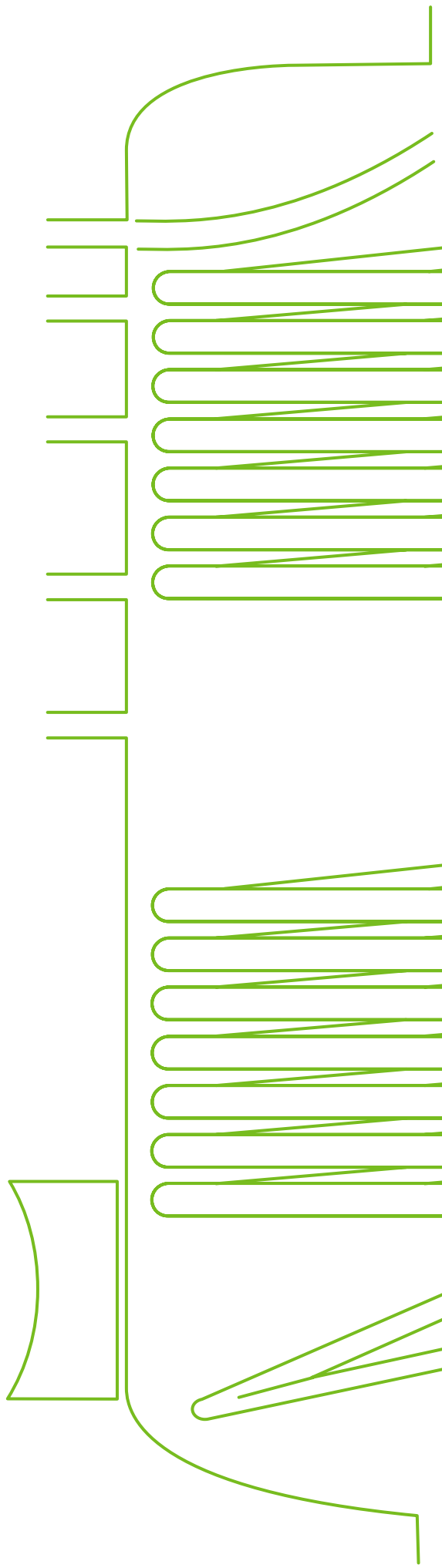


**COL·LECCIÓ**  
**BALANÇ ENERGÈTIC**  
**D'EQUIPS CONSUMIDORS**  
MESURA I CÀLCUL

**BESCANVIADORS**  
**DE CALOR**

04





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

**BESCANVIADORS**  
**DE CALOR**

04

**Primera edició**

Juliol de 2016

**Autors**

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

**Coordinació del document**

Mariona Coll - Institut Català d'Energia

**Revisor del document**

Josep M<sup>a</sup> Piguillem - EFIENER ENGINYERIA SLP

**Disseny**

Eva Sánchez - Institut Català d'Energia

**Maquetació**

OXIGEN Comunicació gràfica

**Versió electrònica**

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



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

Per veure'n una còpia, visiteu:

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

# Índex

<b>0</b>	<b>Pròleg</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Introducció</b>	<b>9</b>
1.1	Justificació del mòdul	9
1.2	Objectiu del mòdul	9
1.3	Abast del mòdul	9
<b>2</b>	<b>Descripció del sistema</b>	<b>10</b>
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
<b>3</b>	<b>Definició del balanç energètic</b>	<b>15</b>
3.1	Descripció del balanç energètic	15
3.2	Esquema del balanç energètic	15
<b>4</b>	<b>Bases de càlcul</b>	<b>16</b>
4.1	Formulació	16
4.2	Taules i diagrames	19
<b>5</b>	<b>Planificació de mesures</b>	<b>22</b>
5.1	Dades de què es disposa	22
5.2	Dades a mesurar	22
5.3	Inventari d'aparells de mesura	23
5.4	Seguretat en persones i equips	25
<b>6</b>	<b>Realització de les mesures</b>	<b>26</b>
6.1	Mesura de les temperatures de superfície	26
6.2	Mesura de la temperatura, humitat relativa i velocitat de l'aire	27
6.3	Mesura del cabal de líquids	28
<b>7</b>	<b>Exemple pràctic 1</b>	<b>29</b>
7.1	Enunciat	29
7.2	Dades	29
7.3	Càlculs i resultat	30
7.4	Comentaris	30
<b>8</b>	<b>Exemple pràctic 2</b>	<b>31</b>
8.1	Enunciat	31
8.2	Dades	31
8.3	Càlculs i resultat	32
8.4	Comentaris	36
<b>9</b>	<b>Referències</b>	<b>37</b>



## 0. Pròleg

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

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

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

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

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

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

El mòdul que ara us presentem és el quart d'aquesta col·lecció que pren com a sistema d'estudi el bescanviador de calor. El balanç energètic calcula la part d'energia que passa pel circuit primari.



# 1. Introducció

## 1.1. Justificació del mòdul

En la majoria de processos on la finalitat és la producció tèrmica, els bescanviadors de calor constitueixen una de les parts més importants. Un bescanviador de calor és el dispositiu més eficient per transferir calor d'un mitjà a un altre, els quals estan a diferent temperatura.

A causa de diversos factors com poden ser les pèrdues de calor en les conduccions dels fluids, les connexions dels diferents circuits o l'embrutiment de les canonades del bescanviador, es poden produir pèrdues energètiques que afecten directament els fluids de treball i en definitiva signifiquen un augment dels costos energètics i mediambientals.

Amb la finalitat d'avaluar el comportament tèrmic del bescanviador, és necessari fer un balanç energètic sobre aquests i d'aquesta manera poder comptabilitzar les pèrdues energètiques i caracteritzar el rendiment del bescanviador.

Realitzar el balanç energètic i calcular el rendiment del bescanviador suposa comprovar el funcionament del bescanviador i permet observar si el bescanviador és l'òptim per al procés en què s'utilitza, detectar si presenta algun problema relacionat amb els factors anteriorment descrits i, en definitiva, optimitzar-ne el funcionament, la qual cosa repercuteix directament en estalvis energètics i econòmics.

## 1.2. Objectiu del mòdul

En aquest mòdul es pretén proporcionar una metodologia de càlcul i una guia pràctica per obtenir dades per poder fer un balanç energètic en bescanviadors de calor, per tal d'avaluar-ne el rendiment tèrmic i proposar o procurar solucions en el cas que aquest no sigui l'esperat.

## 1.3. Abast del mòdul

L'abast d'aquest mòdul preveu totes les tipologies de bescanviadors que formen part de les instal·lacions tèrmiques. Aquests equips s'utilitzen molt en la indústria química, centrals elèctriques, sistemes de climatització, criogènia, en recuperació de calor i en la indústria transformadora.

Es poden classificar segons si són recuperadors o regeneradors, segons el procés de transferència de calor, poden ser de contacte directe o de contacte indirecte, i segons la geometria poden ser tubulars, de plaques o de superfície estesa.

En l'apartat corresponent a les tipologies d'equip, es desenvolupa de manera més exhaustiva aquesta classificació.

## 2. Descripció del sistema

### 2.1. Definició

Els bescanviadors de calor són dispositius dissenyats per transferir calor d'un mitjà a un altre. Dins de les diverses tipologies que s'expliquen en l'apartat 2.3, un bescanviador de calor es pot descriure com un aparell format per dos circuits separats per una barrera, (si es tracta d'un bescanviador de contacte indirecte) per on passen els fluids i on a través d'aquesta es produeix la transferència de calor. En el cas contrari, és a dir, en el contacte directe, la transferència es produeix entre els fluids, els quals són immiscibles.

