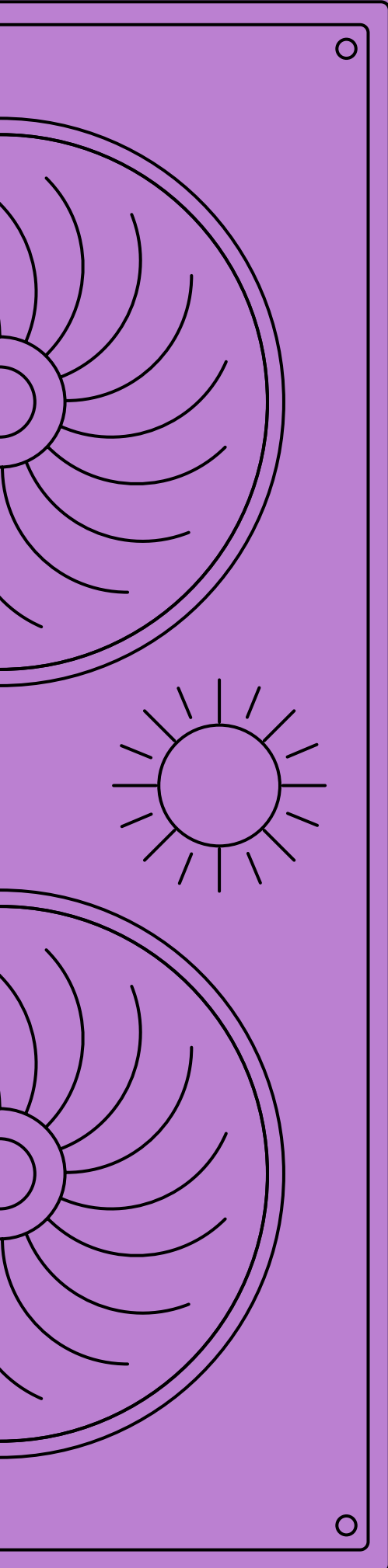


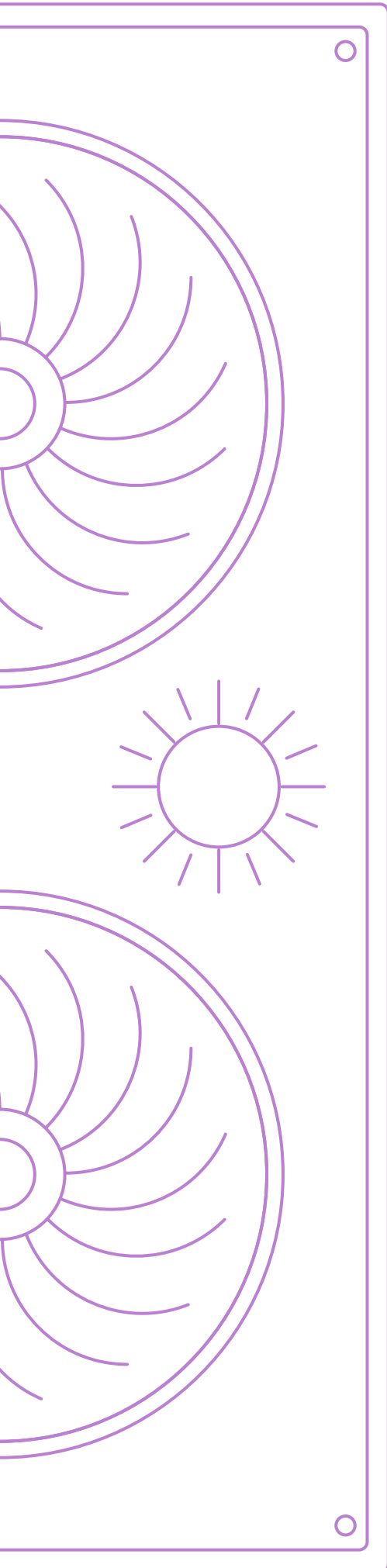
COL·LECCIÓ
BALANÇ ENERGÈTIC
D'EQUIPS CONSUMIDORS
MESURA I CÀLCUL

BOMBES
DE CALOR

10







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

BOMBES
DE CALOR

10

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 Piguillem - EFIENER ENGINYERIA SLP

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	9
1.3	Abast del mòdul	9
1.4	Dades macroenergètiques	10
2	Descripció del sistema	10
2.1	Definició	10
2.2	Principis de funcionament i paràmetres	10
2.3	Tipologies d'equip	11
2.4	Normativa aplicable	13
2.5	Descripció gràfica	14
3	Definició del balanç energètic	16
3.1	Descripció del balanç energètic	16
3.2	Esquema del balanç energètic	16
4	Bases de càlcul	18
4.1	Formulació	18
4.2	Taules i diagrames	22
5	Planificació de mesures	24
5.1	Dades de què es disposa	24
5.2	Dades a mesurar	24
5.3	Inventari d'aparells de mesura	25
5.4	Seguretat en persones i equips	27
6	Realització de les mesures	28
6.1	Mesura de les temperatures de superfície	28
6.2	Mesura de la temperatura, humitat relativa i velocitat de l'aire	29
6.3	Mesura del cabal de líquids	30
6.4	Mesura de voltatge, intensitat i factor de potència	31

7	Exemple pràctic	32
7.1	Enunciat	32
7.2	Dades	32
7.3	Càlculs i resultat	33
7.4	Comentaris	34
8	Exemple pràctic	34
8.1	Enunciat	34
8.2	Dades	34
8.3	Càlculs i resultat	35
8.4	Comentaris	36
9	Referències	37

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 el desè d'aquesta col·lecció que pren com a sistema d'estudi la bomba de calor. El balanç energètic, calcula la relació entre la potència frigorífica o calorífica resultant i l'energia subministrada a la bomba per aconseguir-ho.

1. Introducció

1.1. Justificació del mòdul

Dins el camp de la climatització d'espais tancats, la bomba de calor destaca com un dels principals equips disponibles. La característica d'aquest tipus d'equips és que transporta la calor d'un focus fred a un focus calent, aprofitant l'efecte de la calor latent d'un fluid. Per fer-ho necessita l'aportació d'energia, ja que un flux de calor per si sol viatja en sentit invers. Cal dir que l'eficiència d'aquests equips és superior a la unitat, és a dir que es produeix més energia de la que necessita per transportar la calor.

Tal com se cita a l'Estudi tecnològic del fred industrial i les seves millors tecnologies disponibles en consum d'energia [1] "L'ús ineficient de l'energia és un malbaratament dels recursos i una contribució a l'escalfament global de la terra que prové majoritàriament del sistema de generació d'energia utilitzat per accionar els sistemes de refrigeració més que de l'emissió de refrigerants a l'atmosfera".

Tenint en compte aquest estudi, és necessari dur a terme un balanç energètic en aquests equips amb la finalitat d'avaluar si hi ha problemes que poden ocasionar una pèrdua energètica. Alguns d'aquests problemes poden ser la pèrdua de calor en canonades per un mal aïllament d'aquestes, l'embrutiment de les canonades a l'evaporador/condensador o el funcionament erroni de la vàlvula d'expansió i/o del compressor (aquests últims són els més usuals).

1.2. Objectiu del mòdul

L'objectiu d'aquest mòdul és proporcionar unes directrius i unes bases de càlcul per poder dur a terme una sèrie de mesures en bombes de calor, amb la finalitat d'elaborar un balanç energètic en aquests equips i acabar calculant-ne l'eficiència energètica.

1.3. Abast del mòdul

Aquest mòdul es centra en totes les tipologies de bomba de calor utilitzades sobretot en processos de climatització d'espais tancats, en processos industrials i escalfament d'aigua i piscines.

Les bombes de calor es poden classificar segons la naturalesa de les fonts freda i calenta, la naturalesa dels fenòmens endotèrmics i exotèrmics, la font d'energia que utilitzen i la seva configuració en el muntatge.

A l'apartat 2.3 es mostren amb més detall les tipologies que s'inclouen a la classificació anterior.

1.4. Dades macroenergètiques

Segons l'Estudi tecnològic del fred industrial i les seves millors tecnologies disponibles en consum d'energia [1], el 2005, al voltant del 15% del consum elèctric mundial s'utilitzava per accionar equips de refrigeració o d'aire condicionat.

2. Descripció del sistema

2.1. Definició

Les bombes de calor són màquines tèrmiques que permeten transferir energia en forma de calor d'un focus a un altre, segons es requereixi.

Aquests dispositius transporten la calor d'un focus fred a un focus calent amb l'aportació d'energia, encara que acostumen a ser reversibles i tant es poden utilitzar per escalfar com per refredar.

Bàsicament consta de cinc elements que duen a terme el cicle de compressió o d'absorció: el fluid refrigerant, un evaporador, un compressor, un condensador i una vàlvula d'expansió. En el cas del cicle d'absorció, el compressor és substituït per un absorbidor i un generador.

