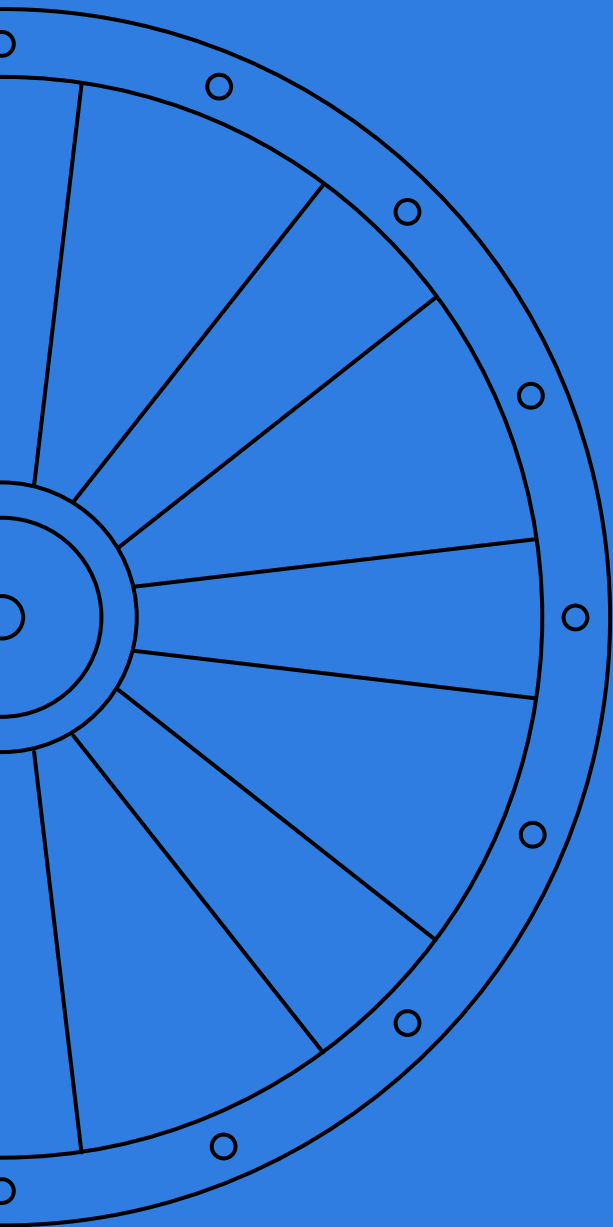
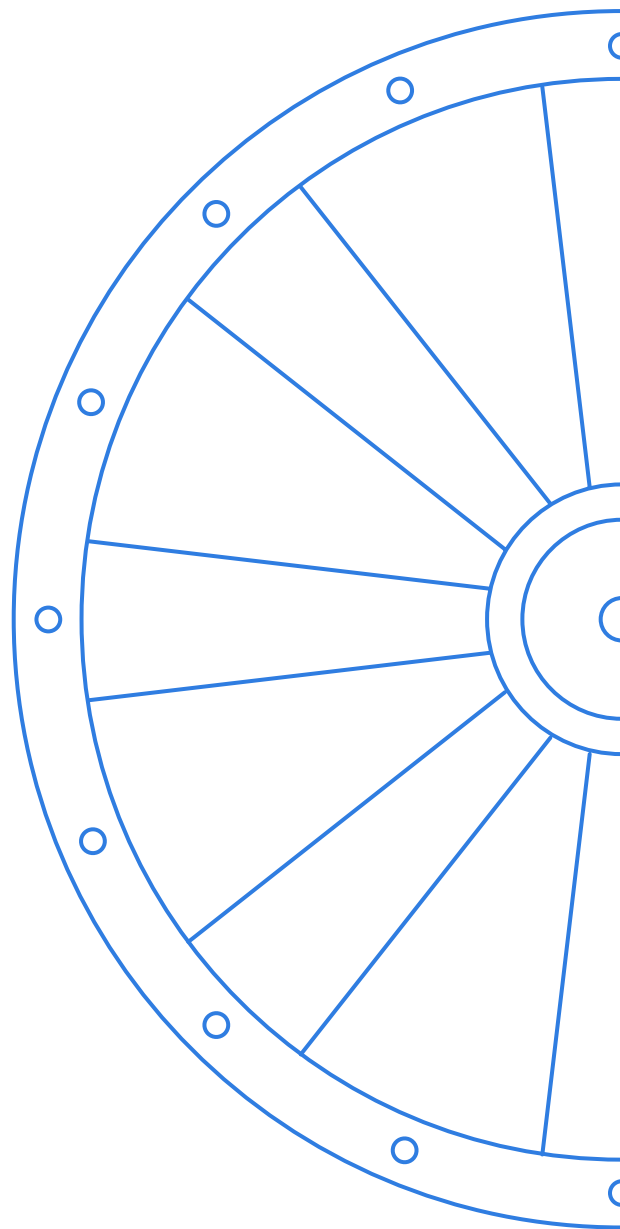


**COL·LECCIÓ**  
**BALANÇ ENERGÈTIC**  
**D'EQUIPS CONSUMIDORS**  
MESURA I CÀLCUL

# VENTILADORS

13

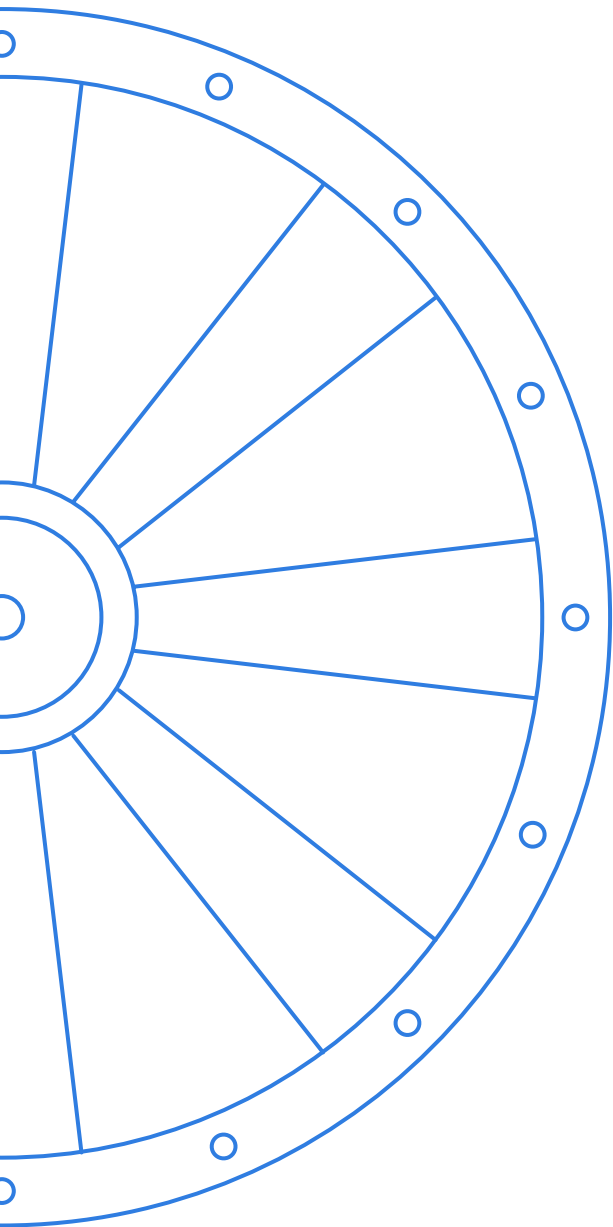




**COL·LECCIÓ**  
**BALANÇ ENERGÈTIC**  
**D'EQUIPS CONSUMIDORS**  
MESURA I CÀLCUL

# VENTILADORS

13



**Primera edició**

Desembre de 2016

**Autors**

Aquesta col·lecció ha estat redactada per la Universitat Politècnica de Catalunya. Daniel Garcia-Almiñana i Lluïsa F. Cabeza.

**Coordinació del document**

Mariona Coll - Institut Català d'Energia

**Revisor del document**

Josep M<sup>a</sup> Granollers - Institut Català d'Energia

**Disseny**

Eva Sánchez - Institut Català d'Energia

**Maquetació**

OXIGEN Comunicació gràfica

**Versió electrònica**

[icaen.gencat.cat/balancenergetic](http://icaen.gencat.cat/balancenergetic)



Aquesta obra està subjecta a una llicència Reconeixement-No Comercial-SenseObres Derivades 3.0 de Creative Commons. Se'n permet la còpia, distribució i comunicació pública sempre que se'n citi la font (Institut Català d'Energia) i l'ús concret no inclogui finalitat comercial. S'ha d'informar sobre les condicions sota les que aquest treball pot ser distribuït o comunicat. Tampoc no se'n poden fer obres derivades.

Per veure'n una còpia, visiteu:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.ca>

# Índex

<b>0</b>	<b>Pròleg</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Introducció</b>	<b>9</b>
1.1	Justificació del mòdul	9
1.2	Objectiu del mòdul	10
1.3	Abast del mòdul	10
<b>2</b>	<b>Descripció del sistema</b>	<b>10</b>
2.1	Definició	10
2.2	Principis de funcionament i paràmetres	11
2.3	Tipologies d'equip	13
2.4	Normativa aplicable	15
2.5	Descripció gràfica	17
<b>3</b>	<b>Definició del balanç energètic</b>	<b>18</b>
3.1	Descripció del balanç energètic	18
3.2	Esquema del balanç energètic	18
<b>4</b>	<b>Bases de càlcul</b>	<b>19</b>
4.1	Formulació	19
4.2	Taules i diagrames	22
<b>5</b>	<b>Planificació de mesures</b>	<b>27</b>
5.1	Dades de què es disposa	27
5.2	Dades a mesurar	27
5.3	Inventari d'aparells de mesura	27
5.4	Seguretat en persones i equips	29
<b>6</b>	<b>Realització de les mesures</b>	<b>30</b>
6.1	Mesura de la pressió i/o velocitats	30
6.2	Mesura velocitat de l'aire	31
6.3	Mesura de la potència elèctrica	31
<b>7</b>	<b>Exemple pràctic</b>	<b>32</b>
7.1	Enunciat	32
7.2	Dades	33
7.3	Càlculs i resultat	34
7.4	Comentaris	35
<b>8</b>	<b>Referències</b>	<b>36</b>



## 0. Pròleg

La Generalitat de Catalunya va aprovar el 9 d'octubre de 2012 el Pla de l'energia i canvi climàtic de Catalunya 2012-2020 (Pecac 2020), que serveix com a guia per a les polítiques energètiques i de mitigació del canvi climàtic a Catalunya. Un dels eixos principals del pla és promoure i desenvolupar projectes d'estalvi energètic i energies renovables. Les polítiques d'estalvi i eficiència energètica es configuren com un instrument de progrés de la societat, perquè contribueixen al benestar de la població, representen un element de responsabilitat social, projecten les activitats humanes cap al desenvolupament sostenible i estableixen un marc per al desenvolupament de la competitivitat empresarial.

