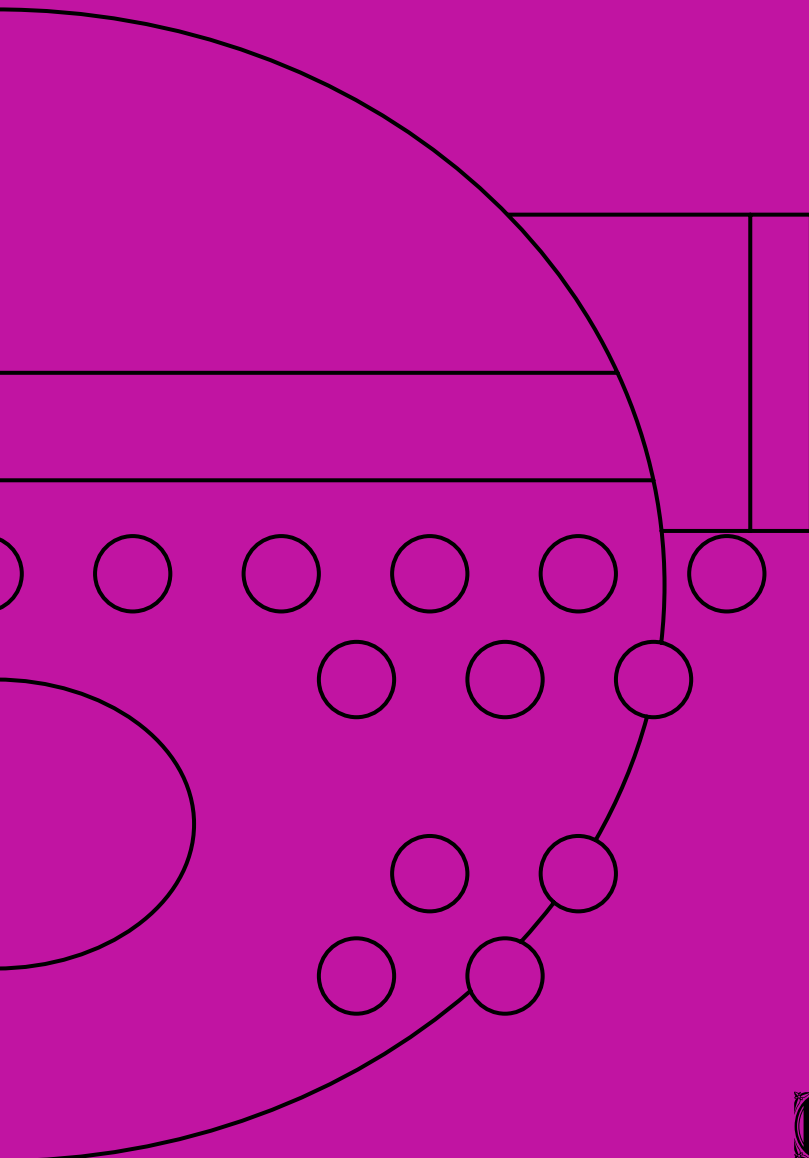
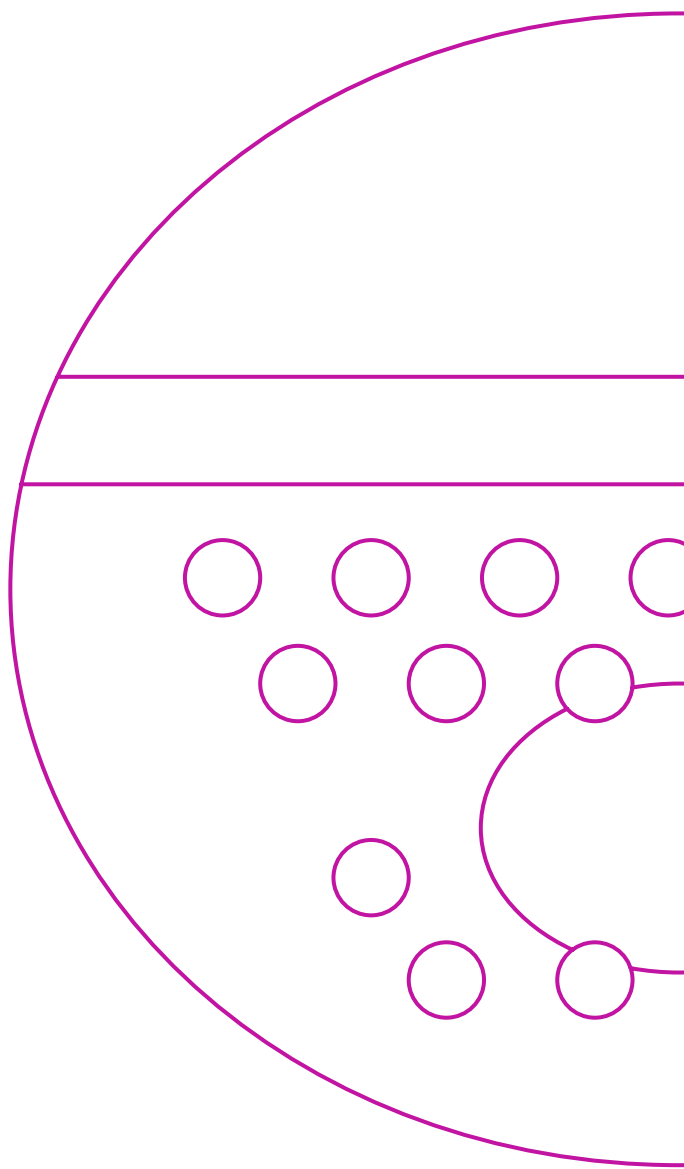


**COL·LECCIÓ**  
**BALANÇ ENERGÈTIC**  
**D'EQUIPS CONSUMIDORS**  
MESURA I CÀLCUL

**CALDERES**  
**DE VAPOR**

07

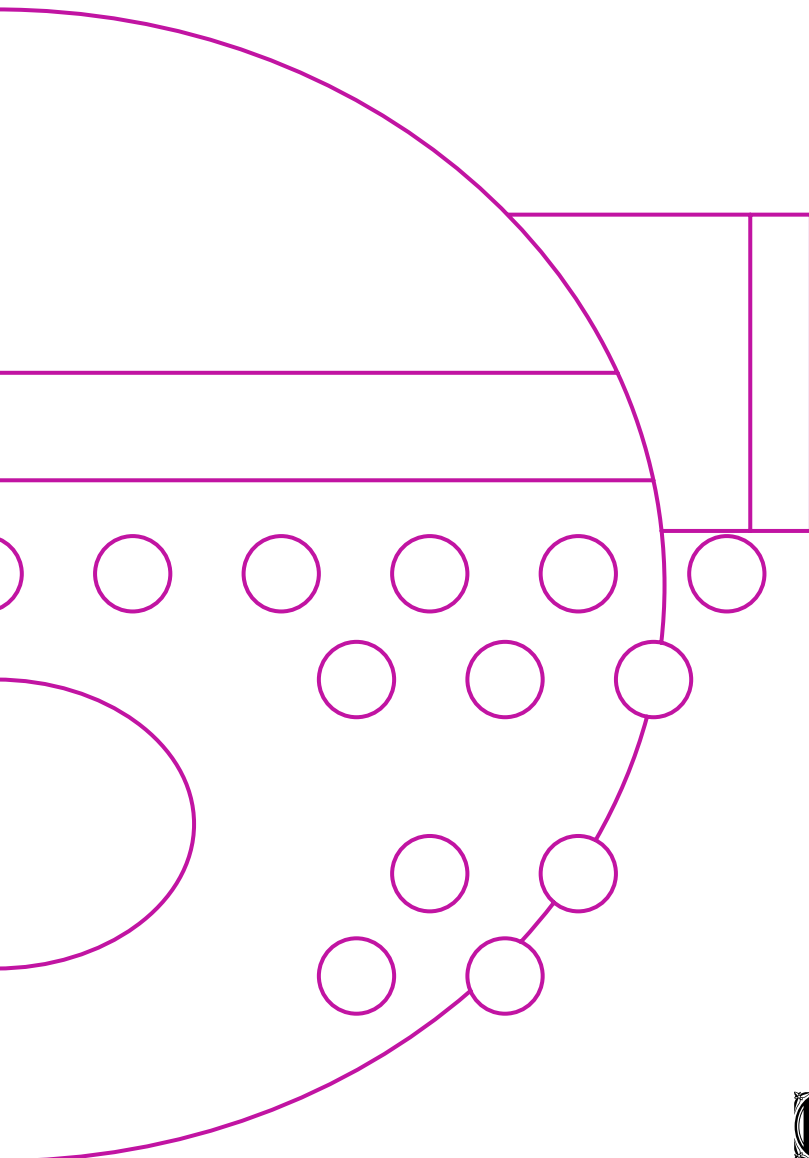




**COL·LECCIÓ**  
**BALANÇ ENERGÈTIC**  
**D'EQUIPS CONSUMIDORS**  
MESURA I CÀLCUL

**CALDERES**  
**DE VAPOR**

07



**Primera edició**

Novembre 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**

Albert Salas - Institut Català d'Energia

**Disseny**

Eva Sánchez - Institut Català d'Energia

**Maquetació**

OXIGEN Comunicació gràfica

**Versió electrònica**

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



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

Per veure'n una còpia, visiteu:

