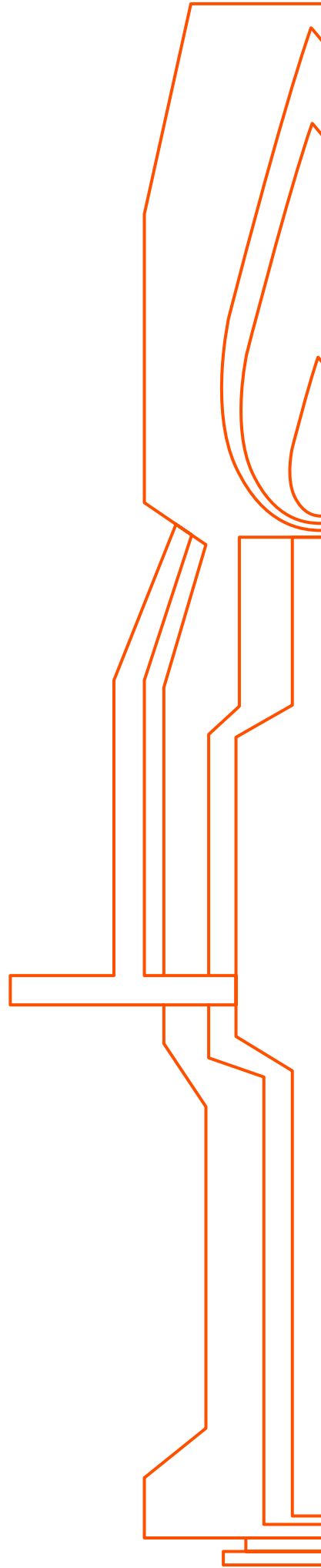


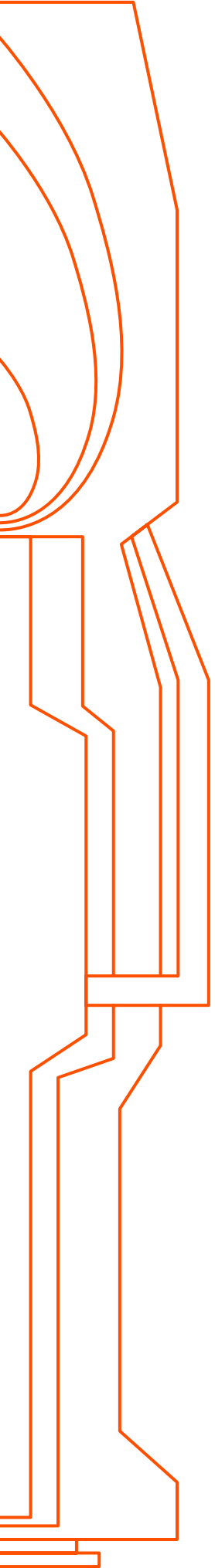


COL·LECCIÓ
BALANÇ ENERGÈTIC
D'EQUIPS CONSUMIDORS
MESURA I CÀLCUL

COMBUSTIÓ EN
CREMADORS

08





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

COMBUSTIÓ EN
CREMADORS

08

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



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

Per veure'n una còpia, visiteu:

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

Índex

0	Pròleg	7
1	Introducció	9
1.1	Justificació del mòdul	9
1.2	Objectiu del mòdul	10
1.3	Abast del mòdul	10
2	Descripció del sistema	10
2.1	Definició	10
2.2	Principis de funcionament i paràmetres	10
2.3	Tipologies d'equip	12
2.4	Normativa aplicable	14
2.5	Descripció gràfica	16
3	Definició del balanç energètic	18
3.1	Descripció del balanç energètic	18
3.2	Esquema del balanç energètic	18
4	Bases de càlcul	19
4.1	Formulació	19
4.2	Taules i diagrames	20
5	Planificació de mesures	22
5.1	Dades de què es disposa	22
5.2	Dades a mesurar	22
5.3	Inventari d'aparells de mesura	22
5.4	Seguretat en persones i equips	23
6	Realització de les mesures	24
6.1	Mesura dels paràmetres de combustió en els fums de sortida	24
7	Exemple pràctic	25
7.1	Enunciat	25
7.2	Dades	25
7.3	Càlculs i resultat	26
7.4	Comentaris	27
8	Referències	28

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 vuitè d'aquesta col·lecció que pren com a sistema d'estudi la combustió en cremadors. El balanç energètic, calcula el rendiment energètic d'un cremador caracteritzant els fluxos d'entrada i sortida del cremador per a poder-los contrastar.

1. Introducció

1.1. Justificació del mòdul

Per definició, la combustió és la reacció química exotèrmica del combustible amb l'oxigen i la flama n'és la característica principal. En aquest procés, es transforma l'energia química del combustible (sòlid, líquid o gasós) en energia tèrmica. Aquesta s'aprofita en aplicacions industrials com generadors de vapor, calderes d'aigua calenta i altres fluids tèrmics, forns, assecadors, etc. Cal dir que la combustió s'utilitza en molts processos industrials i, per tant, fa que sigui un procés molt freqüent en la indústria.

Els combustibles tenen una composició elemental formada per carboni i hidrogen (elements realment combustibles) amb alguns altres elements com nitrogen, oxigen, sofre i petites quantitats de vanadi, sodi i níquel.

Per altra banda, la combustió pot dur-se a terme directament amb oxigen o amb una mescla que el contingui anomenada comburent. El comburent més utilitzat avui és l'aire donada la seva disponibilitat i que és totalment gratuït.

Per tal que es produeixi la combustió de manera continuada cal que la barreja combustible-comburent sigui inflamable, és a dir, que la mescla tingui una composició i temperatura adequada perquè la flama pugui propagar-se per tota la mescla.

El dispositiu que possibilita que es doni l'anterior situació és el cremador, l'eficiència energètica del qual va molt lligada a les condicions en què es produeix la reacció de combustió.