Gràcies a aquests cinc elements es produeix fred o calor segons el mode en què estigui actuant la bomba de calor. Per això, resulten un equip molt útil en climatització d'edificis i/o espais tancats. A més a més, estan guanyant terreny en aplicacions d'escalfament d'aigua, piscines i processos industrials.

Cal assenyalar que en processos industrials també s'utilitzen refredadores, que no deixen de ser bombes de calor que actuen només en cicle frigorífic.

2.2. Principis de funcionament i paràmetres

La base de funcionament d'aquest dispositius és l'anomenat cicle de fred que s'inicia a l'evaporador on el fluid refrigerant s'evapora (absorbint calor) a baixa temperatura i a baixa pressió. Tot seguit, el fluid entra al compressor, on augmenta la pressió fins que és prou elevada per provocar la condensació al condensador, a temperatura ambient. A continuació, el fluid frigorígen entra al condensador on es produeix la condensació (cedint calor). Finalment, el fluid condensat entra en una vàlvula d'expansió que provoca una forta davallada de la pressió fins a la pressió de treball de l'evaporador, que produeix, en la majoria de casos, una evaporació parcial del refrigerant (Figura 10.1).

En el cas de tractar-se d'una bomba de calor per absorció, utilitza energia tèrmica en comptes d'energia mecànica per funcionar. Tal com s'ha esmentat anteriorment, aquest

tipus de bombes de calor incorporen un absorbidor i un generador en comptes d'un compressor.

A l'absorbidor hi ha una mescla formada pel fluid refrigerant i un absorbent. Aquesta combinació és un procés exotèrmic que genera calor i que és bombejada cap al generador. Aquí, i amb l'aportació d'energia, se separa la mescla, de manera que obté una solució pobra en frigorigen que es retorna a l'absorbidor, i una solució amb frigorigen pur o amb un mínim d'absorbent que s'envia al condensador. En aquest punt es condensa, passa per una vàlvula d'expansió i torna a l'evaporador, on es vaporitza i torna a entrar a l'absorbidor.

Tenint en compte el funcionament de les bombes de calor i amb l'objectiu de calcular-ne l'eficiència, s'ha de caracteritzar la potència frigorífica o calorífica que genera i la potència elèctrica o tèrmica que necessita per funcionar.

En definitiva, els paràmetres que es necessitaran són: el tipus de fluid refrigerant (en el seu defecte es pot considerar el fluid amb què intercanvia calor), temperatura d'entrada del fluid a la bomba i temperatura de sortida, cabal volumètric o màssic, altres paràmetres com la calor específica i la densitat, i també és interessant tenir el voltatge, la intensitat de corrent i el factor de potència del compressor.

En el cas que un dels fluids de bescanvi sigui aire, com per exemple passa en bombes de calor aire-aire, aigua-aire o aire-aigua, s'ha de tenir en compte l'energia associada amb l'aigua, que conté aquest aire en forma de vapor d'aigua. Per tant, a efectes de poder-ho calcular s'han de tenir en compte la pressió de vapor, l'entalpia de vapor d'aigua i la humitat relativa i temperatura de l'aire, a més a més dels altres paràmetres esmentats anteriorment.

Finalment, si es tracta d'una bomba de calor per absorció, s'ha de tenir en compte la potència tèrmica que s'aporta al generador en comptes de la potència elèctrica. Per tant, s'ha de considerar el tipus de fluid que intercanvia calor amb la mescla bicomponent per caracteritzar paràmetres propis del fluid com la calor específica i la densitat. A part, també s'ha de tenir en compte la temperatura d'entrada i sortida d'aquest fluid al generador i el seu cabal màssic o volumètric.

2.3. Tipologies d'equip

Hi ha diferents classes de bomba de calor, segons la classificació realitzada en l'apartat 1.3. A continuació es mostren amb més detall les més utilitzades.

Segons la naturalesa de les fonts freda i calenta, es té:

Bombes de calor aire-aire. És una bomba de calor que intercanvia la calor entre l'aire

de diferents ambients, com per exemple l'aire interior i exterior d'un local a climatitzar, l'aire humit d'un assecador, aire preescalfat per a processos industrials, etc. Com a problema, cal destacar la gran variabilitat de l'aire i la formació de gel a baixes temperatures. En cas que es tracti d'aire d'extracció d'un altre local, un altre problema és la disponibilitat.

Bombes de calor aire-aigua. Aquests aparells s'utilitzen fonamentalment per generar aigua calenta i aigua calenta sanitària. L'aire com a focus fred pot ser exterior, extret d'un local calefaccionat o aire humit provinent d'assecadors o d'altres processos. Pel que fa a l'aigua com a focus calent, pot ser provinent d'un circuit de calefacció, aigua calenta per processos, etc. (Figura 10.1).

Bombes de calor aigua-aire. Aquest cas és molt similar a l'anterior, però intercanviant els fluids, en aquest cas l'aire en el focus calent i l'aigua en el focus fred. S'utilitzen majoritàriament per refredar aigua, per escalfar aire o preescalfar-lo per a processos industrials.

Bomba de calor aigua-aigua. Utilitzen al focus fred fonamentalment aigües naturals, de rius i llacs, aigües subterrànies, etc. I al focus calent aigua de retorn de calefacció, aigua calenta de processos, etc.

Bomba de calor geotèrmica. Aquest tipus de bomba transfereix la calor entre el sòl i l'aigua o l'aire. Consisteixen bàsicament en la unió de qualsevol de les anteriors tipologies amb el subsòl, mitjançant aigua directa del mateix subsòl (del nivell freàtic, d'aqüífers, etc.) o mitjançant un circuit tancat d'aigua glicolada per evitar-ne la congelació. El seu principi de funcionament se centra en el fet que el subsòl manté una temperatura constant d'uns 15 °C, sempre que no es tracti de terrenys amb activitats volcàniques. Aquesta temperatura és sempre més baixa que la temperatura ambient a l'estiu, i a la inversa a l'hivern, fet que implica que l'extracció de calor del terreny o l'addició de fred es faci de la manera més òptima i eficient. Per tot això, aquest tipus de bombes de calor s'utilitzen tant per a climatització d'espais com per refredar i escalfar aigua o altres fluids (Figura 10.5).

Segons la naturalesa dels fenòmens endotèrmics i exotèrmics, es té:

Bombes de calor per compressió. Es tracta d'un tipus de bomba de calor on els fenòmens endotèrmics a l'evaporador i els fenòmens exotèrmics al condensador es produeixen mitjançant l'aportació d'energia mecànica. Poden ser de compressió simple o per etapes, amb injecció de vapor parcial o total, i màquines en cascada.

Bombes de calor per absorció. En aquest cas la producció frigorífica o calorífica es duu a terme mitjançant l'aportació d'energia tèrmica. Consta de dues unitats endotèrmiques (evaporador i generador) i dues unitats exotèrmiques (absorbidor i condensador). Les mescles refrigerant i absorbent més utilitzades són amoníac-aigua i aigua-bromur de liti. Poden ser amb una sola etapa o amb múltiples etapes (Figura 10.4).

Per la font d'energia que utilitzen, es té:

Bombes de calor de motor elèctric, de gas i altres combustibles o bombes de calor d'absorció accionades per energies renovables, com la solar, o per calor d'extracció i/o de recuperació de processos.

Per definició, es pot dir que les bombes de calor són equips autònoms de generació de fred i calor. Com a tal, es poden classificar segons el muntatge, i així en trobem de calor compactes, partides o *split* i *multisplit* (Figures 10.2 i 10.3).

Les unitats compactes, tal com indica el seu nom, estan formades per una única unitat compacta que conté tots els dispositius d'una bomba de calor.

Les bombes de calor partides o *split* estan formades per dues unitats: la condensadora formada pel condensador i el compressor, que normalment se situa a l'exterior del local a climatitzar, i la unitat climatitzadora, formada per l'evaporador i el ventilador que se situa dins el local a climatitzar. Cal comentar que l'evaporador, o el condensador en el cas d'una bomba de calor reversible, s'intercanvien segons si actuen en mode calefacció o en mode refrigeració.

El cas del muntatge *multisplit* és molt similar a l'anterior però amb la diferència que existeix més d'una unitat interior per una sola unitat exterior.

2.4. Normativa aplicable

La normativa aplicable en aquest mòdul és bàsicament el Reglament d'instal·lacions tèrmiques als edificis (RITE) [2] del 2007 i el Reial decret 187/2011 [3], corresponent a la transposició espanyola de la Directiva d'ecodisseny 2009/125/CE [4].

Pel que fa a la pèrdua de calor a través de les canonades de les bombes, al reglament esmentat s'exigeix que s'hi incorpori aïllament. També s'exigeix una mínima espessor en funció del diàmetre exterior de la canonada i de la diferència de temperatures.

A més, a la instrucció tècnica IT 1 i concretament a l'apartat IT 1.2.4.1, *Generación de calor y frío*, es mostren una sèrie d'instruccions amb la finalitat de caracteritzar i quantificar l'exigència d'eficiència energètica en la generació de fred o calor.

