

*Titulo original: Industrial Ventilation. 20th Edition of Recommended Practice, 1988.*  
Committee on Industrial Ventilation. P. O. Box 16153. Lansing, Michigan 48901 USA.  
American Conference of Governmental Industrial Hygienists  
6500 Glenway Avenue, Bldg. D-7  
Cincinnati, Ohio 45211 USA

© American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc.

© Generalitat Valenciana  
Conselleria de Treball i Afers Socials  
Direcció General de Treball  
Paseo de la Alameda, 16  
46010 Valencia

Venta y distribución en España: Librería de la Generalitat Valenciana  
Plaza de Manises, 3  
46003 Valencia  
Tl. (96) 386 61 70

PRINTED IN SPAIN  
IMPRESO EN ESPAÑA

I.S.B.N.: 84-7890-818-8

DEPÓSITO LEGAL: V. 1.289-1992

Imprime: ARTES GRÁFICAS SOLER, S. A. - LA OLIVERETA, 28 - 46018 VALENCIA - 1992

## AUTORES

### *Coordinador general del proyecto*

GOBERNA, Ricardo                   Ingeniero Industrial.  
Dirección General de Trabajo.  
Generalidad Valenciana, Valencia.

### *Coordinadores*

HUGHES, Robert T.                Presidente Comité Ventilación Industrial.  
Cincinnati, Ohio.  
RIVEIRA, Vicente                 Dr. Ingeniero Industrial.  
Presidente de la IOHA. Madrid.

### *Traducción texto*

BERNAL, Félix                     Ingeniero Químico IQS.  
SEAT. Barcelona.  
CASTEJÓN, Emilio                 Ingeniero Industrial.  
Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.  
Barcelona.

### *Revisión técnica: grupo expertos españoles*

BELTRÁN, José                    Ingeniero Industrial.  
Dirección General de Trabajo.  
Generalidad Valenciana. Valencia.  
CASTELLA, José Luis             Ingeniero Químico IQS.  
Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.  
Madrid.  
GONZÁLEZ, Enrique               Dr. Ciencias Químicas.  
Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.  
Madrid.  
MARCUELLO, Daniel               L. Ciencias Químicas.  
Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo.  
Zaragoza.  
MORENO, Domingo                Dr. Ingeniero Industrial.  
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.  
Madrid.  
POU, Ramón                     L. Ciencias Químicas.  
TECOHINSA. Barcelona.  
RIVEIRA, José María             Ingeniero Industrial.  
INCOHINSA. Madrid.

### *Revisión técnica: grupo expertos norteamericanos*

Consuelo, ÁVILA                 Jersey City, New Jersey.  
Pablo, CICERO-FERNÁNDEZ       Los Angeles, California.  
Libardo, LATORRE               Dearborn, Michigan.  
Henry, RAMOS                    Baton Rouge, Louisiana.

### *Supervisión textos y colaboradores de la Dirección General de Trabajo de la Generalidad Valenciana*

ORTIZ, Bernardo, TARÍN, Francisca y PÉREZ, Carmen.

# VENTILACIÓN INDUSTRIAL

MANUAL DE RECOMENDACIONES PRÁCTICAS  
PARA LA PREVENCIÓN DE RIESGOS PROFESIONALES

1.ª Edición en español

 GENERALITAT VALENCIANA  
CONSELLERIA DE TREBALL I AFERS SOCIALS  
Direcció General de Treball

1992

# Í N D I C E

	<u>Pág.</u>
PRESENTACIÓN .....	XI
INTRODUCCIÓN A LA EDICIÓN EN ESPAÑOL .....	XIII
PREFACIO .....	XV
AGRADECIMIENTOS .....	XVII
DEFINICIONES .....	XIX
CAPÍTULO 1. PRINCIPIOS GENERALES DE VENTILACIÓN	
1.1. Introducción .....	1-2
1.2. Sistemas de impulsión .....	1-2
1.3. Sistemas de extracción .....	1-2
1.4. Definiciones básicas .....	1-3
1.5. Principios del flujo del aire .....	1-5
1.6. Aceleración del aire y pérdidas en la entrada a las campanas .....	1-6
1.7. Pérdida de carga en conductos .....	1-8
1.8. Sistemas con varias campanas .....	1-10
1.9. Características del flujo de aire en impulsión y en extracción .....	1-11
Referencias .....	1-11
CAPÍTULO 2. VENTILACIÓN GENERAL	
2.1. Introducción .....	2-2
2.2. Principios de ventilación por dilución .....	2-2
2.3. Ventilación por dilución para la protección de la salud .....	2-2
2.4. Mezclas-ventilación por dilución para la protección de la salud .....	2-7
2.5. Ventilación por dilución para la prevención de incendios y explosiones .....	2-7
2.6. Ventilación por dilución para la prevención de incendios en el caso de mezclas ...	2-8
2.7. Ventilación para el control del ambiente térmico .....	2-8
2.8. Balance térmico e intercambio de calor .....	2-9
2.9. Mecanismo de adaptación del cuerpo .....	2-10
2.10. Aclimatación .....	2-10
2.11. Efectos agudos del calor .....	2-10
2.12. Medición del estrés térmico .....	2-11
2.13. Índices de estrés térmico .....	2-12
2.14. Control del calor mediante ventilación .....	2-13
2.15. Sistemas de ventilación .....	2-13
2.16. Enfriamiento por velocidad .....	2-15
2.17. Control del calor radiante .....	2-16
2.18. Prendas de protección para exposiciones cortas .....	2-16
2.19. Intercambiadores de calor respiratorios .....	2-16
2.20. Trajes refrigerados .....	2-17
2.21. Cabinas .....	2-17
2.22. Aislamiento .....	2-17
Referencias .....	2-17
CAPÍTULO 3. CAMPANAS DE EXTRACCIÓN LOCALIZADA	
3.1. Introducción .....	3-2
3.2. Propiedades de los contaminantes .....	3-2

	<u>Pág.</u>
3.3. Tipos de campanas .....	3-2
3.4. Parámetros del diseño de campanas .....	3-2
3.5. Pérdida de carga en las campanas .....	3-15
3.6. Velocidad mínima en el conducto .....	3-18
3.7. Campanas con requerimientos especiales .....	3-18
3.8. Ventilación de impulsión extracción .....	3-19
3.9. Procesos a temperatura elevada .....	3-20
Referencias .....	3-21
<b>CAPÍTULO 4. EQUIPOS PARA DEPURACIÓN DE AIRE</b>	
4.1. Introducción .....	4-2
4.2. Selección del equipo de captación de polvo .....	4-2
4.3. Tipos de captadores de polvo .....	4-3
4.4. Datos adicionales útiles para la selección de un captador de polvo .....	4-24
4.5. Depuración de nieblas, gases y vapores .....	4-28
4.6. Depuradores para contaminantes gaseosos .....	4-28
4.7. Filtros compactos .....	4-28
4.8. Coste de los equipos de captación de polvo .....	4-30
4.9. Selección de equipos de filtración de aire .....	4-30
4.10. Operaciones con materiales radiactivos o extremadamente tóxicos .....	4-35
4.11. Venteos de protección contra explosiones .....	4-36
Referencias .....	4-36
<b>CAPÍTULO 5. PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE SISTEMAS DE EXTRACCIÓN LOCALIZADA</b>	
5.1. Introducción .....	5-2
5.2. Etapas preliminares .....	5-2
5.3. Procedimiento de diseño .....	5-2
5.4. Métodos de diseño .....	5-2
5.5. Ayudas para el cálculo .....	5-3
5.6. Distribución del caudal de aire .....	5-3
5.7. Sistemas de extracción con pleno .....	5-7
5.8. Evaluación de la presión del ventilador .....	5-10
5.9. Correcciones por cambios de velocidad .....	5-10
5.10. Ejemplo de diseño de un sistema .....	5-11
5.11. Correcciones para diferentes materiales del conducto .....	5-11
5.12. Pérdida de carga en conductos no circulares .....	5-12
5.13. Correcciones por temperatura, humedad y altitud .....	5-12
5.14. Equipos para depuración del aire .....	5-28
5.15. Descarga gradual .....	5-28
5.16. Chimenas de evaluación .....	5-29
5.17. Entradas de aire adicionales .....	5-29
5.18. Velocidad económica óptima .....	5-29
Referencias .....	5-29
<b>CAPÍTULO 6. VENTILADORES</b>	
6.1. Introducción .....	6-2
6.2. Definiciones básicas .....	6-2
6.3. Selección de un ventilador .....	6-7
6.4. Instalación y mantenimiento de los ventiladores .....	6-22
Referencias .....	6-22
<b>CAPÍTULO 7. RENOVACIÓN Y RECIRCULACIÓN DE AIRE</b>	
7.1. Introducción .....	7-2
7.2. Renovación de aire .....	7-2
7.3. Caudal de renovación de aire .....	7-4
7.4. Control ambiental .....	7-5

	<u>Pág.</u>
7.5. Caudal de aire para control ambiental .....	7-5
7.6. Índice de renovación .....	7-5
7.7. Temperatura del aire de renovación .....	7-6
7.8. Renovación de aire y coste de calefacción .....	7-8
7.9. Equipos para el calentamiento del aire de renovación .....	7-8
7.10. Coste de calefacción del aire de renovación .....	7-16
7.11. Conservación del aire .....	7-16
7.12. Evaluación de los niveles de exposición de los trabajadores .....	7-21
Referencias .....	7-23
<b>CAPÍTULO 8. RECOMENDACIONES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE EXTRACCIÓN LOCALIZADA</b>	
8.1. Introducción .....	8-2
8.2. Generalidades .....	8-2
8.3. Materiales .....	8-2
8.4. Construcción .....	8-2
8.5. Detalles constructivos .....	8-5
8.6. Normas .....	8-5
8.7. Otros tipos de materiales para conductos .....	8-5
8.8. Ensayos .....	8-5
Referencias .....	8-5
<b>CAPÍTULO 9. COMPROBACIÓN DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN</b>	
9.1. Introducción .....	9-2
9.2. Medida de la presión .....	9-2
9.3. Medida del caudal .....	9-5
9.4. Instrumentos para la medida de la velocidad del aire .....	9-12
9.5. Calibración de los instrumentos de medida .....	9-18
9.6. Evaluación de los sistemas de extracción .....	9-23
9.7. Dificultades encontradas en las mediciones de campo .....	9-26
Referencias .....	9-29
<b>CAPÍTULO 10. OPERACIONES ESPECÍFICAS</b>	
10.1. Fundición .....	10-4
10.2. Materiales de alta toxicidad .....	10-20
10.3. Manutención de materiales .....	10-34
10.4. Trabajo de metales .....	10-41
10.5. Cubas abiertas .....	10-61
10.6. Pintura .....	10-80
10.7. Trabajo de la madera .....	10-86
10.8. Bajo caudal alta velocidad .....	10-99
10.9. Varios .....	10-106
<b>CAPÍTULO 11. APÉNDICES</b>	
Apéndice A. Valores límite para sustancias químicas en el ambiente de trabajo con las modificaciones propuestas para 1991-1992 .....	11-2
Apéndice B. Constantes físicas .....	11-21
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>12-1</b>

## PRESENTACIÓN

Los riesgos a los que están sometidos los trabajadores en la industria es una realidad cotidiana, a la vista de los datos de siniestralidad laboral que nos ofrecen las estadísticas. Los siniestros que se producen son consecuencia de los fracasos en la acción preventiva con unos costes humanos y materiales muy elevados. Elevar el nivel de protección de los trabajadores frente a los riesgos derivados del trabajo, debe realizarse mediante la aplicación de las técnicas de prevención por expertos o especialistas, como forma de garantizar unas condiciones seguras o aceptables en los ambientes de trabajo.

Situaciones en que los trabajadores están expuestos a sustancias químicas y calor son muy frecuentes y la solución a los problemas que pueden presentarse debe efectuarse mediante la aplicación de las técnicas de Ventilación Industrial.

El libro de *Ventilación Industrial* que presentamos, es un manual eminentemente práctico que recoge la experiencia de más de 40 años en Estados Unidos sobre el diseño y verifica-

ción de sistemas de ventilación. La presente edición es la primera que se efectúa en lengua española con autorización del Dr. Arwin Apol, Presidente de la ACGIH (American of Governmental Industrial Hygienists) de Estados Unidos y de Robert T. Hughes, Presidente del Comité de Ventilación a los que expresamente damos las gracias. Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a los higienistas industriales españoles y norteamericanos que han participado en el proyecto de traducción de este excelente manual.

Con esta publicación, la Dirección General de Trabajo de la Consellería de Trabajo y Asuntos Sociales de la Generalidad Valenciana, pone a disposición de todas aquellas personas dedicadas a la prevención de los riesgos profesionales un nuevo libro, resultado de años de experiencia, que contiene las guías y referencias para el control de riesgos y desea que constituya una herramienta eficaz para la solución de muchos de los problemas que se presentan frecuentemente en la industria.

EDUARDO MONTESINOS CHILET  
Director General de Trabajo

## INTRODUCCIÓN A LA EDICIÓN ESPAÑOLA

Hace veinte años se impulsó desde el Ministerio de Trabajo en España, la formación de una nueva generación de higienistas industriales, basada en la experiencia de Estados Unidos y que tuvo como consecuencia la utilización posterior en nuestro país de los métodos y modernas técnicas de prevención de los riesgos profesionales.

El manual de Ventilación Industrial de la American Conference of Governmental Industrial Hygienists, fue uno de los libros básicos utilizados para la enseñanza de las técnicas de ventilación en la industria, como forma de controlar los agentes químicos y el calor de los ambientes de trabajo.

El libro original en inglés ha continuado en sus sucesivas ediciones, siendo una referencia y guía práctica para los higienistas industriales y otros profesionales en el diseño y control de los sistemas de Ventilación.

Para aquellas personas que no dominan el inglés y están habituados a utilizar las unidades métricas de medida, constituye un inconveniente que no les permite aprovechar al máximo, los conceptos y diseños que incluye este excelente manual.

Para tratar de solucionar este problema y aprovechando la sensibilidad por la mejora de las condiciones de trabajo de D. Eduardo Montesinos, Director General de Trabajo de la Consellería de Trabajo y Asuntos Sociales de la Generalidad Valenciana y las excelentes relaciones que actualmente existen con las asociaciones de higienistas industriales de Estados Unidos, ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists), AIHA (American Industrial Hygiene Association), y IOHA (International Occupational Hygiene Association), surgió el proyecto común de efectuar una traducción al español del Manual de Ventilación de la ACGIH de reconocido prestigio en todo el mundo.

Gracias a las gestiones realizadas por D. Vicente Riveira, Presidente de los higienistas industriales españoles y Jeffrey S. Lee, Presidente de IOHA ante Arwin Apol y Robert T. Hughes, Presidentes de la ACGIH y del Comité de Ventilación respectivamente, se consiguió su participación en el proyecto y la autorización para la traducción por primera vez

del Manual de Ventilación, por el interés que supone el español en EEUU y resto de países de habla española.

Al fin de garantizar al máximo una correcta traducción, tarea nada fácil, pues aparte de la dificultad de traducir cualquier libro técnico, se añadía la de convertir todo el sistema de medidas anglo-sajón al sistema métrico, se decidió que fueran los propios higienistas industriales españoles los que efectuaran el trabajo y se encargaran a su vez de efectuar la revisión de cada uno de los capítulos, para lo cual, se formó un grupo de trabajo a los que tenemos que agradecer su espíritu de colaboración y eficiencia en la ejecución del proyecto. Mención especial merecen D. Félix Bernal y D. Emilio Castejón por su dedicación, experiencia y rigurosidad en la traducción del texto.

La traducción española de cada uno de los capítulos, fueron remitidos a Robert T. Hughes como Presidente del Comité de Ventilación de la ACGIH para que a su vez se efectuara una supervisión de los trabajos y a los que tenemos que dar las gracias por sus aportaciones y sugerencias que han sido incluidas en el texto, salvo algunas diferencias en la forma de expresión del lenguaje.

La obra corresponde a la traducción íntegra de la 20.ª edición americana y únicamente ha sido adaptado, por razones prácticas uno de los apartados del capítulo 7 en lo que se refiere a temperaturas mínimas en invierno y grados-día, que ha sido modificado con datos a utilizar en España. Por razones obvias se ha suprimido el apéndice C (Suplemento métrico) y el apéndice A (Valores Límite TLV para sustancias químicas en el ambiente de trabajo) ha sido sustituido por el actual de 1991/1992 publicado por la ACGIH.