Un bescanviador de calor resulta molt versàtil en els processos de producció tèrmica, ja que pot treballar amb tot tipus de fluids, tant líquids com gasosos, i permet realitzar diverses combinacions en funció del que es necessiti. Així, existeixen bescanviadors ai-re-aire, aigua-aire, oli-aigua, gas-gas, líquid-gas, aigua-procés, etc.

D'altra banda, s'han de tenir en compte els fluids que s'utilitzen per qüestions d'embrutiment i fer un manteniment i revisions periòdiques del bescanviador per evitar pèrdues de transferència de calor que es tradueixen en una disminució del rendiment.

### 2.2. Principis de funcionament i paràmetres

En general el funcionament d'un bescanviador de calor és molt simple. Així, un intercanviador disposa de dos circuits separats per un medi transmissor de calor per on circulen dos fluids a diferent temperatura. L'existència d'un diferencial de temperatura entre els dos fluids fa que es produeixi una transferència de calor a través de l'àrea de bescanvi entre els dos circuits, de manera que es produeix un escalfament del fluid més fred i un refredament del fluid més calent.

En termes generals, s'anomena el circuit primari el circuit on es realitza la generació de calor o fred, i circuit secundari aquell circuit receptor, és a dir, aquell circuit que disposa del fluid que es vol escalfar o refredar.

Per avaluar si el procés anteriorment descrit és l'òptim, s'ha de calcular el rendiment del bescanviador. És a dir, calcular quina quantitat d'energia tèrmica o frigorífica del fluid primari és transferida al fluid secundari.

En conseqüència, els paràmetres a tenir en compte són l'energia associada als dos fluxos de l'intercanviador i, per tant, cal caracteritzar les temperatures d'entrada i sortida de cada flux, el tipus de fluid, la seva densitat, la seva calor específica i el cabal circulant.

Per altra banda, s'haurà de calcular el coeficient de transferència de calor, que té en compte la velocitat a la qual es transmet la calor, en funció de les característiques fluidodinàmiques de cada flux i de la conductivitat de la barrera de separació.

En el cas que un dels fluids sigui aire, s'ha tenir en compte l'energia associada a l'aigua que aquest conté en forma de vapor d'aigua. Per tant, a efectes de poder realitzar el càlcul, s'han de considerar la pressió de vapor, l'entalpia de vapor d'aigua i la humitat relativa i temperatura de l'aire, a més dels altres paràmetres anteriorment indicats.

## 2.3. Tipologies d'equip

En l'apartat 1.3, s'han classificat les tipologies d'aquest equip segons la funcionalitat, la transferència de calor i la geometria de l'equip. En aquest apartat, s'entra en més detall en els tipus de bescanviadors, i s'esmenten els més utilitzats en la indústria, en l'ús domèstic i en el sector serveis.

A continuació, es mostra una relació dels bescanviadors més utilitzats i una breu descripció d'aquests:

**Bescanviador concèntric o de doble tub.** Aquest bescanviador consisteix en una canonada situada concèntricament dins d'un altra de diàmetre més gran. Un fluid circula per la canonada interna i l'altre per l'espai anular que queda entre la canonada interior i exterior. Poden incorporar aletes en la canonada interior per augmentar la superfície associada a la transferència de calor i reduir, així, la mida del bescanviador. Es poden muntar per mòduls en sèrie, paral·lel o en combinacions d'ambdues. Les dimensions més típiques solen oscil·lar entre 50 i 400 mm pel que fa al diàmetre exterior, i entre 1,5 i 12 m de longitud nominal.

Les aplicacions d'aquest tipus de bescanviador són bàsicament l'escalfament o refredament de fluids de procés quan es necessita poca àrea de bescanvi (50 m<sup>2</sup> com a màxim) o quan un fluid és un gas, un fluid viscosos o un fluid amb poc volum. Resulten cars i voluminosos.

**Bescanviador de carcassa i tubs.** Aquesta tipologia consta d'una carcassa per on passa un dels fluids de treball i un feix de tubs en l'interior d'aquesta per on passa l'altre fluid. A l'interior de la carcassa, juntament amb el feix de tubs, es poden trobar deflectors o separadors (també anomenats pantalles o *baffles*) que solen tenir un espaiat entre 0,5 i 0,6 vegades el diàmetre de la carcassa, per forçar el fluid que circula per la carcassa a tenir un contacte màxim amb els tubs que contenen el segon fluid. Existeixen diverses tipologies de carcassa juntament amb els seus respectius capçals i diverses configuracions de passos de carcassa i passos de tubs, amb la finalitat de reduir les dimensions del bescanviador o reduir-ne la caiguda de pressió a l'interior. El feix de tubs paral·lelament també pot presentar diferents tipus de pas com pot ser pas quadrat, triangular, etc.

Els bescanviadors de carcassa i tubs són els més freqüents a la indústria química de procés i s'utilitzen en moltes aplicacions industrials com per exemple en instal·lacions de vapor d'aigua, per refredar sistemes hidràulics i transformadors elèctrics, per refredar aire en postrefredadors de compressors, per condensar refrigerants, aplicacions químiques o petroquímiques, etc.

**Bescanviadors compactes.** Aquest tipus de bescanviador té la particularitat que tots els seus components formen un únic dispositiu compacte. Normalment tenen una relació àrea superficial/volum de  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Poden incorporar aletes per augmentar l'àrea de bescanvi per unitat de volum. Poden ser bescanviadors de plats amb aletes o tubs amb aletes. Pel que fa als fluids, aquests solen circular en direccions ortogonals entre sí, és a dir, en flux creuat.

Aquest tipus de bescanviador s'utilitza fonamentalment per a aplicacions amb gasos. A causa de les seves dimensions més reduïdes respecte als altres bescanviadors i la seva gran relació superfície/volum, aquest tipus de bescanviadors són molt utilitzats en la indústria de l'automòbil, en la indústria aeroespacial i en la indústria marina. En general, s'utilitzen per usos de refrigeració i climatització com evaporadors, condensadors o bateries de fred, radiadors per a l'automòbil, etc.

**Bescanviador de plaques.** Aquest tipus de bescanviador consta de diverses plaques corrugades juntes compactades mitjançant uns marcs regulables de forma que s'obliga els fluids a circular entre elles de forma alterna. El tipus de placa més utilitzada és la tipus Chevron. Es tracta d'un bescanviador molt compacte i versàtil, ja que permet la regulació de l'àrea de bescanvi ajustant el nombre de plaques als requeriments, presenta mínimes pèrdues de calor amb l'ambient, no pot haver-hi mescla de fluids i presenta un embrutiment baix, fet que comporta que sigui un bescanviador amb una alta eficiència en la transferència de calor i de fàcil manteniment.

La seva aplicació és molt extensa, i es pot trobar en la indústria farmacèutica, alimentària, química, petroquímica, en plantes elèctriques, siderúrgiques i marines, entre d'altres, sobretot per la seva facilitat de neteja, en processos amb una gran taxa d'embrutiment, i la possibilitat d'incorporar a un preu raonable materials de construcció sofisticats (per exemple, titani o níquel) en processos corrosius. Alguns dels seus usos són en torres de refrigeració seques, en escalfament o refredament de productes alimentaris, en processos d'intercanvi tèrmic en indústries químiques, en refrigeració d'olis, en recuperació de calor, en maneig de substàncies corrosives els processos associats a la química del clor, etc.