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

# Índex

<b>0</b>	<b>Pròleg</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Introducció</b>	<b>9</b>
1.1	Justificació del mòdul	9
1.2	Objectiu del mòdul	10
1.3	Abast del mòdul	10
<b>2</b>	<b>Descripció del sistema</b>	<b>10</b>
2.1	Definició	10
2.2	Principis de funcionament i paràmetres	10
2.3	Tipologies d'equip	12
2.4	Normativa aplicable	14
2.5	Descripció gràfica	15
<b>3</b>	<b>Definició del balanç energètic</b>	<b>16</b>
3.1	Descripció del balanç energètic	16
3.2	Esquema del balanç energètic	17
<b>4</b>	<b>Bases de càlcul</b>	<b>18</b>
4.1	Formulació	18
4.2	Taules i diagrames	21
<b>5</b>	<b>Planificació de mesures</b>	<b>23</b>
5.1	Dades de què es disposa	23
5.2	Dades a mesurar	24
5.3	Inventari d'aparells de mesura	24
5.4	Seguretat en persones i equips	26
<b>6</b>	<b>Realització de les mesures</b>	<b>27</b>
6.1	Mesura de les temperatures de superfície	27
6.2	Mesura del cabal de líquids	28
6.3	Mesura de la potència d'escalfament i de bombeig del combustible líquid	29
<b>7</b>	<b>Exemple pràctic</b>	<b>30</b>
7.1	Enunciat	30
7.2	Dades	31
7.3	Càlculs i resultat	32
7.4	Comentaris	33
<b>8</b>	<b>Referències</b>	<b>34</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 setè d'aquesta col·lecció que pren com a sistema d'estudi la caldera de vapor. El balanç energètic, calcula el rendiment de la caldera contrastant la calor que guanya l'aigua que es vaporitza en ella amb la calor que aporta el combustible emprat en aquest procés.



# 1. Introducció

## 1.1. Justificació del mòdul

El vapor s'ha utilitzat com a mitjà de transport de l'energia tèrmica des de la revolució industrial, i el seu ús ha evolucionat des d'aplicacions cinemàtiques en moviment de màquines fins a aplicacions en la generació d'electricitat, en aplicacions domèstiques, en instal·lacions de calefacció i, sobretot, en els múltiples usos que avui en dia té en la indústria química, tèxtil, alimentària, farmacèutica, etc.

El vapor reuneix una sèrie de característiques que fan que sigui un mitjà molt emprat pel transport d'energia tèrmica. És un fluid no tòxic, que s'aconsegueix a partir de l'evaporació de l'aigua. El vapor permet un fàcil ajustament de la temperatura d'operació i transporta grans quantitats d'energia tèrmica amb poca massa.

Es genera mitjançant l'aportació d'energia a l'aigua de procés en les calderes de vapor, i és per això que aquestes constitueixen la part principal en aquest tipus d'instal·lacions tèrmiques.

Per altra banda, l'eficiència de les instal·lacions de vapor va molt lligada a les condicions d'operació d'aquestes, de la pressió i temperatura d'operació, del funcionament dels accessoris com ara purgadors i vàlvules, alineacions de línies de servei, filtres d'impureses, de l'aprofitament de calor residual en el retorn del condensat, del tractament de l'aigua d'entrada, de l'aïllament en les canonades, etc. Però sobretot cal destacar l'eficiència energètica en la caldera com a factor important en l'eficiència global de la instal·lació.

Tal i com se cita a l'Estudi d'eficiència energètica en el sector dels fluids tèrmics i situació a Catalunya [1], "el vapor és utilitzat usualment sense gaire compte, i en resulten sistemes mantinguts pobrament amb baixa eficiència. Fins i tot en les aplicacions millor regulades, trobarem pèrdues de calor i pèrdues de vapor que es podrien evitar. Aproximadament un 10% d'estalvi és possible si estudiem i millorem l'operació de les xarxes de vapor".

És per això que és convenient realitzar balanç energètic en aquest tipus de calderes per evitar pèrdues energètiques en la generació de vapor que s'acaben traduint en costos energètics i ambientals. També cal comentar que és important estudiar l'aïllament de les canonades de vapor així com l'estat dels accessoris, i evitar al màxim les pèrdues energètiques en el vapor, en el condensat i les fuites de vapor.

## 1.2. Objectiu del mòdul

L'objectiu d'aquest mòdul és proporcionar una metodologia i unes bases de càlcul per poder fer mesures per caracteritzar un balanç energètic en calderes de vapor.

## 1.3. Abast del mòdul

Aquest mòdul se centra bàsicament en tres tipus de calderes de vapor: les calderes piro-tubulars, aqutubulars i compostes.

En l'apartat 2.3, es poden observar algunes de les característiques més importants d'aquests tres tipus de calderes.

# 2. Descripció del sistema

## 2.1. Definició

Una caldera de vapor és un dispositiu encarregat de generar la quantitat de vapor d'aigua saturat o sobreescalfat necessària per cobrir la demanda tèrmica d'un determinat procés.

Una caldera de vapor consta, a trets generals, d'una cambra interna pressuritzada més un cremador i una sortida de fums. A la cambra interna, es poden trobar tres seccions diferenciades: la secció corresponent a l'escalfament d'aigua on s'intercanvia calor amb els fums procedents del cremador, la secció corresponent a l'evaporació on es genera el vapor i la secció on el vapor sec se separa de les gotes d'aigua que aquest pot contenir, ja que aquestes poden provocar una pèrdua d'eficiència en la instal·lació. També en certs tipus de caldera es pot trobar una quarta secció referent al sobreescalfament de vapor.

Finalment, cal dir que les calderes de vapor constitueixen un dispositiu molt versàtil, ja que poden funcionar utilitzant pràcticament qualsevol tipus d'energia, gràcies a l'extensa tipologia de cremadors amb què poden operar. Des de cremadors que poden funcionar amb combustibles sòlids, líquids o gasosos, fins a cremadors que en la seva tipologia constructiva poden modular la potència adaptant-la a la corba de consum de la caldera.

Per a més informació, consulteu el mòdul de combustió en cremadors.

## 2.2. Principis de funcionament i paràmetres

El funcionament de les calderes és força senzill. En primer lloc entra una mescla de combustible i comburent (aire) en el cremador de la caldera, aquest inflama la mescla i en provoca la combustió dins la cambra de combustió o llar.

Posteriorment, els gasos de combustió recorren la cambra interna per la secció d'escalfament, intercanvien calor amb l'aigua d'aquesta secció, i posteriorment són expulsats a través d'una xemeneia. Durant aquest procés, l'aigua líquida s'escalfa fins a arribar a la temperatura de saturació i es vaporitza obtenint vapor saturat a la pressió d'operació de la caldera.

El vapor generat es pot utilitzar com a vapor directe i incorporar-lo al procés aprofitant-ne la calor sensible i latent, o com a vapor indirecte aprofitant-ne la calor latent i separant el condensat que es pot generar en la secció de separació de la caldera o en purgadors al llarg de la instal·lació.

Un cop el vapor ha circulat per tota la instal·lació, es pot recuperar total o parcialment el condensat de retorn i el condensat dels purgadors en un dipòsit d'alimentació que, juntament amb l'aigua de xarxa prèviament tractada, alimenten la caldera per tornar a començar el cicle de generació de vapor. És important, des del punt de vista de l'eficiència d'aquests equips, el retorn dels condensats en la caldera, ja que aquests tenen un nivell tèrmic molt superior a l'aigua de xarxa i, per tant, es necessitarà menys energia per generar vapor a partir d'ells i, a més a més, l'aigua dels condensats ja està tractada.