Les auditories energètiques són una peça clau per identificar les oportunitats i potenciar les inversions en projectes d'estalvi energètic i energies renovables. Una auditoria energètica de qualitat aporta la informació necessària a un centre consumidor d'energia, ja sigui un edifici, una indústria o una flota de transport, per tal d'establir un full de ruta amb una estratègia de millora contínua del seu consum energètic.

En aquest sentit, el novembre de 2012 l'Institut Català d'Energia (ICAEN) va publicar la *Guia metodològica per a realitzar auditories energètiques*, on es ressalta el seu paper clau, sempre que es facin de manera meticulosa. El factor de més pes per determinar la qualitat de l'auditoria és l'obtenció del nombre superior possible de dades mesurades al camp de treball.

Arran d'aquella guia, i de la resposta que va tenir entre els professionals, l'Icaen va detectar que calia complementar la guia amb la formació necessària per fer mesures de camp amb instruments portàtils, i posteriorment conèixer el balanç energètic dels sistemes en estudi. També calia dotar els destinataris d'un cert criteri en la interpretació dels valors obtinguts en les mesures amb els instruments portàtils.

D'aquí neix aquesta publicació, pensada com una col·lecció de mòduls amb una estructura similar. En primer lloc, es justifica l'elecció d'aquell equip i la seva importància en l'àmbit macroeconòmic. Després es descriu i delimita el sistema objecte del balanç energètic i la normativa que se li aplica. A partir d'aquí, es defineix el balanç energètic i tots els càlculs necessaris, fórmula a fórmula, amb les taules i diagrames de bibliografia que calguin. Finalment, es detalla la planificació de les mesures, les característiques dels instruments mesuradors i les mesures mateixes, pas a pas. Per últim, s'inclou l'aplicació de la metodologia del mòdul a un cas concret o dos, i es comenta la fiabilitat dels resultats obtinguts.

Val a dir que aquest càlcul és necessari en l'avaluació o diagnòstic que es porta a terme en una auditoria, però també pot formar part del protocol de manteniment d'una instal·lació, i per tant aquestes mesures de camp poden caldre amb certa periodicitat. És per això que aquesta col·lecció s'adreça tant als professionals del sector de la consultoria energètica com als responsables energètics dels centres consumidors d'energia.

El mòdul que ara esteu consultant és el tretzè d'aquesta col·lecció, que pren com a sistema d'estudi el ventilador. El balanç energètic calcula el rendiment del ventilador i contrasta l'alçada manomètrica que guanya el cabal de fluid que impulsa el ventilador amb l'electricitat que consumeix.



# 1. Introducció

## 1.1. Justificació del mòdul

A la majoria d'instal·lacions que utilitzen fluids gasosos se'n fa necessari el transport a través de conductes cap a punts d'utilització diferents als de la seva captació. Sovint quan la circulació de fluids gasosos de forma natural no és suficient, es fa evident la necessitat de sistemes de circulació forçada que proporcionin al fluid l'energia suficient per vèncer les resistències de fregament o canvis de secció bruscos als conductes per tal de garantir que arribi al punt d'utilització amb la velocitat i pressió requerides.

Els equips que possibiliten la circulació forçada de fluids gasosos són bàsicament els ventiladors i els compressors. Tot i que els dos dispositius permeten aquesta circulació forçada, es tracten en mòduls diferents, ja que hi ha certes diferències en el seu funcionament. En general, l'objectiu principal dels ventiladors és generar un flux continu a baixes pressions. D'altra banda, l'objectiu dels compressors és produir grans increments de pressió dels fluids gasosos per tal d'aprofitar-ne l'energia o per aconseguir un nivell de pressió determinat.

En aquest mòdul es tracten els ventiladors i s'hi destaquen els que operen amb aire. Tal com s'ha comentat anteriorment, els ventiladors treballen a baixes pressions, per la qual cosa la pressió relativa del fluid és molt baixa respecte de la seva pressió absoluta. Això suposa que el fluid gasós es pot modelitzar com un fluid incompressible o, en altres paraules, tractar-lo com un líquid. Tot plegat significa que els ventiladors es poden tractar de manera similar a les bombes hidràuliques.

Per tant, igual que en el cas de les electrobombes centrífugues, l'eficiència energètica dels ventiladors depèn de les condicions requerides per a la instal·lació del fluid i les disponibles pel ventilador, és a dir, el punt de funcionament. D'altra banda, l'eficiència energètica en ventiladors també depèn del funcionament correcte del motor elèctric que els acciona, els mecanismes de transmissió, els mecanismes de propulsió del fluid, la forma del ventilador (perfil de les aspes) i el manteniment del ventilador.

En aquest sentit, per tant, és convenient dur a terme un balanç energètic en ventiladors per tal d'avaluar si presenten algun dels problemes relacionats amb els aspectes anteriorment esmentats, que poden ocasionar una pèrdua d'eficiència energètica i provocar un augment dels costos energètics i mediambientals.

## 1.2. Objectiu del mòdul

L'objectiu d'aquest mòdul és proporcionar una metodologia per poder dur a terme una sèrie de mesures en ventiladors i també donar unes bases de càlcul per caracteritzar-ne el balanç energètic i, amb un càlcul posterior, l'eficiència energètica.

## 1.3. Abast del mòdul

Aquest mòdul se centra bàsicament en tots els tipus de ventiladors on el fluid de treball sigui l'aire. A l'apartat 2.3 es mostren detalladament les diferents tipologies constructives de ventiladors segons la forma d'impulsar l'aire.

# 2. Descripció del sistema

## 2.1. Definició

Un ventilador es pot definir com una màquina rotativa que s'encarrega de proporcionar l'energia suficient a un fluid gasós per tal de transportar-lo a punts d'utilització diferents a la seva captació, amb l'objectiu que aquest fluid pugui complir amb una sèrie de funcions. Segons el tipus de dispositiu on opera el fluid gasós, aquestes funcions poden ser la transferència de calor, la renovació de l'aire d'un habitacle o espai determinat (naus industrials o túnels), o el transport de materials sòlids com ara la pols, cendres i materials granulars, etc.

Bàsicament s'hi poden destacar dues parts: el sistema d'accionament del ventilador, que acostuma a ser un motor elèctric, i el sistema de propulsió connectat a l'eix del motor i utilitzat per moure el fluid gasós. Aquest darrer acostuma a estar format per un rodet en el perímetre del qual es distribueixen els àleps del ventilador.

Altres parts dels ventiladors que es poden destacar són: la carcassa per protegir-lo contra els cops, la reixa de protecció per protegir les persones del contacte directe amb l'aparell i altres elements mecànics (arbres de transmissió, rodaments i coixinets), i elements de regulació i control per garantir la seguretat i el funcionament correcte de la màquina.

Cal dir que els ventiladors són un element molt freqüent a la indústria i altres sectors, ja que satisfan moltes necessitats com la ventilació, l'assecatge, la refrigeració d'espais i màquines, el moviment de partícules sòlides, etc.

Els més utilitzats són els que operen amb aire.

## 2.2. Principis de funcionament i paràmetres

El funcionament d'un ventilador és força senzill. En primer lloc, l'energia elèctrica proporcionada al motor fa que aquest posi en marxa l'eix, que està connectat al centre del rodet del ventilador, el qual gira solidàriament. Gràcies a aquest fet es produeix l'aspiració d'aire cap als àleps del rodet.

Un cop l'aire circula a través dels àleps, per l'efecte del seu moviment, augmenta lleugerament la pressió, es posa en moviment i genera un flux continu d'aire amb una certa velocitat.

Finalment i segons la instal·lació on opera el ventilador, aquest flux d'aire es canalitza a través de conductes fins al lloc d'utilització. En altres tipus d'instal·lacions, l'aire circula lliurement per un determinat espai.

Com ja s'ha dit, l'eficiència energètica dels ventiladors depèn del seu punt de funcionament, és a dir, del cabal d'aire en què la pressió que exerceix el ventilador és igual a la pressió requerida per la instal·lació on opera. Per tant, s'haurà d'analitzar el ventilador i la instal·lació.

Per a l'anàlisi del ventilador, els fabricants en proporcionen les corbes característiques com la corba de pressió total disponible, la pressió estàtica i dinàmica, el rendiment i la potència consumida, tot envers el cabal.

Pel que fa a l'anàlisi de la instal·lació, se n'ha de calcular la corba característica. Un cop calculada, el punt de funcionament és aquell en què la corba del ventilador i la corba de la instal·lació presenten el mateix valor pel que fa a pressió total. A la Figura 13.1 es mostren les corbes característiques d'un ventilador genèric i a la Figura 13.2 es mostra una avaluació qualitativa del punt de funcionament d'un ventilador.

Un cop es coneixen els principis de funcionament dels ventiladors i els paràmetres que influeixen en la seva eficiència s'han de caracteritzar els paràmetres necessaris per calcular-la. Aquests paràmetres són l'alçada manomètrica que proporciona l'aparell, el cabal i la densitat de l'aire, l'acceleració de la gravetat i la potència elèctrica subministrada al ventilador.

Cal dir que per al càlcul de l'alçada manomètrica s'ha de dur a terme un balanç energètic a la instal·lació on opera el ventilador mitjançant l'equació de l'energia de Bernoulli. Per tant, es necessiten els paràmetres que hi intervenen com són les pressions i les velocitats en l'aspiració i el subministrament del fluid, i els coeficients referents a les pèrdues de càrrega.