En aquest apartat es destaca bàsicament l'exigència d'ajustar el dimensionament de potència dels equips de generació de fred i calor a la demanda tèrmica del local i comptabilitzar les pèrdues de calor que hi poden haver a través de les canonades i fluids termòfors.

També s'exigeix que la temperatura de sortida, en el cas d'aigua refrigerada, es mantingui constant, excepte situacions en què es justifiqui el contrari.

El salt de temperatura en els equips de fred serà una funció creixent de la potència del generador o generadors de fred, fins al límit establert pel fabricant amb la finalitat d'estalviar energia.

En el cas del Reial decret 187/2011, és d'aplicació amb els productes relacionats amb l'energia (ErP), ja sigui pel seu consum directe d'energia com pel fet d'afectar al consum d'altres aparells. Aquesta normativa es materialitza en reglaments específics per a cada família de productes, els quals 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 10.1 a la Figura 10.5 es pot observar una mostra de les tipologies de bomba de calor descrites a l'apartat 2.3.

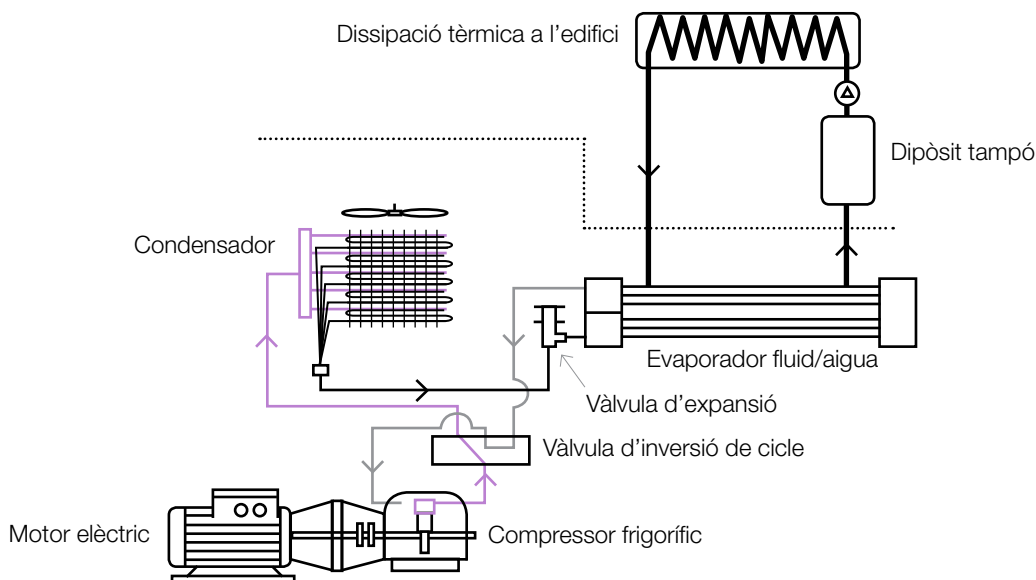


Figura 10.1. Bomba de calor aire-aigua amb compressor accionat per motor elèctric i treballant en cicle de refrigeració. Tota la màquina és a l'exterior.

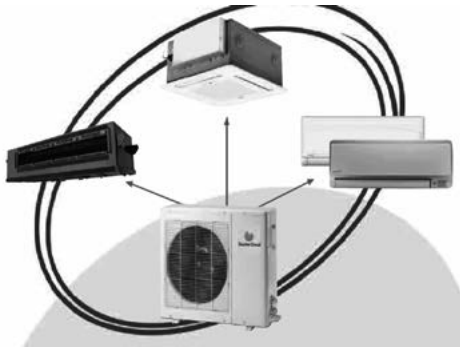


Figura 10.2. Bomba de calor multisplit.



Figura 10.3. Bomba de calor aire-aire split o partida.

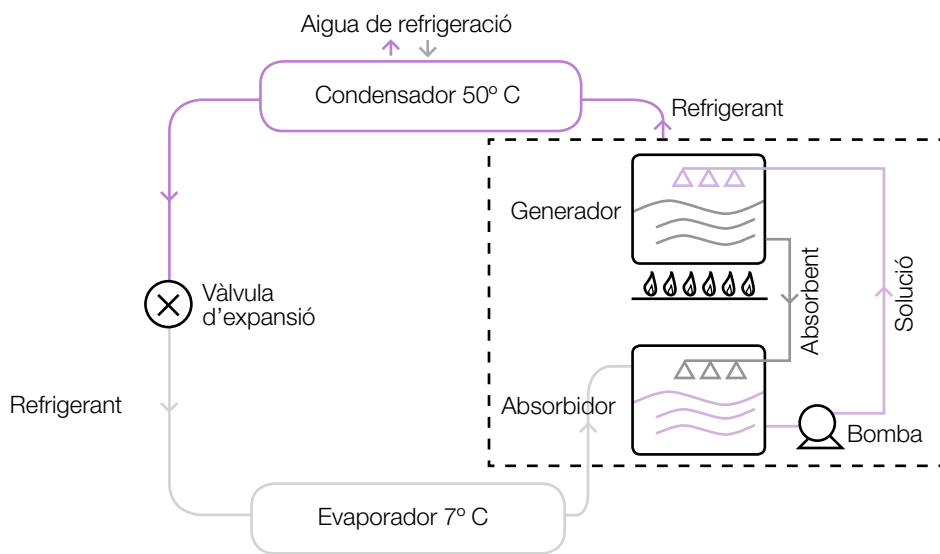


Figura 10.4. Bomba de calor per absorció.

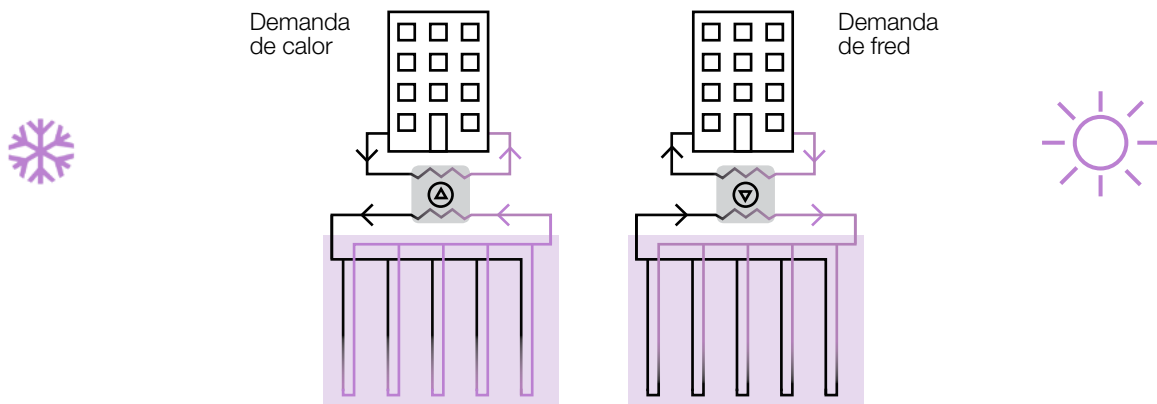


Figura 10.5. Bomba de calor geotèrmica mitjançant un sistema tancat.

3. Definició del balanç energètic

3.1. Descripció del balanç energètic

A les bombes de calor el balanç energètic té la finalitat de caracteritzar els fluxos d'energia per acabar calculant l'eficiència energètica o COP (*Coefficient Of Performance*), és a dir, la relació entre la potència frigorífica o calorífica que s'aconsegueix i l'energia subministrada per fer-ho.

Per tant, al balanç energètic d'una bomba de calor per compressió es comptabilitzen com a entrades la potència tèrmica associada a l'evaporador i la potència consumida pel compressor, i es comptabilitza com a sortida la potència tèrmica associada al condensador.

A les bombes de calor per absorció, el balanç energètic s'executa de manera diferent. Com a entrades es consideren la potència tèrmica associada a l'evaporador i l'associada al generador, i com a sortides la potència tèrmica associada al condensador i a l'absorbidor.

Cal comentar que el càlcul de la potència consumida al compressor depèn del tipus d'energia que utilitza per funcionar, ja que pot ser elèctrica o proporcionada per la combustió de combustibles fòssils o altres.

3.2. Esquema del balanç energètic

A l'Equació 10.1 es mostra la relació entre les potències tèrmiques de l'evaporador, del condensador i la consumida pel compressor. I a la Figura 10.6 es pot observar l'esquema del balanç energètic en una bomba de calor de compressió simple.

