



## **PROJECTE FINAL DE CARRERA**

*“Disseny d’un sistema de generació de vapor”*

- 112071 -

|                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| <u>Ensenyament:</u>    | Enginyeria Química |
| <u>Tutor ETSEQ:</u>    | Josep M. Chillida  |
| <u>Tutor extern:</u>   | José A. Díaz       |
| <u>Alumne:</u>         | Joan Benet         |
| <u>Equip:</u>          | 7                  |
| <u>Data d’entrega:</u> | 11 de maig 2012    |

---

## ÍNDIX

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | INTRODUCCIÓ .....   | 1  |
| 1.1.   | Descripció del procés .....                                     | 1  |
| 1.2.   | Agraïments.....   | 2  |
| 2.     | ETAPA PRELIMINAR.....   | 3  |
| 2.1.   | Descripció del projecte.....                                    | 3  |
| 2.2.   | Abast del projecte.....   | 3  |
| 2.3.   | Estudi bibliogràfic de les alternatives de procés.....          | 4  |
| 2.4.   | Planificació inicial del projecte (Diagrama de Gantt).....      | 4  |
| 2.5.   | Descripció general del sistema.....                             | 5  |
| 2.5.1. | Descripció del sistema de generació de vapor.....               | 5  |
| 3.     | BASES PER AL DESENVOLUPAMENT DEL PROJECTE.....                  | 9  |
| 3.1.   | Bases de disseny.....   | 9  |
| 3.1.1. | Especificació del procés .....                                  | 10 |
| 3.1.2. | Especificació del combustible .....                             | 10 |
| 3.1.3. | Especificació dels gasos de la combustió.....                   | 11 |
| 3.1.4. | Especificació del condensat.....                                | 13 |
| 3.1.5. | Especificacions del producte .....                              | 15 |
| 3.1.6. | Capacitat, flexibilitat operativa i factor de servei.....       | 16 |
| 3.1.7. | Necessitats de combustible.....                                 | 17 |
| 3.1.8. | Normes de disseny a aplicar .....                               | 18 |
| 3.2.   | Dades bàsiques pel desenvolupament de l'enginyeria .....        | 19 |
| 3.2.1. | <i>Utilities</i> disponibles.....                               | 19 |
| 3.2.2. | Preus de les <i>utilities</i> .....                             | 22 |
| 3.2.3. | Dades de l'emplaçament.....                                     | 22 |
| 3.2.4. | Normes oficials de disseny a aplicar .....                      | 24 |
| 4.     | DESENVOLUPAMENT DE L'ENGINYERIA BÀSICA .....                    | 25 |
| 4.1.   | Elaboració de diagrames.....                                    | 25 |
| 4.1.1. | Detall caldera .....  | 25 |
| 4.1.2. | Blocs.....  | 25 |
| 4.1.3. | Flux de Procés (PFD) .....                                      | 25 |
| 4.1.4. | Plot Plan.....  | 26 |
| 4.1.5. | P&ID .....  | 26 |
| 4.2.   | Disseny bàsic .....   | 27 |
| 4.2.1. | Dimensionament dels tubs del sistema de generació de vapor..... | 27 |
| 4.2.2. | Dimensionament tèrmic i mecànic del sistema.....                | 29 |
| 4.2.3. | Dimensionament de l'hogar.....                                  | 30 |
| 4.2.4. | Dimensionament del sobreescalfador.....                         | 34 |
| 4.2.5. | Dimensionament de l'evaporador.....                             | 35 |

---

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 4.2.6.  | Dimensionament de l'economitzador.....                           | 38 |
| 4.2.7.  | Perfils de temperatures i punt <i>pinch</i> .....                | 40 |
| 4.2.8.  | Selecció del sistema de bombeig .....                            | 43 |
| 4.2.9.  | Equips auxiliars.....  | 45 |
| 4.2.10. | Disseny de canonades i determinació de la pèrdua de càrrega..... | 47 |
| 4.2.11. | Disseny de la instrumentació i control.....                      | 48 |
| 5.      | SEGURETAT EN EL DISSENY DE LES INSTAL·LACIONS .....              | 53 |
| 5.1.    | Seguretat de la unitat per falta d'aigua.....                    | 53 |
| 5.2.    | Seguretat de la unitat per excés de pressió .....                | 54 |
| 5.3.    | Seguretat de la unitat per falla en la flama .....               | 54 |
| 5.4.    | Seguretat diversa de la unitat .....                             | 55 |
| 5.5.    | Seguretat diversa de sala de control.....                        | 55 |
| 5.6.    | Mesures de protecció individual .....                            | 56 |
| 6.      | MEDIAMBIENT EN EL DISSENY DE LES INSTAL·LACIONS .....            | 58 |
| 7.      | MANTENIMENT DE LES INSTAL·LACIONS .....                          | 62 |
| 7.1.    | Neteges .....  | 62 |
| 7.2.    | Drenat .....   | 63 |
| 7.3.    | Vàlvules de seguretat.....                                       | 63 |
| 7.4.    | Cremadors.....   | 63 |
| 7.5.    | Circuit aigua.....   | 63 |
| 7.6.    | Generador de vapor .....   | 64 |
| 7.7.    | Tubs amb fissures.....   | 64 |
| 7.8.    | Sistema de bombeig .....   | 64 |
| 7.9.    | Freqüència de les accions de manteniment.....                    | 65 |
| 8.      | MANUAL D'OPERACIÓ .....  | 67 |
| 8.1.    | Posada en servei .....   | 67 |
| 8.2.    | Funcionament en estat estacionari .....                          | 68 |
| 8.3.    | Posada en fora de servei .....                                   | 69 |
| 8.4.    | Aturada d'emergència .....                                       | 69 |
| 9.      | ESTUDI ECONÒMIC .....  | 71 |
| 9.1.    | Balanç econòmic actual.....                                      | 71 |
| 9.2.    | Pressupost i balanç econòmic amb calderes .....                  | 72 |
| 9.3.    | Comparativa de les dues opcions .....                            | 73 |
| 10.     | CONCLUSIONS.....   | 76 |
| 11.     | BIBLIOGRAFIA .....   | 77 |

## 1. INTRODUCCIÓ

El projecte “Disseny d’un sistema de generació de vapor” amb número 112071, s’ha realitzat sota la tutorització de l’empresa *BASF Española SL*, concretament amb *BASF-Sonatrach PropanChem*. Aquesta empresa es troba dins del *site* de *BASF Española SL A* Tarragona i s’encarrega de produir propilè a partir de propà mitjançant una reacció catalítica de deshidrogenació.

