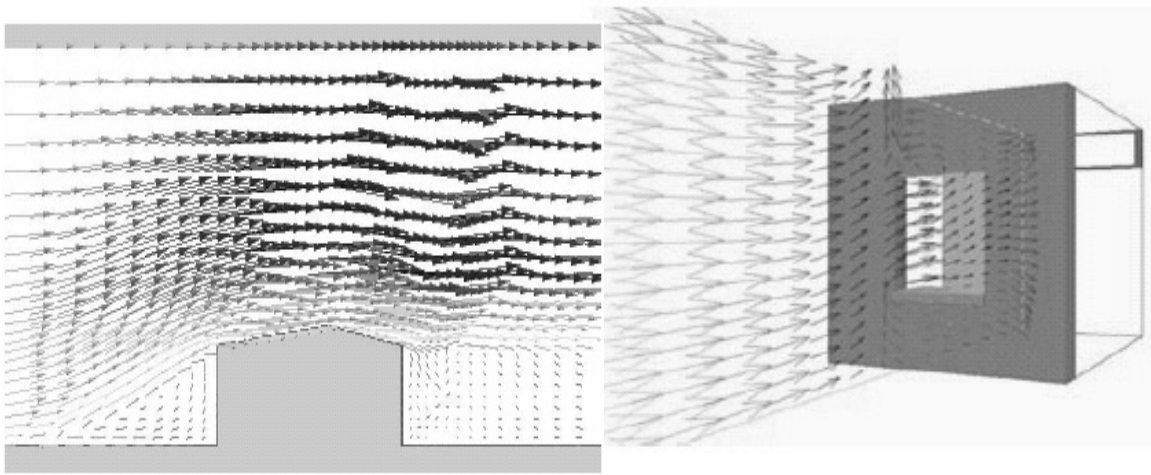


Figura 6.2. Ejemplos de modelos CFD

De aquí deriva la ventaja de utilizar métodos simples de cálculos para la fase preliminar de diseño de un sistema, donde todavía es posible cambiar su forma o su orientación o algún otro elemento.

Es interesante destacar que dada la naturaleza aleatoria de los parámetros de entrada para los modelos de ventilación natural, como la velocidad del viento y su orientación, de poco sirve utilizar modelos muy complicados y detallistas, sino lo que realmente sirve para un ingeniero que quiera implementar en el diseño de un sistema técnicas de ventilación natural, es contar con herramientas de cálculo simples que den resultados cualitativamente correctos.

Las herramientas de tipo empírico no siempre son métodos de cálculos numéricos, sino que también se han desarrollado tablas de datos tabuladas y guías prácticas para asistir en el diseño de edificios ventilados naturalmente.

De acuerdo a los parámetros que estime, podemos reconocer tres categorías de métodos empíricos:

- Cálculos empíricos para la predicción de caudales de aire;
- Cálculos empíricos para la predicción de la velocidad del aire dentro del edificio;
- Cálculos empíricos para el dimensionamiento de aberturas.

Los métodos han sido deducidos tanto de la teoría como de datos experimentales específicos y no pueden ser considerados de validez general; por lo que, como se mencionó anteriormente deberán ser usados dentro de sus límites de validez.

## Métodos de cálculo empíricos para la predicción de caudales de aire

Distintos procedimientos simplificados basados en datos experimentales han sido desarrollados para obtener caudales de aire estimativos esencialmente en edificios de una sola zona.

Estos modelos pueden ser usados durante la fase de diseño para obtener valores de caudales de aire aproximados. A continuación se describen los métodos más representativos y validados.

### El método del British Standard

Este método publicado del BS 5925-1991: "Code for practice for Design of Buildings: Ventilation principles and designing for natural ventilation" propone fórmulas para el cálculo de infiltración de aire y ventilación tanto para recintos con una abertura como para configuraciones con ventilación cruzada.

El método asume un flujo bidireccional a través del edificio e ignora las divisiones internas. Las tablas 6.3 y 6.4 dan esquemáticamente las fórmulas propuestas para diferentes patrones de flujo y diferentes condiciones.

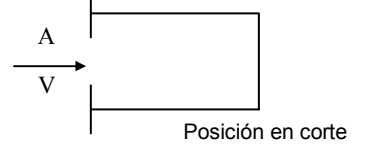
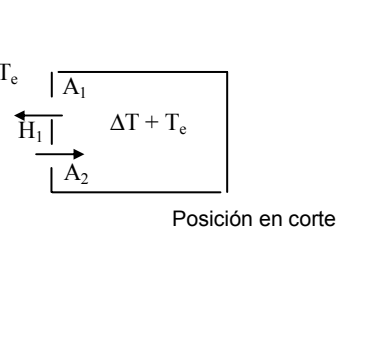
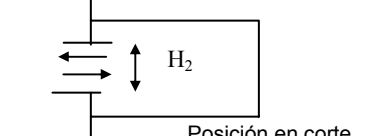
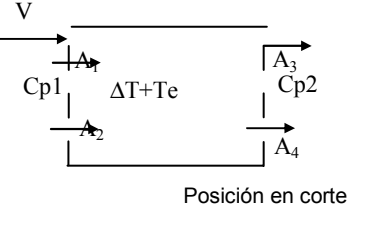
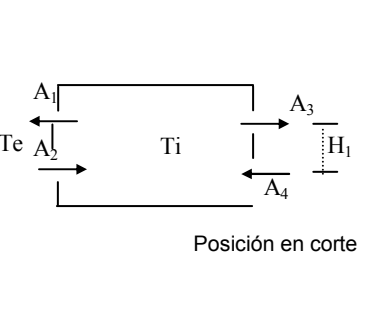
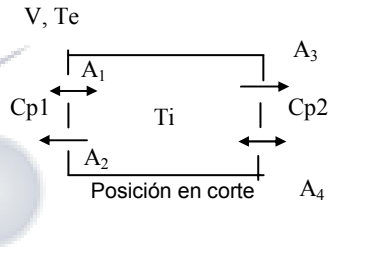
<p>(a) Ventilación debida al efecto del viento  <math>Q=0,025AV</math>          Donde <math>Q[m^3/s]</math> es el caudal de aire, <math>A[m^2]</math> es la superficie de aberturas y <math>V [m/s]</math> la velocidad del viento.</p>	 <p>Posición en corte</p>
<p>(b) Ventilación debida al efecto de la diferencia de temperaturas con dos aberturas</p> $Q = C_d A \left[ \frac{\varepsilon \sqrt{2}}{(1 + \varepsilon)(1 + \varepsilon^2)^{1/2}} \right] \left( \frac{\Delta T g H_1}{\bar{T}} \right)$ <p><math>\varepsilon = A_1/A_2</math>, <math>A = A_1 + A_2</math>          donde <math>C_d</math> es el coeficiente de descarga, <math>\Delta T</math> es la principal diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior, y <math>\bar{T} = \frac{T_e + T_i}{2}</math> en <math>K^\circ</math>.</p>	 <p>Posición en corte</p>
<p>(c) Ventilación debida al efecto de la diferencia de temperaturas con una abertura</p> $Q = C_d \frac{A}{3} \sqrt{\frac{\Delta T g H_2}{\bar{T}}}$	 <p>Posición en corte</p>

Tabla 6.1. Fórmulas para ventilación con aberturas en una sola fachada

Tabla 6.4. Fórmulas para ventilación cruzada

<p>(a) Ventilación debida al efecto del viento</p> $Q_w = C_d A_w V \sqrt{\Delta C_p}$ $\frac{1}{A_w^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$	 <p>Posición en corte</p>
<p>(b) Ventilación debida al efecto de la diferencia de temperaturas</p> $Q_b = C_d A_b \left( \frac{2 \Delta T g H_1}{T} \right)^{0,5}$ $\frac{1}{A_b^2} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2}$ $T = \frac{T_e + T_i}{2} \text{ en } K^\circ$	 <p>Posición en corte</p>
<p>(c) Ventilación debida al efecto del viento y de la diferencia de temperaturas</p> <p><math>Q=Q_b</math> para <math>\frac{V}{\sqrt{\Delta T}} &lt; 0,26 \sqrt{\frac{A_b H_1}{A_w \Delta C_p}}</math></p> <p><math>Q=Q_w</math> para <math>\frac{V}{\sqrt{\Delta T}} &gt; 0,26 \sqrt{\frac{A_b H_1}{A_w \Delta C_p}}</math></p> <p><math>\Delta T = T_i - T_e</math></p>	 <p>Posición en corte</p>

## El método de la ASHRAE

Este método extraído del capítulo 25 del ASHRAE Fundamental Handbook (1999) que trata sobre ventilación e infiltración, está basado en el modelo del LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) desarrollado por Sherman y Grimsrud en 1980.

Este modelo ha sido ampliamente utilizado y requiere del conocimiento del área efectiva de escape del edificio, es decir, de infiltración. La precisión del método puede llegar a ser muy buena ( $\pm 7\%$  para períodos de una semana) cuando los parámetros del edificio en cuestión son bien conocidos, pero la precisión se pierde cuando no se conocen bien estos parámetros obteniéndose errores del orden del 40% - Como regla general: Solo es aplicable en el caso de infiltraciones y no en el caso de ventanas entreabiertas por mas pequeña que sea la abertura.

Para obtener el área de efectiva de escape del edificio se pueden realizar pruebas de presurización. Si estas pruebas no pueden ser llevadas a cabo, los datos de la Tabla 6.5 pueden ser usados para estimar el área efectiva de infiltración.

Para obtener el área total de infiltración de aire del edificio, hay que multiplicar todas las dimensiones o número de cada componente del edificio por el apropiado valor de la tabla. La suma de todos los productos resultantes es el área total de infiltración del edificio.

La Tabla 6.6 da el resultado de un ejemplo de cálculo del área efectiva de infiltración. Cada componente, en el cual se produce una infiltración de aire, está identificado en la primera columna y descrito en la segunda. El largo, área o número de componentes se encuentran en la tercer columna. La cuarta columna contiene el área de infiltración por unidad de componente, extraído de la Tabla 6.5 ,y la quinta columna contiene el área total de infiltración asociada con cada componente. La suma de los términos de la última columna es el área total de infiltración del edificio.

Usando el área de infiltración efectiva de aire, el flujo de aire puede ser calculado de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Q = A_L \sqrt{C_S \Delta T + C_W V^2}$$

donde:

Q = Caudal de aire [ $m^3/h$ ]

$A_L$  = Area efectiva de infiltración (air leakage) [ $cm^2$ ]

$C_S$  = Coeficiente stack [ $m^6/h^2cm^4K$ ]

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura promedio entre el exterior y el interior para el intervalo de tiempo del cálculo [K]

$C_W$  = Coeficiente debido al viento [ $m^4s^2/h^2cm^4$ ]

V = Velocidad media del viento medida en la estación meteorológica local para el intervalo de tiempo del cálculo [m/s]

Las renovaciones/hora del edificio se obtienen dividiendo al caudal por el volumen. La Tabla 6.7 presenta valores de  $C_S$  para residencias de uno, dos y tres pisos. El valor del coeficiente debido al viento  $C_W$  depende de las obstrucciones del entorno y de la altura del edificio. La Tabla 6.8 lista cinco diferentes clases de obstrucciones y la Tabla 6.9 presenta valores para el CW para edificios de uno, dos y tres pisos para cada una de las distintas clases de obstrucciones. En el cálculo de los valores de las Tablas 6.7 y 6.9, se tomaron los valores de la altura de uno, dos y tres pisos como 2,44m, 4,88m y 7,32m respectivamente; además se consideró al terreno como un área rural con obstáculos dispersos.





Tabla 6.5. Areas efectivas de infiltración (Aplicación para edificios bajos, de hasta 3 pisos)

Componentes del Edificio	Unidad (Áreas de infiltración)	Mejor estimado	Rango
<i>Cielorraso</i>			
- general	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.8	0.79 - 2.8
- con declive	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.19	0.046 - 0.19
- hueco para luces	cm <sup>2</sup> /unid.	10	1.5 - 21
- lámparas colgantes	cm <sup>2</sup> /unid.	0.82	
<i>Puertas</i>			
- simple, sin burlete	cm <sup>2</sup> /unid.	21	12 - 53
- simple, con burlete	cm <sup>2</sup> /unid.	12	4 - 27
- doble, sin burlete	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	11	7 - 22
- doble, con burlete	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	8	3 - 23
- interior (escaleras)	cm <sup>2</sup> /lmc	0.9	0.25 - 1.5
- rendija para correo	cm <sup>2</sup> /lmc	4	
<i>Paredes (exterior)</i>			
- de concreto	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.5	0.048 - 1.8
- pared con ladrillos de arcilla (revocada)	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.68	0.05 - 2.3
- panel de concreto encastrado	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.2	0.28 - 1.65
- bloque de concreto de baja densidad(sin revocar)	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	3.5	1.3 - 4
- bloque de concreto de baja densidad(pintado)	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.1	0.52 - 1.1
- bloque de concreto de alta densidad(sin revocar)	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.25	
<i>Ventanas</i>			
- horizontales de proyección, sin burlete	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	1.6	0.8 - 2.4
- horizontales de proyección, con burlete	cm <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	0.8	0.4 - 1.2
- de abrir, sin burlete	cm <sup>2</sup> /lmc	0.28	
- de abrir, con burlete	cm <sup>2</sup> /lmc	0.24	0.1 - 3
- con dos hojas corredizas verticales, sin burlete	cm <sup>2</sup> /lmc	2.5	0.86 - 6.1
- con dos hojas corredizas verticales, sin burlete	cm <sup>2</sup> /lmc	0.65	0.2 - 1.9
- con una hoja vertical corrediza, con burlete	cm <sup>2</sup> /lms	0.87	0.62 - 1.24
- corrediza horizontal, con burlete	cm <sup>2</sup> /lms	0.67	0.2 - 2.06
- corrediza horizontal, de madera	cm <sup>2</sup> /lms	0.44	0.27 - 0.99
- corrediza horizontal, de aluminio	cm <sup>2</sup> /lms	0.8	0.27 - 2.06
- doble vidriado	cm <sup>2</sup> /lms	0.018	0.009 - 0.018
- umbral de la ventana	cm <sup>2</sup> /lmc	0.21	0.139 - 0.212
<i>Salidas eléctricas/ enchufes</i>			
- sin tapas	cm <sup>2</sup> /unid.	2.5	0.5 - 6.2
- con tapas	cm <sup>2</sup> /unid.	0.15	0.08 - 3.5
<i>Cañerías y cableados</i>			
- no sellados	cm <sup>2</sup> /unid.	6	2 - 24
- sellados	cm <sup>2</sup> /unid.	2	1 - 2
<i>Respiraderos</i>			
- baño con respiradero cerrado	cm <sup>2</sup> /unid.	10	2.5 - 20
- baño con respiradero abierto	cm <sup>2</sup> /unid.	20	6.1 - 22

Notas: 1. lmc = metro lineal por rendija, lms = metro lineal por hoja de ventana.

2. Datos basados en una diferencia de presión de 4 Pa y Cd = 1.

3. Fuente: ASHRAE Fundamental Handbook 1997, Capítulo 25



Componente	Descripción	Tamaño o número	$A_L$ por unidad =	$A_L, \text{cm}^2$
Umbral de ventanas		42 m	0,21 $\text{cm}^2/\text{m}$	8,82
Salidas eléctricas	C/tapa	20	0,15 $\text{cm}^2/\text{unid.}$	3
Ventanas	Horizontales de proyección con burlete	13 $\text{m}^2$	0,8 $\text{cm}^2/\text{m}^2$	10,4
Puertas exteriores	Doble sin burlete	6 $\text{m}^2$	11 $\text{cm}^2/\text{m}^2$	66
Respiradero del baño	abierto	1	20 $\text{cm}^2/\text{unid.}$	20
Cañerías	Selladas	7	2 $\text{cm}^2/\text{unid.}$	14
Área total calculada de infiltración de aire del edificio=				122,22 $\text{cm}^2$

Tabla 6.6. Ejemplo de cálculo del área efectiva de infiltración de un edificio basado en las áreas de infiltración de los distintos componentes

	Cantidad de pisos		
	Uno	Dos	Tres
Coefficiente Stack	0,00188	0,00376	0,00564

Tabla 6.7. Coeficiente Stack  $C_s$  [ $\text{m}^6/\text{h}^2\text{cm}^4\text{K}$ ]

Clase	Descripción
1	Edificio expuesto
2	Campo con algunos obstáculos
3	Barrio residencial
4	Área suburbana
5	Centro de la ciudad

Tabla 6.8. Clases de obstrucciones del entorno local

Clase de obstrucciones	Cantidad de pisos		
	Uno	Dos	Tres
1	0,00143	0,00544	0,00640
2	0,00319	0,00421	0,00495
3	0,00226	0,00299	0,00351
4	0,00135	0,00178	0,00209
5	0,00041	0,00054	0,00063

Tabla 6.9. Coeficiente debido al viento  $C_w$  [ $\text{m}^4\text{s}^2/\text{h}^2\text{cm}^4$ ]

### Ejemplo

Estimar el caudal y las renovaciones por hora de un edificio de dos pisos. El edificio tiene un área efectiva de infiltración de 845  $\text{cm}^2$  y un volumen de 340  $\text{m}^3$ , y está ubicado en un barrio residencial (obstrucción de clase 3). La temperatura interior es de 20°C y la temperatura exterior de diseño es de 30°C. Asumir una velocidad de diseño del viento de 4  $\text{m/s}$ .

De las Tablas 6.5 y 6.9 se obtienen  $C_s = 0,00376$  y  $C_w = 0,00299$  respectivamente por lo que el flujo de aire es:

$$Q = 845 \sqrt{0,00376 \cdot 10 + 0,00299 \cdot 4^2} = 247 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Por lo que las renovaciones por hora son iguales a  $Q/\text{Vol.} = 247/340 = 0,73$  renovaciones/hora.

## El método de Aynsley

Aynsley propuso un método simple para la predicción del flujo global de aire para el caso de ventilación cruzada.

Asumiendo dos aberturas principales en fachadas opuestas del edificio, el método requiere el  $C_p$  (coeficiente de presión) de cada fachada para calcular el caudal de aire que atraviesa el edificio. Teniendo en cuenta la conservación de masas entre las dos aberturas, se deriva la siguiente expresión para el cálculo del flujo de aire:

$$Q = \sqrt{\frac{Cp_1 - Cp_2}{\frac{1}{A_1^2 Cd_1^2} + \frac{1}{A_2^2 Cd_2^2}}} V_z$$

donde  $Cd_1$  y  $Cd_2$  son los coeficientes de descarga dados en función de las configuraciones de las aberturas,  $A_1$  y  $A_2$  son las área de las aberturas 1 y 2 respectivamente y  $V_z$  es la velocidad de referencia del viento.

El principal interés de este método es su simplicidad y eficiencia para dar un valor estimado del orden de magnitud del flujo de aire en la ventilación cruzada.

## El método de De Gidds y Phaff

En este método se analizan los efectos del viento y de la temperatura de manera conjunta y por separado. Fue desarrollado por Phaff y De Gidds, ellos condujeron experimentos en la planta baja de edificios de tres pisos en distintas localidades, usando técnicas de gases, para medir la influencia del efecto del viento y la temperatura (efecto stack) en los caudales de aire a través de una abertura.

Con los resultados obtenidos crearon este modelo empírico que cuantifica el efecto combinado de la temperatura, el viento y la turbulencia para el caso de ventilación con abertura en una sola fachada.

Para representar la ventilación natural provista en ausencia de viento, una constante de turbulencia fue adicionada para el cálculo del flujo de aire. Esta constante de turbulencia es exclusiva de este método, ya que la mayoría de las correlaciones existentes para la ventilación natural fallan al predecir el flujo de aire en ausencia del viento.

El efecto de la turbulencia fue cuantificado gracias a las observaciones de los valores de velocidad del aire fluctuantes. El modelo calcula una velocidad efectiva ( $U_{eff}$ ), que se refiere al flujo a través de media ventana abierta, y deriva directamente del caudal de aire medido ( $Q$ ). En forma general la velocidad efectiva se define como:

$$U_{eff} = \frac{Q}{A/2} = \sqrt{\frac{2}{g} (\Delta P_{wind} + \Delta P_{stack} + \Delta P_{turb})}$$

que toma la siguiente forma:

$$U_{eff} = \frac{Q}{A/2} = \sqrt{C_1 U_{met}^2 + C_2 H \Delta T + C_3}$$

donde  $U_{met}$  es la velocidad del viento meteorológica,  $H$  es la altura de la abertura,  $C_1$  es un coeficiente adimensional que depende del viento;  $C_2$  es una constante debida al efecto Stack y  $C_3$  es una constante de turbulencia. EL término  $C_3$  es equivalente a una presión efectiva de turbulencia que provee ventilación en ausencia del viento y del efecto Stack. Teniendo en cuenta que  $C_1=0,001$ ;  $C_2=0,0035$  y  $C_3=0,01$  el caudal de aire se puede obtener con la siguiente expresión:

$$Q = \frac{A}{2} \sqrt{0,001U_{met}^2 + 0,0035H\Delta T + 0,01}$$

donde:

Q = Caudal de aire que atraviesa la abertura [m<sup>3</sup>/s]

A = Area de la abertura [m<sup>2</sup>]

U<sub>met</sub> = Velocidad promedio del viento medida por la estación meteorológica local [m/s]

H = Altura de la abertura [m]

ΔT = Diferencia de temperatura promedio entre el interior y el exterior [°C o °K]

## Métodos de cálculo empíricos para la estimación de velocidades de aire dentro de edificios ventilados naturalmente

El conocimiento acerca de las características del movimiento del aire son esenciales para los diseñadores de edificios. La velocidad del aire incrementa la pérdida de calor corporal tanto convectivo como evaporativo incrementando el confort térmico.

Estudios recientes también demostraron que el impacto de la intensidad de la turbulencia del aire puede ser significativo y es posible incorporar los efectos de la turbulencia en los modelos de confort térmico.

Importantes investigaciones han sido llevadas a cabo en los últimos 50 años para desarrollar metodologías para predecir el movimiento del aire inducido por el viento dentro de los edificios.

Las técnicas propuestas pueden ser clasificadas dentro de cinco categorías de acuerdo a la metodología usada:

- investigaciones basada en experimentos a escala real;
- investigaciones basadas en simulaciones numéricas computarizadas;
- métodos basados en datos tabulados obtenido de estudios paramétricos en túneles de viento;
- métodos hechos para el uso de los coeficientes de descarga del viento;
- métodos basados en la medición directa de las velocidades de aire interior en modelos a escala del edificio investigado situados en túneles de viento.

Las principales características, ventajas y desventajas, así como las limitaciones, de algunas de las metodologías propuestas serán discutidas a continuación.

## El método de Givonni

Givonni propuso un método general de correlación, basado en datos experimentales, para calcular la velocidad promedio de aire interior en recintos de área cuadrada, con aberturas de entradas iguales a las de salida ubicadas en paredes opuestas. De acuerdo con el método la velocidad promedio dentro de un recinto está dada por la siguiente expresión:

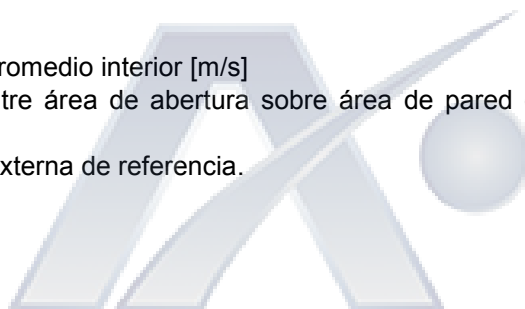
$$V_i = 0,45(1 - e^{-3,48X})V_r$$

Donde:

V<sub>i</sub> es la velocidad promedio interior [m/s]

X es la relación entre área de abertura sobre área de pared donde la abertura se ubica. [adimensional]

V<sub>r</sub> es la velocidad externa de referencia.



## Métodos basados en datos tabulados

Es bien conocido que la velocidad de aire dentro de un edificio no es uniforme de ningún modo. Estudios en distintos modelos claramente demuestran áreas con torbellinos y áreas de baja velocidad.

Sin embargo, cuando se estudia la eficiencia global de la ventilación natural en un edificio, es más conveniente considerar un valor promedio de velocidad de aire interior.

Estudios en túneles de vientos hicieron posible comparar velocidades de aire interior para recintos ventilados naturalmente bajo diferentes direcciones de viento y con diferentes número de aberturas y ubicaciones.

Melaragno ha propuesto valores del promedio y máximas velocidades de aire interior para recintos con una sola abertura, diferentes relaciones entre ancho de la abertura sobre ancho de la pared y distintas direcciones del viento.(Tabla 6.10).

Dirección del viento	Ancho de abertura/ ancho de pared		
	1/3	2/3	3/3
Viento perpendicular a la abertura	13	13	16
Dirección del viento oblicua en el frente	12	15	23
Dirección del viento oblicua en la parte trasera	14	17	17

Tabla 6.10. Efecto del tamaño de las aberturas en recintos sin ventilación cruzada sobre la velocidad promedio de aire interior (% de la velocidad exterior del aire).

Las velocidades de aire interior están expresadas como un porcentaje de la velocidad del aire libre exterior.

Se pueden destacar dos observaciones de la tabla, una es que en los recintos donde hay una sola abertura, el tamaño de las ventanas tiene muy poca influencia en la velocidad de aire interior, la otra es en el caso de vientos oblicuos con respecto a la abertura hay un efecto apreciable con el aumento del tamaño de la abertura.

Esto se debe a la distribución de presiones, en el caso de vientos oblicuos hay variaciones de presión sobre el ancho de la pared, por lo que el aire puede entrar por una parte de la abertura y salir por otra parte de la misma.

En cambio con vientos perpendiculares las diferencias de presión sobre la pared son muy pequeñas para que el aumento del tamaño de aberturas tenga un efecto más notable. Este efecto se vio en la figura 5.2.

El mismo autor propuso valores de las principales velocidades de aire interior para distintas configuraciones de ventilación cruzada sin divisiones internas (Tablas 6.12 a 6.14).

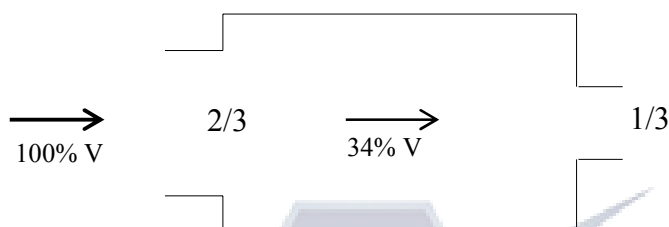


Figura 6.11. Efectos en el tamaño de las aberturas de entrada y salida en recintos con ventilación cruzada con aberturas en paredes opuestas.

Ancho de la abertura de entrada / ancho de la pared	Ancho de la abertura de salida / ancho de la pared	V <sub>prom.</sub> (%)
1/3	1/3	35
1/3	2/3	39
1/3	1	44
2/3	1/3	34
2/3	2/3	37
2/3	1	35
1	1/3	32
1	2/3	36
1	1	47

Tabla 6.12. Efectos en el tamaño de las aberturas de entrada y salida en recintos con ventilación cruzada con aberturas en paredes opuestas, con vientos perpendiculares.