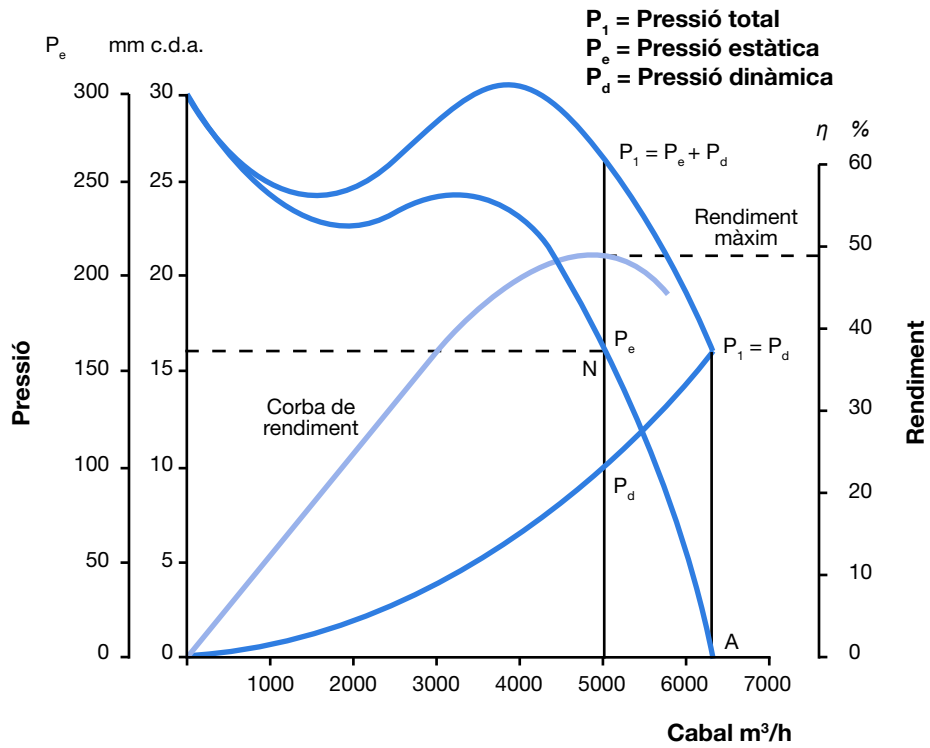


Figura 13.1. Corba característica d'un ventilador genèric on s'observa el punt de màxim rendiment.

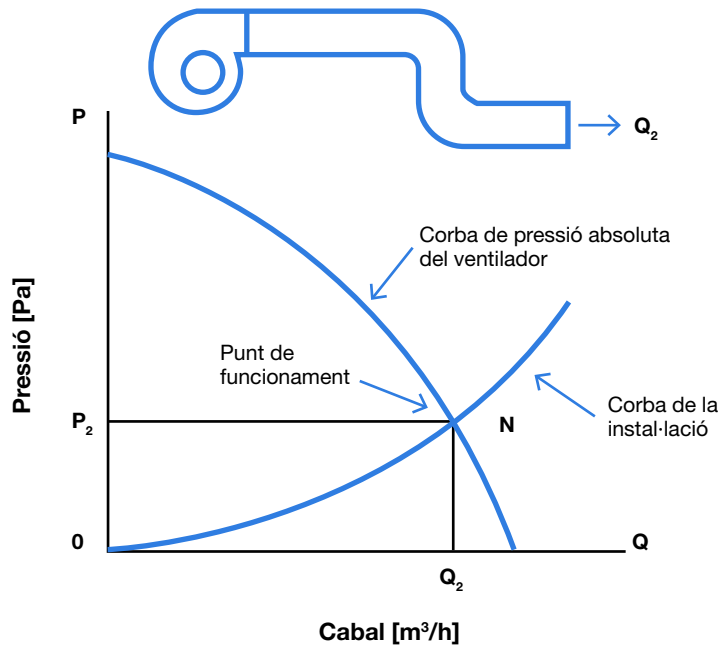


Figura 13.2. Avaluació qualitativa del punt de funcionament d'un ventilador.

## 2.3. Tipologies d'equip

Tal com s'ha referenciat a l'apartat 1.3, els ventiladors es poden classificar segons la forma d'impulsar l'aire. D'acord amb aquesta divisió, hi ha els ventiladors axials, els centrífugs i els especials.

### Ventiladors axials

En aquest tipus de ventiladors l'aire segueix una trajectòria en la mateixa direcció que l'eix del motor. N'existeixen diversos subtipus segons la tipologia constructiva del rodet. A continuació se'n referencien alguns:

**Ventilador axial helicoïdal.** S'utilitzen fonamentalment per moure grans cabals d'aire a baixes pressions. Són de baix rendiment energètic i la transferència d'energia al fluid es produeix majoritàriament en forma de pressió dinàmica, és a dir, conseqüència de la velocitat del fluid. Sobretot es fan servir en aplicacions de circulació, extracció i renovació d'aire per climatitzar i acostumen a estar instal·lats a parets o sostres.

**Ventilador axial tubular.** Estan formats per una sèrie d'àleps amb una espessor molt petita i situats al llarg del perímetre del rodet. Amb aquests ventiladors s'aconsegueix una pressió estàtica del fluid més elevada. Rendeixen més que els helicoïdals i són molt idonis per col·locar en conductes. Bàsicament s'utilitzen en calefacció, ventilació, aire condicionat i també en algunes instal·lacions industrials, com són forns d'assecatge o cabines de pintura, i l'extracció localitzada de fums.

**Ventilador axial tubular de paletes directrius.** Aquest són molt similars als anteriors. L'única diferència és que en el perímetre del rodet es distribueix un gran nombre d'àleps fixos o mòbils i, per tant, s'aconsegueixen pressions més elevades amb rendiments energètics més grans. Tenen aplicacions similars a les dels ventiladors tubulars, però proporcionen un flux més uniforme, amb la possibilitat d'obtenir més pressió del fluid.

### Ventiladors centrífugs

En aquest tipus de ventiladors l'aire entra al rodet descrivint una trajectòria axial i surt seguint-ne una de perpendicular a l'eix del motor que acciona el ventilador, a més a més tenen un nivell sonor més baix que els axials. Els ventiladors centrífugs es poden classificar segons la tipologia constructiva de les pales o àleps del rodet de la següent manera:

**Ventilador centrífug d'àleps portants.** És un ventilador centrífug on els àleps tenen un perfil aerodinàmic i estan inclinats cap endarrere. Gràcies a la tipologia constructiva dels àleps, es minimitzen les pèrdues de càrrega produïdes a l'interior del ventilador i és per això que proporciona un gran rendiment. A més a més, acostuma a ser autolimitant de potència.

Aquests ventiladors s'utilitzen fonamentalment en sistemes de climatització (HVAC) i en aplicacions industrials amb aire net.

**Ventilador centrífug d'àleps inclinats cap endavant.** En aquest cas els àleps estan inclinats cap endavant. És apte per a cabals grans a baixes pressions, no és autolimitant de potència i proporciona menys rendiment que la tipologia anterior.

S'utilitza fonamentalment en instal·lacions de ventilació, calefacció i condicionament d'aire a baixa pressió, com ara forns domèstics i unitats compactes d'aire condicionat.

**Ventilador centrífug d'àleps inclinats cap endarrere.** Aquest ventilador disposa dels àleps inclinats cap endarrere i pot girar a altes velocitats, de manera que aconsegueix rendiments més elevats respecte als aparells d'àleps inclinats cap endavant. A més, és autolimitant de potència.

Tenen les mateixes aplicacions que els ventiladors d'àleps portants, però també es poden utilitzar en aplicacions industrials on l'ambient és corrosiu i/o abrasiu.

**Ventiladors radials.** Els àleps d'aquests ventiladors distribueixen de manera radial amb un origen comú al centre del rodet. Aquest tipus d'aparell es caracteritza per una alta resistència mecànica i per la facilitat de muntatge o desmuntatge, per la qual cosa és de fàcil manteniment. N'hi ha alguns dissenys que permeten l'autoneteja. A més a més, poden augmentar progressivament la seva potència amb el cabal.

S'utilitzen bàsicament en instal·lacions industrials de manipulació de materials.

### **Ventiladors especials**

En aquest àmbit s'han de destacar els **ventiladors helicocentrífugs** en els quals la direcció del flux d'aire segueix una trajectòria mixta entre la que proporciona un ventilador axial i la que proporciona un ventilador centrífug.

Altres ventiladors especials són els **ventiladors tangencials** en els quals la trajectòria del flux d'aire és normal a l'eix del motor.

Finalment, cal dir que els ventiladors es poden classificar de moltes maneres diferents a la mostrada anteriorment i, entre d'altres, es poden tenir en compte les característiques següents:

El tipus de carcassa.

El rang de pressió que ofereix.

Les condicions d'ús.

Els automatismes de regulació i control que incorporen.

El sistema d'accionament del rodet.

## 2.4. Normativa aplicable

La normativa aplicable en aquest mòdul bàsicament és el Reglament d'instal·lacions tèrmiques als edificis (RITE) [1] de setembre de 2013, que és l'última actualització, ja que des de 2007 hi ha hagut modificacions el 2009 i 2010. I també aplica el Reial decret 187/2011 [2], corresponent a la transposició espanyola de la Directiva d'ecodisseny 2009/125/CE [3].

A la IT.1 d'aquest reglament, concretament a l'apartat IT.1.2.4.2.5. *Eficiència energètica para los equipos de transporte de fluidos*, s'estableix que la selecció dels equips d'impulsió s'ha de dur a terme de manera que el seu rendiment sigui com més alt millor, en les condicions calculades sobre el funcionament real de la instal·lació. I si els equips són de cabal variable, les condicions anteriors seran les condicions mitjanes.

Al mateix apartat també s'especifica que s'ha de justificar la potència dels sistemes de transport de fluids per a cada circuit i definir-la d'acord amb el cabal d'operació del circuit. A banda, també s'estableix una classificació per categories de la potència específica absorbida per cada ventilador segons el tipus d'instal·lació en la qual opera. Aquestes categories bàsicament són:

SFP 1 i SFP 2: Sistemes de ventilació i d'extracció.

SFP 3 i SFP 4: Sistemes de climatització, segons la complexitat.

A la Taula 13.1 es mostra la potència específica absorbida per cada ventilador a partir de les categories anteriors. Com es pot comprovar a la Taula 13.1, hi ha una categoria més (SFP 5) la qual no està definida al RITE.

Categories	Potència específica dels ventiladors [W/(m <sup>3</sup> /s)]
SFP 1	$W_{\text{esp}} \leq 500$
SFP 2	$500 < W_{\text{esp}} \leq 750$
SFP 3	$750 < W_{\text{esp}} \leq 1250$
SFP 4	$1250 < W_{\text{esp}} \leq 2000$
SFP 5	$W_{\text{esp}} > 2000$

Taula 13.1. Potència específica absorbida per cada ventilador segons la categoria de la instal·lació on operen.

A més a més, els ventiladors han de complir la Directiva Ecodesign 2009/125/EC (ErP Directive) que estableix els requisits obligatoris d'ecodisseny a partir del 26 de setembre de 2015. Aquesta directiva no estableix condicionants obligatoris, sinó que es fa a través de la implementació de reglaments específics per a cada grup, anomenats Lots (LOT).

Els esquemes següents mostren la reglamentació i els àmbits d'aplicació.