La planta té necessitats i requisits de vapor derivats de l’activitat productiva. Per aquest motiu, el disseny es basa en dimensionar el sistema de generació de vapor que satisfaci totes les necessitats i requisits de la planta i que, alhora, garanteixi la producció contínua.

### 1.1. Descripció del procés

L’empresa *BASF-Sonatrach Propanchem (PDH)* es troba integrada en el *site* de producció de *BASF Española SL* en Tarragona.

La planta de *PDH* emprà el procés *OLEFLEX*<sup>[1]</sup> per la producció propilè (grau polímer) a partir de la deshidrogenació catalítica del propà.

El procés consta de dues parts diferenciades: la zona de reacció i la zona de fraccionament. Aquesta darrera està formada per les operacions unitàries de separació i purificació, mentre que en la zona de reacció es troben els reactors amb llit catalític, els forns i la regeneració del catalitzador i és on s’origina la reacció de deshidrogenació.

L’alimentació és subministrada pel *rack* de canonades que connecta els tancs d’emmagatzematge del port amb la planta. L’alimentació és purificada prèviament amb la finalitat d’extraure els hidrocarburs més pesats en el depropanitzador i les impureses (compostos nitrogenats, metalls pesats, aigua...).

---

[1] El sistema *OLEFLEX* és una llicència de *UOP* que consisteix en la deshidrogenació catalítica del propà.

L'alimentació purificada és introduïda a la zona de reacció juntament amb una fracció mesurada d'hidrogen, anomenat rati. Aquest hidrogen és necessari per tal de controlar la reactivitat del catalitzador i l'equilibri. Degut que la deshidrogenació és una reacció endotèrmica, la línia d'entrada és escalfada en els forns.

Tot seguit, es troba el turbo compressor, el qual funciona gràcies a l'expansió del vapor d'alta pressió en la turbina. Aquest és l'encarregat de fer circular tot el procés.

El centre de tot el procés és el *Cold Box* o caixa freda, el qual és l'encarregat de condensar tots els hidrocarburs de la línia de sortida dels reactors, prèviament netejada d'impureses, per tal de poder separar l'hidrogen produït del propà no reaccionat i el propilè produït. En aquest mateix sistema, es realitza l'anomenat rati propà/hidrogen que es recircula a l'alimentació dels reactors juntament amb l'alimentació de propà fresc.

La línia sortida del *Cold Box* està compost de propà i de propilè, majoritàriament, i d'hidrocarburs lleugers produïts per les reaccions secundàries o pel craqueig realitzat quan la línia del procés passa pels forns. Aquests compostos lleugers són extrets pel cap, en el detanitzador, i per fons s'extrau el propà i el propilè que són introduïts en l'*splitter*, el qual és una columna de destil·lació binària que separa el propà i el propilè. (Ref. 3.1)

## 1.2. Agraïments

Agrair a *BASF Española SL* i concretament a l'empresa *BASF-Sonatrach Propanchem* l'oportunitat de poder realitzar juntament el projecte de final de carrera i fer ús de les seves instal·lacions per dur a terme el laboratori d'investigació.

Personalment, agrair a tots els treballadors i responsables de *BASF-Sonatrach Propanchem* que s'han interessat en el desenvolupament del projecte i que han aportat tota la seva experiència en totes les àrees on s'ha necessitat.

Individualment, agrair al tutor de l'empresa, Sr. Jose Antonio Díaz Escobar, tot el seu suport, dedicació, constància i disponibilitat durant tot el transcurs del projecte.

---

## **2. ETAPA PRELIMINAR**

### **2.1. Descripció del projecte**

El projecte “*Disseny d’un sistema de generació de vapor*”, que es realitza sota la tutorització de *BASF-Sonatrach Propanchem* (PDH), es planteja amb la finalitat de dissenyar i instal·lar un sistema de generació de vapor que garanteixi la producció en qualsevol moment.

### **2.2. Abast del projecte**

El projecte es basa en el disseny de l’enginyeria bàsica d’un sistema de generació de vapor d’alta pressió que, dintre de la legislació mediambiental vigent, solventi la necessitat d’aquest en la planta. La capacitat del sistema es determina segons el consum que té el procés.

S’estudia la qualitat i quantitat d’un corrent residual del procés per tal d’emprar-lo com a combustible en el sistema. Aquest estudi es basa en la presa de mostres i en l’anàlisi al laboratori amb la finalitat de conèixer la seva concentració. A més, es determina si la quantitat generada pel procés és suficient o, pel contrari, es requereix d’un corrent addicional de combustible.

El dimensionament de tot el conjunt de les calderes es centra en la realització de balanços de matèria i d’energia, on s’inclourà tota la informació de tipus físic i termodinàmic. També hi ha informació sobre el dimensionament mecànic. A més, es realitza un estudi fluidomecànic de totes les línies i accessoris. S’adjunta al disseny, el dimensionament dels equips auxiliars necessaris (tancs, bombes...).

Es realitza un estudi de les emissions on s’avalua el seu impacte i s’estudien les tècniques disponibles per la reducció del impacte sobre el medi ambient. Per últim, es finalitza el projecte amb un estudi de viabilitat econòmica del conjunt del disseny on es comparen les dues situacions econòmiques.

### **2.3. Estudi bibliogràfic de les alternatives de procés**

Previ al inici del projecte s'ha realitzat una recerca bibliogràfica amb al finalitat d'obtenir l'alternativa de procés que millor s'ajusti a les necessitats i requisits de la planta. La recerca es centra en el tipus de caldera més adient.

Bibliogràficament, s'ha trobat que les calderes industrials es classifiquen en dos grups: les piro-tubulars i les acu-tubulars. I dintre d'aquestes darreres es diferencien entre calderes amb calderí aigua-vapor y calderes d'un únic pas. Addicionalment, les calderes es poden classificar d'alta pressió i baixa pressió, de vapor saturat o sobreescalfat.