Cal destacar el tractament previ de l'aigua o de la caldera per evitar formació d'incrustacions o fenòmens de corrosió en aquesta que poden provocar situacions d'explosió en les parts que suporten pressió o pèrdua d'eficiència energètica.

Un cop es coneixen els principis de funcionament d'una caldera de vapor, s'ha de calcular l'eficiència energètica d'aquesta per tal d'avaluar-ne el funcionament correcte, és a dir, quina quantitat de potència consumida per la caldera es transforma en potència útil absorbida per l'aigua líquida per generar vapor.

Per tant, per tal de calcular l'eficiència energètica de la caldera es necessiten els paràmetres següents: densitat, cabal volumètric o màssic associat al flux de vapor i al flux de condensat, així com també la temperatura i pressió per tal de calcular l'entalpia específica en cada flux.

Per altra banda, s'ha de caracteritzar la potència associada al combustible que utilitza la caldera, i per tant, es necessiten els paràmetres següents: el tipus de combustible per caracteritzar el poder calorífic inferior (PCI) i la seva densitat, així com també el cabal volumètric o màssic, la temperatura i la pressió del combustible.

En el cas de tractar-se de combustibles líquids, a banda dels paràmetres anteriors també s'ha de caracteritzar la potència de preescalfament del combustible així com la de bombeig d'aquest.

## 2.3. Tipologies d'equip

A continuació es fa una breu descripció dels tipus de calderes que es troben actualment en la indústria:

**Calderes pirotubulars.** En aquest tipus de calderes, els fums procedents del cremador circulen per dins dels tubs situats a la cambra interna de la caldera, mentre que l'aigua ho fa per fora dels tubs. Poden ser verticals o horitzontals, encara que la majoria són horitzontals. Bàsicament consisteixen en una cambra de combustió horitzontal que pot variar entre 0,5 i 1,8 m de diàmetre segons la potència de sortida de la caldera. La seva finalitat principal és el subministrament de calor.

Les calderes pirotubulars amb producció de foc estan limitades a 20-30 bars de pressió d'operació, mentre que amb la utilització de calor residual aquest límit pot augmentar considerablement. Per altra banda, la seva potència tèrmica de sortida està limitada a 20 MW i el seu rendiment tèrmic oscil·la entre el 80-85% segons el combustible, millorable si disposa d'un economitzador. Poden utilitzar qualsevol tipus de combustible comercial i tenen baix cost comparat amb les aqutubulars en les aplicacions en què són intercanviables.

Aquest tipus de calderes estan preparades per treballar després de fer totes les connexions als serveis i necessiten aigua prèviament tractada. A més, el període d'inspecció en aquest tipus de calderes és inferior, cada 16 mesos.

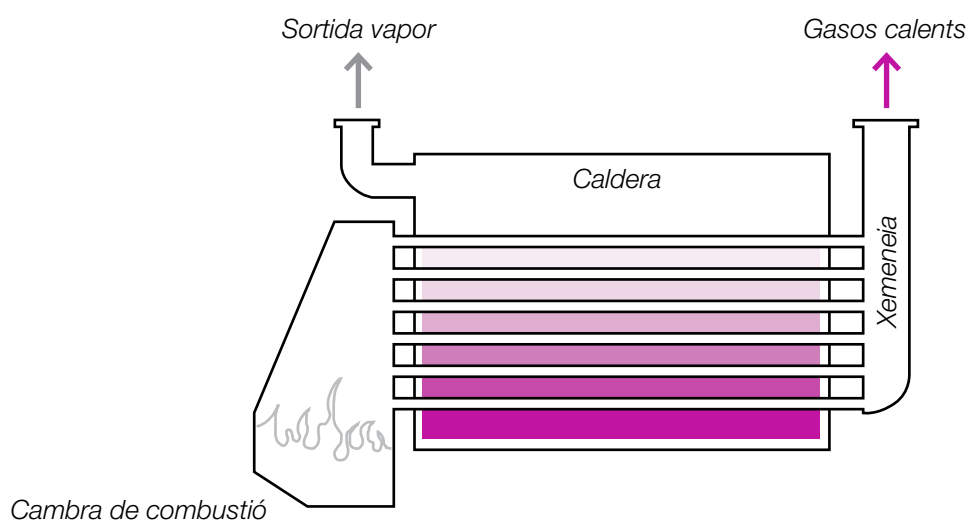


Figura 7.1. Caldera pirotubular

**Calderes aquotubulars.** En aquest tipus de calderes, l'aigua circula per l'interior dels tubs, mentre que els fums circulen entre els espais dels tubs. La seva finalitat és subministrar calor i/o potència.

Es consideren de manera ideal sense límit de pressió i sense límit de potència tèrmica de sortida. El seu rendiment oscil·la entre el 85-90% si l'economitzador està inclòs en la caldera.

A causa de la gran cambra de combustió de què disposen, poden funcionar amb qual·sevol tipus de combustible, ja que el disseny del forn pot adaptar-se al combustible. Tenen un alt cost en comparació amb les piro·tubulars en les aplicacions en què són intercanviables.

Poden acoblar-se a fàbrica o en el lloc de destí i necessiten aigua tractada però amb més cura que les piro·tubulars. El període d'inspecció d'aquest tipus de calderes és de 26 mesos.

La flexibilitat en el disseny fa que siguin innombrables les tipologies constructives d'aquest tipus de caldera i, per tant, es poden trobar calderes aquotubulars amb múltiples dipòsits, de dipòsit únic, amb circulació forçada o assistida.

**Calderes compostes.** En aquest tipus de caldera, el dipòsit de vapor se substitueix per una carcassa amb tubs de petit diàmetre, o sigui, una caldera piro·tubular sense forn. Aquest tipus de disseny combina els avantatges del baix cost de les calderes piro·tubulars amb el seu dipòsit gran pel vapor, amb la flexibilitat pel combustible del forn de les

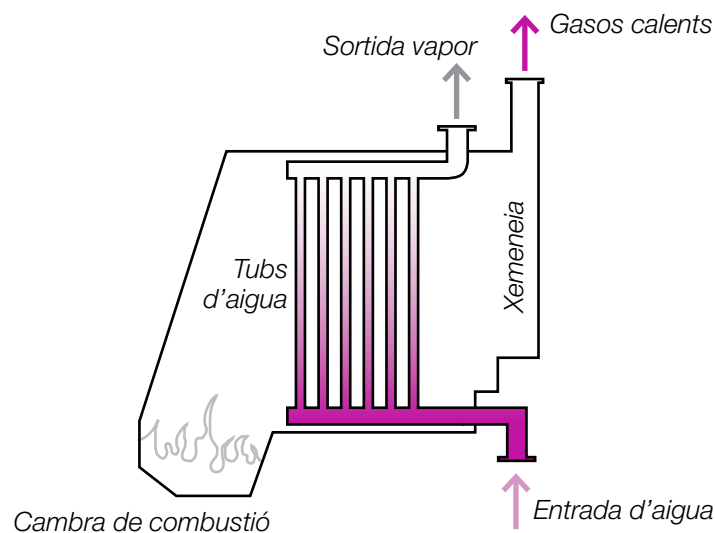


Figura 7.2. Caldera aquotubular

aquotubulars. En una caldera composta, la potència de sortida està controlada per la capacitat de fabricació de la carcassa i per limitacions en el transport. La pressió màxima està limitada per la temperatura de les plaques dels tubs. De tota manera, en aquest tipus de calderes s'eliminen els problemes de pressió i potència de sortida de les calderes pirotubulars.

## 2.4. Normativa aplicable

La normativa aplicable en aquest mòdul bàsicament és el Reglament d'Instal·lacions Tèrmiques als Edificis (RITE) [2] del 2007, el Reglament d'equips a pressió i les seves instruccions tècniques complementàries [3] i diverses normes UNE de referència.

Pel que fa a la pèrdua de calor a través de les canonades, accessoris o dispositius de la caldera, en el RITE s'exigeix la incorporació d'aïllament en aquestes. També s'exigeix una mínima espessor d'aquest en funció del diàmetre exterior de la canonada i de la diferència de temperatures.

Pel que fa al reglament d'equips a pressió en la instrucció tècnica complementària ITC EP-1 *Calderas*, s'especifica que s'hauran d'adoptar les mesures de seguretat, rendiment o mediambientals indicades en les corresponents disposicions específiques del reglament present.

En la mateixa instrucció es detallen les condicions d'emplaçament, instal·lació, posada en marxa, inspeccions periòdiques, reparacions i modificacions, a banda de les obligacions dels usuaris i operadors de caldera per garantir la seguretat de les persones i de les calderes.

