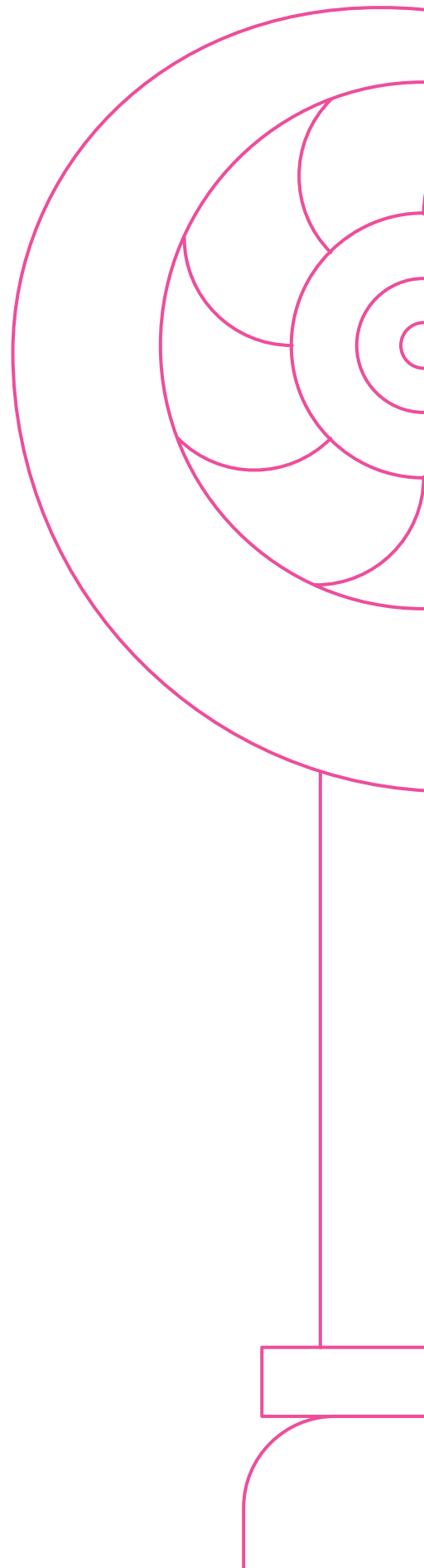


COL·LECCIÓ
BALANÇ ENERGÈTIC
D'EQUIPS CONSUMIDORS
MESURA I CÀLCUL

ELECTROBOMBES
CENTRÍFUGUES

11







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

ELECTROBOMBES
CENTRÍFUGUES

11

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^a Granollers - Institut Català d'Energia

Disseny

Eva Sánchez - Institut Català d'Energia

Maquetació

OXIGEN Comunicació gràfica

Versió electrònica

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

0	Pròleg	7
1	Introducció	9
1.1	Justificació del mòdul	9
1.2	Objectiu del mòdul	10
1.3	Abast del mòdul	10
2	Descripció del sistema	10
2.1	Definició	10
2.2	Principis de funcionament i paràmetres	11
2.3	Tipologies d'equip	13
2.4	Normativa aplicable	16
2.5	Descripció gràfica	16
3	Definició del balanç energètic	18
3.1	Descripció del balanç energètic	18
3.2	Esquema del balanç energètic	18
4	Bases de càlcul	19
4.1	Formulació	19
4.2	Taules i diagrames	21
5	Planificació de mesures	24
5.1	Dades de què es disposa	24
5.2	Dades a mesurar	25
5.3	Inventari d'aparells de mesura	25
5.4	Seguretat en persones i equips	26
6	Realització de les mesures	27
6.1	Mesura del cabal de la bomba	27
6.2	Mesura de voltatge, intensitat i factor de potència	28
7	Exemple pràctic	29
7.1	Enunciat	29
7.2	Dades	29
7.3	Càlculs i resultat	31
7.4	Comentaris	32
8	Referències	33

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 us presentem és l'onzè d'aquesta col·lecció que pren com a sistema d'estudi l'electrobomba centrífuga. El balanç energètic, caracteritza els fluxos d'entrada i sortida a la bomba, per obtenir, en un càlcul posterior, el rendiment o quocient entre la potència hidràulica servida per l'electrobomba centrífuga i la potència elèctrica demanada per aquesta.

1. Introducció

1.1. Justificació del mòdul

A la majoria d'instal·lacions que utilitzen fluids líquids, se'n fa necessari el transport a través de conductes o canonades cap a punts d'utilització o consum diferents al punt de captació. En la majoria de casos on la circulació per gravetat no és suficient o inviable, calen sistemes de circulació forçada, que proporcionen al fluid l'energia suficient per vèncer els desnivells d'altura entre els punts de captació i utilització, per vèncer les resistències de fregament o canvis de secció bruscos que puguin presentar les canonades i, en definitiva, per poder garantir el subministrament del fluid al punt d'utilització.

Els equips que possibiliten la circulació forçada de fluids líquids són les bombes. Tenim coneixement de les bombes des de l'edat antiga, com ho són, per exemple, les sínies de transport d'aigua. Actualment existeix una gran varietat de bombes molt més evolucionades que s'utilitzen a totes les instal·lacions que operen amb fluids líquids, entre les quals destaquen les més usuals, les electrobombes centrífugues.

Cal dir que els dispositius equivalents a les bombes per a la circulació forçada de fluids gasosos són bàsicament compressors i ventiladors (tractats en altres mòduls).

L'eficiència energètica de les electrobombes centrífugues va molt lligada a les condicions d'operació requerides per a la instal·lació i les condicions disponibles per a la bomba, és a dir, el seu punt de funcionament. D'altra banda, també depèn del funcionament del rodet, de l'eix i altres mecanismes que possibiliten el moviment del fluid en sentit perpendicular a l'eix; a més, depèn del funcionament del motor elèctric que els acciona i el fluid amb què treballa.

És per això que és convenient dur a terme un balanç energètic en electrobombes centrífugues per tal d'avaluar si s'està produint algun problema relacionat amb algun dels factors que en caracteritzen l'eficiència i optimitzar-ne el funcionament amb la finalitat d'obtenir una reducció dels costos energètics i ambientals associats al seu funcionament.

1.2. Objectiu del mòdul

L'objectiu d'aquest mòdul és proporcionar una guia i unes bases de càlcul per poder confeccionar mesures en electrobombes centrífugues, amb la finalitat de caracteritzar el balanç energètic necessari per al càlcul del seu rendiment.

1.3. Abast del mòdul

Aquest mòdul se centra bàsicament en tots els tipus d'electrobombes centrífugues que es poden trobar a les instal·lacions que transporten fluids líquids. A trets generals les electrobombes centrífugues es poden classificar segons el nombre d'etapes que fa per elevar la pressió del fluid, i el seu tipus d'aspiració, la manera com funciona bomba, la trajectòria del fluid, l'orientació de l'eix o de la bomba, i segons el tipus d'acoblament amb els accionaments o motors elèctrics.

A l'apartat 2.3 es mostren amb més detall les diferents tipologies partint de la classificació anterior.

2. Descripció del sistema

2.1. Definició

En general, una bomba es podria definir com un dispositiu que s'encarrega d'elevar líquids a nivells d'altura superiors als de la seva captació a partir d'apujar-ne la pressió i/o velocitat amb l'aportació d'energia.

Una electrobomba centrífuga és un tipus de bomba rotativa accionada amb energia elèctrica que eleva la pressió o velocitat del fluid i transforma l'energia cinètica de rotació dels seus mecanismes en energia de pressió i/o energia de velocitat. Bàsicament consta de quatre parts que en possibiliten el funcionament: la canonada d'aspiració del fluid; l'impulsor o rodet amb una distribució d'àleps al llarg del perímetre; la carcassa que envolta el rodet, formant un espai comprès entre les dues parts per on circula el fluid, i finalment la canonada d'impulsió, situada a la sortida d'aquest espai amb la qual el fluid descriu una trajectòria perpendicular a l'eix del rodet.