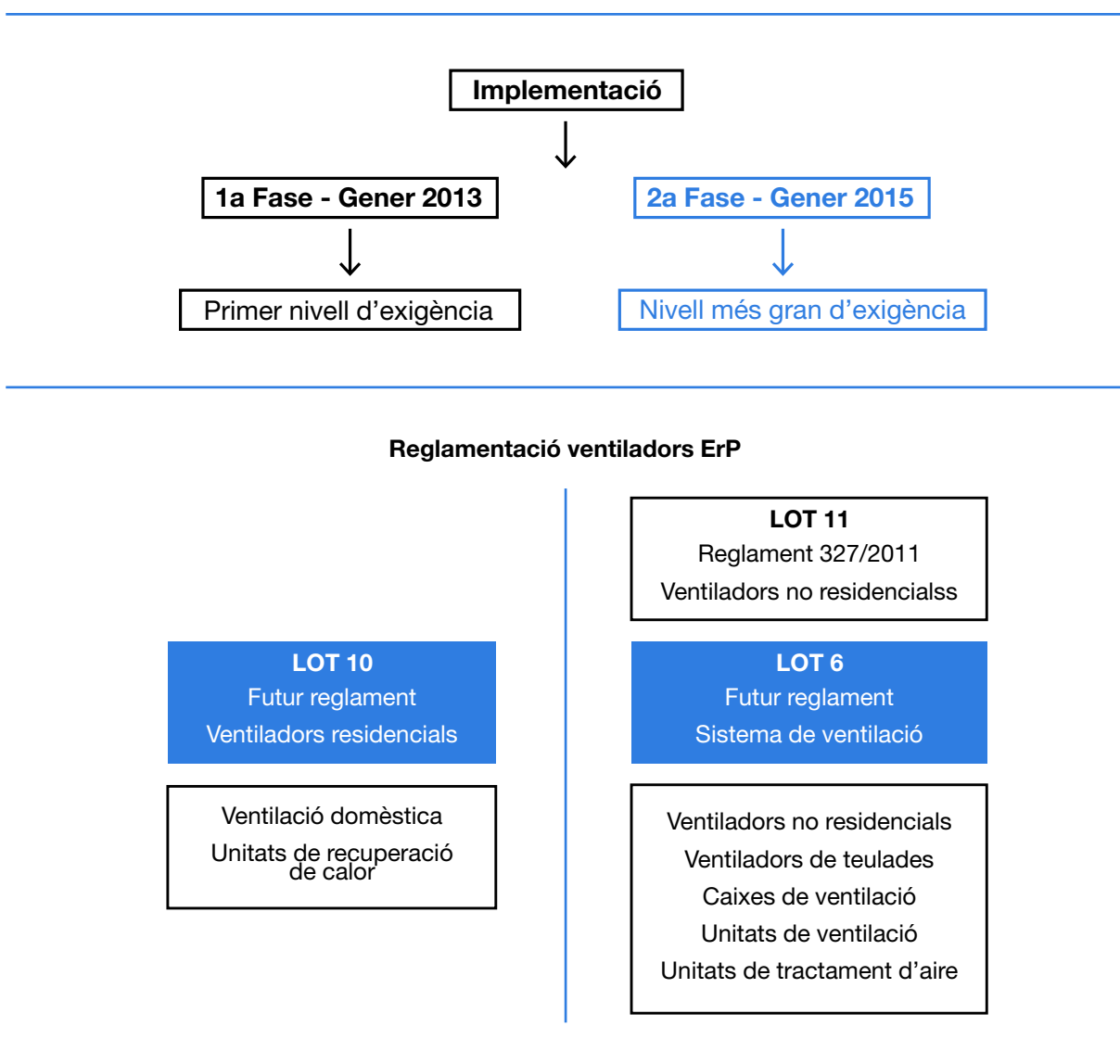


Figura 13.3. Reglamentació i àmbits d'aplicació de la Directiva Ecodesign

En el cas del Reial decret 187/2011, aquest és d'aplicació als productes relacionats amb l'energia (ErP), ja sigui per al consum directe d'energia com pel fet d'afectar el consum d'altres aparells. Aquesta normativa es materialitza en reglaments específics per a cada família de productes, que fixen els requeriments d'ecodisseny mínims que els productes han de complir per poder disposar del marcat CE.



## 2.5. Descripció gràfica

Des de la Figura 13.4 a la Figura 13.11 es mostren algunes de les tipologies de ventiladors esmentades a l'apartat 2.3.



Figura 13.4.  
Ventilador axial.



Figura 13.5.  
Ventilador centrífug.



Figura 13.6.  
Ventilador axial  
helicoidal per a  
muntatge en paret.



Figura 13.7.  
Ventilador axial per a  
funda tubular.

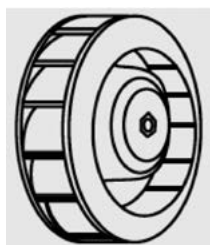


Figura 13.8.  
Esquema d'un rodets  
d'un ventilador centrífug  
amb els àleps inclinats  
cap endarrere.

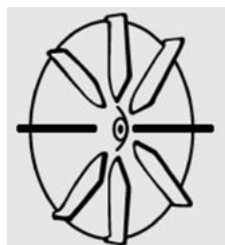


Figura 13.9.  
Esquema d'un rodets  
d'un ventilador centrífug  
radial.

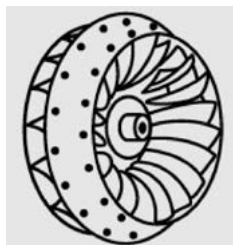


Figura 13.10.  
Esquema d'un rodets  
d'un ventilador  
helicocentrífug

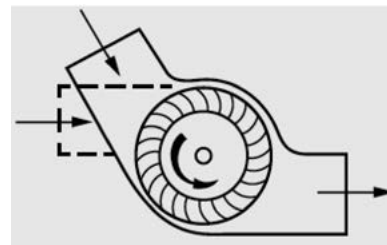


Figura 13.11.  
Esquema d'un rodets  
d'un ventilador tangencial.

## 3. Definició del balanç energètic

### 3.1. Descripció del balanç energètic

Tal com s'ha comentat a l'apartat 2.2, per tal de poder caracteritzar l'alçada manomètrica que proporciona el ventilador i, en un càlcul posterior, la seva potència pneumàtica, s'ha d'executar un balanç energètic segons l'equació de Bernoulli de l'energia d'un fluid (en aquest cas, aire). Com en tot balanç energètic, s'han de caracteritzar les entrades i sortides que es tenen al sistema en estudi, en aquest cas la instal·lació on opera el ventilador.

En aquest sistema, doncs, les entrades són l'alçada manomètrica del fluid en l'aspiració i l'alçada manomètrica proporcionada pel ventilador. D'altra banda, es tenen com a sortides l'alçada manomètrica del fluid al subministrament i les pèrdues de càrrega que aquest pugui presentar en la circulació pels conductes.

Finalment cal aclarir que la potència elèctrica subministrada al ventilador es té en compte en el càlcul final del rendiment, però no com a flux d'entrada en el balanç energètic de la instal·lació.

### 3.2. Esquema del balanç energètic

A l'Equació 13.1 es mostra la relació entre els fluxos d'entrada i els fluxos de sortida en una instal·lació genèrica de transport de fluids gasosos mitjançant ventiladors, i a la Figura 13.12 es mostra l'esquema del balanç energètic.

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + H_v = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_{1-2} \quad \text{Equació 13.1}$$

On:

El subíndex 1 correspon a l'aspiració del fluid de treball en la instal·lació.

El subíndex 2 correspon a la impulsió del fluid de treball en la instal·lació.

$z_i$  [m] correspon al nivell d'alçada geomètrica en el punt indicat pel subíndex<sup>1</sup>.

$P_i$  [bar] correspon a la pressió relativa del fluid de treball en el punt indicat pel subíndex.

$\gamma$  [N/m<sup>3</sup>] correspon al pes específic del fluid de treball del ventilador<sup>2</sup>.

$v_i$  [m/s] correspon a la velocitat del fluid de treball en el punt indicat pel subíndex.

$g$  [m/s<sup>2</sup>] correspon a l'acceleració de la gravetat.

$H_v$  [m.c.a] correspon a l'alçada manomètrica proporcionada pel ventilador.

$h_{1-2}$  [m.c.a] correspon a les pèrdues de càrrega lineals i singulars en els conductes de la instal·lació.

<sup>1</sup> En la majoria de casos aquesta variable és nul·la ja que normalment l'aspiració del fluid de treball i el subministrament es troben a la mateixa alçada.

<sup>2</sup>  $\gamma$  es calcula així:  $\gamma = g \cdot \rho$ , on  $\rho$  és la densitat del fluid de treball a la instal·lació.

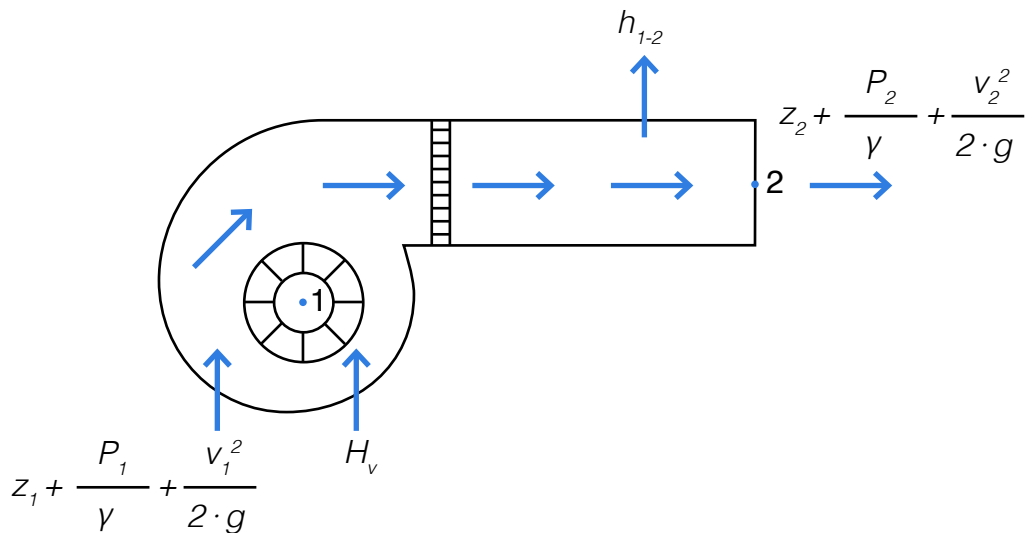


Figura 13.12. Esquema del balanç energètic en instal·lacions de transport de fluids gasosos mitjançant ventiladors.

## 4. Bases de càlcul

### 4.1. Formulació

En primer lloc s'ha de calcular la potència consumida del ventilador mitjançant l'Equació 13.2:

$$P_h = \gamma \cdot \dot{V}_v \cdot H_v \quad \text{Equació 13.2}$$

On:

$P_h$  [W] correspon a la potència consumida del ventilador.