Tal i com se cita en *l'Estudi d'eficiència energètica de la combustió i situació a Catalunya [1], la pràctica totalitat de les indústries catalanes són conscients de la necessitat d'ajustar la combustió per a obtenir el màxim rendiment energètic. Això fa que totes controlin, d'una manera o altra, la regulació de la combustió.*

És per això que és necessari fer un balanç energètic en els cremadors per tal d'avaluar si hi ha problemes relacionats amb la combustió que poden ocasionar una pèrdua d'eficiència energètica, la qual cosa es tradueix en un augment dels costos energètics i mediambientals. Alguns d'aquests problemes poden ser la presència d'incrementats productes d'una combustió incompleta, la presència excessiva de cendres pel que fa a combustibles sòlids, pèrdues energètiques per transferència de calor, una mala regulació de la composició, pressió i temperatura de la mescla combustible-aire, una mala estabilitat i un mal control de la flama o, en general, un mal funcionament del cremador.

1.2. Objectiu del mòdul

L'objectiu d'aquest mòdul és proporcionar una metodologia i unes bases de càlcul per poder fer una sèrie de mesures per caracteritzar posteriorment un balanç energètic en cremadors i definir el tipus de combustió que realitza.

1.3. Abast del mòdul

Aquest mòdul se centra bàsicament en tots els tipus de cremadors utilitzats en la indústria classificats sota dos criteris. En primer lloc, segons el combustible que utilitzen, i en segon lloc s'han classificat els cremadors que, segons la seva tipologia constructiva, reben el nom de cremadors especials.

A l'apartat 2.3 es pot observar una descripció més exhaustiva de les diferents tipologies de cremadors.

2. Descripció del sistema

2.1. Definició

Els cremadors són equips que possibiliten la reacció de combustió barrejant comburent (generalment aire) i combustible amb unes determinades condicions de pressió, temperatura i diàmetre adequat de les partícules de combustible. Tenen com a objectius principals mesclar l'aire i el combustible en les proporcions establertes, assegurar la inflamabilitat de la mescla, assegurar una encesa ràpida d'aquesta i, sobretot, assegurar una combustió completa, continua i estable.

Algunes de les parts més importants d'un cremador són el capçal de combustió en el qual s'injecten el combustible i l'aire, el conducte que uneix la cambra i el capçal de combustió, el sistema elèctric per a l'encesa de la mescla, el grup de regulació de la temperatura, de la pressió, i del cabal d'aire i combustible, així com també altres automatismes de control de la combustió i de seguretat.

En general, un cremador ha de tenir un marge de regulació adequat a les necessitats del procés en què s'utilitza. També ha de ser capaç de mantenir estable la flama dins del marge de regulació, ha de poder regular la forma i les dimensions de la flama, les seves dimensions han d'anar d'acord amb la cambra de combustió i ha d'incorporar automatismes que en facilitin un bon control.

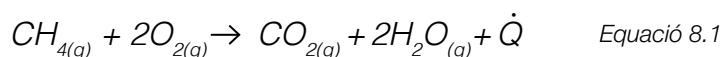
2.2. Principis de funcionament i paràmetres

A la combustió, per mitjà del comburent (oxigen de l'aire) s'oxida el carboni present en els combustibles i es produeix una reacció exotèrmica que allibera energia i productes

de la combustió com són el diòxid de carboni, el nitrogen, el vapor d'aigua i altres substàncies que poden contenir els combustibles.

Pel que fa als tipus de combustió, se'n diferencien tres tipus: la combustió completa o perfecta, la qual es realitza amb un excés d'aire i no es troben substàncies combustibles en els productes de la combustió; la combustió estequiomètrica o teòrica, la qual es realitza sense excés d'aire, i la combustió incompleta que es fa amb un defecte d'aire o una barreja deficient que provoca la presència de substàncies parcialment oxidades o incremats en els productes de la combustió.

A l'Equació 8.1 es mostra la reacció de combustió estequiomètrica del metà:



On:

$CH_{4(g)}$ correspon a la fórmula química del metà.

$O_{2(g)}$ correspon a la fórmula química de l'oxigen.

$CO_{2(g)}$ correspon a la fórmula química del diòxid de carboni.

$H_2O_{(g)}$ correspon a la fórmula química de l'aigua en fase gas.

\dot{Q} correspon a l'energia tèrmica generada a la combustió.

El funcionament dels cremadors va molt lligat a la reacció de combustió. En primer lloc, per mitjà d'un difusor, entra el combustible amb unes certes condicions de temperatura i pressió en el capçal de combustió del cremador, al mateix temps mitjançant circulació forçada o natural entra una certa quantitat d'aire, que pot ser a temperatura ambient o preescalfat. Seguidament la mescla combustible-aire circula a alta velocitat pel conducte que uneix el capçal i la cambra de combustió per assolir una bona mescla. Una vegada la mescla entra a la cambra de combustió, el sistema d'encesa proporciona l'energia d'activació necessària perquè es produeixi la combustió dins la cambra. Finalment els productes procedents de la reacció de combustió són aspirats cap a procés per utilitzar l'energia tèrmica d'aquests.

Un cop definit el procés de combustió i el funcionament dels cremadors, s'ha de caracteritzar l'eficiència energètica de la combustió d'aquests, és a dir, la relació entre la potència tèrmica obtinguda en la combustió i el poder calorífic inferior del combustible.

Bàsicament, hi ha dos mètodes per calcular l'eficiència energètica de la combustió en els cremadors. El primer consisteix a caracteritzar el percentatge de pèrdues per calor sensible i les pèrdues per la presència d'incremats i restar-los del rendiment ideal, és a dir, del 100%. Els paràmetres necessaris per aquest mètode són les concentracions de CO_2 i CO a la sortida de la vena de fums, la temperatura dels gasos de combustió i la temperatura ambient.

El segon mètode es realitza de manera molt semblant a l'anterior, però amb la diferència que el percentatge de pèrdues per calor sensible es calcula partint del PCI del combustible i en funció de les concentracions, de la temperatura, cabal màssic o volumètric i calor específica de tots els gasos de combustió, així com també de la temperatura ambient. Per altra banda, el percentatge de pèrdues per la presència d'incrementats es calcula també sobre la base del PCI del combustible i en funció del PCI i concentració de CO. Aquest mètode implica treballar amb la reacció estequiomètrica i alhora fer un balanç energètic i màssic en el cremador. A la vegada, les substàncies que intervenen en la reacció poden arribar a ser molt complexes i diferents segons el tipus de combustible que s'utilitza. Per tant, aquest mètode resulta molt complicat d'aplicar.

2.3. Tipologies d'equip

A continuació, es fa una breu descripció dels tipus de cremadors segons el tipus de combustible que utilitzen i segons si són cremadors especials.