Aquest tipus de bombes proporcionen un cabal de fluid uniforme sense pulsacions, requereixen un parell motor baix per accionar-se, absorbeixen potència de manera contínua sense sobrecàrregues quan l'altura a què s'ha d'impulsar el fluid no varia i tenen un baix cost inicial i de conservació. També cal destacar que, com que són màquines rotatives, ocupen molt menys espai que altres bombes, tenen un funcionament silenciós, proporcionen solucions a la majoria de problemes en circulació de fluids, tenen una gran versatilitat a l'hora d'acoblar-se amb els motors elèctrics o turbines, alhora que tenen un funcionament senzill comparat amb altres tipus de bombes.

D'altra banda, però, l'existència d'aire i partícules sòlides en l'espai comprès entre l'impulsor i la carcassa perjudica el funcionament de la bomba. Per tant, en cas que hi hagi aire s'ha de purgar la bomba, així com el fluid de treball abans de l'aspiració a l'entrada de la bomba.

Les característiques anteriorment comentades sobre les bombes centrífugues fan que actualment siguin el tipus més utilitzat a les instal·lacions que transporten fluids i, per tant, el tipus de bomba amb més producció industrial.

2.2. Principis de funcionament i paràmetres

El funcionament d'una electrobomba centrífuga és senzill. En primer lloc hi entra el fluid per mitjà de la canonada d'aspiració; tot seguit, circula fins a la part central del rodet on, gràcies al moviment de rotació d'aquest i dels àleps, experimenta un canvi de direcció i guanya energia de pressió i de velocitat. Posteriorment, aquest mateix fluid es descarrega a l'espai comprès entre la carcassa i el rodet amb pressió i velocitat molt més elevades que a l'aspiració. Aquest espai per on circula el fluid pot ser de tres tipus: espiral o cargol, difusor i turbina. En els dos primers (espiral o cargol i difusor), durant la circulació del fluid l'energia de la seva velocitat es transforma en energia de pressió, mentre que en l'últim tipus (turbina) l'augment d'energia és conseqüència de la velocitat del fluid. Finalment, un cop el fluid ha circulat per tot l'espai comprès entre la carcassa i el rodet surt a través de la canonada d'impulsió de la bomba cap a la instal·lació.

Pel que fa a l'eficiència energètica de la bomba, cal dir que depèn del seu punt de funcionament, és a dir, del cabal de líquid en el qual la pressió disponible per la bomba garanteix la pressió requerida per la instal·lació sense que s'hi produeixi cavitació. La cavitació a l'interior de la bomba s'ha d'evitar i per tant no sols s'ha d'avaluar el cabal del punt de funcionament òptim, tan per a la bomba com per a la instal·lació, sinó que aquest sigui inferior al cabal màxim per sota del qual s'evita la cavitació en la bomba.

Per a l'anàlisi de la bomba, els fabricants proporcionen les diferents corbes pròpies de l'aparell, i mostren la pressió disponible per a la bomba davant el cabal, o la seva eficiència davant el cabal o els diagrames d'altura neta requerida per evitar la cavitació a l'entrada de la bomba enfront el cabal (NPSHr), etc.

Per analitzar la instal·lació, cal estudiar l'altura de columna d'aigua que requereix i l'altura neta disponible (NPSH_d).

Un cop es té la corba referent a la columna d'aigua requerida per la instal·lació, el punt de funcionament de la bomba és aquell en què la seva corba característica coincideix amb la corba característica de la instal·lació. A la Figura 11.1 es mostra de manera qualitativa l'avaluació del punt de funcionament d'un determinat tipus de bomba.

El límit de cabal màxim per evitar la cavitació és el que proporciona una altura neta requerida per la bomba igual a l'altura neta disponible per la instal·lació (NPSHr=NPSH_d). A la Figura 11.2 es mostra de manera qualitativa com trobar el cabal màxim que evita la cavitació en la bomba.

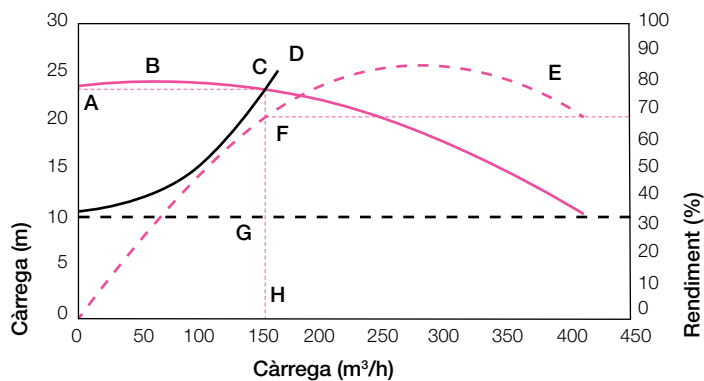


Figura 11.1. Avaluació del punt de funcionament a partir de les corbes de característiques d'un determinat tipus de bomba i la corba característica de la instal·lació.

- A** - Càrrega operació 22,9 m
- B** - Corba de la bomba
- C** - Punt de funcionament
- D** - Corba de la instal·lació
- E** - Corba de rendiment
- F** - Rendiment d'operació 67,5%
- G** - Càrrega estàtica 10 m
- H** - Cabal de funcionament 150 m³/h

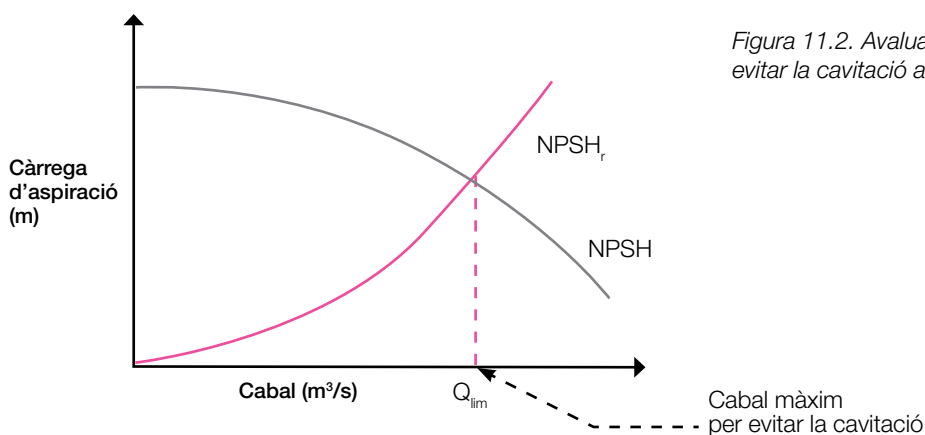


Figura 11.2. Avaluació del cabal màxim per evitar la cavitació a partir de les corbes NPSH.

Un cop descrit el funcionament de les electrobombes centrífugues i un cop definits els paràmetres que influeixen en la seva eficiència global, s'han de caracteritzar els paràmetres necessaris per calcular-la; bàsicament són l'altura manomètrica de la bomba, el cabal, la densitat del fluid amb què opera, i la constant referent a l'acceleració de la gravetat. A més a més, es necessita la potència elèctrica subministrada a la bomba.

Cal dir que per calcular l'altura manomètrica de la bomba s'ha de dur a terme un balanç energètic a la instal·lació mitjançant l'equació de l'energia de Bernoulli i, per tant, es necessiten també els paràmetres que hi intervenen, com són els nivells d'altura, les pressions i les velocitats en l'aspiració i en el subministrament del fluid, i els coeficients referents a les pèrdues de càrrega en la instal·lació.

2.3. Tipologies d'equip

A continuació es descriuen breument de les diferents tipologies d'electrobombes centrífugues d'acord amb la classificació de l'apartat 1.3.

Segons el nombre d'etapes que fa per elevar la pressió del fluid tenim les bombes següents:

Electrobomba centrífuga d'una sola etapa. Aquest tipus fa l'elevació de la pressió del fluid de treball mitjançant un sol rotor. Es tracta de la classe més senzilla de construir, ja que només disposa del rodet amb els àleps, de la carcassa i de l'espiral o cargol que guia el fluid i el difusor. S'utilitzen per a un servei de baixa pressió.