Como se ve incrementando el tamaño de la abertura de salida, manteniendo constante la de entrada, se produce un muy pequeña mejora en la circulación.

Sin embargo, la máxima eficiencia se obtiene cuando ambas aberturas tiene el máximo tamaño al mismo tiempo, mientras que la mínima eficiencia se obtiene cuando las áreas de entrada son máximas y las de salida mínimas.

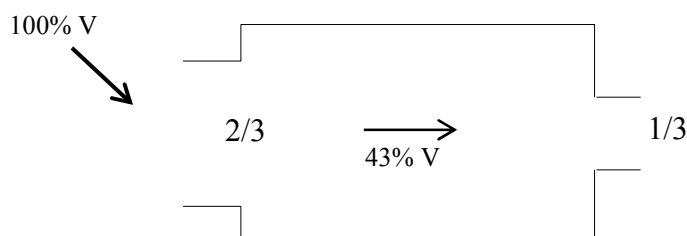


Figura 6.13. Aberturas en paredes opuestas, con viento oblicuo.

Ancho de la abertura de entrada / ancho de la pared	Ancho de la abertura de salida / ancho de la pared	V <sub>prom.</sub> (%)
1/3	1/3	42
1/3	2/3	40
1/3	1	44
2/3	1/3	43
2/3	2/3	51
2/3	1	59
1	1/3	41
1	2/3	62
1	1	65

Tabla 6.14. Efectos en el tamaño de las aberturas de entrada y salida en recintos con ventilación cruzada con aberturas en paredes opuestas, con vientos oblicuos.

Comparando el efecto del viento a 45° con respecto a la abertura de entrada, con el caso de viento perpendicular, se demuestra que los vientos oblicuos tiene mayor eficiencia de ventilación en todos los casos.

Esto se debe a que cuando el viento es perpendicular, el flujo principal entra por la abertura de entrada y se dirige directamente a la salida produciendo turbulencia en los rincones de la pared opuesta pero el resto del recinto se ve muy poco afectado, en cambio, cuando el viento es oblicuo (a 45°) la mayoría del volumen de aire toma un movimiento turbulento circular alrededor del recinto, incrementando el flujo de aire en las paredes laterales y en los rincones.

Además se vuelve a demostrar que aún en el caso de dirección de viento oblicua, la ventilación más eficiente se obtiene cuando ambas aberturas son máximas.

Cuando las aberturas de entrada y salida se encuentran en paredes adyacentes, el efecto debido al tamaño relativo de las aberturas es diferente (Fig. 6.15). La velocidad promedio de aire interior en recintos con ventilación cruzada con aberturas en paredes adyacentes y vientos perpendiculares y oblicuos está dada en la Tabla 6.16.

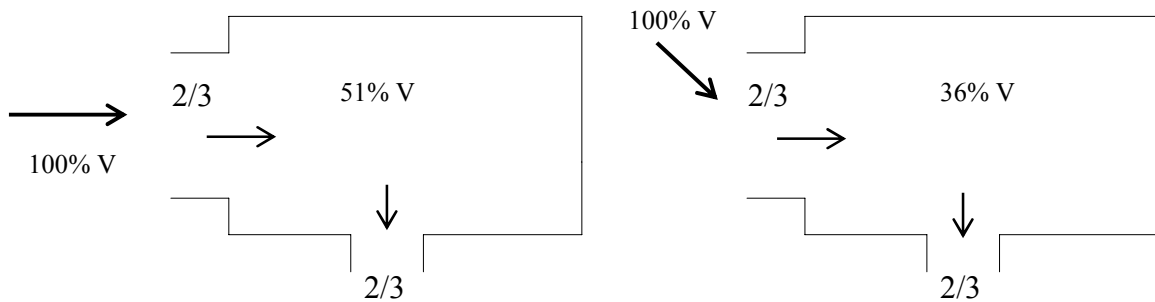


Figura 6.15. Efectos en el tamaño de las aberturas de entrada y salida en recintos con ventilación cruzada con aberturas en paredes adyacentes y vientos perpendiculares y oblicuos a la abertura de entrada.

Ancho de la abertura de entrada / ancho de la pared	Ancho de la abertura de salida / ancho de la pared	V <sub>prom.</sub> (%)	
		Viento perpendicular	Viento oblicuo
1/3	1/3	45	37
1/3	2/3	39	40
1/3	1	51	45
2/3	1/3	51	36
1	1/3	50	37

Tabla 6.16. Efectos en el tamaño de las aberturas de entrada y salida en recintos con ventilación cruzada con aberturas en paredes adyacentes y vientos perpendiculares y oblicuos a la abertura de entrada.

Para vientos perpendiculares la eficiencia mínima ocurre cuando la relación de la abertura de entrada es 1/3 y la de salida 2/3. Para el caso del viento a 45° la máxima eficiencia se obtiene cuando la relación de la abertura de entrada es 1/3 y la de salida 1, mientras que la mínima eficiencia ocurre para una relación de abertura de entrada de 2/3 y la de salida 1/3.

Es interesante destacar que cuando las aberturas se encuentran en paredes adyacentes, la mejor eficiencia de ventilación se obtiene con vientos perpendiculares a la abertura de entrada y no con vientos oblicuos como ocurría en el caso de aberturas en paredes opuestas.

## **La metodología CSTB**

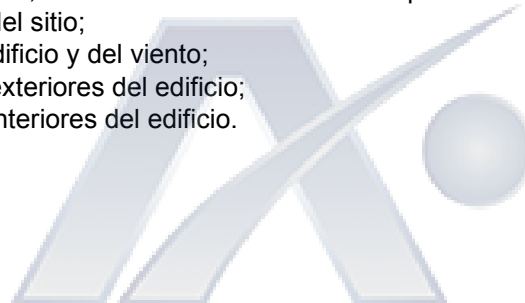
La metodología propuesta por el CSTB (Centre Scientifique et Technique du Batiment) está basada en datos obtenidos de modelos a escala en túneles de viento para la predicción del movimiento de aire inducido por el viento. El método se basa en la evaluación del coeficiente global de ventilación, C<sub>G</sub>, definido como:

$$C_G = \frac{V_i}{V_{1,5}}$$

donde: V<sub>i</sub> es la velocidad principal de aire interior a 1,5m de altura y V<sub>1,5</sub> es la velocidad del aire exterior a la misma altura.

De acuerdo al método, el coeficiente de ventilación depende directamente de:

- las características del sitio;
- la orientación del edificio y del viento;
- las características exteriores del edificio;
- las características interiores del edificio.



Para evaluar estas variables el método propone la determinación de cuatro coeficientes:  $C_{site}$ ,  $C_{orientation}$ ,  $C_{arch. Ext.}$ ,  $C_{aero. Inter.}$ . Entonces el coeficiente global de ventilación, CG de un recinto dado es igual al mínimo de los cuatro coeficientes previamente definidos:

$$C_G = \min(C_{site}, C_{orientation}, C_{arch. Ext.}, C_{aero. Inter.})$$

Para la evaluación de cada coeficiente, se propone una metodología específica, un poco compleja pero completa, basada en la performance relativa de ventilación de una maqueta de referencia,  $C_0$ ; por ej.  $C_x = f(C_0)$ , la cual es medida en un túnel de viento y se encontró que  $C_0 = 0,6$ .

Es decir, todos los valores de los coeficientes estarán referenciados a este valor  $C_0$ . La maqueta de referencia, para la cual se determinó el  $C_0$ , es una construcción sin divisiones internas de 30m<sup>2</sup>, con una altura de cielorraso que va de los 3m de altura hasta los 4m, ya que el techo tiene una inclinación de 10°. Las 2 aberturas, ubicadas en paredes opuestas, representan el 30% del área de pared, mientras que el eje del edificio es paralelo al eje principal del viento dominante. Finalmente se considera que la maqueta está ubicada en un terreno llano libre de obstrucciones.

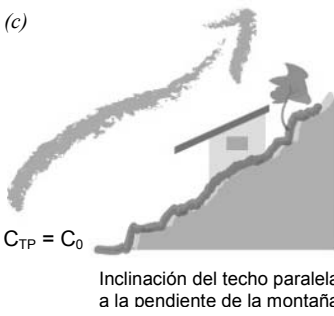
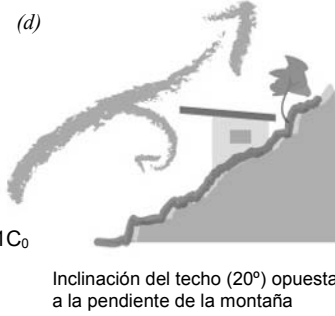
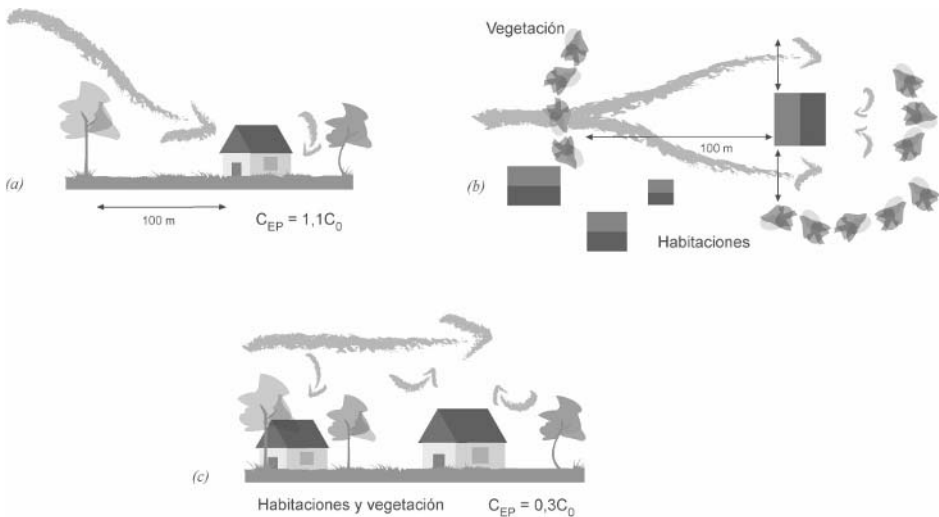
El método examina el caso de los edificios ubicados en zonas rurales o sitios con una baja o mediana densidad urbana. Es considerado que la ventilación natural no es una técnica efectiva para sitios que tienen características de muy alta densidad urbana.

### **C<sub>SITE</sub> (Características del sitio)**

Para evaluar  $C_{SITE}$ , se deben estimar primero los coeficientes  $C_{TP}$ ,  $C_{EP}$  y  $C_{PM}$ .

$C_{TP}$ (Topografía del sitio)	<p>Sitios desfavorables</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonas a favor del viento en la base de una colina; <math>C_{TP} = 0,6C_0</math>;</li> <li>• Zonas en contra del viento en la base de una colina; <math>C_{TP} = 0,5C_0</math>;</li> <li>• Valles pobremente orientados a los vientos locales; <math>C_{TP} = 0,3C_0</math></li> <li>• Acantilados; <math>C_{TP} = 0,7C_0</math>.</li> </ul> <p>Sitios favorables</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zonas entre dos colinas con una orientación apropiada hacia los vientos locales; <math>C_{TP} = 1,1C_0</math> (Fig 6.17a);</li> <li>• Zonas sobre la ladera de una montaña, con la inclinación del techo mayor que la pendiente de la montaña, ver siguientes casos; <math>C_{TP} = 1,2C_0</math> (Fig 6.17b);</li> <li>• Zonas sobre la ladera de una montaña con un techo inclinado paralelo a la pendiente de la montaña; <math>C_{TP} = C_0</math> (Fig 6.17c);</li> <li>• Zonas sobre la ladera de una montaña con un techo inclinado (20°) opuesto a la pendiente de la montaña; <math>C_{TP} = 1,3C_0</math> (Fig. 6.17d).</li> </ul> <div style="text-align: center;"> </div>
---------------------------------	--



	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>(c)</p>  <p><math>C_{TP} = C_0</math></p> <p>Inclinación del techo paralela a la pendiente de la montaña</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>(d)</p>  <p><math>C_{TP} = 1.1C_0</math></p> <p>Inclinación del techo (20°) opuesta a la pendiente de la montaña</p> </div> </div> <p>Figura 6.17. Impacto del sitio: la influencia de la topografía</p>
<p><math>C_{EP}</math> (Obstrucciones del entorno)</p>	<p>Para el caso de sitios rurales o de baja densidad urbana, la presencia de árboles altos u otras obstrucciones, de 5 a 10m. de altura, en frente de la fachada donde actúa el viento reduce significativamente el potencial de la ventilación natural, por lo que en ese caso el edificio debería ubicarse lo más lejos posible de la obstrucción.</p> <p>El método propone lo siguiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si la obstrucción es paralela al eje de acción del viento, el edificio debería ubicarse a una distancia mínima de 12 veces la altura de la obstrucción (Fig. 6.18a);</li> <li>• Si la obstrucción es perpendicular al eje de acción del viento, el edificio debería ubicarse a una distancia igual a 4 veces la altura de la obstrucción (Fig. 6.18b);</li> <li>• Si las condiciones anteriores se cumplen, entonces <math>C_{EP} = C_0</math>; sino <math>C_{EP}</math> toma valores entre <math>0,1C_0</math> y <math>0,5C_0</math> (Fig. 6.18c).</li> </ul> <div style="text-align: center;">  <p>(a) <math>C_{EP} = 1,1C_0</math></p> <p>(b) <math>C_{EP} = 1,1C_0</math></p> <p>(c) <math>C_{EP} = 0,3C_0</math></p> </div> <p>Figura 6.18. Impacto del sitio: influencia de las obstrucciones del entorno</p>
<p><math>C_{PM}</math> (Planta urbana del sitio)</p>	<p>Para un edificio aislado, el método considera <math>C_{PM} = C_0</math>. La metodología examina dos tipos de organización relativa de edificios:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Organización de los edificios en líneas paralelas (Fig.6.19a-c);</li> <li>• Organización de los edificios en forma de <math>\Pi</math> (Fig. 6.19d).</li> </ul> <p>La organización de los edificios en líneas paralelas es caracterizada</p>

por el número de líneas,  $n$ , la distancia,  $a$ , entre los edificios de la misma línea y la distancia,  $b$ , entre líneas sucesivas.

Si el ángulo de incidencia del viento es paralelo al eje de las aberturas,  $\theta=0$ , para los edificios de la primera línea el coeficiente  $C_{PM}$  puede ser obtenido como función de la distancia  $a$ , de la Figura 6.19a. Como se muestra, para  $a=3m$ ,  $C_{PM} = 1,3C_0$ .

Para los edificios ubicados en las otras líneas y para el mismo ángulo de incidencia, el coeficiente  $C_{PM}$  puede ser obtenido como función de las distancias  $a$  y  $b$ , de la Figura 6.19b. Como se muestra para  $a=2m$  y  $b>30m$ , o  $a=7$  u  $8m$  y  $b>15m$ ,  $C_{PM} = C_0$ .

De acuerdo al método, los mismos resultados son obtenidos para ángulos de incidencia de  $\pm 20^\circ$ . Si el ángulo de incidencia está entre  $\pm 45^\circ$  (Fig. 6.19c), entonces:

$$C_{PM (\theta=\pm 45^\circ)} = 0,75C_{PM (\theta=0)}$$

El método propone  $C_{PM} = 1,2C_0$  para un organización en forma de  $\Pi$  (Fig. 6.19d) y  $C_{PM} = 0,6C_0$  a  $0,7C_0$  si el ángulo de incidencia del viento es paralelo al eje de las aberturas del edificio.

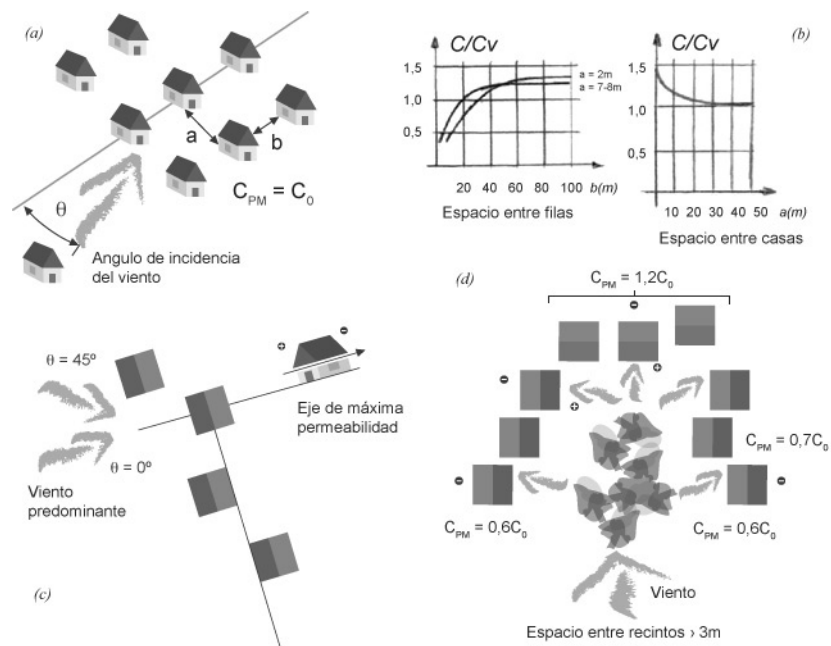


Figura 6.19. Impacto del sitio: influencia de la posición relativa de los edificios

Cuando  $C_{TP}$ ,  $C_{EP}$  y  $C_{PM}$  han sido calculados, el coeficiente  $C_{SITE}$  es calculado de acuerdo a la siguiente metodología:

1. Si las condiciones para la distancia de los obstáculos vecinos se cumplen entonces  $C_{SITE} = C_{EP} = C_0$ , sino  $C_{EP} < C_0$ . Cuando  $C_{EP} = 0,1$  a  $0,5C_0$  el potencial para la ventilación natural es bajo. Si las condiciones se cumplen y  $C_{TP} \geq C_0$  mientras que las distancias  $a$  y  $b$  entre los edificios vecinos son apropiadas, entonces  $C_{SITE} = (C_{PM} + C_{TP})/2$ .
2. Si la primera condición se cumple y  $C_{TP} < C_0$ , entonces  $C_{SITE} = C_{TP}$ .

3. Si el edificio se encuentra en la ladera de una montaña, con una inclinación de techo de  $20^\circ$  opuesta a la pendiente de la montaña, y la distancia con los edificios vecinos es apropiada, mientras que el ángulo de incidencia del viento es paralelo al eje de las aberturas  $C_{SITE} = 1,5C_0$ .
4. Si el edificio se encuentra en la ladera de una montaña, con una inclinación de techo paralela a la pendiente de la montaña, y la distancia con los edificios vecinos es apropiada, mientras que el ángulo de incidencia del viento es paralelo al eje de las aberturas  $C_{SITE} = 1,3C_0$ .

### **C<sub>ORIENTATION</sub> (Orientación del edificio con respecto al viento)**

El impacto del ángulo de incidencia del viento depende de los siguientes parámetros:

- El ángulo  $\theta$  entre el eje de las aberturas y el eje del viento (Fig. 6.20);
- La naturaleza y características de la planta urbana.

Para estimar el coeficiente,  $C_{orientation}$ , se propone la siguiente metodología:

1. Si  $\theta = 0^\circ$  o  $\theta$  es igual o menor a  $\pm 20^\circ$ , entonces  $C_{orientation} = C_0$ .
2. Si  $\theta = \pm 45^\circ$ , entonces  $C_{orientation} = 0,75C_0$ .
3. Si  $\theta = 90^\circ$ , entonces  $C_{orientation} = 0,5C_0$ .

Para otros valores de  $\theta$  se debe interpolar.

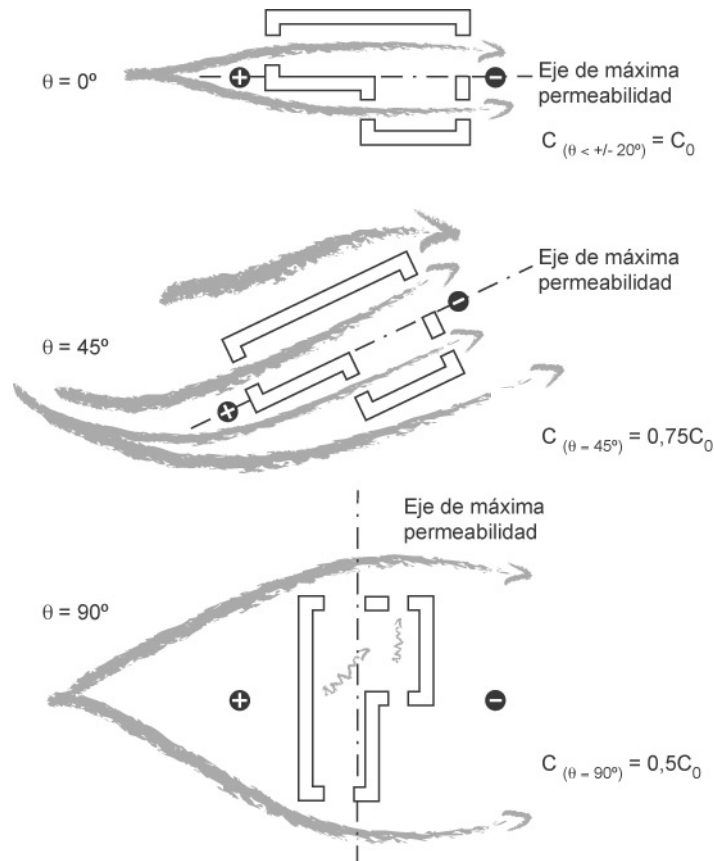
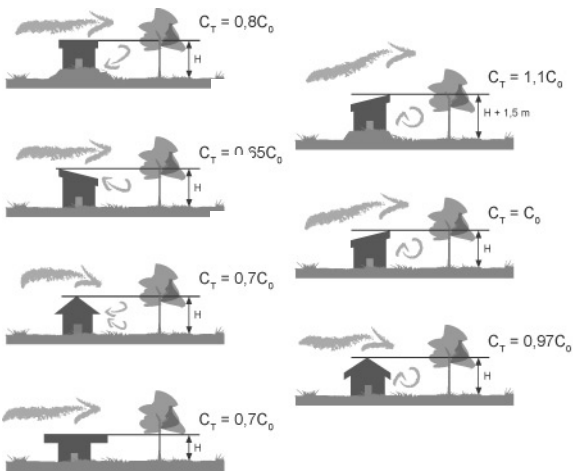
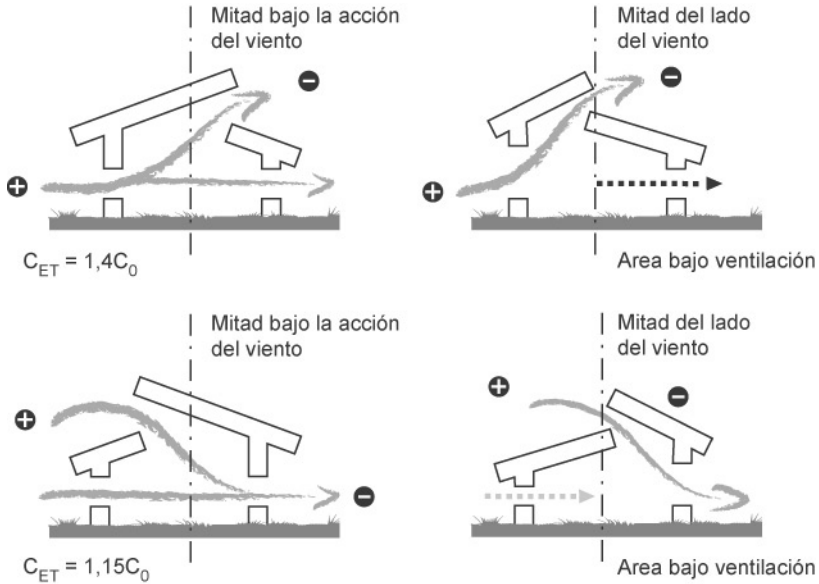
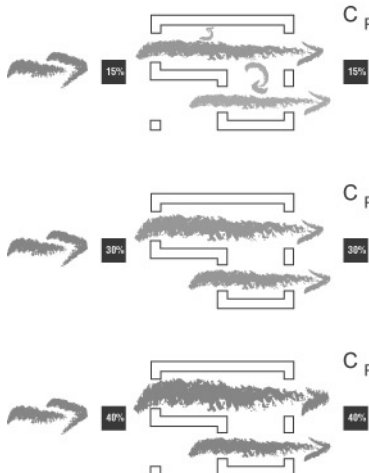


Figura 6.20. Impacto del ángulo de incidencia

**C<sub>ARCHI</sub> (Características externas del edificio)**

Para evaluar C<sub>ARCHI</sub> primero se deben estimar C<sub>T</sub>, C<sub>ET</sub>, C<sub>P</sub>, C<sub>PI</sub> y C<sub>J</sub>.

<p>C<sub>T</sub> (Características del techo)</p>	<p>El coeficiente C<sub>T</sub> está dado por el método para construcciones ubicadas en pisos llanos o inclinados. Para construcciones en pisos llanos se examinan los casos que aparecen en la Figura 6.21.</p>  <p>Para edificios ubicados en la ladera de la montaña cuando la inclinación del techo es opuesta a la pendiente de la montaña, el método propone <math>C_T = 1,3C_0</math>.</p>
<p>C<sub>ET</sub> (Efecto de la existencia de un techo con aberturas)</p>	<p>Un techo con aberturas es eficiente cuando una de las aberturas se ubica en la fachada donde actúa el viento y la otra en la fachada opuesta. El área total de aberturas debería ser de unos 3 a 4m. por cuarto.</p> <p>El método examina dos casos, mostrados en la Figura 6.22.</p> 
<p>C<sub>P</sub> (Características de las ventanas)</p>	<p>Para mejorar la performance de la ventilación natural, el eje de las aberturas principales debería ser paralelo al eje de los vientos predominantes.</p> <p>La relación entre la superficie de aberturas en una fachada y la superficie de la fachada es definida como la porosidad de dicha fachada. Los siguientes valores del coeficiente C<sub>P</sub> son propuestos en función de las</p>

	<p>porosidades de las fachadas donde actúa el viento y en las fachadas opuestas (Fig. 6.23):</p>  <p> <math>C_p = 0,7C_0</math>  <math>C_p = C_0</math>  <math>C_p = 1,2C_0</math> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Porosidad del 15% → <math>C_p = 0,7C_0</math>;</li> <li>○ Porosidad del 30% → <math>C_p = C_0</math>;</li> <li>○ Porosidad del 40% → <math>C_p = 1,2C_0</math>.</li> </ul> <p>Figura 6.23. Impacto de las características externas del edificio: el efecto de la naturaleza y características de las aberturas</p> <p>Si la porosidad de las fachadas es distinta, entonces la porosidad de la fachada opuesta a la acción del viento debería ser la mayor. Si, por ejemplo, la porosidad de la fachada donde actúa el viento es del 40% y en la fachada opuesta del 30% entonces <math>C_p = 1,1C_0</math>, mientras que para el caso inverso, <math>C_p = 1,3C_0</math>.</p> <p>El efecto de las ventanas laterales siempre es positivo. Por ejemplo, para un edificio con una porosidad del 30% para ambas fachadas y porosidad del 10% para las aberturas laterales, <math>C_p = 1,2C_0</math>.</p> <p>Si la porosidad de la fachada opuesta a la acción del viento es cero, entonces posibles aberturas laterales compensan, no totalmente la ausencia de dicha abertura. Por ejemplo si la porosidad de la fachada donde actúa el viento es del 30%, y de la opuesta es 0%, con una porosidad del 20% de las fachadas laterales, entonces <math>C_p = 0,7C_0</math>.</p>
<p><math>C_{PL}</math> (Efecto de pilotes)</p>	<p>Si se utilizan pilotes, que eleven la construcción a 1m. de altura y el pasaje del aire es libre, se incrementará la eficiencia de ventilación. El método propone <math>C_{PL} = 1,2C_0</math>.</p>
<p><math>C_J</math> (Efecto de aleros)</p>	<p>Los aleros, cuando están ubicados apropiadamente, incrementan la diferencia de presión y facilitan el movimiento del aire a través del edificio. De acuerdo con el método, la altura de los aleros debería ser de por lo menos 2,5m. y su largo mínimo de 2m. Si existe un alero con estas características, el método propone <math>C_J = 1,1C_0</math>.</p>

Si todos los coeficientes  $C_T$ ,  $C_{ET}$ ,  $C_P$ ,  $C_{PL}$  y  $C_J$  están determinados, entonces una metodología precisa es propuesta para estimar  $C_{archi}$ . La metodología ha sido desarrollada para dos configuraciones:

Para un edificio monovolúmen con aberturas en la fachada donde actúa el viento o en la fachada opuesta:

1. La porosidad de la fachada donde actúa el viento y la opuesta deben ser mayor al 15%. Si la porosidad de la fachada opuesta a la acción del viento es cero, la porosidad de las fachadas laterales deberá ser de por lo menos el 20%. En este caso y si las condiciones 2-4 no se cumplen, entonces  $C_{archi} = C_p$ . Si esta condición no se cumple totalmente, entonces el método considera que la arquitectura del edificio no es adecuada para la utilización de ventilación natural.