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_e + \dot{W}_e \quad \text{Equació 10.1}$$

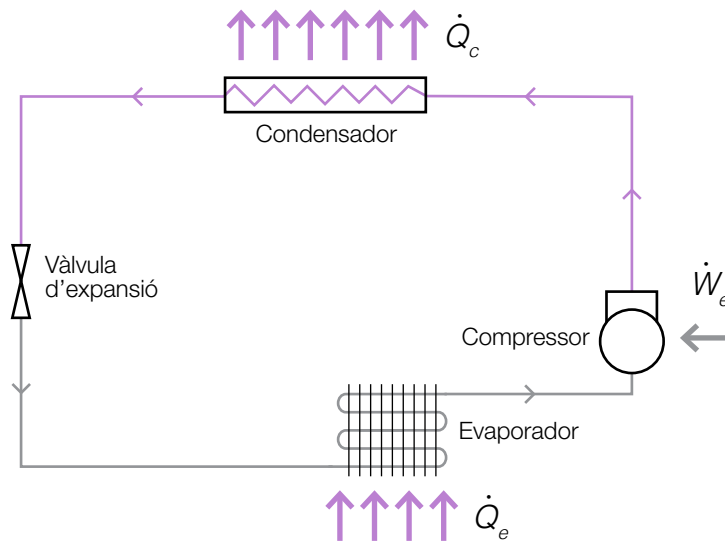


Figura 10.6. Esquema del balanç energètic en una bomba de calor de compressió simple.

A l'Equació 10.2 es mostra la relació en el balanç energètic entre la potència tèrmica associada a l'evaporador, absorbidor, generador i condensador, en una bomba de calor per absorció. L'esquema del balanç energètic a les bombes de calor per absorció es mostra a la Figura 10.7.

$$\dot{Q}_c + \dot{Q}_a = \dot{Q}_e + \dot{Q}_g \quad \text{Equació 10.2}$$

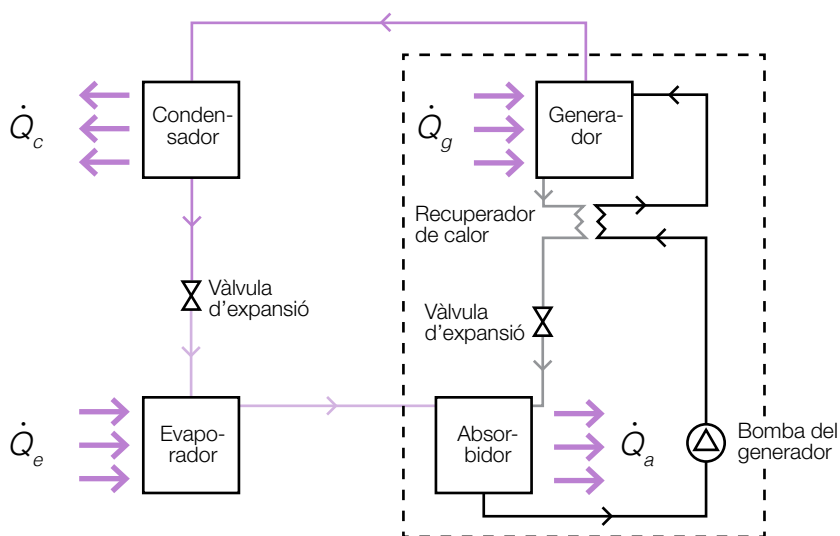


Figura 10.7. Esquema del balanç energètic en una bomba de calor per absorció de simple etapa.

4. Bases de càlcul

4.1. Formulació

En primer lloc s'ha de tenir en compte de quin tipus de bomba de calor es tracta pel que fa a la naturalesa de les fonts freda i calenta, segons els fenòmens endotèrmics i exotèrmics i en quin mode està funcionat (refrigeració o calefacció), ja que el COP canvia.

Tot seguit es pot calcular la potència tèrmica associada al flux que intercanvia calor amb l'evaporador o el condensador, segons el mode en què funcioni la bomba de calor.

Per a fluids diferents a l'aire es calcula mitjançant l'Equació 10.3:

$$\dot{Q}_e = \dot{V}_e \cdot \rho_e \cdot c_{pe} \cdot \Delta T \quad \text{Equació 10.3}$$

On:

\dot{Q}_e [W] correspon a la potència tèrmica del fluid que intercanvia calor amb l'evaporador.

\dot{V}_e [m³/s] correspon al cabal volumètric del fluid que intercanvia calor amb l'evaporador.

ρ_e [kJ/kg·°C] correspon a la calor específica del fluid que intercanvia calor amb l'evaporador. Valor extret de taules de propietats tèrmiques de fluids.

c_{pe} [kg/m³] correspon a la densitat del fluid que intercanvia calor amb l'evaporador. Valor extret de taules de propietats tèrmiques de fluids.

ΔT [°C] correspon a la diferència de temperatures entre l'entrada i la sortida del fluid a l'evaporador.

Si la bomba de calor actua en mode calefacció, es pot calcular de la mateixa manera la potència tèrmica associada al fluid que intercanvia calor amb el condensador \dot{Q}_c .

En el cas que un dels fluids sigui aire, s'ha de tenir en compte l'energia tèrmica associada al vapor d'aigua que aquest conté. Per tant, per calcular la potència tèrmica de l'aire humit sense tenir en compte la condensació de l'aigua, s'ha d'utilitzar a l'Equació 10.4:

$$\dot{Q}_{aire} = \dot{V}_{aire} \cdot \rho_{aire} \cdot \Delta h_{aire} \quad \text{Equació 10.4}$$

On:

\dot{Q}_{aire} [W] correspon a la potència tèrmica de l'aire.

\dot{V}_{aire} [m³/s] correspon al cabal volumètric d'aire. Es calcula segons l'Equació 10.5.

ρ_{aire} [kg/m³] correspon a la densitat de l'aire. Valor extret de la Taula 10.2, avaluat a la temperatura mitjana de l'aire.

Δh_{aire} [kJ/kg] correspon a l'increment d'entalpia específica de l'aire humit a les temperatures d'entrada i sortida del bescanviador.

$$\dot{V}_{aire} = v_{aire} \cdot S \quad \text{Equació 10.5}$$

On:

v_{aire} [m/s] correspon a la velocitat de l'aire.

S [m²] correspon a la secció de la canonada per on circula l'aire.

La variable Δh_{aire} es pot calcular amb la diferència d'entalpies calculades per a cada una de les temperatures, segons l'Equació 10.6:

$$h_{aire} = c_{p,aire} \cdot T_{aire} + r (h_v + c_{pv} \cdot T_{aire}) \quad \text{Equació 10.6}$$

On:

h_{aire} [kJ/kg] correspon a l'entalpia específica de l'aire humit.

$c_{p,aire}$ [kJ/kg·°C] correspon a la calor específica a pressió constant de l'aire. Valor extret de la Taula 10.2, avaluat a la temperatura mitjana de l'aire.

T_{aire} [°C] correspon a la temperatura de l'aire.

r [kg_{aigua}/kg_{aire}] correspon a la humitat específica de l'aire. Es calcula segons l'Equació 10.7.

h_v [kJ/kg] correspon a l'entalpia específica de vapor saturat. Valor extret de la Taula 10.1 avaluat a la temperatura mitjana de l'aire.

C_{pv} [kJ/kg·°C] correspon a la calor específica del vapor d'aigua. Valor extret de la Taula 10.1 avaluat a la temperatura mitjana de l'aire.

$$r = 0,6215 \frac{P_v}{P_{aire} - P_v} \quad \text{Equació 10.7}$$

On:

P_v [kPa] correspon a la pressió de vapor d'aigua a la temperatura de l'aire en °C. Es calcula segons l'Equació 10.8.

P_{aire} [kPa] correspon a la pressió l'aire. Es pot considerar com la pressió atmosfèrica de 101,325 kPa en equips de climatització.

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{vs} \quad \text{Equació 10.8}$$

On:

P_{vs} [kPa] correspon a la pressió del vapor saturat a la temperatura de l'aire. Es calcula segons l'Equació 10.9.

HR [%] correspon a la humitat relativa de l'aire.

$$P_{vs} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[\frac{17,27 \cdot T_{aire}}{237,3 + T_{aire}} \right]}}{10} \quad \text{Equació 10.9}$$

Una altra manera de calcular l'entalpia específica de l'aire és mitjançant el diagrama psicromètric de la Figura 10.8.

Per calcular el COP de la bomba de calor també es necessita la potència elèctrica consumida pel compressor, calculada amb l'Equació 10.10 per a un compressor trifàsic i amb l'Equació 10.11 per a un compressor monofàsic.

$$\dot{W}_e = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad \text{Equació 10.10}$$

On:

\dot{W}_e [W] correspon a la potència elèctrica consumida pel compressor.

V [V] correspon al voltatge de la instal·lació elèctrica que alimenta el compressor.

I [A] correspon a la intensitat de corrent de la instal·lació elèctrica que alimenta el compressor.

$\cos\varphi$ [-] correspon al factor de potència de la instal·lació elèctrica que alimenta el compressor.

$$\dot{W}_e = V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad \text{Equació 10.11}$$

En el cas d'una bomba de calor per absorció, s'ha de calcular la calor bescanviada al generador, Q_g , en comptes de la potència elèctrica del compressor.

El càlcul s'efectua, coneixent el fluid que intercanvia calor amb el generador, de la mateixa manera que a l'Equació 10.3 per a fluids diferents a l'aire i amb l'Equació 10.4 per l'aire.