Electrobomba centrífuga de doble etapa. Aquesta fa l'elevació de la pressió mitjançant dos rotors o rodets connectats en sèrie. Constructivament té una carcassa molt més gran que les anteriors i a l'interior es munten els dos rodets. S'utilitzen fonamentalment per a un servei de pressió mitjana.

Electrobomba centrífuga multietapa. Disposada de tres o més rotors o rodets connectats en sèrie. Bàsicament s'utilitza per a serveis d'alta pressió i de nivells elevats d'altura manomètrica. També s'utilitza en instal·lacions amb pous d'aspiració de gran profunditat.

Segons el tipus d'aspiració i impulsió del fluid, tenim:

Bombes centrífugues d'aspiració simple. En aquest tipus el rodet té una sola cavitat per on absorbeix el líquid, que entra per un costat de manera axial al rodet, per la qual cosa experimenta un gran esforç axial.

Bombes centrífugues de doble aspiració. En aquesta el fluid entra de manera axial per les dues cavitats que té el rodet, de manera que s'equilibra l'esforç axial a què estaria sotmès si fos d'aspiració simple. Aquest tipus de bombes són molt sensibles a desequilibris en els esforços axials si les canonades d'aspiració no estan ben dissenyades.

També hi ha bombes centrífugues que disposen d'aspiració lateral i impulsió superior, d'aspiració inferior i impulsió superior, i d'aspiració i impulsió lateral.

Segons el tipus de funcionament de la bomba, tenim:

Bombes centrífugues de tipus espiral. En aquest cas l'espai on el rodet descarrega el fluid té una forma espiral que s'expandeix progressivament de manera que provoca que part de l'energia produïda per la velocitat del fluid es transformi en energia produïda per la

pressió d'aquest. D'aquesta manera s'aconsegueix elevar la pressió del fluid perquè pugui superar el desnivell d'altura de la instal·lació i les pèrdues de càrrega a les canonades.

Bombes centrífugues tipus difusor. Aquí els àleps direccionals i estacionaris del rodet provoquen un canvi de direcció en la trajectòria del fluid i l'expandeixen gradualment, de manera que aconseguix transformar l'energia associada a la velocitat del fluid en energia de pressió. En aquesta classe de bombes centrífugues l'augment de pressió del fluid es produeix sobretot en els àleps del rodet i no en l'espai comprès entre la carcassa i el rodet.

Bombes centrífugues tipus turbina. En aquest tipus es provoquen turbulències en el fluid que circula per l'espai comprès entre la carcassa i el rodet per mitjà dels àleps. Les turbulències provocades al fluid fan que aquest circuli a alta velocitat fins a la canonada d'impulsió. Per tant, en aquest cas, el fluid augmenta la seva energia per la velocitat i no per la pressió. La carcassa ha de tenir un disseny acurat perquè les altes velocitats a les quals circula el fluid poden provocar altes pèrdues de càrrega dins la mateixa bomba.

Segons la trajectòria que segueix el fluid dins la bomba, tenim:

Bombes centrífugues de flux radial. Aquesta bomba obliga el fluid a sortir amb una trajectòria perpendicular a l'eix del rodet per la canonada d'impulsió.

Bombes centrífugues de flux axial. En aquest cas el fluid descriu una trajectòria en espiral i forma cilindres coaxials segons la direcció de l'eix. Solen tenir menys àleps que les de flux radial per la qual cosa el fluid circula amb espais més grans que permeten la circulació del líquid amb petites partícules sòlides en suspensió. A la majoria de les bombes axials la inclinació dels àleps es pot regular fins a obtenir la inclinació òptima que proporcioni el màxim de rendiment possible en condicions reals de treball de la bomba.

Bombes centrífugues de flux mixt o diagonal. En aquest tipus el fluid descriu una hèlix cònica segons la direcció de l'eix. Es pot dir que es tracta d'un flux en part radial i en part axial, i d'aquí que també s'anomeni "flux diagonal".

Segons l'orientació de l'eix o de la bomba, tenim:

Bombes centrífugues horitzontals. L'eix del motor d'aquesta bomba se situa en un pla horitzontal, per la qual cosa el rodet està en posició vertical i a la mateixa altura que el motor. Són les més utilitzades ja que tenen un funcionament i manteniment senzills i un cost més baix respecte a les verticals. Estan preparades per funcionar en sec, exte-

riorment al líquid, encara que no és aconsellable perquè les bombes centrífugues necessiten que el líquid bombejat treballi com a lubricant. No aspiren el fluid de manera automàtica i, per tant, necessiten una posada en marxa i un encebament previ. La majoria de cops, l'encebament i l'engegada no són fàcils per la qual cosa les bombes verticals incorporen vàlvules de peu i altres sistemes d'encebament.

Bombes centrífugues verticals. En aquest cas l'eix del motor es troba en un pla vertical i el rodet en un pla horitzontal. Ara bé, poden tenir el motor situat per sobre la bomba, cosa que fa que puguin treballar tant per sota el nivell del fluid com per sobre. A les bombes verticals submergides s'elimina el problema de l'encebament, ja que tant si estan en funcionament com si no, el rodet es troba envoltat de fluid i per tant només necessita una engegada prèvia del motor. A les bombes verticals submergides, l'aspiració s'acostuma a fer a certa profunditat respecte de la superfície lliure del fluid per evitar problemes d'entrada d'aire i de pèrdua de cabal, que afecta al rendiment de la bomba. Les més usuals de les verticals submergides són les del tipus turbina.

A les bombes verticals no submergides, el motor que acciona l'aparell es pot situar prop de la bomba, però se n'ha d'evitar el contacte amb el fluid. Un exemple n'és l'extracció d'aigua de pous subterranis.

En general, les bombes verticals se solen utilitzar en processos on es bombegen grans cabals de fluid, com per exemple en aplicacions marines, en drenatge, en irrigació, en extracció d'aigua de pous, etc.

Finalment segons el tipus d'acoblament de la bomba amb l'accionament o motor, tenim:

Bombes centrífugues d'acoblament directe. Aquestes comparteixen el mateix eix de rotació que el motor que les acciona, de manera que formen una única unitat compacta. Acostumen a ser de baixa potència en comparació amb les d'acoblament indirecte. A més, tenen un pes relativament baix, el conjunt motor-bomba ocupa poc espai i són de baix cost en comparació amb les d'acoblament indirecte. Pel que fa al rendiment energètic global, s'ha de tenir en compte el rendiment del motor i el de la bomba.

Bombes centrífugues d'acoblament indirecte. Aquest tipus de bombes no comparteixen l'eix del motor, sinó que el de la bomba i el del motor són independents i s'uneixen a través d'arbres de transmissió. Constitueixen sistemes partits de gran potència de bombeig, ocupen molt més espai que les d'acoblament directe, resulten tenir un cost més elevat i un manteniment més exhaustiu. D'altra banda, juntament al rendiment energètic global s'ha de tenir en compte el rendiment mecànic de la transmissió, a més del rendiment del motor i el de la bomba.

2.4. Normativa aplicable

La normativa aplicable en aquest mòdul, és bàsicament és el Reglament d'instal·lacions tèrmiques als edificis (RITE), de l'1 de setembre de 2013, que correspon a l'última actualització.

A la IT.1 d'aquest reglament, concretament a l'apartat IT.1.2.4.2.5. *Eficiència energetica 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 rendiment sigui com més elevat 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 de funcionament al llarg d'una temporada.

En el mateix apartat també s'especifica que s'ha de justificar la potència dels sistemes de bombeig per a cada circuit i definir-la d'acord amb el cabal d'operació del circuit.

Finalment, també s'estableix que per a les bombes de circulació d'aigua en xarxes de canonades serà suficient equilibrar el circuit per disseny i emprar vàlvules d'equilibratge, si cal.