## 2.4. Normativa aplicable

Les normatives aplicables en aquest mòdul bàsicament són el Reglament d'instal·lacions tèrmiques als edificis (RITE) [1] del 2007, la norma UNE-EN 307 [2] del juny de 1999 i el Reial decret 187/2011 [3], corresponent a la transposició espanyola de la directiva d'ecodisseny 2009/125/CE [4].

Per minimitzar pèrdues per transferència de calor, en el reglament d'instal·lacions tèrmiques en edificis s'exigeix l'aïllament de les canonades sota una sèrie de premisses. Per tant, les canonades dels bescanviadors han d'incorporar aïllament i que aquest compleixi amb les espessors mínimes exigides pel mateix reglament. Per a més informació, s'ha de consultar el mòdul d'aïllaments en canonades.

Altres factors que poden influir en la pèrdua d'eficiència energètica són el tipus d'instal·lació, funcionament i manteniment. En la norma UNE-EN 307:1999 es detalla una sèrie de directrius per elaborar unes instruccions relacionades amb la instal·lació, funcionament i manteniment del bescanviador. Aquestes instruccions, un cop elaborades, tenen la finalitat d'evitar la pèrdua de rendiment en el bescanviador.

Les instruccions de funcionament i de manteniment permeten realitzar un bon control sobre el dispositiu i evitar pèrdua de transferència de calor per embrutiment de les canonades.

En el cas del Reial decret 187/2011, aquest és d'aplicació als productes relacionats amb l'energia (ErP), ja sigui pel seu consum directe d'energia com pel fet que afecta el 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 4.1 fins a la Figura 4.8, es mostren els diferents tipus de bescanviadors més usuals.

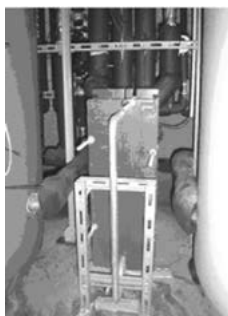


Figura 4.1. Bescanviador de plaques en bastidor.

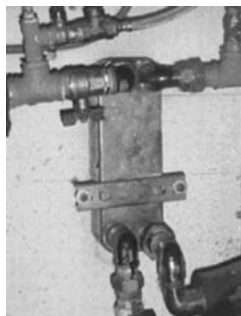


Figura 4.2. Bescanviador compacte amb plaques soldades.



Figura 4.3. Termografia de funcionament d'un bescanviador.

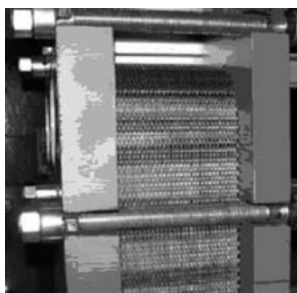


Figura 4.4. Detall de les plaques.

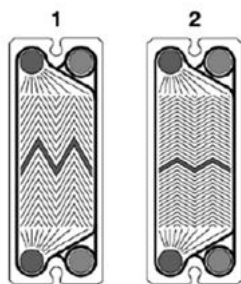


Figura 4.5. Possibles geometries de plaques.



Figura 4.6. Bescanviador compacte aletejat.

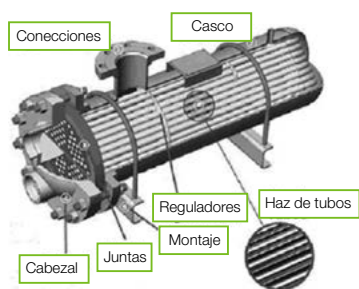


Figura 4.7. Bescanviador de carcassa i tubs.



Figura 4.8. Bescanviador concèntric.

## 3. Definició del balanç energètic

### 3.1. Descripció del balanç energètic

Per a la realització del balanç energètic d'un bescanviador, es considera aquest com un volum de control on s'analitzen les entrades i sortides d'energia. Per tant, es consideraran com a entrades els fluxos d'energia associats als corrents d'entrada i sortida en els dos circuits, així com les pèrdues tèrmiques que es puguin produir en el bescanviador.

Amb l'objectiu de calcular l'eficiència del bescanviador, s'ha d'avaluar quina quantitat d'energia del corrent que passa pel circuit primari és transferida al corrent que passa pel secundari.

### 3.2. Esquema del balanç energètic

A l'Equació 4.1 es pot observar la relació entre els fluxos d'energia d'entrada i sortida del balanç energètic. A la Figura 4.9 es mostra l'esquema del balanç energètic en bescanviadors de calor.

$$\dot{E}_{1,in} + \dot{E}_{2,in} = \dot{E}_{1,out} + \dot{E}_{2,out} + \dot{Q}_p \quad \text{Equació 4.1}$$

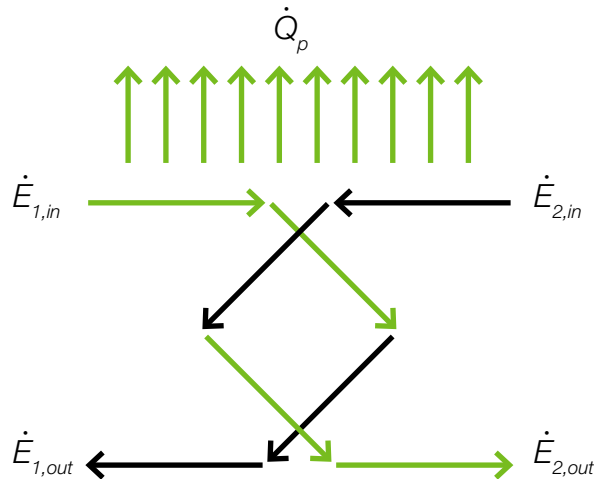


Figura 4.9. Esquema del balanç energètic en un bescanviador de calor.

## 4. Bases de càlcul

### 4.1. Formulació

En termes generals, la caracterització del corrent energètic en el circuit primari o de generació es realitza segons l'Equació 4.2:

$$\dot{Q}_1 = \dot{V}_1 \cdot \rho_1 \cdot \Delta h_1 \quad \text{Equació 4.2}$$

On:

$\dot{Q}_1$  [W] correspon a la potència tèrmica en el circuit primari.

$\dot{V}_1$  [m<sup>3</sup>/s] correspon al cabal volumètric en el circuit primari.

$\rho_1$  [kg/m<sup>3</sup>] correspon a la densitat mitjana del fluid primari.

$\Delta h_1$  [kJ/kg] correspon a la variació d'entalpia del fluid del circuit primari entre les temperatures d'entrada i sortida del bescanviador.

En el cas d'un fluid simple i que no es produeixin vaporitzacions o condensacions entre l'entrada i la sortida (per tant, no es pot aplicar a l'aire), s'utilitza l'Equació 4.3 (Equació 4.2 simplificada):

$$\dot{Q}_1 = \dot{V}_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T \quad \text{Equació 4.3}$$

$\dot{Q}_1$  [W] correspon a la potència tèrmica en el circuit primari.

$\dot{V}_1$  [m<sup>3</sup>/s] correspon al cabal volumètric en el circuit primari.

$c_{p1}$  [kJ/kg·°C] correspon a la calor específica del fluid primari. Paràmetre extret de taules de propietats de fluids. Per al cas de l'aigua, es pot consultar la Taula 1.1. en funció de la temperatura mitjana del circuit.

$\rho_1$  [kg/m<sup>3</sup>] correspon a la densitat del fluid primari. Paràmetre extret de taules de propietats de fluids, pel cas de l'aigua es pot consultar la Taula 4.1 en funció de la temperatura mitjana del circuit.

$\Delta T$  [°C] correspon a la diferència de temperatures entre l'entrada i la sortida del fluid al circuit primari.