El libro como ya se indica en el prefacio de la edición original es un manual práctico, resultado de años de experiencia en el diseño, mantenimiento y evaluación de sistemas industriales de extracción, bien entendido que su difusión se efectúa sin que el editor, ni ninguno de los miembros que han participado en el proyecto asuma ninguna responsabilidad por las informaciones, omisiones u errores que hubieran podido pasar inadvertidos a pesar del esfuerzo realizado.

RICARDO GOBERNA  
*Coordinador general del proyecto*  
Dirección General de Trabajo



## PREFACIO

*VENTILACIÓN INDUSTRIAL: Un manual práctico* es el resultado de años de experiencia de los miembros del Comité y de la recopilación de resultados de investigación e informaciones sobre diseño, mantenimiento y evaluación de sistemas industriales de extracción. El Manual, que pretende presentar un método lógico para el diseño y verificación de dichos sistemas, ha tenido una gran aceptación como guía para Centros Oficiales, como referencia para proyectistas de ventilación industrial y como libro de texto para cursos de Higiene Industrial.

No se pretende que el Manual sea empleado como norma legal, sino como una guía. La revisión y actualización de cada uno de los capítulos del Manual es una tarea permanente del Comité, a la luz de las nuevas informaciones sobre ventilación industrial que se obtienen de los proyectos de investigación en curso, de informes sobre realizaciones prácticas de ingenieros, y de los artículos aparecidos en diversas publicaciones técnicas. El Manual se edita únicamente con tapas duras e incluye un suplemento métrico.

En esta vigésima edición el Comité ha revisado y reescrito o modificado todos los capítulos –virtualmente la totalidad del Manual–. Durante los últimos cuatro años se ha revisado en profundidad el contenido de cada sección, modificándose lo necesario para aumentar la profundidad o amplitud de lo tratado. Se mantiene nuestra política de presentar la información de una forma práctica, concisa y de fácil comprensión. En los lugares apropiados se incluyen presentaciones teóricas simples a fin de mostrar los fundamentos de las ecuaciones prácticas, especialmente en temas en los que el Comité ha incrementado el contenido. El Manual es suficientemente completo para el diseño de sistemas industriales de extracción sin necesidad de acudir a otros textos. En nuestro constante esfuerzo por presentar las últimas técnicas y datos, el Comité desea, agradece y busca activamente comentarios y sugerencias sobre la exactitud e idoneidad de la información presentada.

En esta edición el Manual ha sido reorganizado, y es importante comprender su nueva ordenación. Cada componente del Manual se llama ahora “Capítulo” en lugar de “Sección”, como en las ediciones anteriores. La correspondencia entre los actuales capítulos y las antiguas secciones es la siguiente:

El Capítulo 1 era la Sección 1  
El Capítulo 2 era las Secciones 2 y 3

El Capítulo 3 era la Sección 4  
El Capítulo 4 era la Sección 11  
El Capítulo 5 era la Sección 6  
El Capítulo 6 era la Sección 10  
El Capítulo 7 era la Sección 7  
El Capítulo 8 era la Sección 8  
El Capítulo 9 era la Sección 9  
El Capítulo 10 era la Sección 5

El principal motivo para esta reorganización ha sido el agrupar en un bloque compacto la teoría del diseño de los sistemas de extracción localizada. El Capítulo 1 se ha ampliado para mostrar los principios del flujo de aire con un poco más de detalle. Las Secciones 2 y 3 se han refundido y ampliado en el Capítulo 2. Los Capítulos 3, 4, 5 y 6 contienen ahora todos los procedimientos importantes de diseño de sistemas de extracción y presentan las campanas, los depuradores, los sistemas de conductos y los ventiladores, por este orden. Los capítulos 7, 8 y 9 mantienen su orden anterior, pero todos han sido revisados y modificados. El Capítulo 10 da los datos para el diseño de campanas para aplicaciones específicas.

Todos los gráficos de los Capítulos 1 al 9 se han elaborado con un ordenador para facilitar futuras modificaciones. En el Capítulo 10 el número de dibujos era excesivo para ser informatizados en el tiempo disponible, por lo que se presentan de la misma forma que en las ediciones anteriores. En la próxima edición serán modificados y convertidos al nuevo estilo.

Esta publicación se ha diseñado para presentar información exacta y fiable con respecto al tema que constituye su objetivo. Su difusión se efectúa en el bien entendido de que ni el Comité ni sus miembros, colectiva o individualmente, asumen ninguna responsabilidad derivada de informaciones erróneas que hubieran podido pasar inadvertidas, ni por omisiones, ni por los resultados obtenidos por el uso de esta publicación.

### COMITÉ DE VENTILACIÓN INDUSTRIAL

J. J. LOEFFLER, GMI Engr. & Mgmt. Institute, Michigan,  
Presidente  
A. G. APOL, FEOH, Washington  
D. J. BURTON, Los Alamos National Laboratory

W. M. CLEARY, Dept. of Public Health  
Mrs. Norma DONOVAN, Editorial Consultant  
L. DICKIE, U. of Louisville, Kentucky  
S. E. GUFFEY, U. of Washington, Washington R. P. Hib-  
bard, U. of Washington, Washington  
R. T. HUGHES, NIOSH, Ohio  
G. S. RAJHANS, Ontario Ministry of Labour, Canada  
M. M. SCHUMAN, General Motors Corp., Michigan

**CONSULTORES**

J. T. BARNHART, New York Blower Co., Indiana  
R. LARSON, Torit Div., Donaldson Co., Minnesota  
G. W. KNUTSON, Pace Lab., Inc., Minnesota  
O. P. PETREY, American Air Filter, Kentucky  
A. L. TWOMBLY, American Air Filter, Kentucky

## AGRADECIMIENTOS

El presente manual representa un verdadero esfuerzo del Comité, al concentrar en una sola obra datos prácticos sobre ventilación procedentes de distintos puntos del país. La diversidad de experiencias y especialidades que representa la cooperación entre los miembros del Comité de Ventilación Industrial con los ingenieros especialistas en Higiene Industrial asegura un resultado enriquecedor.

Desde la primera edición, en 1951, el esfuerzo se ha coronado con éxito, como atestigua la aceptación del "Manual de Ventilación" en la industria, los centros oficiales y como referencia y libro de texto en todo el mundo.

El Comité actual agradece la confianza y el firme apoyo recibido de los Comités anteriores y de sus miembros, que se relacionan más abajo.

Asimismo, el Comité expresa un agradecimiento especial a la Division of Occupational Health, Michigan Department of Health, por la aportación del original de su manual de campo que constituyó la base de la Primera Edición, y al señor Knowlton J. Caplan, que supervisó la preparación de dicho manual.

El Comité expresa también su agradecimiento a aquellos consultores que en tan gran medida han contribuido a la preparación de ésta y las anteriores ediciones de la obra, y a la señora Norma Donovan, Secretaria del Comité, por su infatigable apoyo a nuestros esfuerzos.

A muchas otras personas e instituciones que han efectuado aportaciones específicas y nos han prestado su apoyo, sugerencias y críticas constructivas, nuestro especial agradecimiento.

### COMITÉ DE VENTILACIÓN INDUSTRIAL

### MIEMBROS DE LOS COMITÉS ANTERIORES

A. B. APOL, 1984-....  
H. AYER, 1962-1966

R. E. BALES, 1954-1960  
J. BALIFF, 1950-1966; Presidente, 1954-1956  
J. T. BARNHART, Consultor, 1986-...  
J. C. BARRET, 1956-1976; Presidente, 1960-1968  
J. L. BELTRAN, 1964-1966  
D. BONN, Consultor, 1958-1968  
D. J. BURTON, 1988-...  
K. J. CAPLAN, 1974-1978; Consultor, 1980-1986  
W. M. CLEARY, 1976-....; Presidente, 1978-1984  
L. DICKIE, 1984-....; Consultor, 1968-1984  
B. FEINER, 1956-1968  
S. E. GUFFEY, 1984-...  
G. M. HAMA, 1950-1984; Presidente, 1956-1960  
R. P. HIBBARD, 1968-...  
R. T. HUGHES, 1976-...  
H. S. JORDAN, 1960-1962  
J. KANE, Consultor, 1950-1952  
J. KAYSE, Consultor, 1956-1958  
J. F. KEPPLER, 1950-1954, 1958-1960  
G. W. KNUTSON, Consultor, 1986-...  
J. J. LOEFFLER, 1980-....; Presidente, 1984-...  
J. LUMSDEN, 1962-1968  
J. R. LYNCH, 1966-1976  
G. MICHAELSON, 1958-1960  
K. M. MORSE, 1950-1951; Presidente, 1950-1951  
R. T. PAGE, 1954-1956  
O. P. PETREY, Consultor, 1978-...  
G. S. RAJHANS, 1978-...  
K. E. ROBINSON, 1950-1954; Presidente, 1952-1954  
A. SALAZAR, 1952-1954  
E. L. SCHALL, 1956-1958  
M. M. SCHUMAN, 1962-....; Presidente, 1968-1978  
J. C. SOET, 1950-1960  
A. L. TWOMBLY, Consultor, 1986-...  
J. WILLIS, Consultor, 1952-1956  
R. WOLLE, 1966-1974  
J. A. WUNDERLE, 1960-1964

---

## DEFINICIONES

---

**Aire de renovación:** Término empleado en ventilación para indicar el volumen de aire exterior que, de forma controlada, es introducido en un edificio para sustituir al aire extraído.

**Alcance:** En distribución del aire, la distancia que una corriente de aire recorre desde una boca de impulsión hasta un punto en el que su velocidad en el eje se reduce a 0,25 m/s. Para aerotermos, la distancia que un chorro de aire se desplaza desde un aerotermo sin una elevación perceptible debida a diferencia de temperatura y pérdida de velocidad.

**Aerosol:** Conjunto de pequeñas partículas, sólidas o líquidas, suspendidas en el aire. El diámetro de las partículas puede variar desde 100 micras hasta 0,01 micras o menos; ejemplos: polvo, niebla, humo.

**Aire standard:** Aire seco a 20 °C y 1 atm. Su densidad vale 1,2 kg/m<sup>3</sup>. Calor específico del aire seco = 0,24 kcal/kg °C.

**Atajadera:** Compuerta deslizante.

**Campana:** Entrada diseñada para capturar el aire contaminado y dirigirlo e introducirlo en un sistema de conductos de extracción.

**Captador de polvo:** Depurador diseñado para separar del aire extraído, antes de su descarga al exterior, cantidades importantes de partículas. Margen habitual: concentraciones iguales o superiores a 7 mg/m<sup>3</sup>.

**Coefficiente de entrada:** Relación entre el caudal real producido por un valor dado de la presión estática en la campana y el caudal teórico que existiría si la totalidad de la presión estática se convirtiera en presión dinámica con un rendimiento del 100 %. Se expresa como el cociente entre el caudal real y el teórico.

**Convección:** Movimiento de un fluido producido por las diferencias de densidad y la acción de la gravedad. En transmisión de calor este concepto se amplía para incluir tanto el movimiento o circulación natural como el forzado.

**Densidad:** Cociente entre la masa de un espécimen o substancia y su volumen. La masa de la unidad de volumen de una substancia. Cuando el peso puede usarse sin riesgo de confusión como sinónimo de masa, la densidad es el peso de la unidad de volumen de una substancia.

**Depurador:** Aparato diseñado con el fin de separar del aire los contaminantes que contiene, tales como polvo, gases, vapores

y humos. (Son depuradores los lavadores, filtros de aire, precipitadores electrostáticos y los filtros de carbón activo.)

**Factor de densidad:** Cociente entre la densidad real del aire y la densidad del aire standard. El producto del factor de densidad por la densidad del aire standard (1,2 kg/m<sup>3</sup>) da la densidad real en kg/m<sup>3</sup>;  $d \times 1,2 = \text{densidad real del aire, kg/m}^3$ .

**Factor de forma:** Relación anchura/longitud.

**Factor de forma de un codo:** La anchura a lo largo del eje del codo dividida por su profundidad en el plano de curvatura.

**Filtro de aire:** Depurador destinado a separar del aire atmosférico pequeñas cantidades de partículas antes de que aquél sea introducido en el edificio. Margen de trabajo habitual: hasta 7 mg/m<sup>3</sup>. Nota: el aire exterior en áreas de gran industria y en el interior de muchas industrias contiene concentraciones superiores a ésta, y por tanto el equipo adecuado para su depuración son los captadores de polvo.

**Gas:** Fluido sin forma que tiende a ocupar uniformemente la totalidad del espacio disponible a temperatura y presión ordinarias.

**Humedad absoluta:** Peso de vapor de agua por unidad de volumen, gramos por centímetro cúbico.

**Humedad relativa:** Cociente entre la presión parcial del vapor de agua en un espacio y la presión de saturación del agua pura a la misma temperatura.

**Humo:** Aerosol formado bien por combustión o sublimación (smoke) o por condensación de vapores de materiales sólidos (fume).

**Límite inferior de inflamabilidad (LII):** El límite inferior de explosividad o inflamabilidad de un gas o vapor a temperatura ambiente ordinaria expresado en porcentaje en volumen del gas o vapor en aire. Su valor se considera constante para temperaturas de hasta 120 °C. Por encima de este valor debe corregirse multiplicando su valor por 0,7, puesto que la inflamabilidad aumenta al incrementarse la temperatura.

**Manómetro:** Instrumento para la medida de la presión; esencialmente consistente en un tubo en U lleno parcialmente con un líquido, usualmente agua, mercurio o un aceite ligero, construido de forma que la magnitud del desplazamiento del líquido indica la presión ejercida sobre el instrumento.

## XX Ventilación industrial

**Micra:** Unidad de longitud igual a la milésima parte de un milímetro o la millonésima parte de un metro.

**Milímetro de columna de agua (mmcda):** Unidad de presión igual a la presión ejercida por una columna de agua de un milímetro de altura a temperatura standard. Equivale a 1 kg/m<sup>2</sup>.

**Niebla:** Pequeñas gotas de un material que es usualmente líquido a temperatura y presión ordinarias.

**Pérdida de carga en la entrada:** Caída de presión producida por el flujo de aire en la entrada a una campana o conducto (mmcda).

**Peso específico:** Cociente entre la masa de la unidad de volumen de una sustancia a la masa del mismo volumen de una sustancia standard a temperatura standard. Usualmente se toma como sustancia de referencia el agua a 4 °C. Para gases se acostumbra tomar como sustancia de referencia el aire seco a la misma presión y temperatura que el gas.

**Pleno:** Cámara para la igualación de la presión.

**Polvo:** Pequeñas partículas sólidas producidas por la ruptura de partículas de mayor tamaño mediante procesos mecánicos tales como molturación, perforación, pulido, explosiones, etc. Las partículas de polvo presentes en un material pueden pasar al aire a causa de operaciones tales como paleado, tamizado, transporte, etc.

**Potencia al freno:** Potencia realmente requerida para mover un ventilador. En ella se incluyen las pérdidas en el ventilador, y puede determinarse únicamente mediante ensayos. (No incluye las pérdidas en la transmisión entre el motor y el ventilador.)

**Potencia teórica:** Potencia teórica necesaria para el funcionamiento de un ventilador si éste tuviera un rendimiento del 100 %, es decir, si no tuviera pérdidas.

**Presión de vapor:** Presión ejercida por un vapor. Si sobre un líquido mantenido a temperatura constante se mantiene confinado su vapor, la presión ejercida por éste se aproxima a un límite fijo llamado presión de vapor o presión de saturación, valor que depende sólo de la temperatura y del líquido de que se trate. La expresión presión de vapor se emplea a veces como sinónimo de presión del vapor saturado.

**Presión dinámica:** Presión cinética en la dirección del flujo que es necesaria para hacer que un fluido en reposo fluya a una determinada velocidad. Se expresa normalmente en mmcda.

**Presión estática:** Presión potencial ejercida en todas direcciones por un fluido en reposo. Para un fluido en movimiento se mide en dirección perpendicular a la del flujo. Normalmente

se expresa, cuando se trata de aire, en mmcda. (Tendencia a dilatar o colapsar el conducto.)

**Presión total:** Suma algebraica de las presiones estática y dinámica (con especial atención al signo).

**Radiación, radiación térmica:** Transmisión de energía por medio de ondas electromagnéticas de longitud de onda muy larga. Cualquiera que sea la longitud de onda, la energía radiante puede, al ser absorbida, convertirse en calor y dar lugar a un aumento de la temperatura del cuerpo absorbente.

**Temperatura efectiva:** Índice arbitrario que combina en un único valor el efecto de la temperatura, la humedad y el movimiento del aire, sobre la sensación de calor o frío experimentada por el cuerpo humano. Su valor numérico es el de la temperatura de un aire tranquilo y saturado de humedad que produjera idéntica sensación.