A més, els circuladors d'aigua han de complir la Directiva europea d'ecodisseny 2009/125/EC (ErP Directive), que estableix els requisits obligatoris d'ecodisseny en aquest camp.

2.5. Descripció gràfica

Des de la Figura 11.3 a la Figura 11.10 es mostren diferents imatges i esquemes de bombes centrífuges.

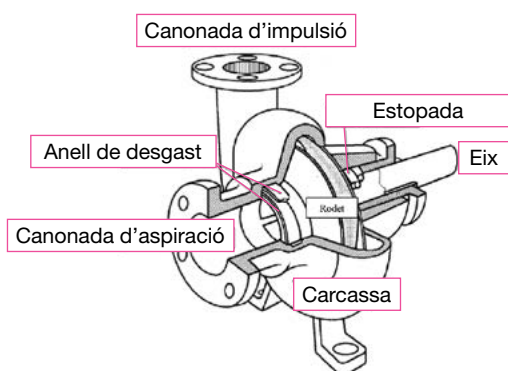


Figura 11.3. Esquema de les parts d'una bomba centrífuga horitzontal amb aspiració lateral i impulsió superior.

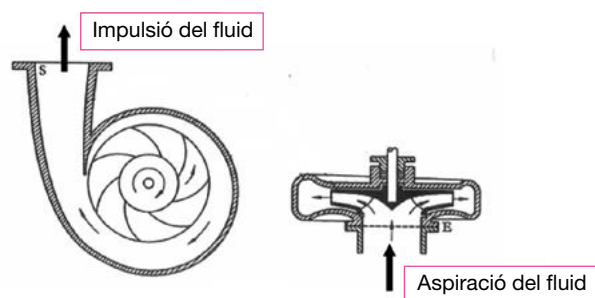


Figura 11.4. Esquema del funcionament d'una bomba centrífuga de tipus espiral.



Figura 11.5. Bomba centrífuga horitzontal.

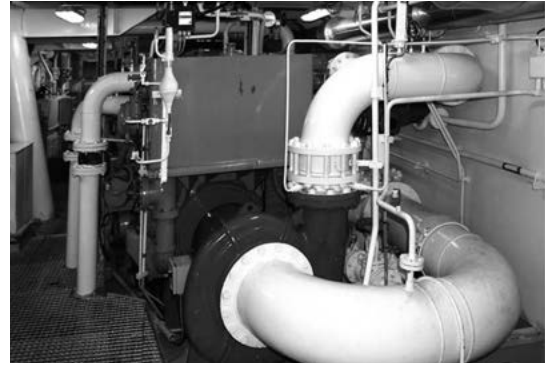


Figura 11.6. Instal·lació de bombeig



Figura 11.7. Bomba centrífuga industrial.

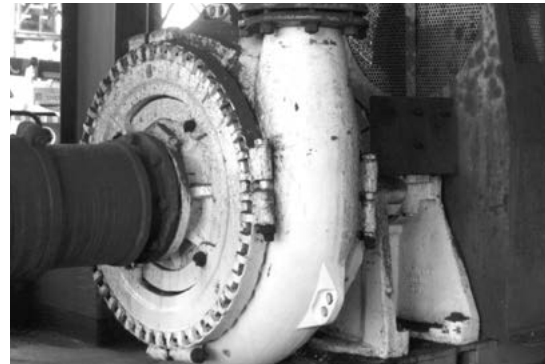


Figura 11.8. Bomba centrífuga en una central de carbó



Figura 11.9. Bomba centrífuga vertical.

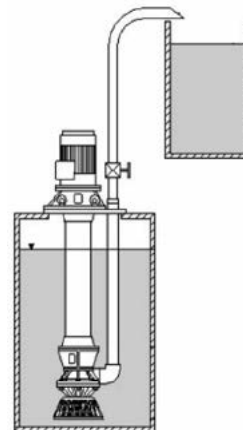


Figura 11.10. Esquema del bombeig d'un fluid mitjançant una bomba centrífuga vertical.

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'altura manomètrica de la bomba i, en un càlcul posterior, la seva potència hidràulica, s'ha de confeccionar un balanç energètic segons l'equació de Bernoulli de l'energia d'un fluid. Com en tot balanç energètic, s'han de caracteritzar les entrades i sortides que es tenen en el sistema d'estudi, en aquest cas la instal·lació de bombeig on opera la bomba.

Tenint en compte l'esmentat més amunt, es tenen com a entrades l'altura manomètrica del fluid en l'aspiració i l'altura manomètrica proporcionada per la bomba. D'altra banda, es tenen com a sortides l'altura manomètrica del fluid en el subministrament i les pèrdues de càrrega que aquest pugui presentar en la seva circulació pels conductes.

Finalment, cal aclarir que la potència elèctrica subministrada a la bomba es té en compte en el càlcul final del seu 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 11.1 es mostra la relació del balanç energètic per a una instal·lació de bombeig genèrica i a la Figura 11.11 es mostra l'esquema.

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + H_b = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + h_{1-2} \quad \text{Equació 11.1}$$

On:

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

El subíndex 2 correspon al subministrament del fluid en la instal·lació.

z_i [m] correspon al nivell d'altura geomètrica en el punt indicat pel subíndex.

P_i [bar] correspon a la pressió relativa en el punt indicat pel subíndex.

γ [N/m³] correspon al pes específic del fluid amb què opera la bomba¹.

v_i [m/s] correspon a la velocitat en el punt indicat pel subíndex.

g [m/s²] correspon a l'acceleració de la gravetat.

H_b [m.c.a] correspon a l'altura manomètrica proporcionada per la bomba.

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

¹ γ es calcula com: $\gamma = g \cdot \rho$, on ρ és la densitat del fluid que es bombeja en la instal·lació.

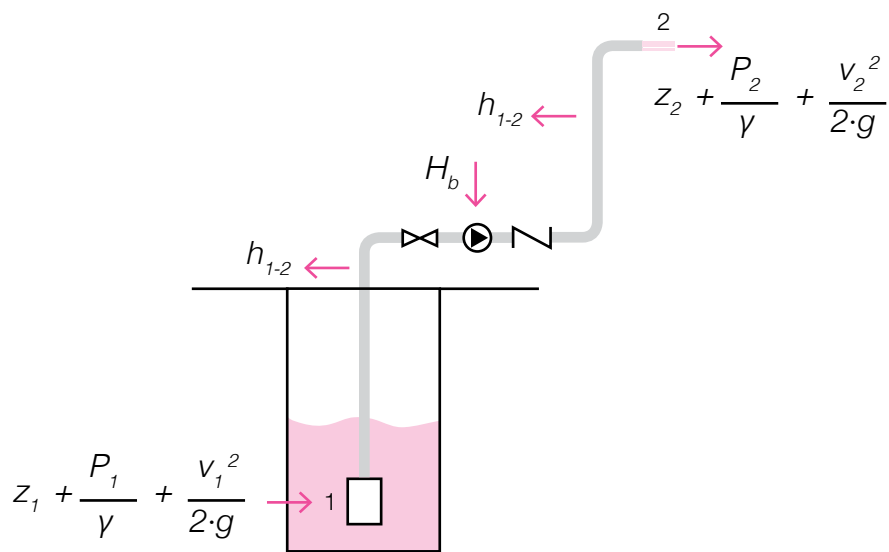


Figura 11.11. Esquema general del balanç energètic en una instal·lació de bombeig.

4. Bases de càlcul

4.1. Formulació

En primer lloc s'ha de calcular la potència hidràulica de la bomba mitjançant l'Equació 11.2:

$$P_h = \gamma \cdot \dot{V}_b \cdot H_b \quad \text{Equació 11.2}$$

On:

P_h [W] correspon a la potència hidràulica de la bomba.

\dot{V}_b [m³/s] correspon al cabal volumètric de la bomba.