- Si se cumple la condición 1 y el recinto tiene un techo con aberturas bien diseñadas, entonces  $C_{\text{archi}} = (C_P + C_{\text{ET}})/2$ .
- Si la construcción cuenta con pilotes o aleros, entonces  $C_{\text{archi}} = (C_P + C_{\text{PL}} + C_T)/3$  o  $C_{\text{archi}} = (C_P + C_J + C_T)/3$ . Notar que para las construcciones que están elevadas  $C_T = C_0$ .
- Si la porosidad de la fachada donde actúa el viento y la opuesta es del 30% y el edificio está construido sobre la ladera de una montaña donde la pendiente del techo es opuesta a la de la montaña, el método propone  $C_{\text{archi}} = 1,3C_0$ .

Para un edificio multiespacio:

- Si no hay aleros ni pilotes, entonces  $C_{\text{archi}} = C_{\text{ET}}$ .
- Si la construcción posee aleros o pilotes, entonces  $C_{\text{archi}} = (C_{\text{ET}} + C_J)/2$  o  $C_{\text{archi}} = (C_{\text{ET}} + C_{\text{PL}})/2$ .

### **C<sub>AERO.INTER.</sub> (Características internas del edificio)**

Las características internas del edificio deberían permitir el pasaje de aire a través del edificio y mantener una relativa homogeneidad dentro del edificio. Los parámetros que deberían ser tenidos en cuenta son, de acuerdo al método, los siguientes:

- Las divisiones internas, para tener en cuenta su efecto el método propone el uso del coeficiente  $C_c$ .
- Los muebles, para su efecto el método no propone ninguna metodología específica.

#### *Evaluación de $C_c$ (el rol de las divisiones internas)*

En orden, de facilitar el flujo de aire a través del edificio, las divisiones internas deberían ser paralelas al flujo de aire (Fig. 6.24a). En este caso  $C_c = C_0$ . Si las divisiones internas, puertas y otras aberturas internas son paralelas al flujo de aire y presentan una porosidad mayor al 50%, entonces  $C_c = 0,9C_0$ .

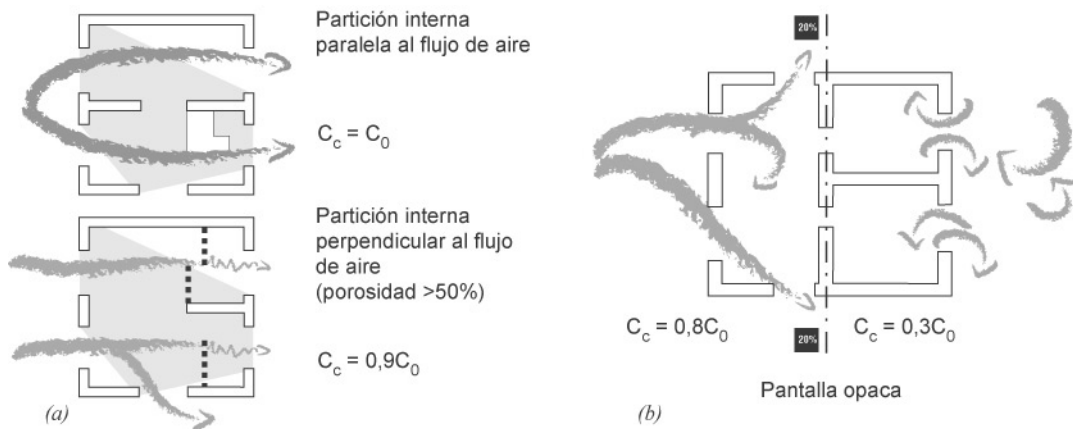


Figura 6.24. El impacto de las características internas del edificio: el rol de las divisiones internas

Si las divisiones internas son perpendiculares al flujo de aire (Fig. 6.24b) y sus porosidades son muy bajas, menores del 20%, o son opacas, entonces para los cuartos opuestos a la acción del viento  $C_c = 0,3C_0$ .

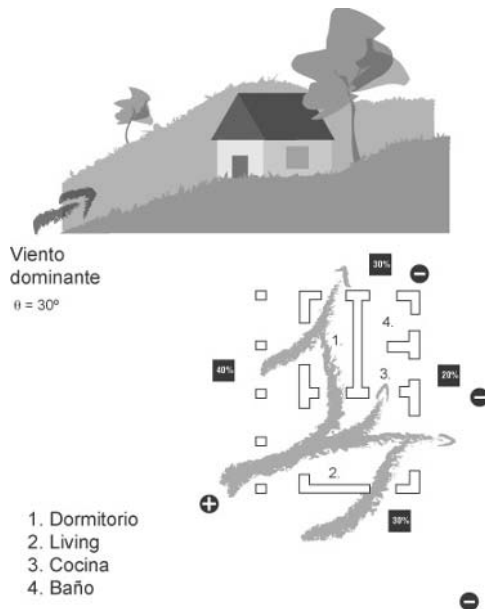
En este caso el cuarto donde actúa el viento está ventilado sólo si hay aberturas laterales con una porosidad mayor al 20%. En este caso para las aberturas donde actúa el viento  $C_c = 0,8C_0$ .

Basándose en lo anterior, el método propone:  $C_{\text{Aero. Inter.}} = C_c$ .

### Ejemplo

Considerando un edificio con cuatro habitaciones como se muestra en la Figura 6.25. El edificio está en la ladera de una montaña y el ángulo de incidencia del viento es  $\theta = 30^\circ$ . La porosidad de la fachada donde actúa el viento, la opuesta y las laterales son 40%, 30% y 20% respectivamente. La construcción está sobre pilotes y los habitaciones 3 y 4 están equipadas con aberturas en el techo.

Calcular el coeficiente  $C_G$  para cada habitación y la relación entre la velocidad de aire interior y la exterior. Fig. 6.25 – Ejemplo de la Metodología CSTB



Cálculo de  $C_{site}$ : Como no hay obstrucciones se obtiene un  $C_{EP} = C_0$ . Además, como el edificio está aislado  $C_{PM} = C_0$ . Finalmente, la pendiente del techo no es muy favorable por lo que  $C_{TP} = C_0$ . Obteniéndose  $C_{site} = C_0$ .

1. Cálculo de  $C_{orientation}$ : Teniendo en cuenta que para  $\theta = 20^\circ$   $C_{orientation} = C_0$  y para  $\theta = 45^\circ$   $C_{orientation} = 0,75C_0$ , por interpolación se obtiene que para  $\theta = 30^\circ$   $C_{orientation} = 0,85C_0$ .

2. Cálculo de  $C_{archi}$ :

Zona 2: Como hay pilotes  $C_{PL} = 1,2C_0$ . Además, como la porosidad de las fachadas es del 30%, y cuenta con aberturas laterales,  $C_P = 1,2C_0$ . Por lo que,  $C_{archi} = (1,2 + 1,2)C_0/2 = 1,2C_0$ .

Zona 1: Como la porosidad de la fachada opuesta a la acción del viento no es mayor al 15% y la porosidad de las aberturas laterales es del 20%, entonces  $C_P = 0,7C_0$ . En este caso el efecto de los pilotes no puede ser tenido en cuenta, por eso  $C_{archi} = C_P = 0,7C_0$ .

Zonas 3 y 4: La presencia de pilotes da un  $C_{PL} = 1,2 C_0$ . Además, las aberturas del techo dan  $C_{ET} = 0,9C_0$ . Por lo que,  $C_{archi} = (0,9 + 1,2)C_0/2 = 1,05C_0$ .

3. Cálculo de  $C_{Aero. Inter.}$ :

Zona 2: Como las divisiones internas son paralelas al flujo de aire,  $C_{Aero. Inter.} = C_0$ .

Zona 1: Como las divisiones internas son opacas y la zona cuenta con aberturas laterales,  $C_{Aero. Inter.} = 0,8C_0$ .

Zonas 3 y 4: Debido a la presencia de aberturas en el techo, junto con las aberturas en las fachadas laterales y en la opuesta a la acción del viento,  $C_{Aero. Inter.} = C_0$ .

Como  $C_G = \min(C_{site}, C_{orientation}, C_{arch. Ext.}, C_{aero. Inter.})$ , se obtiene:

- Zona 1:  $C_G = \min(C_0; 0,85C_0; 0,7C_0; 0,8C_0) = 0,7C_0$  o 0,42.
- Zona 2:  $C_G = \min(C_0; 0,85C_0; 1,2C_0; C_0) = 0,85C_0$  o 0,51.
- Zona 3 y 4:  $C_G = \min(C_0; 0,85C_0; 1,05C_0; C_0) = 0,85C_0$  o 0,51.

Por lo que la velocidad interior a 1,5m. de altura, dentro de la zona 1 sería del 42% de la velocidad del viento exterior  $V_i = 0,42 \cdot V_{1,5}$ ; mientras que para la zona 2, 3 y 4 la velocidad del aire interior a la misma altura sería la mitad de la velocidad del aire exterior  $V_i = 0,51 \cdot V_{1,5}$ .



## La metodología Ernest

Usando datos obtenidos de modelos a escala en túneles de viento, Ernest propuso un modelo empírico simple para la predicción del movimiento del aire interior inducido por el viento.

El modelo requiere entradas climáticas como la dirección del viento y la distribución de la presión a través del edificio, así también como datos relacionados al edificio, como tamaño y características de las aberturas y la configuración de las divisiones internas.

El método predice un coeficiente de velocidad interior promedio,  $C_v$ , definido como la relación de la principal velocidad interior y la principal velocidad de referencia externa, por lo que  $V_i = C_v \cdot V_e$ . EL modelo puede ser utilizado para las configuraciones usadas en la Tabla 6.26.

Rugosidad del terreno	Tres tipos de rugosidades de terreno fueron investigadas correspondiendo a: campo abierto, área de baja densidad urbana y área de media densidad urbana.
Dirección del viento	Para cada tipo de configuración del edificio, siete direcciones de viento fueron medidas, correspondiendo a ángulos de incidencia de 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° y 90° desde la normal del edificio.
Obstrucciones inmediatas	Una obstrucción que consistía en una larga hilera ubicada en 10 posiciones distintas fue utilizada.
Altura del edificio y geometría del techo	Un edificio de dos pisos y tres tipos de pendientes de techo fueron investigados.
Formas del edificio	Un total de cinco geometrías de edificio fueron testeadas: rectangular, (dos tipos), en forma de L, en forma de U y en forma de Z.
Proyecciones externas del edificio	Dos tipos de aleros y dos tipos de salientes horizontales fueron testeados.
Tamaño de las ventanas	El rango del tamaño de ventanas investigado, fue tal que la porosidad de la pared variara desde 6% hasta 25% del área de la pared.
Ubicación de las ventanas	Se examinaron ventanas en fachadas opuestas, tanto centradas como desplazadas hacia un lado.
Divisiones internas	Dos tipos de divisiones internas fueron analizadas para tres posiciones diferentes dentro del recinto y dos alturas distintas. La configuración exacta de las divisiones internas se dan más adelante.

Tabla 6.26. Rango de parámetros usados para generar el modelo de Ernest

Para calcular el coeficiente de velocidad interior promedio,  $C_v$ , es propuesta la siguiente fórmula:

$$C_v = f_1(C_p, \theta) f_2(\phi) f_3(p_n, \theta) f_4$$

Donde:

$C_p$  es el coeficiente de presión;

$\theta$  es la dirección del viento;

$\phi$  es la porosidad del edificio;

$p_n$  es el tipo de división interior;

$f_1(C_p, \theta)$  es el coeficiente para el efecto de la distribución de la presión y la dirección del viento;

$f_2(\phi)$  es el coeficiente para el efecto del tamaño de la ventana;

$f_3(p_n, \theta)$  es el coeficiente para el efecto de las divisiones internas;

$f_4$  es el coeficiente para el efecto de los accesorios de las ventanas.

Para calcular el coeficiente  $f_1(C_p, \theta)$  se presenta la siguiente fórmula empírica:

$$f_1(C_p, \theta) = [0,0203 \cdot \Delta C_p + 0,0296 \cdot C_{p,i} \cdot \cos \theta - 0,0651 \cdot C_{p,o} \cdot \cos \theta - 0,0178 \cdot \cos \theta + 0,0054]^{0,5}$$

Donde  $C_{p,i}$  es el coeficiente de presión promedio para la abertura donde actúa el viento,  $C_{p,o}$  es el coeficiente de presión promedio para la abertura en la fachada opuesta a la acción del viento y  $\Delta C_p = (C_{p,i} - C_{p,o})$ .

Para calcular  $f_2(\varphi)$  la expresión propuesta es:

$$f_2(\varphi) = 3,48 \cdot \varphi + 0,42$$

La porosidad del edificio ( $\varphi$ ) ( $0,06 < \varphi < 0,25$ ) se calcula con la siguiente expresión:

$$\varphi = 2 \cdot A_i \cdot A_o / [A_w (2 \cdot A_i^2 + 2 \cdot A_o^2)^{0,5}]$$

donde  $A_i$  es el área de abertura de entrada,  $A_o$  es el área de la abertura de salida y  $A_w$  es el área interior de la pared que contiene la abertura de entrada.

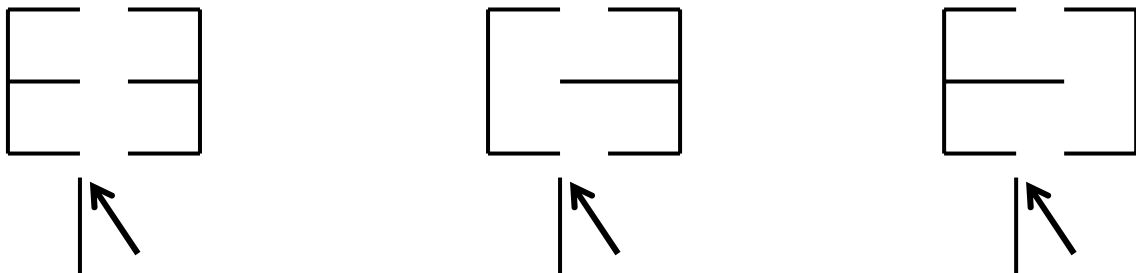
Para calcular el efecto de las divisiones internas,  $f_3$ , el usuario debe seleccionar una de las configuraciones de la Fig. 6.27 y un valor para la posición de las divisiones, altura de ellas y dirección del viento donde:

Dip: es la distancia entre la abertura y la división

Lir: es la distancia entre la abertura y la salida

Hip: es la altura de la división interna

Hir: es la altura interior del recinto



Posición de la división	Pos = Dip/Lir	$0,25 \leq Pos \leq 0,75$
Altura de la división	Hip = Hip/Hir	$2/3 \leq Hp \leq 1$
Dirección del viento	$\theta$	$0 \leq \theta \leq 90^\circ$

Figura 6.27. Tipos de divisiones internas

Con estas configuraciones, se dan cuatro funciones empíricas en la Tabla 6.28.

Tipo de partición	$f_3(p_n, \theta)$	A	B	C	D
Tipo 1	$A + B \cdot Hp \cdot Pos + C \cdot \cos 6\theta$	0,770	0,287	0,045	-
Tipo 2, Hp = 1	$A + B \cdot \sin \theta$	0,882	0,057	-	-
Tipo 2, Hp = 2/3	$A + B \cdot Pos + C \cdot \sin \theta + D \cdot Pos \cdot \sin \theta$	0,646	0,381	0,442	-0,699
Tipo 2, Hp = 1	$A + B \cdot Pos + C \cdot \sin \theta + D \cdot \cos 6\theta$	0,628	0,300	0,064	0,042

Tabla 6.28. Coeficiente  $f_3$

Para el cálculo del coeficiente  $f_4$  el método propone los valores dados en la Tabla 6.29 sugeridos por Swami y Chandra.

Tipo de ventana	$f_4$
Ventana abierta con mosquitero de porosidad del 60%	0,85
Ventana totalmente abierta con toldo sin mosquitero	0,75
Ventana con toldo y mosquitero de porosidad del 60%	0,65

Tabla 6.29. Coeficiente  $f_4$

#### Ejemplo

Calcular el coeficiente de velocidad promedio interior para un recinto con divisiones internas de tipo 1,  $H_p=0,75$ ,  $Pos=0,33$  y  $\theta = 30^\circ$ . Asumir  $C_{P,i} = -0,04$ ,  $C_{P,0} = -0,51$ , mientras que la ventana tiene un mosquitero de porosidad del 60% y el edificio tiene una porosidad del 20%.

$$f_1(C_{P,\theta}) = [0,0203 \cdot 0,47 + 0,0296 \cdot (-0,04) \cdot (0,866) - 0,0651 \cdot (-0,51) \cdot (0,866) - 0,0178 \cdot (0,866) + 0,0054]^{0,5} = 0,165$$

$$f_2(\varphi) = 3,48 \cdot 0,20 + 0,42 = 1,116$$

De la Tabla 6.28 obtenemos:

$$\begin{aligned} f_3(p_n, \theta) &= A + B \cdot H_p \cdot Pos + C \cdot \cos 6\theta \\ &= 0,770 + 0,287 \cdot 0,75 \cdot 0,33 + 0,045 \cdot (-1) \\ &= 0,796 \end{aligned}$$

Finalmente de la Tabla 6.29 obtenemos  $f_4 = 0,85$ .

Por lo que:

$$\begin{aligned} C_V &= f_1(C_{P,\theta}) f_2(\varphi) f_3(p_n, \theta) f_4 \\ &= 0,165 \cdot 1,116 \cdot 0,796 \cdot 0,85 = 0,125 \end{aligned}$$

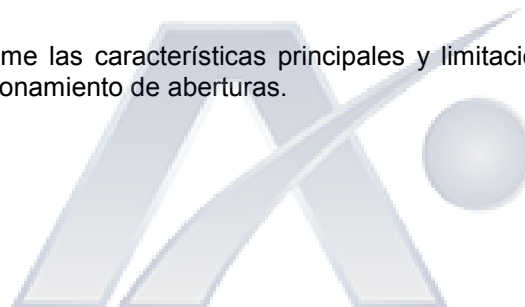
## Métodos de cálculo empíricos para dimensionar aberturas

Los métodos simplificados que se presentarán son para calcular las áreas de las aberturas tanto de entrada como de salida del flujo de aire para configuraciones con ventilación cruzada en un recinto o edificio monovolúmen. Con algunas excepciones estos métodos sólo consideran el efecto de las fuerzas del viento y desprecian el efecto de la temperatura. Estos métodos son fáciles de usar e ideales para aplicarlos en la etapa de prediseño del edificio.

Debería ser claro para los diseñadores que todos los métodos empíricos deben ser usados dentro de sus límites de aplicabilidad. Los datos climáticos utilizados para los cálculos deben ser lo más representativo posible. Si el propósito del diseño es dimensionar las aberturas para refrescamiento, deberán ser usados los datos climáticos del mes presentando la carga térmica más grande.

Sin embargo, es claro que, algunos datos de entrada y especialmente para la distribución de presiones alrededor del edificio, hay un cierto grado de incertidumbre. Estas metodologías deben ser vistas como herramientas para dimensionar aberturas en forma aproximada y no como métodos de cálculo precisos dada la incertidumbre que puede existir en los datos de entrada que requieren los modelos. No existen todavía métodos exactos que expliquen detalladamente el comportamiento de la ventilación natural y si existieran serían de una complejidad tal que estarían fuera del interés de la mayoría de los profesionales.

La Tabla 6.30 resume las características principales y limitaciones de cinco metodologías empíricas para el dimensionamiento de aberturas.



Método	Características de la abertura	Fuerzas de flujo
The Florida Solar Energy Centre Method I	Considera abertura de entrada igual a la de salida. Calcula el área de abertura bruta. Considera aberturas con mosquiteros	Considera sólo el efecto del viento. Propone correcciones para la orientación del viento, tipo de terreno, edificios vecinos y altura de aberturas
The Florida Solar Energy Centre Method II	Considera áreas de aberturas desiguales. Calcula el área efectiva de ventana. Propone una metodología para tener en cuenta el efecto de mosquiteros y porosidad de ventanas	Considera sólo el efecto del viento. Toma en cuenta los coeficientes de presión debido al viento. Propone correcciones para los edificios vecinos y la altura de las aberturas
The ASHRAE Method	Considera áreas de aberturas desiguales. Propone un coeficiente para considerar la efectividad de la abertura en función del ángulo de incidencia del viento	Considera el efecto del viento o la temperatura. No considera el efecto combinado de ambos
The Aynsley Method	Considera áreas de aberturas desiguales	Considera sólo el efecto del viento. Toma en cuenta los coeficientes de presión debido al viento
The British Standard Method	Considera áreas de aberturas desiguales	Considera tanto el efecto del viento como el de la temperatura. Propone criterios para el efecto combinado (sólo para el cálculo de caudales de aire)

Tabla 6.30. Características de cinco métodos empíricos para el diseño de aberturas para edificios con ventilación cruzada

## El método I del Florida Solar Energy Centre

Como se vio en la Tabla 6.30, el método asume que las aberturas tienen áreas iguales, aunque igual puede ser usado para pequeñas diferencias y no toma en cuenta el efecto de la temperatura. Para un edificio de dos pisos el cálculo debe hacerse por separado para cada piso. Para diferencias grandes de áreas de aberturas, se propone otro método, desarrollado por los mismos autores.

De acuerdo con el método, el área bruta total requerida,  $TOA$ , aberturas de entrada más las de salida, para lograr un determinado número de renovaciones por hora de aire,  $ach$ , puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$TOA = \frac{1,16 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot ach}{W \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4}$$

donde:

$TOA$  es el área total de abertura (entrada más salida) [ $m^2$ ]

$V$  es el volumen del edificio [ $m^3$ ]

$ach$  son las renovaciones por hora de diseño [1/h]

$W$  es la velocidad del viento [m/s]

$f_1$  es el coeficiente en función del ángulo de incidencia del viento, los datos han sido obtenidos en túneles de viento y un ángulo de incidencia igual a cero significa que el viento sopla perpendicularmente a la fachada del edificio (Tabla 6.31)

$f_2$  es el factor de corrección debido al terreno. Este factor es función de la ubicación del edificio y la estrategia de ventilación (Tabla 6.32)

$f_3$  es el factor de corrección debido al vecindario. Este coeficiente es función de la altura de la pared del edificio que obstaculiza la llegada del viento al edificio en estudio,  $h$  y la distancia que hay entre ellos,  $g$ . Valores de la relación  $g/h$  han sido obtenidos en pruebas en túneles de viento (Tabla 6.33)

$f_4$  es el factor de multiplicación debido a la altura. Para ventanas para el segundo piso o para casas sobre pilotes el factor es igual a 1,15 sino es igual a 1.

La ecuación asume ventanas con mosquiteros de una porosidad igual a 0,6, sin no hay mosquiteros el resultado de la ecuación debe ser dividido por 1,67. Además el método considera que el marco de puertas y ventanas corresponden alrededor del 20% del área bruta, por lo que para calcular el área neta de abertura se debe dividir la ecuación por 1,25.

Angulo de incidencia del viento ( $^{\circ}$ )	$f_1$
0-40	0,35
50	0,30
60	0,25
70	0,20
80	0,14
90	0,08

Tabla 6.31. Factor de corrección debido al ángulo de incidencia del viento,  $f_1$ .

Tipo de terreno	Ventilación las 24 horas	Ventilación nocturna
Costa o cerca del océano	1,30	0,98
Aeropuertos o terrenos planos con edificios, separados por muros aislados	1,00	0,75
Rural	0,85	0,64
Suburbano o industrial	0,67	0,50
Centro de una gran ciudad	0,47	0,35

Tabla 6.32. Factor de corrección del terreno,  $f_2$

Relación $g/h$	$f_3$
0	0,00
1	0,41
2	0,63
3	0,77
4	0,85
5	0,93
6	1,00

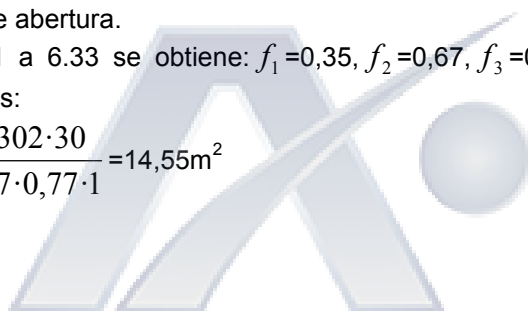
Tabla 6.33. Factor de corrección por el vecindario,  $f_3$

### Ejemplo

Para una ubicación dada con velocidad de viento de 4m/s, volumen de 302 m<sup>3</sup>, 30 renovaciones por hora y ángulo de incidencia de 10°. EL edificio se encuentra en un área suburbana y es ventilado las 24 horas del día. La altura del edificio vecino que obstruye la acción del viento es de 2,44 m y la distancia que lo separa del edificio estudiado es de 7,32 m. Usar  $f_4=1$ . Determinar el área total de abertura.