Finalment, mitjançant les equacions que van des de l'Equació 10.12 fins a l'Equació 10.15, es pot calcular el COP de la bomba de calor per compressió en mode refrigeració i calefacció, com també el COP de la bomba de calor per absorció en els dos modes.

$$COP_F = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_e} \quad \text{Equació 10.12}$$

On:

COP_F [-] correspon al coeficient d'eficiència energètica de la bomba de calor per compressió en mode refrigeració.

$$COP_C = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}_e} \quad \text{Equació 10.13}$$

On:

COP_C [-] correspon al coeficient d'eficiència energètica de la bomba de calor per compressió en mode calefacció.

$$COP_{a,F} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \quad \text{Equació 10.14}$$

On:

$COP_{a,F}$ [-] correspon al coeficient d'eficiència energètica de la bomba de calor per absorció en mode refrigeració.

$$COP_{a,C} = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_g} \quad \text{Equació 10.15}$$

On:

$COP_{a,C}$ [-] correspon al coeficient d'eficiència energètica de la bomba de calor per absorció en mode calefacció.

4.2. Taules i diagrames

En la Taula 10.1 es mostren les propietats físiques i termodinàmiques de l'aigua saturada en funció de la temperatura.

Temperatura °C	Pressió de saturació kPa	Densitat kg/m ³		Entalpia kJ/kg			Calor específic J/kg·°C	
		ρ		h _l	h _{lv}	h _v	C _p	
		Líquid	Vapor	Líquid	Vaportització	Vapor	Líquid	Vapor
12	1,403	999,0	0,011	50,40	2472	2522,8	4192	1862
15	1,706	999,0	0,013	62,97	2465	2528,3	4186	1863
20	2,339	998,0	0,017	83,90	2543	2537,4	4182	1867
30	4,246	996,0	0,030	125,72	2430	2555,5	4178	1875
40	7,384	992,1	0,051	167,52	2407	2573,5	4179	1885
45	9,593	990,1	0,065	188,42	2395	2582,4	4180	1892
50	12,35	988,1	0,083	209,33	2383	2591,3	4181	1900
55	15,76	985,2	0,104	230,25	2371	2600,1	4183	1908
60	19,94	983,3	0,13	251,18	2359	2608,8	4185	1916
65	25,03	980,4	0,161	272,11	2346	2617,46	4187	1926
70	31,19	977,5	0,198	293,07	2334	2626,1	4190	1936
75	38,58	974,7	0,242	314,02	2321	2634,5	4193	1948
80	47,39	971,8	0,293	335,01	2309	2643	4197	1962
85	57,83	968,1	0,354	356,01	2296	2651,23	4201	1977
90	70,14	965,3	0,423	377,04	2283	2659,5	4206	1993
95	84,55	961,5	0,504	398,08	2270	2667,5	4212	2010
100	101,33	957,9	0,598	419,17	2257	2675,6	4217	2029
110	143,27	950,6	0,826	461,41	2230	2690,9	4229	2071
120	198,53	943,4	1,121	503,81	2203	2705,9	4244	2120
130	270,1	934,6	1,496	646,39	2174	2720	4263	2177
140	361,3	921,7	1,965	589,16	2145	2733,4	4286	2244
150	475,8	916,6	2,546	632,21	2114	2746,1	4311	2314
160	617,8	907,4	3,256	675,47	2083	2757,4	4340	2420
170	791,7	897,7	4,119	719,14	2050	2768,5	4370	2490

Taula 10.1. Propietats físiques i termodinàmiques de l'aigua saturada.

A la Taula 10.2 es mostren les propietats tèrmiques de l'aire a 1 atm de pressió.

En el cas que un dels fluids sigui aire, es pot calcular l'entalpia específica de l'aire humit per quilogram d'aire sec en funció de la temperatura i la humitat relativa de l'aire mitjançant el diagrama psicomètric de la Figura 10.8.

Temperatura °C	Densitat kg/m ³	Calor específic J/kg·°C
T	ρ	Cp
250	1,413	1003
280	1,271	1004
290	1,224	1005
298	1,186	1005
300	1,177	1005
310	1,143	1006
320	1,11	1006
330	1,076	1007
340	1,043	1007
350	1,009	1008
400	0,883	1008
450	0,785	1013
500	0,706	1020
550	0,642	1029
600	0,589	1039

Taula 10.2. Propietats físiques de l'aire a 1 atm de pressió.

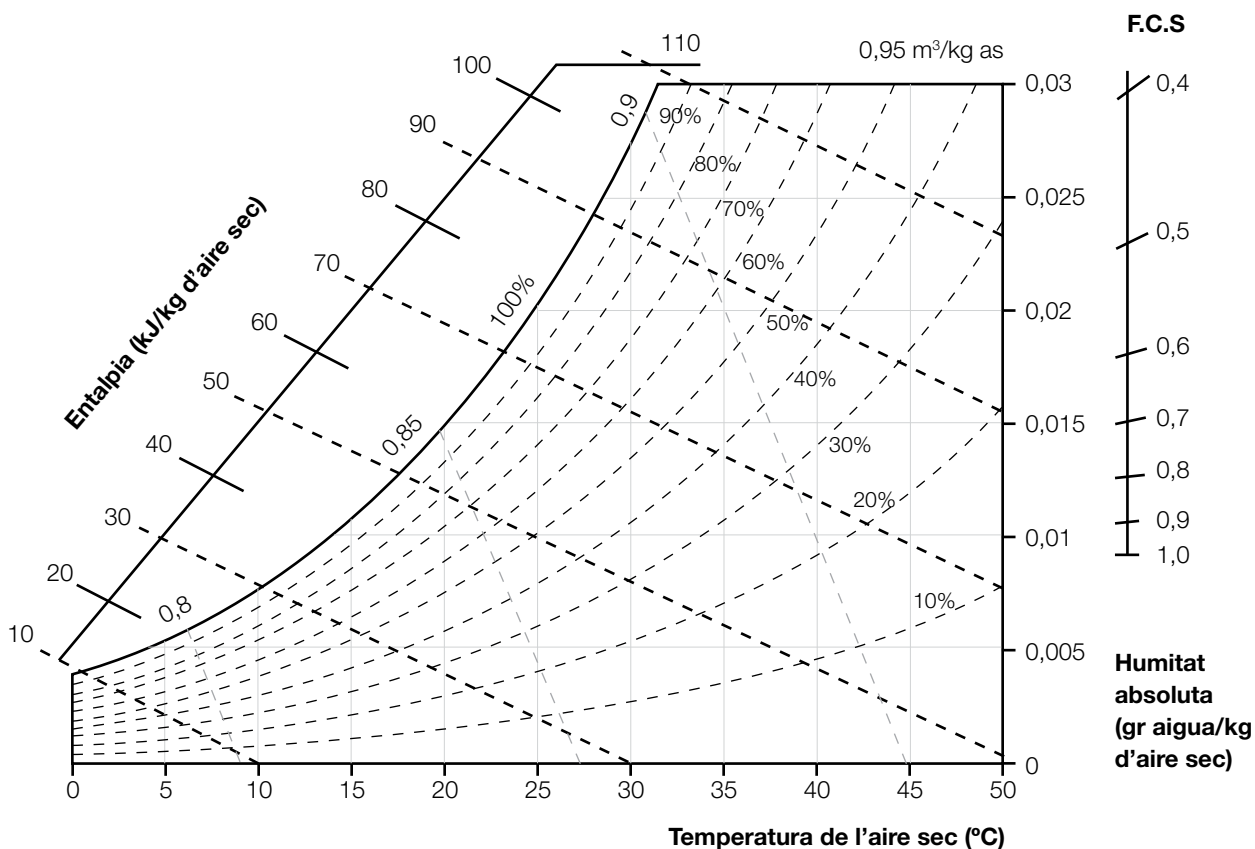


Figura 10.8. Diagrama psicromètric a pressió atmosfèrica (101,325 kPa) [7].