$\dot{V}_v$  [m<sup>3</sup>/s] correspon al cabal volumètric del ventilador.

Pel que fa a la variable  $\dot{V}_v$ , es pot calcular mitjançant l'Equació 13.3:

On:

$$\dot{V}_v = v \cdot S \quad \text{Equació 13.3}$$

$S$  [m<sup>2</sup>] correspon a la secció de la canonada per on circula l'aire. Cal dir que la secció ha de ser la de la canonada on s'ha mesurat la velocitat que s'utilitzi a l'Equació 13.3.

La variable  $H_v$  s'ha de calcular aïllant-la de l'Equació 13.1, de manera que s'obté l'Equació 13.4.

$$H_v = (z_2 - z_1) + \left( \frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + \left( \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} \right) + h_{1-2} \quad \text{Equació 13.4}$$

En instal·lacions de transport d'aire, les variables  $z_1$  i  $z_2$  es poden anul·lar la majoria de vegades. Cal dir que les altres variables que intervenen a l'Equació 13.4, també poden ser nul·les segons el tipus d'instal·lació.

La densitat del fluid necessària per al càlcul de la variable  $\gamma$  s'ha d'avaluar a la temperatura mitjana del fluid.

Pel que fa a la variable  $h_{1-2}$ , s'ha de calcular mitjançant l'Equació 13.5:

$$h_{1-2} = h_L + h_s \quad \text{Equació 13.5}$$

On:

$h_L$  [m.c.a] correspon a les pèrdues de càrrega lineals. Calculades mitjançant l'Equació 13.6.

$h_s$  [m.c.a] correspon a les pèrdues de càrrega singulars. Calculades mitjançant l'Equació 13.7

$$h_L = J \cdot (L_1 + L_2) \quad \text{Equació 13.6}$$

On:

$J$  [m.c.a/m] correspon a les pèrdues de càrrega lineals per metre de conducte. Valor extret d'àbacs en funció del cabal del ventilador, velocitat del fluid de treball i diàmetre o diàmetre equivalent del conducte. Per l'aire, consulteu la de la Figura 13.14.

$L_1$  [m] correspon a la longitud del conducte d'aspiració.

$L_2$  [m] correspon a la longitud del conducte d'impulsió.

$$h_s = J \cdot L_{eq} \quad \text{Equació 13.7}$$

On:

$L_{eq}$  [m] correspon a la longitud equivalent dels elements singulars de la instal·lació que poden provocar una pèrdua de càrrega en l'aire. Valor extret de la Taula 13.2 en funció del tipus d'accessori i del diàmetre del conducte (conducte circulars) o l'amplada del conducte (conducte rectangulars).

Un cop determinada la potència pneumàtica del ventilador, s'ha de calcular la potència elèctrica subministrada pel motor, si no es pot mesurar directament. Per a motors monofàsics, es calcula mitjançant Equació 13.8 i per a motors trifàsics mitjançant l'Equació 13.9.

$$P_e = V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad \text{Equació 13.8}$$

On:

$P_e$  [W] correspon a la potència elèctrica subministrada al ventilador.

$V$  [V] correspon al voltatge del motor que alimenta el ventilador.

$I$  [A] correspon a la intensitat del motor que alimenta el ventilador.

$\cos\varphi$  [-] correspon al factor de potència del motor que alimenta el ventilador.

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad \text{Equació 13.9}$$

Un cop es té calculada la potència elèctrica subministrada al ventilador es pot calcular el rendiment del mateix, mitjançant l'Equació 13.10:

$$\eta_v = \frac{P_h}{P_e} \cdot 100 \quad \text{Equació 13.10}$$

On:

$\eta_v$  [%] correspon a l'eficiència energètica del ventilador.

## 4.2. Taules i diagrames

A la Figura 13.13 es mostra l'àbac necessari per calcular el diàmetre equivalent per conduccions d'aire en canonades rectangulars a partir de les dimensions de la secció.

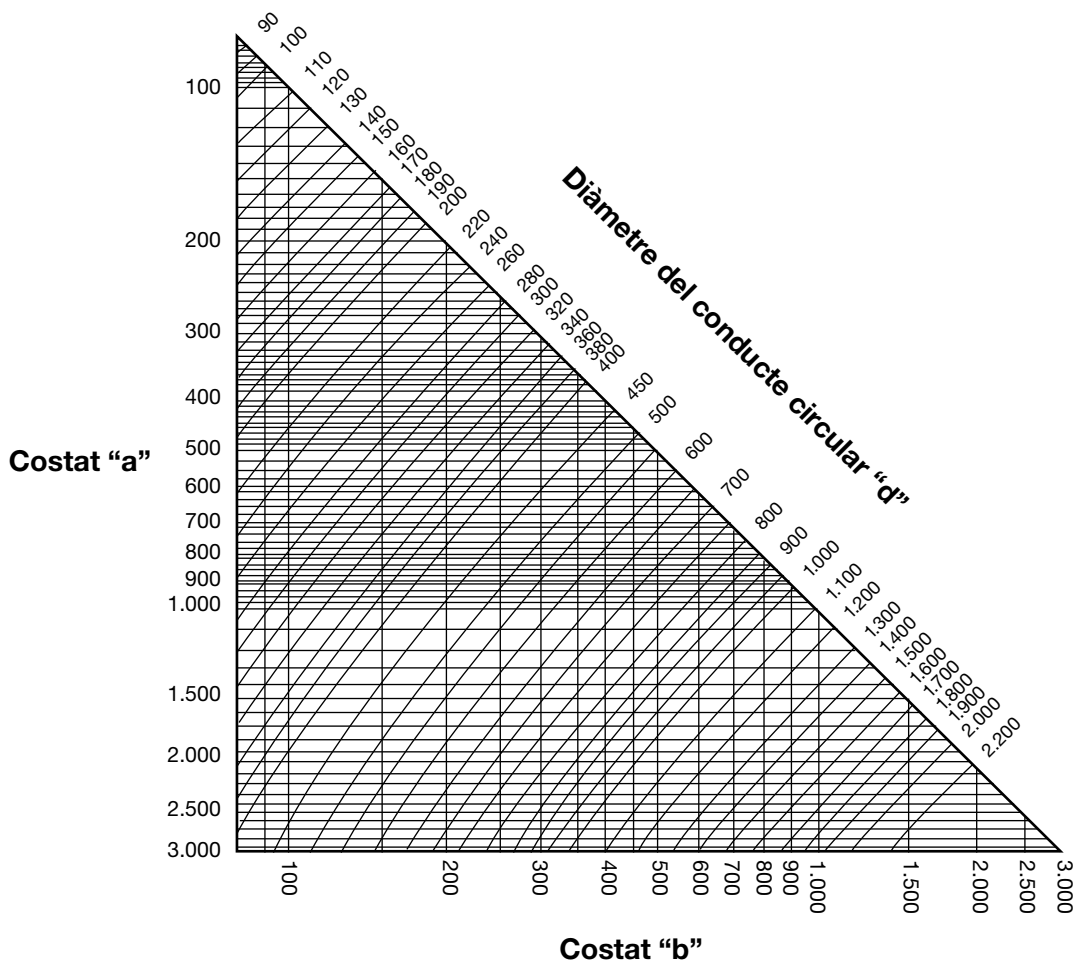


Figura 13.13. Àbac per al càlcul del diàmetre equivalent en conduccions d'aire per conductes rectangulars.

A la Figura 13.14 es mostra l'àbac per al càlcul de pèrdues de càrrega lineals per metre de conducte a conduccions d'aire.

**Pèrdua de càrrega per metre de conducte (mm c.d.a/m)**

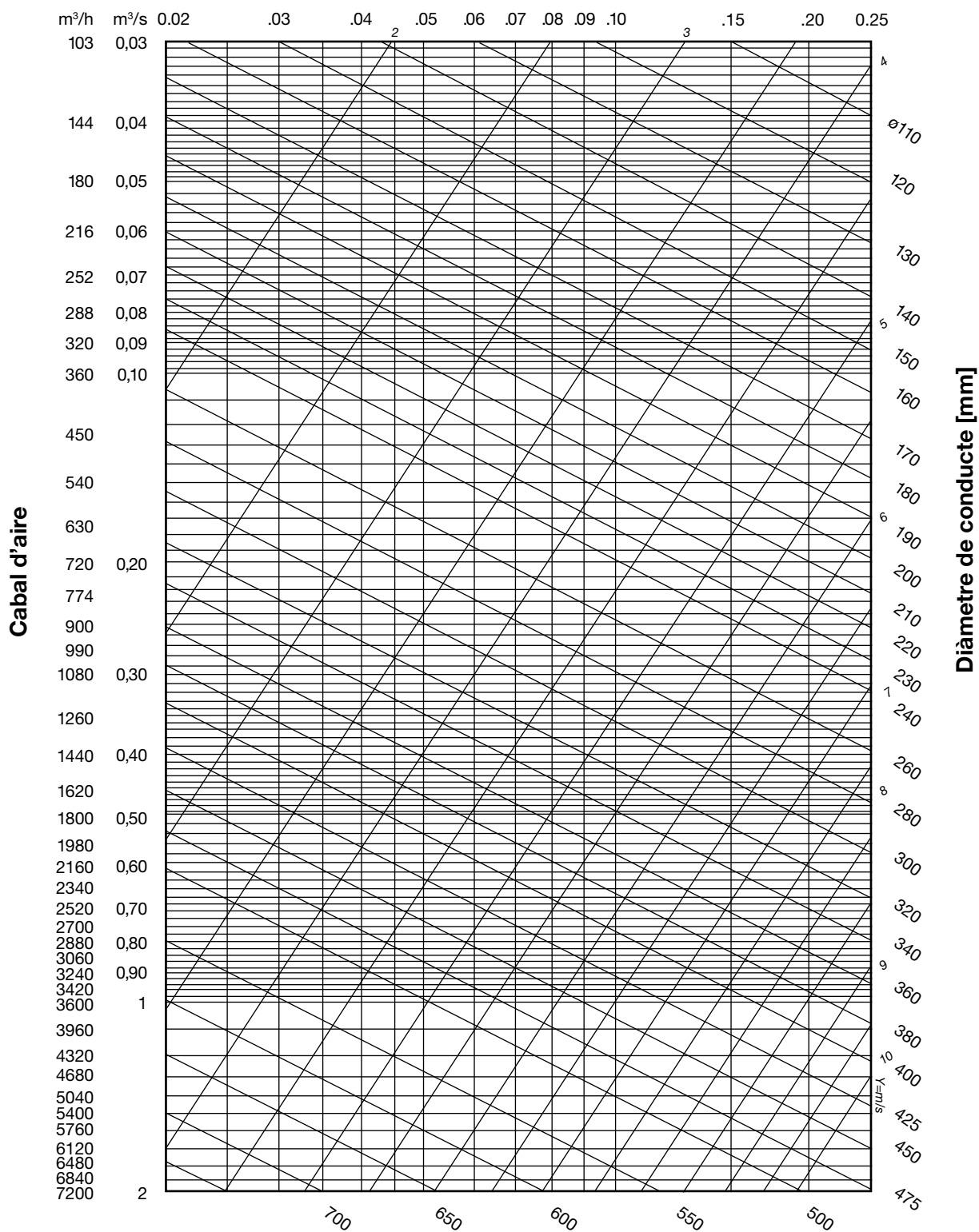


Figura 13.14. Àbac per al càlcul de les pèrdues de càrrega lineals a conduccions d'aire.