De las Tablas 6.31 a 6.33 se obtiene:  $f_1=0,35$ ,  $f_2=0,67$ ,  $f_3=0,77$ . Entonces la ecuación toma los siguientes valores:

$$TOA = \frac{1,16 \cdot 10^{-3} \cdot 302 \cdot 30}{4 \cdot 0,35 \cdot 0,67 \cdot 0,77 \cdot 1} = 14,55 \text{m}^2$$



## El método II del Florida Solar Energy Centre

Este método desarrollado por S.Chandra, es un simple procedimiento para dimensionar aberturas de entrada y salida de aire en recintos con ventilación cruzada.

El método se basa en el coeficiente de diferencias de presión a través de las entradas y salidas, y permite el cálculo del área efectiva de ventanas, A, que es una combinación de las áreas de las entradas y salidas abiertas.

Este método no considera el efecto de la temperatura, y además asume que todas las aberturas de entrada tienen la misma presión positiva y todas las de salida la misma presión negativa.

El área efectiva A está definida por la siguiente expresión:

$$A = A_0 A_i / (A_0^2 + A_i^2)^{0.5}$$

donde:

A es el área efectiva total [m<sup>2</sup>]

A<sub>0</sub> es el área de abertura de salida [m<sup>2</sup>]

A<sub>i</sub> es el área de abertura de entrada [m<sup>2</sup>]

Para calcular A, el método propone la siguiente expresión:

$$A = \frac{4,3 \cdot 10^{-4} \cdot V \cdot ach}{W \sqrt{f_3 \cdot f_4 \cdot PD}}$$

donde:

V, ach, W,  $f_3$  y  $f_4$  fueron definidos en el método anterior

PD es el coeficiente de diferencia de presión actuando a través de las entradas y salidas y está dado por:

$$PD = WPC - LPC$$

donde:

WPC es el coeficiente de presión de las fachadas donde actúa el viento

LPC es el coeficiente de presión de las fachadas opuestas a la acción del viento

El método propone usar los coeficientes de presión de la Tabla 6.35 para las cuatro fachadas de un edificio residencial (Fig. 6.34).

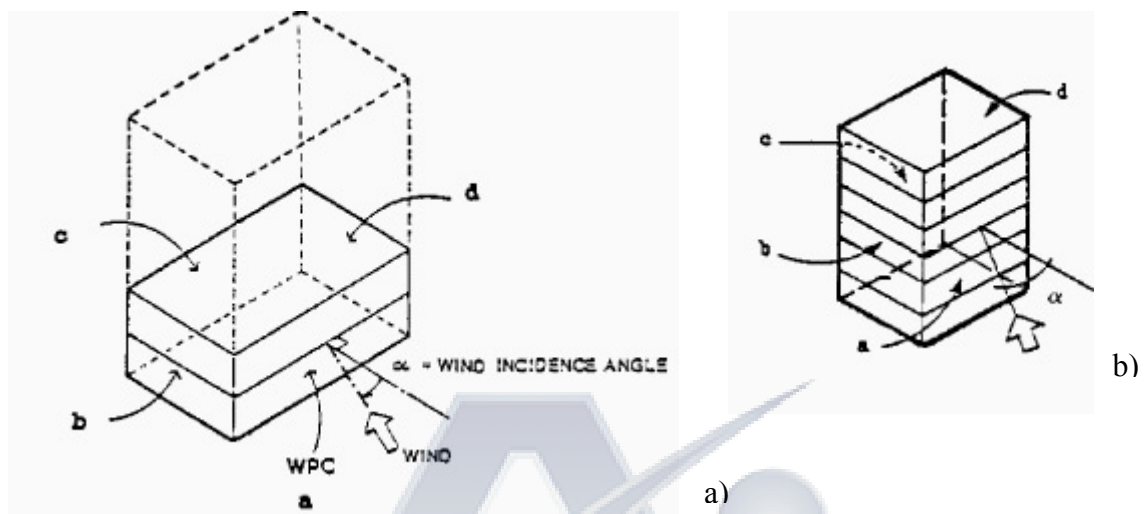


Figura 6.34 . Planos del coeficiente de presión y ángulo de incidencia del viento, para: a) edificios de uno o dos pisos; b) edificios de dos a seis pisos

Tipo de edificio	Angulo de incidencia del viento, $\alpha$ ( $^\circ$ )	Coefficiente de presión, PC, en la superficie <i>a</i>	Coefficiente de presión, PC, en la superficie <i>b</i>	Coefficiente de presión, PC, en la superficie <i>c</i>	Coefficiente de presión, PC, en la superficie <i>d</i>
Edificios de uno o dos pisos	0,0	0,40	-0,40	-0,25	-0,40
	22,5	0,40	-0,06	-0,40	-0,60
	45,0	0,25	0,25	-0,45	-0,45
	67,5	-0,06	0,30	-0,55	-0,40
	90,0	-0,4	0,40	-0,40	-0,25
Edificios cuadrados de dos o a seis pisos	0	0,80	-0,70	-0,30	-0,70
	15	0,80	-0,90	-0,50	-0,60
	45	0,50	0,50	-0,50	-0,50
	90	-0,70	-0,80	0,70	-0,30
Edificios rectangulares de dos o a seis pisos	0	0,70	-0,70	-0,40	-0,70
	45	0,60	0,40	-0,50	-0,40
	90	-0,50	0,80	-0,50	-0,20

Tabla 6.35. Coeficientes de presión, PC, en función del ángulo de incidencia del viento

Nota: Otros valores recomendados para PC, para otros tipos de aberturas, son:

- Abertura de entrada con alero, PC = 0,40;
- Abertura de salida con alero, PC = -0,25;
- Aberturas en el techo, PC = -0,30

Para tener en cuenta el efecto de mosquiteros o ventanas parcialmente abiertas, etc se define el factor de porosidad, PF, definido como el producto entre la porosidad del mosquitero, IPF, con una factor de porosidad de la ventana, WPF, es propuesta:

$$PF = IPF \cdot WPF$$

Valores de IPF y WPF para distintos tipos de mosquiteros y ventanas son dados en las Tablas 6.36 y 6.37.

Entonces, las áreas totales, no abiertas, de entrada y salida,  $TA_i$  y  $TA_0$ , son dadas por las siguientes expresiones:

$$TA_i = A_i / PF$$

$$TA_0 = A_0 / PF$$

Tipo de mosquitero	IPF típico
Sin mosquitero	1,00
Bronce, 14 alambres/pulg.	0,80
Fibra de vidrio, 18 alambres/pulg.	0,60

Tabla 6.36. Factores de porosidad para mosquiteros, IPF

Tipo de ventana	WPF típico
De una o dos hojas que pivotan verticalmente	0,40
Con proyecciones que pivotan horizontalmente	0,60
Otras	Medir porosidad

Tabla 6.37. Factores de porosidad para ventanas, WPF, se asume que las cortinas interiores no bloquean el paso del aire

### Ejemplo

El volumen del edificio es de  $43m^3$ , las renovaciones/hora requeridas son 30, la velocidad promedio del viento es de 4 m/s, y el ángulo de incidencia del viento es de  $45^\circ$ , mientras que en la fachada *d* hay un alero. El edificio está en un área urbana. La relación g/h es de 3. Calcular: (a) El área efectiva abierta requerida,  $A_i$ ; (b) La superficie de abertura de entrada y salida, considerando que son iguales; (c) El área total, no abierta, de aberturas de entrada y salida si se cuenta con un mosquitero en ventanas que pivotan horizontalmente.



- (a) De la Tabla 6.33 obtenemos  $f_3 = 0,77$ ,  $f_4 = 1$ . De la Tabla 6.35 obtenemos  $WPC = 0,25$  y  $LPC = -0,25$ , entonces  $PD = 0,5$ . Por lo que:

$$A = \frac{4,3 \cdot 10^{-4} \cdot V \cdot ach}{W \sqrt{f_3 \cdot f_4 \cdot PD}} = \frac{4,3 \cdot 10^{-4} \cdot 43 \cdot 30}{4 \sqrt{0,77 \cdot 1 \cdot 0,5}} = 0,223 \text{ m}^2$$

- (b) Si  $A_0 = A_i$  entonces  $A_i = 1,41 \cdot A$ . Por lo tanto  $A_i = A_0 = 0,32 \text{ m}^2$   
 (c) De la Tabla 6.36 obtenemos  $IPF = 0,8$  y  $WPF = 0,60$  entonces  $PF = 0,48$ . Por lo que,  
 $TA_i = TA_0 = 0,32 / 0,48 = 0,67 \text{ m}^2$

## El método ASHRAE

Una metodología muy simple para calcular las superficies de aberturas en edificios ventilados naturalmente es propuesta por la ASHRAE. De acuerdo con este método si el flujo es principalmente causado por la acción del viento, el área libre de las aberturas de entrada, A, en un edificio con aberturas de entrada iguales a las salida, puede ser calculada con la siguiente expresión:

$$A = Q / (E \cdot W)$$

Donde:

- A es el área libre de abertura [ $\text{m}^2$ ]
- Q es el caudal de aire de diseño [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- E es la efectividad de la abertura
- W es la velocidad del viento [ $\text{m}/\text{s}$ ]

El parámetro E debería ser tomado entre 0,5 y 0,6 para vientos perpendiculares y estaría entre 0,25 y 0,35 para vientos diagonales.

De acuerdo con el método, los mayores flujos por unidad de área de abertura se obtienen para aberturas de entrada iguales a las de salida. Si no pueden ser iguales entonces la ecuación puede ser usada para calcular la abertura menor. El flujo final es obtenido de la Figura 6.38 en función de la relación entre la abertura mayor y la abertura menor. El procedimiento para calcular las aberturas es el siguiente. Para una relación entre aberturas de entrada y salida dada, el porcentaje de incremento del flujo, x, es tomado de la Figura 6.38. Entonces el caudal de diseño, Q, es dividido por x y el flujo resultante es usado en la ecuación para calcular el área mínima de las aberturas.

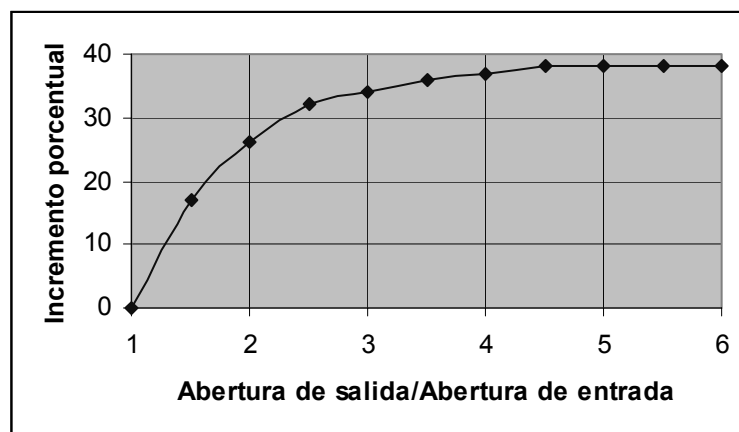


Figura 6.38. Incremento en el flujo a causa de una abertura mayor a la otra

Si la velocidad local del viento no es importante y el flujo de aire se debe principalmente a la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior, ASHRAE propone otra fórmula para calcular el área de aberturas.

Si las áreas de entrada y salida son iguales, entonces la superficie de las aberturas tanto de entrada como de salida, puede ser calculada con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q}{116\sqrt{h(T_i - T_0)}}$$

Donde:

A es la superficie de abertura [m<sup>2</sup>]

Q es el caudal de aire de diseño [L/s]

h es la altura desde la abertura de entrada hasta la de salida [m]

Ti y To son las temperaturas promedio interior y exterior respectivamente [°C]

Si las aberturas de entrada y salida no son iguales, entonces para una relación dada entre salida y entrada o viceversa, el porcentaje de aumento del caudal, x, es tomado de la Figura 6.34. El flujo de aire de diseño, Q es dividido por x y el flujo resultante es usado en la ecuación para calcular el área mínima de las aberturas.

### Ejemplo 1

Para un lugar dado, la velocidad del viento de diseño es de 2 m/s y es perpendicular a las aberturas de un edificio ventilado naturalmente. El volumen del recinto es de 200 m<sup>3</sup> y el intercambio de aire requerido es de ocho renovaciones por hora. Además, a causa de limitaciones constructivas, la relación entre las aberturas de salida sobre las de entrada es de 1,5. Calcular el área de las aberturas de entrada y salida.

El caudal de aire de diseño es de 1600 m<sup>3</sup>/h o 0,444 m<sup>3</sup>/s. De la Figura 6.17 el aumento esperado del caudal de aire, debido a áreas de aberturas desiguales, es del 17,5%. Por lo que, el flujo correspondiente a la abertura más chica es igual a 0,444/1,175 = 0,38 m<sup>3</sup>/s. Por lo que el área de las aberturas de entrada debería ser igual a A<sub>i</sub> = 0,38/(0,5·2) = 0,38 m<sup>2</sup>, mientras que el área de las aberturas de salida debería ser igual a A<sub>o</sub> = 0,38·1,5 = 0,57 m<sup>2</sup>.

### Ejemplo 2

Para el ejemplo anterior considerar que el flujo es debido principalmente a la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior. La diferencia de altura entre las aberturas de entrada y salida es de 4m. La diferencia de temperaturas de diseño es de 4°C. Calcular las aberturas necesarias para un intercambio de aire de ocho renovaciones por hora.

Como se calculó en el ejemplo previo el flujo que corresponde a la abertura más chica es igual a 0,38 m<sup>3</sup>/s. Por lo que el área de las aberturas de entrada debería ser igual a A<sub>i</sub> = 380/116·4 = 0,82 m<sup>2</sup>, mientras que el área de abertura de salida debería ser igual a A<sub>o</sub> = 0,82·1,5 = 1,22 m<sup>2</sup>.

## El método de Aynsley

El método propuesto por Aynsley ya ha sido presentado anteriormente, recordemos que el método calcula el flujo de aire considerando la acción del viento y desprecia el fenómeno debido a la diferencia de temperaturas.

Para una superficie de abertura definida, ubicada en la fachada donde actúa el viento, A1, la superficie de la segunda abertura A2, puede ser calculada con la siguiente ecuación. En este caso, con Cd1=Cd2, se obtiene que:

$$A_2 = \frac{A_1 \cdot Q}{Cd \cdot W} \frac{1}{\sqrt{A_1^2 \cdot (Cp_1 - Cp_2) - \left(\frac{Q}{Cd \cdot W}\right)^2}}$$

### Ejemplo

Para un lugar dado, la velocidad del viento de diseño es de 2 m/s y es perpendicular a las aberturas de un edificio ventilado naturalmente. Las aberturas se encuentran en fachadas opuestas. El volumen del recinto es de 600 m<sup>3</sup> y el intercambio de aire requerido es de ocho renovaciones por hora. Además, a causa de limitaciones constructivas, la superficie de la aberturas de salida es de 3 m<sup>2</sup>. Calcular el área de la abertura de entrada si el coeficiente de descarga para cada abertura se lo considera igual a 0,6.

De la Tabla 6.19 los coeficientes de presión para las aberturas de entrada y salida son 0,4 y -0,25 respectivamente, por lo que  $\Delta C_p = 0,65$ . Además  $Q = 1,33$  m<sup>3</sup>/s, entonces:

$$A_1 = \frac{3 \cdot 1,33}{0,6 \cdot 2} \frac{1}{\sqrt{3^2 \cdot (0,65) - \left(\frac{1,33}{0,6 \cdot 2}\right)^2}} = 1,54 m^2$$

Exactamente el mismo método es propuesto por el British Standard Institution para configuraciones con ventilación cruzada donde el flujo de aire es debido a la acción del viento.

### El método del British Standard

Este método propone diferentes expresiones para calcular el flujo de aire en configuraciones con ventilación natural teniendo en cuenta tanto el efecto del viento como el de la temperatura. Además se propone un criterio para contabilizar el efecto combinado de ambos. El método fue presentado en detalle anteriormente y como se explicó en el método anterior, la metodología que tiene en cuenta el efecto del viento es igual a la presenta por Aynsley.

En el caso de flujos de aire debidos a la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior, el método propone para el cálculo de la superficie de aberturas de entrada o salida, A1, necesaria para lograr un caudal, Q, la siguiente expresión para un valor dado de superficie de entra o salida, A2, respectivamente:

$$A_1 = A_2 \cdot D \sqrt{\frac{1}{A_2^2 - D^2}}$$

donde:

$$D = \frac{Q}{\sqrt{C_d \left( \frac{2 \cdot \Delta T \cdot H \cdot g}{T} \right)}} \quad \text{donde } T = \frac{T_0 + T_i}{2} \text{ [°K]}$$

### Ejemplo

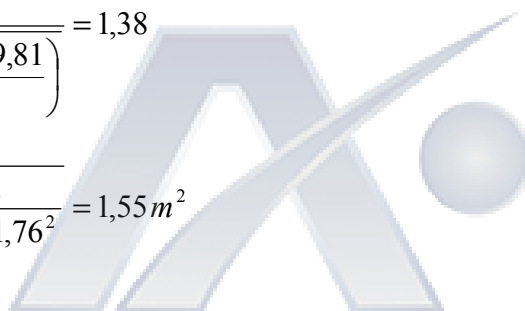
Para un lugar dado, la temperatura de diseño interior es de 27°C mientras que la temperatura exterior es de 31°C. El volumen del recinto es de 600 m<sup>3</sup> y el intercambio de aire requerido es de ocho renovaciones por hora. Además, a causa de limitaciones constructivas, la superficie de la aberturas de salida es de 3 m<sup>2</sup> y la distancia vertical entre aberturas es de 6m. Calcular el área de la abertura de entrada si el coeficiente de descarga para cada abertura se lo considera igual a 0,6.

Se obtiene que  $Q = 1,33$  m<sup>3</sup>/s. Entonces:

$$D = \frac{1,33}{\sqrt{0,6 \left( \frac{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 9,81}{302} \right)}} = 1,38$$

Por lo tanto:

$$A_1 = 3 \cdot 1,76 \sqrt{\frac{1}{3^2 - 1,76^2}} = 1,55 m^2$$



## Análisis comparativo

Para comparar las predicciones de los distintos métodos, se han realizado cálculos para distintas configuraciones de edificios.

Como los distintos métodos están caracterizados por varios tipos de limitaciones debido al efecto del viento o la temperatura, así también como las relaciones de aberturas, los casos a ser considerados deben ser lo suficientemente simples como para satisfacer las limitaciones de todos los métodos.

### Ejemplo 1 – Un caso simple

Calcular el área neta de superficie de aberturas de entrada y salida de aire para un edificio ventilado naturalmente de 700 m<sup>3</sup>. El intercambio de aire requerido es de seis renovaciones por hora. La velocidad principal del viento durante la época de diseño es de 2 m/s y es paralela al eje principal del edificio. La diferencia de temperatura entre el ambiente interior y el exterior es despreciable. Considerar que la velocidad del viento es medida cerca del edificio y no requiere ningún tipo de corrección debida a la superficie del terreno. Además el efecto de los edificios aledaños es despreciable. Finalmente, considerar que las aberturas son iguales, ubicadas en fachadas opuestas en planta baja, normales al eje principal del edificio, y sin mosquiteros.

#### *El método I del Florida Solar Energy Centre*

Este método considera áreas de aberturas iguales y desprecia el efecto de la temperatura. Utiliza cuatro coeficientes para tomar en cuenta el efecto de la orientación de viento, corrección del terreno, edificios vecinos y altura de aberturas. Tomando en cuenta las suposiciones hechas en el ejemplo es evidente que  $f_2 = f_3 = f_4 = 1$ .

El área total de aberturas, en m<sup>2</sup>, está dado por la siguiente fórmula:

$$TOA = \frac{1,16 \cdot 10^{-3} \cdot V \cdot ach}{W \cdot f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot f_4}$$

Esta ecuación asume un mosquitero con porosidad de 0,6, como no hay mosquitero el resultado de esta ecuación debe ser dividido por 1,67. Además, esta ecuación asume que los marcos de puertas y ventanas representan alrededor del 20% del área bruta por lo que para calcular el área neta de abertura el resultado debe ser dividido por 1,25.

Sustituyendo los datos se obtiene  $TOA = 6,88 \text{ m}^2$  y por lo tanto el área bruta de aberturas de entrada y salida es de  $3,44 \text{ m}^2$ . Si se toma en cuenta que no hay mosquitero y que el método calcula el área bruta de abertura, la superficie neta de aberturas de entrada y salida es igual a  $A_0 = A_i = 3,44 / 1,67 / 1,25 = 1,64 \text{ m}^2$ .

#### *El método II del Florida Solar Energy Centre*

Este método considera áreas de aberturas desiguales y propone el cálculo de una abertura efectiva. No toma en cuenta los efectos de la temperatura. Utiliza dos coeficientes para tomar en cuenta el efecto de los edificios vecinos y la altura de las aberturas. Si se consideran las suposiciones realizadas en el ejemplo, es evidente que  $f_3 = f_4 = 1$ . El área total de aberturas en m<sup>2</sup>, está dado por:

$$A = \frac{4,3 \cdot 10^{-4} \cdot V \cdot ach}{W \sqrt{f_3 \cdot f_4 \cdot PD}}$$

De la Tabla 6.35  $WPC = 0,4$  y  $LPC = -0,25$ . Entonces:  
 $PD = WPC - LPC = 0,65$



Sustituyendo los valores se obtiene  $A = 1,12 \text{ m}^2$  y por lo tanto la superficie de aberturas de entrada y salida es  $A_0 = A_i = 1,41 \cdot A = 1,58 \text{ m}^2$ .

#### El método ASHRAE

Este método considera los efectos del viento y de la temperatura, pero no su acción combinada. Propone un coeficiente E, para tomar en cuenta la efectividad de la abertura en función del ángulo de incidencia del viento. Basado en los datos del ejemplo, E es tomado como 0,5. Por lo que:

$$A = Q/(E \cdot W) = 1,16 \text{ m}^2.$$

#### El método Aynsley

Este método permite el cálculo del área de aberturas de entrada y salida en configuraciones de ventilación natural donde el flujo es inducido por acción del viento, y no considera áreas de abertura iguales. Para una superficie de abertura definida, la superficie de la otra abertura puede ser calculada con la ecuación propuesta por Aynsley. En este caso y si los coeficientes de descarga son iguales, entonces:

$$A_2 = \frac{A_1 \cdot Q}{Cd \cdot W} \frac{1}{\sqrt{A_1^2 \cdot (Cp_1 - Cp_2) - \left(\frac{Q}{Cd \cdot W}\right)^2}}$$

Si  $Cp_1 = 0,4$  y  $Cp_2 = -0,25$  y  $Cd_1 = Cd_2$ , entonces  $A_1 = A_2 = 1,01 \text{ m}^2$ .

#### El método del British Standard

Como ya se mencionó, este método predice el mismo resultado que el método de Aynsley para configuraciones donde la diferencia de temperaturas entre el ambiente interior y el exterior son despreciables. Por lo tanto,  $A_1 = A_2 = 1,01 \text{ m}^2$ .

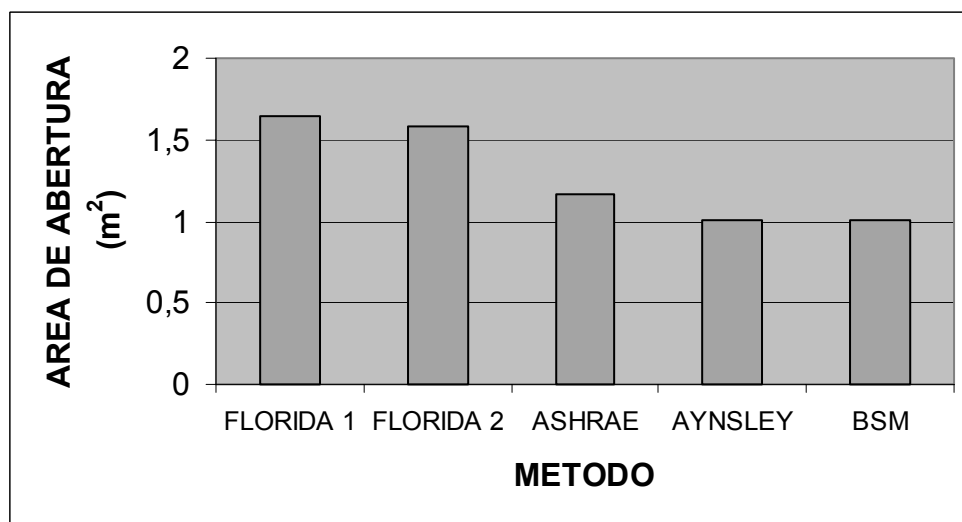


Figura 6.39. Valores de áreas de abertura obtenidos para el ejemplo 1

#### Ejemplo 2 – El efecto de la diferencia de temperaturas

Este segundo ejemplo es el mismo que el anterior, pero con una diferencia de temperatura de 3°C entre el interior y el exterior. Por lo que, le ejemplo es el siguiente:

Calcular el área neta de superficie de aberturas de entrada y salida de aire para un edificio ventilado naturalmente de 700 m<sup>3</sup>. El intercambio de aire requerido es de seis renovaciones por hora. La velocidad principal del viento durante la época de diseño es de 2 m/s y es paralela al eje principal del edificio. La diferencia de temperatura entre el ambiente interior y el exterior es de 3°C. Considerar que la velocidad del viento es medida cerca del edificio y no requiere ningún tipo de corrección debida a la superficie del terreno. Además el efecto de los edificios aledaños es despreciable. Finalmente, considerar que las aberturas son iguales, ubicadas en fachadas opuestas en planta baja, normales al eje principal del edificio, y sin mosquiteros. La diferencia vertical entre las aberturas es de 2m.

Como ya se mencionó, los métodos I y II del Florida Solar Energy Centre así como también el método de Aynsley no toman en cuenta el efecto de la diferencia de temperaturas. Por lo que los resultados de estos métodos son los mismos que los del primer ejemplo.

El método de la ASHRAE propone dos expresiones para calcular las aberturas requeridas, la que toma en cuenta sólo el efecto del viento da como resultado 1,16 m<sup>2</sup>, como se vio en el ejemplo anterior. Si sólo se considera el efecto de la temperatura, tomando en cuenta los datos, entonces el área necesaria de abertura es igual a 8,5 m<sup>2</sup>.

El método del British Standard propone un criterio para decidir que factor tiene más peso, si el efecto del viento o el efecto de la diferencia de temperaturas, para el ejemplo se determina que el efecto del viento es el que prevalece por lo que  $A_1 = A_2 = 1,01 \text{ m}^2$ .

### Método de las ecuaciones de lazo (Looping equations)

Uno de los métodos más nuevos y versátiles para el dimensionamiento de aberturas, es el método de las ecuaciones de lazo (looping equations) de James Axley, propuesto en 1999. Este concepto permite introducir en el camino del flujo de aire cualquier tipo de singularidad como divisiones internas o cualquier dispositivo o componente.

La Figura 6.40 muestra el principio del método de la ecuación de lazo. La idea básica es que la suma de los cambios de presión sufridos por una corriente de aire que recorre un lazo volviendo a su origen sea igual a cero. Si la geometría del problema es conocida, se pueden determinar algunos lazos, como por ejemplo: exterior → abertura de entrada → interior → abertura de salida → exterior → exterior (original).