Dins la ITC EP-1, RD2060/2008, de 12 de desembre, destaquen l'article 8, *Agua de alimentación y agua de la caldera*, i l'article 12, *Obligaciones de los usuarios*. L'article 8 fa referència al tractament previ de l'aigua de la caldera i al règim de control, filtratge, purgues i extraccions.

Per altra banda, en l'article 12 es fa referència a les obligacions de l'usuari de la caldera envers el funcionament, manteniment, vigilància i documentació de la caldera i accessoris.

També s'haurà d'aplicar la nova normativa d'ecodisseny (ErP) que ha entrat en vigor a partir del 26/09/2015 pel que fa als requisits de disseny ecològic per a totes les calderes que generin vapor amb la finalitat de calefactar: Directiva 2009/125/CE.

Es poden consultar altres normes que fan referència a calderes de vapor, les quals es mostren a continuació:

UNE 9112:1988

Calderes de vapor. Funcionament i manteniment. Instruccions generals.

UNE 9004:1986

Calderes de vapor. Característiques i dades fonamentals per definir-les.

UNE 9002:1986

Calderes de vapor. Classificació.

UNE 12953: 2003.

Calderes piro-tubulars

UNE-EN 12952-12:2004.

Calderes aquotubulars.

## 2.5 Descripció gràfica

De la Figura 7.3 a la Figura 7.6 es mostren els diferents tipus de caldera de vapor de l'apartat 2.3.

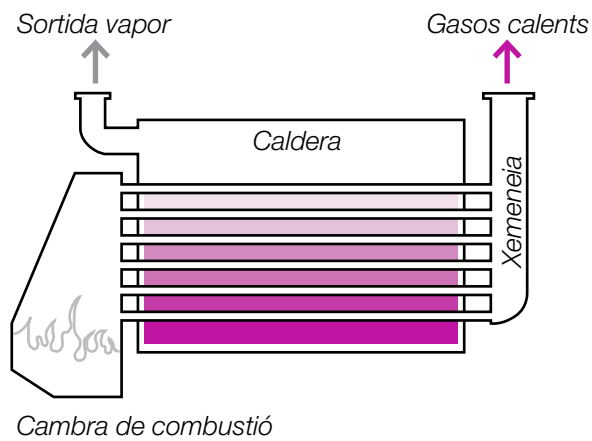


Figura 7.3. Caldera piro-tubular

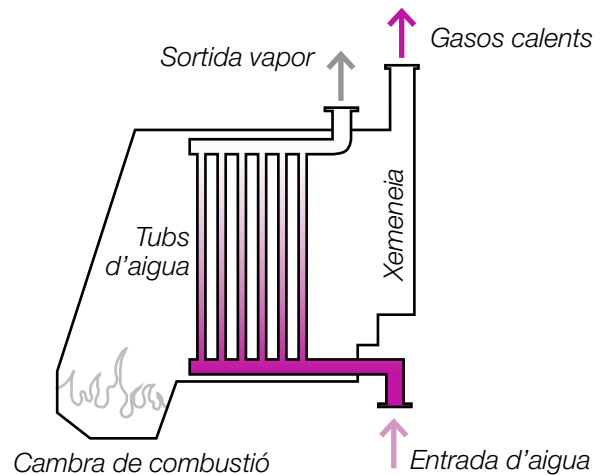


Figura 7.4. Caldera aquo-tubular

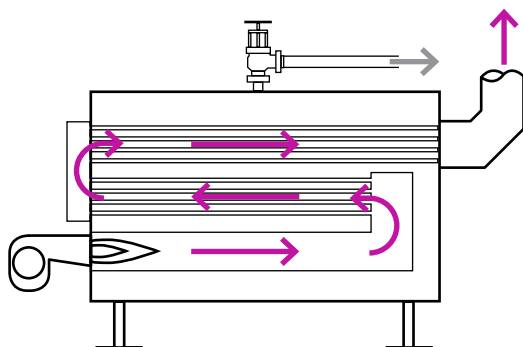
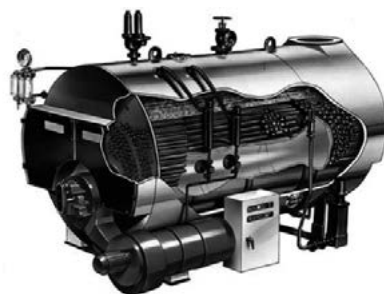


Figura 7.5. Caldera piro-tubular de vapor saturat amb tres passos de tub.



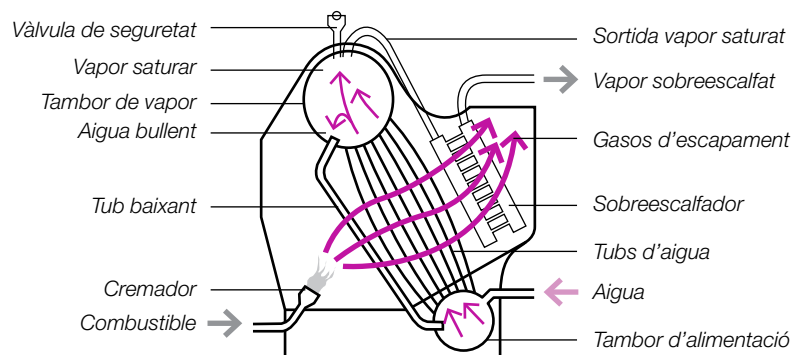


Figura 7.6. Caldera aquotubular de vapor sobreescalfat.

## 3. Definició del balanç energètic

### 3.1. Descripció del balanç energètic

El balanç energètic en calderes de vapor té com a objectiu caracteritzar els fluxos d'energia d'entrada i sortida en la caldera per poder calcular el rendiment energètic d'aquesta.

Per tant, en una caldera de vapor es consideren com a entrades el flux d'energia associat al retorn del condensat, el flux d'energia associat a l'entrada d'aigua de xarxa en la caldera i el flux d'energia procedent de la combustió del combustible en el cremador. Per altra banda, es considera com a sortida el flux d'energia associat al vapor d'aigua generat en la caldera, el flux d'energia associat als fums de sortida, el flux d'energia associat a les pèrdues de la caldera i el flux de les purgues. Cal dir que el flux associat al retorn del condensat i el flux associat a l'aigua d'entrada es poden considerar com un únic flux, ja que en la majoria d'instal·lacions aquests dos corrents es mesclen en un dipòsit d'alimentació de la caldera.

Un cop caracteritzats els corrents d'entrada i sortida en la caldera de vapor, relacionant la potència tèrmica útil que absorbeix l'aigua i la potència tèrmica de la combustió, s'obté el rendiment de la caldera.



Una altra manera d'avaluar el rendiment d'una caldera és caracteritzant el percentatge de pèrdues per transferència de calor en la caldera, el percentatge de pèrdues en els fums i el percentatge de pèrdues energètiques per la presència d'incrementats a causa d'una combustió incompleta en el cremador. Un cop es tenen caracteritzats aquests percentatges, es resten del rendiment ideal, és a dir, del 100%, i es troba el rendiment de la caldera.

Aquest últim mètode, requereix aplicar les correlacions de transferència de calor i fer un balanç energètic en el cremador per avaluar les pèrdues en la combustió. En aquest mòdul no es mostra aquest mètode ja que es mostra en el mòdul de cremadors.

Finalment, cal comentar que el càlcul del rendiment energètic en calderes de vapor es realitza partint del PCI (Poder Calorífic Inferior) del combustible que aquesta utilitza.