**Pèrdua de càrrega per metre de conducte (mm c.d.a/m)**

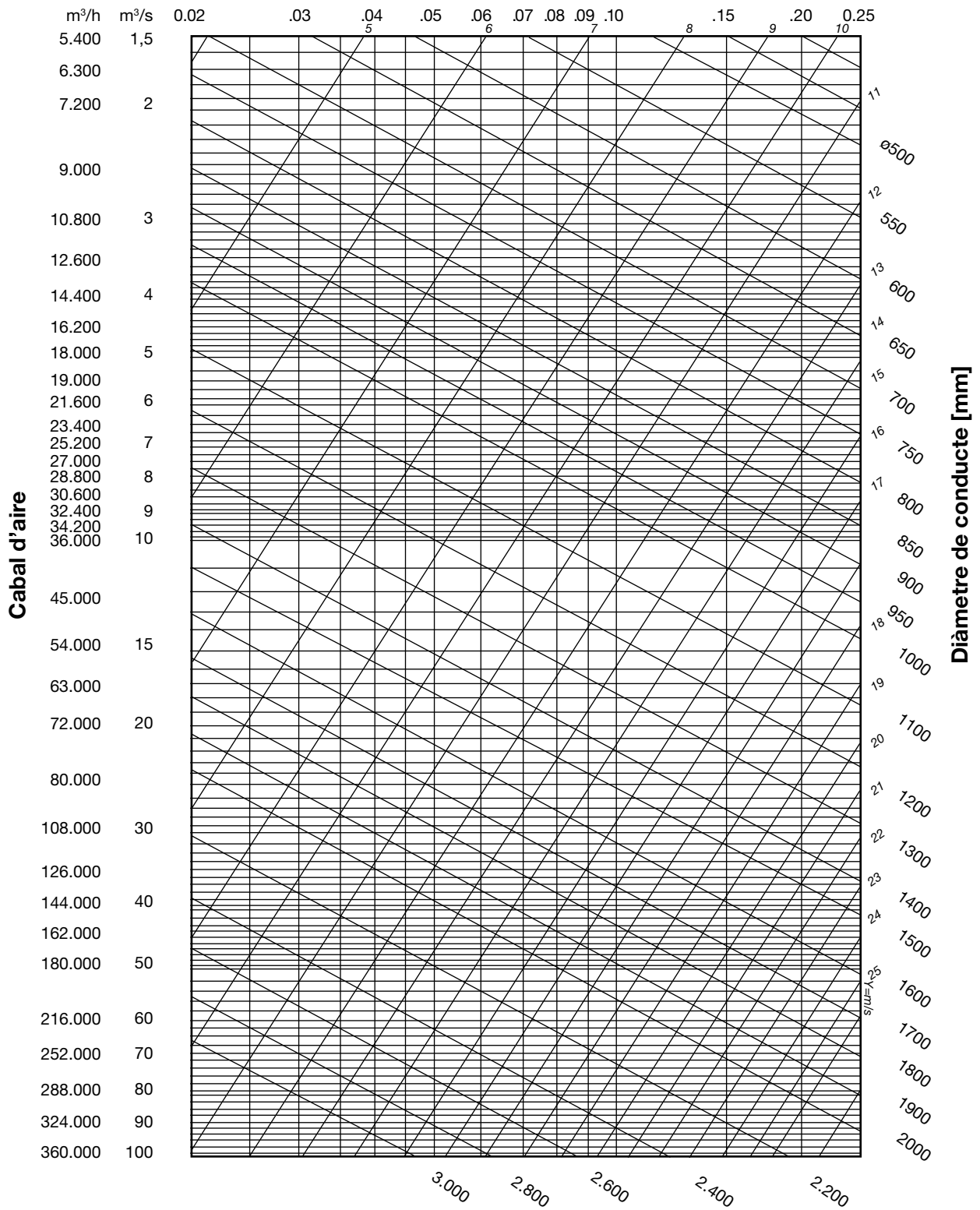
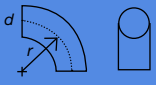
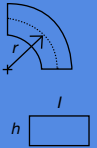


Figura 13.14. Àbac per al càlcul de les pèrdues de càrrega lineals a conduccions d'aire.

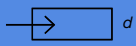


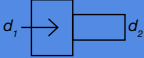
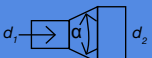


A la Taula 13.2 es mostra la longitud equivalent de diversos accessoris per al càlcul de les pèrdues de càrrega singulars que poden provocar.

Element		Diàmetre de conducte o la cota h (mm)											
		75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	
Colze de secció circular 	r=d	1,3	1,7	2,5	3,4	4,3	5,1	6	6,8	7,6	8,5	10	
	r=1,5d	0,9	1,2	1,8	2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4	6	7,2	
	r= 2d	0,7	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	
Colze conducte de secció rectangular 	l/h=0,25	r=0,5h	1,9	2,5	3,7	5	6,3	7,5	8,8	10	11	12,5	15
		r=h	0,5	0,7	1	1,4	1,7	2,1	2,5	2,8	3,2	3,5	4,2
		r=1,5h	0,3	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,4
	l/h=0,5	r=0,5h	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24
		r=h	0,6	0,9	1,4	1,8	2,2	2,7	3,2	3,6	4,1	4,5	5,4
		r=1,5h	0,3	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,4
	l/h=1	r=0,5h	3,7	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	30
		r=h	0,8	1	1,6	2,2	2,7	3,3	3,9	4,4	5	5,5	6,6
		r=1,5h	0,4	0,5	0,7	0,9	1	1,4	1,6	1,8	2	2,3	2,7
	l/h=4	r=0,5h	5	6,5	10	13	16	20	23	26	29	33	39
		r=h	1,3	1,7	2,6	3,4	4,3	5,1	6	6,8	7,7	8,5	10
		r=1,5h	0,5	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3	3,6



Taula 13.2. Longitud equivalent en metres de tram recte per al càlcul de les pèrdues de càrrega singulars.

Element		Diàmetre de conducte (mm)											
		75	100	150	200	250	300	350	400	450	500	600	
Entrades		3	4,3	7,2	10,5	13,8	17,2	20,8	24,4	28,2	32	40	
		1,6	2,4	4	5,8	7,6	9,5	11,5	13,6	15,6	17,6	22,2	
Contracció suau 	$\alpha = 60^\circ$	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,6	
	$\alpha = 45^\circ$	0,13	0,2	0,3	0,4	0,6	0,7	0,9	1	1,2	1,4	1,8	
	$\alpha = 30^\circ$	0,06	0,09	0,15	0,2	0,3	0,4	0,45	0,5	0,6	0,7	0,9	
Contracció abrupta 	$d_2/d_1=1,1$	0,3	0,4	0,8	1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,6	4,1	
	$d_2/d_1=1,4$	1	1,5	2,5	3,6	4,6	5,9	7,1	8,2	9,77	11	13,7	
	$d_2/d_1=2$	1,4	2	3,5	5	6,3	10,5	9,9	11,6	13,5	15,4	19	
Canvis de secció 	$\alpha = 60^\circ$ o major	$d_2/d_1=1,2$	0,3	0,4	0,8	1	1,5	1,9	2,3	2,7	3,1	3,6	4,1
		$d_2/d_1=1,5$	1	1,5	2,6	3,6	4,6	5,9	7,1	8,2	9,7	11	13,7
		$d_2/d_1=2$	1,8	2,6	4,5	3,2	8,2	10,5	12,6	15	17,2	19,6	24,4
	$\alpha = 45^\circ$	$d_2/d_1=1,2$	0,3	0,4	0,7	1	1,4	1,7	2	2,4	2,8	3,2	4
		$d_2/d_1=1,5$	0,8	1,1	1,9	2,6	3,7	4,6	5,5	6,5	7,6	8,6	10,6
		$d_2/d_1=2$	1,4	2	3,5	5	6,3	8,2	9,9	11,6	13,5	15,4	19
	$\alpha = 30^\circ$	$d_2/d_1=1,2$	0,16	0,23	0,4	0,6	0,8	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	2,2
		$d_2/d_1=1,5$	0,4	0,6	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,6	5,7
		$d_2/d_1=2$	0,75	1,1	1,8	2,6	3,5	4,4	5,3	6,2	7,2	8,2	10

Taula 13.2. Longitud equivalent en metres de tram recte per al càlcul de les pèrdues de càrrega singulars

## 5. Planificació de mesures

### 5.1. Dades de què es disposa

- Acceleració de la gravetat:  $g$  [ $m/s^2$ ]
- Densitat del fluid:  $\rho$  [ $kg/m^3$ ]
- Pèrdues de càrrega lineals unitàries:  $J$  [mm.c.d.a/m]
- Diàmetre del conducte d'aspiració (secció circular):  $D_1$  [m]
- Diàmetre del conducte d'impulsió (secció circular):  $D_2$  [m]
- Longitud del costat llarg del conducte d'aspiració (secció rectangular):  $a_1$  [m]
- Longitud del costat curt del conducte d'aspiració (secció rectangular):  $b_1$  [m]
- Longitud del costat llarg del conducte d'impulsió (secció rectangular):  $a_2$  [m]
- Longitud del costat curt del conducte d'impulsió (secció rectangular):  $b_2$  [m]
- Longitud del conducte d'aspiració:  $L_1$  [m]
- Longitud del conducte d'impulsió:  $L_2$  [m]
- Longitud equivalent per a les pèrdues de càrrega singulars:  $L_{eq}$  [m]

### 5.2. Dades a mesurar

- Pressió relativa del fluid en l'aspiració:  $P_1$  [Pa]
- Pressió relativa del fluid en la impulsió:  $P_2$  [Pa]
- Velocitat del fluid en l'aspiració:  $v_1$  [m/s]
- Velocitat del fluid en la impulsió:  $v_2$  [m/s]
- Potència elèctrica:  $P_e$  [W]
- Voltatge del motor que alimenta al ventilador:  $V$  [V]
- Intensitat del motor que alimenta al ventilador:  $I$  [A]
- Factor de potència del motor que alimenta al ventilador:  $\cos\phi$  [-]

### 5.3. Inventari d'aparells de mesura

- Manòmetre 1 (Figura 13.15):
  - Variable mesurada:  $P_1, P_2$

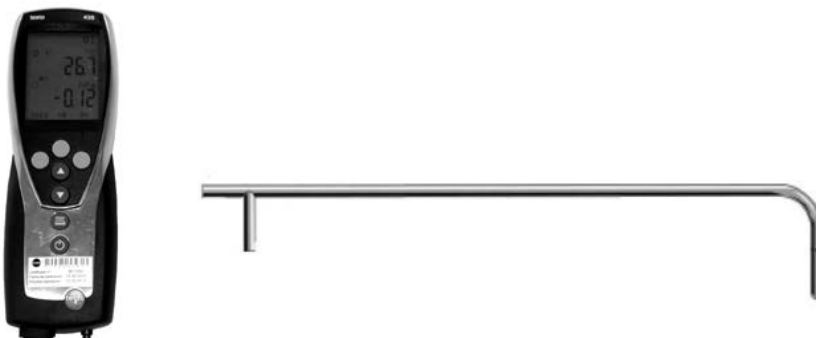


Figura 13.15. Multímetre + tub de Pitot.