**Temperatura húmeda:** La temperatura húmeda termodinámica es la temperatura a la cual el agua sólida o líquida, por evaporación en el aire, puede saturar adiabáticamente el aire a la misma temperatura. La temperatura húmeda (a secas) es la temperatura indicada por un termómetro húmedo construido y utilizado correctamente.

**TLV's (valores TLV):** Valores empleados como guías para el control de los riesgos para la salud provocados por sustancias o materiales tóxicos presentes en el aire, y que se expresan como las concentraciones medias ponderadas en el tiempo a las cuales casi todos los trabajadores pueden estar expuestos 8 horas al día durante largos períodos de tiempo sin efectos adversos (ver el Apéndice).

**Vapor:** Forma gaseosa de sustancias que se encuentran normalmente en estado sólido o líquido y que pueden cambiar a dichos estados ya sea aumentando la presión o disminuyendo la temperatura.

**Velocidad de captura:** Velocidad de aire en cualquier punto delante de la boca de una campana, o en la propia boca de la misma, necesaria para superar las corrientes de aire opuestas a la captación y aspirar el contaminante situado en ese punto arrastrándolo hacia la campana.

**Velocidad de transporte:** Ver velocidad mínima en el conducto.

**Velocidad en rendija:** Flujo lineal de aire a través de una rendija, m/s.

**Velocidad mínima en el conducto:** Velocidad mínima del aire necesaria para mover las partículas en la corriente de aire, m/s.

**Zona de confort (promedio):** Margen de temperaturas efectivas en el cual la mayoría (50 % o más) de adultos se sienten confortables.

---

## Capítulo 1

# PRINCIPIOS GENERALES DE VENTILACIÓN

---

1.1 INTRODUCCIÓN .....	1-2	1.7 PÉRDIDA DE CARGA EN CONDUCTOS .	1-8
1.2 SISTEMAS DE IMPULSIÓN .....	1-2	1.7.1 PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMOS RECTOS .....	1-8
1.3 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN .....	1-2	1.7.2 PÉRDIDA DE CARGA EN PUNTOS SINGULARES .....	1-10
1.4 DEFINICIONES BÁSICAS .....	1-3	1.8 SISTEMAS CON VARIAS CAMPANAS ....	1-10
1.5 PRINCIPIOS DEL FLUJO DEL AIRE .....	1-5	1.9 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE AIRE EN IMPULSIÓN Y EN EXTRACCIÓN ....	1-11
1.6 ACELERACIÓN DEL AIRE Y PÉRDIDAS EN LA ENTRADA A LAS CAMPANAS ...	1-6	REFERENCIAS .....	1-11

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La importancia de disponer de aire limpio y sin contaminar en el ambiente de trabajo industrial es bien conocida. La industria moderna, con su complejidad de operaciones y procesos, utiliza un número creciente de sustancias y preparados químicos muchos de los cuales poseen una elevada toxicidad. El empleo de dichos materiales puede dar lugar a que en el ambiente de trabajo estén presentes, en concentraciones que excedan los niveles de seguridad, partículas, gases, vapores y/o nieblas. El estrés térmico puede también originar ambientes de trabajo inseguros o incómodos. Una ventilación eficaz y bien diseñada ofrece una solución a estas situaciones, en las que se requiere la protección del trabajador. La ventilación puede también ser útil para controlar olores, humedad y otras condiciones ambientales indeseables.

El riesgo potencial para la salud asociado a una sustancia presente en el aire viene indicado por su Valor Límite (TLV). El TLV se define como la concentración en el aire de una sustancia a la que se considera que casi todos los trabajadores pueden exponerse repetidamente, día tras día, sin sufrir efectos adversos. El valor TLV-TWA se define como la concentración media ponderada en el tiempo, para una jornada normal de trabajo de 8 horas y una semana laboral de 40 horas, que no producirá efectos adversos en la mayoría de los trabajadores, es empleado usualmente como referencia de seguridad. Los valores TLV son publicados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists, y se revisan anualmente para incorporar los nuevos conocimientos sobre toxicidad de las sustancias. El Capítulo 12 de este Manual incluye una lista de los valores TLV en vigor en el momento de la publicación.\*

En las plantas industriales se emplean dos tipos generales de sistemas de ventilación. Los sistemas de IMPULSIÓN se utilizan para impulsar aire, habitualmente templado, a un local de trabajo. Los sistemas de EXTRACCIÓN se emplean para eliminar los contaminantes generados por alguna operación, con la finalidad de mantener un ambiente de trabajo saludable.

Un programa completo de ventilación debe incluir tanto la impulsión como la extracción. Si la cantidad global de aire que se extrae de un local de trabajo es superior a la cantidad de aire exterior que se aporta, la presión en el interior será más baja que la atmosférica. Esta situación puede ser deseable cuando se emplea ventilación por dilución para controlar o aislar ciertos contaminantes en una zona determinada de la planta, pero a menudo el fenómeno se produce porque se han instalado sistemas de extracción sin tener en cuenta la sustitución del aire que extraen. Cuando ello ocurra, el aire entrará en la planta de una manera incontrolada, a través de rendijas, puertas, ventanas, etc. Habitualmente esta situación trae como consecuencia, en primer lugar, malestar en la época invernal para quienes

trabajan cerca de los límites del local. En segundo lugar, se produce una reducción de la eficacia de funcionamiento de los sistemas de extracción, que puede dar lugar a una disminución del grado de control de los contaminantes y originar posibles riesgos para la salud. Finalmente, se producirán mayores costes de calefacción y refrigeración. El Capítulo 7 de este manual analiza este asunto con mayor detalle.

## 1.2 SISTEMAS DE IMPULSIÓN

Los sistemas de impulsión se emplean con dos finalidades: 1) para crear un ambiente confortable en la planta (sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación); y 2) para sustituir el aire extraído de la planta (sistemas de sustitución). En muchos casos los sistemas de impulsión y de extracción están acoplados, como en los sistemas de control por dilución (ver la sección 1.3 del Capítulo 2).

Un sistema de impulsión bien diseñado debe incluir una sección de toma de aire; filtros, equipo de calefacción y/o refrigeración, un ventilador, conductos y registros o rejillas para la distribución del aire por el espacio de trabajo. Los filtros, el equipo de calefacción y/o refrigeración y el ventilador se encuentran a menudo integrados en un conjunto único denominado unidad de impulsión y tratamiento del aire. Si se recircula una parte del aire impulsado por el sistema es necesario instalar un sistema de RETORNO para devolver el aire recirculado a la unidad de tratamiento.

## 1.3 SISTEMAS DE EXTRACCIÓN

Los sistemas de ventilación por extracción se clasifican en dos grupos genéricos: 1) los sistemas de extracción GENERAL y 2) los sistemas de extracción LOCALIZADA.

Los sistemas de extracción general pueden emplearse para el control del ambiente térmico y/o para la eliminación de los contaminantes generados en un área, mediante el barrido de un espacio dado con grandes cantidades de aire. Cuando se emplea para el control térmico, el aire debe ser templado y recirculado. Cuando se emplea para el control de los contaminantes (sistema de dilución), éstos deben mezclarse con una cantidad de aire suficiente para que la concentración se reduzca hasta niveles seguros. Normalmente el aire contaminado se descarga a la atmósfera. A fin de reemplazar el aire extraído suele emplearse un sistema de impulsión, que funciona asociado al de extracción.

Los sistemas de ventilación por dilución acostumbran a utilizarse para el control de la contaminación sólo cuando no es posible el empleo de la extracción localizada, pues las grandes cantidades de aire templado que son necesarias para sustituir el aire que se extrae pueden dar lugar a elevados costes de funcionamiento. El Capítulo 2 describe las características básicas de los sistemas de ventilación general y sus

\* Los valores TLV se publican en castellano con permiso de ACGIH por la Conselleria de Trabajo y Asuntos Sociales de la Generalitat Valenciana.

aplicaciones para el control de los contaminantes y del riesgo de incendio.

Los sistemas de extracción localizada se basan en el principio de capturar el contaminante en, o muy cerca de, su origen. Es el método de control preferido porque es el de mayor eficacia y, al emplear caudales más pequeños, reduce en menores costes de calefacción con respecto a los elevados caudales requeridos por los sistemas de extracción general. La importancia actual del control de la contaminación atmosférica refuerza la necesidad del empleo, en los sistemas de ventilación industrial, de equipos de depuración eficaces, cuyo coste es más reducido en los sistemas de extracción localizada debido al menor caudal de aire que utilizan.

Los sistemas de extracción localizada se componen de hasta cuatro tipos de elementos básicos: el(los) elemento(s) de captación, el sistema de conductos (incluyendo la chimenea de salida y/o el conducto de recirculación), el depurador y el ventilador. El objetivo del elemento de captación es captar el contaminante atrapándolo en una corriente de aire dirigida hacia dicho elemento, que en lo sucesivo denominaremos genéricamente campana. Para transportar el aire contaminado hasta el depurador, cuando existe, o hasta el ventilador, es necesario disponer de un sistema de conductos. En el depurador el contaminante es separado del aire. El ventilador ha de vencer todas las pérdidas debidas al rozamiento, la entrada a la campana y las uniones de conductos y, al mismo tiempo, producir el caudal de aire previsto. A la salida del ventilador existe habitualmente un conducto dispuesto en tal forma que el aire descargado por él no sea reintroducido en el local por la impulsión de aire en el mismo, o por el sistema de aire acondicionado o calefacción. En ciertos casos el aire depurado es reintroducido en el local. En el Capítulo 7 se discute cuándo es ello posible y de qué forma ha de realizarse.

El presente Manual trata los aspectos de diseño de los sistemas de ventilación por extracción, pero los principios que se describen son aplicables también a los sistemas de impulsión.

#### 1.4 DEFINICIONES BÁSICAS

Para describir el flujo del aire se emplean las siguientes definiciones básicas, que serán repetidamente usadas en el resto de este Manual.

La densidad ( $d$ ) del aire se define como su masa por unidad de volumen y se expresa habitualmente en kilogramos por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). A la presión de 1 atm. y  $20^\circ\text{C}$  de temperatura, su valor es de  $1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ , valor que se obtiene de la ecuación de los gases perfectos, que relaciona la presión, la densidad y la temperatura:

$$P = dRT/M \quad [1.1]$$

donde:

$P$  = presión absoluta, atmósferas

$d$  = densidad,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$R$  = constante de los gases perfectos que vale  $0,082 \text{ atm l}/\text{grado mol}$

$M$  = peso molecular; para el aire se adopta un valor de 28,8

$T$  = Temperatura absoluta, grados Kelvin  $T = ^\circ\text{C} + 273$

De la ecuación anterior se deduce que la densidad es inversamente proporcional a la temperatura, a presión constante. Por lo tanto, en cualquier situación en la que se maneje aire seco (ver el Capítulo 5 para el cálculo con aire húmedo), se tendrá:

$$dT = (dT)_{\text{standard}}$$

es decir,

$$d = d_{\text{standard}} \frac{T_{\text{standard}}}{T} = 1,2 \frac{293}{T} \quad [1.2]$$

Así, por ejemplo, la densidad del aire seco a  $150^\circ\text{C}$  será:

$$d = 1,2 \frac{293}{273 + 150} = 0,831 \text{ kg}/\text{m}^3$$

El flujo volumétrico, habitualmente denominado "caudal", se define como el volumen o cantidad de aire que atraviesa una sección determinada por unidad de tiempo. Está relacionado con la velocidad media y el área de la sección atravesada por la expresión:

$$Q = A V \quad [1.3]$$

donde:

$Q$  = caudal,  $\text{m}^3/\text{s}$

$V$  = velocidad media,  $\text{m}/\text{s}$

$A$  = área de la sección,  $\text{m}^2$

Dadas dos cualesquiera de estas tres variables, la tercera puede ser determinada fácilmente.

El aire o cualquier otro fluido circulan siempre de las regiones de mayor presión total a las de menor, en ausencia de aporte de energía (un ventilador). Una masa de aire en movimiento tiene asociadas tres presiones distintas, pero matemáticamente relacionadas.

La presión estática (PE) se define como la presión que tiende a hinchar o colapsar el conducto, y se expresa en milímetros de columna de agua (mmcda). Normalmente se mide con un manómetro de columna de agua, de ahí las unidades empleadas. La presión estática puede ser positiva o negativa con respecto a la presión atmosférica local, pero debe medirse perpendicularmente a la dirección del flujo de aire. La presión estática puede medirse empleando un tubo de Pitot (ver Figura 9-3) o a través de un orificio perforado (nunca con un punzón) en la pared del tubo, cuidando de evitar las rebabas en la pared interna, que distorsionarían el flujo del aire.



La presión dinámica (PD) se define como la presión requerida para acelerar el aire desde velocidad cero hasta una cierta velocidad (V), y es proporcional a la energía cinética de la corriente de aire. La relación entre PD y V viene dada por:

$$V = 4,43 \sqrt{\frac{PD}{d}} \quad [1.4]$$

o bien por:

$$PD = d \left( \frac{V}{4,43} \right)^2$$

donde:

- V = velocidad, m/s
- PD = presión dinámica, mmcda

Si se supone que el aire se encuentra en condiciones standard, la ecuación anterior se reduce a:

$$V = 4,043 \sqrt{PD} \quad [1.5]$$

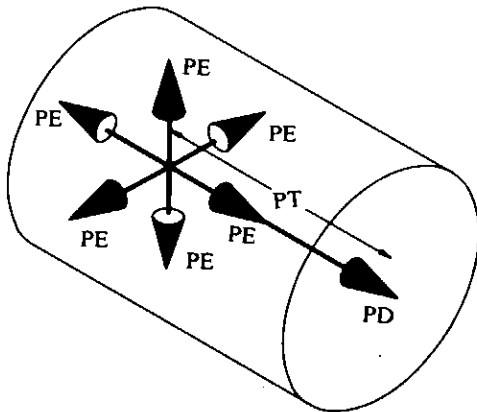


FIGURA 1-1 PE, PD Y PT EN UN PUNTO

o bien:

$$PD = \left( \frac{V}{4,043} \right)^2$$

PD se ejerce únicamente en la dirección del flujo y es siempre positiva. La Figura 1-1 muestra gráficamente la diferencia entre PE y PD.

La presión total (PT) se define como la suma algebraica de las presiones estática y dinámica:

$$PT = PE + PD \quad [1.6]$$

La presión total puede ser positiva o negativa con respecto a la presión atmosférica, y es una medida del contenido energético del aire, por lo que va siempre descendiendo a medida que se produce el avance del aire por el interior del conducto. Únicamente aumenta al pasar a través del ventilador.

La presión total puede medirse con un tubo de impacto dirigido aguas arriba de la corriente de aire y conectado a un manómetro. Los valores de PT en distintos puntos de una misma sección no son coincidentes debido a las diferencias de velocidad entre ellos; por esta razón, una sola lectura del valor de PT no es indicativa del contenido energético del aire. En el Capítulo 9 se indica la metodología a seguir para la medición de las distintas presiones en un sistema de conductos.