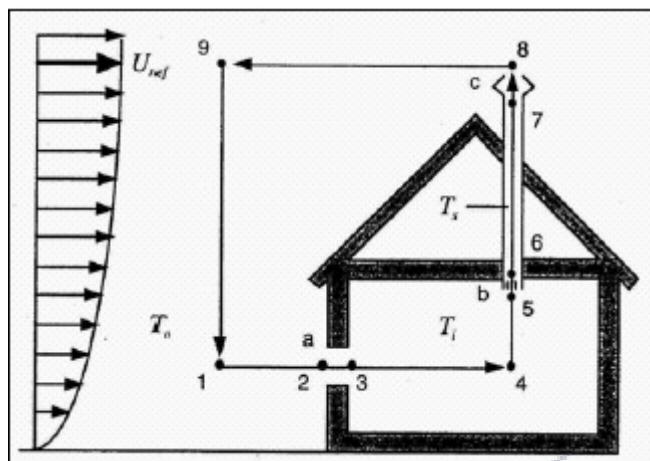


Figura 6.40. Principio de la ecuación de lazo. Lazo: 1-2-3-4-5-6-7-8-9-1

La suma puede ser expresada como:

$$\sum_i f(Q_i, size_i) - g \sum_i \rho_i \Delta z_{ij} - (\Delta C_p) \frac{\rho U_{ref}^2}{2} = 0$$

donde el primer término es la suma de las caídas de presión de cada uno de los componentes a lo largo del lazo, el segundo es el efecto stack y el tercero es el efecto del viento.

La gran ventaja de este método es que permite dimensionar aberturas tanto externas como internas para sistemas de ventilación de configuraciones arbitrarias y con distintas complejidades para condiciones climáticas específicas.

El método consiste en los siguientes ocho pasos:

1. Dibujar la geometría y tipología del edificio e identificar los lazos de los flujos de ventilación natural.
2. Identificar un nodo de presión del ambiente y nodos de presión adicionales a la entrada y salida de cada componente que aparezca a lo largo de los lazos.
3. Establecer las condiciones de diseño: coeficientes de presión para las aberturas, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento y temperaturas interiores.
4. Establecer requerimientos de diseño: las tasas de ventilación requeridas para cada recinto ocupado para poder obtener los caudales de aire para cada componente.
5. Armar las ecuaciones de lazo para cada lazo establecido en el paso 1 tomando en cuenta sistemáticamente cada cambio de presión a lo largo de cada lazo.
6. Determinar las dimensiones mínimas factibles para cada abertura a través de la evaluación de los límites asintóticos de la ecuación de lazo para las condiciones de diseño.
7. Desarrollar y aplicar un número suficiente de pautas de diseño tanto técnicas como no técnicas para transformar el problema de diseño definido para cada ecuación de lazo indeterminado en un problema determinado.
8. Desarrollar una estrategia operativa apropiada para tomar en cuenta la naturaleza variable de las condiciones de diseño de los sistemas de ventilación natural.

El NIST (National Institute of Standards and Technology de los Estados Unidos) desarrolló un software en el 2003, el LoopDA, para realizar estos ocho pasos. A pesar de no automatizar totalmente los ocho pasos este programa realmente simplifica el uso de este método y es de gran ayuda en la administración de todo el proceso.

La principal desventaja de este método es que siempre hay más aberturas que lazos posibles, por lo tanto sólo es posible determinar un conjunto de soluciones factibles. Esto obliga a necesitar del uso de otras consideraciones para elegir una solución que sirva para las condiciones de diseño establecidas.





## Bibliografía

1. BS 5925 (1980). Code of Practice for Design of Buildings: Ventilation principles and designing for natural ventilation. British Standards Institution, Londres.
2. Aynsley, R.M., W. Melbourn y B.J.Vickery (1977). Architectural Aerodynamics. Applied Science Publishers, Londres.
3. De Gidds, W. y H.Phaff (1982). "Ventilation rates and Energy Consumption due to Open Windows". Air Infiltration Review, Vol.4, No.1.
4. Mayer, E. (1987). "Physical Causes for Draft: Some New Findings". ASHRAE Transactions, Vol.93, Part 1.
5. Fanger, P.O.; A.Melikov y H. Hanzawa (1988). "Air Turbulence and Sensation of Draft". Energy and Buildings, Vol.21, No.1.
6. Arens, E., D.Ballanti, C.Bennett, S.Guldman y B.White. (1989). "Developing the San Francisco Wind Ordinance and its Guidelines for Compliance". Building and Environment, Vol.24, No.4.
7. Ernest,D.R. (1991). "Predicting Wind-Induced Air Motion, Occupant Comfort and Cooling Loads in Naturally Ventilated Buildings". PhD Thesis, University of California at Berkeley.
8. B. Givonni (1976). "Man, Climate & Architecture". Applied Science Publishers. Londres.
9. Melaragno, M. (1982). Wind in Architectural and Environmental Design. Van Nostrand Reinhold, Nueva York.
10. Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB) (1992). Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide – Methodologie de prise en compte des parameters climatiques dans l'habitat et conseils pratiques. Tomo 1. CSTB, París, Francia.
11. Swami, M.V. y Chandra S. (1988). "Correlations for Pressure Distribution on Buildings and Calculation of Natural Ventilation Airflow". ASHRAE Transactions, Vol. 94, Part 1.
12. Chandra S., P.W.Fairey y M.M.Houston (1983). "A Handbook for Designing Ventilated Buildings". Florida Solar Energy Centre, Cabo Cañaveral, USA.
13. "Design: cooling buildings by natural ventilation". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineering Support Agency (2004).
14. "1999 ASHRAE Handbook CD"
15. Yarke E., Fujol M., Vitali L. y Seoane, M. (2004) "Ventilación natural – Estimación de parámetros sobre modelos a escala utilizando equipamiento de bajo costo". Trabajo presentado en la XXVII Reunión de Trabajo de ASADES – La Plata – Argentina - 2004.
16. "Natural Ventilation in Buildings", Capítulo 3. Editor F. Allard (1998). James & James.
17. Axley, J.W. (1999). "Natural Ventilation Design using Looping Equations". Indoor Air 99.



## 7 – SUGERENCIAS PRÁCTICAS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE VENTILACION NATURAL

Los sistemas mecánicos de ventilación pueden ser diseñados independientemente del diseño del edificio en el que van a ser instalados, además pueden ser instalados en edificios existentes después de algunas modificaciones. En cambio, los sistemas de ventilación natural necesitan ser diseñados conjuntamente con el edificio, ya que el edificio y sus componentes son los elementos que pueden reducir o incrementar el movimiento del aire.

Arquitectos e ingenieros necesitan adquirir información cualitativa y cuantitativa acerca de las interacciones entre las características del edificio y la ventilación natural en orden de diseñar edificios y sistemas consistentes que logren un consumo bajo de energía. La información cualitativa incluye conceptos y criterios de diseño, la información cuantitativa incluye técnicas de cálculo para definir parámetros climáticos, dimensionamiento de aberturas, estimación de flujos de aire, y evaluación de los métodos mas convenientes para la selección de una solución adecuada.

A continuación se dan algunos criterios, sugerencias y/o consideraciones que pueden llegar a ser de gran utilidad para un diseñador que pretenda implementar técnicas de ventilación natural en edificios.

### Localización del edificio y sus partes componentes

Los siguientes objetivos principales deberían ser tenidos en cuenta cuando se selecciona un sitio para un proyecto de edificio adecuado para ventilación natural:

- Obtener el mayor aporte del flujo de aire según la topografía y la posición de los edificios aledaños, para lograr un incremento del potencial de ventilación en los recintos interiores;
- Equilibrar la utilización de los recursos naturales para un mejor compromiso entre el confort térmico en verano e invierno;
- Evitar situaciones con vientos permanentes no deseados;
- No utilizar flujos de aire con contaminantes o polvillo

Si el edificio no se encuentra en un área urbana, debería localizarse de manera tal de aprovechar los gradientes de viento local. En montañas y cerros conviene localizarlos en la mitad de la pendiente, ya que en esta posición vientos moderados que suben por la pendiente pueden generar ventilación cruzada en la sección más corta del edificio. Si se encuentra en cercanía al mar, río o un lago, el edificio debería tratar de ubicarse cerca de la costa con el eje longitudinal paralelo a la costa para aprovechar las brisas marinas.

Si el edificio se encuentra en un área urbana, como ocurre generalmente, debería ubicarse lo mas alejado posible de otros edificios que puedan obstruir los vientos en verano. Si esto no es posible el edificio debe tratar de ubicarse con su eje longitudinal perpendicularmente a la dirección preponderante del viento en verano, si la dirección preponderante del viento en invierno es distinta, como usualmente ocurre, es posible buscar una posición que optimice la localización relativa para obtener una buena exposición a los vientos del verano y un resguardo de los vientos de invierno (Fig. 7.1).



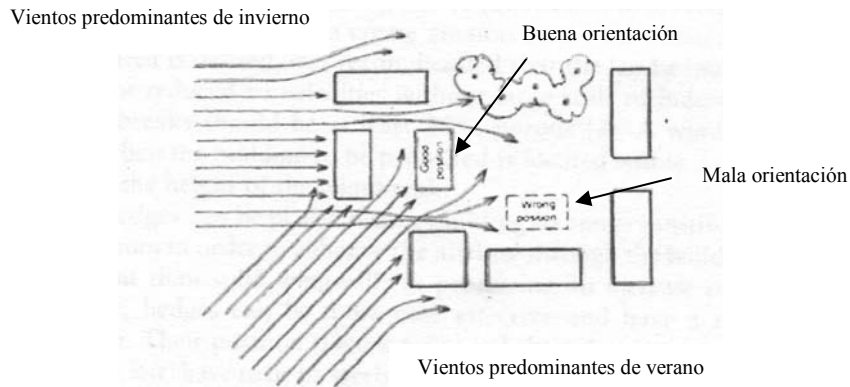
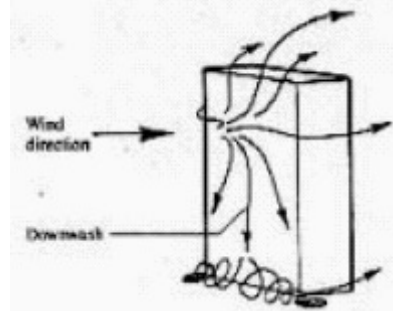


Figura 7.1. Ejemplo de buenas y malas localizaciones del edificio en un entorno urbano, con respecto al viento

En áreas urbanas muy densas, los recintos que necesitan más ventilación deben ser ubicados en los pisos superiores donde el flujo de viento es más fuerte y menos turbulento que cerca del suelo. En sitios donde hay edificios cercanos, el estudio del flujo de aire puede llegar a ser muy complejo. A continuación se muestran distintos efectos que pueden producir fuertes vientos favoreciendo la ventilación, pero el diseñador debe tener mucho cuidado ya que también pueden llegar a generar efectos adversos en los peatones fuera del edificio o en balcones y corredores.

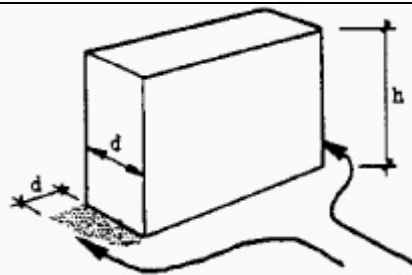
**Flujos descendentes en edificios altos**

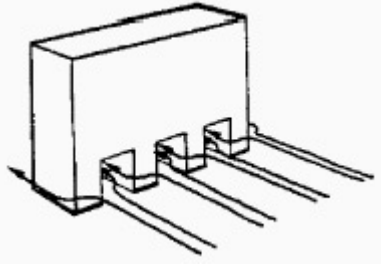
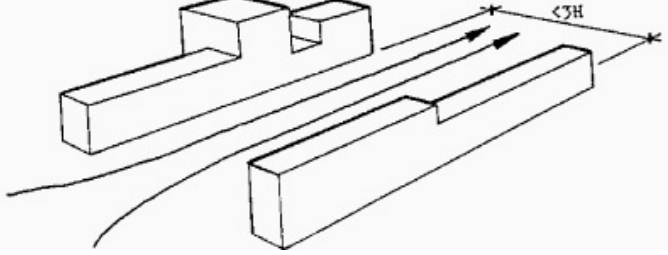
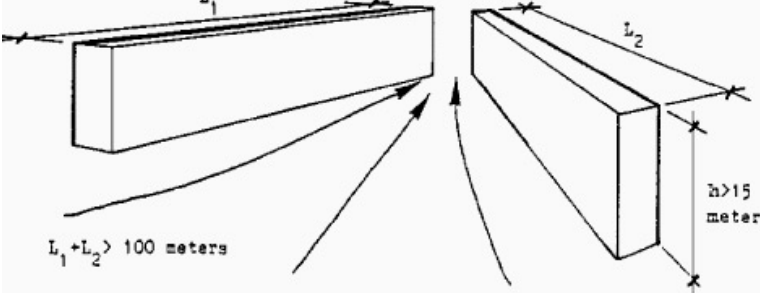
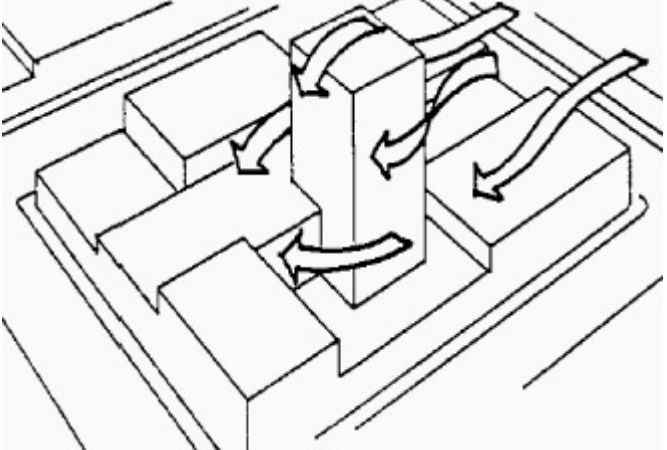
Algunos de los vientos más fuertes se encuentran en la base de los edificios altos, especialmente en los rincones, este efecto se produce porque los vientos en los pisos superiores son mayores que en la base, generándose presiones mayores en la parte superior del edificio. Esta diferencia de presión crea un fuerte flujo de aire descendente en la fachada donde actúa el viento.



**Efecto de los rincones**

Vientos fuertes ocurren en los rincones de un edificio donde el flujo de aire va desde la zona de alta presión en la fachada donde actúa el viento hacia la zona de baja presión en la fachada opuesta. La aceleración del viento está generalmente restringida a un área con un radio no mayor que el ancho del edificio. Cuanto más alto y ancho es el edificio, más fuerte es el efecto.



<p><b>El efecto de aberturas en la base del edificio</b>          Cuando un edificio de cinco pisos o más es elevado sobre columnas o cuenta con un pasaje a través del mismo, el aire forzado a través de las aberturas crea un canal de vientos intensificados.</p>	
<p><b>Efecto canal</b>          Una calle, u otro espacio abierto alineado con grupos de edificios juntos puede generar un canal si el espacio es largo y angosto (menos de tres alturas) en relación con la altura del edificio en estudio.</p>	
<p><b>Efecto Venturi</b>          El efecto Venturi ocurre cuando dos edificios largos son ubicados en ángulo con sus rincones muy juntos creando un pasaje muy angosto en el cual los vientos se aceleran obteniéndose altas velocidades.</p>	
<p><b>Efecto pirámide</b>          Las estructuras en pirámide ofrecen poca resistencia al viento y generalmente parece que dispersan la energía del viento en todas las direcciones. Una aplicación de este efecto se ve en la configuración que muestra la figura en donde se reduce el efecto del flujo descendente, y en los rincones.</p>	

Cuando el proyecto es rodeado por un conjunto de edificios, esta localización debería aprovecharse para evitar interferencias en el flujo de los vientos preponderantes del verano.

Sin embargo, el mayor compromiso debe estar dado considerando un resguardo suficiente para los vientos invernales. Una disposición alternada de edificios es más apropiada que una disposición paralela o en filas porque ofrece una mayor exposición a los vientos. Un efecto similar se obtiene si se ubican los edificios en diagonal con respecto a la dirección del viento preponderante (Fig. 7.2).



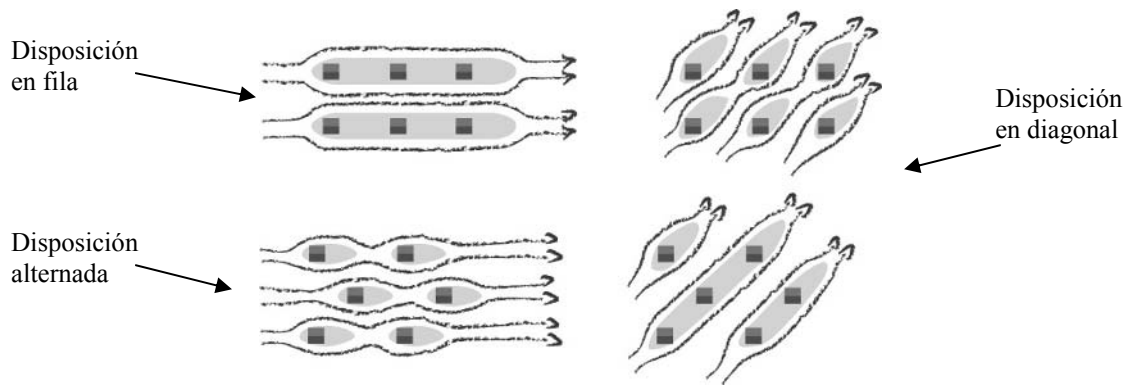


Figura 7.2. Patrones de flujo de aire a través de distintos Layout

Cuando la densidad y configuración de los edificios aledaños no permitan una correcta exposición a los vientos, el edificio debería ser diseñado para ser lo suficientemente alto para sobrepasar las obstrucciones, teniendo en cuenta consideraciones relacionadas a otros requerimientos y regulaciones edilicias.

### Forma y orientación del edificio

La forma y orientación del edificio definen el patrón de flujo de aire, es decir el camino que seguirá el viento a través del edificio, para esto se requiere de estudios aerodinámicos. La arquitectura aerodinámica es un campo complejo, mucha gente llega a conclusiones erróneas en la interpretación de la forma de los objetos y su interacción con un flujo de aire.



Las siguientes formas, de izquierda a derecha, tienen la siguiente resistencia al flujo: 1; 2,6; 4 y 9,3. Generalmente se asume que la forma circular es más aerodinámica que la rectangular, concepto totalmente erróneo. Esto demuestra que la intuición está usualmente equivocada en relación a la aerodinámica y la herramienta más confiable es realizar pruebas en túneles de viento. En la Figura 7.3 se pueden apreciar patrones de flujo de aire para distintas formas de edificios y orientaciones.

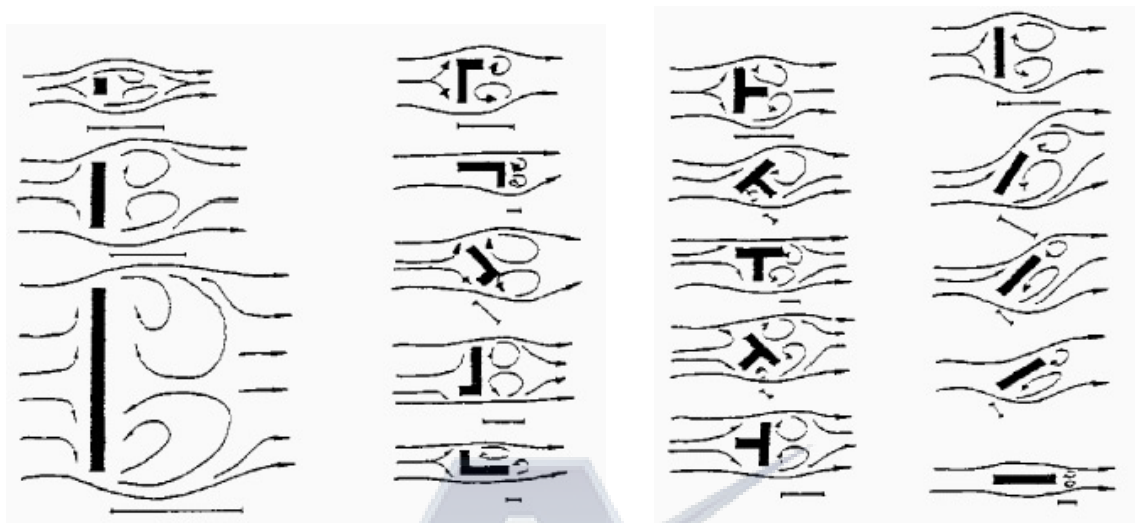


Figura 7.3. Patrones de flujo de aire para distintas formas de edificios y la influencia de su orientación



Otra variable a tener en cuenta es la altura del edificio, si se aumenta, manteniéndose el largo y el ancho del edificio, la velocidad del viento aumentará en los pisos superiores induciendo mayores flujos de aire en las aberturas ubicadas en las fachadas donde actúa el viento, mientras que en la fachada opuesta se generará mayor succión. Incrementando la altura de un edificio se puede obtener mayores beneficios del efecto stack en escaleras y otros conductos. Este efecto puede ser usado para propósitos de ventilación cuando el flujo de viento sea débil. Sin embargo, por encima de una cierta altura, la estratificación de la densidad del aire y temperatura podría causar un exceso de diferencias de temperatura entre los pisos superiores e inferiores del edificio, que no podría ser fácilmente eliminado por mecanismos pasivos.

Valores cualitativos sobre la influencia de la proporción de las fachadas, es decir la relación entre el largo y el ancho de un edificio, pueden ser obtenidos con el modelo de Mario Grosso explicado en el Capítulo 5. Como regla general, la dimensión de la sección que debe ser paralela a los vientos predominantes de verano debe mantenerse en un mínimo funcional. Además la relación entre el largo y el ancho debería no ser muy grande para evitar una disminución significativa de la presión en el medio de la fachada donde actúa el viento con un posible efecto de succión en los bordes.

Cuando la mejor orientación para evitar una excesiva incidencia solar es opuesta a la mejor orientación con respecto a los vientos, las consideraciones solares son generalmente las que mas peso tienen en la decisión final. Esto es especialmente cierto en edificios elevados donde la necesidad de una orientación que reduzca ganancias solares es lo más importante. Sin embargo, si el edificio es bajo, está bien aislado, tiene un color externo claro y cuenta con ventanas con un sombreado efectivo, la influencia sobre las temperaturas internas con respecto a la orientación probablemente sea despreciable. En estos casos, prevalece la elección de la orientación en función de la ventilación por su efecto mayor en las condiciones interiores de confort térmico. En la figura 7.4, se puede apreciar distintas configuraciones con respecto a la exposición solar y al viento.

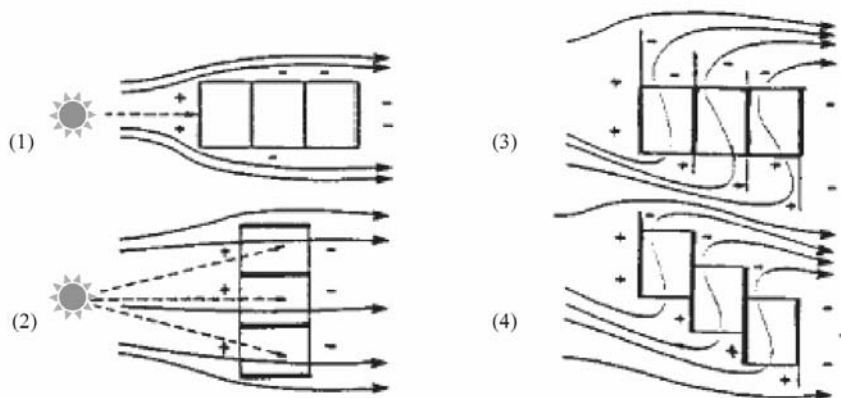


Figura 7.4. Forma y orientación del edificio con respecto a la exposición solar y al viento. (1) Buena protección solar, mala ventilación; (2) Buena ventilación, mala protección solar; (3) Buena protección solar y ventilación, gracias al uso de aleros; (4) Buena protección solar y ventilación, gracias a la ubicación alternada de los recintos del edificio.

## Diseño del paisaje

La construcción de un paisaje adecuado alrededor de los edificios tiene una importante función en el control del movimiento del aire a través de los mismos y se genera un microclima particular. El tipo y disposición de vegetación a ser incluida en un sitio debe ser elegida teniendo en cuenta el patrón de flujo de aire además de consideraciones estéticas y ambientales. Las principales funciones de la vegetación son: resguardo del viento, desvío del viento, aceleración del aire, acondicionamiento del aire y sombreado.

Arbustos densos pueden ser ubicados alrededor del edificio para generar zonas de presión positiva y negativa, son menos efectivos que aleros y proyecciones horizontales pero son más

económicos y tienen una apariencia agradable. La posición (Figura 7.5) y la distancia de las aberturas (Figura 7.6, izquierda) deben ser apropiadamente elegidas ya que afectan el patrón del flujo de aire dentro del recinto. Cuando se plantan árboles su distancia de las aberturas es fundamental ya que pueden afectar el desplazamiento vertical del flujo de aire interior (Figura 7.6, derecha).

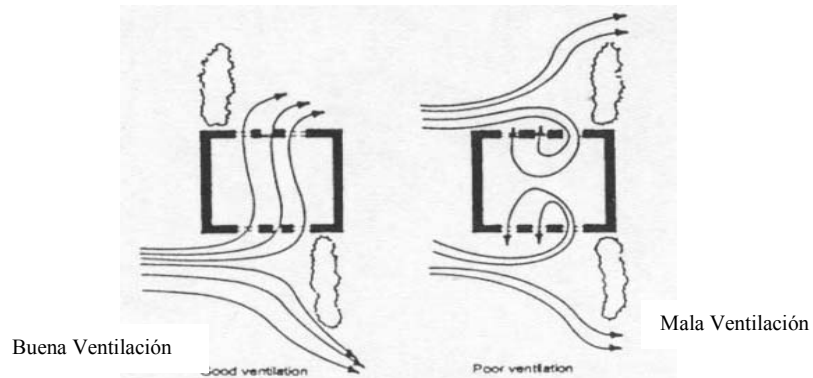


Figura 7.5. El efecto de la posición de los arbustos en el patrón de flujo a través de un edificio

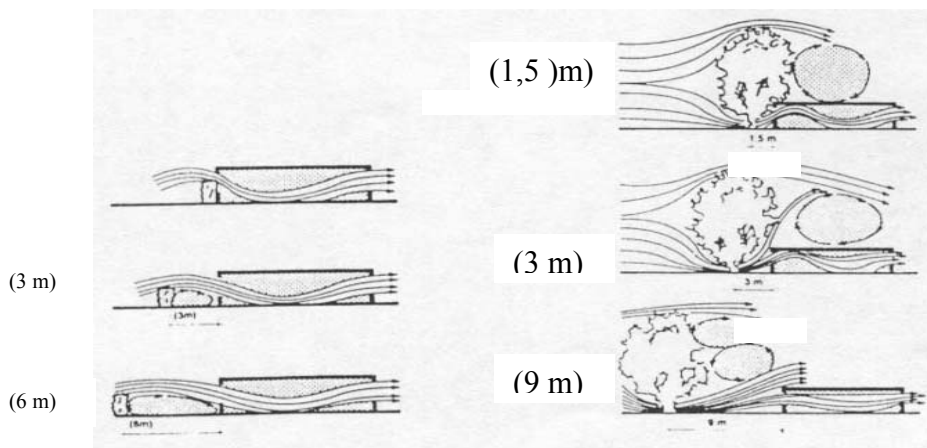


Figura 7.6. El efecto de un arbusto (izquierda) y un árbol (derecha) en el patrón de flujo a través de un edificio en relación a su distancia con respecto a las aberturas

Hileras de árboles o arbustos pueden ser usadas para dirigir al aire directamente hacia el edificio o bien alejarlo del mismo (Figura 7.7). La vegetación puede crear áreas de altas velocidades de viento haciendo pasar al aire a través de pasajes angostos (efecto Venturi) (Figura 7.8). Las zonas donde el flujo de aire es acelerado son las de mayor presión negativa por lo que convendría ubicar las aberturas de salida sobre estas fachadas.