- Manòmetre 2 (Figura 13.16):
  - Variable mesurada:  $P_1, P_2, v_1, v_2$

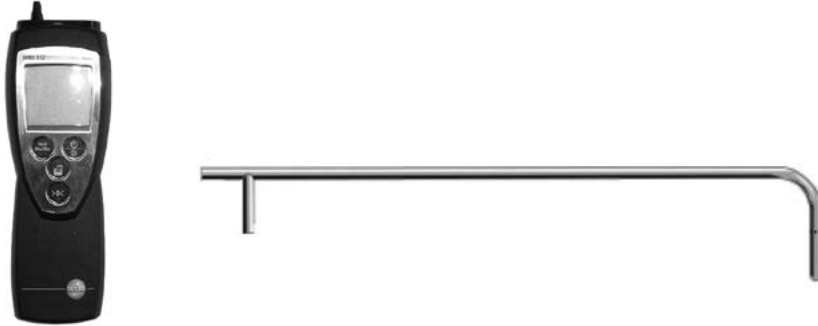


Figura 13.16. Manòmetre digital + tub de Pitot.

- Termohigròmetre (Figura 13.17):
  - Variable mesurada:  $v_1, v_2$



Figura 13.17. Multímetre + sonda tèrmica de velocitat de fil calent.

- Anemòmetre (Figura 13.18):
  - Variable mesurada:  $v_1, v_2$



Figura 13.18. Multímetre + sonda de velocitat de tipus molinet.

- Analitzador de xarxes elèctriques (Figura 13.19):
  - Variable mesurada:  $V$ ,  $I$ ,  $\cos\varphi$ ,  $P_e$ , desequilibri de fases.

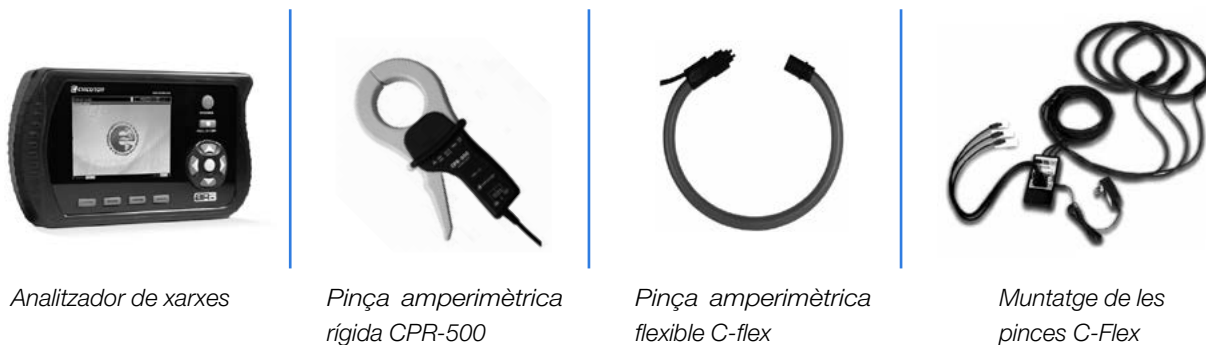


Figura 13.19. Analitzador elèctric AR6 + accessoris.

## 5.4 Seguretat en persones i equips

Abans de fer qualsevol mesura, és necessari i imprescindible llegir les instruccions d'ús de l'aparell o dispositiu de mesura.

**Seguretat per a les persones.** S'ha de tenir en compte que la mesura de  $P_1$ ,  $P_2$  és invasiva i que, per tant, s'ha de practicar una obertura a les canonades on l'aire circula a pressió i nivell tèrmic determinats. Si es té això en compte, és aconsellable portar guants de protecció tèrmica i mantenir certa distància de seguretat respecte de l'obertura practicada al conducte.

Per a la mesura de les variables  $v_1$  i  $v_2$ , s'ha de tenir certa prudència i mantenir una distància suficient per evitar ràfegues d'aire calent o fred.

En la mesura de les variables  $P_e$ ,  $V$ ,  $I$ ,  $\cos\varphi$ , i altres paràmetres elèctrics, s'ha de tenir present que es duu a terme sobre xarxes elèctriques en funcionament i, com a tal, la mesura ha de ser realitzada per un tècnic expert amb carnet d'electricista, que no treballi mai sol, que disposi d'elements de protecció (guants i calçat aïllant), que utilitzi eines normalitzades, que hagi fet un curs de seguretat industrial per tal de tenir recursos preventius i que conegui el pla específic de riscos laborals de l'empresa.

**Seguretat en equips.** És aconsellable no tractar de manera brusca el multímetre, el manòmetre digital, així com el tub de Pitot. Feu les mesures tenint en compte certes distàncies de seguretat amb els elements mòbils.

## 6. Realització de les mesures

### 6.1. Mesura de la pressió i/o velocitats.

1. S'ha de seleccionar del menú de la configuració l'opció *Parametres* i s'ha de configurar el factor del tub de Pitot a l'opció *P-factor*. El valor del factor del tub de Pitot es pot considerar de l'1 per als tubs amb angle i de 0,67 per als tubs de Pitot rectes.
2. S'ha d'apagar l'aparell i connectar els tubs de silicona als tubs de connexió de pressió de la part inferior de multímetre representats amb el signe "+" i "-".
3. S'han de connectar els mateixos tubs de silicona al tub de Pitot respectant el signes, tal com es mostra a la Figura 13.20.
4. S'ha de fer un forat als conductes d'aspiració i impulsió i col·locar-hi el tub de Pitot, tal com es mostra a la Figura 13.21.
5. Automàticament ja es veurà la mesura. S'aconsella prendre'n unes quantes i fer-ne una mitjana. Per defecte la pressió, es veurà en hPa.



Figura 13.20. Connexió dels tubs de pressió positiva i negativa en el tub de Pitot.

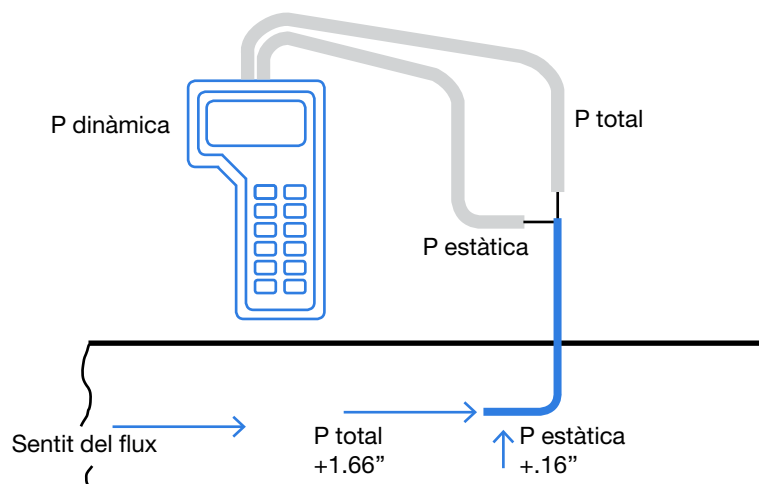


Figura 13.21. Col·locació del tub de Pitot a l'interior del conducte per on circula l'aire.

## 6.2. Mesura de la velocitat de l'aire

1. S'ha de connectar la sonda de velocitat tèrmica de fil calent al multímetre i engegar l'aparell.
2. Cal col·locar la sonda de velocitat tèrmica a l'interior del conducte per on circula l'aire, procurant que el punt de mesura s'ubiqui al centre del flux d'aire.
3. S'ha de mesurar al conducte d'aspiració i a la d'impulsió.
4. S'ha d'esperar fins que els valors s'estabilitzin i anotar o guardar les dades.

En el cas que es tracti d'una sortida d'aire sense conducte, es recomana muntar un conducte provisional de cartró o material similar per laminar el flux d'aire.

Les variables  $v_1$ ,  $v_2$  també es poden mesurar amb un anemòmetre. Els passos són els mateixos, però emprant la sonda de velocitat de tipus molinet en lloc de la sonda de velocitat tèrmica de fil calent.

## 6.3. Mesura de la potència elèctrica

1. S'han de connectar les preses de tensió i les pinces amperimètriques segons el tipus d'instal·lació, tal com s'indica a la Figura 13.22, a les connexions del motor elèctric del ventilador. Cal tenir en compte les normes de seguretat del manual i les referenciades en l'apartat 5.4.
2. S'ha d'engegar l'aparell i seleccionar el tipus de mesura prement la icona [ANÁLISIS DE MEDIDAS]. Un cop s'obri la llista amb les diferents mesures disponibles, s'ha de seleccionar mitjançant el cursor gris el tipus de mesura que s'hagi de fer segons les configuracions presentades a la Figura 13.22.
3. Un cop seleccionada la mesura, cal prémer la tecla dinàmica [ACCIONES] i seleccionar [REGISTROS]. S'obrirà una pantalla on es poden veure els paràmetres principals de la connexió a analitzar.
4. Cal llegir les mesures, guardar-les o anotar-les. És convenient deixar l'analitzador connectat durant el temps en què es fan les altres mesures perquè integri tot el període.