Les calderes piro-tubulars són un tipus de calderes on els gasos de combustió circulen per l'interior dels tubs i operen a pressions d'entre 0-21 barg. Tenen un cost d'inversió inicial reduït degut a la seva simplicitat, permeten una gran flexibilitat d'operació i no necessiten una gran puresa d'aigua d'alimentació. Són petites i eficients. Per contra, necessiten major rang de temps a l'hora de pujar la pressió i entrar en funcionament, i no poden ser emprades per a operacions amb altes pressions.

Les calderes acu-tubulars són un tipus de caldera que, a diferència de les piro-tubulars, l'aigua circula per l'interior dels tubs, poden operar a pressions d'entre 0 fins a 150 barg i són calderes que es poden posar en servei molt ràpidament. En contraposició, tenen una grandària i pes major i, per tant, un major cost d'inversió superior. (Ref. 2.2)

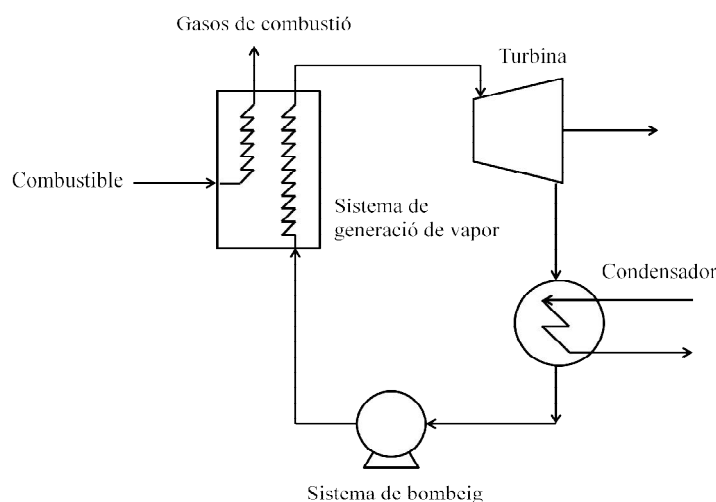
La caldera que es tracta en aquest projecte correspon a una caldera fixa de combustible gas, acu-tubular amb hogar i amb circulació natural. En aquestes calderes, l'aigua circula per l'interior dels tubs i els productes de la combustió per l'exterior d'aquests.

### **2.4. Planificació inicial del projecte**

La planificació inicial del projecte es troba detallada en el diagrama de *Gantt* adjunt al projecte en format DIN A3.

## 2.5. Descripció general del sistema

El dimensionament de les calderes de vapor dóna lloc al tancament d'un cicle termodinàmic anomenat cicle *Rankine*. El cicle *Rankine*, figura 2.5.1, és usat en les plantes de generació de vapor, on l'aigua és l'element de treball que recorre cíclicament per tot el procés. El cicle que realitza l'aigua comença en la caldera, on absorbeix el calor i s'escalfa fins al punt d'ebullició, el vapor produït és sobreescalfat a pressió constant fins a obtenir el vapor d'alta pressió. Aquest vapor passa a través de la turbina on s'expandeix en un procés aproximadament adiabàtic realitzant treball. El vapor de baixa pressió provinent de l'expansió de la turbina ingressa en el condensador i allibera tot el calor fins a condensar-se i es retorna a la caldera mitjançant un sistema de bombeig.



**Figura 2.5.1** Esquema del cicle *Rankine*

### 2.5.1. Descripció del sistema de generació de vapor

El sistema de generació de vapor és un conjunt d'elements de transferència de calor que permeten obtenir com a producte el vapor d'alta pressió. Aquest sistema és un recipient estanc on l'aigua a pressió es transforma en vapor, mitjançant l'aplicació de calor resultant d'una combustió. En un diagrama bàsic d'una caldera es poden distingir dos sistemes independents. Un està relacionat amb l'aigua i el vapor, mentre que l'altre està format pel conjunt dels gasos produïts en la combustió.



### 2.5.1.1. Àrees i elements bàsics d'una caldera

Les àrees d'una caldera són la secció de convecció i la de radiació o hogar. En la zona de convecció els fums generats per la combustió escalfen els tubs de l'aigua o del vapor. Aquesta secció està composta per diversos elements: els tubs baixants i pujants, el sobreescalfador, l'evaporador i l'economitzador, els quals mai tenen contacte directe amb la flama. La secció de radiació o hogar és el lloc de la caldera on es produeix la calor necessària per la generació de vapor mitjançant la combustió. (Ref. 1.1)

La caldera aquotubular consta de diversos components bàsics: el sobreescalfador, l'evaporador, l'economitzador i els tubs. Cadascun d'ells es troba en una àrea diferent de la caldera. A continuació, es descriuen els elements que componen la caldera segons l'ordre de pas del fluid a evaporar. Per tal del conèixer d'una forma més gràfica les àrees de la caldera veure plànol N°1 *Detall caldera*.

L'economitzador és el primer element del sistema de generació de vapor. En aquesta part, és on es recupera la calor de sortida dels gasos de combustió amb la finalitat d'augmentar la temperatura d'entrada del fluid abans d'entrar en l'evaporador de la caldera.

L'evaporador és la part on té lloc la transformació del fluid de líquid a vapor. L'evaporador està format pel calderí i els tubs de pujada i de baixada. El calderí és un recipient de configuració horitzontal amb la missió d'acumular l'aigua i separar el vapor saturat de les partícules d'aigua. Connectats al calderí, es troben els tubs que poden ser de baixada i de pujada. S'anomenen tubs de baixada als tubs que connecten el calderí amb la part inferior. Pel contrari, els tubs de pujada o vaporitzadors també es troben connectats amb el calderí i el col·lector i contenen aigua i vapor, en canvi els tubs baixants només transporten aigua en estat líquid. Degut això existeix recirculació natural entre els tubs (diferència de densitat).