Segons el tipus de combustible que utilitzen, es tenen els següents tipus de cremadors:

Cremadors de combustibles sòlids. El combustible sòlid s'acostuma a entrar polvoritzat al cremador. A més a més, aquest tipus de cremadors disposen de tremuges d'alimentació del combustible i sistemes d'extracció de cendres, ja que la presència d'aquestes pot dificultar la combustió. El rendiment d'aquests cremadors va molt lligat a la granulometria, a les matèries volàtils, a les cendres i al punt de fusió del combustible.

El combustible sòlid més utilitzat és el carbó polvoritzat encara que actualment, donat l'impuls que s'està donant a les energies renovables, també es poden trobar cremadors que utilitzen biomassa.

Cremadors de combustibles líquids. Un combustible líquid pot cremar de dues formes, evaporant-se i cremant com a gas, o polvoritzant-lo en petites gotes (diàmetre entre 10 i 200 micres) escalfades per la radiació de la flama. Tenint en compte això, es poden trobar cremadors de combustibles líquids de gasificació, de polvorització mecànica, de polvorització amb fluid auxiliar i cremadors de copa rotativa.

Pel que fa als cremadors de gasificació, el tipus més senzill és el de tassa de vaporització. En aquest cremador, la calor s'aplica en una capa de combustible, i de la seva superfície es desprèn el combustible en estat vapor. Aquest vapor crema en presència de l'aire comburent. Aquest tipus de cremador només pot utilitzar productes destil·lats amb baixa viscositat, tenen un rendiment baix i són econòmics pel que fa al consum d'energia elèctrica. Queden limitats a aplicacions de baixes potències.

Pel que fa als cremadors de polvorització mecànica, aquests poden ser de pressió directa, amb retorn, de pressió directa amb ranures regulables, de pistó i amb doble circuit

de pressió. Necessiten que el combustible tingui molt bona qualitat, quant a viscositat baixa i impureses.

Pel que fa als cremadors de polvorització amb fluid auxiliar, aquests poden ser amb vapor, amb polvorització mecànica amb ajuda del vapor i amb aire a alta, mitjana o baixa pressió. L'energia per a la polvorització és aportada pel fluid auxiliar i acostumen a tenir obertures més grans que en els anteriors cremadors, ja que el combustible entra en el cremador a menys pressió.

I, finalment, en els cremadors de copa rotativa, l'atomització del combustible es realitza fent-lo fluir per l'interior d'una copa cònica o cilíndrica que gira a una velocitat de 3.000 r.p.m.

Cremadors de combustibles gasosos. Els combustibles gasosos es cremen i es regulen amb més facilitat, ja que la combustió és fa en una sola fase i els fums generats són nets i no embruten la cambra de combustió. Els paràmetres que defineixen un cremador de combustible gasós són la potència tèrmica, la velocitat de propagació de la flama, la modulació del cremador i el temps de combustió.

Segons el tipus de combustió entre el gas i l'aire, es poden trobar cremadors amb flama de difusió en els quals la combustió es produeix en la cambra en el moment de la mescla, cremadors amb premescla parcial i premescla total en els quals el gas es mescla parcialment o totalment abans de la combustió.

Cremadors mixtos. Aquest tipus de cremadors utilitzen mescles de diferents combustibles per funcionar. Destaquem els cremadors mixtos de carbó polvoritzat i fuel o gas i els cremadors mixtos de líquid-gas.

Alguns cremadors especials són:

Cremadors d'alta velocitat. Es tracta de cremadors normalment de gas que van equipats amb una precambra de combustió a la sortida de la qual existeix una reducció de la secció del conducte que provoquen que els gasos de combustió surtin a velocitat elevada entre 100 i 200 m/s. S'utilitzen fonamentalment en els forns-túnel de la indústria ceràmica i en els forns de recuit i tremp de la indústria metal·lúrgica. Tenen un ampli marge de regulació, poden funcionar pràcticament amb aire estequiomètric, produeixen una flama molt estable dins el marge de regulació, creen una bona uniformitat de la temperatura del recinte i incrementen la transmissió de calor per convecció.

Cremadors de combustió submergida. Es tracta d'un tipus de cremadors, de gas, que tenen la capacitat de realitzar la combustió submergits en un líquid sempre que no hi hagi retorn de flama i que la pressió del gas o mescla pugui vèncer la resistència del líquid. Poden ser cremadors amb flama de difusió o de premescla total. Generalment, l'aire i el combustible s'introdueixen per separat; mitjançant un compressor, s'eleva la

pressió de la mescla per vèncer la resistència del líquid, i l'encesa es realitza per una espurna proporcionada per un transformador elèctric. Les instal·lacions que utilitzen aquest tipus de combustió tenen un elevat rendiment a temperatures baixes, ja que es minimitzen les pèrdues a través de les parets i s'augmenta el bescanvi entre els fums i el líquid.

Cremadors de radiació infraroja. En aquest tipus de cremadors, la calor de combustió s'aplica sobre una superfície de material refractari i en fa augmentar la temperatura. Posteriorment, aquesta superfície emet energia en forma de radiació infraroja que es transforma en calor quan s'aplica sobre un objecte. En definitiva, s'aconsegueix escalfar l'objecte però no el medi que l'envolta. Aquest tipus de cremadors s'utilitza en assecat i acabat de tractaments superficials en la indústria tèxtil i paperera.

Cremadors de tubs radiants. Aquest tipus de cremadors té un funcionament molt similar als de radiació infraroja amb l'única diferència que la calor de combustió s'aplica sobre la superfície interior d'un tub que emet calor en elevar-se la seva temperatura. S'utilitzen fonamentalment en vitrificats de xapes metàl·liques, tractaments superficials de materials fèrrics en atmosferes especials i en calefacció de naus industrials de gran altura.

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.

El control dels cremadors pot ser "tot o res", per etapes o modulants. Al RITE, concretament a l'apartat IT 1.2.4.1.2.3 *Regulación de los quemadores*, s'estableix que el control dels cremadors alimentats amb combustibles líquids o gasosos serà una funció de la potència tèrmica nominal del generador de calor. A la Taula 8.1 es pot observar la regulació dels cremadors establerta pel RITE.