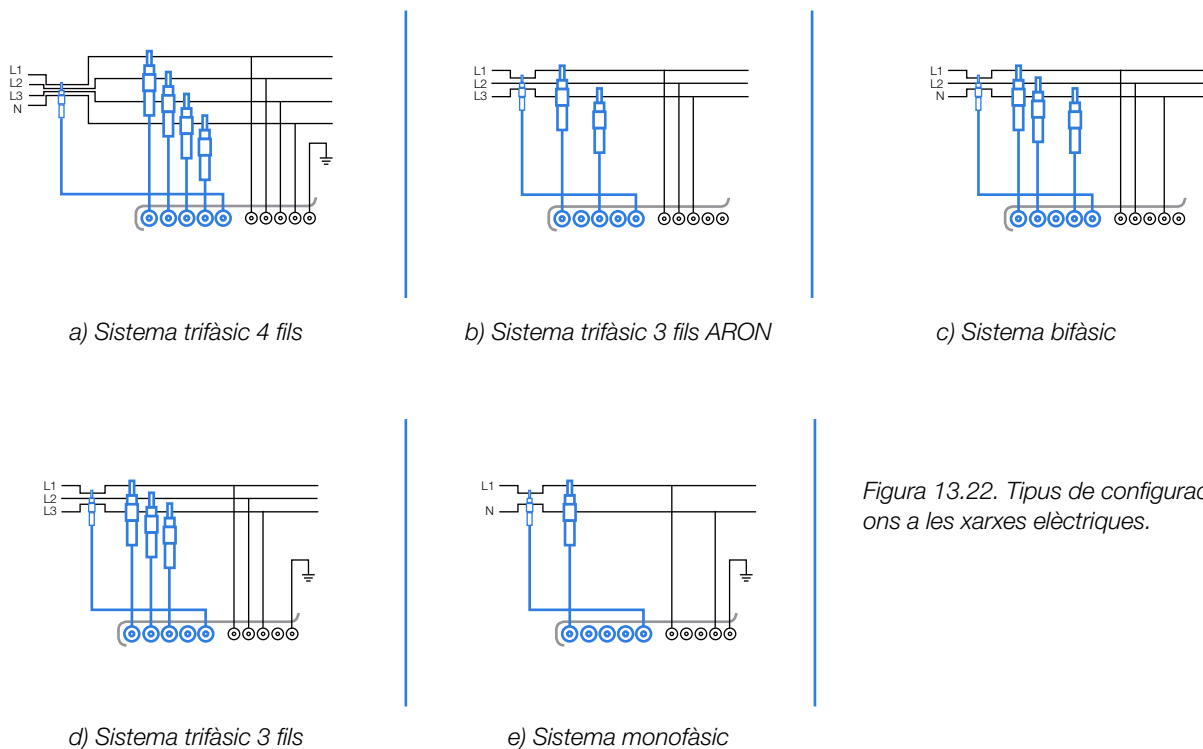


Figura 13.22. Tipus de configuracions a les xarxes elèctriques.

## 7. Exemple pràctic

### 7.1. Enunciat

S'ha d'analitzar el ventilador de la Figura 13.23, que proporciona la ventilació necessària a una sala de màquines on hi ha grans motors de combustió. Aquest aparell és de tipus helicoidal tubular i està situat a la paret exterior. L'aspiració es fa sense conducte i la impulsió, mitjançant un conducte de 150 m de longitud que salva un vestíbul i porta l'aire a la sala de màquines. Tant el ventilador com el conducte tenen un diàmetre de 638 mm. L'energia se subministra al ventilador per mitjà d'un motor elèctric monofàsic de 460 W que es troba juntament amb el propulsor.

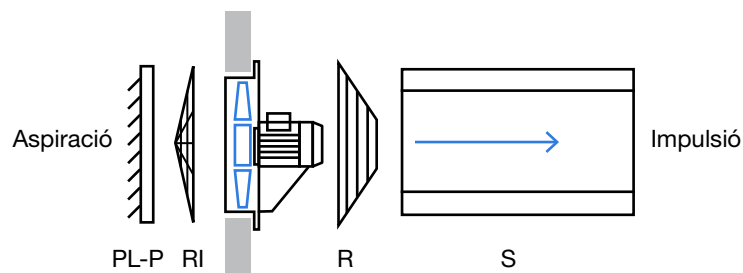


Figura 13.23. Esquema del ventilador de l'enunciat.



## 7.2. Dades

A la Taula 13.3 i Taula 13.4 es mostra el recull de les dades de què es disposa i les dades mesurades en el ventilador i en la instal·lació de ventilació.

Paràmetres	Unitats	Dada
Acceleració de la gravetat	m/s <sup>2</sup>	9,81
Densitat de l'aire a 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	1,2
Pèrdues de càrrega lineals unitàries <sup>1</sup>	mm.c.d/m	0,144
Diàmetre del conducte d'impulsió	m	0,638
Longitud del conducte d'impulsió	m	150

Taula 13.3. Dades de què es disposa sobre el ventilador i la instal·lació de ventilació.

Paràmetres	Unitats	Dada
Velocitat de l'aire en la impulsió	m/s	10
Potència elèctrica subministrada al ventilador	W	440

Taula 13.4. Dades mesurades en el ventilador i en la instal·lació de ventilació.

A la Figura 13.24 es mostren diferents corbes característiques de diferents ventiladors.

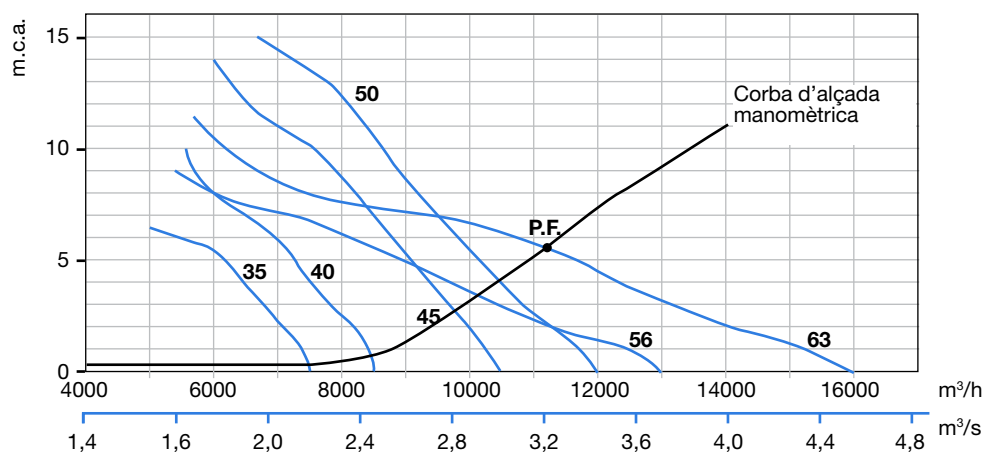


Figura 13.24. Corbes característiques de diferents ventiladors.

<sup>1</sup> Valor extret de l'àbac de la figura 13.14 a partir del diàmetre del conducte i el cabal d'aire d'impulsió.

### 7.3. Càlculs i resultat

A partir de les dades referenciades a la Taula 13.3 i Taula 13.4 i amb la corba característica núm. 63 de la Figura 13.24, corresponent a la donada pel fabricant, es procedeix en primer lloc a realitzar el balanç energètic en la instal·lació per tal de calcular l'alçada manomètrica proporcionada pel ventilador a l'aire.

En aquest cas, tant l'aspiració com el subministrament d'aire es fan a pressió atmosfèrica, per tant, les pressions en l'aspiració i subministrament es poden considerar nul·les. D'altra banda, només s'ha mesurat la velocitat de l'aire en el subministrament i es calcularan les pèrdues de càrrega per l'únic conducte que hi ha (conduïte d'impulsió).

$$H_v = (z_2 - z_1) + \left( \frac{P_2 - P_1}{\gamma} \right) + \left( \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} \right) + h_{1-2}$$

$$H_v = \frac{(10^2 - 0) \frac{m}{s}}{2 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2}} + 0,0216m = 5,12m$$

Les pèrdues de càrrega només són lineals ja que no existeixen elements singulars en la instal·lació que puguin provocar pèrdua de càrrega.

$$h_{1-2} = h_L + h_s$$

$$h_{1-2} = h_L = J \cdot (L_2)$$

$$h_{1-2} = 0,144 \frac{mm \cdot c.d.a}{m} \cdot 150m = 21,6mm \rightarrow 0,0216m$$

Un cop es coneix l'alçada manomètrica que proporciona el ventilador a l'aire, se'n pot calcular la potència pneumàtica, però abans s'ha de calcular el cabal:

$$\dot{V}_v = v \cdot S$$

$$\dot{V}_v = v \cdot (\pi \cdot r^2)$$

$$\dot{V}_v = 10 \frac{m}{s} \cdot (\pi \cdot 0,319^2) m^2 = 3,197 \frac{m^3}{s} \approx 3,2 \frac{m^3}{s}$$

$$P_h = \gamma \cdot \dot{V}_v \cdot H_v$$

$$P_h = g \cdot \rho \cdot \dot{V}_v \cdot H_v$$

$$P_h = 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 1,2 \frac{Kg}{m^3} \cdot 3,2 \frac{m^3}{s} \cdot 5,12m = 192,9W$$

Amb la potència consumida calculada i la potència elèctrica subministrada ja es pot calcular el rendiment global del ventilador:

$$\eta_v = \frac{P_h}{P_e} \cdot 100$$

$$\eta_v = \frac{192,9W}{440W} \cdot 100 = 43,8\%$$

#### 7.4. Comentaris

El rendiment obtingut és força baix. Com es pot observar a la corba núm. 63 de la Figura 13.24, per al cabal calculat de 3,2 m<sup>3</sup>/s correspon una alçada manomètrica lleugerament superior a 5 m.c.d.a, que és aproximadament equivalent als 5 m d'alçada manomètrica requerits per a la instal·lació si funciona amb aire. Per tant, el ventilador opera sobre el seu punt de funcionament.

Si es tenen en compte aquestes característiques, s'arriba a la conclusió que s'està consumint massa energia elèctrica per a l'alçada manomètrica que ha de proporcionar el ventilador i que, per tant, s'hauria d'estudiar la possibilitat de canviar tot el ventilador, o el motor elèctric que l'acciona per un altre que en les mateixes condicions d'operació tinguin un rendiment més elevat.

## 8. Referències

**[1]** Reial decret 1027/2007. *Reglament d'instal·lacions tèrmiques als edificis*. BOE, 29 d'agost de 2007.

<https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-15820>

**[2]** Reial decret 87/2011, relatiu a l'establiment de requisits de disseny ecològic aplicables als productes relacionats amb l'energia. BOE 3, de març de 2011.

[http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-4038](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-4038)

**[3]** Directiva 2009/125/CE, per la qual s'instaura un marc per a l'establiment de requisits de disseny ecològic aplicable als productes relacionats amb l'energia.

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:es:PDF>