La variable H_b s'ha de calcular aïllant-la de l'Equació 11.1 obtenint així l'Equació 11.3.

$$H_b = (z_2 - z_1) + \left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right) + \left(\frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} \right) + h_{1-2} \quad \text{Equació 11.3}$$

Cal dir que les variables que intervenen a l'Equació 11.3 depenen del tipus d'instal·lació i en segons quins casos poden ser nul·les. La variable V és una funció del cabal i es pot calcular mitjançant l'Equació 11.4:

$$V_b = v \cdot S \quad \text{Equació 11.4}$$

On:

S [m^2] correspon a la secció de la canonada.

Pel que fa a la variable h_{1-2} , s'ha de calcular mitjançant l'Equació 11.5:

$$h_{1-2} = h_L + h_s \quad \text{Equació 11.5}$$

On:

h_L [m.c.a] correspon a les pèrdues de càrrega lineals. Calculades mitjançant l'Equació 11.6.

h_s [m.c.a] correspon a les pèrdues de càrrega singulars. Aquest valor s'extreu de la Taula 11.1 i la Taula 11.2.

$$h_L = J \cdot (L_1 + L_2) \quad \text{Equació 11.6}$$

On:

J [m.c.a/m] correspon a les pèrdues de càrrega lineals per metre de canonada. Aquest valor s'extreu d'àbacs en funció del cabal de la bomba, del material i diàmetre de la canonada. Per a canonades de coure, consulteu la Figura 11.12, i per a canonades de PVC, la Figura 11.13.

L_1 [m] correspon a longitud de la canonada d'aspiració.

L_2 [m] correspon a la longitud de la canonada d'impulsió.

Un cop calculada la potència hidràulica de la bomba, s'ha de calcular la potència elèctrica subministrada pel motor a la bomba. Per a motors monofàsics es calcula mitjançant l'Equació 11.7 i per a motors trifàsics l'Equació 11.8.

$$P_e = V \cdot I \cdot \cos\phi \quad \text{Equació 11.7}$$

On:

P_e [W] correspon a la potència elèctrica subministrada a la bomba.

V [V] correspon al voltatge del motor que alimenta la bomba.

I [A] correspon a la intensitat del motor que alimenta la bomba.

$\cos\phi$ [-] correspon al factor de potència del motor que alimenta la bomba.

$$P_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\phi \quad \text{Equació 11.8}$$

Un cop es té calculada la potència elèctrica subministrada a la bomba, se'n pot calcular el rendiment mitjançant l'Equació 11.9:

$$\eta_b = \frac{P_h}{P_e} \cdot 100 \quad \text{Equació 11.9}$$

4.2. Taules i diagrames

A la Figura 11.12 i Figura 11.13 es poden observar els abàcs pel càlcul de les pèrdues de càrrega lineals unitàries per a tubs de coure i PVC, respectivament.

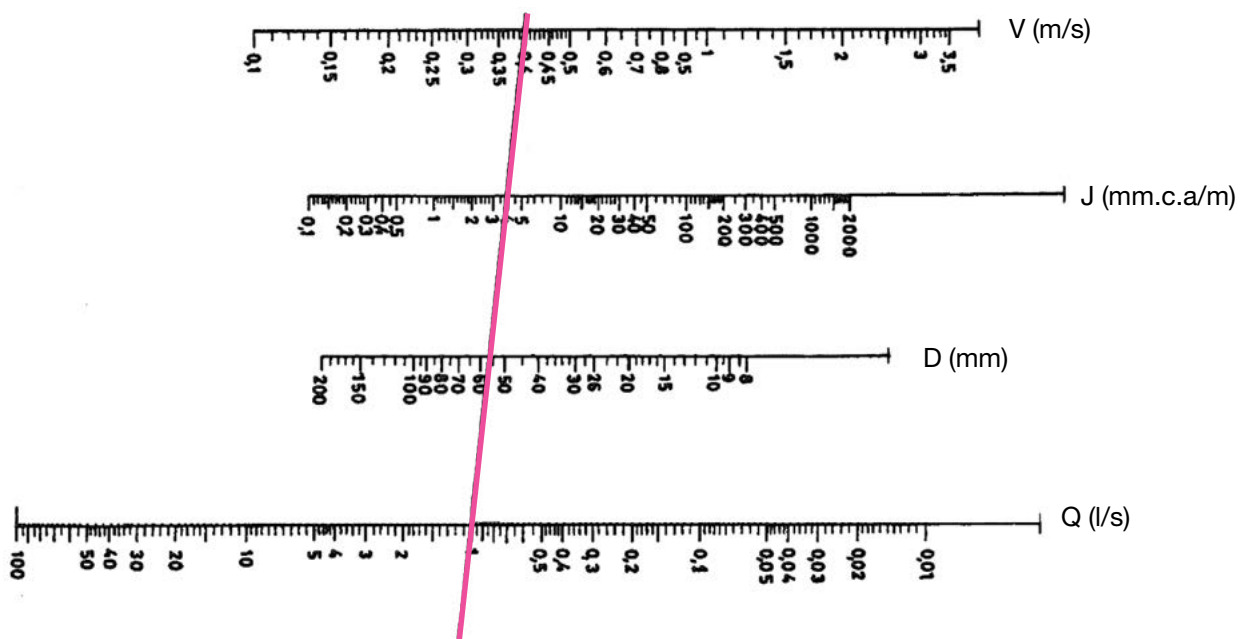


Figura 11.12. Àbac per al càlcul de pèrdues de càrrega lineals en tubs de coure.

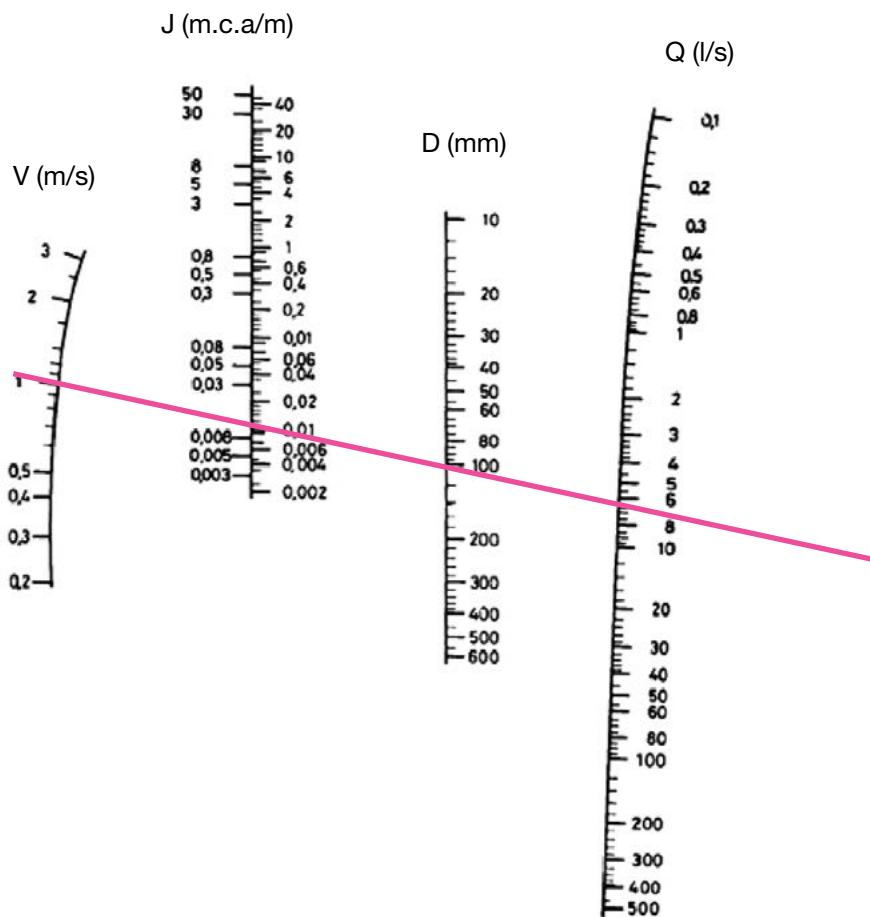





Figura 11.13. Àbac per al càlcul de pèrdues de càrrega lineals en tubs de PVC.