Potència tèrmica nominal del generador de calor [kW]	Regulació
$P \leq 70$	Una marxa o modulant
$70 < P \leq 400$	Dues marxos o modulant
$P > 400$	Tres marxos o modulant

Taula 8.1. Regulació de cremadors [3].

A més, des del passat 26 de setembre de 2015, van entrar en vigor els reglaments UE núm. 813/2013 i UE núm. 814/2013 que complementen la Directiva 2009/125/CE pel que fa als requisits de disseny ecològic aplicables als aparells de calefacció, calefactores combinats i escalfadors amb una potència calorífica nominal de ≤ 400 kW, i dipòsits d'aigua calenta amb una capacitat de ≤ 2.000 litres.

Els fabricants seran els que a hauran d'aplicar els criteris següents a la seva producció:

- Es defineixen els nivells mínims d'eficiència.
- Es defineixen els valors màxims de soroll.
- Es defineixen els valors màxims d'emissions de Nox.
- Es defineixen els nivells mínims d'aïllament en acumuladors d'ACS.
- S'estableix un nou criteri a l'hora de calcular els rendiments dels equips, en què es passa del rendiment instantani al rendiment estacional.
- S'estableix un nou dimensionament per a ACS, en funció del perfil de consum declarat.

També entren en vigor els reglaments UE núm. 811/2013 i UE núm. 812/2013, que complementen la Directiva 2010/30/UE pel que fa a l'etiquetatge energètic d'aparells de calefacció, calefactores combinats, equips combinats d'aparell de calefacció, control de temperatura i dispositiu solar i escalfadors d'aigua, dipòsits d'aigua calenta i els equips combinats d'escalfador d'aigua i dispositiu solar. Calderes fins a una potència calorífica nominal de ≤ 70 kW, i dipòsits d'aigua calenta amb una capacitat de ≤ 500 litres.

Al Reglament d'Equips a Pressió, els cremadors no es tracten particularment, però apareixen com a subsistemes de les calderes i altres equips que es tracten en les instruccions tècniques complementàries del reglament present.

Les normes UNE referents a la combustió en calderes aquotubulars i piro-tubulars són:
Per a calderes aquotubulars i instal·lacions auxiliars:

UNE-EN 12952-8:2003. *Requisitos para los sistemas de combustión de combustibles líquidos y gaseosos para la caldera.*

UNE-EN 12952-9:2003. *Requisitos para los sistemas de combustión de combustibles sólidos pulverizados para la caldera.*

Per a calderes piro-tubulars:

UNE-EN 12953-7:2003. *Requisitos para los sistemas de combustión de combustibles líquidos y gaseosos para la caldera.*

UNE-EN 12953-12:2004. *Requisitos para los equipo de combustión de parrilla para combustibles sólidos en la caldera.*

2.5 Descripció gràfica

Des de la Figura 8.1 fins la Figura 8.7, es mostren diferents imatges i esquemes de cremadors i sistemes de combustió.



Figura 8.1. Cremador amb entrada d'aire forçada.

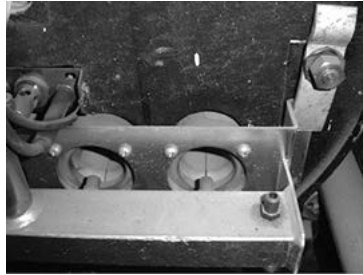


Figura 8.2. Injectors d'aire en un cremador atmosfèric.



Figura 8.3. Cremador d'alta velocitat.

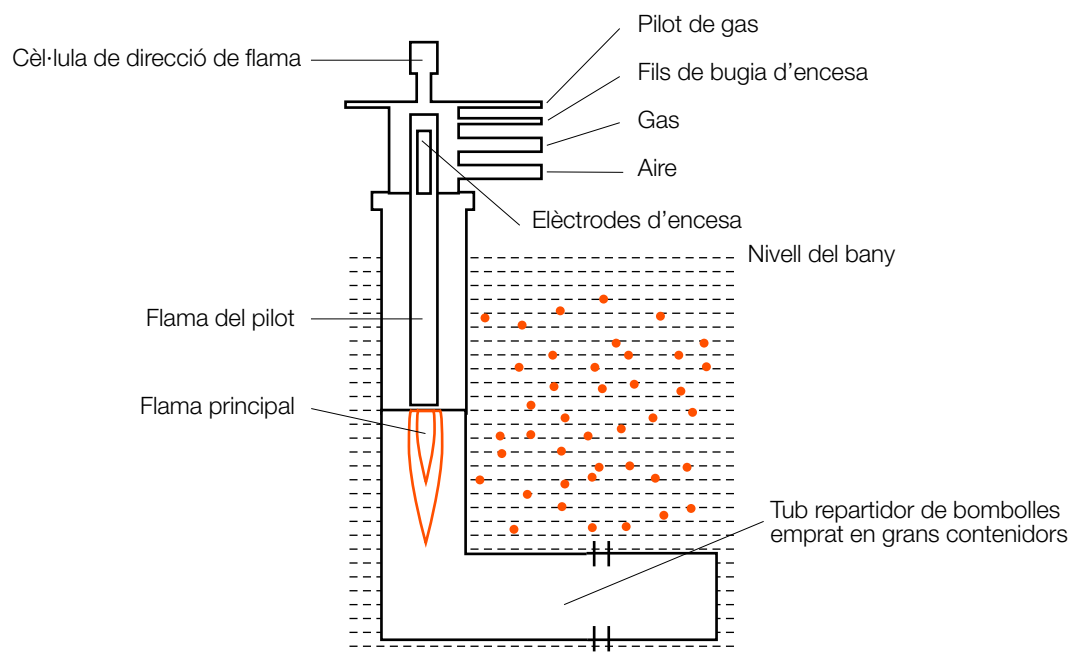


Figura 8.4. Esquema d'un sistema de combustió submergida.