El significado de estas presiones puede explicarse como sigue. Supongamos un tramo de un conducto, sellado por ambos extremos, que es presurizado a una presión estática de 0,005 atm. por encima de la presión atmosférica, tal como se indica en la Figura 1-2. Si se perfora en la pared del tubo un pequeño agujero (de 2 a 3 mm de diámetro) y se le conecta una de las ramas de un manómetro en U, la lectura será aproximadamente 50 mmcda. Obsérvese la diferencia de niveles entre las dos ramas del manómetro. Si el agua de la rama abierta a la atmósfera se encuentra a un nivel superior al de la rama conectada al conducto, la presión es positiva (mayor que la atmosférica). Puesto que no hay velocidad, la presión dinámica es nula, y PE = PT. Una

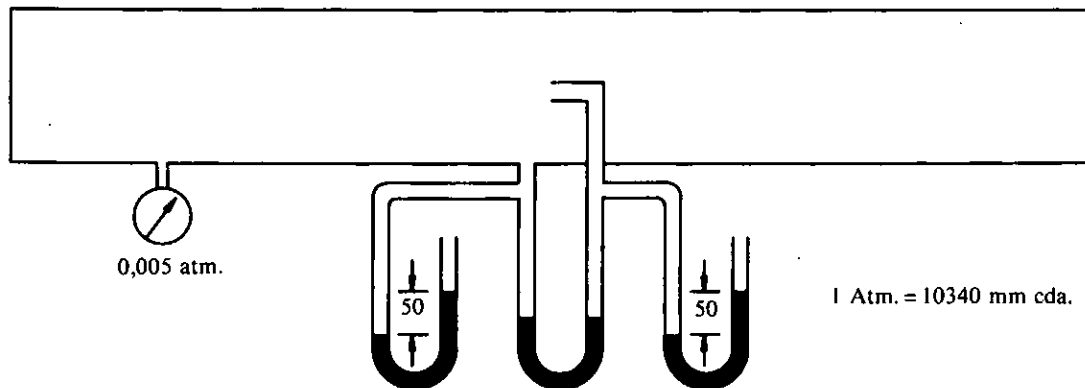


FIGURA 1-2 MEDICIÓN DE PE, PD Y PT EN UN CONDUCTO PRESURIZADO

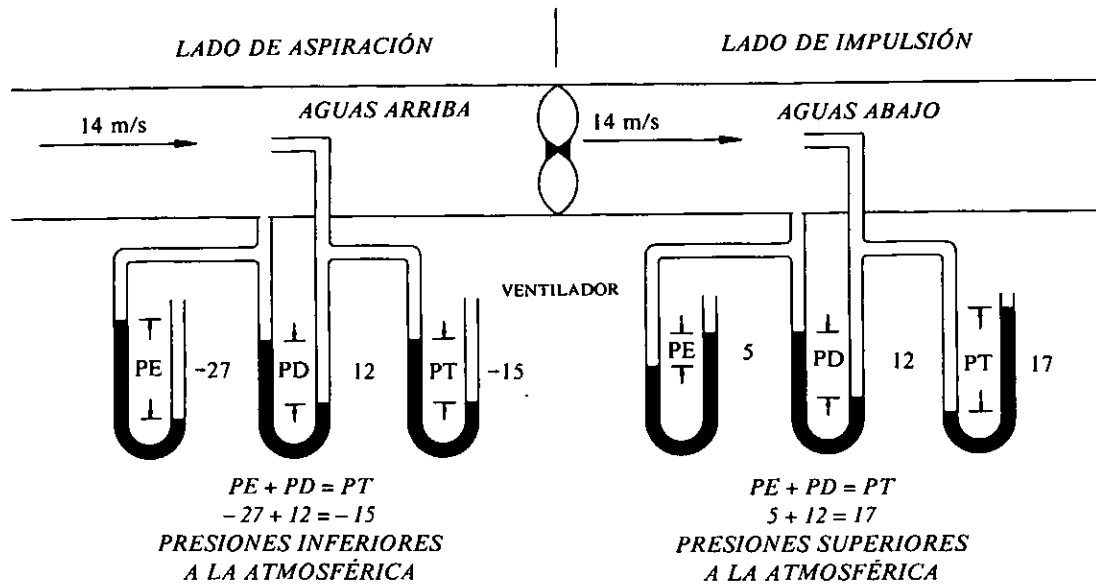


FIGURA 1-3 PE, PD, PT EN DISTINTOS PUNTOS DE UN SISTEMA DE VENTILACIÓN

sonda cuyo extremo esté dirigido en sentido opuesto al del movimiento del aire se denomina tubo de impacto, y medirá la presión total. En este ejemplo, si conectamos un manómetro a un tubo de impacto (el situado a la derecha), indicará también 50 mmca. Finalmente, si uno de los lados del manómetro se conecta al tubo de impacto y el otro a la sonda de presión estática (el central en el dibujo), el manómetro indicará la diferencia entre ambas presiones. Puesto que  $PD = PT - PE$ , un manómetro conectado de esta forma indicará directamente PD. En este ejemplo, puesto que no hay flujo,  $PD = 0$ , como nos muestra la igualdad de niveles entre ambas ramas.

Si se destaparan los extremos del conducto y en su interior se colocara un ventilador, la situación podría modificarse hasta la indicada; por ejemplo, en la Figura 1-3. Aguas arriba del ventilador PE y PT son negativas (inferiores a la atmosférica). Es el llamado *lado de aspiración*. Aguas abajo del ventilador PE y PT son ambas positivas. Éste es el llamado *lado de impulsión*. Independientemente del lado del ventilador, PD es siempre positiva. Obsérvese que las diferencias de nivel en cada manómetro indican si los valores respectivos de PE y PT son positivos o negativos con respecto a la presión atmosférica local.

## 1.5 PRINCIPIOS DEL FLUJO DEL AIRE

El flujo del aire en los sistemas de ventilación industrial está gobernado por dos principios básicos de la mecánica de fluidos: la conservación de la masa y la conservación de la energía. Se trata de leyes "contables" que, básicamente, establecen que la masa y la energía no desaparecen y han de ser, por tanto, tenidas en cuenta en su totalidad. Este Manual no pretende efectuar un estudio en profundidad de

este tema; la demostración de los citados principios puede encontrarse en cualquier texto de mecánica de fluidos. Sin embargo, es importante conocer cuáles son las hipótesis simplificadoras que se incluyen en los principios que se exponen más adelante; dichas hipótesis son:

1. Se desprecian los efectos del intercambio térmico. Si la temperatura en el interior del conducto es significativamente distinta de la del aire en los alrededores del conducto, se producirá un intercambio de calor. En consecuencia tendrá lugar un cambio en la temperatura del aire en el interior del conducto y, por tanto, se modificará el caudal.
2. Se considera que el aire es incompresible. Si la pérdida global de presión en el sistema supera 500 mmca, aproximadamente, la densidad cambiará alrededor de un 5% y el caudal también se modificará (véase el Capítulo 5).
3. Se supone que el aire es seco. La presencia de vapor de agua en el aire reduce la densidad de éste, por lo que debe efectuarse una corrección para tener en cuenta este efecto. El Capítulo 5 describe el análisis psicrométrico necesario.
4. Se ignoran el peso y el volumen del contaminante presente en la corriente de aire. Se trata de una hipótesis admisible en la gama de concentraciones que son habituales en los sistemas típicos de extracción. Si existen altas concentraciones de sólidos, o cantidades significativas de gases distintos del aire, deben efectuarse correcciones para tener en cuenta su efecto.

La conservación de la masa exige que el balance neto del flujo másico debe ser nulo. Si se desprecian los efectos que acabamos de describir, la densidad permanecerá constante y el balance neto del flujo volumétrico (caudal) deberá ser cero. Por ello, el caudal que entra en una campana debe ser

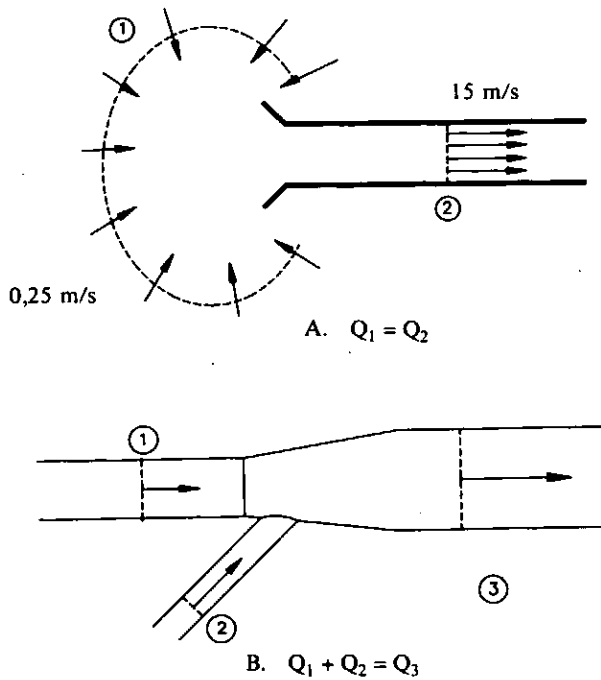


FIGURA 1-4 CAUDALES EN DISTINTAS SITUACIONES. A. FLUJO A TRAVÉS DE UNA CAMPANA; B. FLUJO EN UNA UNIÓN DE CONDUCTOS

el mismo que el que atraviesa el conducto que sale de ella. En la unión de dos conductos, el caudal de salida debe ser igual a la suma de los caudales de cada uno de ellos. Cuando un conducto se divide en otros dos, el caudal que llega debe ser igual a la suma de los dos caudales de salida. La Figura 1-4 ilustra estos conceptos.

La conservación de la energía exige tener en cuenta todos los cambios de energía que se producen a medida que el aire fluye de un punto a otro. En términos de las presiones previamente definidas, este principio puede expresarse de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} PT_1 &= PT_2 + h_p \\ PE_1 + PD_1 &= PE_2 + PD_2 + h_p \end{aligned} \quad [1.7]$$

donde:

- subíndice 1 = un punto cualquiera aguas arriba
- subíndice 2 = un punto cualquiera aguas abajo
- $h_p$  = pérdida de energía sufrida por el aire mientras fluye desde un punto al otro.

Obsérvese que, según este principio, la *presión total debe disminuir en la dirección en la que discurre el flujo*.

La aplicación de estos principios se mostrará mediante el análisis del sencillo sistema dibujado en la Figura 1-5. La chimenea de salida, usualmente vertical, se ha situado horizontal para facilitar el trazado de las variaciones de las presiones estática, dinámica y total. Se trata de una campana-

na de una muela de desbarbado que requiere un caudal de  $0,15 \text{ m}^3/\text{s}$  y un conducto de  $100 \text{ mm}$  de diámetro (sección de  $0,007854 \text{ m}^2$ ).

### 1.6 ACELERACIÓN DEL AIRE Y PÉRDIDAS EN LA ENTRADA A LAS CAMPANAS

El aire fluye desde el local (punto 1 de la Figura 1-5), a través de la campana, hasta el conducto (punto 2 de la Figura 1-5), en el que la velocidad viene dada por la expresión:

$$\begin{aligned} V &= \frac{Q}{A} = \frac{0,15}{0,007854} = 19,1 \text{ m/s} \\ PD &= \left( \frac{V}{4,043} \right)^2 = \left( \frac{19,1}{4,043} \right)^2 = 22,31 \end{aligned}$$

Esta velocidad corresponde a una presión dinámica de  $22,31 \text{ mmcd}$ , suponiendo aire en condiciones standard.

Si no existen pérdidas asociadas a la entrada en la campana, la aplicación del principio de conservación de la energía (ecuación 1-7) da:

$$PE_1 + PD_1 = PE_2 + PD_2$$

Éste es el bien conocido principio de Bernoulli de la mecánica de fluidos. El subíndice 1 se refiere a las condiciones en el local, donde la presión estática es la atmosférica ( $PE_1 = 0$ ) y la velocidad del aire puede admitirse que es muy próxima a cero ( $PD_1 = 0$ ). Por ello, el principio de conservación de la energía conduce a

$$PE_2 = -PD_2 = -22,31 \text{ mmcd}$$

Incluso aunque no existieran pérdidas en la entrada a la campana, la *presión estática debe disminuir a causa de la aceleración sufrida por el aire hasta alcanzar la velocidad en el conducto*.

En realidad se producen pérdidas en la entrada a la campana. Estas pérdidas en la entrada ( $hc_c$ ) se expresan normalmente mediante un factor de pérdidas ( $F_c$ ) multiplicado por la presión dinámica en el conducto de manera que  $hc_c = F_c PD$ . El principio de conservación de la energía se expresa entonces

$$PE_2 = -(PD_2 + hc_c) \quad [1.8]$$

El valor absoluto de  $PE_2$  se denomina succión estática de la campana ( $PE_c$ ). Por tanto

$$PE_c = -PE_2 = PD_2 + hc_c \quad [1.9]$$

En la Figura 1-5, por ejemplo, suponiendo un coeficiente de pérdidas en la entrada de  $0,40$  tendremos

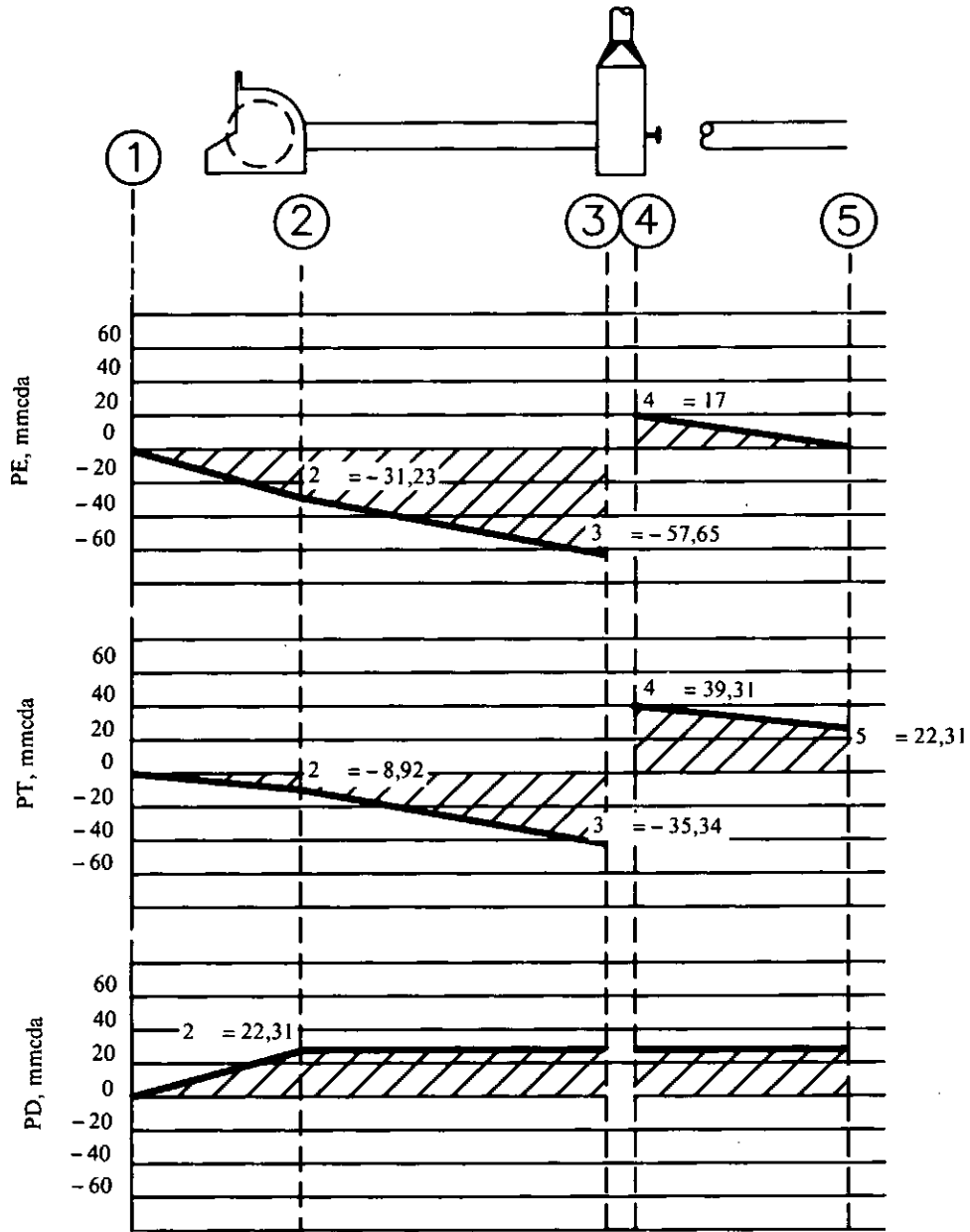


FIGURA 1-5 VARIACIÓN DE PE, PD Y PT A LO LARGO DE UN SISTEMA DE VENTILACIÓN.

$$\begin{aligned}
 PE_c &= PD_2 + F_c PD_2 \\
 &= 22,31 + (0,4) (22,31) \\
 &= 22,31 + 8,92 \\
 &= 31,23 \text{ mm cda}
 \end{aligned}$$

En resumen, la presión estática aguas abajo de la campana es negativa (inferior a la atmosférica), por dos razones:

1. La aceleración del aire hasta la velocidad en el conducto; y

2. Las pérdidas en la entrada a la campana.

Obsérvese en el gráfico que  $PT_2 = -PE_c$ , lo que confirma la afirmación de que la presión total decrece en el sentido del flujo.