De la mateixa manera, es caracteritzarà el corrent secundari o receptor amb l'Equació 4.2 o amb la simplificació mostrada en l'Equació 4.3.



Finalment amb l'Equació 4.4 es calcula rendiment del bescanviador:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} \quad \text{Equació 4.4}$$

On:

$\eta$  correspon al rendiment tèrmic del bescanviador de calor.

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'utilitzarà l'Equació 4.5:

$$\dot{Q}_{\text{aire}} = \dot{V}_{\text{aire}} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot \Delta h_{\text{aire}} \quad \text{Equació 4.5}$$

On:

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

$\dot{V}_{\text{aire}}$  [m<sup>3</sup>/s] correspon al cabal volumètric d'aire. Es calcula segons l'Equació 4.6.

$\rho_{\text{aire}}$  [kg/m<sup>3</sup>] correspon a densitat de l'aire. Valor extret de la Taula 4.3 en funció de la temperatura mitjana del circuit.

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

$$\dot{V}_{\text{aire}} = v_{\text{aire}} \cdot S \quad \text{Equació 4.6}$$

On:

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

$S$  [m<sup>2</sup>] correspon a la secció de la canonada per on hi circula l'aire.

La variable  $\Delta h_{aire}$  es pot calcular realitzant la diferència d'entalpies calculades per cada una de les temperatures, segons l'Equació 4.7, sempre que la diferència de temperatures entre l'entrada i la sortida no sigui gaire gran:

$$h_{aire} = c_{p, aire} \cdot T_{aire} + r \cdot (h_v + c_{pv} \cdot T_{aire}) \quad \text{Equació 4.7}$$

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 1.3 en funció de la temperatura mitjana del circuit.

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

$r$  [kg<sub>aigua</sub> / kg<sub>aire</sub>] correspon a la humitat específica de l'aire. Es calcula segons l'Equació 4.8.

$h_v$  [kJ/kg] correspon a l'entalpia específica de vapor saturat. Valor extret de la Taula 4.4 en funció de la temperatura mitjana del circuit.

$c_{pv}$  [kJ/kg·°C] correspon a la calor específica del vapor d'aigua. Valor extret de la Taula 4.1 en funció de la temperatura mitjana del circuit.

$$r = 0,6215 \frac{P_v}{P_{aire} - P_v} \quad \text{Equació 4.8}$$

On:

$P_v$  [kPa] correspon a la pressió de vapor d'aigua a temperatura de l'aire en °C. Es calcula segons l'Equació 4.9

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

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{vs} \quad \text{Equació 4.9}$$

On:

$P_{vs}$  [kPa] correspon a la pressió del vapor saturat a la temperatura de l'aire. Es calcula segons l'Equació 4.10.

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

$$P_{vs} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[ \frac{17,27 \cdot T_{aire}}{237,3 + T_{aire}} \right]}}{10} \quad \text{Equació 4.10}$$

Una altra manera de calcular l'entalpia específica de l'aire és mitjançant el diagrama psicromètric de la Figura 4.10. S'ha de tenir en compte que a partir de la temperatura i la humitat relativa de l'aire es pot trobar l'entalpia específica per quilogram d'aire sec. En aquest cas, s'ha de realitzar un balanç energètic i de massa particularitzat a l'equip que s'està tractant i utilitzar el diagrama psicromètric i la taula de propietats de l'aigua saturada que es mostra en la Taula 4.4.

## 4.2. Taules i diagrames

A la Taula 4.1 es mostren la pressió de saturació, la densitat i la calor específica de l'aigua líquida saturada en funció de la temperatura.

Temperatura °C	Pressió de saturació kPa	Densitat kg/m <sup>3</sup>		Calor específic J/kg·°C	
T	P	$\rho$		Cp	
		Líquid	Vapor	Líquid	Vapor
40	7,384	992,1	0,051	4179	1885
45	9,593	990,1	0,065	4180	1892
50	12,35	988,1	0,083	4181	1900
55	15,76	985,2	0,104	4183	1908
60	19,94	983,3	0,13	4185	1916
65	25,03	980,4	0,161	4187	1926
70	31,19	977,5	0,198	4190	1936
75	38,58	974,7	0,242	4193	1948
80	47,39	971,8	0,293	4197	1962
85	57,83	968,1	0,354	4201	1977
90	70,14	965,3	0,423	4206	1993

Taula 4.1. Propietats físiques de l'aigua saturada [5].

A la Taula 4.2 es mostren les propietats físiques de l'etilenglicol en funció de la temperatura. En el cas que un dels fluids sigui una mescla de components com és el cas de l'aigua glicolada s'haurà de fer una mitjana ponderada de les propietats que es mostren a la Taula 4.1 i Taula 4.2 segons el percentatge de cada fluid en la mescla.

Temperatura °C	Densitat kg/m <sup>3</sup>	Calor específic J/kg·°C
T	$\rho$	C <sub>p</sub>
0	1131	2295
20	1117	2386
40	1101	2476
60	1086	2566
80	1078	2658
100	1059	2750

Taula 4.2. Propietats físiques de l'etilenglicol [6].

A la Taula 4.3 es mostren les propietats físiques de l'aire a 1 atmosfera de pressió

Temperatura °C	Densitat kg/m <sup>3</sup>	Calor específic J/kg·°C
T	$\rho$	C <sub>p</sub>
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 4.3. Propietats físiques de l'aire a 1 atm de pressió [7].

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 un diagrama psicromètric a pressió atmosfèrica [8].

A la Taula 4.4 es mostren les propietats termodinàmiques de l'aigua saturada en funció de la temperatura.

Temperatura °C	Pressió de saturació kPa	Densitat kg/m <sup>3</sup>		Entalpia kJ/kg			Calor específic J/kg·°C	
		$\rho$		hl	h <sub>lv</sub>	h <sub>v</sub>	C <sub>p</sub>	
		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 4.4. Propietats termodinàmiques de l'aigua a la saturació [9]

## 5. Planificació de mesures

### 5.1. Dades de què es disposa

En general, per a fluids en què no varien gaire les seves propietats entre l'entrada i la sortida:

- Densitat del fluid que passa pel circuit primari:  $\rho_1$  [kg/m<sup>3</sup>]
- Densitat del fluid que passa pel circuit secundari:  $\rho_2$  [kg/m<sup>3</sup>]
- Calor específica del fluid primari:  $c_{p1}$  [kJ/kg·°C]
- Calor específica del fluid secundari:  $c_{p2}$  [kJ/kg·°C]

En el cas concret de l'aire:

- Densitat de l'aire:  $\rho_{aire}$  [kg/m<sup>3</sup>]
- 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 [m<sup>2</sup>]

### 5.2. Dades a mesurar

En general, per a fluids en què no varien gaire les seves propietats entre l'entrada i la sortida:

- Temperatura d'entrada al circuit primari:  $T_{1,in}$  [°C]
- Temperatura de sortida al circuit primari:  $T_{1,out}$  [°C]
- Temperatura d'entrada al circuit secundari:  $T_{2,in}$  [°C]
- Temperatura de sortida al circuit secundari:  $T_{2,out}$  [°C]
- Cabal volumètric al circuit primari:  $\dot{V}_1$  [m<sup>3</sup>/s]
- Cabal volumètric al circuit secundari:  $\dot{V}_2$  [m<sup>3</sup>/s]

En el cas concret de l'aire:

- 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]

### 5.3. Inventari d'aparells de mesura

- Termòmetre de contacte/Termòmetre d'infraroig (Figura 4.10 i Figura 4.11 respectivament).
  - Variables mesurades:  $T_{1,in}$ ,  $T_{1,out}$ ,  $T_{2,in}$ ,  $T_{2,out}$



Figura 4.10. Multímetre TESTO 435  
+ Sonda de superfície.