### 3.2. Esquema del balanç energètic

En l'Equació 7.1, es mostra la relació entre els corrents d'entrada i sortida en una caldera de vapor mentre que en la figura 7.7 i 7.8 es mostra l'esquema genèric d'una instal·lació de vapor i l'esquema del balanç energètic respectivament.

$$\dot{Q}_f + \dot{F} = \dot{Q}_v + \dot{Q}_{fums} + \dot{Q}_p + \dot{Q}_{purg} \quad \text{Equació 7.1}$$

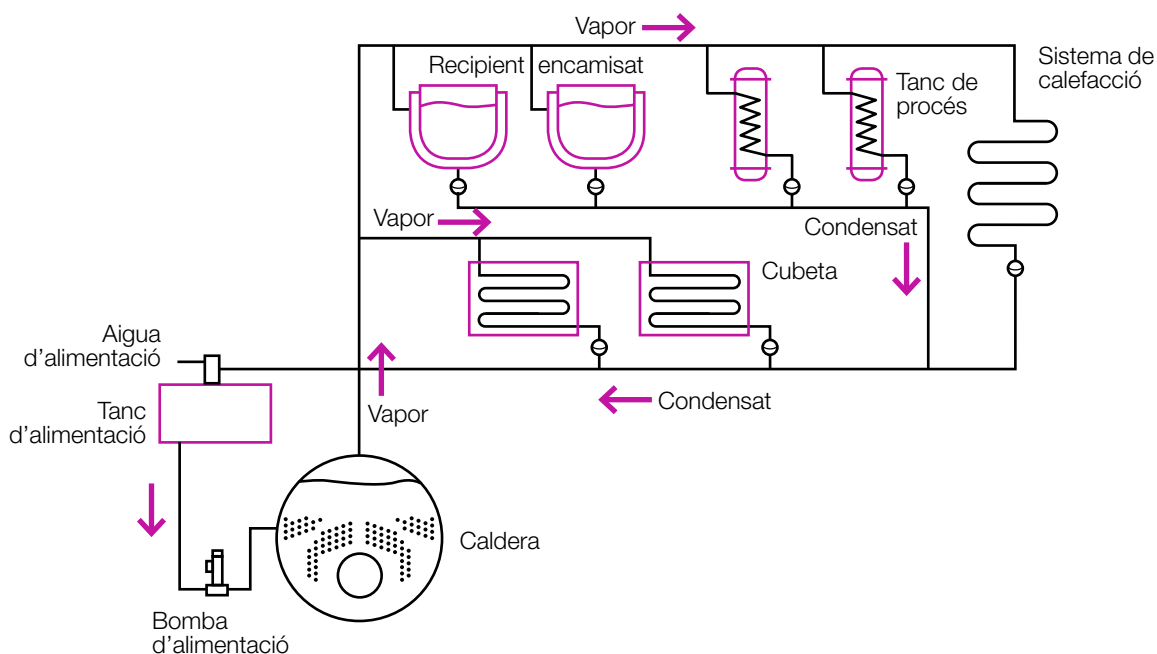


Figura 7.7. Esquema genèric d'una instal·lació de vapor amb retorn de condensats.

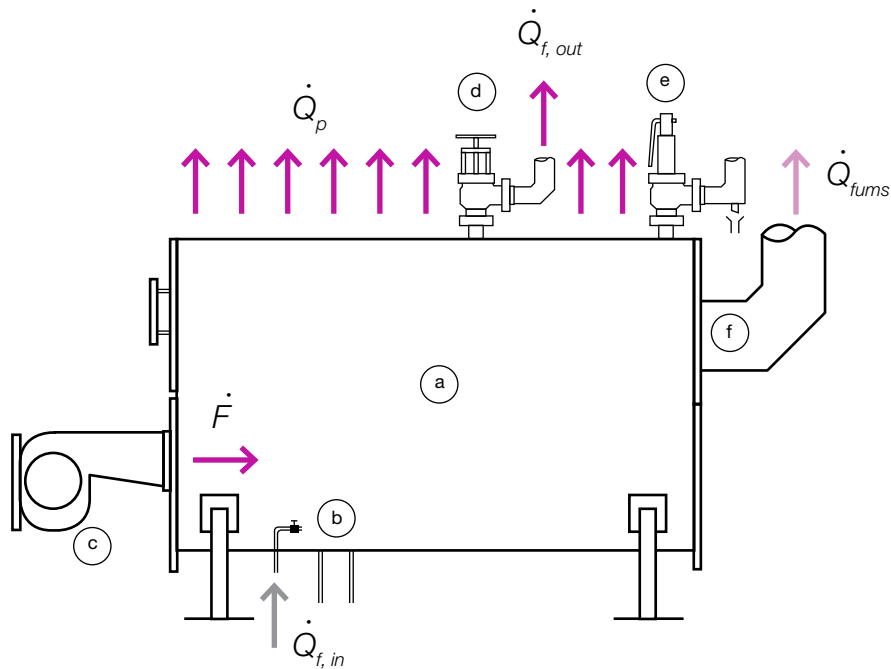


Figura 7.8. Esquema de les parts d'una caldera de vapor i del balanç energètic. a) Caldera, b) Entrada d'aigua i condensats, c) Cremador, d) Sortida del vapor, e) Vàlvula de seguretat, f) Sortida de fums, g) Purgadors de la caldera.

## 4. Bases de càlcul

### 4.1. Formulació

En primer lloc, s'ha de calcular la potència tèrmica útil que absorbeix l'aigua al seu pas per la caldera mitjançant l'Equació 7.2:

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_v - \dot{Q}_f \quad \text{Equació 7.2}$$

$$\dot{Q}_f = \dot{V}_f \cdot \rho_f \cdot h_f \quad \text{Equació 7.3}$$

$$\dot{Q}_v = \dot{V}_v \cdot \rho_v \cdot h_v \quad \text{Equació 7.4}$$

On:

$\dot{Q}_u$  [kW] o [MW] correspon a la potència tèrmica útil absorbida per l'aigua al seu pas per la caldera.

$\dot{Q}_f$  [kW] o [MW] correspon a la potència tèrmica associada a l'aigua d'entrada a la caldera.

$\dot{Q}_v$  [kW] o [MW] correspon a la potència tèrmica associada al vapor saturat a la sortida de la caldera.

$\dot{V}_f$  [m<sup>3</sup>/s] correspon al cabal volumètric de l'aigua d'entrada a la caldera.

$\rho_f$  [kg/m<sup>3</sup>] correspon a la densitat de l'aigua d'entrada a la caldera. Valor extret de la Taula 7.1 a partir de la temperatura de l'aigua.

$h_f$  [kJ/kg] correspon a l'entalpia específica de l'aigua d'entrada a la caldera. Valor extret de la Taula 7.1 a partir de la temperatura de l'aigua.

En aquest mòdul se suposa que l'aigua líquida d'entrada a la caldera és saturada. Si aquest no és el cas la variable  $h_f$  s'extreu de les taules d'aigua subrefredada a partir de la pressió i temperatura.

$\dot{V}_v$  [m<sup>3</sup>/s] correspon al cabal volumètric del vapor saturat a la sortida de la caldera.

$\rho_v$  [kg/m<sup>3</sup>] correspon a la densitat del vapor saturat a la sortida de la caldera. Valor extret de la Taula 7.1 a partir de la temperatura del vapor saturat.

$h_v$  [kJ/kg] correspon a l'entalpia específica del vapor saturat a la sortida de la caldera. Valor extret de la Taula 7.1 a partir de la temperatura del vapor saturat.<sup>1</sup>

En el cas de tractar-se de vapor sobreescalfat, la variable  $h_v$  s'extreu de les taules de vapor sobreescalfat a partir de la temperatura i pressió del vapor.

El valor de la variable  $\dot{V}_v$  es pot mesurar amb el comptador que incorporen les calderes de vapor. En cas que les calderes no incorporin aquest comptador, s'ha de fer un balanç màssic particularitzat a l'aigua tal com s'indica en l'Equació 7.5.

$$\dot{V}_f \cdot \rho_f = \dot{V}_v \cdot \rho_v + \dot{V}_{purg} \cdot \rho_{purg} \quad \text{Equació 7.5}$$

On:

$\dot{V}_{purg}$  [m<sup>3</sup>/s] correspon al cabal volumètric de les purgues del vapor en la caldera.

$\rho_{purg}$  [kg/m<sup>3</sup>] correspon a la densitat de les purgues del vapor en la caldera. Valor extret de la Taula 7.1 en funció de la temperatura del condensat de les purgues.

En segon lloc, es calcula la potència tèrmica associada a la combustió de combustibles. Per a combustibles líquids es calcula mitjançant l'Equació 7.6 i per a gasosos mitjançant l'Equació 7.7.

$$\dot{F}_L = \dot{V}_{comb,L} \cdot r_{comb,L} \cdot PCI_L + \dot{W}_{e,h} + \dot{W}_{e,p} \quad \text{Equació 7.6}$$

On:

$\dot{F}_L$  [kW] o [MW] correspon a la potència tèrmica del combustible líquid.

$V_{comb,L}$  [m<sup>3</sup>/s] correspon al cabal volumètric de combustible líquid en el cremador.

$r_{comb,L}$  [kg/m<sup>3</sup>] correspon a la densitat del combustible líquid del cremador.

$PCI_L$  [kJ/kg] correspon al poder calorífic inferior del combustible líquid del cremador.