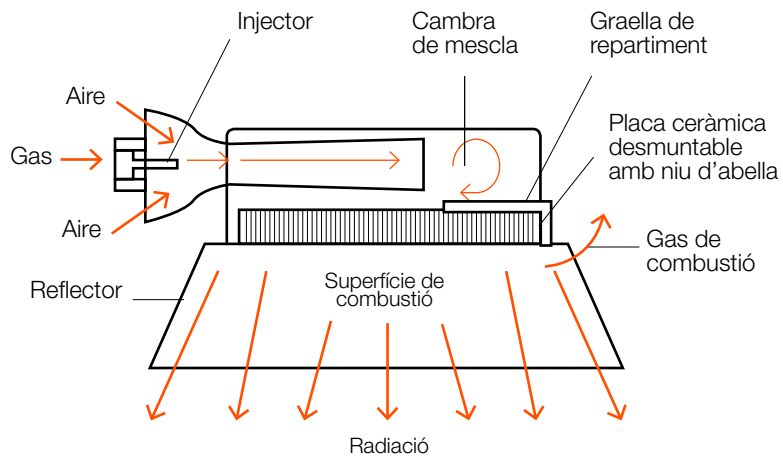


Figura 8.5. Esquema d'un sistema de combustió per radiació infraroja.



Figura 8.6. Cremador de tub radiant.

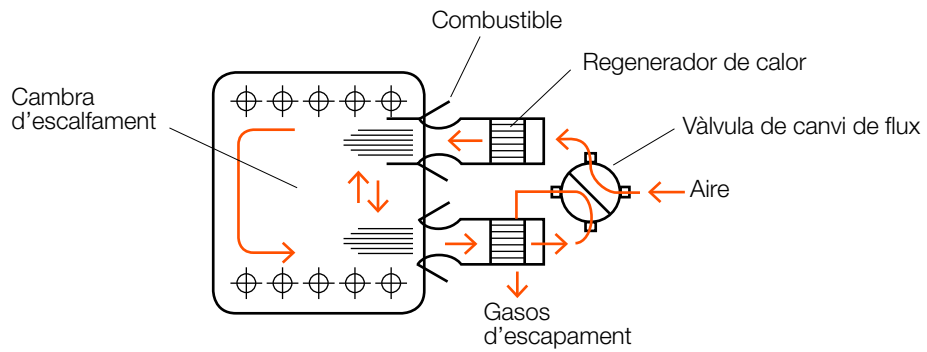


Figura 8.7. Esquema de cremadors regeneratius.

3. Definició del balanç energètic

3.1. Descripció del balanç energètic

El balanç energètic als cremadors té com a objectiu caracteritzar els fluxos d'entrada i sortida del cremador per poder calcular el rendiment energètic del cremador o de la reacció de combustió que produeix.

Per tant, es consideraran com a fluxos d'entrada del cremador la potència tèrmica associada al corrent d'entrada de combustible i la potència tèrmica associada a l'entrada d'aire. Per altra banda, es consideren com a sortides la potència tèrmica associada als fums en la sortida del cremador i les pèrdues energètiques que aquests puguin presentar com ara la pèrdua per calor sensible a la sortida dels fums, pèrdues per la presència d'incrementats i pèrdues energètiques per transferència de calor.

Cal dir que en algunes tipologies constructives de cremadors aquest balanç pot canviar, com és el cas dels cremadors regeneratius, ja que s'ha de comptabilitzar com a entrada el retorn d'una part dels gasos de combustió.

3.2. Esquema del balanç energètic

En l'Equació 8.2 es mostra la relació entre els corrents d'entrada i sortida en un cremador, mentre que en la Figura 8.8 es mostra l'esquema del balanç energètic, respectivament.

$$\dot{F} + \dot{Q}_{\text{aire}} = \dot{Q}_{\text{fums}} + \dot{Q}_s + \dot{Q}_i + \dot{Q}_p \quad \text{Equació 8.2}$$

On:

\dot{F} [kW] correspon a la potència tèrmica del combustible.

\dot{Q}_{aire} [kW] correspon a la potència tèrmica associada a l'aire d'entrada.

\dot{Q}_{fums} [kW] correspon a la potència tèrmica associada als fums disponible per al dispositiu amb què treballa el cremador.

\dot{Q}_s [kW] corresponen a les pèrdues energètiques per calor sensible dels fums a la sortida del dispositiu amb què treballa el cremador

\dot{Q}_i [kW] correspon a les pèrdues energètiques per la presència d'incrementats en els productes de la combustió.

\dot{Q}_p [kW] correspon a les pèrdues energètiques per transferència de calor en el cremador. En aquest mòdul no es tenen en compte ja que s'estudia l'eficiència de la combustió en el cremador.

Cal dir que perquè el rendiment de la combustió sigui elevat, les pèrdues per la presència d'incrementats han de ser al més baixes possible; això indicaria sobretot una baixa concentració de CO en els productes de la combustió.

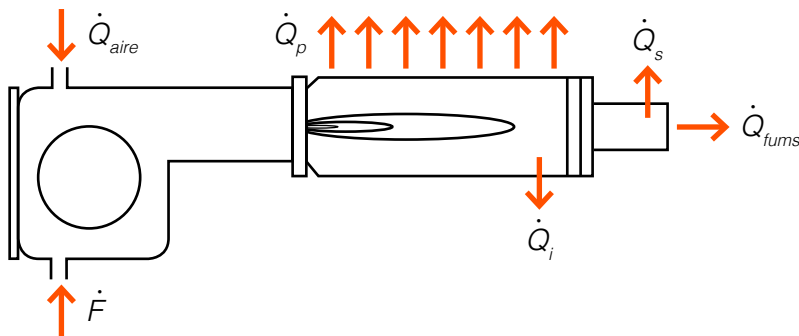


Figura 8.8. Esquema del balanç energètic en un cremador.

4. Bases de càlcul

4.1. Formulació

En aquest apartat, es mostren les bases de càlcul referents al primer dels dos mètodes descrits en l'apartat 2.2, ja que la seva aplicació és molt més senzilla envers l'altre mètode. En primer lloc, s'ha de caracteritzar el percentatge de les pèrdues per calor sensible en la combustió del cremador mitjançant l'Equació 8.3

$$\% \dot{Q}_s = k \cdot \frac{T_{fums} - T_a}{\%CO_2} \quad \text{Equació 8.3}$$

On:

$\% \dot{Q}_s$ [%] correspon al percentatge de pèrdues energètiques per calor sensible en els fums.
 k [°C] correspon a un coeficient que depèn del combustible que s'utilitza en el cremador i de la concentració de CO_2 . Valor extret de la Taula 8.2.

T_{fums} [°C] correspon a la temperatura dels fums a la sortida de la vena de fums en el cremador.

T_a [°C] correspon a la temperatura ambient.