Un método alternativo para describir las pérdidas en la entrada de la campana es el empleo del coeficiente de entrada a la campana ( $C_e$ ). Este coeficiente se define como la raíz cuadrada del cociente entre la presión dinámica en el conducto y la presión estática de la campana, es decir,

$$C_e = \sqrt{\frac{PD}{PE_c}} \quad [1.10]$$

Si no se produjeran pérdidas sería  $PE_c = PD$  y  $C_e = 1$ . Sin embargo, puesto que en la campana siempre se producen pérdidas,  $C_e$  es siempre inferior a la unidad. En la Figura 1-5,

$$C_e = \sqrt{\frac{PD}{PE_c}}$$

$$= \sqrt{\frac{22,31}{31,23}} = 0,845$$

Una propiedad importante de  $C_e$  es que es constante para una campana dada. Por tanto, puede emplearse para determinar el caudal si se conoce la presión estática. En efecto,

$$Q = AV = 4,43 A \sqrt{\frac{PD}{d}} = 4,43 A C_e \sqrt{\frac{PE_c}{d}} \quad [1.11]$$

Para aire standard esta ecuación se convierte en

$$Q = 4,043 A C_e \sqrt{PE_c} \quad [1.12]$$

que para el ejemplo de la Figura 1-5, da

$$Q = 4,043 (0,007854) (0,845) \sqrt{31,23} = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}$$

Empleando  $C_e$  y midiendo  $PE_c$  es posible determinar rápidamente el caudal de una campana y tomar medidas correctoras si el valor hallado no coincide con el de diseño.

### 1.7 PÉRDIDA DE CARGA EN CONDUCTOS

Existen dos componentes de la pérdida global de presión total en un tramo de conducto: 1) pérdida de carga en los tramos rectos y 2) pérdida de carga en los puntos singulares (codos, uniones, etc.).

**1.7.1 Pérdida de carga en tramos rectos:** La pérdida de carga en los tramos rectos es una función compleja de la velocidad del aire, del diámetro del conducto, de la densidad y viscosidad del aire, y de la rugosidad superficial del conducto. Los efectos de la velocidad, diámetro, densidad y viscosidad se combinan en el *número de Reynolds* ( $Re$ ), que se define como:

$$Re = \frac{dVD}{\mu} \quad [1.13]$$

donde:

- d = densidad, kg/m<sup>3</sup>
- D = diámetro, m
- V = velocidad, m/s
- μ = viscosidad, kg/m s

El efecto de la rugosidad superficial se da usualmente mediante la *rugosidad relativa*, que es el cociente entre la altura absoluta de las rugosidades ( $\epsilon$ ), definida como la altura media de las rugosidades para un material determinado, y el diámetro del conducto. Algunos valores típicos de rugosidad absoluta empleados en los sistemas de ventilación se dan en la Tabla 1-1.

TABLA 1.1 Rugosidad superficial absoluta

Material	Rugosidad absoluta ( $\epsilon$ ), cm
Chapa galvanizada	0,015
Acero	0,005
Aluminio	0,005
Acero inoxidable	0,005
Conducto flexible (alma descubierta)	0,3
Conducto flexible (alma recubierta)	0,09

Estas cifras son valores de diseño, que pueden sufrir variaciones notables según cuál sea el proceso de fabricación.

L. F. Moody (1.1) combinó todos estos efectos en un gráfico único, usualmente llamado *diagrama de Moody* (ver Figura 1-6), mediante el cual, si se conoce el número de Reynolds y la rugosidad relativa, es posible hallar el *factor de fricción* ( $f$ ).

Una vez determinado, el factor de fricción se utiliza en la *ecuación del factor de fricción de Darcy-Weisbach* a fin de determinar la pérdida de carga global en el tramo:

$$h = f \frac{L}{D} PD \quad [1.14]$$

donde:

- h = pérdida de carga en el conducto, mmca
- f = factor de fricción del diagrama de Moody (adimensional)
- L = longitud el tramo, m
- D = diámetro del conducto, m
- PD = presión dinámica, mmca

Existen muchas ecuaciones que permiten resolver por ordenador el diagrama de Moody. Una de ellas es la de Churchill (1.2), que da un pequeño porcentaje de error en toda la gama de flujos laminares, críticos y turbulentos, con una única ecuación. Esta ecuación es:

$$f = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-3/2} \right]^{1/12} \quad [1.15]$$

donde:

$$A = \left\{ -2,457 \ln \left[ \left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} + \left( \frac{\epsilon}{3,7 D} \right) \right] \right\}^{16}$$

$$B = \left( \frac{37,530}{Re} \right)^{16}$$

Aunque útil, esta ecuación es difícil de usar si no se dispone de un ordenador. Se han efectuado varias propuestas para simplificar el cálculo de la pérdida de carga en tramos rectos para situaciones especiales. Durante muchos años se han empleado, para el diseño de sistemas de ventilación, gráficos basados en la ecuación de Wright (1.3):

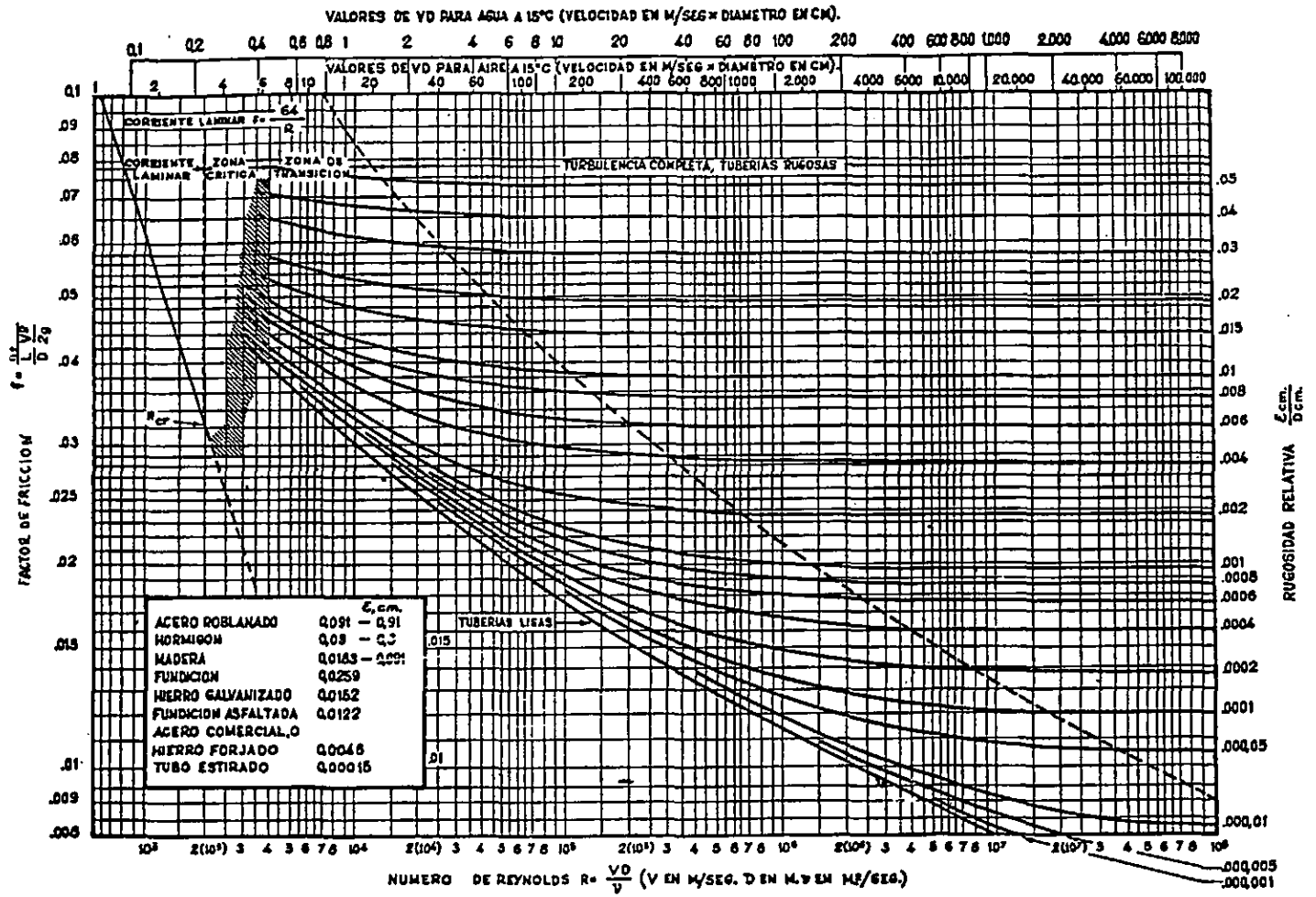


FIGURA 1-6 DIAGRAMA DE MOODY (adaptado de la referencia 1.1)

$$h = 5,3845 \frac{V^{1,9}}{D^{1,22}} \quad 1.16$$

donde:

V = velocidad en el conducto, m/s  
 D = diámetro del conducto, m

Esta ecuación da la pérdida de carga expresada en mmca por metro de conducto, para aire standard de densidad 1,2 kg/m<sup>3</sup> que circula por un conducto limpio, de hierro galvanizado y sección circular, con aproximadamente cuatro tramos cada tres metros ( $\epsilon = 0,015$  cm), y es la base del diagrama para el cálculo de la pérdida de carga expresada en longitud equivalente que se muestra en la Figura 5-16.

Trabajos posteriores de Loeffler<sup>(1.4)</sup> produjeron ecuaciones útiles para el empleo del método de cálculo de "presión dinámica". Mediante el empleo de los valores standard de rugosidad superficial se obtuvieron ecuaciones que pueden combinarse con la de Darcy-Weisbach en la forma:

$$h = H_f L PD \quad [1.17]$$

El valor de  $H_f$  se determinó experimentalmente para el flujo de aire standard en conductos de varios materiales, obteniéndose ecuaciones de la forma:

$$H_f = \frac{a V^b}{Q^c} \quad [1.18]$$

que proporcionan una buena exactitud (error inferior al 5%). La constante "a" y los exponentes "b" y "c" varían

TABLA 1.2 Constantes de la ecuación de correlación

Material	$\epsilon$ , cm	a	b	c
Aluminio, acero, acero inoxidable	0,005	0,0162	0,465	0,602
Chapa galvanizada	0,015	0,0155	0,533	0,612
Conducto flexible, alma recubierta	0,09	0,0186	0,604	0,639

en función del material, como se indica en la Tabla 1-2. Obsérvese que no se desarrolló una correlación para el conducto flexible de alma no recubierta, extremadamente rugoso. Esta ecuación, empleando las constantes de la Tabla 1-2 para conducto de chapa de acero galvanizado, es la que se empleó para desarrollar el gráfico de la Figura 5-18. *Obsérvese que el valor obtenido del gráfico o de la ecuación 1.18 debe multiplicarse por la longitud del conducto y por la presión dinámica.*

**1.7.2 Pérdida de carga en puntos singulares:** Los puntos singulares (codos, uniones, etc.) de un conducto también producen una pérdida de presión total. Estas pérdidas se calculan mediante uno de los dos siguientes métodos: 1) el método de la presión dinámica y 2) el método de la longitud equivalente.

En el método de la presión dinámica, las pérdidas de los puntos singulares vienen dadas por un coeficiente de pérdida (F) multiplicado por la presión dinámica en el conducto. Así,

$$h_p = F PD \quad [1.19]$$

En las reducciones, uniones o ensanchamientos, coexisten varias presiones dinámicas. El valor adecuado para su empleo con el coeficiente de pérdida se indica en las tablas correspondientes.

En el método de la longitud equivalente se considera que el punto singular es equivalente a una cierta longitud de conducto recto que produciría la misma pérdida de carga que él. Esta pérdida es función del tamaño del conducto y de la presión dinámica. La Figura 5-20 corresponde a las pérdidas esperadas a velocidades del aire de alrededor de 20 m/s.

En la Figura 1-5, un conducto recto de 5 metros de longitud, de diámetro constante y construido en chapa galvanizada, une la campana a la entrada del ventilador. Puesto que la sección del conducto es constante, la velocidad y por tanto la presión dinámica lo son también, para un caudal dado. El principio de conservación de la energía se expresa:

$$PE_2 + PD_2 = PE_3 + PD_3 + h_p$$

donde el subíndice 3 se refiere a la entrada del ventilador. Puesto que  $PD_2 = PD_3$ , la pérdida de carga se manifiesta como una reducción de la presión estática (y existirá, por supuesto, una reducción equivalente en la presión total). La pérdida de carga puede obtenerse de la ecuación 1.17 con la ayuda de la ecuación 1.18:

$$H_f = 0,0155 \frac{V^{0.533}}{Q^{0.612}} = 0,0155 \frac{19,1^{0.533}}{0,15^{0.612}} = 0,237$$

De la ecuación 1.17,  $h_p = (0,237) (5) (22.31) = 26,42$  mmcda.

Y empleando este resultado en el principio de conservación de la energía,

$$PE_3 = PE_2 - h_p = -31,23 - 26,42 = -57,65 \text{ mmcda}$$

Otros 3 metros de conducto recto están conectados en la descarga del ventilador. Las pérdidas desde el ventilador hasta la salida del sistema serán alrededor de 17 mmcda. Puesto que la presión estática a la salida del conducto debe ser la atmosférica ( $PE_5 = 0$ ), el principio de la conservación de la energía conduce a:

$$PE_4 = PE_5 + h_p = 0 + 17 = 17 \text{ mmcda}$$

Por ello, la presión estática a la salida del ventilador debe ser superior a la atmosférica en una cantidad igual a la pérdida de carga en el conducto de descarga.

## 1.8 SISTEMAS CON VARIAS CAMPANAS

La mayor parte de los sistemas de extracción son más complejos que el ejemplo precedente. Usualmente es más económico comprar un solo ventilador y un único depurador para conectarlos a una serie de operaciones similares, que crear un sistema completo para cada una de ellas. Por ejemplo, la extracción en diez muelas de desbarbado que se

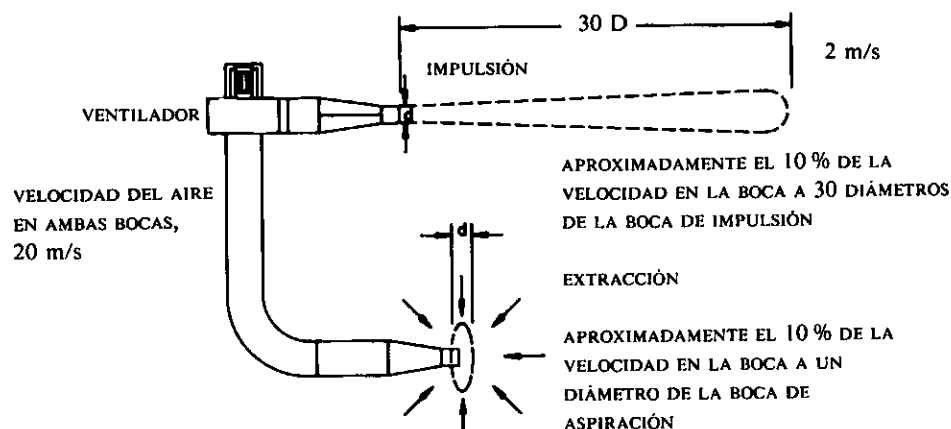


FIGURA 1-7 COMPARACIÓN ENTRE ASPIRACIÓN E IMPULSIÓN

usan continuamente puede combinarse en un conducto común que lleva a un depurador y un ventilador también comunes. Esta situación se trata de manera similar a la de un sistema simple, aunque hay que tomar algunas precauciones para asegurarse de que el caudal de cada una de las campanas es el deseado (ver el capítulo 5).

### 1.9 CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE AIRE EN IMPULSIÓN Y EN EXTRACCIÓN

Cuando el aire es impulsado a través de una pequeña abertura mantiene su efecto direccional durante una distancia considerable más allá del plano de la abertura. Sin embargo, si el flujo de aire a través de la misma abertura fuera invertido, de manera que actuara como una extracción con el mismo caudal, el flujo se volvería casi no direccional y su radio de influencia se vería fuertemente reducido. Por esta razón la extracción localizada no debe emplearse cuando el proceso no pueda desarrollarse en la proximidad *inmediata* de la campana. Asimismo, debido a este efecto,

debe hacerse todo lo posible para encerrar la operación tanto como se pueda. La Figura 1-7 ilustra la gran diferencia existente entre impulsión y extracción.

Este efecto muestra también que las rejillas de descarga de aire de impulsión o renovación pueden influir en un sistema de extracción. Si no se toman precauciones, el flujo de impulsión de una rejilla puede distorsionar seriamente la distribución del flujo de aire de una campana de extracción.

### REFERENCIAS

- 1.1 L. F. Moody: "Friction Factors for Pipe Flow." *ASME Trans.* 66:672 (1944).
- 1.2 S. W. Churchill: "Friction Factor Equation Spans all Fluid Flow Regimes." *Chemical Engineering*, Vol. 84 (1977).
- 1.3 D. K. Wright, Jr.: "A New Friction Chart for Round Ducts." *ASHVE Trans.*, Vol. 51, Appendix I, p. 312 (1945).
- 1.4 J. J. Loeffler: "Simplified Equations for HVAC Duct Friction Factors." *ASHRAE J.*, p. 76 (enero 1980).