$W_{e,h}$  [kW] correspon a la potència elèctrica del preescalfador del combustible líquid.

$W_{e,p}$  [kW] correspon a la potència elèctrica de bombeig del combustible líquid.

$$\dot{F}_G = \dot{V}_n \cdot PCI_G \quad \text{Equació 7.7}$$

On:

$\dot{F}_G$  [kW] o [MW] correspon a la potència tèrmica del combustible gasós.

$\dot{V}_n$  [Nm<sup>3</sup>/s] correspon al cabal volumètric del combustible gasós en el cremador, en condicions normals de pressió i temperatura, és a dir, una atmosfera de pressió i 0 °C de temperatura. Es calcula mitjançant l'Equació 7.8.

$PCI_G$  [kJ/Nm<sup>3</sup>] correspon al poder calorífic inferior del combustible gasós en condicions normals corresponents a 0°C de temperatura i 101,3 kPa.

El subministrador de combustible proporciona el poder calorífic de subministrament en la factura. Per altra banda, si no es té aquest valor, es pot consultar en taules (Taula 7.2 per a combustibles líquids i Taula 7.3 per a combustibles gasosos).

$$\dot{V}_n = V_r \cdot \frac{P_r}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_r} \cdot \frac{Z_0}{Z_r} \quad \text{Equació 7.8}$$

On:

$V_r$  [m<sup>3</sup>/s] correspon al cabal volumètric real de combustible gas mesurat al comptador.

$P_r$  [kPa] correspon a la pressió absoluta del combustible gas en el subministrament.

$P_0$  [kPa] correspon a la pressió absoluta del combustible gas en condicions normals. Es considera 1 atmosfera o 101,3 kPa per a aquesta variable.

$T_0$  [K] correspon a la temperatura del combustible gas en condicions normals. Es considera de 273,15 K, és a dir, 0°C.

$T_r$  [K] correspon a la temperatura real del combustible gas en el subministrament.

$Z_0$  [-] correspon al factor de compressibilitat del gas en condicions normals.

$Z_r$  [-] correspon al factor de compressibilitat del gas en les condicions de pressió i temperatura reals.

Els factors de compressibilitat  $Z_0$  i  $Z_r$  són complexos en el seu càlcul i a les pressions de treball de les calderes el quocient  $\frac{Z_0}{Z_r}$  pràcticament no afecta. Per tal de facilitar els càlculs aquest quocient es redueix a la unitat,  $\frac{Z_0}{Z_r} = 1$

Un cop calculades la potència tèrmica útil que absorbeix l'aigua i la potència tèrmica del combustible, es pot calcular el rendiment de la caldera de vapor amb combustible líquid mitjançant l'Equació 7.9 i amb combustible gasós mitjançant l'Equació 7.10:

$$\eta_L = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{F}_L} \cdot 100 \quad \text{Equació 7.9}$$

On:

$\eta_L$  [%] correspon al rendiment energètic en una caldera de vapor de combustible líquid.

$$\eta_G = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{F}_G} \cdot 100 \quad \text{Equació 7.10}$$

On:

$\eta_G$  [%] correspon al rendiment energètic en una caldera de vapor de combustible gasós.

## 4.2. Taules i diagrames

A la Taula 7.1 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 <sup>3</sup>		Entalpia kJ/kg			Calor específic J/kg·°C	
		$\rho$		hl	hlv	hv	Cp	
		Líquid	Vapor	Líquid	Vaportizació	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	0,130	251,18	2359	2608,8	4185	1916
65	25,03	980,4	0,161	272,11	2346	2617,5	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	2643,0	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 7.1. Propietats físiques i termodinàmiques de l'aigua saturada en funció de la temperatura.

	Densitat	PCI				PCS
	kg/m <sup>3</sup>	kcal/kg	kWh/kg	te/kg	MJ/kg	MJ/kg
GLP Propà	506 <sup>(1)</sup>	11.073	12,88	11,07	46,35	50,45
GLP Butà	580 <sup>(1)</sup>	10.939	12,72	10,94	45,79	49,68
Querosè	780	10.368	12,06	10,37	43,40	46,50
Gasoil C	850	10.099	11,74	10,10	42,28	43,12
Fuel núm. 1	944	9.699	11,28	9,70	40,60	42,70

<sup>(1)</sup> Densitat en estat líquid a 20°C

Taula 7.2. Poder calorífic superior i inferior de diferents combustibles líquids.

	Densitat	PCI				PCS
	Relativa <sup>(1)</sup>	kcal/m <sup>3</sup>	kWh/m <sup>3</sup>	te/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>
Gas natural	0,63 <sup>(2)</sup>	9.228	10,73	9,23	38,63	42,92
Gas ciutat	0,65	4.037	4,69	4,04	16,90	18,20
Propà	1,85 <sup>(3)</sup>	20.484	23,8	20,5	85,7	93,3
Butà	2,41 <sup>(3)</sup>	26.253	30,5	26,3	109,9	119,2

<sup>(1)</sup> Densitat relativa en funció de la de l'aire. Per a obtenir la densitat real multiplicar per 1,29 kg/m<sup>3</sup> en condicions normals, o per 1,19 kg/m<sup>3</sup> a 20 °C.

<sup>(2)</sup> Variable per a cada jaciment, entre 0.58 i 0.66 en condicions normals.

<sup>(3)</sup> Densitat relativa a 20°C

Taula 7.3. Poder calorífic superior i inferior de diferents combustibles gasosos.

## 5. Planificació de mesures

### 5.1. Dades de què es disposa

- Densitat de l'aigua d'entrada a la caldera  $\rho_f$  [kg/m<sup>3</sup>]
- Entalpia específica de l'aigua d'entrada a la caldera:  $h_f$  [kJ/kg]
- Densitat del vapor saturat a la sortida de la caldera:  $\rho_v$  [kg/m<sup>3</sup>]
- Entalpia específica del vapor saturat a la sortida de la caldera:  $h_v$  [kJ/kg]
- Densitat del combustible líquid del cremador:  $\rho_{comb,L}$  [kg/m<sup>3</sup>]
- Poder calorífic inferior del combustible líquid del cremador:  $PCI_L$  [kJ/kg]
- Poder calorífic inferior del combustible gasós en condicions normals:  $PCI_G$  [kJ/Nm<sup>3</sup>].
- Pressió del combustible gasós en condicions normals:  $P_o$  [kPa]
- Temperatura del combustible gasós en condicions normals:  $T_o$  [K]
- Densitat de les purgues del vapor en la caldera (en el cas que no hi hagi comptador de vapor):  $\rho_{purg}$  [kg/m<sup>3</sup>]

## 5.2. Dades a mesurar

- Cabal volumètric de l'aigua d'entrada a la caldera:  $\dot{V}_f$  [m<sup>3</sup>/s]
- Cabal volumètric del vapor saturat a la sortida de la caldera:  $\dot{V}_v$  [m<sup>3</sup>/s]
- Cabal volumètric real del combustible gas mesurat al comptador:  $\dot{V}_f$  [m<sup>3</sup>/s]
- Cabal volumètric de les purgues (si no hi ha comptador de vapor):  $\dot{V}_{purg}$  [m<sup>3</sup>/s]
- Cabal volumètric de combustible líquid:  $\dot{V}_{comb,L}$  [m<sup>3</sup>/s]
- Temperatura de l'aigua a l'entrada de la caldera:  $T_f$  [°C]
- Temperatura del vapor a la sortida de la caldera:  $T_v$  [°C]
- Temperatura de les purgues del vapor en la caldera:  $T_{purg}$  [°C]
- Temperatura del combustible líquid:  $T_{comb,L}$  [°C]
- Pressió absoluta del vapor a la sortida de la caldera:  $P_{vapor}$  [kPa]
- Pressió absoluta de l'aigua d'entrada a la caldera:  $P_f$  [kPa]
- Potència elèctrica del preescalfador del combustible líquid:  $W_{e,h}$  [kW]
- Potència elèctrica de bombeig del combustible líquid:  $W_{e,p}$  [kW]
- Temperatura real del combustible gas en el subministrament:  $T_r$  [K]
- Pressió real del combustible gas en el subministrament:  $P_r$  [kPa]

## 5.3. Inventari d'aparells de mesura

- Termòmetre de contacte/Termòmetre d'infraroig (Figura 7.9. i Figura 7.10. respectivament).