Figura 4.11. Termòmetre d'infrarojos TESTO 845.

- Termohigròmetre (Figura 4.12):
  - Variables mesurades:  $T_{aire,in}$ ,  $T_{aire,out}$ ,  $HR_{in}$ ,  $HR_{out}$ ,  $v_{aire}$



Figura 4.12. Multímetre TESTO 435 + Sonda tèrmica de velocitat de fil calent.

- Anemòmetre (Figura 4.13):
  - Variables mesurades:  $v_{aire}$



Figura 4.13. Multímetre TESTO 435 + Sonda de velocitat tipus molinet.

- Cabalímetre ultrasònic no invasiu per a líquids (figura 4.14):
  - Variables mesurades:  $\dot{V}_1, \dot{V}_2$



a) Cabalímetre

b) Transductors

c) Maleta de transport cabalímetre i accessoris.

Figura 4.14. Cabalímetre FLEXIM Fluxus F601 + Accessoris.



## 5.4. Seguretat en persones i equips

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

**Seguretat per a les persones.** Prèviament a la realització de les mesures, s'ha de tenir en compte que la mesura de les temperatures  $T_{1,in}$ ,  $T_{1,out}$ ,  $T_{2,in}$ ,  $T_{2,out}$  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 de 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 o que poden produir cremades.

En la mesura de les variables  $\dot{V}_1$ ,  $\dot{V}_2$  s'ha de tenir en compte que el muntatge del cabalímetre es fa sobre la canonada. Per tant, també per fer aquesta mesura és convenient portar guants de protecció tèrmica.

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

A l'igual que el multímetre, és aconsellable no tractar de manera brusca el cabalímetre i els accessoris.

El cabalímetre és un dispositiu força senzill de mantenir, ja que incorpora un sistema de diagnòstic 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 realitzar una bona fixació d'aquests amb la canonada i 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.

## 6. Realització de les mesures

### 6.1. Mesura de les temperatures de superfície

1. Connectar la sonda de superfície al multímetre i engegar l'aparell.
2. Accedir a una zona representativa de l'entrada de la canonada de cada circuit, primari i secundari.
3. 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. Esperar fins que el valor s'estabilitzi i anotar la mesura o guardar-la.
5. Repetir el procediment en diversos punts de la canonada.
6. Realitzar el mateix procediment a les sortides de cada circuit, primari i secundari.

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 amb el material de la canonada segons la Taula 4.5.
2. Segons des de quina distància es mesuri, s'ha d'ajustar la mesura mitjançant l'interruptor lliscant que té el termòmetre. Fins a 2 metres, cal fer lliscar l'interruptor endavant i fins a 10 metres endarrere.
3. S'ha d'accedir a una zona representativa de l'entrada de la canonada de cada circuit, primari i secundari.
4. S'ha de prémer el gallet i dirigir el raig làser a la zona en qüestió on es vol mesurar la temperatura. Cal esperar fins que el valor s'estabilitzi i anotar-lo o guardar-lo.
5. S'ha de repetir la mesura en diversos punts de la canonada.
6. S'ha de realitzar el mateix procediment en les sortides de cada circuit, primari i secundari.

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

Material	Emissivitat
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

Taula 4.5. Emissivitat de diferents materials [1].



Material	Emissivitat
Llautó *	0,50
Marbre	0,94
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

Taula 4.5. Emissivitat de diferents materials [1].

Material	Emissivitat
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

\* Oxidat \*\* Opac \*\*\* Natural

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

1. S'ha de 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 en el conducte per on circula l'aire, procurant que el punt de mesura s'ubiqui al centre del flux d'aire. Automàticament en l'aparell ja es visualitzarà la mesura de temperatura, humitat relativa i velocitat.
3. S'ha de mesurar a l'entrada i sortida del circuit per on passa l'aire.
4. S'ha d'esperar fins que els valors s'estabilitzin i anotar o guardar les dades.

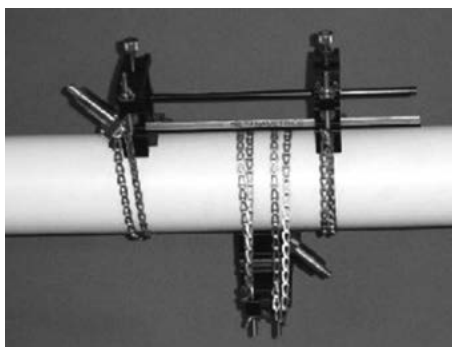
En el cas que es tracti d'una sortida d'aire sense conducte, es recomana muntar un conducte provisional de cartró o material similar per laminar el flux d'aire.

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

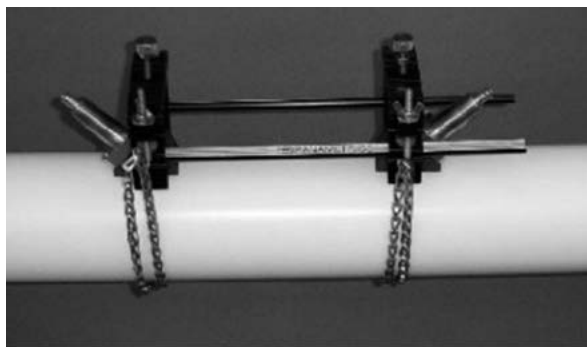
1. S'ha de connectar la sonda de velocitat tipus molinet al multímetre i engegar l'aparell.
2. S'ha de col·locar la sonda tipus molinet en el conducte per on circula l'aire, procurant que el punt de mesura s'ubiqui al centre del flux d'aire. Automàticament en l'aparell ja es visualitzarà la mesura de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

### 6.3. Mesura del cabal de líquids

1. En el menú principal del cabalímetre se selecciona *Parámetros*.
2. Se selecciona l'opció *Para el canal A*. S'han d'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. S'han d'entrar també les dades del fluid. El cabalímetre disposa d'una base de dades de diferents líquids.
3. En el menú principal del cabalímetre, s'ha de seleccionar *Medición*.
4. S'ha de 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'ha de muntar els transductors sobre la canonada a una o dues travesses segons la Figura 4.15, aplicant greix entre els transductors i la canonada. És aconsellable, en el cas que es pugui, fer el muntatge a dues travesses.
6. S'ha de realitzar la mesura en trams rectes de canonades evitant colzes, vàlvules o altres elements que puguin provocar turbulències en el fluid. Si és possible, s'ha de deixar un espai de 10 vegades el diàmetre de la canonada abans del punt de mesura i 5 vegades el diàmetre de la canonada després del punt de mesura. Si no és possible aquesta configuració s'ha de deixar 2/3 abans i 1/3 després.
7. S'han d'anotar o guardar les mesures quan el valor d'aquesta s'estabilitzi.



a) A una travessa.



b) A dues travesses.

Figura 4.15. Muntatge dels transductors.

## 7. Exemple pràctic 1

### 7.1. Enunciat

Es disposa de les dades referenciades en l'apartat 5.1 i es fan les mesures de les dades referenciades en l'apartat 5.2, en un bescanviador de calor aigua glicolada-aigua d'un sistema solar tèrmic. Es demana determinar l'eficiència del sistema de bescanvi.

### 7.2. Dades

A la Taula 4.6 es mostra el recull de valors calculats amb les dades extretes de les taules 4.1, 4.2 i 4.3 a partir de les temperatures mesurades a l'entrada i a la sortida del primari i el secundari.