5. Planificació de mesures

5.1. Dades de què es disposa

Per a afluïds diferents a l'aire:

- Densitat del fluid que intercanvia calor amb l'evaporador (mode refrigeració): ρ_e [kg/m³]
- Calor específica del fluid que intercanvia calor amb l'evaporador (mode refrigeració): C_{pe} [kJ/kg·°C]
- Densitat del fluid que intercanvia calor amb el condensador (mode calefacció): ρ_c [kg/m³]
- Calor específica del fluid que intercanvia calor amb el condensador (mode calefacció): C_{pc} [kJ/kg·°C]
- Densitat del fluid que intercanvia calor amb el generador (bomba de calor per absorció): ρ_g [kg/m³]
- Calor específica del fluid que intercanvia calor amb el generador (bomba de calor per absorció): C_{pg} [kJ/kg·°C]

Per a l'aire:

- Densitat de l'aire: ρ_{aire} [kg/m³]
- Calor específica de l'aire: $C_{p,aire}$ [kJ/kg·°C]
- Entalpia específica de vapor d'aigua: h_v [kJ/kg]
- Calor específica del vapor d'aigua: C_{pv} [kJ/kg·°C]
- Pressió de l'aire: P_{aire} [kPa]
- Dimensions de la secció per on circula l'aire [m²]

5.2. Dades a mesurar

Per a fluids diferents a l'aire:

- Temperatura del fluid a l'entrada de l'evaporador (mode refrigeració): $T_{e,in}$ [°C]
- Temperatura del fluid a la sortida de l'evaporador (mode refrigeració): $T_{e,out}$ [°C]
- Temperatura del fluid a l'entrada del condensador (mode calefacció): $T_{c,in}$ [°C]
- Temperatura del fluid a la sortida del condensador (mode calefacció): $T_{c,out}$ [°C]
- Temperatura del fluid a l'entrada del generador (bomba de calor per absorció): $T_{g,in}$ [°C]
- Temperatura del fluid a la sortida del generador (bomba de calor per absorció): $T_{g,out}$ [°C]
- Cabal volumètric del fluid a l'evaporador (mode refrigeració): \dot{V}_e [m³/s]
- Cabal volumètric del fluid al condensador (mode calefacció): \dot{V}_c [m³/s]
- Cabal volumètric del fluid al generador (bomba de calor per absorció): \dot{V}_g [m³/s]

Per l'aire, tant en mode refrigeració com en mode calefacció:

- Temperatura d'entrada: $T_{aire,in}$ [°C]
- Temperatura de sortida: $T_{aire,out}$ [°C]
- Humitat relativa d'entrada: HR_{in} [%]
- Humitat relativa de sortida: HR_{out} [%]
- Velocitat de l'aire: v_{aire} [m/s]

Altres dades a mesurar en bombes de calor per compressió:

- Tensió de la instal·lació elèctrica que alimenta el compressor: V [V]
- Corrent de la instal·lació elèctrica que alimenta el compressor: I [A]
- Factor de potència de la instal·lació elèctrica que alimenta el compressor: $\cos\phi$ [-]

5.3. Inventari d'aparells de mesura

- Termòmetre de contacte/termòmetre d'infraroig (Figura 10.9 i Figura 10.10 respectivament).

– Variable mesurada: $T_{e,in}, T_{e,out}, T_{c,in}, T_{c,out}, T_{g,out}, T_{g,in}$

- Termohigròmetre (Figura 10.11):

– Variables mesurades: $T_{aire,in}, T_{aire,out}, HR_{in}, HR_{out}, v_{aire}$

- Anemòmetre (Figura 10.12):

– Variables mesurades: v_{aire}

- Cabalímetre ultrasònic no invasiu per líquids (Figura 10.13):

– Variables mesurades: $\dot{V}_e, \dot{V}_c, \dot{V}_g$



Figura 10.9. Multímetre TESTO 435 + sonda de superfície.



Figura 10.10. Termòmetre d'infrarojos TESTO 845.



Figura 10.11. Multímetre TESTO 435 + sonda tèrmica de velocitat de fil calent.



Figura 10.12. Multímetre + sonda de velocitat tipus molinet.

a)



b)



c)



Figura 10.13. Cabalímetre FLEXIM Fluxus F601 + accessoris. a) Cabalímetre. b) Transductors. c) Maleta de transport del cabalímetre i accessoris.

- Analitzador de xarxes elèctriques (Figura 10.14):
 - Variable mesurada: V , I , $\cos\phi$, W_e , *desequilibri de fases*

a)



b)



c)



d)



Figura 10.14. 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 fer qualsevol mesura, és necessari i imprescindible llegir les instruccions d'ús del aparell o dispositiu de mesura.

Seguretat per a les persones. Prèviament als mesuraments s'ha de tenir en compte que la mesura de les temperatures $T_{e,in}$, $T_{e,out}$, $T_{c,in}$, $T_{c,out}$, $T_{g,in}$, $T_{g,out}$ es fan sobre la superfície de la canonada. En conseqüència, és aconsellable portar guants de protecció tèrmica per protegir-se contra possibles cremades, tant si es tracta de canonades que transporten fluids a alta temperatura com a baixa.

Per a la mesura de les variables $T_{aire,in}$, $T_{aire,out}$, HR_{in} , HR_{out} , v_{aire} , s'ha de tenir en compte certa prudència i mantenir una distància suficient per evitar ràfegues d'aire calent o fred.

En la mesura de les variables \dot{V}_e , \dot{V}_c , \dot{V}_g , s'ha de tenir en compte que el muntatge del cabalímetre es fa sobre la canonada. Per tant, per realitzar aquesta mesura també és convenient portar guants de protecció tèrmica.

En la mesura de les variables V , I , $\cos\phi$, i altres paràmetres elèctrics, s'ha de tenir en compte que es duu a terme sobre xarxes elèctriques en funcionament i, com a tal, la mesura s'ha d'executar per un tècnic expert amb carnet d'electricista, que no treballi mai sol, que disposi d'elements de protecció com guants, pantalla facial 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 el pla específic de riscos laborals de l'empresa.

Seguretat en equips. És aconsellable no tractar de manera brusca el multímetre, el termòmetre d'infrarojos, les sondes, i el cabalímetre. Cal prendre les mesures tenint en compte certes distàncies de seguretat amb els elements mòbils.

Igual que el multímetre, és aconsellable no tractar de manera brusca el cabalímetre i els accessoris. És un dispositiu força senzill de mantenir ja que incorpora un sistema de diagnosi d'errors que, bàsicament, poden ser electrònics, dels transductors o de la cel·la de flux. Sobretot s'han d'evitar fugues de líquids corrosius a prop dels transductors, tampoc no s'ha de muntar en superfícies molt dures o amb temperatures extremes, i cal evitar els xocs amb altres objectes. És convenient fixar-los fermament a la canonada, comprovar l'estat de les abraçadores que els subjecten i tractar de manera suau els connectors amb el cabalímetre, ja que són la part més fràgil.

Tampoc no és aconsellable tractar de manera brusca l'analitzador de xarxes i els accessoris, que és un aparell senzill de mantenir. Cal evitar tot ajustament, manteniment o reparació que impliqui l'obertura de l'equip, cosa que només pot fer personal qualificat.

Abans de qualsevol operació, modificació de les connexions, canvi, manteniment o reparació cal desconnectar l'aparell de tota font d'alimentació. Quan es sospiti d'un funcionament erroni o fallada de l'equip o de la protecció, s'ha de deixar fora de servei assegurant que no es pugui produir cap connexió accidental.

6. Realització de les mesures

6.1. Mesura de les temperatures de superfície

1. S'ha de connectar la sonda de superfície al multímetre i engegar l'aparell.
2. S'ha d'accedir a una zona de la canonada representativa.
3. S'ha d'aplicar pasta tèrmica al punt de mesura escollit per tal de facilitar la transmissió de calor cap a l'element sensor i incrementar la rapidesa de la mesura.
4. S'ha d'esperar fins a que el valor s'estabilitzi i anotar la mesura o guardar-la.
5. S'ha de repetir el procediment en diversos punts de la canonada.

És aconsellable treballar amb la sonda de superfície de tipus termoparell.

En el cas que es treballi amb el termòmetre d'infrarojos, s'han de seguir els passos següents:

1. S'ha d'ajustar l'emissivitat amb la tecla *Mode* en relació al material de la canonada segons la Taula 10.3.
2. Segons des de quina distància es mesuri, s'ha d'ajustar la mesura mitjançant l'interruptor lliscant de què disposa el termòmetre. Fins a 2 metres, cal fer lliscar l'interruptor endavant i fins a 10 metres, endarrere.
3. Cal accedir a una zona de la canonada representativa.
4. S'ha de prémer el gallet i dirigir el raig làser a la zona en qüestió on es vol mesurar la temperatura. Aleshores, cal esperar fins que el valor s'estabilitzi i anotar-lo o guardar-lo.
5. S'ha de repetir la mesura en diferents punts de la canonada.