$\%CO_2$ [%] correspon a la concentració de CO_2 a la sortida de la vena de fums del cremador.

En segon lloc, s'ha de calcular el percentatge de pèrdues energètiques per la presència d'incrementats en la combustió mitjançant l'Equació 8.4:

$$\% \dot{Q}_i = k \cdot \frac{\%CO}{\%CO + \%CO_2} \quad \text{Equació 8.4}$$

On:

$\%Q_s$ [%] correspon al percentatge de pèrdues energètiques per la presència d'incrementats en la combustió.

k [-] correspon a un coeficient que va en funció del combustible que s'utilitza en el cremador. Valor extret de la Taula 8.3.

$\%CO$ [%] correspon a la concentració de CO a la sortida de la vena de fums del cremador.

Finalment, amb el percentatge de pèrdues per calor sensible i per la presència d'incrementats i mitjançant l'Equació 8.5, es pot calcular el rendiment de la combustió en el cremador.

$$\eta_c = 100\% - \%Q_s - \%Q_i \quad \text{Equació 8.5}$$

On:

η_c [%] correspon al rendiment energètic de la combustió en el cremador.

Per determinar les concentracions de CO i CO₂ es poden utilitzar diagrames en funció del combustible. Destaca el diagrama d'Ostwald de la Figura 8.9 i el diagrama de Keller de la Figura 8.10.

4.2. Taules i diagrames

A la Taula 8.2 es mostren diferents correlacions per al càlcul del coeficient k de les pèrdues per calor sensible, les quals van en funció del combustible que s'utilitza en el cremador.

Combustible	Fórmula pel coeficient k (1/°C)
Gasoil	$k = 0,495 + (0,00693 \cdot \%CO_2)$
Fuel	$k = 0,518 + (0,0067 \cdot \%CO_2)$
Antracita	$k = 0,68$
Gas natural	$k = 0,379 + (0,0097 \cdot \%CO_2)$
Propà	

Taula 8.2. Fórmules pel coeficient k en funció del combustible que utilitza el cremador.

A la Taula 8.3, es mostren els diferents valors del coeficient k , en funció del combustible que utilitza el cremador, per les pèrdues per la presència d'incrementats en la combustió.

Combustible	Valor del coeficient k
Gasoil	95
Fuel	
Antracita	60
Gas natural	72
Propà	84

Taula 8.3. Valor coeficient k en funció del combustible que utilitza el cremador.

A la Figura 8.9 i la Figura 8.10 es pot observar el diagrama d'Ostwald i el diagrama de Keller per un fuel pesat.

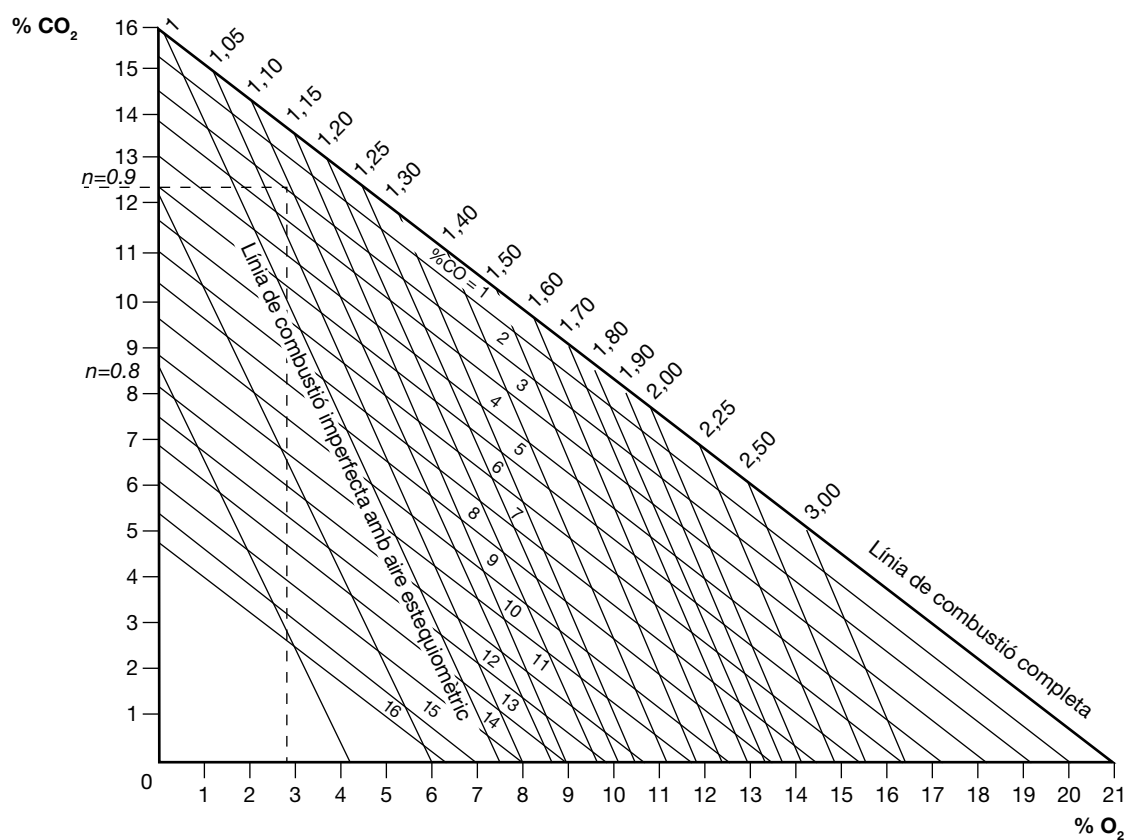


Figura 8.9. Diagrama d'Ostwald per a un fuel pesat.