---

## Capítulo 2

# VENTILACIÓN GENERAL

---

2.1	INTRODUCCIÓN .....	2-2	2.11.1	Golpe de calor .....	2-10
2.2	PRINCIPIOS DE VENTILACIÓN POR DILUCIÓN .....	2-2	2.11.2	Agotamiento por calor .....	2-11
2.3	VENTILACIÓN POR DILUCIÓN PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD .....	2-2	2.11.3	Calambres por calor .....	2-11
2.3.1	Ecuación general de la ventilación por dilución .....	2-2	2.11.4	Erupción por calor .....	2-11
2.3.2	Cálculo de la ventilación por dilución en condiciones de concentración estacionaria .....	2-5	2.12	MEDICIÓN DEL ESTRÉS TÉRMICO .....	2-11
2.3.3	Aumento de la concentración .....	2-5	2.12.1	Temperatura del aire (seca) .....	2-11
2.3.4	Velocidad de eliminación .....	2-6	2.12.2	Temperatura húmeda natural .....	2-11
2.4	MEZCLAS - VENTILACIÓN POR DILUCIÓN PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD .....	2-7	2.12.3	Temperatura húmeda psicrométrica .....	2-11
2.5	VENTILACIÓN POR DILUCIÓN PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS Y EXPLOSIONES .....	2-7	2.12.4	Velocidad del aire .....	2-11
2.6	VENTILACIÓN POR DILUCIÓN PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN EL CASO DE MEZCLAS .....	2-8	2.12.5	Calor radiante .....	2-11
2.7	VENTILACIÓN PARA EL CONTROL DEL AMBIENTE TÉRMICO .....	2-8	2.12.6	Estimación de la carga térmica metabólica .....	2-12
2.8	BALANCE TÉRMICO E INTERCAMBIO DE CALOR .....	2-9	2.13	ÍNDICES DE ESTRÉS TÉRMICO .....	2-12
2.8.1	Convección .....	2-9	2.13.1	Índice de Temperaturas Húmeda y de Globo (Índice WBGT) .....	2-12
2.8.2	Radiación .....	2-9	2.13.2	Índice de Temperatura de Globo Húmedo (Índice WGT) .....	2-13
2.8.3	Evaporación .....	2-9	2.14	CONTROL DEL CALOR MEDIANTE VENTILACIÓN .....	2-13
2.9	MECANISMO DE ADAPTACIÓN DEL CUERPO .....	2-10	2.15	SISTEMAS DE VENTILACIÓN .....	2-13
2.10	ACLIMATACIÓN .....	2-10	2.16	ENFRIAMIENTO POR VELOCIDAD .....	2-15
2.11	EFFECTOS AGUDOS DEL CALOR .....	2-10	2.17	CONTROL DEL CALOR RADIANTE .....	2-16
			2.18	PRENDAS DE PROTECCIÓN PARA EXPOSICIONES CORTAS .....	2-16
			2.19	INTERCAMBIADORES DE CALOR RESPIRATORIOS .....	2-16
			2.20	TRAJES REFRIGERADOS .....	2-17
			2.21	CABINAS .....	2-17
			2.22	AISLAMIENTO .....	2-17
				REFERENCIAS .....	2-17

## 2.1 INTRODUCCIÓN

“Ventilación general” es un término amplio que hace referencia al suministro o extracción de aire de una zona, local o edificio. Según sus objetivos puede clasificarse de la siguiente forma:

1. *Ventilación por dilución* – consiste en la dilución del aire contaminado con aire sin contaminar, con el objetivo de controlar riesgos para la salud, riesgos de incendio y explosión, olores y contaminantes molestos. La ventilación por dilución puede también incluir el control de contaminantes ambientales (vapores, gases y partículas) generados en el interior de edificios cerrados.

La ventilación por dilución es menos satisfactoria que la extracción localizada para controlar los riesgos para la salud. Aunque en determinadas circunstancias es posible que la ventilación por dilución proporcione el mismo nivel de protección que la extracción localizada a un coste menor, debe ponerse atención en no considerar únicamente la inversión inicial y olvidar el coste de funcionamiento, puesto que la ventilación por dilución extrae usualmente cantidades importantes de calor cuya reposición puede incrementar en gran medida su coste energético global.

2. *Ventilación de control térmico* – consiste en el control de las condiciones ambientales asociadas con los ambientes industriales muy calurosos, tal como los que se encuentran en fundiciones, lavanderías, panaderías, etcétera, con la finalidad de prevenir daños o molestias.

## 2.2 PRINCIPIOS DE VENTILACIÓN POR DILUCIÓN

Los principios básicos del diseño de sistemas de ventilación por dilución son los siguientes:

1. Elegir, a partir de los datos disponibles, la cantidad de aire suficiente para conseguir una dilución satisfactoria del contaminante. Los valores indicados en la Tabla 2-1 suponen una dilución y distribución perfectas del aire y de los vapores de disolvente. Dichos valores han de multiplicarse por el valor de K elegido (ver el párrafo 2.3.1).
2. Situar, si es posible, los puntos de extracción cerca de los focos del contaminante, a fin de beneficiarse de la “ventilación puntual”.
3. Situar los puntos de introducción y extracción del aire de tal forma que el aire pase a través de la zona contaminada. El trabajador debe estar situado entre la entrada de aire y el foco contaminante.
4. Sustituir el aire extraído mediante un sistema de reposición del mismo. El aire aportado debe ser calentado durante las épocas frías. Los sistemas de ventilación por dilución manejan usualmente grandes cantidades de aire mediante ventiladores de baja presión. Para

que el sistema funcione satisfactoriamente es imprescindible reponer el aire extraído.

5. Evitar que el aire extraído vuelva a introducirse en el local descargándolo a una altura suficiente por encima de la cubierta o asegurándose de que ninguna ventana, toma de aire exterior u otra abertura se encuentra situada cerca del punto de descarga.

## 2.3 VENTILACIÓN POR DILUCIÓN PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD

El empleo de la ventilación por dilución para la protección de la salud está sometido a cuatro limitaciones: 1) la cantidad de contaminante generada no debe ser demasiado elevada, pues en ese caso el caudal de aire que sería necesario resultaría excesivo; 2) los trabajadores deben estar suficientemente alejados del foco de contaminante o la dispersión del contaminante debe producirse en concentraciones lo bastante bajas, de forma que la exposición de los trabajadores no supere el correspondiente valor TLV; 3) la toxicidad del contaminante debe ser baja; y 4) la dispersión del contaminante debe ser razonablemente uniforme.

La ventilación por dilución encuentra su aplicación más frecuente en el control de vapores orgánicos cuyo TLV sea igual o superior a 100 ppm. Para aplicar con éxito los principios de la dilución a esta clase de problemas es necesario disponer de datos reales sobre la velocidad de generación de vapor, o sobre la velocidad de evaporación del líquido. Normalmente estos datos pueden obtenerse en la propia planta si ésta dispone de registros adecuados sobre el consumo de materiales.

**2.3.1 Ecuación general de la ventilación por dilución:** El caudal de ventilación necesario para mantener constante la concentración, para un valor dado de la velocidad de generación de contaminante, se deduce a partir de un balance de contaminante en el local suponiendo que el aire introducido está libre de contaminación,

$$\text{Acumulación} = \text{Generación} - \text{Eliminación}$$

es decir,

$$VdC = Gdt - Q' Cdt \quad [2.1]$$

donde:

$$\begin{aligned} V &= \text{volumen del local} \\ G &= \text{velocidad de generación} \\ Q' &= \text{Caudal efectivo de ventilación} \\ C &= \text{Concentración del gas o vapor} \\ t &= \text{tiempo} \end{aligned}$$

En estado estacionario,

$$\begin{aligned} dC &= 0 \\ Gdt &= Q' Cdt \end{aligned}$$

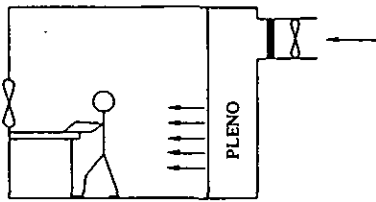
TABLA 2-1 Volúmenes de aire de dilución para vapores

Los valores siguientes se han calculado empleando los valores TLV indicados entre paréntesis, en ppm. Si el TLV hubiese cambiado deberían recalcularse los requerimientos de aire de dilución. Los valores dados en la tabla deben multiplicarse por la velocidad de evaporación (l/h) para obtener el caudal efectivo de ventilación (Q') (ver la ecuación 2.5).

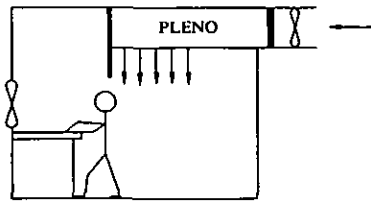
Líquido (TLV en ppm)*	m <sup>3</sup> de aire (std)** por litro evaporado
Acetona (750)	437
Acetato de n-amilo (100)	1619
Acetato de n-butilo (150)	1214
Acetato de etilo (400)	613
Acetato de 2-etoxi-etilo (5)	NO RECOMENDADO
Acetato de metilo (200)	1448
Acetato de 2-metoxietilo (5)	NO RECOMENDADO
Acetato de n-propilo (200)	1042
Alcohol n-butílico (50)	5238
Alcohol etílico (1.000)	411
Alcohol isoamílico (100)	2214
Alcohol isopropílico (400)	786
Alcohol metílico (200)	2923
Benceno (10)	NO RECOMENDADO
2-Butoxietanol (25)	NO RECOMENDADO
Cloroformo (10)	NO RECOMENDADO
1,2 Dicloroetileno (200)	1601
Dicloruro de etileno (10)	NO RECOMENDADO
Dioxano (25)	NO RECOMENDADO
Disolvente Stoddard (100)	1786-2083
Eter etílico (400)	573
Eter isopropílico (250)	679
2-Etoxietanol (5)	NO RECOMENDADO
Gasolina (300)	REQUIERE CONSIDERACIONES ESPECIALES
Metil n-butil cetona (5)	NO RECOMENDADO
Metilcloroformo (350)	678
Metiletilcetona (200)	1339
Metilisobutilcetona (50)	3845
Metilpropilcetona (200)	1185
2-Metoxietanol (5)	NO RECOMENDADO
Nafta (alquitrán de hulla)	REQUIERE CONSIDERACIONES ESPECIALES
Nafta VM y P (300)	REQUIERE CONSIDERACIONES ESPECIALES
Nitrobenceno (1)	NO RECOMENDADO
Sulfuro de carbono (10)	NO RECOMENDADO
1,1,2,2-Tetracloroetano (1)	NO RECOMENDADO
Tetracloroetileno (50)	4712
Tetracloruro de carbono (5)	NO RECOMENDADO
Tolueno (100)	2262
Tricloroetileno (50)	5357
Xileno (100)	1964

\* Ver los valores TLV 1991-1992 en el Apéndice A.

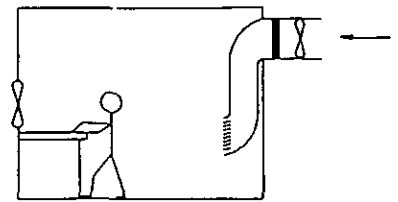
\*\* Las cantidades de aire de dilución tabuladas deben multiplicarse por el valor elegido para K.



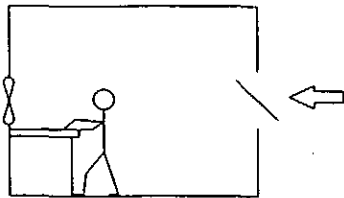
ENTRADA DE AIRE ÓPTIMA  
EXTRACCIÓN ÓPTIMA  
K = 1,0 MÍNIMO



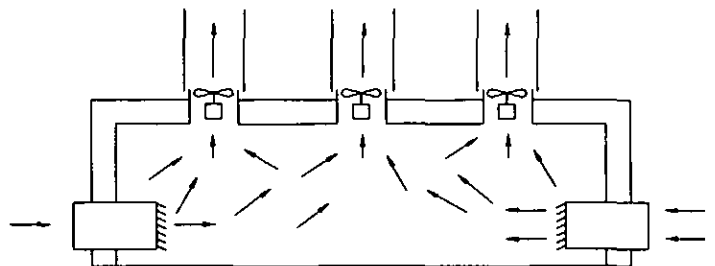
ENTRADA DE AIRE ÓPTIMA  
EXTRACCIÓN ÓPTIMA  
K = 1,0 MÍNIMO



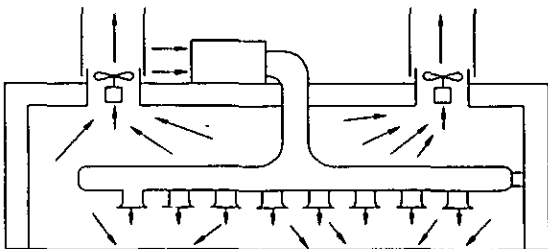
ENTRADA DE AIRE ÓPTIMA  
EXTRACCIÓN ÓPTIMA  
K = 1,5 MÍNIMO



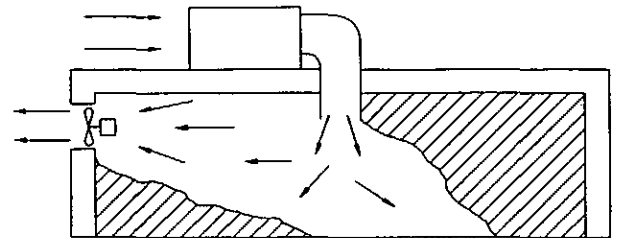
ENTRADA DE AIRE CORRECTA  
EXTRACCIÓN ÓPTIMA  
K = 2,5 MÍNIMO



CORRECTO  
K = 2 A 5  
REF. 2.2



BUENO  
K = 1,5 A 2  
REF. 2.2



MALO  
K = 5 A 10  
REF. 2.2

NOTA: LOS VALORES DE K INDICADOS TIENEN SÓLO EN CUENTA LAS ENTRADAS Y SALIDAS DEL AIRE, Y SON ORIENTATIVOS. PARA ELEGIR EL VALOR DE K A EMPLEAR EN LA ECUACIÓN DEBE TENERSE TAMBIÉN EN CUENTA EL NÚMERO Y SITUACIÓN DE LOS TRABAJADORES, EL FOCO DE CONTAMINANTE Y LA TOXICIDAD DEL MISMO.

AMERICAN CONFERENCE  
OF GOVERNMENTAL  
INDUSTRIAL HYGIENISTS

VALORES DE K SUGERIDOS PARA  
DISTINTAS ENTRADAS Y SALIDAS DEL AIRE

FECHA 1-88

FIGURA 2-1

$$\int_{t_1}^{t_2} G dt = \int_{t_1}^{t_2} Q' C dt$$

Si la concentración, C, y la velocidad de generación, G, son constantes, tendremos,

$$G (t_2 - t_1) = Q' C (t_2 - t_1)$$

$$Q' = \frac{G}{C} \quad [2.2]$$

Debido a que la mezcla no es completa, se introduce un factor de seguridad en el cálculo del caudal, de modo que:

$$Q' = \frac{Q}{K} \quad [2.3]$$

donde:

- Q = caudal real de ventilación, m<sup>3</sup>/h
- Q' = caudal efectivo de ventilación, m<sup>3</sup>/h
- K = factor de seguridad para tener en cuenta que la mezcla no es completa

La ecuación 2.2 queda entonces:

$$Q = \left( \frac{G}{C} \right) K \quad [2.4]$$

Este factor K se basa en varias consideraciones:

1. La eficacia de mezcla y distribución del aire introducido en el local o espacio que se ventila (ver la Figura 2-1).
2. La toxicidad del disolvente. Aunque el TLV y la toxicidad no son sinónimos, se han sugerido las siguientes recomendaciones para elegir el valor de K más apropiado:
  - Sustancia ligeramente tóxica: TLV > 500 ppm
  - Sustancia moderadamente tóxica: TLV 100 ÷ 500 ppm
  - Sustancia altamente tóxica: TLV < 100 ppm
3. La consideración de cualquier otra circunstancia que el higienista considere importante en base a su experiencia y a las características de la situación concreta. Incluidas en este criterio se encuentran circunstancias como:
  - a. La duración del proceso, el ciclo de operaciones y la ubicación habitual de los trabajadores en relación a los focos de contaminante.
  - b. La ubicación y número de focos contaminantes en el local o área de trabajo.
  - c. Los cambios estacionales en la cantidad de ventilación natural.
  - d. La reducción en la eficacia funcional de los equipos mecánicos de ventilación.
  - e. Otras circunstancias que puedan afectar a la concentración de sustancias peligrosas en la zona respiratoria de los trabajadores.