Material	Emissivitat
Aigua	0,67 a 0,99
Acer **	0,80
Aliment congelat	0,96
Alumini *	0,03 a 0,30
Amiant	0,95
Asfalt	0,95
Basalt	0,70
Carbó	0,85 a 0,96
Cautxú	0,95
Ceràmica	0,90 a 0,95
Ciment	0,96
Cotó	0,77
Coure **	0,95
Cuiro	0,75 a 0,80
Formigó	0,94 a 0,95
Fusta	0,90 a 0,94
Ferro *	0,70
Gel	0,96 a 0,98
Guix	0,80 a 0,90
Laca	0,80 a 0,95
Llautó *	0,50
Marbre	0,94

Material	Emissivitat
Neu	0,83 a 0,90
Morter	0,89 a 0,91
Oli	0,97
Òxids de crom	0,81
Òxids de coure, ferro	0,78 a 0,82
Plàstic	0,85 a 0,95
Paper	0,94 a 0,97
Pedra calcària	0,98
Pell humana	0,98
Pintura	0,93
Porcellana	0,92
Plàstic	0,94
Plom *	0,50
Pols	0,94
Rajola	0,90 a 0,96
Sorra	0,90
Suro	0,70
Teula (negra)	0,98
Tèxtil	0,90 a 0,94
Transformador pintat	0,94
Vidre	0,85 a 1,00

Taula 10.3. Emissivitat de diferents materials

* Oxidat ** Opac *** Natural

6.2. Mesura de la temperatura, humitat relativa i velocitat de l'aire

1. Cal connectar la sonda de velocitat tèrmica de fil calent al multímetre i engegar l'aparell.
2. S'ha de col·locar la sonda de velocitat tèrmica al conducte per on circula l'aire, procurant que el punt de mesura s'ubiqui al centre del flux d'aire. Automàticament a l'aparell ja es veuran les mesures de temperatura, humitat relativa i velocitat.
3. S'ha de mesurar a l'entrada i sortida del circuit per on passa l'aire.
4. Cal esperar fins que els valors s'estabilitzin i anotar o guardar les dades.

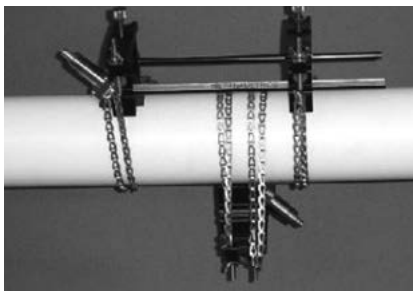
En el cas que es tracti d'una sortida d'aire sense conducte, es recomana muntar un conducte provisional de cartró o material similar per laminar el flux d'aire.

La variable v_{aire} també es pot mesurar amb un anemòmetre amb els passos següents:

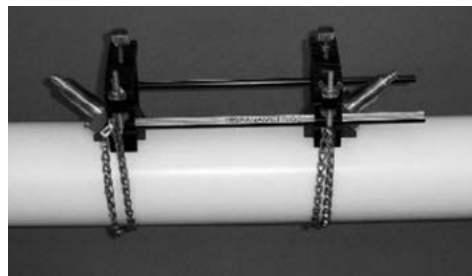
1. Cal connectar la sonda de velocitat de tipus molinet al multímetre i engegar l'aparell.
2. S'ha de col·locar la sonda de tipus molinet al conducte per on circula l'aire, procurant que el punt de mesura s'ubiqui al centre del flux d'aire. Automàticament, a l'aparell ja es veurà la mesura de velocitat.
3. S'ha de mesurar a l'entrada i sortida del circuit per on passa l'aire.
4. Cal esperar fins que els valors s'estabilitzin i anotar o guardar les dades.

6.3. Mesura del cabal de líquids

1. Al menú principal del cabalímetre, s'ha de seleccionar *Parámetros*.
2. Cal seleccionar l'opció *Para el canal A* i entrar les dades del tipus de canonada: material, diàmetre exterior i l'espessor de la canonada en mm. Si el cabalímetre disposa d'un mesurador de gruix, caldrà determinar-lo d'aquesta forma. En cas contrari, s'han d'utilitzar dades tabulades estàndard. Cal 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. S'han de muntar els transductors sobre la canonada a una o dues travesses segons la Figura 10.15, aplicant greix entre els transductors i la canonada. És aconsellable, en el cas que es pugui, muntar-los a dues travesses.



a) a una travessa.



b) a dues travesses.

Figura 10.15. Muntatge dels transductors

6. S'ha de mesurar en trams rectes de canonades, i evitar 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'ha de deixar 2/3 abans i 1/3 després.

7. Cal anotar o guardar la mesura quan el seu valor s'estabilitzi.

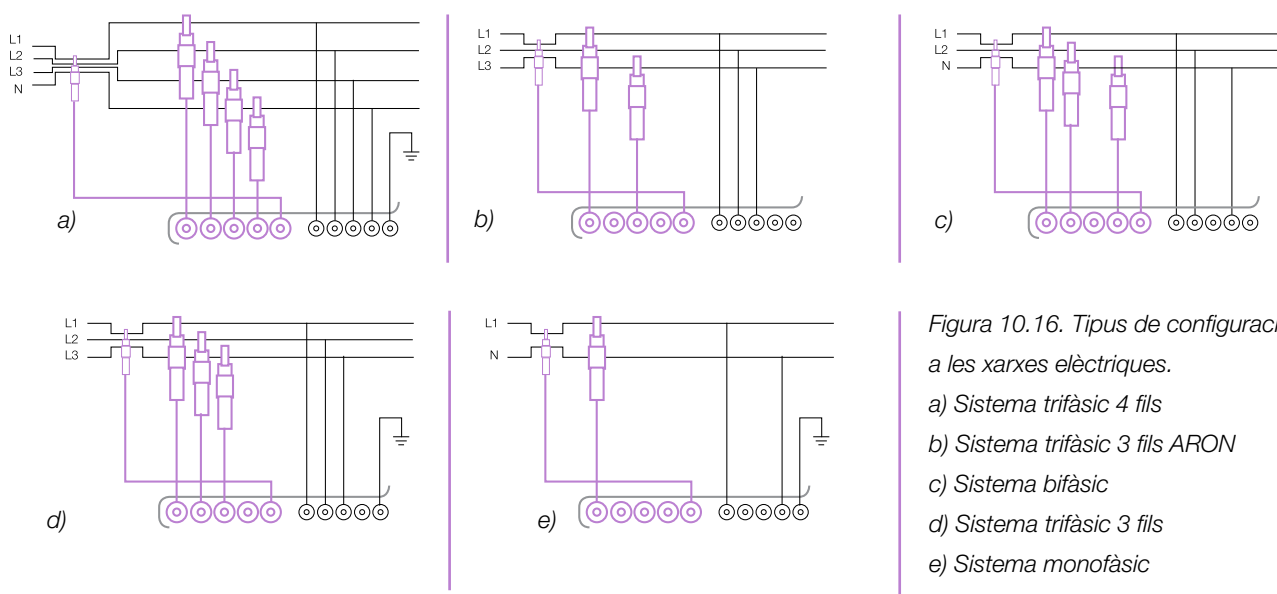
6.4. Mesura de voltatge, intensitat i factor de potència.

1. Cal connectar les preses de tensió i les pinces amperimètriques segons el tipus d'instal·lació, tal com s'indica a la Figura 10.16, a les connexions del motor elèctric del compressor. S'han de 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 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 10.16.

3. Un cop seleccionada la mesura, s'ha de prémer la tecla dinàmica [ACCIONES] i seleccionar [REGISTROS]. S'obre 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.



7. Exemple pràctic

7.1. Enunciat

Es vol avaluar el COP en cicle de fred d'una bomba de calor reversible que climatitza un determinat local. Es tracta d'una màquina partida aire-aire en el qual la unitat interior està connectada a un conducte. El local té la seva pròpia renovació d'aire, independent de la màquina, això significa que l'aire de retorn a la màquina, el de circulació interior, ja estarà barrejat amb el d'aportació exterior.

7.2. Dades

A la Taula 10.4 i Taula 10.5 es mostra el recull de dades de què es disposa i les dades mesurades a la bomba de calor en cicle de fred.

Paràmetres	Unitats	Dada
Densitat de l'aire	kg/m ³	1,215
Calor específica de l'aire	kJ/kg·°C	1,005
Entalpia específica de vapor d'aigua	kJ/kg	2.535
Calor específica del vapor d'aigua	kJ/kg·°C	1,866
Pressió de l'aire	kPa	101,325

Taula 10.4. Dades de què es disposa a la bomba de calor sobre el fluid que bescanvia calor amb l'evaporador.

Paràmetres	Unitats	Dada
Temperatura d'entrada	[°C]	25,3
Temperatura de sortida	[°C]	12,4
Humitat relativa d'entrada	[%]	65
Humitat relativa de sortida	[%]	37
Cabal volumètric	m ³ /s	0,634
Voltatge de línia del motor elèctric del compressor	V	398,4
Intensitat de línia del motor elèctric del compressor	A	22,9
Factor de potència del motor elèctric del compressor	-	0,86
Potència activa mitjana consumida pel motor del compressor	kW	13,6
Potència aparent consumida pel motor del compressor	kVA	15,8
Desequilibri entre fases	%	< 3%

Taula 10.5. Dades mesurades a la bomba de calor en cicle de fred.