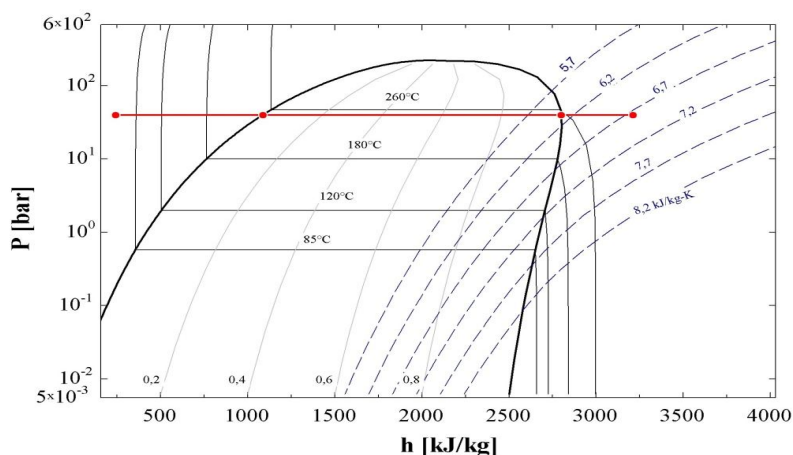
El sobreescalfador té la funció d'afegir calor al vapor saturat provinent del calderí per tal que aquest assoleixi una temperatura superior. Aquest augment de temperatura produeix el vapor sobreescalfat requerit.

Per últim, l'hogar és el lloc on es consumeixen els productes de la combustió i s'allibera calor. Aquest ha d'estar dissenyat tenint en consideració el temps, la turbulència i la

temperatura de la combustió amb l'objectiu d'obtenir una combustió completa. La configuració de l'hogar està determinada pel tipus de combustible i el mètode de combustió. (Ref. 1.1)

### 2.5.1.2. Circuit de l'aigua

Un cop conegudes les zones i els elements que componen tot el sistema de generació de vapor és necessari conèixer el recorregut que realitza l'aigua des de que és impulsada pel sistema de bombeig fins que és transformada en vapor d'alta pressió. A continuació, es mostra el diagrama pressió entalpia (P-h) on es pot veure tot el procés de transformació des d'un punt de vista termodinàmic.



**Figura 2.5.1.2.1** Diagrama P-h del sistema de generació de vapor

L'alimentació de l'aigua líquida al sistema s'inicia en l'economitzador, on s'escalfa fins a una temperatura pròxima a la de saturació i s'introdueix en el calderí. L'aigua descendeix pels tubs baixants fins al col·lector inferior on és distribuïda pels tubs vaporitzadors, lloc on es formen les bombolles de vapor que són separades posteriorment en el calderí. El vapor saturat separat en el calderí és escalfat per sobre de la seva temperatura de saturació en el sobreescalfador per tal d'obtenir el vapor requerit. (Ref. 1.1)

En la figura 2.5.1.2.2 es presenta el diagrama físic del camí que segueix l'aigua des de que entra al sistema fins que surt com a vapor sobreescalfat.

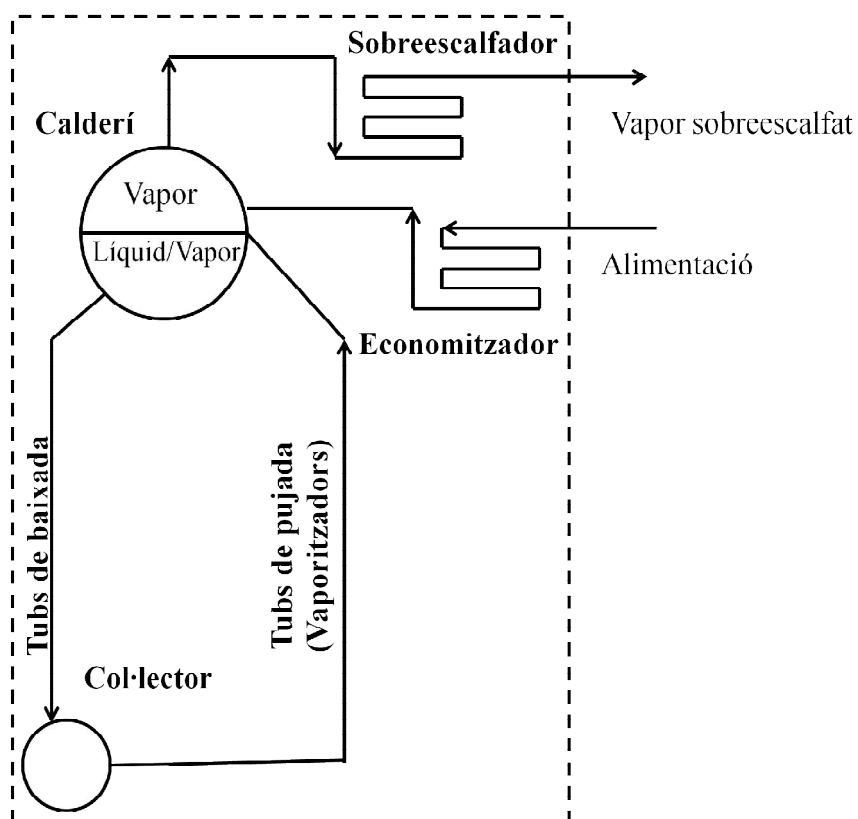


Figura 2.5.1.2.2 Circuit de l'aigua en la caldera

### **3. BASES PER AL DESENVOLUPAMENT DEL PROJECTE**

La informació que es troba en aquest apartat està compresa des de les estimacions de disseny i necessitats de procés, fins a l'especificació del producte final i les necessitats de matèries primeres segons el mètode d'operació. Aquests paràmetres determinen els objectius, els límits del dimensionament i les bases del projecte.

#### **3.1. Bases de disseny**

L'objectiu del projecte és dimensionar un sistema de generació de vapor d'alta pressió per a la planta de *PDH* que garanteixi la producció en qualsevol de les operatives de la planta, que sigui econòmicament viable, legal i respectuós amb el medi ambient. A més, aquest disseny té en compte les millors tècniques disponibles aplicables a aquests tipus d'instal·lacions.

La planta, on s'emplaçarà el generador de vapor, consta de dues turbines que necessiten vapor d'alta pressió. Aquests equips són la *CT-4501* i la *CT-3001* que fan funcionar el seus respectius compressors. La turbina *CT-4501* fa treballar el compressor de la bomba de calor, la qual es troba en la columna de destil·lació o *splitter*. Per altra banda, la turbina *CT-3001* és l'equip que fa moure el turbo compressor *C-3001*, que és l'encarregat de fer circular tot el vapor en la zona de reacció. Veure plànol N° 2 i 3. (Ref. 3.1)

Com el procés de *PDH* és en continu el sistema de generació consta de dues calderes bessones amb la particularitat que, conjuntament, poden mantenir qualsevol necessitat de servei de vapor i, quan una d'elles s'atura, la segona pot satisfer ràpidament totes les necessitats del procés. Aquesta configuració dóna lloc a un sobredimensionament important de tot el sistema, encara que aquest és necessari per tal de garantir el procés en continu de la planta.