A la Taula 11.1 es mostren les pèrdues de càrrega singulars en funció de l'element que les provoca i el seu diàmetre.

Classe de resistència aïllada	Diàmetre de la canonada (mm)												
	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	
 managuet d'unió	0,00	0,00	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,09	0,12	0,15	0,20	0,25	
 con de reducció	0,20	0,30	0,50	0,65	0,85	1,00	1,30	2,00	2,30	3,00	4,00	5,00	
 colze o corba 45°	0,20	0,34	0,43	0,47	0,56	0,70	0,83	1,00	1,18	1,25	1,45	1,63	
 corba 90°	0,18	0,33	0,45	0,6	0,84	0,96	1,27	1,48	1,54	1,97	2,61	3,42	
 colze 90°	0,38	0,5	0,63	0,76	1,01	1,32	1,71	1,94	2,01	2,21	2,94	3,99	
 T de 45°	1,02	0,84	0,9	0,96	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00	3,30	
 T confluència de ramal	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00	1,20	
 T derivació a ramal	1,80	2,50	3,00	3,60	4,10	4,60	5,00	5,50	6,20	6,90	7,70	8,90	
 vàlvula de comporta oberta	0,14	0,18	0,21	0,26	0,36	0,44	0,55	0,69	0,91	1,09	1,44	1,70	
 vàlvula de globus	4,05	4,95	6,25	8,25	10,8	13,0	17,0	21,0	28,0	33,0	39,0	47,5	
 radiador/ caldera	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,75	6,50	7,00	7,50	8,00	10,0	
 caldera amb valvuleria	3,00	4,20	4,90	5,60	6,30	7,00	8,00	8,75	9,50	10,0	11,0	12,0	

Taula 11.1. Longituds equivalents en m.c.a per metre de canonada per les pèrdues de càrrega singulars en funció del tipus d'element que les provoca i el seu diàmetre.

5 Planificació de mesures

5.1 Dades de què es disposa

- Acceleració de la gravetat: g [m/s^2]
- Densitat de fluid amb que treballa la bomba: γ [kg/m^3]
- Pèrdues de càrrega lineals unitàries: J [$m.c.a/m$]
- Diàmetre de la canonada d'aspiració (canonades circulars): D_1 [m]
- Diàmetre de la canonada d'impulsió (canonades circulars): D_2 [m]
- Longitud de la canonada d'aspiració: L_1 [m]
- Longitud de la canonada d'impulsió: L_2 [m]
- Altura geomètrica d'aspiració: z_1 [m]
- Altura geomètrica d'impulsió: z_2 [m]
- Pressió relativa del fluid en l'aspiració²: P_1 [Pa]
- Pressió relativa en la impulsió: P_2 [Pa]

5.2 Dades a mesurar

- Cabal volumètric de la bomba: \dot{V}_b [m^3/s]
- Voltatge del motor que alimenta la bomba: V [V]
- Intensitat de corrent del motor que alimenta la bomba: I [A]
- Factor de potència del motor que alimenta la bomba: $\cos\varphi$ [-]

5.3. Inventari d'aparells de mesura

- Cabalímetre ultrasònic no invasiu per a líquids (Figura 11.14):
 - Variables mesurades: \dot{V}_b

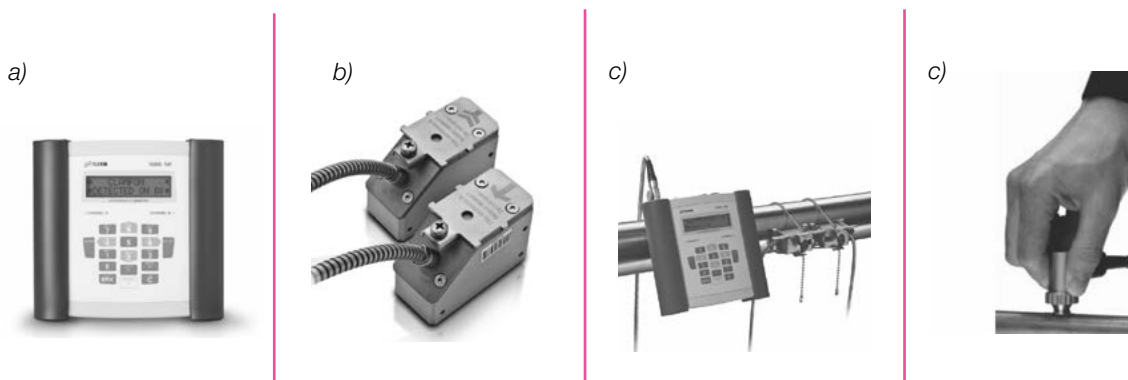


Figura 11.14. Cabalímetre + accessoris

a) Cabalímetre, b) Transductors petits amb guia per connectar a dues travesses, c) Suport per al muntatge dels transductors grans, d) Mesurador de gruix de canonades.

²En els casos en què al punt de mesura només es tingui la pressió atmosfèrica el valor d'aquesta variable serà nul.

- Analitzador de xarxes elèctriques (Figura 11.15):
 - Variable mesurada: V , I , $\cos\phi$, P_e , *desequilibri entre fases*.

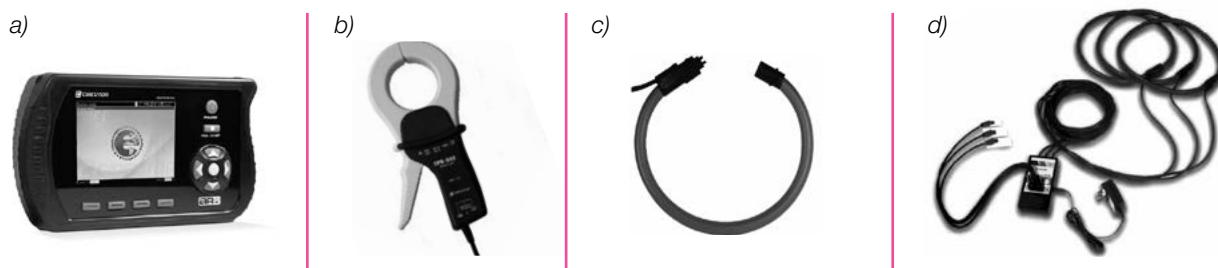


Figura 11.15. Analitzador elèctric AR6 + accessoris. a) Analitzador de xarxes, b) Pinça amperimètrica rígida CPR-500, c) Pinça amperimètrica flexible C-flex, d) Muntatge de les pinces C-Flex.

5.4 Seguretat en persones i equips

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

Seguretat per a les persones. Abans dels mesuraments s'ha de tenir en compte que la mesura de V_b es fa sobre instal·lacions de bombeig que poden transportar líquids a altes temperatures i que, per tant, es recomana portar guants de protecció tèrmica.

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

Seguretat en equips. És aconsellable no tractar de manera brusca el cabalímetre i els accessoris, ni l'analitzador de xarxes i els seus accessoris. El cabalímetre és un dispositiu força senzill de mantenir ja que incorpora un sistema de diagnosi d'errors. Bàsicament, els errors poden ser electrònics, dels transductors o de la cel·la de flux.

Sobretot s'ha d'evitar fugues de líquids corrosius a prop dels transductors. També s'ha d'evitar muntar en superfícies molt dures o amb temperatures extremes i evitar els xocs amb altres objectes. És convenient fixar-los de forma segura a la canonada, comprovar

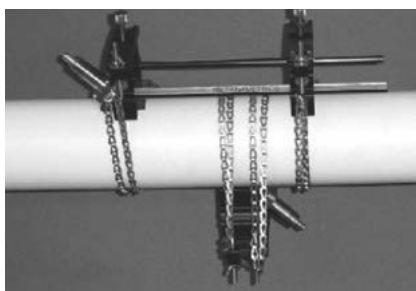
l'estat de les abraçadores que els subjecten i tractar de manera suau els connectors amb el cabalímetre, ja que en són la part més fràgil.