7.3. Càlculs i resultat

A partir de les dades referenciades a la Taula 10.4 i Taula 10.5, es pot calcular la potència tèrmica associada a l'aire al seu pas per l'evaporador:

En primer lloc es procedeix a calcular l'entalpia específica de l'aire humit per la temperatura d'entrada de l'aire o de retorn:

$$h_{\text{aire, in}} = c_{p, \text{aire}} \cdot T_{\text{aire}} + r (h_v + c_{pv} \cdot T_{\text{aire}})$$

$$h_{\text{aire, in}} = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 25,3^\circ\text{C} + 0,013 \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}} \cdot (2535 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}}} + 1,866 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 25,3^\circ\text{C}) = 58,99 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

$$r = 0,6215 \frac{P_v}{P_{\text{aire}} - P_v} = 0,6215 \cdot \frac{2,097 \text{ kPa}}{101,325 \text{ kPa} - 2,097 \text{ kPa}} = 0,013 \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{\text{vs}} = \frac{65}{100} \cdot 3,226 \text{ kPa} = 2,097 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{vs}} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[\frac{17,27 \cdot T_{\text{aire}}}{237,3 + T_{\text{aire}}}\right]}}{10} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[\frac{17,27 \cdot 25,3^\circ\text{C}}{237,3 + 25,3^\circ\text{C}}\right]}}{10} = 3,226 \text{ kPa}$$

En segon lloc es fa el mateix càlcul per la temperatura de sortida de l'aire o d'impulsió:

$$h_{\text{aire, out}} = c_{p, \text{aire}} \cdot T_{\text{aire}} + r (h_v + c_{pv} \cdot T_{\text{aire}})$$

$$h_{\text{aire, out}} = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 12,4^\circ\text{C} + 3,285 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}} \cdot (2535 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}}} + 1,866 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 12,4^\circ\text{C}) = 20,865 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

$$r = 0,6215 \frac{P_v}{P_{\text{aire}} - P_v} = 0,6215 \cdot \frac{0,5328 \text{ kPa}}{101,325 \text{ kPa} - 0,5328 \text{ kPa}} = 3,285 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{\text{vs}} = \frac{37}{100} \cdot 1,44 \text{ kPa} = 0,5328 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{vs}} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[\frac{17,27 \cdot T_{\text{aire}}}{237,3 + T_{\text{aire}}}\right]}}{10} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[\frac{17,27 \cdot 12,4^\circ\text{C}}{237,3 + 12,4^\circ\text{C}}\right]}}{10} = 1,44 \text{ kPa}$$

Un cop calculada l'entalpia específica de l'aire a l'entrada i sortida de la bomba de calor, es calcula la potència tèrmica associada a l'aire, que en aquest cas bescanvia calor amb l'evaporador:

$$\dot{Q}_{\text{aire}} = \dot{V}_{\text{aire}} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot \Delta h_{\text{aire}}$$

$$\dot{Q}_{\text{aire}} = 0,634 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,215 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{m}^3} \cdot (58,99 - 20,865) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}}} = 29,49 \text{ kW}$$

Finalment, amb la potència activa consumida pel motor elèctric del compressor es pot calcular el COP en cicle de fred:

$$COP_F = \frac{Q_e}{W_e} = \frac{29,49 \text{ kW}}{13,6 \text{ kW}} = 2,17$$

7.4. Comentaris

El COP trobat en cicle de fred, tal com s'esperava, és superior a la unitat i es troba dins els valors normals per a una equip climatitzador al cicle de refredament.

8. Exemple pràctic 2

8.1. Enunciat

Es vol avaluar el COP en cicle de calor de la bomba de calor de l'apartat 7.

8.2. Dades

A la Taula 10.6 i a la Taula 10.7, es mostren les dades de què es disposa i les dades mesurades en la bomba en cicle de calor.

Paràmetres	Unitats	Dada
Densitat de l'aire	kg/m ³	1,173
Calor específica de l'aire	kJ/kg·°C	1,005
Entalpia específica de vapor d'aigua	kJ/kg	2.552
Calor específica del vapor d'aigua	kJ/kg·°C	1,873
Pressió de l'aire	kPa	101,325

Taula 10.6. Dades de què es disposa a la bomba de calor sobre el fluid que bescanvia calor amb el condensador.

Paràmetres	Unitats	Dada
Temperatura d'entrada	[°C]	21,2
Temperatura de sortida	[°C]	34,6
Humitat relativa d'entrada	[%]	62
Humitat relativa de sortida	[%]	46
Cabal volumètric	m ³ /s	0,81
Voltatge de línia del motor elèctric del compressor	V	394,1
Intensitat de línia del motor elèctric del compressor	A	19,1
Factor de potència del motor elèctric del compressor	-	0,82
Potència activa mitjana consumida pel motor del compressor	kW	10,68
Potència aparent consumida pel motor del compressor	kVA	13,02
Desequilibri entre fases	%	< 3%

Taula 10.7. Dades mesurades a la bomba de calor en cicle de calor.

8.3. Càlculs i resultat

A partir de les dades referenciades a la Taula 10.6 i Taula 10.7, es pot calcular la potència tèrmica associada a l'aire al seu pas pel condensador.

En primer lloc es procedeix a calcular l'entalpia específica de l'aire humit per la temperatura d'entrada de l'aire o de retorn:

$$h_{\text{aire, in}} = c_{p, \text{aire}} \cdot T_{\text{aire}} + r (h_v + c_{pv} \cdot T_{\text{aire}})$$

$$h_{\text{aire, in}} = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 21,2^\circ\text{C} + 9,72 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}} \cdot \left(2552 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}}} + 1,873 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 21,2^\circ\text{C} \right) = 46,50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

$$r = 0,6215 \frac{P_v}{P_{\text{aire}} - P_v} = 0,6215 \cdot \frac{1,56 \text{ kPa}}{101,325 \text{ kPa} - 1,56 \text{ kPa}} = 9,72 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{vs} = \frac{62}{100} \cdot 2,52 \text{ kPa} = 1,56 \text{ kPa}$$

$$P_{vs} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[\frac{17,27 \cdot T_{\text{aire}}}{237,3 + T_{\text{aire}}} \right]}}{10} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[\frac{17,27 \cdot 21,2^\circ\text{C}}{237,3 + 21,2^\circ\text{C}} \right]}}{10} = 2,52 \text{ kPa}$$

En segon lloc es fa el mateix càlcul per la temperatura de sortida de l'aire o d'impulsió:

$$h_{\text{aire, out}} = c_{p,\text{aire}} \cdot T_{\text{aire}} + r(h_v + c_{pv} \cdot T_{\text{aire}})$$

$$h_{\text{aire, out}} = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}} \text{ } ^\circ\text{C}} \cdot 34,6^\circ\text{C} + 0,016 \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}} \cdot (2552 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}}} + 1,873 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}} \text{ } ^\circ\text{C}} \cdot 34,6) = 76,64 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

$$r = 0,6215 \frac{P_v}{P_{\text{aire}} - P_v} = 0,6215 \cdot \frac{2,53 \text{ kPa}}{101,325 \text{ kPa} - 2,53 \text{ kPa}} = 0,016 \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{vs} = \frac{46}{100} \cdot 5,5 \text{ kPa} = 2,53 \text{ kPa}$$

$$P_{vs} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[\frac{17,27 \cdot T_{\text{aire}}}{237,3 + T_{\text{aire}}}\right]}}{10} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[\frac{17,27 \cdot 34,6^\circ\text{C}}{237,3 + 34,6^\circ\text{C}}\right]}}{10} = 5,5 \text{ kPa}$$

Un cop calculada l'entalpia específica de l'aire a l'entrada i sortida de la bomba de calor, es calcula la potència tèrmica associada a l'aire, que en aquest cas bescanvia calor amb l'evaporador:

$$\dot{Q}_{\text{aire}} = \dot{V}_{\text{aire}} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot \Delta h_{\text{aire}}$$

$$\dot{Q}_{\text{aire}} = 0,81 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,173 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{m}^3} \cdot (76,64 - 46,50) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}}} = 28,64 \text{ kW}$$

Finalment amb la potència activa consumida pel motor elèctric del compressor es pot calcular el COP en cicle de calor:

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_e} = \frac{28,64 \text{ kW}}{10,68 \text{ kW}} = 2,68$$

8.4. Comentaris

El COP trobat en cicle de calor, tal com s'esperava, és superior a la unitat i és superior al COP en cicle de fred, ja que es consumeix menys energia en generació de calor. El valor del COP es troba dins els valors normals per una bomba de calor en cicle calorífic.

9. Referències

[1] Informes i estudis tecnològics encarregats per l'Institut Català d'Energia. Estudi tecnològic del fred industrial i les seves millors tecnologies en consum d'energia. Gener de 2005.

http://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/08_guies_informes_estudis/informes_i_estudis/arxius/200501_informe_fred_industrial.pdf

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

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

[3] Reial decret 187/2011, 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

[4] 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>

[5] Yunus A. Çengel (1998). *Heat transfer. A practical approach*. WCB/McGraw-Hill. Taula A-9, pàg. 958-959.

[6] Yunus A. Çengel (1998). *Heat transfer. A practical approach*. WCB/McGraw-Hill. Taula A-11, pàg. 961.

[7] Ashrae Handbook (1997). *Fundamentals, SI Edition*. ASHRAE Psychometric chart Núm. 1, capítol 6.11.

[8] Ashrae Handbook (1997). *Fundamentals, SI Edition*. Taula 3, capítol 6.5-6.7.