Part de l'energia introduïda a les calderes prové del combustible gas emprat anomenat *Off-Gas*, el qual és un corrent residual generat pel procés ric en hidrogen. La composició del

---

qual s'ha determinat experimentalment amb la presa de mostres i el seu anàlisi en el laboratori.

### **3.1.1. Especificació del procés**

És essencial pel disseny conèixer les especificacions de les entrades i sortides de l'equip. El sistema consta de dues entrades i dues sortides, les quals corresponent al costat aigua o fred i al costat combustió o calent.

L'especificació del combustible es determinen experimentalment extraient mostres de procés i analitzant-les al laboratori, apartat 3.1.2.1, i l'especificació del condensat s'extrau dels històrics disponibles. En referència a les sortides, el vapor d'alta es genera segons l'especificació de la turbina i les característiques del vapor subministrat i, per últim, els gasos de combustió es determinen segons el balanç de matèria de la reacció de combustió.

### **3.1.2. Especificació del combustible**

El sistema de generació de vapor d'alta pressió o calderes empra com a combustible en les calderes un corrent gas residual anomenat *Off-Gas*. Els combustibles gasosos, com l'*Off-Gas*, són una mescla de gasos combustibles (hidrocarburs i hidrogen). Degut a que la composició de l'*Off-Gas* pot variar lleugerament degut al procés, s'han pres i analitzat mostres en diferents dies amb l'objectiu de normalitzar la composició.

#### **3.1.2.1. Anàlisi de l'*Off-Gas***

En aquest apartat es troben les simplificacions realitzades sobre l'estudi de la composició de l'*Off-Gas*, annex 3.

Si s'observa la composició d'aquest corrent es conclou que està format per més de 15 compostos orgànics diferents. Aquest fet és característic d'un corrent residual en un procés com l'emprat en *PDH*. Degut això i amb la finalitat de reduir la dificultat en els càlculs termodinàmics i en l'obtenció de les propietats, s'ha decidit reduir el nombre de compostos presents pels més significatius i normalitzar les concertacions. Aquesta normalització passa per emprar com a constituents de l'*Off-Gas* els hidrocarburs que es troben entre l'hidrogen i el butà, ambdós inclosos.

**Taula 3.1.2.1.1** Composició normalitzada de l'*Off-Gas*

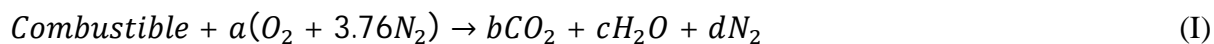
| Compost     | $x_{,i \min}$ [%] | $\bar{x}_{,i}$ [%] | $x_{,i \max}$ [%] |
|-------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| $H_2$       | 73.1              | 73.7               | 74.4              |
| $CH_4$      | 11.9              | 12.2               | 12.7              |
| $C_2H_6$    | 11.7              | 12.2               | 12.5              |
| $C_2H_4$    | 1.0               | 1.02               | 1.04              |
| $C_3H_8$    | 0.187             | 0.250              | 0.299             |
| $C_3H_6$    | 0.007             | 0.008              | 0.009             |
| $C_4H_{10}$ | 0.470             | 0.639              | 0.772             |

### 3.1.3. Especificació dels gasos de la combustió

La composició i quantitat de gasos de combustió venen determinats pel balanç de matèria de la reacció de combustió entre l'*Off-Gas* i l'aire atmosfèric. A continuació, es mostra la reacció de combustió amb la relació estequiomètrica i amb excés d'aire, excés que és determinat en aquest mateix apartat.

#### 3.1.3.1. Reacció de combustió

El balanç de matèria de la reacció s'ha realitzat tenint en compte que la composició del combustible és una mescla d'hidrocarburs i hidrogen, apartat 3.1.2.1, i suposant 1 kmol de combustible. D'aquesta manera s'han obtingut els coeficients estequiomètrics per la reacció de combustió.

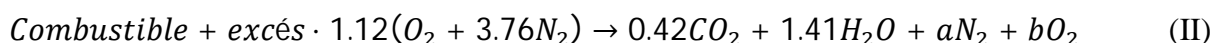
**Taula 3.1.3.1.1** Estequiometria de la combustió sense excés d'aire

| Compost                              | Estequiometria |
|--------------------------------------|----------------|
| Aire                                 | 1.12           |
| Diòxid de carboni, [ $\text{CO}_2$ ] | 0.420          |
| Aigua, [ $\text{H}_2\text{O}$ ]      | 1.41           |
| Nitrogen, [ $\text{N}_2$ ]           | 4.23           |

### 3.1.3.2. Selecció de l'excés d'aire

L'excés d'oxigen en una combustió és molt important per tal d'obtenir una combustió completa. Realment, si només es subministra l'oxigen estequiomètric, la reacció no es realitza completament ni assoleix la velocitat suficient i es generen reaccions incompletes com la formació de monòxid de carboni ( $\text{CO}$ ). Annex 2 apartat A.2.1.

S'ha realitzat el balanç de matèria amb diferents excessos d'aire amb l'objectiu de conèixer la quantitat d'oxigen que s'obté en els gasos de combustió. Una combustió correcta i completa té un rang de concentració d'oxigen en els gasos del 2 al 6 %. (Ref. 3.2)



A banda de la combustió completa, també cal tenir en compte que un excés d'aire elevat amb una temperatura superior al 750°C pot donar lloc a la formació de  $\text{NO}_x$ , per tant aquest excés no ha de ser molt elevat. (Ref.3.9)

**Taula 3.1.3.2.1** Quantitat d'oxigen en els gasos de combustió segons l'excés.

| Excés Aire [%] | $x_i$ [%] | Excés Aire [%] | $x_i$ [%] |
|----------------|-----------|----------------|-----------|
| 1              | 0.186     | 30             | 4.40      |
| 5              | 0.885     | 40             | 5.48      |
| 10             | 1.70      | 50             | 6.44      |
| 15             | 2.46      | 75             | 8.37      |
| 20             | 3.16      | 100            | 9.84      |

A partir de la taula anterior es conclou que el rang òptim d'excés d'aire és del 15 al 40 %. Alhora, s'ha comprovat quin efecte té aquest excés en l'obtenció de calor. Aquesta calor es tradueix en la temperatura de sortida dels gasos de combustió també anomenada temperatura de flama adiabàtica. En l'annex 2 apartat A.2.2. es mostra la taula amb els resultats de temperatura de flama adiabàtica obtinguts a partir de l'efecte del excés d'aire i de la temperatura d'entrada de l'*Off-Gas*.