Paràmetres	Representat per	Unitats	Dada
Densitat del fluid primari (aigua amb 20% d'etilenglicol) (80% densitat de l'aigua + 20% densitat etilenglicol)	$\rho_1$	kg/m <sup>3</sup>	1006,25
Densitat del fluid secundari (aigua)	$\rho_2$	kg/m <sup>3</sup>	990
Calor específica del fluid primari (80% Cp de l'aigua + 20% Cp de l'etilenglicol)	Cp <sub>1</sub>	kJ/kg·°C	3,855
Calor específica del fluid secundari (aigua)	Cp <sub>2</sub>	kJ/kg·°C	4,18

Taula 4.6. Dades de què es disposa sobre els fluids en el bescanviador.

A la taula 4.7 es mostren els valors de les temperatures mesurades en el bescanviador, i dels cabals volumètrics trobats amb el cabalímetre.

Paràmetres	Representat per	Unitats	Dada
Temperatura d'entrada al circuit primari	T1,in	°C	57,2
Temperatura de sortida al circuit primari	T1,out	°C	52,2
Temperatura d'entrada al circuit secundari	T2,in	°C	43,3
Temperatura de sortida al circuit secundari	T2,out	°C	47,8
Cabal volumètric circuit primari	V1	m <sup>3</sup> /s	8,2·10 <sup>-4</sup>
Cabal volumètric circuit secundari	V2	m <sup>3</sup> /s	8,056·10 <sup>-4</sup>

Taula 4.7. Dades mesurades al bescanviador.

### 7.3. Càlculs i resultat

Amb les dades de la Taula 4.6 i la Taula 4.7, es pot calcular la potència tèrmica de cada circuit i, posteriorment, el rendiment del bescanviador.

En primer lloc, es calcula la potència tèrmica associada al fluid primari:

$$\dot{Q}_1 = \dot{V}_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T = \dot{V}_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1,in} - T_{1,out})$$

$$\dot{Q}_1 = 8,2 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cdot 1006,25 \frac{kg}{m^3} \cdot 3,855 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (57,2 - 42,2)^\circ C = 15,9 \text{ kW}$$

En segon lloc, es calcula la potència tèrmica associada al fluid secundari:

$$\dot{Q}_2 = \dot{V}_2 \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot \Delta T = \dot{V}_2 \cdot \rho_2 \cdot c_{p2} \cdot (T_{2,in} - T_{2,out})$$

$$\dot{Q}_2 = 8,056 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s} \cdot 990 \frac{kg}{m^3} \cdot 4,180 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (47,8 - 43,3)^\circ C = 15 \text{ kW}$$

Finalment, es calcula el rendiment:

$$\dot{\eta} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} \cdot 100 = \frac{15 \text{ kW}}{15,9 \text{ kW}} \cdot 100 = 94,34 \%$$

### 7.4. Comentaris

Com es pot veure el rendiment és del 94,34%. Així doncs, es pot dir que aquest bescanviador presenta poques pèrdues energètiques i, per tant, des d'aquest punt de vista funciona correctament.

## 8. Exemple pràctic 2

### 8.1. Enunciat

Es disposa de les dades referenciades en l'apartat 5.1 i es realitzen les mesures de les dades referenciades en l'apartat 5.2, en una bateria de refrigeració d'un climatitzador. Es demana determinar l'eficiència del sistema de bescanvi.

### 8.2. Dades

A la Taula 4.8 es mostren els valors calculats amb les dades extretes de la taula 4.1, 4.3 i 4.4, a partir de les temperatures mesurades a l'entrada i a la sortida del primari i el secundari.

Paràmetres	Representat per	Unitats	Dada
Densitat del fluid primari (aigua)	$\rho_1$	kg/m <sup>3</sup>	997
Densitat del fluid secundari (aire)	$\rho_2$	kg/m <sup>3</sup>	1,13
Calor específica del fluid primari	$C_{p1}$	kJ/kg·°C	4,180
Calor específica del fluid secundari (aire)	$C_{p2}$	kJ/kg·°C	1,005
Entalpia específica de vapor d'aigua	$h_v$	kJ/kg	2539,20
Calor específica del vapor d'aigua	$C_{p,aire}$	kJ/kg·°C	1,87
Pressió de l'aire	$P_{aire}$	Pa	101325

Taula 4.8. Dades dels fluids de la bateria de refrigeració.

A la Taula 4.9 es mostren els valors de les temperatures mesurades en el bescanviador, les humitats relatives i dels cabals volumètrics trobats.

Paràmetres	Representat per	Unitats	Dada
Temperatura d'entrada al circuit d'aigua	$T_{1,in}$	°C	7
Temperatura de sortida al circuit d'aigua	$T_{1,out}$	°C	12
Temperatura d'entrada al circuit d'aire	$T_{2,in}$	°C	31,1
Temperatura de sortida al circuit d'aire	$T_{2,out}$	°C	12,1
Cabal volumètric circuit d'aigua	$V_1$	m <sup>3</sup> /s	$2,75 \cdot 10^{-3}$
Cabal volumètric circuit d'aire	$V_2$	m <sup>3</sup> /s	1,194
Humitat relativa de l'aire a l'entrada	$HR_{in}$	%	63,2
Humitat relativa de l'aire a la sortida	$HR_{out}$	%	99,2

Taula 4.9. Dades mesurades en la bateria de refrigeració.

### 8.3. Càlculs i resultat

En primer lloc, es calcula la potència tèrmica associada al fluid primari (aigua), éssent en aquest cas:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_1 &= \dot{V}_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot \Delta T = \dot{V}_1 \cdot \rho_1 \cdot c_{p1} \cdot (T_{1,out} - T_{1,in}) \\ &= 2,75 \cdot 10^{-3} \frac{m^3}{s} \cdot 997 \frac{kg}{m^3} \cdot 4,180 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (12 - 7)^\circ C = 57,3 \text{ kW}\end{aligned}$$

En segon lloc, es calcula la potència tèrmica associada al fluid secundari.

Com que es tracta d'aire, es pot calcular amb les equacions de l'entalpia específica de l'aire humit o, per altra banda, mitjançant el diagrama psicromètric [8].

Així, a continuació es mostren els dos mètodes de càlcul. En primer lloc, es mostra el càlcul mitjançant les equacions de l'entalpia específica de l'aire de l'apartat 4.1:

Com a primer pas, es procedeix a calcular l'entalpia específica de l'aire humit per la temperatura d'entrada de l'aire:

$$\begin{aligned}h_{aire,in} &= c_{p,aire} \cdot T_{aire} + r (h_v + c_{pv} \cdot T_{aire}) \\ h_{aire,in} &= 1,005 \frac{kJ}{kg_{aire} \cdot ^\circ C} \cdot 31,1^\circ C + 0,018 \frac{kg_{aigua}}{kg_{aire}} \\ &\cdot (2539,20 \frac{kJ}{kg_{aigua}} + 1,87 \frac{kJ}{kg_{aigua} \cdot ^\circ C} \cdot 31,1^\circ C) = 77,9 \frac{kJ}{kg_{aire}} \\ r &= 0,6215 \frac{P_v}{P_{aire} - P_v} = 0,6215 \cdot \frac{2,85 \text{ kPa}}{101,325 \text{ kPa} - 2,85 \text{ kPa}} = 0,018 \frac{kg_{aigua}}{kg_{aire}} \\ P_v &= \frac{HR}{100} \cdot P_{vs} = \frac{63,2}{100} \cdot 4,51 \text{ kPa} = 2,85 \text{ kPa} \\ P_{vs} &= \frac{6,11 \cdot e^{\left[ \frac{17,27 \cdot T_{aire}}{237,3 + T_{aire}} \right]}}{10} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[ \frac{17,27 \cdot 31,1^\circ C}{237,3 + 31,1^\circ C} \right]}}{10} = 4,51 \text{ kPa}\end{aligned}$$



En segon lloc, es fa el mateix càlcul per a la temperatura de sortida de l'aire.