– Variable mesurada:  $T_f, T_v, T_{purg}, T_{comb,L}, T_r$



Figura 7.9. Multímetre + Sonda de superfície



Figura 7.10. Termòmetre d'infrarojos

La mesura de les variables  $V_v$  i  $P_{vapor}$ , és complexa sense intervenir en el vapor. De tota manera, moltes calderes incorporen un comptador de vapor i un manòmetre d'on es poden extreure aquestes mesures.



Pel que fa a les variables  $P_f$  i  $P_{vapor}$  si es consideren aigua saturada i vapor saturat respectivament no cal mesurar-les, amb la seva temperatura ja n'hi ha prou.

En el cas que la caldera no disposi del comptador, s'ha de fer un balanç de massa en la caldera segons s'indica a l'Equació 7.5 de l'apartat 5.1.

- Cabalímetre ultrasònic no invasiu per líquids (Figura 7.11 ):

– Variable mesurada:  $\dot{V}_f, \dot{V}_{purg}, \dot{V}_{comb,L}$



Cabalímetre



Suport per al muntatge dels transductors grans



Transductors petits amb guia per connectar a dues travesses



Mesurador de gruix de canonades

Figura 7.11. Cabalímetre + Accessoris.

- Analitzador de xarxes elèctriques (figura 7.12).

– Variable mesurada:  $\dot{W}_{e,h}, \dot{W}_{e,p}$



Analitzador de xarxes



Pinça amperimètrica rígida CPR-500



Pinça amperimètrica flexible C-flex



Muntatge de les pinces C-Flex

Figura 7.12. Analitzador elèctric AR6 + Accessoris.

La mesura de les variables  $P_r$  i  $V_r$  resulta molt complexa sense la intervenció directa en el combustible gas.

Donat que no es pot intervenir directament en el gas, perquè això significaria un risc elevat d'explosió, moltes calderes de vapor incorporen a l'entrada del cremador una rampa de gas o grup de regulació que serveix per acabar de filtrar el gas, regular-lo i comptabilitzar-lo.

Per tant, la mesura d'aquestes variables es pot observar directament en el grup de regulació. En la Figura 7.13 es mostra una rampa de gas típica que poden incorporar les calderes.

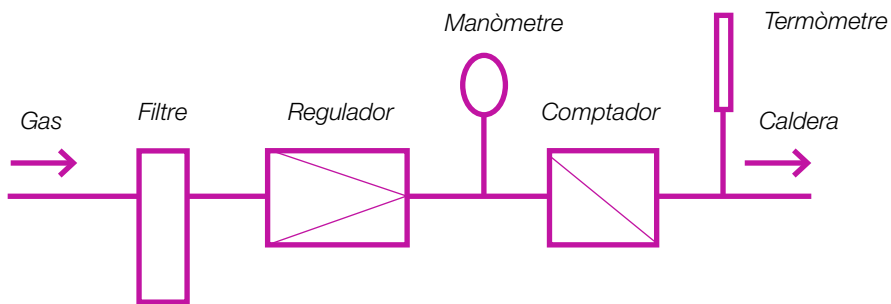


Figura 7.13. Esquema d'un grup de regulació típic en una caldera.

### 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  $T_f, T_v, T_{f,out}, T_{comb,L}, T_r$  es fa sobre la superfície

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

En la mesura de les variables  $\dot{W}_{e,h}, \dot{W}_{e,p}$  i altres paràmetres elèctrics, s'ha de tenir en compte que es fa sobre xarxes elèctriques en funcionament i, com a tal, la mesura ha de ser realitzada per un tècnic expert amb carnet d'electricista, que no treballi mai sol, que disposi d'elements de protecció com guants i calçat aïllant, que utilitzi eines normalitzades, que hagi fet un curs de seguretat industrial per tal de tenir recursos preventius i que conegui, en la mesura del possible, el Pla específic de riscos laborals de l'empresa.

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

Sobretot s'ha d'evitar fugues de líquids corrosius a prop dels transductors del cabalímetre; també s'han 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, així com tractar de manera suau els connectors amb el cabalímetre, ja que en són la part més fràgil.

Cal evitar tot ajustament, manteniment o reparació que impliqui l'obertura de l'analitzador; només es pot obrir l'equip per personal qualificat. Abans de qualsevol operació, modificació de les connexions, canvi, manteniment o reparació, cal desconnectar l'aparell de tota font d'alimentació. Quan se sospiti d'un funcionament erroni, fallada de l'equip o de la protecció, aquest ha de deixar-se 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. Accedir a una zona representativa de la canonada d'entrada d'aigua, de la canonada de sortida de vapor i de la canonada d'entrada de combustible líquid o gasós.
2. 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.
3. Esperar fins que el valor s'estabilitzi i anotar la mesura o guardar-la.
4. Repetir el procediment en diversos punts de les canonades.

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

1. Connectar el termòmetre d'infrarojos.
2. Ajustar l'emissivitat en relació amb el material de la canonada segons la Taula 7.4.
3. Prémer el gallet i dirigir el raig làser a la zona en qüestió on es vol mesurar la temperatura. Esperar fins que el valor s'estabilitzi i anotar-lo o guardar-lo.
4. Repetir la mesura en diversos punts de les canonades.

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

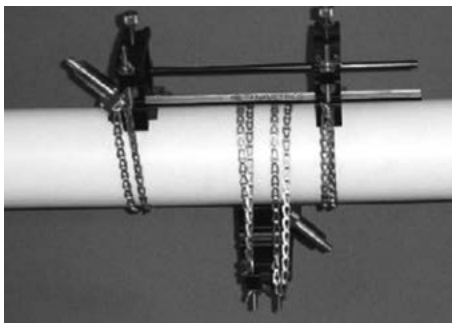
Taula 7.4. Emissivitat de diferents materials

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

## 6.2. Mesura del cabal de líquids

1. En el menú del cabalímetre, s'ha de seleccionar *Parametros*, per entrar les dades corresponents.

2. Cal entrar les dades del tipus de canonada: material, diàmetre exterior i 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.
3. Cal entrar les dades del fluid, bàsicament el tipus de fluid. El cabalímetre disposa d'una base de dades de diferents líquids.
4. Cal especificar la longitud de trajectòria, la longitud axial, el nombre de travesses (una o dues en aquest cas) i l'espaiament entre transductors.
5. Cal muntar els transductors sobre la canonada a una o dues travesses, segons la Figura 7.14, aplicant greix entre el transductor i la canonada. És aconsellable, en el cas que es pugui, fer el muntatge a dues travesses.
6. S'ha de fer 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'ha d'anotar o guardar la mesura quan el valor d'aquesta s'estabilitzi.



a) a una travessa.



b) a dues travesses.

Figura 7.14. Muntatge dels transductors.

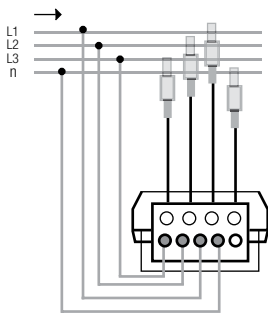
### 6.3. Mesura de la potència d'escalfament i de bombeig del combustible líquid

1. S'han de connectar les preses de tensió i les pinces amperimètriques segons el tipus d'instal·lació, tal com s'indica a la figura 7.15, a les connexions del motor elèctric del compressor. Cal tenir en compte les normes de seguretat del manual i les referenciades en l'apartat 5.4.

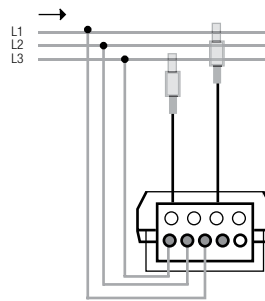
2. S'ha d'engegar l'aparell i seleccionar el tipus de mesura a realitzar prement la icona [ANÁLISIS DE MEDIDAS]. Un cop s'obri la llista amb les diferents mesures disponibles, s'ha de seleccionar mitjançant el cursor gris el tipus de mesura que s'ha de fer segons les configuracions presentades a la figura 7.15.

3. Un cop seleccionada la mesura a realitzar, cal prémer la tecla dinàmica [ACCIONES] i seleccionar [REGISTROS]. S'obrirà una pantalla on es podran visualitzar els paràmetres principals de la connexió a analitzar.

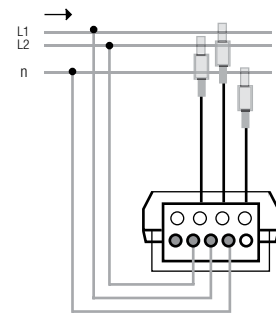
4. S'han de llegir les mesures, guardar-les o anotar-les. És convenient deixar l'analitzador connectat durant el temps en què es fan les altres mesures perquè integri tot el període.