Es conclou que, al augmentar l'excés d'aire la temperatura del gasos de sortida disminueix, ja que hi ha més volum de gas a escalfar. Per altra banda, es pot observar una dependència directa entre la temperatura d'entrada i la temperatura de flama adiabàtica, això es degut que el sistema ja entra escalfat i, per una mateixa aportació d'energia, la temperatura de sortida és major. Amb els resultats obtinguts es troben dependències que permetran trobar la variabilitat en l'operativa de la càmera de combustió. (Ref. 2.1)

La relació aire/combustible, per al 15% d'excés, és de 4.76 i la relació del combustible amb els gasos generats és de 24.8.

Per últim, tot el disseny es basa en la reacció del 15% d'excés d'aire, ja que per aquest excés, la concentració present d'oxigen en el gasos de combustió es troba dins dels valors típics i la temperatura de sortida és elevada per tal d'evitar la generació de  $NO_x$ . La composició i temperatura de la nova unitat es troba en l'apartat del disseny, apartat 4.2.

### 3.1.4. Especificació del condensat

En tot cicle *Rankine* es genera quan s'ha extret tota l'energia del vapor un condensat. S'ha estudiat aquest condensat amb l'objectiu de conèixer la seva composició per tal de determinar el material a emprar i decidir si es necessari instal·lar sistemes de purificació. Amb les dades del procés s'han conegut quins són el paràmetres del condensat.

**Taula 3.1.4.1** Paràmetres del condensat

| Temperatura [°C] | Pressió [barg] | $\dot{m}$ [t/h] |
|------------------|----------------|-----------------|
| 57               | 3.5            | 135             |



### 3.1.4.1. Estudi del condensat

Conèixer la composició del condensat és fonamental per tal de poder decidir si s'ha d'instal·lar una unitat purificadora o no i, en el cas de que aquesta sigui necessària, de quin tipus ha de ser. Per aquest motiu s'identifica la composició i els paràmetres del condensat de planta, dades les quals s'han extret dels històrics disponibles. Tanmateix, s'identifiquen els conflictes que poden tenir les impureses presents i, un cop avaluats els possibles problemes, es conclou si el conjunt necessita d'un sistema de purificació. Primerament, es mostren les dades extretes del condensat de les dades disponibles del laboratori de *PDH*.

**Taula 3.1.4.1.1** Paràmetres del condensat (Ref. 3.1)

| <i>pH</i> | Conductivitat [ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] |
|-----------|---|
| 8.78      | 6.18                                      |

**Taula 3.1.4.1.2** Quantitat dels components del condensat (Ref. 3.1)

| <i>SiO<sub>2</sub></i><br>[ppm] | <i>Fe</i><br>[ppm] | <i>Zn</i><br>[ppb] | <i>Cu</i><br>[ppb] | <i>Cl</i><br>[ppm] | <i>SO<sub>4</sub><sup>=</sup></i><br>[ppm] | <i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i><br>[ppm] | <i>Na</i><br>[ppb] |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--|--|--------------------|
| 0                               | <0.1               | ---                | ---                | <0.1               | <0.1                                       | <0.1                                       | 49                 |

Tot seguit es detallen els conflictes que poden ser perjudicials per al funcionament de les calderes derivats de les impureses presents en l'aigua condensada de retorn.

**Taula 3.1.4.1.3** Efectes perjudicials de les impureses (Ref. 1.1)

| Impuresa              | Fórmula  | Efecte   |
|-----------------------|--|--|
| Matèries en suspensió | ---  | Obstrucció en canonades.                                     |
| Matèria orgànica      | ---  | Depòsits en el vapor.  |
| Diòxid de carboni     | <i>CO<sub>2</sub></i>                                | Corrosió i baix <i>pH</i> si l'alcalinitat és baixa.         |
| Oxigen                | <i>O<sub>2</sub></i>                                 | Corrosió.  |
| Sulfur d'hidrogen     | <i>SH<sub>2</sub></i>                                | Corrosió.  |
| Ferro/Manganès        | <i>Fe/Mn</i>   | Depòsits en el vapor.  |
| Duresa                | <i>Ca<sup>+</sup>/Mg<sup>+</sup></i>                 | Incrustacions.   |
| Acidesa               | <i>H<sup>+</sup></i>                                 | Corrosió.  |
| Alcalinitat           | <i>CO<sub>3</sub><sup>=</sup>/CO<sub>3</sub>H/OH</i> | Espumes, despreniment de <i>CO<sub>2</sub></i> , fragilitat. |
| Clorurs               | <i>Cl</i>  | Augment de la salinitat i corrosivitat.                      |
| Sulfats               | <i>SO<sub>4</sub><sup>=</sup></i>                    | Augment de la salinitat i incrustacions dures.               |
| Nitrats               | <i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>                    | Augment de la salinitat i corrosivitat.                      |
| Silici                | <i>SiO<sub>2</sub></i>                               | Incrustacions i depòsits.                                    |
| Salinitat             | ---  | Concentracions elevades formen espumes.                      |
| Coure                 | <i>Cu</i>  | Depòsits i corrosió.   |
| Oli                   | ---  | Depòsits i espumes.  |

Presentats els efectes perjudicials que poden sofrir les calderes si el condensat d'entrada conté impureses, cal determinar quin és el rang d'impureses requerit en l'alimentació de l'aigua.