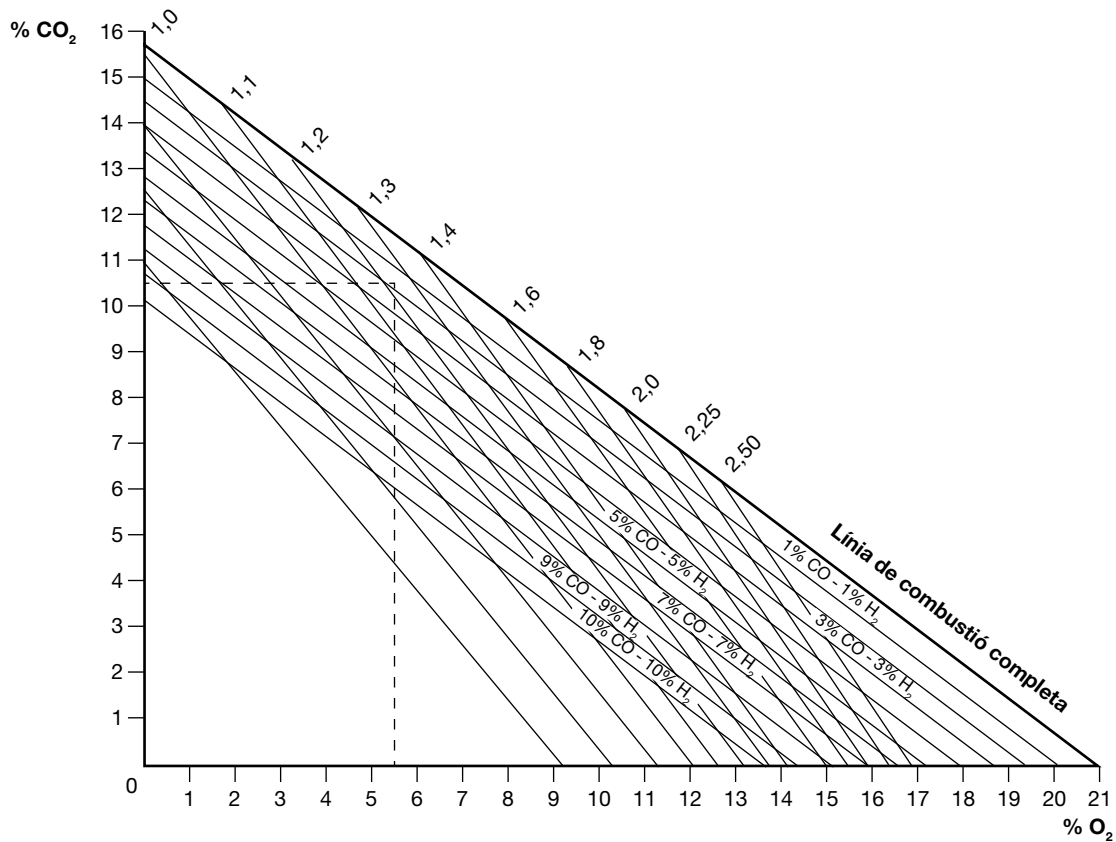


Figura 8.10. Diagrama de Keller per un fuel pesat.

5. Planificació de mesures

5.1. Dades de què es disposa

- Coeficient k per les pèrdues per calor sensible: $k \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right]$
- Coeficient k per les pèrdues per la presència d'incrèments: $K [-]$

5.2. Dades a mesurar

- Temperatura dels fums a la sortida de la vena de fums: $T_{\text{fums}} [^\circ\text{C}]$
- Temperatura ambient: $T_a [^\circ\text{C}]$
- Concentració de CO_2 a la sortida de la vena de fums en el cremador: $\% \text{CO}_2 [\%]$
- Concentració de CO a la sortida de la vena de fums en el cremador: $\% \text{CO} [\%]$

5.3. Inventari d'aparells de mesura

- Analitzador de combustió (Figura 8.11)
 - Variables mesurades: $T_{\text{fums}}, T_a, \% \text{CO}_2, \% \text{CO}$



Figura 8.11. Analitzador de combustió.

5.4 Seguretat en persones i equips

Abans de realitzar 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 variables, T_{fums} , T_a , $\%CO_2$, $\%CO$ és intrusiva i s'ha d'intervenir directament a la sortida de la vena de fums. Per tant, és convenient utilitzar guants de protecció tèrmica i mantenir certa distància de seguretat per evitar ràfegues de fums a alta temperatura que podrien provocar cremades.

Cal tenir en compte que generalment es realitzen les mesures prop de dispositius a pressió i de substàncies inflamables i, per tant, qualsevol fuga que es pugui produir significa un risc molt elevat d'explosió. S'ha d'evitar realitzar la mesura amb la proximitat de dispositius amb càrrega elèctrica, si no s'han adoptat les mesures adequades contra accidents elèctrics.

Seguretat per als equips. És aconsellable no tractar de manera brusca l'analitzador i la sonda de combustió. S'han de fer les mesures tenint en compte que per analitzar els fums de combustió s'ha de realitzar una mesura intrusiva i només s'ha d'introduir la sonda de combustió, ja que qualsevol altre element no suportaria les elevades temperatures dels fums.

L'analitzador només es pot obrir en les tasques de manteniment especificades en el manual.

Qualsevol intervenció en l'analitzador ha de ser efectuada per personal qualificat.

Algunes de les tasques més importants en el manteniment i neteja de l'analitzador són: S'ha de netejar la carcassa de l'analitzador amb un drap humit. No s'han d'utilitzar productes de neteja agressius ni dissolvents. S'han de netejar la sonda de combustió regularment mitjançant aire comprimit. Si es detecta un mal funcionament del termoparell de la sonda de combustió, cal canviar-lo segons les instruccions d'ús.

Quan l'analitzador mostri un nivell del 90 % d'emplenat s'ha de buidar la trampa de condensats tal i com s'especifica en el manual d'ús.

Cal revisar regularment el filtre de partícules i el filtre addicional, ja que solen embrutar-se, i s'han de canviar si presenten signes de contaminació.

6. Realització de les mesures

6.1. Mesura dels paràmetres de combustió en els fums de sortida

1. Des de la pantalla inicial, s'ha de seleccionar *Combustibles*. Un cop dins, cal seleccionar el tipus de combustible amb que opera el cremador.
2. Un cop realitzada la configuració dels paràmetres de mesura, s'ha de connectar la sonda de combustió a l'analitzador procurant que el termoparell no toqui al tub metàl·lic de protecció.
3. S'ha de situar la sonda de combustió a l'entrada d'aire al cremador. En aquest moment, l'analitzador realitzarà la fase zero de la mesura, mesurarà la temperatura ambient i %O₂ a l'entrada d'aire al cremador.
4. S'ha de col·locar la sonda de combustió al centre del conducte de la vena de fums segons es mostra en la Figura 8.12. En el cas que no hi hagi cap orifici per poder introduir la sonda cal fer-ne un de nou de 6 a 8 mm amb l'eina adequada.
5. S'ha de posar l'equip amb què treballa el cremador amb la potència i el règim de funcionament desitjats i esperar 5 min per tal d'assegurar-lo.
6. Des de la pantalla *inici* de l'analitzador, s'ha d'observar l'evolució dels paràmetres mesurats. Cal anotar o guardar les mesures en el moment en què s'estabilitzin.