El valor de K, elegido de acuerdo con estas consideraciones, se encuentra entre 1 y 10.

**2.3.2 Cálculo de la ventilación por dilución en condiciones de concentración estacionaria:** La concentración de un gas o vapor en estado estacionario puede expresarse mediante la ecuación del balance de materia

$$Q' = \frac{G}{C}$$

Por ello, el caudal de aire sin contaminar que se requiere para mantener la concentración ambiental de una sustancia tóxica a un nivel aceptable puede calcularse fácilmente si se determina la velocidad de generación. Normalmente la concentración aceptable (C), expresada en partes por millón (ppm), se toma igual al valor TLV. Para disolventes líquidos la velocidad de generación viene dada por la siguiente expresión,

$$G = \frac{24 \times d \times E}{M}$$

donde:

- G = velocidad de generación, m<sup>3</sup>/h
- 24 = el volumen de vapor, en m<sup>3</sup> en condiciones standard, generado por la evaporación de 1 litro de un disolvente de densidad unitaria y peso molecular unitario
- d = densidad relativa del disolvente líquido
- E = velocidad de evaporación del disolvente, l/h
- M = peso molecular del disolvente

Por tanto, Q' = G/C puede expresarse como

$$Q' = \frac{24 \times 10^6 \times d \times E}{M \times C} \quad [2.5]$$

**EJEMPLO**

De un depósito que contiene metilcloroformo se evapora éste a una velocidad de 0,71 litros por hora. ¿Cuáles son los caudales efectivos (Q') y real (Q) de ventilación que deben emplearse para mantener la concentración del vapor por debajo del valor TLV?

$$TLV = 350 \text{ ppm, } d = 1,32, M = 133,4, \text{ supóngase } K = 5$$

Suponiendo una mezcla perfecta, el caudal efectivo de ventilación (Q') será

$$Q' = \frac{24 \times 10^6 \times 1,32 \times 0,71}{133,4 \times 350} = 481 \text{ m}^3/\text{h}$$

Debido a la mezcla incompleta el caudal real deberá ser

$$Q = Q' K = 481 \times 5 = 2405 \text{ m}^3/\text{h}$$

**2.3.3 Aumento de la concentración del contaminante (ver Figura 2-2):** La concentración de contaminante puede

calcularse al cabo de cualquier período de tiempo. De la expresión diferencial del balance de materia se obtiene

$$\frac{dC}{G - Q' C} = -\frac{dt}{V}$$

que puede integrarse, dando:

$$\ln \left( \frac{G - Q' C_2}{G - Q' C_1} \right) = -\frac{Q' (t_2 - t_1)}{V} \quad [2.6]$$

donde el subíndice 1 se refiere a las condiciones iniciales y el 2 a la situación en el instante final. Si se desea calcular el tiempo necesario para alcanzar una concentración determinada, el valor de  $t_2 - t_1$ , o  $\Delta t$ , vale:

$$\Delta t = -\frac{V}{Q'} \left[ \ln \left( \frac{G - Q' C_2}{G - Q' C_1} \right) \right] \quad [2.7]$$

Si  $C_1 = 0$ , la ecuación queda:

$$\Delta t = -\frac{V}{Q'} \left[ \ln \left( \frac{G - Q' C_2}{G} \right) \right] \quad [2.8]$$

Nota: la concentración  $C_2$  se expresa en tanto por uno, es decir, 200 ppm se expresa como  $200/10^6$ .

Si se desea determinar el nivel de concentración ( $C_2$ ) al cabo de un cierto intervalo de tiempo,  $t_2 - t_1$  o  $\Delta t$ , y si  $C_1 = 0$ , la ecuación queda:

$$C_2 = \frac{G \left[ 1 - e \left( -\frac{Q' \Delta t}{V} \right) \right]}{Q'} \quad [2.9]$$

Nota: para convertir  $C_2$  a ppm, multiplique el resultado por  $10^6$ .

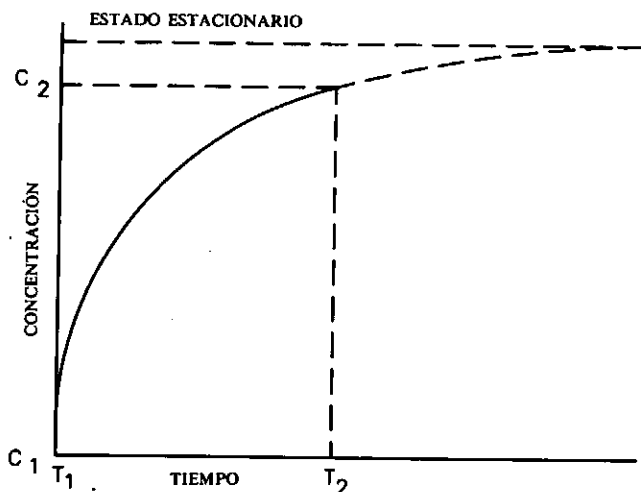


FIGURA 2-2

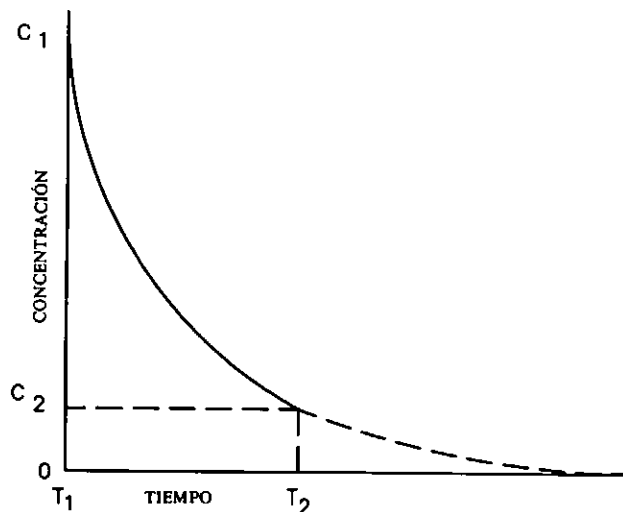


FIGURA 2-3

**EJEMPLO**

Se generan vapores de metilcloroformo en las siguientes condiciones:  $G = 2,034 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $Q' = 3.400 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $V = 2.832 \text{ m}^3$ ;  $C_1 = 0$ ;  $K = 3$ . ¿Cuánto tiempo tardará la concentración ( $C_2$ ) en alcanzar 200 ppm?

$$\Delta t = -\frac{V}{Q'} \left[ \ln \left( \frac{G - Q' C_2}{Q'} \right) \right] = 0,338 \text{ horas}$$

Empleando los mismos valores que en el ejemplo anterior, ¿cuál será la concentración al cabo de 60 minutos?

$$C_2 = \frac{G \left[ 1 - e \left( -\frac{Q' \Delta t}{V} \right) \right]}{Q'} \times 10^6 = 419 \text{ ppm}$$

**2.3.4 Velocidad de eliminación (ver Figura 2-3):** Cuando una masa de aire se encuentra contaminada pero no se produce una cantidad adicional de contaminación o de generación del contaminante, la velocidad de disminución de la concentración en un período de tiempo se expresa como sigue:

$$VdC = -Q' C dt$$

$$\int_{C_1}^{C_2} \frac{dC}{C} = -\frac{Q'}{V} \int_{t_1}^{t_2} dt$$

$$\ln \left( \frac{C_2}{C_1} \right) = -\frac{Q'}{V} (t_2 - t_1)$$

es decir,

$$C_2 = C_1 e \left[ -\frac{Q' (t_2 - t_1)}{V} \right] \quad [2.10]$$

**EJEMPLO**

En el local del ejemplo del párrafo 2.3.3, supóngase que el caudal de ventilación sigue siendo el mismo ( $Q' = 3400 \text{ m}^3/\text{h}$ ), pero el proceso contaminante se interrumpe. ¿Cuánto tiempo será necesario para que la concentración se reduzca desde 100 ( $C_1$ ) hasta 25 ( $C_2$ ) ppm?

$$t_2 - t_1 = -\frac{V}{Q'} \ln \left( \frac{C_2}{C_1} \right) = 1,155 \text{ horas (69,3 minutos)}$$

En el problema anterior, si la concentración ( $C_1$ ) en el instante  $t_1$  vale 100 ppm, ¿cuál será la concentración ( $C_2$ ) al cabo de 60 minutos ( $\Delta t$ )?

$$C_2 = C_1 e^{\left( -\frac{Q' \Delta t}{V} \right)} = 30,1 \text{ ppm}$$

## 2.4 MEZCLAS - VENTILACIÓN POR DILUCIÓN PARA LA PROTECCIÓN DE LA SALUD

En muchos casos el líquido para cuyos vapores se pretende establecer una ventilación por dilución, se tratará de una mezcla. El procedimiento usualmente empleado en estos casos es el siguiente.

Cuando se encuentran presentes dos o más sustancias tóxicas debe tomarse en consideración su efecto conjunto más que los efectos individuales. A falta de información en contrario, los efectos individuales han de considerarse aditivos. Es decir, se considerará que se supera el TLV de la mezcla si la suma de las siguientes fracciones,

$$\frac{C_1}{\text{TLV}_1} + \frac{C_2}{\text{TLV}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{TLV}_n} \quad [2.11]$$

supera la unidad. "C" indica la concentración ambiental existente, y TLV el valor límite respectivo. En ausencia de información en contrario, la ventilación por dilución debe por tanto ser calculada sobre la base de que los diferentes riesgos son aditivos. Se calcula la cantidad de aire necesaria para diluir cada uno de los componentes de la mezcla hasta su nivel seguro de concentración, y se toma como caudal de ventilación la suma de dichas cantidades individuales.

Pueden hacerse excepciones a dicha regla cuando existen buenas razones para creer que los efectos principales de los diferentes componentes de la mezcla no son aditivos sino independientes, como ocurre cuando los efectos de dichos componentes son de tipo puramente local sobre distintos órganos del cuerpo. En tal caso, ordinariamente, sólo se excede el valor límite cuando alguna de las fracciones

$$\frac{C_1}{\text{TLV}_1} \text{ o } \frac{C_2}{\text{TLV}_2}, \text{ etc.,}$$

supera la unidad.

Por tanto, cuando se encuentran presentes dos o más sustancias tóxicas y se sabe que sus efectos respectivos no

son aditivos, sino que actúan independientemente sobre los distintos órganos del cuerpo, debe calcularse el caudal de ventilación necesario para cada componente de la mezcla y emplear el mayor de los valores obtenidos como caudal de ventilación global.

**EJEMPLO**

Se realiza una operación de limpieza y encolado, en las que se liberan metil etil cetona (MEK) y tolueno. Ambos tienen efectos narcóticos y sus efectos se consideran aditivos. La toma de muestras da una concentración de 150 ppm de MEK y de 50 ppm de tolueno. Empleando la ecuación dada, la suma de las fracciones  $[(150/200) + (50/100) = 1,25]$  es superior a la unidad, por lo que se supera el TLV de la mezcla. El caudal necesario, en condiciones standard, para diluir la mezcla hasta el TLV, será:

Supóngase que se liberan 0,95 litros de cada uno cada hora. Elijase un valor de  $K = 4$  para la MEK y de 5 para el tolueno; la densidad de la MEK es de 0,805, y la del tolueno, 0,866; el peso molecular de la MEK es de 72,1, y el del tolueno de 92,13.

$$Q \text{ para MEK} = \frac{(24) (0,805) (10^6) (4) (0,95)}{72,1 \times 200} = 5091 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q \text{ para el tolueno} = \frac{(24) (0,866) (10^6) (5) (0,95)}{92,13 \times 100} = 10723 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q \text{ para la mezcla} = 5091 + 10723 = 15823 \text{ m}^3/\text{h}$$

## 2.5 VENTILACIÓN POR DILUCIÓN PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS Y EXPLOSIONES

Otra función de la ventilación por dilución es reducir la concentración de vapores en el interior de un recipiente hasta valores inferiores al límite inferior de inflamabilidad (LII). Debe insistirse en que esta aplicación carece de sentido cuando se trata de locales de trabajo en los que están presentes trabajadores. En este caso se aplican siempre los caudales adecuados para la protección de la salud. La razón de ello es evidente cuando se comparan los valores numéricos de los TLV y los LII.

El TLV del xileno es 100 ppm. El LII del xileno es 1 %, es decir, 10000 ppm. Para que una mezcla de aire y xileno sea segura contra incendios y explosiones ha de ser mantenida por debajo del 25 % del LII, es decir, 2500 ppm. La exposición a tal concentración puede causar daños severos e incluso la muerte. Sin embargo, en hornos de cocción, estufas de secado, en secaderos cerrados, en el interior de conductos de ventilación, etc., debe emplearse ventilación por dilución a fin de mantener las concentraciones por debajo del LII.

La ecuación 2.5 puede modificarse para calcular las cantidades de aire necesarias para lograr la dilución por debajo del LII. Sustituyendo el TLV por el LII:

$$Q = \frac{(24 (d) (100) (E) (Fs))}{(M) (LII) (B)} \text{ (para condiciones standard)} \quad [2.12]$$

- Notas:
1. Puesto que el LII se expresa en porcentaje (partes por 100), en lugar de en ppm (partes por millón, como el TLV), el factor 1.000.000 se convierte en 100.
  2. Fs es un factor de seguridad que depende del porcentaje del LII que debe alcanzarse para estar en condiciones de seguridad. En la mayor parte de hornos y estufas de secado se ha encontrado que un procedimiento razonable consiste en mantener una concentración inferior al 25 % del LII en todo momento y en todo punto del equipo. En los secaderos continuos adecuadamente ventilados se emplea un valor de Fs de 4 (25 % del LII). En las estufas discontinuas, con buena distribución de aire, la existencia de picos en el flujo de secado exige valores de Fs entre 10 y 12 para mantener las condiciones de seguridad en todo momento. En estufas de secado continuas o discontinuas sin recirculación o deficientemente ventiladas, pueden ser necesarios valores de Fs más elevados.
  3. B es una constante que tiene en cuenta el hecho de que el límite inferior de inflamabilidad de las mezclas de vapores en aire disminuye a temperaturas elevadas. B se toma igual a la unidad para temperaturas hasta 120 °C y 0,7 cuando la temperatura supera dicho valor.

**EJEMPLO**

Una partida de estanterías esmaltadas por inmersión es cocida en un horno con recirculación a 175 °C durante 60 minutos. El esmalte aplicado a las estanterías contiene, como sustancias volátiles, 0,95 litros de xileno. ¿Qué caudal de ventilación será necesario para diluir la concentración de vapor de xileno en el interior del horno, hasta un valor seguro en todo momento?

Para el xileno, LII = 1 %; d = 0,88; M = 106; Fs = 10; B = 0,7. De la ecuación 2.12:

$$Q = \frac{(24 (0,88) (0,95) (100) (10))}{(106) (1,0) (0,7)} = 270 \text{ m}^3/\text{h}$$

Puesto que la ecuación anterior se refiere a condiciones standard, el caudal debe convertirse desde 20 °C a 175 °C (que son las condiciones de funcionamiento):

$$Q_r = (Q_{std}) (Cociente de temperaturas absolutas)$$

$$= 270 \left( \frac{273 + 175}{273 + 20} \right) = 413 \text{ m}^3/\text{h}$$

**EJEMPLO**

En muchos casos la velocidad de evaporación de disol-

vente no es uniforme, debido a las variaciones de temperatura del proceso o a la forma en que se emplea el disolvente.

Un mezclador de 1,8 m de diámetro se emplea para mezclar arena y resina en ciclos de 10 minutos. En cada operación se utilizan 181 kg de arena, 8,61 kg de resina, y 3,8 litros de alcohol etílico (el alcohol se evapora en los dos primeros minutos). ¿Cuál es el caudal de ventilación necesario?

Para el alcohol etílico, LII = 3,28 %; d = 0,789; M = 46,07; Fs = 4; B = 1

$$Q = \frac{(24 (0,789) (114) (100) (4))}{(46,07) (3,28) (1)} = 5714 \text{ m}^3/\text{s}$$

Otra fuente de datos es la publicación número 86 del National Board of Fire Underwriter's titulada *Standard for Class A Ovens and Furnaces* (2.3). En ella se encuentra una lista más completa de disolventes y sus propiedades. Además, relaciona y describe diversos dispositivos de seguridad y enclavamientos que deben ser siempre tenidos en cuenta al considerar la ventilación por dilución para la prevención de incendios y explosiones. Véase también la referencia 2.4.