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

$$h_{\text{aire,out}} = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 12,1^\circ\text{C} + 8,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}} \cdot (2539,20 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}}} + 1,87 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aigua}} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 12,1^\circ\text{C}) = 34,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

$$r = 0,6215 \frac{P_v}{P_{\text{aire}} - P_v} = 0,6215 \cdot \frac{1,399 \text{ kPa}}{101,325 \text{ kPa} - 1,399 \text{ kPa}} = 8,7 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}_{\text{aigua}}}{\text{kg}_{\text{aire}}}$$

$$P_v = \frac{HR}{100} \cdot P_{vs} = \frac{99,2}{100} \cdot 1,41 \text{ kPa} = 1,399 \text{ kPa}$$

$$P_{vs} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[ \frac{17,27 \cdot T_{\text{aire}}}{237,3 + T_{\text{aire}}} \right]}}{10} = \frac{6,11 \cdot e^{\left[ \frac{17,27 \cdot 12,1^\circ\text{C}}{237,3 + 12,1^\circ\text{C}} \right]}}{10} = 1,41 \text{ kPa}$$

Un cop calculades les entalpies específiques de l'aire a l'entrada i sortida de la bateria de refrigeració, es calcula la potència tèrmica associada a aquest corrent:

$$\dot{Q}_{\text{aire}} = \dot{V}_{\text{aire}} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot \Delta h_{\text{aire}} = 1,194 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,13 \cdot \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{m}^3} \cdot (77,9 - 34,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire}}} = 58,6 \text{ kW}$$

Havent caracteritzat els dos corrents es pot calcular el rendiment:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_{\text{aire}}} \cdot 100 = \frac{57,3 \text{ kW}}{58,6 \text{ kW}} \cdot 100 = 97,78 \%$$

Tal com s'ha comentat anteriorment, la potència tèrmica del corrent d'aire també es pot determinar mitjançant el diagrama psicromètric i realitzant un balanç de massa i un altre d'energia particularitzat a l'equip que s'està tractant, en aquest cas una bateria de fred.

En primer lloc, mitjançant el diagrama psicromètric s'avalua si hi ha condensació de l'aigua continguda en l'aire. A la Figura 4.16, s'observa com la humitat absoluta del punt 2 (9,5 gr d'aigua/kg d'aire sec) és inferior a la del punt 1 (18 gr aigua/kg d'aire sec), la qual cosa indica que hi ha hagut una disminució del contingut d'aigua dins de l'aire humit. Efectivament, el procés que segueix l'aire (indicat per la línia verda) talla la corba de saturació a aproximadament 23°C. Com que la temperatura de l'aire continua disminuint fins als 12,1°C de sortida de la bateria, s'ha produït una reducció de la seva humitat.

Així, per determinar la quantitat d'aigua que ha condensat es fa un balanç de massa amb l'Equació 4.11:

$$\dot{m}_{as,in} + \dot{m}_{v,in} = \dot{m}_{as,out} + \dot{m}_{v,out} + \dot{m}_{w,out} \quad \text{Equació 4.11}$$

On:

$\dot{m}_{as,in} = \dot{m}_{as,out}$  [kg/s] correspon al cabal màssic de l'aire sec, que és igual a l'entrada i a la sortida.

Així, l'equació queda de la manera següent:

$$\dot{m}_{v,in} - \dot{m}_{v,out} = \dot{m}_{w,out}$$

$$\dot{m}_{as,in} \cdot (w_{in} - w_{out}) = \dot{m}_{w,out}$$

$$\dot{V}_{\text{aire}} \cdot \rho_{\text{aire,in}} \cdot (w_{in} - w_{out}) = \dot{m}_{w,out}$$

$$1,194 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,13 \cdot \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{m}^3} \cdot (0,018 - 0,0095) \frac{\text{kg}_w}{\text{kg}_{as}} = 0,0115 \frac{\text{kg}_w}{\text{s}}$$

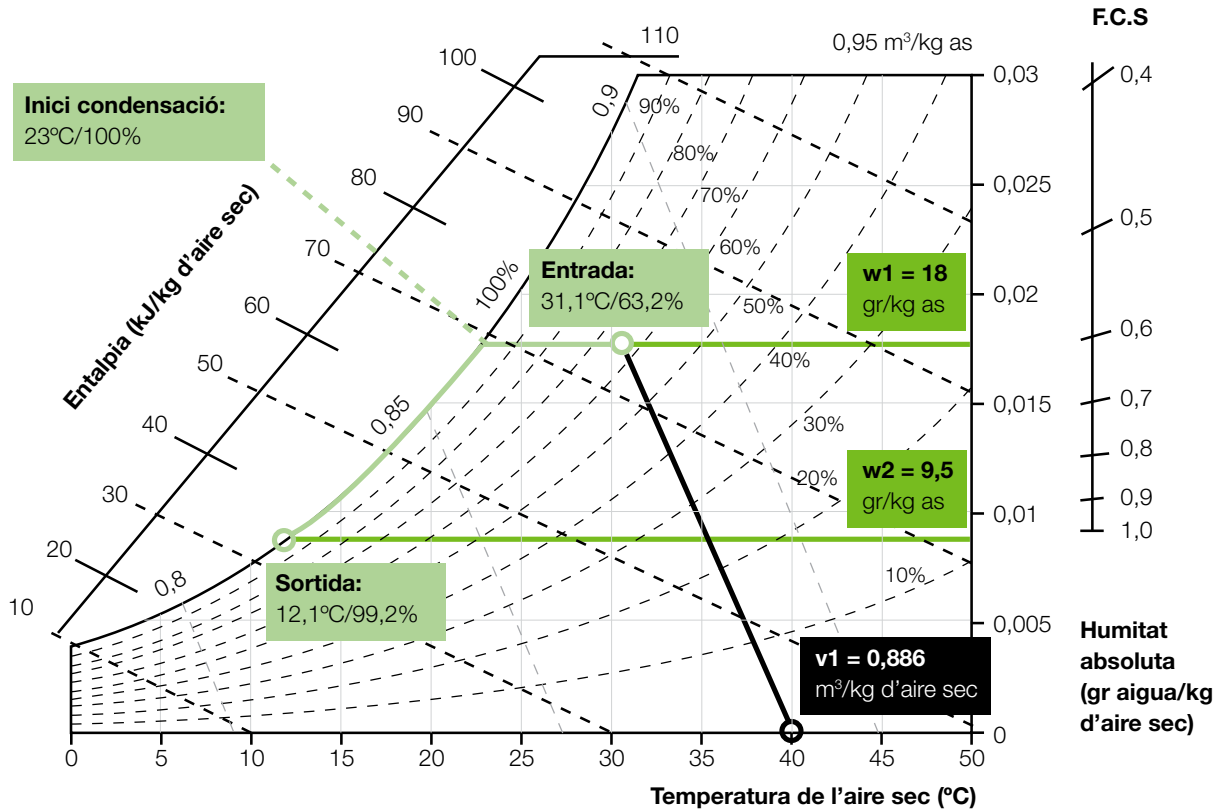


Figura 4.16. Càlcul d'humitat mitjançant el diagrama psicromètric.