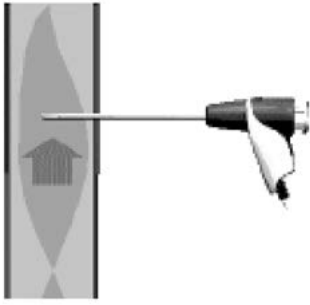


Figura 8.12. Col·locació de la sonda de combustió en el conducte de fums.

7. Exemple pràctic

7.1. Enunciat

Amb un analitzador de fums, s'obtenen dades de combustió d'una caldera estanca de 400 kW de potència, alimentada amb gasoil. Tot i que l'analitzador indica un rendiment de combustió del 67%, es pretén conèixer quina part de la reducció de rendiment es deu a la presència d'incrementats en els fums resultat de la combustió.

7.2. Dades

A la Taula 8.4 es poden observar les dades de què es disposa.

Paràmetres	Unitats	Dada
Coefficient k per a les pèrdues per calor sensible (gasoil)	1/°C	0,58 ¹
Coefficient k per a les pèrdues per la presència d'incrementats (gasoil)	-	95

Taula 8.4. Dades de què es disposa sobre la combustió del cremador.

A la taula 8.5 es reuneixen les dades mesurades amb l'analitzador dels fums de combustió del cremador.

Paràmetres	Unitats	Dada
Temperatura dels fums a la vena de fums del cremador	°C	200
Temperatura ambient	°C	20
Concentració de CO ₂ a la vena de fums en el cremador	%	12
Concentració de CO a la vena de fums en el cremador	%	4

Taula 8.5. Dades mesurades sobre la combustió del cremador.

¹ Coeficient calculat amb la fórmula pel gasoil de la Taula 8.2. $k = 0,495 + (0,00693 \cdot \%CO_2)$

7.3. Càlculs i resultat

A partir de les dades referenciades a la Taula 8.4 i la Taula 8.5 es procedeix a calcular, en primer lloc, el percentatge de pèrdues per calor sensible en la combustió:

$$\% \dot{Q}_s = k \cdot \frac{T_{fums} - T_a}{\%CO_2}$$
$$\% \dot{Q}_s = 0,58 \cdot \frac{1}{^\circ C} \cdot \frac{(200 - 20)^\circ C}{12\%} = 8,7\%$$

Un cop calculat el percentatge de pèrdues per calor sensible, es calcula el percentatge de pèrdues per la presència d'incrementats en la combustió:

$$\% \dot{Q}_i = k \cdot \frac{\%CO}{\%CO + \%CO_2}$$
$$\% \dot{Q}_i = 95 \cdot \frac{4\%}{4\% + 12\%} = 23,75\%$$

Un cop es tenen els percentatges de pèrdues energètiques caracteritzats, es pot calcular el rendiment de la combustió:

$$\eta_c = 100\% - \%Q_s - \%Q_i$$
$$\eta_c = 100\% - 8,7\% - 23,75\% = 67,55\%$$

Finalment, es pot fer un càlcul de la contribució de cadascuna de les pèrdues calculades a la pèrdua total per combustió:

Pèrdues totals per combustió:

$$\%P_{combustió} = 100\% - \eta_c$$
$$\%P_{combustió} = 100\% - 67,55\% = 32,45\%$$

Pèrdues per calor sensible:

$$P_s = \frac{\% \dot{Q}_s}{P_{\text{combustió}}} \cdot 100 \qquad P_s = \frac{8,7\%}{32,45\%} \cdot 100 = 26,8\%$$

Pèrdues per incremats:

$$P_i = \frac{\% \dot{Q}_i}{P_{\text{combustió}}} \cdot 100 \qquad P_i = \frac{23,75\%}{32,45\%} \cdot 100 = 73,2\%$$

7.4. Comentaris

El rendiment obtingut en la combustió estudiada és molt baix, la qual cosa implica que la combustió no s'està fent de manera correcta.

Com es pot observar, el percentatge de pèrdues per calor sensible és d'un 8,7% amb una concentració de CO₂ del 12%, cosa que indica que la combustió s'està fent sense excés d'aire i amb una diferència de temperatures entre els fums i l'ambient correcta. Una temperatura de 200 °C de sortida és força alta i es podrien fer recircular els fums a través d'un economitzador i utilitzar l'energia tèrmica que aquests encara tenen, amb la qual cosa es reduiria la contribució de pèrdues per calor sensible del 26,8%.

Pel que fa al percentatge de pèrdues per la presència d'incremats en la combustió, aquest és d'un 23,75%. Aquest percentatge és molt alt, cosa que indica bàsicament que s'està fent una combustió incompleta, és a dir, amb defecte d'aire. També es pot observar que el percentatge de CO és del 4 % (molt superior als màxims exigits del 0,02%). Es tracta d'un percentatge molt alt, ja que per cada 1% de contingut més de CO en els gasos de combustió augmenten les pèrdues energètiques entre un 4 i un 7%. Això queda demostrat amb la contribució del 73,2% a la pèrdua total de combustió.

Convindria avaluar si els automatismes de regulació i control de la combustió estan operant correctament o realitzen la combustió amb excés d'aire, però tenint en compte que un gran excés d'aire pot fer augmentar les pèrdues per calor sensible. També, si és possible, s'hauria d'analitzar el combustible i, si es detecta algun tipus de defecte, s'hauria de canviar si és possible.

En la mateixa operació de mesura, també es pot introduir una sonda d'opacímetre, i així trobar quina quantitat de partícules surten amb els fums, i saber si s'està complint amb el permís d'emissions per a fums.

8. Referències

[1] Informes i estudis tecnològics encarregats per l'Institut Català d'Energia. Estudi d'Eficiència energètica de la combustió i situació a Catalunya. Maig de 2005.

http://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/17_publicacions_informes/08_guies_informes_estudis/informes_i_estudis/arxiu/200505_informe_combustio.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