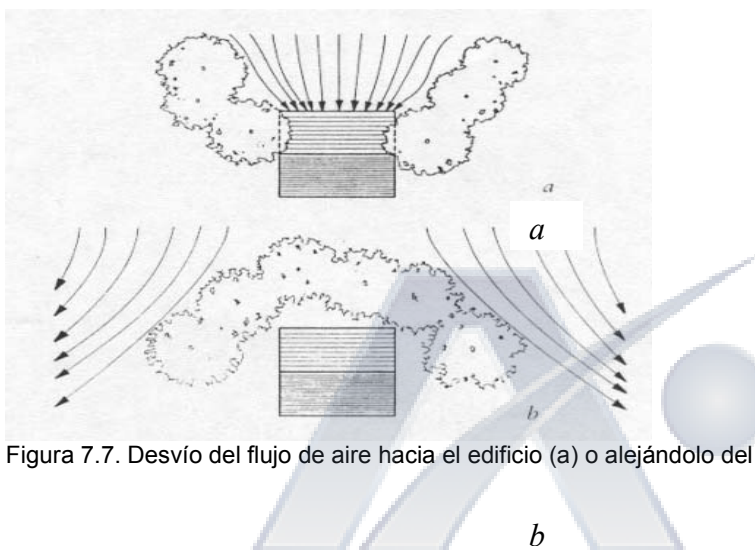


Figura 7.7. Desvío del flujo de aire hacia el edificio (a) o alejándolo del edificio (b)



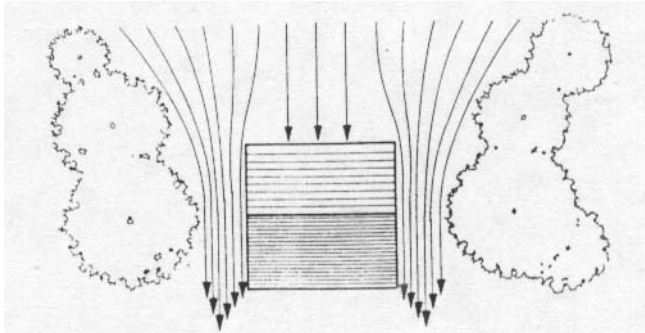


Figura 7.8. Angostamiento del espacio entre arbustos o árboles y el edificio para acelerar el flujo de aire

A través de los efectos de sombreado y transpiración, el calor contenido en el aire es absorbido por la vegetación mientras que la humedad del aire aumenta. Este proceso induce a un enfriamiento del aire. Además la vegetación reduce el ruido, remueve partículas de polvo, absorbe dióxido de carbono e introduce oxígeno al aire.

### Forma del techo

La forma del techo de un edificio afecta el remolino descendente, así como también la distribución de la presión del viento en las partes superiores de las fachadas. Consecuentemente, el flujo de aire cerca del techo, a través del ático y en los recintos ubicados en los pisos superiores resulta modificado según la forma del mismo.

Un techo plano o uno con una pendiente menor a  $15^\circ$  tiene presiones negativas sobre el total de su superficie independientemente del ángulo de incidencia del viento. Cualquier abertura ubicada en cualquiera de estos tipos de techos experimentarán una succión y funcionarán como aberturas de salida. Los techos que tengan una inclinación superior a los  $15^\circ$ , tendrán presiones positivas. Los techos a dos aguas con inclinaciones menores a  $21^\circ$  estarán bajo presiones negativas sobre el total de su superficie.

Para inclinaciones superiores la cara donde actúa el viento tendrá presiones positivas, mientras que la cara opuesta siempre tendrá presiones negativas. En la Figura 7.9 se pueden apreciar la distribución de presiones y patrones de flujo sobre distintos tipos de techos.

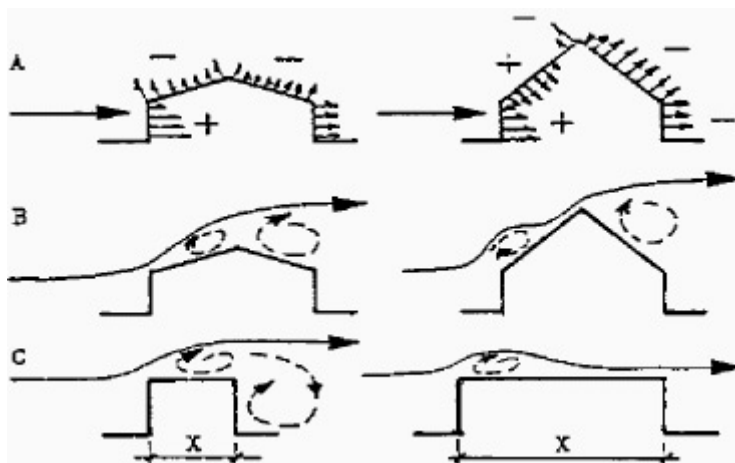


Figura 7.9. Distribución de presiones y patrones de flujo sobre distintos tipos de techos.

El efecto de las salientes del techo puede ser utilizado para lograr sombreado y mejorar la ventilación. Esto se debe a que las salientes del techo incrementan la presión positiva en el exterior de la ventana induciendo un flujo de aire mayor al interior del recinto, el efecto puede apreciarse claramente en la figura 7.10.

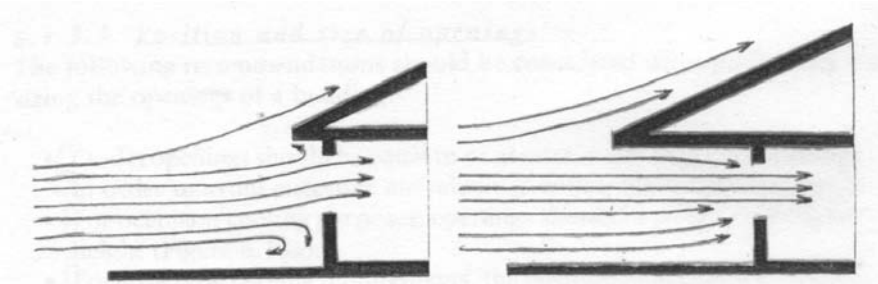


Figura 7.10. Efecto sobre el flujo a través de una abertura debido al aumento de la profundidad de la saliente del techo

## Ubicación y tamaño de aberturas

Siempre que sea posible, para obtener una buena ventilación, lo mejor es proveer a un recinto de ventilación cruzada, es decir, una abertura sobre la fachada donde actúa el viento (zona de presión positiva) y la otra en la fachada opuesta (zona de presión negativa).

Para ventanas en paredes adyacentes la mejor distribución de aire (las velocidades promedio aumentan entre el 10% y el 20%) se obtiene cuando el ángulo de incidencia del viento es perpendicular al eje de las aberturas. Mientras que para aberturas en paredes opuestas, los vientos oblicuos aumentan las velocidades promedio entre un 20% y 30% más que con vientos perpendiculares. Contrariamente a lo que se pueda creer, en este caso no conviene ubicar las aberturas perpendicularmente a la dirección de los vientos preponderantes en verano, sino que los mejores resultados se obtienen con ángulos de incidencia del viento de entre 30° y 60°.

La figura 7.11 muestra patrones de flujo de aire para configuraciones con ventanas en paredes opuestas y en paredes adyacentes y la figura 7.12 muestra el efecto del ángulo de incidencia del viento en el flujo de aire interno.

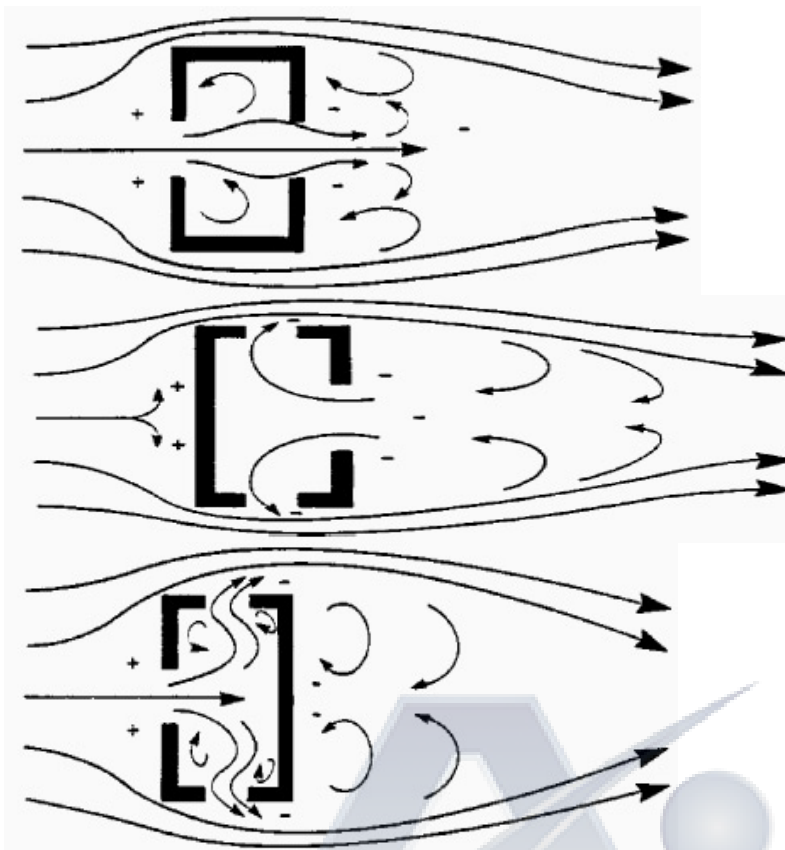


Figura 7.11. Patrones de flujo y zonas de presión

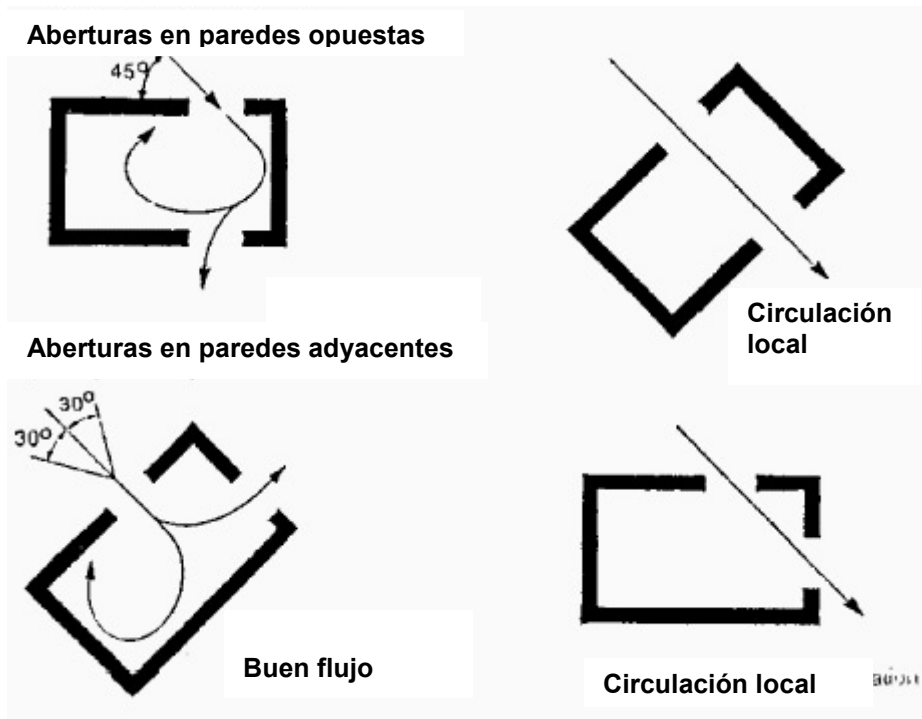


Figura 7.12. Efecto del ángulo de incidencia del viento en el flujo de aire interno

Cuando las ventanas están ubicadas en la superficie de una sola pared, la ventilación suele ser débil y es casi independiente de la dirección del viento. El promedio de velocidad interior no suele cambiar significativamente con el aumento del tamaño de las aberturas. Lo más efectivo que se puede hacer en estos casos es colocar dos aberturas sobre una la pared donde actúa el viento y así poder obtener ventilación cruzada (Figura 7.13).

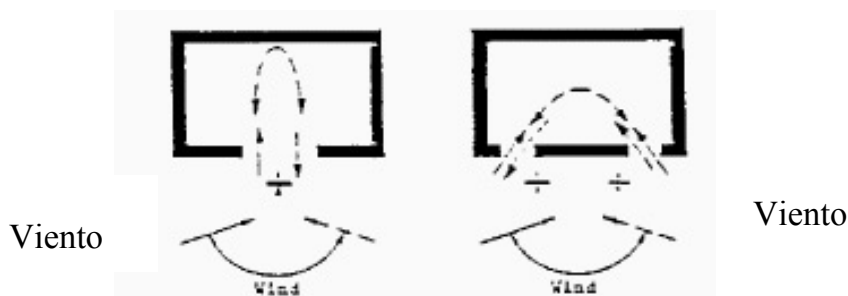


Figura 7.13. Cuando sólo se cuenta con una pared exterior, es una buena opción colocar dos ventanas sobre la misma

La correcta ubicación de las aberturas es fundamental para lograr una eficiente ventilación del recinto. Si lo que se busca es utilizar ventilación de confort sobre las personas, las aberturas deberían ubicarse a la altura de los ocupantes (Figura 7.14a), en cambio si lo que se busca es un refrescamiento estructural del edificio a través de la ventilación nocturna, la posición de las aberturas deben ser cercanas a las superficies de intercambio de calor, como paredes, pisos y cielorrasos (ver Figura 7.14b y 7.15).

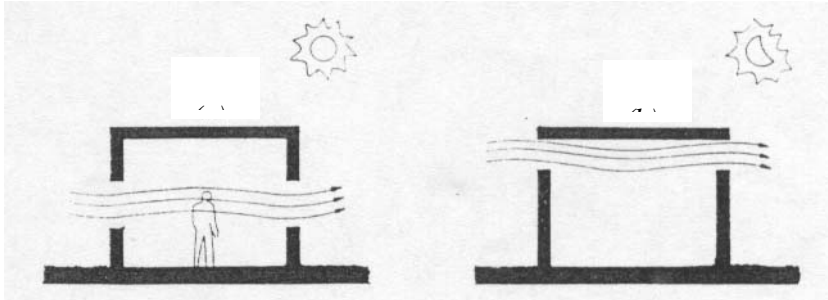


Figura 7.14. Posición de las aberturas para (a) optimizar el refrescamiento sobre las personas y (b) sobre la estructura

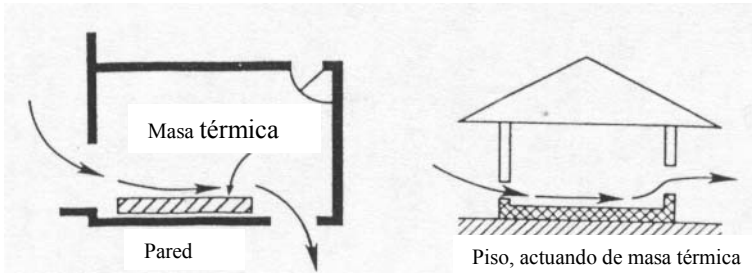


Figura 7.15. Configuraciones para ventilación nocturna para optimizar la exposición de las superficies de la masa térmica

Es interesante destacar que la posición de las aberturas de salida no afectan significativamente el patrón de flujo del aire, sino que la variable que lo controla es la ubicación de las aberturas de entrada, además del tipo de abertura. Esto se puede apreciar en la figura 7.16

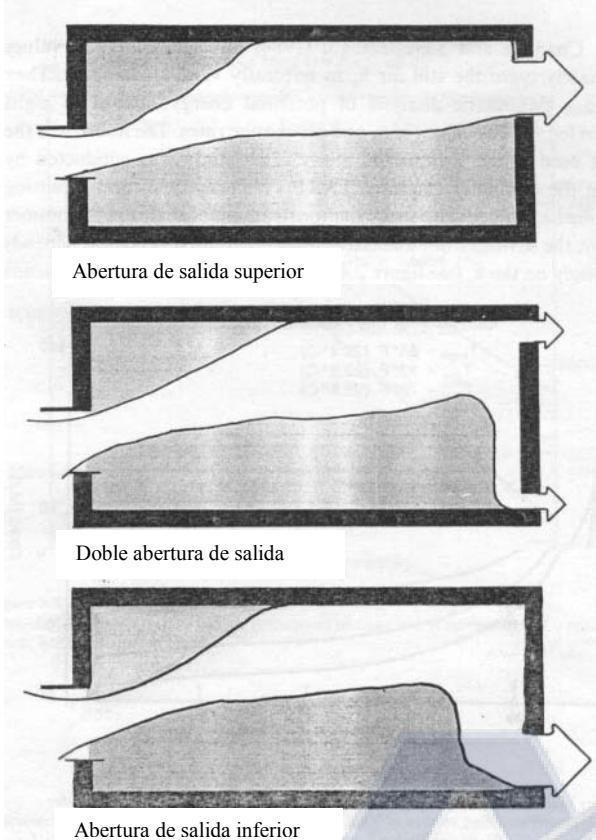


Figura 7.16. La ubicación de las aberturas de salida del aire tiene un efecto muy pequeño sobre el patrón de flujo

Otro efecto poco conocido es el efecto Jet en la pared, si la abertura de entrada se ubica cerca del rincón del recinto, el aire tiende a circular por la pared más cercana, lavando las paredes y así se obtiene una mejor circulación de aire por el recinto, este interesante efecto puede verse en la Figura 7.17.

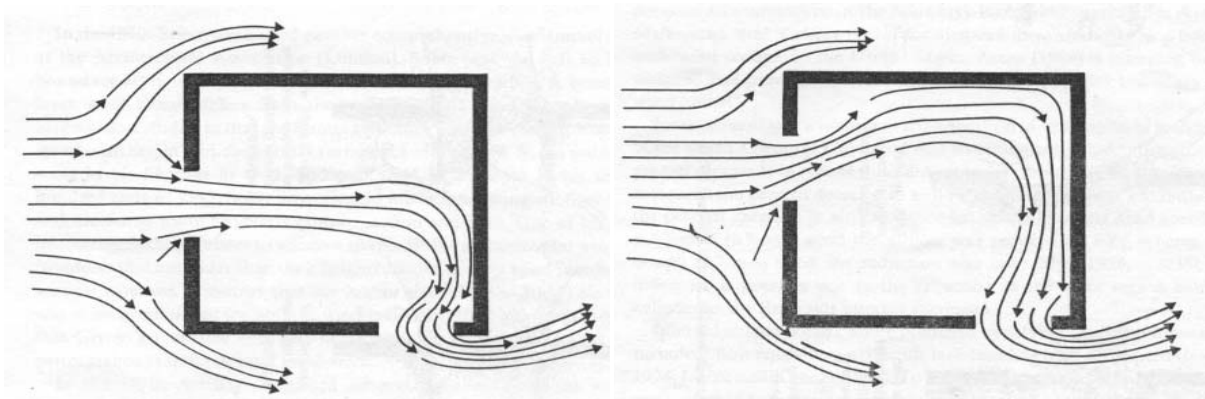


Figura 7.17. El efecto Jet sobre las paredes

La influencia del tamaño de las aberturas depende de si el recinto cuenta con ventilación cruzada o no. Si sólo cuenta con aberturas sobre una sola pared, el aumento del tamaño de las aberturas tendrá un pequeño efecto en el flujo de aire interior, especialmente si el viento es perpendicular a las aberturas. Cuando el viento es oblicuo aumentando el ancho de las aberturas se provee de un gradiente de presiones mayor obteniéndose velocidades de aire interior mayores.

En recintos con ventilación cruzada, el flujo de aire es determinado principalmente por el área de la abertura más chica, cuando las áreas de aberturas de entrada y salida son iguales, o las de entrada son ligeramente menores a las de salida, se obtienen mayores flujos de aire y mayores velocidades de aire interior.

Incrementar el área de las aberturas de entrada sin modificar el área de las de salida o viceversa, produce un pequeño aumento de la velocidad de aire interior. Cuando la abertura de entrada es menor a la de salida, la velocidad máxima interior es mucho mayor, pero la velocidad promedio sólo es un poco mayor, comparado con áreas de abertura iguales. En cambio, cuando el área de las aberturas de entrada es mayor a las de salida, la distribución de velocidades en el recinto es mucho más uniforme.

Teniendo en cuenta estas características, se puede sugerir utilizar áreas de aberturas de entrada menores que la de salida, si se quiere obtener un flujo concentrado en un área restringida, esto es ideal en recintos donde los ocupantes estén cerca de la abertura de entrada, por ejemplo en un dormitorio donde la cama esté cerca de la ventana. En cambio, se aconseja utilizar áreas de aberturas de entrada mayores que la de salida, en salas de estar donde se necesite una mejor distribución del aire. La figura 7.18 muestra el efecto de áreas de aberturas desiguales.

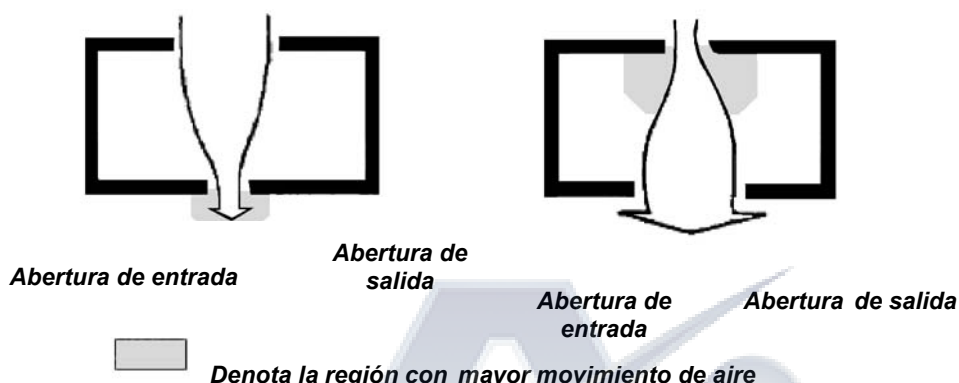


Figura 7.18. Efecto del tamaño de abertura relativo en el flujo de aire



## Forma y tipo de ventanas

La forma de la ventana donde ingresa el aire es el factor más importante en la determinación de la eficiencia del refrescamiento debido al viento. La forma horizontal es la mejor para capturar y admitir vientos desde más ángulos de incidencia del viento. Una ventana horizontal funciona mejor que una cuadrada o una vertical, y mejora su eficiencia en vientos con un ángulo de incidencia de 45° (Ver Figura 7.19).

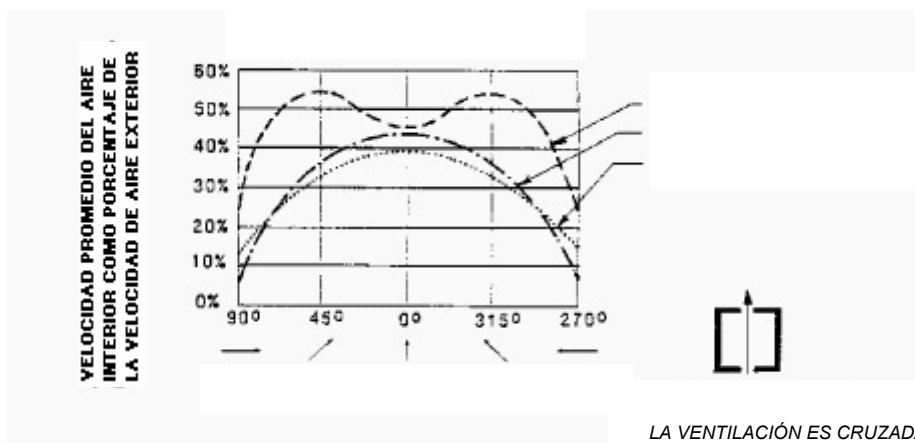


Figura 7.19. Performance de la forma de la ventana en relación al ángulo de incidencia del viento

Ventanas cuadradas y verticales exhiben una buena performance para vientos perpendiculares. Si el ángulo de incidencia varía en un rango estrecho y las ventanas pueden ser ubicadas perpendicularmente al viento, entonces aberturas cuadradas también pueden funcionar efectivamente.

Sin embargo, si el ángulo de incidencia varía mucho, entonces las ventanas horizontales trabajarán más efectivamente bajo una mayor variedad de condiciones. Aberturas altas exhiben una efectividad mucho menor que la que muestran las ventanas horizontales y cuadradas para todos los ángulos de incidencia.

Las diferencias entre las tipologías de ventanas con respecto a su influencia sobre el flujo de aire son suficientemente significativas como para tenerlas en cuenta. Además hay tipologías que son más aptas para ventilación de confort, ya que el flujo se dirige principalmente hacia las zonas que ocupan las personas, y otras tipologías son más aptas para la ventilación nocturna, ya que el flujo tiende a barrer en primer lugar las superficies del recinto.

En la tabla 7.20 se pueden apreciar los tipos de ventanas principales y las características del flujo de aire interior y en la Figura 7.21 se pueden ver los patrones de flujo para distintos tipos de ventanas.

Tabla 7.20. Tipo de ventana y características del flujo de aire interior

Tipo de ventana	Flujo de aire interior	Máxima área de abertura (%)	Recomendaciones para ventilación natural
Ventanas corredizas verticales y horizontales	Horizontal en la misma dirección del flujo externo o vertical depende si la ventana es horizontal o vertical respectivamente.	50	Deben ser colocadas a nivel y dirigidas en frente de la zona donde el flujo de aire es deseado.
Ventanas con ejes verticales centrados y ventanas de abrir de dos hojas	Control horizontal del flujo de aire.	50-90	Efecto similar a aleros. Usar al nivel donde el flujo de aire es deseado.

Ventanas de proyección horizontal	Flujo ascendente a menos que esté totalmente abierta.	50-90	La mejor ubicación es debajo de la zona donde el flujo de aire es deseado.
Ventanas pivotante con ejes horizontales	Control del flujo vertical. El flujo copia el ángulo de la hoja de la ventana	60-90	Pueden ser ubicadas a cualquier altura. No se pueden cerrar totalmente. Máximo control vertical.