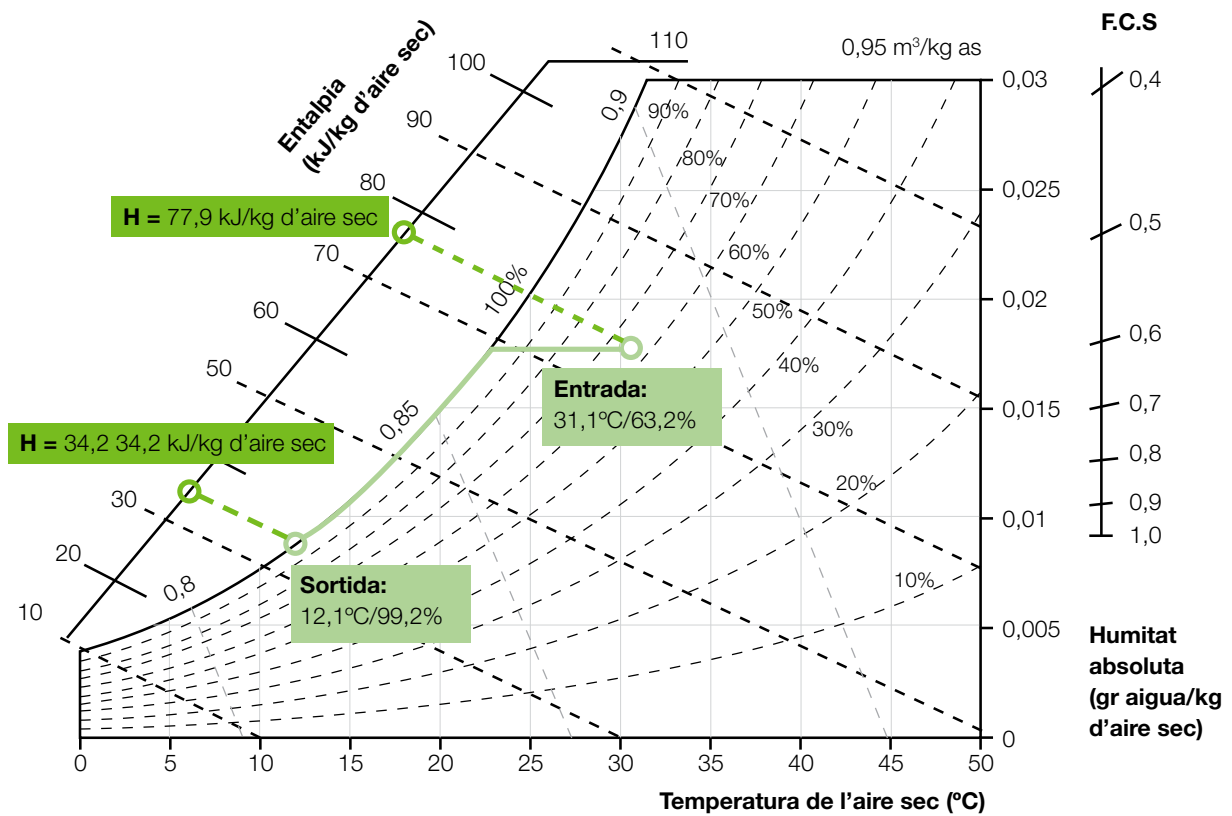


Figura 4.17. Càlcul de l'entalpia d'entrada i de sortida de l'aire mitjançant el diagrama psicromètric

A continuació es procedeix a realitzar amb l'Equació 4.12 un balanç d'energia en la bateria de refrigeració:

$$\dot{Q}_{\text{aire}} = \dot{m}_{\text{aire,in}} \cdot h_{\text{aire,in}} - \dot{m}_{\text{aire,out}} \cdot h_{\text{aire,out}} - \dot{m}_{\text{w,out}} \cdot h_{\text{w,out}} \quad \text{Equació 4.12}$$

On:

$\dot{m}_{\text{aire,in}} = \dot{m}_{\text{aire,out}}$  [kg/s] correspon al cabal màssic de l'aire sec, que és igual a l'entrada i a la sortida. Es calcula amb l'equació 4.13.

$$\dot{m}_{\text{aire,in}} = \dot{V}_{\text{aire}} \cdot \frac{1}{v_{\text{aire}}} = \dot{V}_{\text{aire}} \cdot r_{\text{aire,in}} \quad \text{Equació 4.13}$$

Tot seguit amb la intersecció de la corba d'humitat relativa i la recta de temperatura i seguint la corba d'entalpia del diagrama psicromètric, es determina l'entalpia d'entrada i sortida, tal i com es mostra a la Figura 4.17 (77,9 kJ/kg d'aire sec per al punt 1 i 34,2 kJ/kg aire sec per al punt 2). L'entalpia de l'aigua saturada s'obté a partir de la taula 4.4, i pren el valor de 50,4 kJ/kg<sub>w</sub> corresponent a una temperatura de 12°C, i la densitat de l'aire s'obté com a invers del valor trobar  $v_1 = 0,886 \text{ m}^3/\text{kg}$  aire sec. A continuació, es realitza el balanç energètic segons l'Equació 4.12.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{aire}} &= 1,194 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,13 \cdot \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{m}^3} \cdot (77,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire,in}}} - 34,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{aire,in}}}) - 0,0115 \frac{\text{kg}_{\text{w}}}{\text{s}} \cdot 50,40 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}_{\text{w}}} \\ \dot{Q}_{\text{aire}} &= 58,38 \text{ kW} \end{aligned}$$

Finalment, el rendiment es calcula de la mateixa manera que en els altres casos:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_{\text{aire}}} \cdot 100 = \frac{57,3 \text{ kW}}{58,38 \text{ kW}} \cdot 100 = 98,15 \%$$

## 8.4. Comentaris

Com es pot observar, amb el primer mètode s'ha obtingut un rendiment del 97,78%, mentre que amb el segon mètode s'ha obtingut un valor del 98,15%, i s'ha comprovat que amb els dos mètodes s'obtenen resultats molt similars. Cal tenir en compte que el mètode basat en el diagrama psicromètric correspon a un mètode gràfic, i, per tant, pot presentar lleugeres variacions respecte al primer mètode.

Pel que fa als valors obtinguts, cal assenyalar que es tracta d'un intercanviador amb una gran eficiència en el procés d'intercanvi, segurament donat per un correcte dimensionament de la bateria de refrigeració aigua/aire per a les condicions de treball del sistema.

## 9. Referències

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

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

**[2]** UNE-EN 307:1999. Directrices para elaborar las instrucciones de instalación, funcionamiento y mantenimiento, necesarias para mantener el rendimiento de cada uno de los tipos de intercambiadores de calor. Juliol de 1999.

**[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](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. ISBN: 0-07-115223-7. Taula A-9, pàg. 958-959, 1998.

**[6]** YUNUS A. ÇENGEL (1998). *Heat transfer. A practical approach*. WCB/McGraw-Hill. ISBN: 0-07-115223-7. Taula A-10, pàg. 960, 1998.

**[7]** YUNUS A. ÇENGEL (1998). *Heat transfer. A practical approach*. WCB/McGraw-Hill. ISBN: 0-07-115223-7. Taula A-11, pàg. 961, 1998.

**[8]** ASHRAE HANDBOOK (1997). *Fundamentals, SI Edition*. ISBN: 1-883413-45-1. ASHRAE Psychometric chart No 1, capítol 6.11, 1997.

**[9]** ASHRAE HANDBOOK (1997). *Fundamentals, SI Edition*. ISBN: 1-883413-45-1 Taula 3, capítol 6.5-6, 1997.