Cal evitar tot ajustament, manteniment o reparació que impliqui l'obertura de l'analitzador de xarxes, només personal qualificat pot obrir l'equip. Abans de qualsevol operació, modificació de les connexions, canvi, manteniment o reparació, cal desconnectar l'aparell de tota font d'alimentació. Quan se sospiti d'un funcionament erroni, fallada de l'equip o de la protecció, s'ha de deixar fora de servei i assegurar-se que no es pugui produir cap connexió accidental.

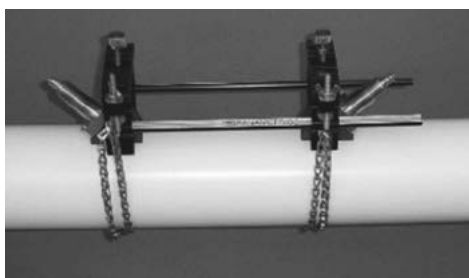
6. Realització de les mesures

6.1. Mesura del cabal de la bomba

1. Al menú principal del cabalímetre, s'ha de seleccionar *Parámetros*.
2. S'ha de seleccionar l'opció *Para el canal A*. Cal entrar les dades del tipus de canonada: material, diàmetre exterior i l'espessor en mm. Si el cabalímetre disposa d'un mesurador de gruix, caldrà que es determini d'aquesta manera. En cas contrari, s'han d'utilitzar dades tabulades estàndard. S'han d'entrar també les dades del fluid. El cabalímetre disposa d'una base de dades de diferents líquids.
3. Al menú principal del cabalímetre, s'ha de seleccionar *Medición* i prémer.
4. Cal seleccionar *Canal A* i especificar la longitud de trajectòria, longitud axial, el nombre de travesses (una o dues en aquest cas) i l'espaiament entre transductors.
5. Cal muntar els transductors sobre la canonada a una o dues travesses segons la Figura 11.16 i aplicar greix entre els transductors i la canonada. És aconsellable, si es pot, muntar a dues travesses.
6. S'ha d'efectuar la mesura en trams rectes de canonades evitant colzes, vàlvules o altres elements que puguin provocar turbulències en el fluid. Si pot ser, cal deixar un espai de 10 diàmetres abans del punt de mesura i 5 diàmetres després del punt de mesura. Si no és possible aquesta configuració, s'han de deixar 2/3 abans i 1/3 després.
7. Cal anotar o guardar la mesura quan el seu valor s'estabilitzi.



a) A una travessa.

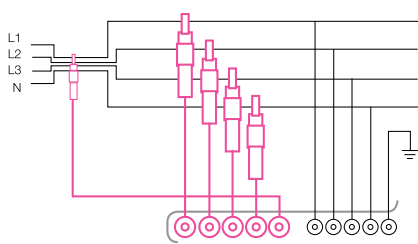


b) A dues travesses.

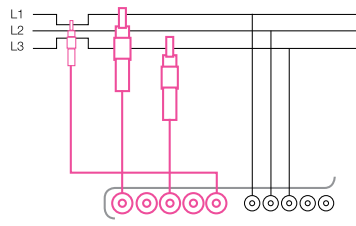
Figura 11.16. Muntatge dels transductors

6.2. Mesura de voltatge, intensitat i factor de potència

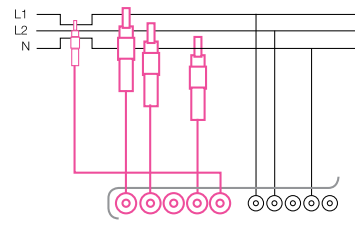
1. Cal connectar les preses de tensió i les pines amperimètriques segons el tipus d'instal·lació, tal com s'indica a la Figura 11.17, a les connexions del motor elèctric del compressor. Cal tenir en compte les normes de seguretat del manual i les referenciades a l'apartat 5.4.
2. S'ha d'engegar l'aparell i seleccionar el tipus de mesura que s'ha de dur a terme prement la icona [ANÁLISIS DE MEDIDAS]. Un cop s'obri la llista amb les diferents mesures disponibles, cal seleccionar mitjançant el cursor gris el tipus de mesura segons les configuracions presentades a la Figura 11.17.
3. Un cop seleccionada la mesura, s'ha de prémer la tecla dinàmica [ACCIONES] i seleccionar [REGISTROS]. S'obrirà una pantalla on es podran veure els paràmetres principals de la connexió a analitzar.
4. S'han de llegir les mesures, guardar-les o anotar-les. És convenient deixar l'analitzador connectat durant el temps en què s'executen les altres mesures perquè integri tot el període.



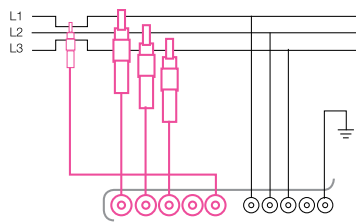
Sistema Trifàsic 4 fils



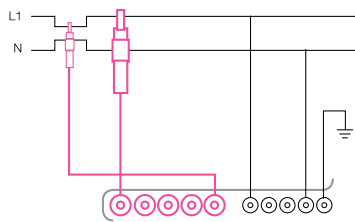
Sistema Trifàsic 3 fils ARON



Sistema Bifàsic



Sistema Trifàsic 3 fils



Sistema Monofàsic

Figura 11.17. Tipus de configuracions a les xarxes elèctriques.

7. Exemple pràctic

7.1. Enunciat

La bomba de la Figura 11.18 opera bombejant l'aigua a 20 °C de temperatura i viscositat cinemàtica d'1 mm²/s del dipòsit 1 fins al dipòsit 2. La longitud de la canonada L1 correspon a 7,5 m i la longitud de la canonada L2 correspon a 600 m. Si les dues canonades són de coure i tenen un diàmetre nominal de 150 mm, quin és el rendiment de la bomba?

7.2. Dades

A la Taula 11.2 es mostren les dades de què es disposa sobre la instal·lació i la bomba. I a la Taula 11.3 es mostren les dades mesurades.

A la Figura 11.19 es mostren les diferents corbes característiques d'altura manomètrica davant el cabal i a la Figura 11.20 es mostren les diferents corbes característiques de potència mecànica davant el cabal. Les corbes estan calculades per al bombeig d'aigua a 20 °C de temperatura i 1 mm²/s de viscositat cinemàtica.

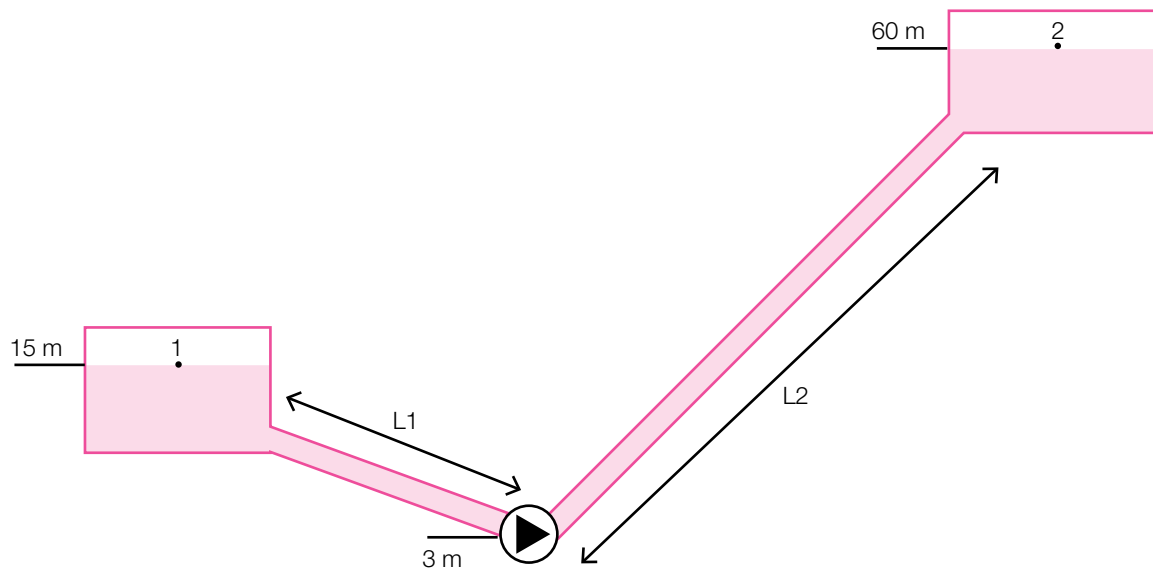


Figura 11.18. Esquema d'una instal·lació de circulació d'aigua entre dos dipòsits.