**Taula 3.1.4.1.4** Aigua d'alimentació recomanada segons UNE 9.075 (Ref. 1.1)

| <b>Requisits generals</b> | <b><math>40 &lt; P_{op} \leq 64</math></b> |
|---------------------------|--|
| Aspecte visual            | Transparent sense color                    |
| Duresa [°f]               | $\leq 0.05$                                |
| <i>pH</i>                 | 8 - 9.5                                    |
| $O_2$ [mg/l]              | $\leq 0.02$                                |
| $CO_2$ (lliure)           | No detectable                              |
| $CO_2$ (combinat)         | Recomanat $\leq 20$                        |
| <i>Fe</i> [ppm]           | Recomanat $\leq 0.05$                      |
| <i>Cu</i> [ppm]           | $\leq 0.01$                                |
| Matèries orgàniques       | $\leq 10$                                  |
| Olis [ppm]                | $\leq 0.5$                                 |
| $SiO_2$ [ppm]             | $\leq 10$                                  |

Finalment, es pot concloure que l'aigua de condensat és bona per ser emprada en les calderes del sistema de generació de vapor perquè la seva composició es troba dins del rang acceptable per l'ús en calderes aquotubulars. Per la qual cosa no cal instal·lar un sistema de purificació d'aigua, encara que la instal·lació gaudeix d'un sistema d'eliminació d'incondensables i d'un sistema de detecció de les impureses.

### 3.1.5. Especificacions del producte

L'objectiu del sistema de generació de vapor és garantir la producció de vapor per a què els equips que necessitin vapor d'alta pressió puguin operar. Per tant, el producte del projecte és el vapor d'alta pressió. A continuació, es mostren les condicions del vapor d'alta pressió a produir obtinguts a partir del disseny de la turbina *CT-3001* i amb l'especificació del vapor subministrat.

**Taula 3.1.5.1** Condicions del vapor a generar

| <b>Temperatura [°C]</b> | <b>Pressió [barg]</b> |
|-------------------------|-----------------------|
| 390-400                 | 45                    |

### 3.1.6. Capacitat, flexibilitat operativa i factor de servei

La planta consta de dues turbines que necessiten vapor d'alta pressió: la *CT-4501* i la *CT-3001*. S'han buscat en les dades del procés quin es el consum de cadascuna d'elles per tal d'avaluar els caudals de vapor que es necessiten. (Ref. 3.1)

**Taula 3.1.6.1** Consum de les turbines *CT-4501* i *CT-3001*

| $m_{CT-4501}$ [t/h] | $m_{CT-3001}$ [t/h] |
|---------------------|---------------------|
| 50                  | 100                 |

El consum de vapor de la *CT-4501* està satisfet per la producció de vapor d'alta pressió pròpia del procés, en canvi el consum de la *CT-3001* s'ha d'obtenir com un servei. Malgrat el consum de la turbina *CT-4501* estigui satisfet pel procés, el sistema generació de vapor ha d'estar dissenyat per satisfer el consum de les dues turbines. Garantir el consum d'ambdues turbines és essencial en la posada en marxa de la planta, ja que, en aquest punt el procés no genera vapor. En condicions normals, aquest sistema només genera vapor pel consum de la *CT-3001*. Tenint en compte les dues operatives de la planta: posada en marxa o operativa normal, les calderes tenen dues càrregues diferents segons el requisit de la planta: càrrega normal i càrrega total.

**Taula 3.1.6.2** Capacitat de generació del sistema

| Operació       | Capacitat [t/h] | Operativa [%] |
|----------------|-----------------|---------------|
| Càrrega normal | 100             | 66.7          |
| Càrrega total  | 150             | 100           |

Tot i així, la planta necessita que les dues calderes del sistema de generació de vapor estiguin en marxa quan la planta operi a càrrega normal. Això es degut a la gran necessitat del vapor en l'operativa de la planta, ja que, en el cas de que el procés es quedés sense vapor aquest s'atura. Per tant, s'ha decidit instal·lar les dues calderes que operaran juntament al 33.3% de la seva càrrega total donant lloc a una producció de 100 t/h.

**Taula 3.1.6.3** Capacitat de generació de les calderes

| Operació        | Capacitat màxima [t/h] | Operativa [%] | Producció [t/h] |
|-----------------|------------------------|---------------|-----------------|
| <i>B-8001 A</i> | 150                    | 33.3          | 50              |
| <i>B-8001 B</i> | 150                    | 33.3          | 50              |

Coneguts els consums, les operatives i la quantitat de condensat disponible, el sistema necessita de 15 t/h d'aigua per tal de garantir el consum de vapor, en el cas que el sistema hagués de generar les 150t/h.

### 3.1.7. Necessitats de combustible

En aquest apartat es mostra l'estudi realitzat sobre la quantitat de combustible a emprar en la generació de vapor d'alta pressió, a partir del balanç d'energia del sistema.

Primerament, cal conèixer el poder calorífic inferior del combustible emprant l'entalpia de combustió i es compara amb el resultat obtingut en el laboratori.

#### 3.1.7.1. Poder calorífic de l'Off-Gas

El poder calorífic d'un combustible és la quantitat de calor que genera un kilogram o un metre cúbic de combustible al oxidar-se de forma completa. Aquest poder calorífic pot ser superior (PCS) o inferior (PCI). Les diferència entre el superior i l'inferior és que, en el primer, el vapor d'aigua es troba totalment condensat i, en el segon, es considera que aquest no condensa. Per aquest cas, es calcula el poder calorífic inferior de l'*Off-Gas*, annex 2 apartat A.2.3.

**Taula 3.1.7.1.1** Poder calorífic *Off-Gas*

| Combustible    | PCI [MJ/Nm <sup>3</sup> ] |
|----------------|---------------------------|
| <i>Off-Gas</i> | 21.7                      |

El resultat obtingut teòricament coincideix amb l'obtingut en l'anàlisi d'aquest en el laboratori, apartat A.3.7 de l'annex 3. Un cop conegut el poder calorífic inferior del combustible, cal saber quina és la quantitat màxima de calor que pot generar. L'energia màxima emesa es descriu com el poder calorífic del combustible per la quantitat de combustible disponible. (Ref. 2.1)

**Taula 3.1.7.1.2** Calor màxima generada per l'*Off-Gas* disponible

| $v$ [Nm <sup>3</sup> /h] | $m$ [kg/s] | $Q_{max}$ [MW] |
|--------------------------|------------|----------------|
| 10000                    | 0.91       | 56.3           |

Paral·lelament, cal saber quina energia necessita el fluid fred per passar de líquid a vapor sobreescalfat. El fluid quan entra a la caldera es troba a 57°C i 45 barg i el vapor sobreescalfat surt del sistema a 400°C i 45 bar. El càlcul es realitza segons la diferència d'entalpies per la quantitat de vapor a generar, apartat A.2.4 de l'annex 2.