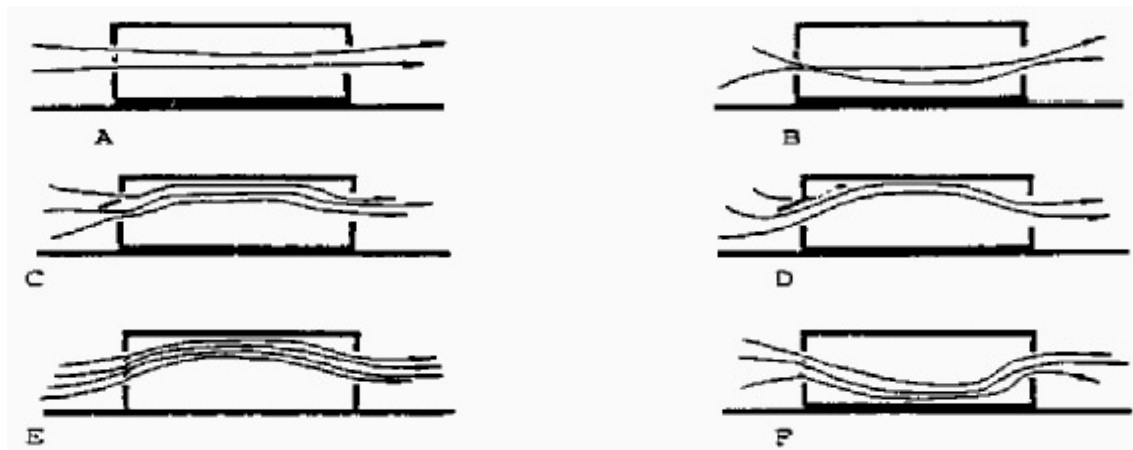


Figura 7.21. Patrones de flujo para distintos tipos de ventana. A) Ventana corrediza vertical: igual grado de apertura en la parte superior e inferior da como resultado un flujo horizontal; B) Ventana corrediza vertical: la apertura de solamente la parte superior o la inferior desvía al flujo hacia arriba o hacia abajo respectivamente; C) y D) Ventana de proyección horizontal: el aire es dirigido hacia arriba para cualquier grado de abertura salvo que esté horizontal; E) y F) Ventana pivotante con ejes horizontales: el aire se mueve aproximadamente en la misma dirección que las hojas.

## Efecto de mosquiteros en ventanas

El uso de mosquiteros en ventanas es esencial en muchas partes del mundo, particularmente en lugares tropicales. Los mosquiteros representan una resistencia al paso del aire causando una considerable reducción del flujo de aire a través de las ventanas. La disminución total del flujo de aire puede llegar a ser del 60%.

El efecto de los mosquiteros depende de la combinación entre la dirección del viento y la cantidad y ubicación de las ventanas. La reducción de la velocidad interior debido a los mosquiteros es mayor con vientos oblicuos que con vientos perpendiculares.

Givonni realizó experiencias en túneles de viento, en las que comprobó que utilizar un mosquitero alrededor de todo el balcón de un recinto es más efectivo que utilizar mosquiteros directamente aplicados en las ventanas. Esta solución permite proteger también los balcones de insectos y permitir su uso en la noche.

En la figura 7.22 se pueden apreciar las distintas configuraciones que testeó Givonni donde se muestran las velocidades promedio de aire interior en porcentaje de la velocidad del aire exterior.





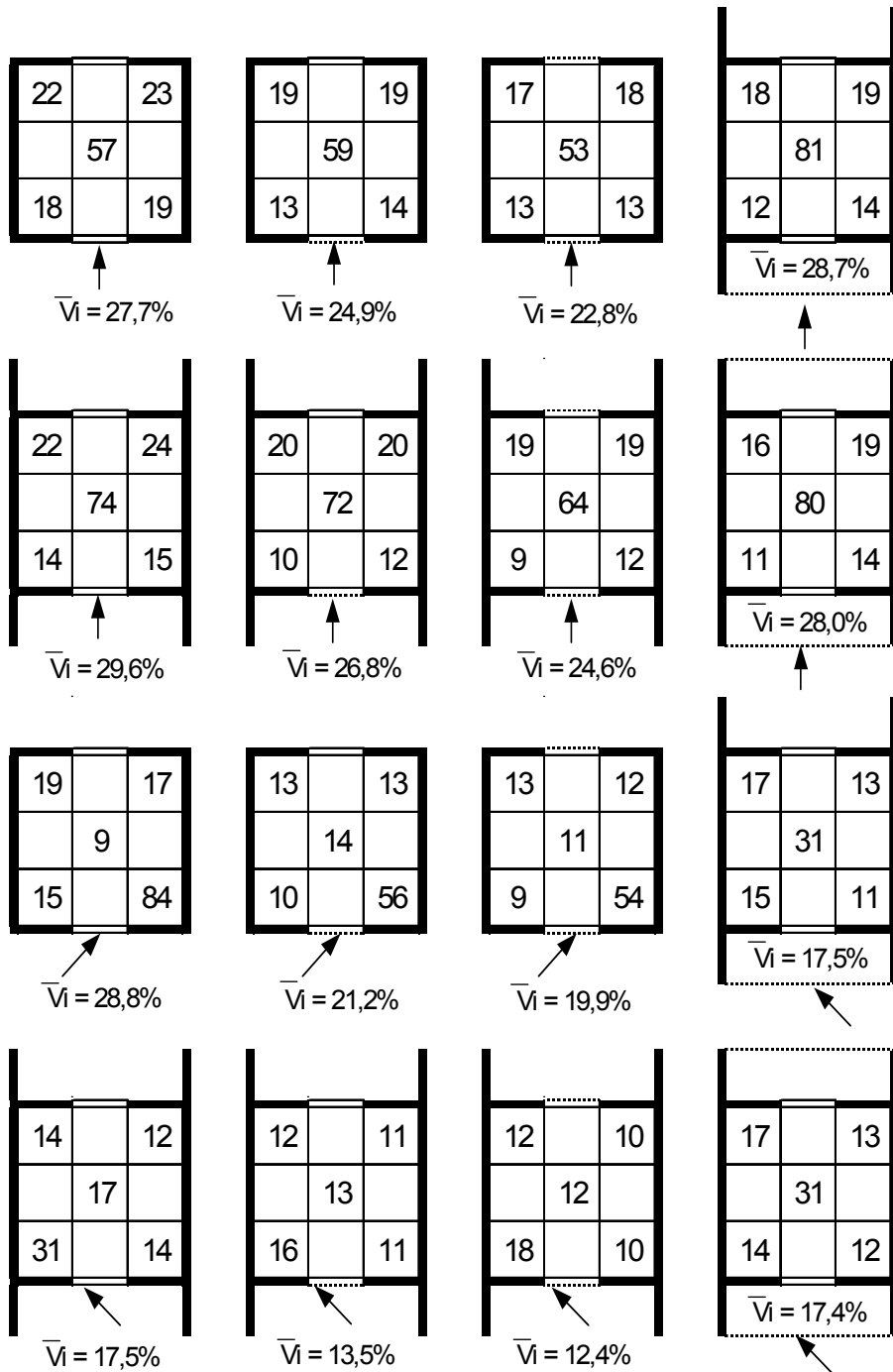


Figura 7.22. Efecto de los mosquiteros en la velocidad de aire interior

## Uso de aletas

Uno de los efectos más útiles de las aletas es la gran mejora que puede generar en las condiciones de ventilación en recintos con una sola pared externa. La ubicación propicia de aleros crea zonas de presión positiva y negativa a lo largo de la pared externa. Esta diferencia puede lograrse, por ejemplo utilizando aleros verticales en las dos ventanas de un recinto, ver Figura 7.23.

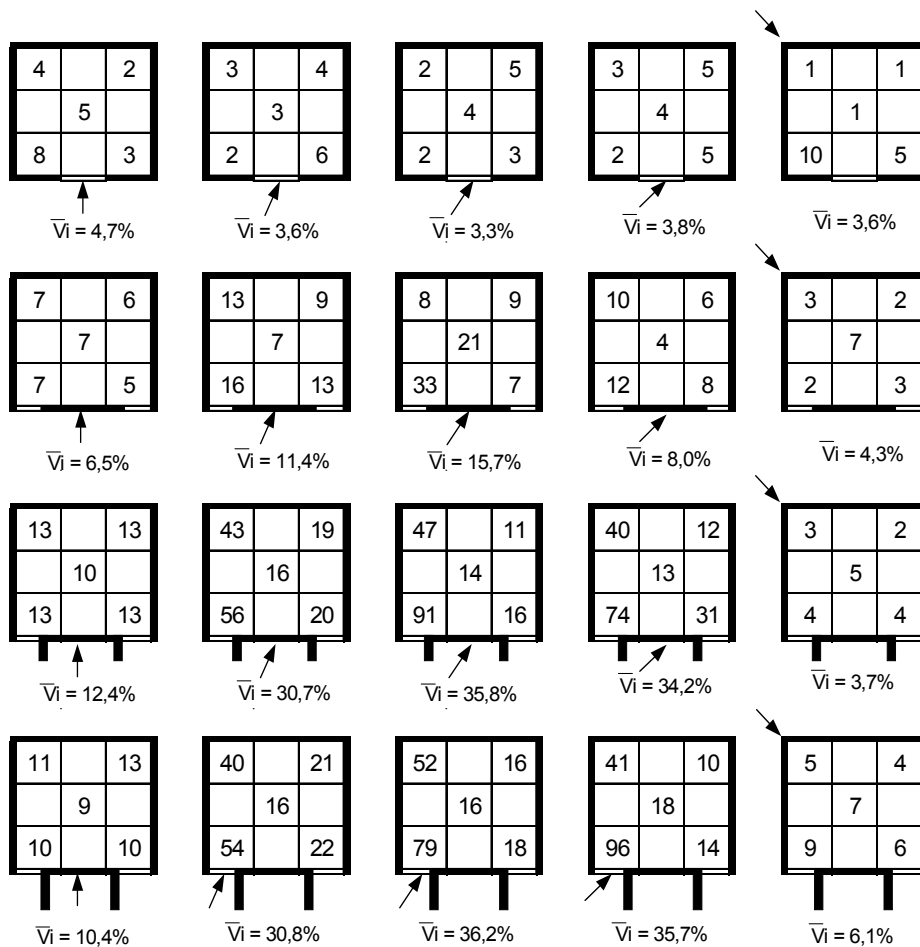


Figura 7.23. Efecto de las aletas en la velocidad de aire interior

Como se ve, una región de presión positiva se genera en frente de la ventana donde actúa el viento y una zona de succión se genera en frente de la segunda ventana. El aire entra al recinto a través de la primera ventana y sale por la segunda ventana, creándose en efecto una ventilación cruzada.

Un efecto similar se puede lograr incorporando proyecciones necesarias para crear un gradiente de presión, integrando los elementos de diseño arquitectónico y funcional. Por ejemplo, los balcones pueden ser diseñados en conjunción con las ventanas para utilizar las paredes laterales del balcón como elementos de control del flujo de aire, en la figura 7.24, se puede apreciar un ejemplo de un living (Fig. 7.24a) y un dormitorio (Fig. 7.24b) en un edificio de departamentos.

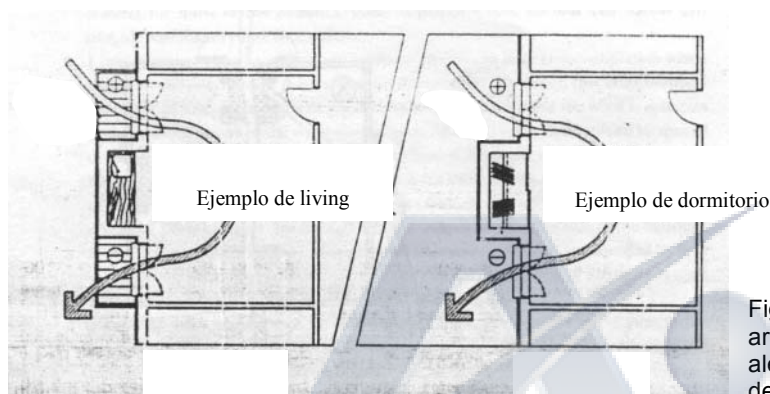


Figura 7.24. Soluciones arquitectónicas actuando como aleros en un edificio de departamentos

Como se dijo anteriormente, el uso de aleros pueden mejorar la ventilación en recintos con una sola pared externa, pero también puede hacerlo en recintos con aberturas que no se encuentren en zonas de presión positiva y negativa. En la Figura 7.25 se muestran distintas disposiciones de aleros para mejorar las condiciones de ventilación.

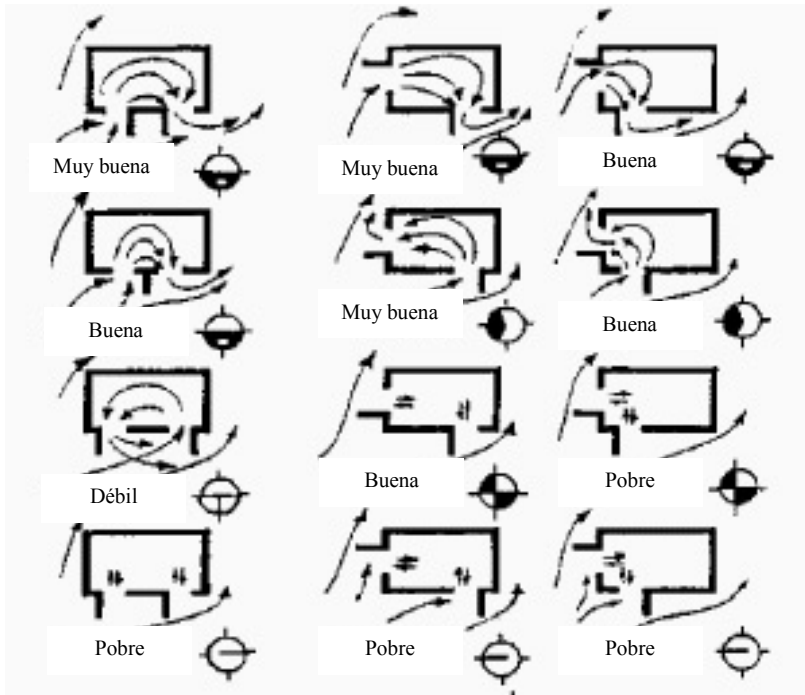


Figura 7.25. Diseño de aleros para recintos con dos ventanas en la misma pared o en paredes adyacentes y su efecto en los patrones de flujo de aire interiores

Además de mejorar las condiciones de ventilación, el propicio uso de los aleros puede proveer de sombreado actuando como proyecciones horizontales en las paredes este y oeste. Un diseño cuidadoso de los aleros horizontales puede mantener la eficiencia de ventilación de las aberturas. Dejando un espacio entre el alero y el edificio se logra que el flujo de aire superior ingrese al recinto (Figura 7.26).

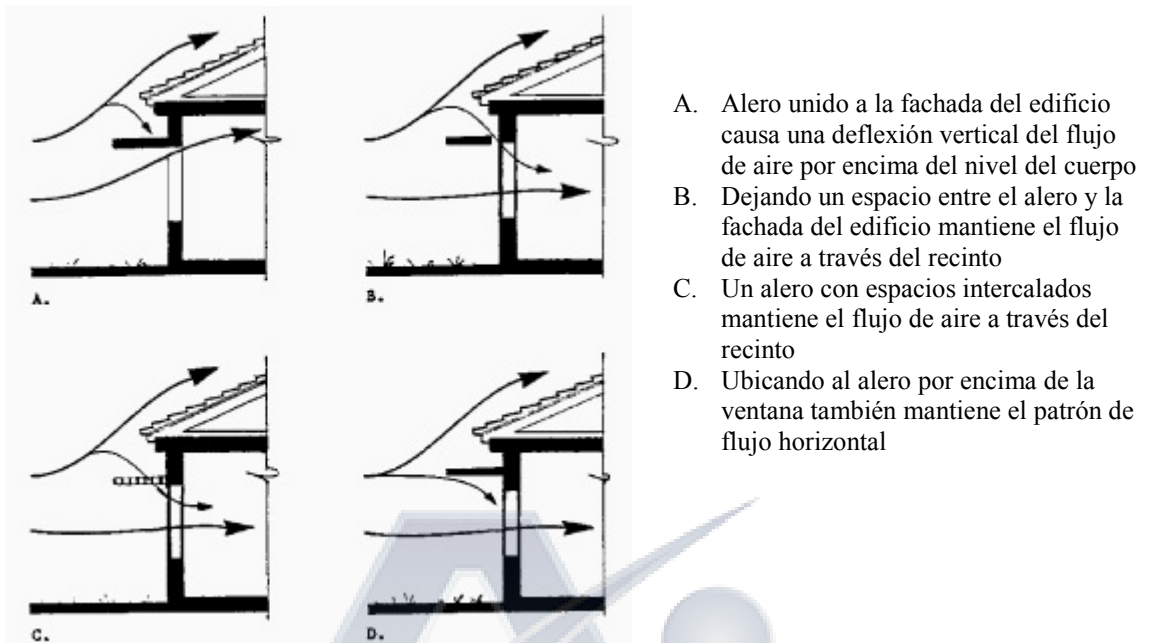


Figura 7.26. El efecto de aleros horizontales en el flujo de aire

La conclusión que se puede hacer con respecto al uso de aleros es que posibilita una gran mejora de la ventilación en edificios cuyos recintos tengan una sola pared exterior, como es el caso de muchas oficinas y salones de clases. Además eligiendo una orientación tal que sea oblicua a la dirección preponderante de los vientos en verano se maximiza el efecto. El ángulo entre la pared y el viento puede variar entre 20° y 70°. La profundidad de la proyección, para un edificio que contiene varios recintos, no debería interferir en la ventilación de los recintos adyacentes. Se recomienda que no debe ser más de la mitad de la distancia entre la proyección de la abertura de salida del primer recinto y el comienzo de la ventana del segundo recinto.

## Distribución interna del edificio

Cuando el aire debe pasar a través de más de un recinto en su trayecto entre la abertura de entrada y la de salida, encuentra una resistencia adicional. La resistencia depende del tamaño y distribución de las paredes y puertas interiores. Las divisiones interiores usualmente hacen que el flujo de aire cambie de dirección, así como también producen expansiones y contracciones sobre el mismo. El paso del aire por pasajes interiores crea turbulencia, incrementando la resistencia al flujo, y obteniéndose un caudal de aire menor. Sin embargo, las divisiones interiores si están bien diseñadas pueden ventilar un área mayor del recinto gracias a una distribución de velocidades de aire más uniforme.

El efecto de subdividir un recinto en dos partes desiguales fue estudiado experimentalmente. En la experiencia la dirección del viento era perpendicular a las ventanas y las mediciones se tomaron a la altura del centro de la ventana. En la Figura 7.27 se muestran las distribuciones de velocidades de aire interior y en la Figura 7.28 se pueden apreciar los patrones de flujo de aire obtenidos con pruebas de mediciones de humo.

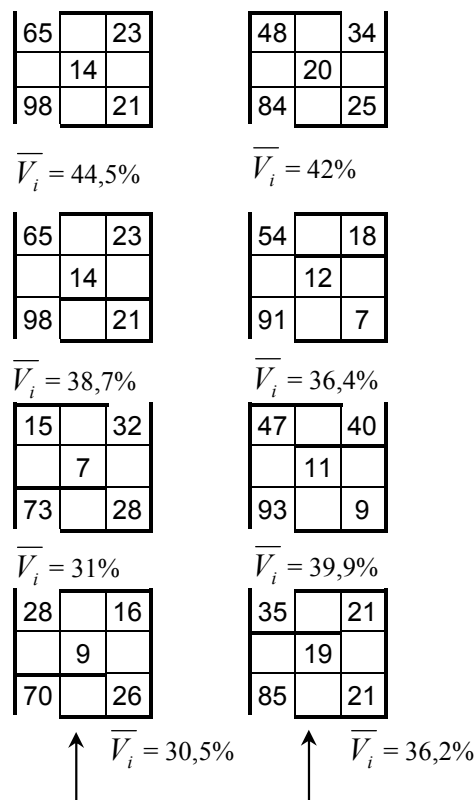


Fig. 7.27. Efecto de las divisiones internas en la distribución de velocidades internas del aire



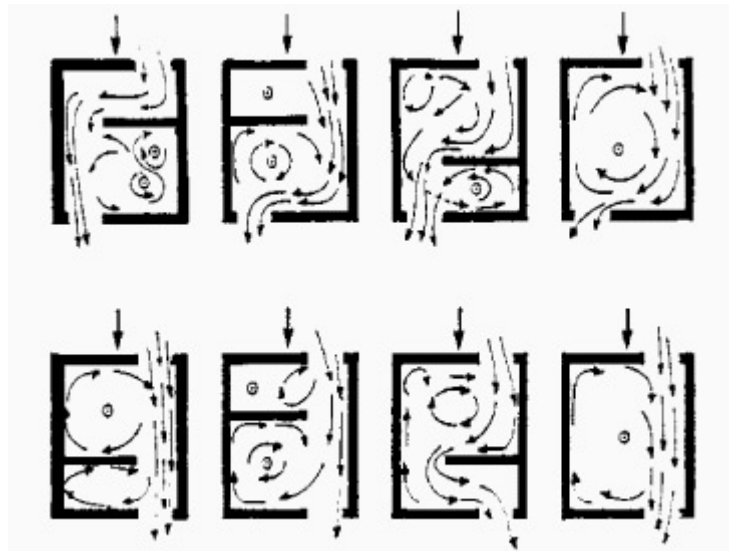


Figura 7.28. Efecto de las divisiones internas en los patrones de flujo de aire

Parece ser que con el tamaño de la división interna usada en la experiencia, una subdivisión moderada reduce las velocidades interiores en todo el recinto, siendo la reducción más grande entre el 44% y el 35%. La velocidades son menores cuando la división está cerca de la abertura de entrada del aire, ya que el flujo debe cambiar abruptamente de dirección, por lo que para mantener altas velocidades interiores se recomienda ubicar las divisiones perpendiculares al flujo cerca de las aberturas de salida del aire.

Los espacios interiores deben ser distribuidos apropiadamente para lograr una ventilación natural efectiva. La función de cada recinto, el layout y la orientación del edificio, y la posición de las aberturas son todos factores muy importantes a ser considerados, y si es posible, de una manera integrada.

## Distribución horizontal

La distribución horizontal de los espacios en un edificio debería tomar en cuenta principalmente a la ventilación cruzada.

En edificios residenciales, la cocina y el baño deberían ubicarse en la fachada opuesta a la acción del viento, con grandes ventanas actuando como aberturas de salida del flujo de aire proveniente de los recintos ubicados en la fachada donde actúa el viento. Esta distribución permite una buena ventilación mientras que se evita el transporte de olores de la cocina y el baño hacia otros cuartos.

Las divisiones perpendiculares al flujo de aire deben tratar de minimizarse para evitar obstrucciones al flujo. Además la ubicación de los muebles en un recinto debe ser diseñada de manera tal que no estorbe el movimiento del aire a través del recinto.

Las salas de estar y de estudio deben ser ubicadas en la fachada donde actúa el viento, así gozan de una buena exposición a los vientos preponderantes, mientras que los dormitorios pueden ser ubicados en cualquiera de las fachadas, pero en una posición más protegida. En la Figura 7.29 se muestra un ejemplo de ventilación cruzada a través de una residencia en relación a la dirección del viento.

En edificios de oficina, los espacios abiertos deben tener ventanas en paredes opuestas. Si las divisiones tiene una altura menor a la del cielorraso, deberían ubicarse de manera tal de reducir el efecto de obstrucción del flujo del aire. Una disposición de oficinas en una sola hilera es mejor que dos hileras de oficinas separadas por un pasillo, tanto para ventilación como para iluminación.

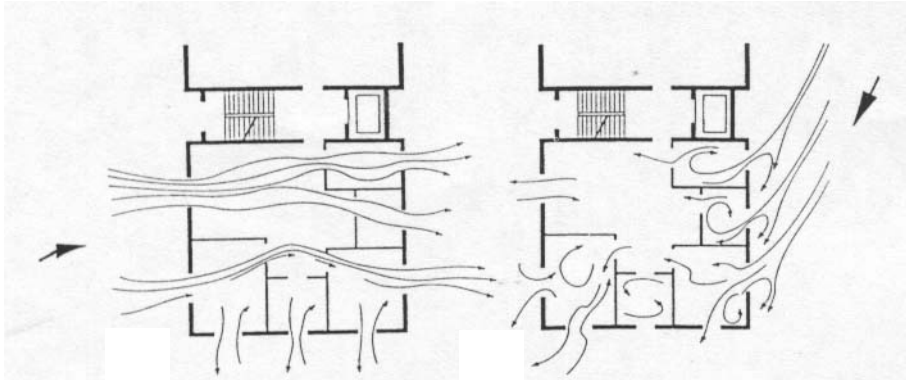


Figura 7.29. Patrones de flujo para ventilación cruzada en una configuración con distintas direcciones de viento: (a) buena ventilación; (b) mala ventilación

## Distribución vertical

La distribución vertical de los espacios interiores en un edificio está básicamente influenciada por el movimiento de aire creado por el efecto Stack.

En residencias de dos pisos, los recintos que generan grandes ganancias térmicas, como cocinas u oficinas con computadora, no deberían ser ubicados en el piso superior. Las salas de estar en los pisos superiores no deberían estar en contacto directo con el piso inferior para evitar el ingreso del aire caliente y contaminado de los cuartos de abajo.

En edificios residenciales de varios pisos o en edificios de oficinas, se debería prestar cuidadosa atención a la ubicación de las escaleras, que pueden funcionar como sistemas de evacuación del aire a través del efecto stack. Las aberturas de salida de aire deben ubicarse en la dirección opuesta a la acción del viento en la parte superior del edificio, mientras que las aberturas de entrada del aire de los departamentos u oficinas deben ubicarse en la fachada donde actúa el viento. En la Figura 7.30 se puede ver un edificio de oficinas donde se aprovechan las escaleras para el uso de la ventilación natural a través del efecto stack.

Debe tenerse en cuenta que las regulaciones de seguridad contra incendios exigen, que las escaleras estén separadas con muros resistentes al fuego, y además las aberturas deben contar con sistemas que las cierren automáticamente en caso de incendio. Regulaciones más complejas deben ser aplicadas a edificios de más de 12 metros de altura.

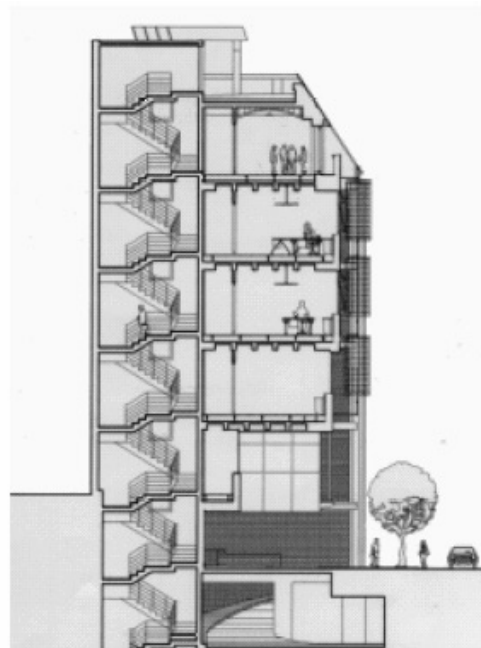


Figura 7.30. Edificio de oficinas diseñado para el aprovechamiento del efecto stack.