Paràmetres	Unitats	Dada
Acceleració de la gravetat	m/s ²	9,81
Densitat de fluid de treball de la bomba (aigua a 20 °C)	kg/m ³	998
Pèrdues de càrrega lineals unitàries en tubs de coure ¹	mm.c.a/m	8,2
Diàmetre de la canonada d'aspiració i impulsió	m	0,150
Longitud de la canonada d'aspiració	m	7,5
Longitud de la canonada d'impulsió	m	600
Altura geomètrica d'aspiració	m	15
Altura geomètrica d'impulsió	m	60

Taula 11.2. Dades de què es disposa sobre la bomba i la instal·lació.

¹ Aquesta dada s'obté per mitjà de l'àbac de la figura 11.12, a partir del diàmetre de la canonada i el cabal volumètric mesurat en la bomba

Paràmetres	Unitats	Dada
Cabal volumètric de la bomba	m ³ /s	0,0194
Potència elèctrica del motor que alimenta la bomba	kW	15

Taula 11.3. Dades mesurades en la bomba.

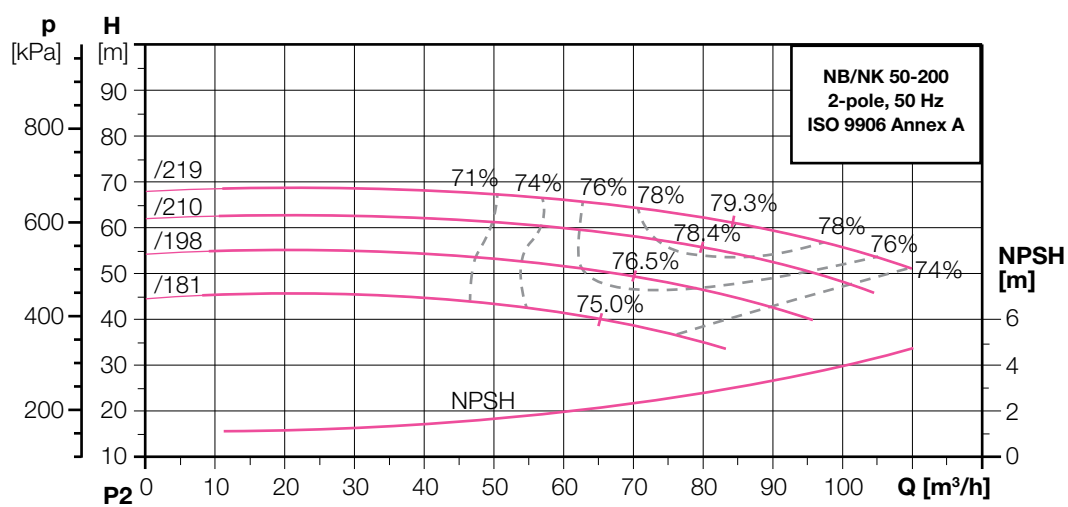


Figura 11.19. Corbes característiques d'altura manomètrica davant el cabal de la bomba que opera a la instal·lació.

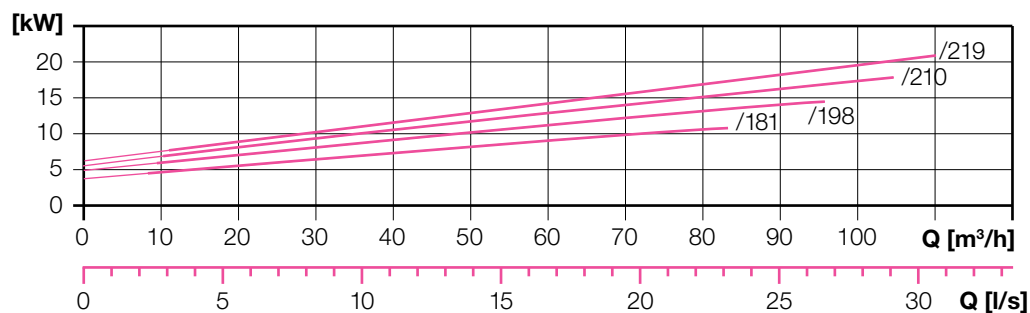


Figura 11.20. Corbes característiques de potència mecànica davant el cabal de la bomba que opera a la instal·lació.

7.3 Càlculs i resultat

A partir de les dades referenciades la Taula 11.2 i la Taula 11.3 i amb la corba característica 198 de la Figura 11.19 i la Figura 11.20, es procedeix en primer lloc a efectuar el balanç energètic en la instal·lació per tal de calcular l'altura manomètrica proporcionada per la bomba a l'aigua.

L'energia deguda a la pressió relativa i velocitat del fluid en la instal·lació són nul·les, ja que els punts 1 i 2 estan situats a la superfície lliure del líquid i a pressió atmosfèrica.

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

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

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

$$h_{1-2} = h_L = J \cdot (L_1 + L_2)$$

$$h_{1-2} = 8,2 \frac{\text{mm.c.a}}{\text{m}} \cdot (7,5 + 600) \text{m} = 4981,5 \text{ mm} \rightarrow 4,98 \text{ m}$$

$$H_b = (60 - 15) \text{m} + 4,98 = 49,98 \approx 50 \text{ m}$$

Un cop es coneix l'altura manomètrica que proporciona la bomba al fluid se'n pot calcular la potència hidràulica:

$$P_h = \gamma \cdot \dot{V}_b \cdot H_b$$

$$P_h = g \cdot \rho \cdot \dot{V}_b \cdot H_b$$

$$P_h = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0194 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 50 \text{m} = 9496,7 \text{ W} \rightarrow 9,49 \text{ W} \approx 9,5 \text{ kW}$$

Amb la potència hidràulica calculada i la potència elèctrica subministrada, ja es pot calcular el rendiment global de la bomba:

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

$$\eta_b = \frac{9,5 \text{ kW}}{15 \text{ kW}} \cdot 100 = 63,3 \%$$

De manera addicional s'ha calculat el rendiment hidràulic a partir de les corbes de potència mecànica davant el cabal (Figura 11.20):

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

$$\eta_b = \frac{9,5 \text{ kW}}{12,5 \text{ kW}} \cdot 100 = 76 \%$$

7.4. Comentaris

Es pot comprovar que el rendiment global obtingut per la bomba és força més baix que el rendiment hidràulic, i és així perquè existeix una pèrdua energètica en els mecanismes de la bomba i, per tant, no se subministra al fluid en forma de potència hidràulica.

D'altra banda, es pot observar a partir de les corbes de rendiment davant el cabal (Figura 1.19), que el rendiment hidràulic en les condicions de funcionament de la bomba (69,8 m³/h) és de 76,5% i l'obtingut a partir del càlcul és de 76%.

Es pot dir que la bomba funciona correctament perquè, en les condicions de funcionament, el rendiment hidràulic que s'obté en el càlcul és molt similar al que s'observa a les corbes.

Cal dir que, si s'optimitzen les condicions de funcionament de la bomba o s'utilitzen altres tipus de bombes i motors elèctrics més eficients, es podria augmentar considerablement el rendiment hidràulic i el global de la bomba.

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] AGÜERA SORIANO, J. *Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas*. Editorial Ciencia 3, S.L 5a edició actualitzada. ISBN 84-95391-01-05. Pàgina 512, Figura 12-10.