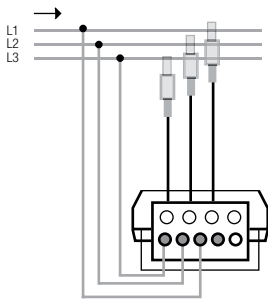
Sistema Trifàsic 4 fils



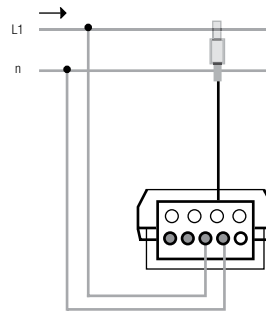
Sistema Trifàsic 3 fils ARON



Sistema Bifàsic



Sistema Trifàsic 3 fils



Sistema Monofàsic

Figura 7.15. Tipus de configuracions en les xarxes elèctriques.

## 7. Exemple pràctic

### 7.1. Enunciat

Una caldera de vapor saturat funciona a gas natural. Una part del vapor produït és retornat a la caldera en forma de condensats. La caldera té una capacitat nominal de 4.000 kg/hora i una potència nominal de 2.781 kW. Es demana calcular el rendiment de la caldera.

## 7.2. Dades

A la Taula 7.5 es mostra el recull de dades de què es disposa i dels valors extrets de la taula 7.1 a partir de les temperatures mesurades a l'entrada d'aigua (109°C) i a la sortida del vapor (161°C).

Paràmetres	Unitats	Dada
Densitat de l'aigua d'entrada a la caldera ( $\rho_f$ )	kg/m <sup>3</sup>	951
Entalpia específica de l'aigua d'entrada a la caldera ( $h_f$ )	kJ/kg	459,3
Densitat del vapor saturat a la sortida de la caldera ( $\rho_v$ )	kg/m <sup>3</sup>	3,38
Entalpia específica del vapor saturat a la sortida de la caldera ( $h_v$ )	kJ/kg	2759,4
Poder calorífic inferior del gas natural <sup>2</sup> ( $PCI_g$ )	kJ/Nm <sup>3</sup>	38.628
Poder calorífic superior del gas natural <sup>3</sup> ( $PCS_g$ )	kJ/Nm <sup>3</sup>	42.920
Pressió del combustible gasós en condicions normals ( $P_0$ )	kPa	101,3
Temperatura del combustible gasós en condicions normals ( $T_0$ )	K	273,15

Taula 7.5. Dades de què es disposa sobre els fluids de la caldera de vapor.

A la taula 7.6 es mostren les dades mesurades en la caldera de vapor.

Paràmetres	Unitats	Dada
Cabal volumètric de l'aigua d'entrada a la caldera ( $\dot{V}_f$ )	m <sup>3</sup> /s	4,016·10 <sup>-4</sup>
Cabal volumètric del vapor saturat a la sortida de la caldera ( $\dot{V}_v$ )	m <sup>3</sup> /s	0,2671
Cabal volumètric real de gas natural ( $\dot{V}_r$ )	m <sup>3</sup> /s	0,056
Temperatura real del combustible gas en el subministrament <sup>4</sup> ( $T_r$ )	K	283,45
Pressió absoluta real del combustible gas en el subministrament ( $P_r$ )	kPa	186
Temperatura d'entrada de l'aigua a caldera ( $T_f$ )	°C	109
Temperatura de sortida de vapor de la caldera ( $T_v$ )	°C	161

Taula 7.6. Dades mesurades en la caldera de vapor.

<sup>2</sup> El valor de PCI del combustible gas és de 10,73 kWh/Nm<sup>3</sup>. S'ha multiplicat pel factor de 3600 kJ/kWh per tenir les unitats en kJ/Nm<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> El valor de PCS del combustible gas és de 11,92 kWh/Nm<sup>3</sup>. S'ha multiplicat pel factor de 3600 kJ/kWh per tenir les unitats en kJ/Nm<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> La temperatura real del gas corresponent a 10,3°C s'ha de transformar en K.

### 7.3. Càlculs i resultat

A partir de les dades referenciades en la Taula 7.5 i Taula 7.6 es calcula, en primer lloc, la calor útil que absorbeix l'aigua al seu pas per la caldera:

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_v - \dot{Q}_f$$

$$\dot{Q}_f = \dot{V}_f \cdot \rho_f \cdot h_f$$

$$\dot{Q}_f = 4,016 \cdot 10^4 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 951 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 459,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 175,4 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_v = \dot{V}_v \cdot \rho_v \cdot h_v$$

$$\dot{Q}_v = 0,2671 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 3,38 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 2759,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2491,2 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_u = 2491,2 - 175,4 = 2315,8 \text{ kW}$$

Un cop calculada la potència tèrmica útil que absorbeix l'aigua, es calcula la potència tèrmica proporcionada pel combustible, en aquest cas gas natural.

Primerament, s'ha de calcular el cabal volumètric del gas natural en condicions normals de la manera següent:

$$\dot{V}_n = V_r \cdot \frac{P_r}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_r} \cdot \frac{Z_0}{Z_r}$$

$$\dot{V}_n = 0,056 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \frac{186 \text{ kPa}}{101,3 \text{ kPa}} \cdot \frac{273,17 \text{ K}}{283,45 \text{ K}} = 0,1 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}}$$

Seguidament, amb el cabal volumètric en condicions normals es pot calcular la potència tèrmica que el combustible aporta a la caldera:

$$\dot{F}_G = \dot{V}_n \cdot PCI_G$$

$$\dot{F}_G = 0,1 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \cdot 38628 \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} = 3862,8 \text{ kW}$$



Finalment, amb la potència tèrmica útil i la potència tèrmica proporcionada pel combustible sobre el PCI, es pot calcular el rendiment de la caldera:

$$\eta_G = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{F}_G} \cdot 100$$

$$\eta_G = \frac{2315,8 \text{ kW}}{3862,8 \text{ kW}} \cdot 100 = 59,95\% \approx 60\%$$

Cal tenir en compte que el valor del rendiment de la caldera s'ha referenciat sobre el PCI. Aquest punt és important si es vol comparar el resultat obtingut amb les dades proporcionades pel fabricant, ja que si es tracta d'un equip de fabricació posterior al 26/09/2015 el càlcul del rendiment no serà l'instantani sinó l'estacional, i s'haurà obtingut sobre el PCS no sobre el PCI. A mode de comparació, si fem el mateix càlcul sobre el PCS del combustible:

$$\dot{F}_G = \dot{V}_n \cdot PCS_G$$

$$\dot{F}_G = 0,1 \frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \cdot 42920 \frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} = 4292 \text{ kW}$$

$$\eta_G = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{F}_G} \cdot 100$$

$$\eta_G = \frac{2315,8 \text{ kW}}{4292 \text{ kW}} \cdot 100 = 53,96\% \approx 54\%$$

Com podem veure, el rendiment de la caldera referenciat sobre el PCS seria més baix.

## 7.4. Comentaris

El rendiment obtingut és un rendiment força baix per a calderes de vapor, ja que en general el rendiment de les calderes de vapor oscil·la entre 80 i 85%.

S'ha de considerar que la caldera treballa al 82% de la seva capacitat i al 83% de la seva potència nominal. El resultat no es pot considerar com a genèric, ja que les mesures s'han fet sota les anteriors característiques de funcionament, entre d'altres, les quals són puntuals.

En definitiva, s'aconsella fer diverses mesures durant una temporada i amb diferents condicions de funcionament i obtenir el coeficient SPF (*Seasonal Performance Factor*). A banda, s'aconsella complementar aquesta anàlisi amb l'anàlisi de la combustió mostrada en el mòdul de cremadors.

## 8. Referències

**[1]** Informes i estudis tecnològics encarregats per l'Institut Català d'Energia. Estudi d'eficiència energètica en el sector dels fluids tèrmics i situació a Catalunya Tom II. Maig de 2006.

[http://icaen.gencat.cat/web/.content/10\\_ICAEN/17\\_publicacions\\_informes/08\\_guies\\_informes\\_estudis/informes\\_i\\_estudis/arxius/200605\\_informe\\_fluids\\_termics\\_volumii.pdf](http://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/08_guies_informes_estudis/informes_i_estudis/arxius/200605_informe_fluids_termics_volumii.pdf)

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

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

**[3]** Reial decret 2060/2008. Reglament d'equips a pressió i les seves instruccions tècniques complementàries. BOE, 5 de febrer de 2007.

[http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2009-1964](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2009-1964)