**2.6 VENTILACIÓN POR DILUCIÓN PARA LA PREVENCIÓN DE INCENDIOS EN EL CASO DE MEZCLAS**

Es práctica habitual considerar que la mezcla se compone exclusivamente del componente que requiere una mayor cantidad de aire de dilución por unidad de volumen líquido y calcular la ventilación necesaria a partir de esta hipótesis. (Este componente será el que tenga un mayor valor para la expresión [d] / [M] [LII].)

**2.7 VENTILACIÓN PARA EL CONTROL DEL AMBIENTE TÉRMICO**

Una de las aplicaciones específicas de la ventilación general es el control del ambiente térmico en ambientes industriales muy calurosos. La función primaria del sistema de ventilación es, en este caso, prevenir las molestias importantes o el posible daño de aquellas personas que trabajan en dicho tipo de ambientes. Aquellas situaciones en las que la carga térmica puede superar la capacidad de defensa del organismo, dando lugar a estrés térmico, pueden tener como consecuencia una reducción en la productividad, patologías profesionales y accidentes. En consecuencia, la introducción de cualquier sistema de ventilación, u otro método de control, debe ser precedida de una evaluación fisiológica en términos de estrés térmico potencial para los ocupantes del ambiente caluroso de que se trate.

Debido a la complejidad de una evaluación fisiológica, los criterios que se presentan aquí se limitan a consideraciones generales. Por ello se recomienda que en el proceso de



diseño de un sistema de ventilación para el control del ambiente térmico se incluya un estudio en profundidad de la publicación *NIOSH* número 86-113, "Criteria for a Recommended Standard, Occupational Exposure to Hot Environments", (2.5).

El diseño de un sistema de ventilación para ambientes laborales muy calurosos incluye usualmente el caudal de aire, su velocidad, temperatura, humedad y distribución en el espacio en cuestión. Es posible que ello exija la incorporación de elementos de refrigeración, cuyo diseño se encuentra fuera del ámbito de este manual. Los criterios de diseño apropiados para este caso pueden obtenerse de la colección de manuales publicados por la American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).

## 2.8 BALANCE TÉRMICO E INTERCAMBIO DE CALOR

Un requerimiento esencial para el mantenimiento continuado de las funciones corporales es que la temperatura interna del cuerpo se encuentre dentro de un margen de un grado alrededor de 37 °C. Para ello es necesario mantener un intercambio térmico constante entre el cuerpo y el ambiente. La magnitud y la velocidad de dicho intercambio se rigen por las leyes fundamentales de la termodinámica del intercambio térmico entre objetos. La cantidad global de calor que debe intercambiarse es función de 1) el calor total producido por el cuerpo (calor metabólico), que puede variar entre 1 kilocaloría (kcal) por kilogramo (kg) de peso corporal por hora (1,16 vatios) en situación de reposo, hasta 5 kcal/kg de peso/hora (7 vatios) para trabajo industrial moderado; y 2) el calor recibido, en su caso, del medio ambiente. La velocidad (flujo) de calor intercambiado con el ambiente es función de la temperatura y humedad del aire, de la temperatura de la piel, de la velocidad del aire, de la evaporación del sudor, de la temperatura radiante y del tipo, cantidad y características del vestido utilizado. La pérdida de calor de origen respiratorio es generalmente muy pequeña, excepto en trabajos muy intensos en ambientes muy secos.

La ecuación básica del balance térmico es:

$$A = (M - W) \pm C \pm R - E \quad [2.13]$$

donde:

- A = acumulación de calor en el cuerpo
- (M-W) = metabolismo total - trabajo efectivo realizado
- C = intercambio por convección
- R = intercambio por radiación
- E = pérdida de calor por evaporación

Para resolver la ecuación es necesario efectuar mediciones de la producción metabólica de calor, la temperatura del aire, la presión parcial del vapor de agua en el aire, la velocidad del aire y la temperatura radiante media.

Las formas principales de intercambio térmico entre el hombre y el medio ambiente son la convección, la radiación y la evaporación. La conducción juega un papel menor en el estrés térmico industrial, salvo durante breves períodos de contacto con herramientas, máquinas, pavimentos, etc., muy calientes, que pueden causar quemaduras.

Las ecuaciones para el cálculo del intercambio térmico por convección, radiación y evaporación están disponibles en unidades del Sistema Internacional (SI), unidades métricas y unidades inglesas. En unidades SI el intercambio térmico se expresa en vatios por metro cuadrado de superficie corporal ( $W/m^2$ ). Se dispone de ecuaciones de intercambio térmico, tanto en unidades métricas como inglesas, para individuos semidesnudos así como para trabajadores con ropa de trabajo convencional (pantalones y camisa de trabajo de manga larga). Los valores se dan en kcal/h o en unidades térmicas británicas por hora (Btu/h) referidas al "trabajador standard" como aquel que pesa 70 kg y cuya superficie corporal es de 1,8 m<sup>2</sup>.

**2.8.1 Convección:** El flujo de intercambio térmico por convección entre la piel de una persona y el aire ambiente inmediatamente en contacto con ella es función de la diferencia entre la temperatura del aire ( $t_a$ ) y la temperatura media ponderada de la piel ( $t_p$ ), y de la velocidad del aire en contacto con la piel ( $V_a$ ). Para el "trabajador standard" con ropa habitual de trabajo, esta relación se expresa:

$$C = 7 V_a^{0.6} (t_a - t_p) \quad [2.14]$$

donde:

- C = calor intercambiado por convección, kcal/h
- $V_a$  = velocidad del aire, m/s
- $t_a$  = temperatura del aire, °C
- $t_p$  = temperatura media ponderada de la piel, usualmente tomada como 35 °C

Cuando  $t_a > 35$  °C el cuerpo recibirá del aire calor por convección; inversamente, cuando  $t_a < 35$  °C el cuerpo perderá calor por convección.

**2.8.2 Radiación:** El flujo de intercambio térmico por radiación entre la piel de una persona y una fuente de calor radiante es función de la cuarta potencia de la diferencia de temperatura absoluta entre la fuente y la piel,  $(T_{rm} - T_p)^4$  aunque una aproximación aceptable cuando se usa la ropa habitual de trabajo viene dada por:

$$R = 6,8 (t_{rm} - t_p) \quad [2.15]$$

donde:

- R = calor intercambiado por radiación, kcal/h
- $t_{rm}$  = temperatura radiante media, °C
- $t_p$  = temperatura media ponderada de la piel

**2.8.3 Evaporación:** La evaporación de agua (sudor) desde la superficie de la piel representa, para el cuerpo, una pérdida de calor. La capacidad máxima de evaporación (y de pérdida de calor) es función del movimiento del aire ( $V_a$ )

y de la diferencia entre la presión parcial del vapor de agua en el aire ( $p_a$ ) y la presión de vapor del agua a la temperatura de la piel ( $p_p$ ). Para personas con la ropa habitual de trabajo, la ecuación que relaciona estas variables es la siguiente:

$$E = 14,4 V_a^{0,6} (p_p - p_a) \quad [2.16]$$

donde:

- E = calor perdido por evaporación
- $V_a$  = velocidad del aire, m/s
- $p_p$  = presión de vapor del agua a la temperatura de la piel, que vale 42 mm Hg a 35 °C
- $p_a$  = presión parcial del vapor de agua en el aire, mm Hg

### 2.9 MECANISMO DE ADAPTACIÓN DEL CUERPO

El cuerpo humano sólo puede adaptarse perfectamente a las condiciones ambientales, a través de un complejo mecanismo, para un estrecho margen de aquéllas. Cuando ello ocurre no se produce acumulación de calor y se alcanza un confort óptimo. Los principales mecanismos de adaptación de que dispone el cuerpo son la circulación periférica, la sudoración y la modificación del metabolismo.

En ambientes fríos se reduce la circulación sanguínea en la piel, mientras que en ambientes cálidos la circulación periférica se incrementa. Este aumento de la circulación en la superficie de la piel se produce a costa de los órganos internos y del cerebro y, si llega a ser excesiva, puede provocar un agotamiento por calor.

La sudoración se incrementa enormemente en ambientes cálidos. Sin embargo, para que se logre un efecto refrigerante la humedad debe ser baja y/o la velocidad del aire elevada, pues dicho efecto es debido a la evaporación de la parte líquida del sudor. Una sudoración abundante disminuye el contenido salino del cuerpo de las personas no aclimatadas, por lo que, cuando debe realizarse un trabajo en ambientes extremadamente secos y calurosos, ha de proporcionarse una dieta rica en sal.

El metabolismo es prácticamente constante en ambientes térmicamente moderados. En cambio, en ambientes fríos o cálidos se produce un incremento del metabolismo. A elevadas temperaturas un aumento brusco del metabolismo indica que los mecanismos fisiológicos de regulación se encuentran próximos a su límite (ver Figura 2-4).

### 2.10 ACLIMATACIÓN

La aclimatación de las personas expuestas al calor durante periodos de tiempo prolongados es un fenómeno bien conocido. Al cabo de un periodo de unas dos semanas, la capacidad de los individuos para soportar el calor aumenta considerablemente. La aclimatación comienza con un descenso en la producción metabólica de calor, a medida que el individuo aprende a utilizar su energía de una forma más

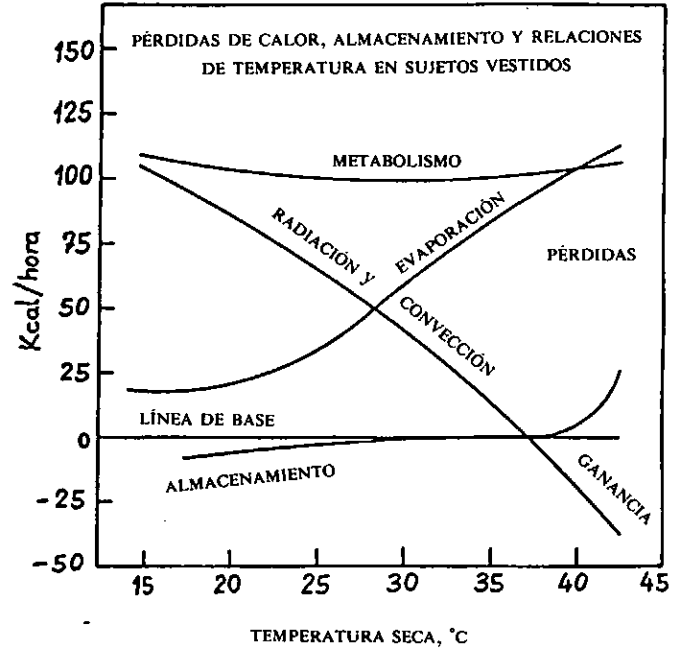


FIGURA 2-4

eficaz y a relajarse cuando la situación lo permite. Durante los primeros días se produce un aumento en la sudoración. El mecanismo de regulación se vuelve aparentemente más sensible y permite al individuo reaccionar mejor ante los cambios de las condiciones ambientales. Se incrementa el volumen sanguíneo, así como el volumen de líquido extracelular; al mismo tiempo se produce un marcado descenso en el ritmo del pulso. La concentración de sal en el sudor desciende hasta niveles en los que es virtualmente imposible que se produzca déficit salino incluso aunque el trabajo se realice en ambientes extremadamente secos y calurosos.

### 2.11 EFECTOS AGUDOS DEL CALOR

Cuando las personas se exponen a un calor excesivo se presentan diversas patologías clínicamente diferenciadas. A continuación se da una breve descripción de las mismas.

**2.11.1 Golpe de calor:** El golpe de calor incluye 1) una afección importante del sistema nervioso central (inconsciencia o convulsiones), 2) ausencia de sudoración, y 3) una temperatura rectal superior a 41 °C. El golpe de calor es una EMERGENCIA MÉDICA, y cualquier procedimiento que sirva para enfriar al paciente mejora el pronóstico. Colocar en una zona a la sombra, quitarle la ropa, humedecer la piel y aumentar el movimiento del aire a su alrededor para incrementar el enfriamiento evaporativo, son recursos que deben utilizarse urgentemente hasta que se disponga de métodos profesionales de enfriamiento y evaluación del grado de afección.

**2.11.2 Agotamiento por calor:** Es una forma benigna de patología por calor que remite rápidamente si se trata pronto. Esta patología se ha encontrado frecuentemente en evaluaciones experimentales de la tolerancia al calor. Típicamente, pero no siempre, está acompañada por un pequeño incremento de la temperatura del cuerpo (38-39 °C). Síntomas como el dolor de cabeza, náuseas, vértigo, debilidad, sed y aturdimiento son comunes al agotamiento por calor y a las primeras fases del golpe de calor.

**2.11.3 Calambres por calor:** Los calambres por calor no son extraños en individuos que realizan un trabajo duro en ambiente caluroso. Son imputables a la continua pérdida de sal a través del sudor, acompañada por una copiosa ingestión de agua sin una adecuada reposición salina. Otros electrolitos, como el magnesio, el calcio y el potasio podrían estar también implicados en el fenómeno. Los calambres se presentan a menudo en los músculos más usados en el trabajo, y pueden aliviarse rápidamente mediante descanso, ingestión de agua y la corrección de los desequilibrios del balance salino.

**2.11.4 Erupción por calor:** La erupción por calor (miliaria rubia), se presenta en forma de pápulas rojas, usualmente en áreas de la piel normalmente cubiertas por las ropas, y produce una sensación de picazón, especialmente cuando se incrementa la sudoración. Se produce en piel permanentemente cubierta de sudor sin evaporar, aparentemente porque las capas queratinosas de la piel absorben agua, se inflaman y obstruyen mecánicamente los conductos sudoríparos. Las pápulas pueden infectarse si no reciben tratamiento.

## 2.12 MEDICIÓN DEL ESTRÉS TÉRMICO

La evaluación del estrés térmico se efectúa midiendo los factores climáticos y físicos del ambiente y evaluando entonces sus efectos sobre el organismo humano mediante el empleo del índice de estrés térmico apropiado. A continuación se indican cuáles son los factores ambientales de interés en el caso del estrés térmico laboral.

**2.12.1 Temperatura del aire (seca), ( $t_a$ )** – es el factor ambiental más fácil de medir. Es la temperatura del aire medida con un termómetro. Las unidades de temperatura propuestas por la Organización Internacional de Normalización (ISO) son los grados centígrados y los grados Kelvin ( $^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$ ).

**2.12.2 Temperatura húmeda natural, ( $t_{hn}$ )** – es la temperatura indicada por un termómetro cuyo sensor está recubierto por una muselina de algodón humedecida y que está expuesto al movimiento natural del aire en el punto de medida.

TABLA 2-2 Estimación de la carga de trabajo mediante el análisis de tareas

A. Posición y movimiento del cuerpo	kcal/min*	
Sentado	0,3	
De pie	0,6	
Andando	2,0-3,0	
Subida de una pendiente andando	añadir 0,8 por metro de subida	
B. Tipo de trabajo	Media kcal/min	Margen kcal/min
Trabajo manual – ligero	0,4	0,2-1,2
pesado	0,9	
Trabajo con un brazo – ligero	1,0	0,7-2,5
pesado	1,8	
Trabajo con los dos brazos – ligero	1,5	1,0-3,5
pesado	2,5	
Trabajo con el cuerpo – ligero	3,5	2,5-9,0
moderado	5,0	
pesado	7,0	
muy pesado	9,0	
C. Metabolismo basal	1,0	
D. Ejemplo de cálculo**		
Trabajo de montaje con una herramienta manual pesada		
1. De pie	0,6	
2. Trabajo con ambos brazos	3,5	
3. Metabolismo basal	1,0	
TOTAL	5,1	
	kcal/min	

\* Para un trabajador standard de 70 kg de peso y una superficie corporal de 1,8 m<sup>2</sup>.

\*\* Ejemplo de cálculo de la producción metabólica de calor de un trabajador para una evaluación inicial.

**2.12.3 Temperatura húmeda psicrométrica, ( $t_{hp}$ )** – es la temperatura indicada por el termómetro cuando alrededor de la muselina se establece una corriente forzada de aire. La  $t_{hp}$  se mide habitualmente con un psicrómetro, que consiste en dos termómetros de mercurio montados sobre un soporte. Uno de ellos se emplea para la medición de la temperatura húmeda psicrométrica, por lo que su bulbo se recubre con una muselina de algodón limpia y humedecida con agua, y el segundo mide la temperatura seca. El movimiento del aire se obtiene manualmente, haciendo girar el psicrómetro, o mecánicamente, mediante un motor.

**2.12.4 Velocidad del aire** – es la velocidad, en m/s, a la que se mueve el aire; su magnitud es importante en el intercambio térmico entre el hombre y el ambiente por su influencia en la transferencia térmica por convección y evaporación.

**2.12.5 Calor radiante** – es la carga térmica de radiación solar e infrarroja que incide sobre el cuerpo humano. Se