## Bibliografía

1. "Passive Cooling", Capítulo 2, Chandra. Editor Jeffrey Cook.
2. "Design: cooling buildings by natural ventilation". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineering Support Agency (2004).
3. "Natural Ventilation in Buildings", Capítulo 5 y 6. Editor F. Allard (1998). James & James. Londres.
4. Módulos didácticos de la asignatura Ingeniería Bioambiental (2005). Eduardo Yarke y Martha Fujol.
5. "Man, Climate & Architecture", Capítulo 15. B. Givonni (1976). Applied Science Publishers.
6. "Passive and low energy cooling of buildings", Capítulo 3. B. Givonni (1994).
7. "Design: cooling buildings by natural ventilation". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineering Support Agency (2004).
8. "1999 ASHRAE Handbook CD".
9. "Motion effects: Bioclimatic design & analysis courses notes". Preparado por M. Mc Kenna de la RMIT University. Seminario 2001.





## 8 - FACTORES QUE LIMITAN LA APLICACIÓN DE LA VENTILACIÓN NATURAL Y ESTRATEGIAS DE CONTROL

### Barreras que limitan la aplicación de la ventilación natural

La ventilación natural puede jugar un rol decisivo en el control de la calidad del aire interior y de la temperatura interior en verano. Sin embargo su aplicación es posible, con expectativas exitosas, solo cuando no hay problemas en áreas diferentes a su función específica y que actúan como obstáculos o barreras funcionales a su implementación. Estas barreras potenciales son presentadas a continuación.

#### Seguridad

Una de las preocupaciones más importantes para el ocupante de un edificio es la seguridad contra la intrusión no autorizada. Esto significa que cada abertura debe ser protegida, especialmente la de los pisos más bajos, donde el acceso es más fácil. Las soluciones típicas son limitar el tamaño máximo de la abertura al tamaño de la cabeza de un niño (15 cm.) o bien, proteger las aberturas con rejas con una separación que no exceda la misma distancia.

Pero no sólo personas pueden ingresar al edificio, sino también animales como ratones, gatos, perros, etc. en los pisos inferiores o pájaros o murciélagos en los pisos superiores. Además los insectos ingresan a través de cualquier abertura sin importar cuan pequeña sea ésta. La instalación de mosquiteros es algo común para la solución de este problema. En el mercado se pueden conseguir marcos de ventanas que traen incorporados mosquiteros enrollables, lo que constituye una solución simple y conveniente.

La reducción del tamaño de las aberturas para impedir el ingreso de intrusos, causa limitaciones en la intensidad de la ventilación natural. Por lo general, rejas y mosquiteros quitan iluminación y producen un impacto visual además de representar un costo adicional. Tampoco hay que olvidarse que las rejas eliminan rutas alternativas de escape en casos de emergencia, y esto puede ser contrario a las reglamentaciones.

La lluvia es otro inconveniente. Las aberturas en la fachada de un edificio ventilado naturalmente también permitirán el ingreso de la lluvia dentro del edificio. Para prevenir el daño que puede causar la lluvia, las aberturas deben ser controladas manualmente por los ocupantes o bien contar con un sistema de control automático. El control manual requiere de la presencia de personas dentro del edificio, por lo que durante la ausencia de ocupantes, las aberturas probablemente permanecerán cerradas por razones de seguridad y la ventilación quedará limitada a la infiltración, que puede llegar a ser un flujo suficiente para mantener una calidad de aire interior óptima pero insuficiente para el refrescamiento en verano. Como la ventilación nocturna es usualmente el modo operativo elegido para proveer refrescamiento natural en verano en edificios ventilados naturalmente, esta barrera juega un rol decisivo a menos que se provea de un sistema de control automatizado.

Para resolver estos problemas, se cuenta con posibles soluciones alternativas. Por ejemplo existen ventanas especiales auto-controladas para ventilación natural las que se pueden conectar con una pequeña central meteorológica y comandar las aberturas según la temperatura, el viento, la hora, además cuentan con sensores de lluvia. En la actualidad se están desarrollando mejores soluciones para poder atenuar este tipo de barreras.

#### Ruido

Cualquier tipo de ruido dentro de un edificio es indeseable, ya sea que provenga del exterior o de otros ambientes o pisos del edificio. Para el caso de ventilación nocturna cuando el edificio está desocupado este no es un problema importante pero si lo es para el caso de la ventilación de confort sobre personas. En un edificio ventilado naturalmente, donde debe haber aberturas con la menor cantidad de obstrucciones posibles para el paso del flujo de aire, hay muy poca atenuación

del sonido y pueden aparecer problemas de transmisión de ruidos excesivos. El ruido del tráfico puede llegar a ser un gran inconveniente y además en muchos países existen regulaciones que limitan el nivel de ruido en el interior de un edificios.

En algunos países se emplean aberturas especiales con baffles reductores de sonido para sobrellevar esta dificultad. Sin embargo, la reducción de sonido usualmente significa una resistencia al flujo de aire y se debe hacerse un cuidadoso balance entre estos dos efectos opuestos.

Se hace notar que los sistemas mecánicos de ventilación no están libres de ruidos. Los sistemas mecánicos producen ruido en ventiladores y motores que generalmente se propagan a través de los elementos estructurales del edificio. Además el aire en movimiento produce ruidos en los conductos, rejillas y difusores que también se transmiten dentro del recinto. Este tipo de ruido suelen ser minimizados con la selección de equipos poco ruidosos, instalación de amortiguadores y materiales atenuadores de sonido, juntas entre los equipos y los conductos, etc. Estas técnicas pueden ser efectivas en la reducción de la mayor parte del ruido, pero siempre queda un nivel de ruido remanente.

Como conclusión, tanto la ventilación natural como los sistemas mecánicos de ventilación son problemáticos para el control del ruido. Un edificio ventilado naturalmente, bajo condiciones correctas de diseño y dimensionamiento, no debería ser más ruidoso que uno ventilado mecánicamente.

## **Contaminación del aire**

En áreas rurales o suburbanas donde la concentración de contaminantes en el aire exterior usualmente no alcanza altos niveles, lo que significa que el ingreso del aire exterior a un recinto no causa problemas en la calidad del aire interior, la ventilación natural constituye una estrategia pasiva de refrescamiento aceptable. Sin embargo, el ingreso de polvillo u olores desagradables puede ocurrir ocasionalmente y esto debe ser cuidadosamente evaluado caso por caso.

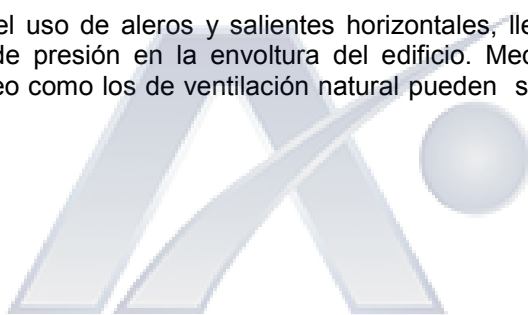
En cambio, en áreas urbanas la polución del aire exterior es un fenómeno frecuente y normalmente intenso, con altas concentraciones de contaminantes que son producidas sobre todo durante el día. Consecuentemente el ingreso de aire exterior al edificio puede ocasionar serios problemas de calidad de aire interior.

Obviamente, la ventilación natural no es recomendable en áreas urbanas contaminadas, especialmente durante el día, ni tampoco en áreas rurales donde el ingreso de polvillo u olores desagradables sea frecuente. En estos casos, es preferible utilizar sistemas mecánicos de ventilación que incluyan filtros mecánicos o químicos.

## **Sombreo**

Cuando la ventilación natural se utiliza durante las horas del día en días despejados en verano, se debe bloquear la ganancia directa del sol para evitar un sobrecalentamiento interior. También deben de tenerse en cuenta necesidades de privacidad y el posible bloqueo del contacto visual directo entre el interior y el exterior. Sin embargo cualquier obstrucción, tanto externa (salientes, cortinas de enrollar) como interna (cortinas) representa un serio obstáculo al flujo de aire. En edificios ventilados naturalmente. De alguna manera los diseños deben contar con elementos de sombreado que sirvan para su propósito (sombreo o privacidad), pero que al mismo tiempo permitan el suficiente ingreso de aire.

En muchos casos el uso de aleros y salientes horizontales, llegan a ser muy útiles en la creación de diferencias de presión en la envoltura del edificio. Mediante su empleo, tanto los requerimientos de sombreado como los de ventilación natural pueden ser satisfechos con la misma solución arquitectónica.



## **Ráfagas fuertes o vientos arrachados**

Para el diseño de sistemas de ventilación natural generalmente se requieren de aberturas de tamaño mediano y a menos que se cuente con un sistema de accionamiento automatizado, es imposible para los ocupantes responder a las fluctuaciones rápidas de las condiciones exteriores.

Cuando el ingreso de aire es muy grande, las velocidades del aire interior pueden aumentar más de lo deseable generando disconfort y ráfagas indeseables. Si son lo suficientemente fuertes, las ráfagas pueden hacer volar papeles y mover objetos, algo que es inaceptable tanto en residencias como en oficinas.

Se deben evitar estas ráfagas indeseables, y al mismo tiempo proveer del caudal de aire suficiente. Este ejercicio requiere de un diseño cuidadoso y de experiencia. Una solución típica en edificios tradicionales es el uso de ventanas con múltiples aberturas, por lo que las aberturas pueden ser abiertas parcialmente según las necesidades del usuario.

## **Compromiso de los usuarios para adecuar patrones de uso**

La ventilación natural puede ser utilizada para varios propósitos: para controlar el sobrecalentamiento, promover el confort térmico (ventilación sobre las personas) o mejorar la calidad del aire interior. Esto significa que debe llevarse a cabo bajo condiciones precisas: cuando la temperatura externa es menor a la interna (para reducir la temperatura interior), o cuando la temperatura interior es muy alta y se requieren altas velocidades de aire aún cuando la temperatura externa es mayor a la interna, o simplemente cuando la calidad del aire interior es inaceptable, sin importar las condiciones externas.

Esto significa que el uso de la ventilación natural debe ser controlado, por la intervención de los ocupantes o por un sistema automatizado. Cuando se requiere la intervención humana, es necesario que los ocupantes estén dispuestos a realizar las tareas necesarias.

El control de la ventilación natural requiere abrir y cerrar ventanas, puertas o aberturas específicas en respuesta de los cambios de las condiciones internas y externas. Así cuando la intensidad y dirección del viento cambie, el patrón más efectivo de apertura de ventanas también debe variar.

La experiencia demuestra que sólo las soluciones simples son las que funcionan bien, excepto cuando los ocupantes son especialistas, pero aún en estos casos el buen funcionamiento abarca períodos cortos de tiempo porque generalmente se pierde el interés con el paso del tiempo. No tiene sentido diseñar complejos patrones de apertura, ya que los ocupantes no van a saber aplicarlos correctamente. Los diseñadores deben producir edificios que sean simples e intuitivos para operar, adecuados para el hombre común. De otra manera, el uso de sistemas de control automatizados es la única solución posible.

## **Regulaciones contra incendios**

Si el concepto de ventilación pasiva está usualmente basado en el uso de grandes ventanas y chimeneas y requiere del flujo de aire libre en cantidades importantes, las regulaciones para prevenir incendios son todo lo contrario.

El movimiento del aire requerido por la ventilación puede tener a su vez una especial importancia en la propagación del fuego dentro de un edificio, por lo que la aplicación del concepto de ventilación intensiva para refrescamiento significa asumir el aumento del riesgo de la propagación del fuego..



## **Un tema a definir: Control manual o automático**

Las variables de las que depende la ventilación natural son extremadamente fluctuantes, por lo que el control de la ventilación natural es una tarea sumamente compleja. Un correcto control debe garantizar la adaptación a las distintas condiciones internas y externas, y el mismo, puede ser manual o automático dependiendo de numerosos parámetros como tipo de uso del edificio, arquitectura del edificio, capacidad de los ocupantes del edificio para elegir las acciones más apropiadas. Generalmente se recomienda el uso de controles manuales para edificios residenciales y el uso de controles automáticos para edificios públicos y de oficinas.

## **Falta de herramientas de diseño apropiadas**

Durante la fase de diseño, las soluciones arquitectónicas e ingenieriles propuestas deben ser evaluadas para chequear su funcionamiento bajo condiciones normales y extremas. Para esta tarea, los diseñadores necesitan tener a su disposición las mejores herramientas de estimación o de cálculo. Las herramientas deben ser precisas y confiables, proveyendo respuestas objetivas para cada solución. Idealmente, también deberían permitir realizar análisis de sensibilidad sobre los parámetros principales para permitir la búsqueda de la solución óptima.

La ventilación natural es un área donde las herramientas de diseño confiables son muy escasas. La gran variabilidad de los mecanismos que causan la ventilación natural, sobre todo el viento, hace que las simulaciones sean muy difíciles y complejas. Por lo que, las herramientas actualmente disponibles requieren de un cierto grado de capacitación del profesional usuario y de habilidad para interpretar los resultados. Esto provoca que la mayoría de los diseñadores no se sientan cómodos usándolas y se sientan confundidos por las usualmente contradictorias recomendaciones para diferentes patrones de viento. Esta dificultad es el mayor obstáculo para la adopción de soluciones basadas en la ventilación natural, ya que todavía sólo diseñadores expertos estarán capacitados para asesorar a los ingenieros y arquitectos en la mejor solución a ser implementada

## **Impacto estético**

Los edificios ventilados naturalmente requieren características especiales, como ventanas y aberturas ubicadas estratégicamente, chimeneas de ventilación en el techo, aleros o salientes horizontales, ventanas especialmente diseñadas, etc. con su consecuente impacto sobre las formas y aspecto del edificio. Sin embargo en la mayoría de los casos la ventilación natural puede ser implementada en edificios que lucen perfectamente convencionales, como ocurre con la gran mayoría de los edificios ventilados naturalmente que se han construido en los países del sur europeo. La integración estética de los componentes requeridos para la ventilación natural son responsabilidad de los profesionales intervinientes.

## **Mayor riesgo profesional para los diseñadores**

Las diferentes barreras para la implementación de la ventilación natural, y sobretodo la dificultad para su control, genera riesgo de insatisfacción y/o reclamos de los dueños del edificio y/o sus ocupantes. La solución más fácil para un diseñador es optar por un sistema mecánico de ventilación convencional, donde todas las variables pueden ser controladas por principios bien conocidos, donde el riesgo es muy bajo y la satisfacción del cliente estará garantizada. Los costos iniciales del edificio podrán ser mayores pero los dueños no se quejarán por eventuales problemas.

Por lo tanto, los diseñadores que acepten el riesgo de utilizar técnicas de ventilación natural, tendrán otras formas de compensación que las económicas. Si el dinero no es usualmente la razón, queda la satisfacción de realizar un buen trabajo, aceptando el desafío y teniendo éxito en el resultado. Usando la ventilación natural, los diseñadores pueden producir un edificio más amigable con el ambiente, con un menor consumo de energía y menores costos operativos t de mantenimiento.

## El cobro de honorarios

Lo habitual es que los diseñadores de instalaciones cobren como honorarios un porcentaje del costo total de la instalación, es decir, cuanto más cara es la instalación mayor es el cobro del honorario. Este tipo de forma de pago, no es muy alentador cuando se busca una solución menos costosa a un problema, ya que para el profesional esto requiere de más trabajo y al final el cobro será menor..

Las soluciones de ventilación natural son un ejemplo más en cómo un diseñador debe trabajar significativamente más para obtener un buen diseño, y con la habitual forma de pago, obtiene menos dinero por el trabajo, ya que una instalación de ventilación natural es sensiblemente más barata que un sistema de aire acondicionado. Este hecho, combinado con el riesgo de insatisfacción de los usuarios, son factores muy desmotivantes.

Para superar esto, los diseñadores de edificios ventilados naturalmente pueden acordar con los dueños del edificio un cobro basado en el tiempo real requerido para el desarrollo de la solución y producción del diseño, o que cantidad hubieran recibido por el diseño de un sistema de ventilación mecánico convencional u otra forma de pago equivalente. Se trata de un cambio de mentalidad, como ya ha ocurrido en otras ocasiones con los asesores de empresas de diseño.

## Estrategias de control para edificios ventilados naturalmente

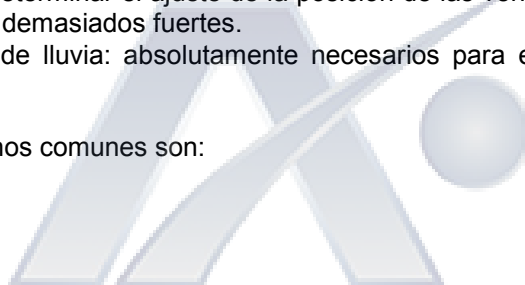
Como se vio anteriormente, por razones de costo inicial para las residencias se recomienda el control manual de los sistemas de ventilación natural, lo que requiere ninguna especificación y solo algunas recomendaciones cuya implementación es relativamente sencilla. En cambio para edificios de oficinas y públicos es recomendable el uso de un control automático. El control automático para ventilación natural es un campo reciente y se encuentra en desarrollo, desgraciadamente todavía hay una escasez de lineamientos a seguir en este tema.

Antes de presentar las distintas estrategias de control, se describirá los elementos necesarios para un sistema de control en un edificio. Un sistema de control automático está compuesto por sensores que medirán los parámetros requeridos para la implementación de la estrategia de control, actuadores para operar las aberturas, controladores para dar instrucciones a los actuadores basándose en algoritmos en respuesta de las mediciones y un de un equipo central supervisor de todo el proceso

Los sensores usualmente utilizados en ventilación natural son:

- Sensores de temperatura: son los componentes básicos de un sistema de control, se usan para medir la temperatura interna y externa, la diferencia entre ambas determina la cantidad de aire a ingresar en el edificio.
- Sensores de CO<sub>2</sub>: usados para evaluar la contaminación interior ocasionada por los ocupantes del edificio.
- Sensores de mezcla de gases (sensores de calidad de aire): utilizados para estimar la calidad de aire interior, son relativamente nuevos y a diferencia de los anteriores son sensitivos a contaminantes que no son producidos por las personas (por ej.:el humo del cigarrillo).
- Sensores de velocidad y dirección del viento: son esenciales cuando se implementa ventilación natural. Al medir la dirección del viento se puede determinar que aberturas de que fachada deberían abrirse, mientras que la medición de la velocidad sirve para determinar el ajuste de la posición de las ventanas o cerrarlas cuando los vientos son demasiados fuertes.
- Detectores de lluvia: absolutamente necesarios para evitar el ingreso de agua al edificio.

Otros sensores menos comunes son:



- Sensores de seguridad en las ventanas: se necesitan para la detección de intrusos o destrucción del vidriado de la ventana.
- Sensores de ganancia solar: el rol de estos sensores para la ventilación natural es el de incrementar el caudal de aire cuando aumenta la radiación solar.
- Sensores de humedad: a veces son necesarios para controlar la humedad de ciertos espacios.

Los principales tipos de actuadores utilizados en un edificio son:

- Actuadores de ventanas. Hay dos tipos principales de actuadores de ventanas:
  - Actuadores de cadena eléctricos (Figura 8.1a). Son compactos y sirven para distintos tipos de ventanas. Este tipo de actuadores generalmente son suministrados con una carrera ajustable.
- Actuadores lineales eléctricos (actuadores de pistón) (Figura 8.1b). Pueden ser usados con casi cualquier tipo de ventanas. No son muy compactos, generalmente su carrera no es ajustable pero son muy poco ruidosos.
- Actuadores de rendijas. Son requeridos para rotar las rendijas de ventilación en una posición específica, pueden ser tanto eléctricos como neumáticos, estos últimos son más baratos y rápidos. Deben incorporar retorno automático cuando son usados para seguridad contra incendios.



Figura 8.1. Actuadores de ventanas: a)Actuador eléctrico de cadena; b)Actuador eléctrico lineal producidos por el Grupo GIESSE S.A.

Los controladores disponibles en el mercado ofrecen miles de posibilidades en término de estrategias de control. Los más conocidos son los PLC, que son similares a las computadoras personales pero utilizan software específicos. Este software incluye una librería de funciones de control como: controles ON-OFF, controles PID (Proporcionales, Integrativos y Derivativos), operadores aritméticos y matemáticos, operadores Boléanos (AND, OR, etc), comparadores (>, <, =, etc).

Un programa específico dedicado al control de la ventilación natural que pueda implementar cualquier estrategia de control puede ser fácilmente creado combinando las distintas funciones. Una de las grandes ventajas de los controladores modernos es la habilidad de implementar un control lógico. El principio del control lógico es extremadamente simple, se basa en reglas simples, como por ejemplo la siguiente: Si la temperatura ambiente es menor a 15°C ENTONCES implementar la estrategia de control 1.

Otro ejemplo clásico, si consideramos el ejemplo del control de la ventilación natural, podría ser:

Si la temperatura ambiente es menor a la temperatura interior Y la temperatura interior es mayor a 26°C ENTONCES abrir las rendijas de ventilación.

Estas reglas lógicas que pueden determinarse si son verdaderas o falsas, organizadas jerárquicamente, pueden ser usadas para controlar sistemas muy complejos.



A pesar de que definir una estrategia de control general para cualquier tipo de edificio es casi imposible, hay reglas y principios comunes que pueden ser aplicados en cualquier edificio. Por lo que se pueden definir tres estrategias de control básicas:

Control basado en la contaminación interior: esta estrategia consiste en monitorear un parámetro de calidad de aire (por ej. CO<sub>2</sub>) y abrir o cerrar ventanas y rendijas de ventilación como se muestra a continuación:

- Si la concentración de CO<sub>2</sub> está por encima del set point, abrir ventanas;
- Si la concentración de CO<sub>2</sub> está por debajo del set point, cerrar ventanas.

La cantidad de aberturas a abrir y el grado de apertura de las mismas dependerá de las condiciones del viento, la forma del edificio, lluvias y diferencias de una zona a la otra; los controles lógicos tendrán que ser implementados para definir estos parámetros. La concentración de CO<sub>2</sub> debería ser medida en cada recinto, esto puede llegar a resultar costoso, por lo que si no es posible, por lo menos habría que colocar un sensor en cada fachada representativa. Para evitar la constante operación de las ventanas es necesario introducir una banda muerta en la cual no se produzcan cambios (a menos que el viento se torne muy fuerte o llueva). En este tipo de estrategia, la ventilación se suministra para propósitos de calidad de aire interior y su potencial para refrescamiento no es aprovechado. Los controles PID no son recomendables para esta estrategia porque introducen el riesgo de la operación constante.

Control basado en las temperaturas interiores y exteriores: Esta estrategia es una "estrategia de refrescamiento pasivo". La ventaja de esta estrategia es que determina cuando el aire exterior puede ser usado para refrescar y cuando no. Hay varias maneras de lograr esto, el problema es saber que acción tomar cuando la temperatura interna es inferior a la externa. A la noche, cuando el edificio está desocupado, las aberturas deberían cerrarse si la temperatura externa es mayor a la interna. Durante el día, en cambio, el incremento de la velocidad relativa puede compensar el incremento relativo de la temperatura interior debido a la ventilación. Esto es difícil de manejar. Sin embargo, cuando las temperaturas externas exceden a la temperatura interna por más de 3°C las aberturas deberían cerrarse.

Cada recinto debería equiparse con termómetros y controles individuales. En este sentido, a veces es necesario modular las aberturas de acuerdo al número de ventanas en los recintos adyacentes. Como en la estrategia anterior, la cantidad de aberturas a abrir y el grado de apertura de las mismas dependerá de las condiciones del viento, la forma del edificio, lluvias y diferencias de una zona a la otra; controles lógicos tendrán que ser implementados para definir estos parámetros. Controladores PI o PID también pueden ser implementados para la determinación del grado de apertura de las ventanas.

Estrategias de control mixtas: en muchos edificios, la ventilación natural no será suficiente para alcanzar el confort térmico durante todo el año, por lo que será necesario la instalación de sistemas de refrescamiento mecánicos. Estrategias de control específicas necesitan ser desarrolladas para integrar el control de sistemas pasivos y mecánicos. Las principales reglas para implementar esta estrategia son las siguientes:

- Setear dos temperaturas de set point, una por debajo de que temperatura se requiere calefacción (por ej. 20°C) y otra por encima de que temperatura se requiere refrescamiento (por ej. 24°C).
- Evitar el uso de la calefacción y la ventilación en el mismo día.
- Definir prioridades: si la temperatura se encuentra entre los puntos de set point utilizar solamente ventilación natural; si la temperatura se encuentra por encima del set point de refrescamiento, de acuerdo a la diferencia de temperaturas interna y externa, utilizar primero ventilación natural y luego refrescamiento auxiliar; y si la temperatura se encuentra por debajo del set point de calefacción, comenzar la calefacción auxiliar.

Nuevamente, los seteos dependerán fuertemente de la forma y organización del edificio y de su equipamiento (unidades de aire acondicionado compactas, ventiladores, etc.).

Otra estrategia que es muy económica y sencilla pero recomendable sólo para edificios donde se conozca muy bien la demanda diaria es la de controlar la apertura de las ventanas a través de un temporizador. Es decir, las ventanas y/o ventiladores se activan a una cierta hora y se desactivan de acuerdo a una agenda predeterminada. Esta estrategia de control puede ser usada en escuelas y edificios de oficinas.



## Bibliografía

1. "Passive Cooling", Capítulo 2, Chandra. Editor Jeffrey Cook.
2. "Design: cooling buildings by natural ventilation". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineering Support Agency (2004).
3. "Natural Ventilation in Buildings", Capítulos 5 y 6. Editor F. Allard (1998). James & James. Londres.
4. "Occupant use of ventilation controls and humidifiers", Kelly, K.; M. Brien y R. Stemp (1993)
5. "Guidelines for the siting and exposure of meteorological instruments and observing facilities". Bureau of Meteorology (1997).
6. "Design: cooling buildings by natural ventilation". U.S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command, Air Force Civil Engineering Support Agency (2004).



## 9 – ANEXO

Se adjunta el disquette que contiene los archivos realizados según el Programa Excel de Microsoft, que resuelven los métodos de cálculo explicados en el capítulo 6.

Con la confección de estos archivos se busca simplificar el uso de cada metodología, ya que el llenado de datos se reduce a los esenciales de cada caso.

### Los métodos incluidos son los siguientes:

Métodos para el cálculo de caudales de aire	El método del Bristish Standard
	El método de ASHRAE (Infiltración)
	El método de Aynsley
	El método de De Gidds and Phaff
	Florida Solar Energy Method I
Métodos de cálculo de velocidades de aire interior	El método de Givonni
	El método de Melaragno
	La metodología Ernest
Métodos de cálculo para el dimensionamiento de aberturas	Florida Solar Energy Method I
	Florida Solar Energy Method II
	El método de ASHRAE
	El método de Aynsley
	El método del Bristish Standard