**Taula 3.1.7.1.3** Calor requerida pel fluid fred

| Operació       | Capacitat [t/h] | $Q_{requerida}$ [MW] |
|----------------|-----------------|----------------------|
| Càrrega normal | 100             | 82.4                 |
| Càrrega total  | 150             | 123                  |

Finalment, coneixent l'energia màxima disponible de l'*Off-Gas* i la quantitat d'energia requerida per generar el vapor es conclou que els 10000 Nm<sup>3</sup>/h no són suficients. Per aquest motiu, el sistema necessita d'un combustible secundari, el Gas Natural, quantitat del qual es determina en el disseny de la caldera, apartat 4.2.

### 3.1.8. Normes de disseny a aplicar

En aquest apartat es descriuen les normes i hipòtesis emprades en tot el disseny i realització del projecte, les quals van des de l'obtenció les dades necessàries fins a les simplificacions realitzades en el mètode aplicat.

#### Propietats:

- Les propietats termodinàmiques s'han extret del *software EES (Engineering Equation Solver)*.
- No s'ha tingut en compte la pèrdua de pressió en el conjunt de la caldera per l'obtenció de les propietats termodinàmiques.

### Disseny tèrmic:

- Les correlacions emprades en el disseny de la caldera estan descrites pel Gas Natural.
- En el balanç d'energia del sobreescalfador la temperatura d'entrada correspon a la temperatura de sortida de l'hogar.
- Només es considera transferència per convecció i la flama no té contacte directe amb cap element de la caldera.
- S'estimen unes pèrdues en la transferència de calor entre el fluid fred i calent del 2%.
- Els paràmetres de *fouling* pels gasos de combustió i l'aigua són  $8370 \text{ kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$  i  $20900 \text{ kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ , respectivament.

## **3.2. Dades bàsiques pel desenvolupament de l'enginyeria**

A continuació, es troba tota la informació necessària de les *utilities* a usar, les dades del emplaçament de la planta, els codis i legislació oficial aplicada en el disseny.

### **3.2.1. Utilities disponibles**

La planta de *PDH* consta de diferents elements que interactuen amb la planta i són necessaris pel seu funcionament i operativa, però no formen part del procés, aquest elements són les *utilities*. Tot seguit es detallen aquelles que són necessàries per l'operació del sistema de generació de vapor.

#### **3.2.1.1. Aigua**

En el disseny del projecte s'empren dos tipus d'aigua, l'aigua industrial i la desmineralitzada. La primera es la emprada en les torres de refrigeració, en segon lloc, l'aigua

desmineralitzada és usada en el sistema de generació de vapor quan la necessitat de producció és superior a la quantitat de condensats obtinguts.

**Taula 3.2.1.1.1** Especificació aigua (Ref.3.1)

| <b>Aigua</b>     | $T_{min}$ [°C] | $T$ [°C] | $T_{max}$ [°C] | $P_{min}$ [barg] | $P$ [barg] | $P_{max}$ [barg] |
|------------------|----------------|----------|----------------|------------------|------------|------------------|
| Industrial       | 10             | [18, 22] | 27             | 6                | 10         | 11               |
| Desmineralitzada | 10             | 20       | 27             | [4, 8]           | 10         | 11               |

Les característiques, propietats i composició de l'aigua industrial són les mateixes que les del riu Ebre. Per altra banda, les característiques de l'aigua desmineralitzada segueixen els criteris de la *VGB Guideline VGB-R 450 L* del 1988. (Ref.3.1)

### 3.2.1.2. Gas natural

El gas natural s'empra en el sistema com el combustible addicional. El gas natural és un producte de la família dels hidrocarburs del petroli format majoritàriament per metà.

**Taula 3.2.1.2.1** Composició del gas natural (Ref.3.1)

| <b>Compost</b> | <b>[%]</b>  |
|----------------|-------------|
| $N_2$          | 0.429       |
| $CH_4$         | 90.2        |
| $C_2H_6$       | 8.14        |
| $C_3H_8$       | 0.978       |
| $C_4H_{10}$    | 0.251       |
| $C_5H_{12}$    | 0.015       |
| Total sofre    | Max. 15 ppm |

El Gas Natural en els límits de bateria es troba entre 25 i 35 barg i a una temperatura de 30°C. La temperatura pot variar lleugerament segons l'etapa de l'any, veure les dades climatològiques de l'apartat 3.2.3.1. (Ref.3.1)

### 3.2.1.3. Aire

L'aire es captat de l'atmosfera i s'empra com aire sec en la combustió de les calderes. La temperatura de l'aire és variable segons l'època de l'any, apartat 3.2.3.1, en canvi la pressió d'aquest és constant i es considera atmosfèrica. (Ref. 3.1)

**Taula 3.2.1.3.1** Composició del aire sec

| Compost | $N_2$ [%] | $O_2$ [%] | $CO_2$ [%] | Altres [%] |
|---------|-----------|-----------|------------|------------|
| Aire    | 78.1      | 20.9      | 0.04       | 0.96       |

### 3.2.1.4. Nitrogen

El nitrogen és emprat en els equips per ser netejats quan aquests estan en fora de servei. La temperatura pot oscil·lar segons el mes de l'any, veure apartat 3.2.3.1. (Ref. 3.1)

**Taula 3.2.1.4.1** Especificació nitrogen (Ref. 3.1)

| Utility  | $P_{min}$ [barg] | $P$ [barg] | $P_{max}$ [barg] | $T$ [°C] | Humitat [°C]    |
|----------|------------------|------------|------------------|----------|-----------------|
| Nitrogen | 11               | [11, 12]   | 15               | 20       | Punt rosada -40 |

### 3.2.1.5. Electricitat

L'especificació de l'electricitat que té disponible la planta es troba detallada en la taula següent.

**Taula 3.2.1.5.1** Característiques de l'electricitat (Ref. 3.1)

| Voltatge | Fases | Freqüència |
|----------|-------|------------|
| 6.000 V  | 3     | 50 Hz      |
| 500 V    | 3     | 50 Hz      |
| 380 V    | 3     | 50 Hz      |



### 3.2.1.6. Aire d'instrumentació

L'aire d'instrumentació es utilitza, com el seu nom indica, en la instrumentació instal·lada en la planta. La temperatura de servei pot diferir de la mostrada, ja que depèn de la temporada de l'any, veure dades climatològiques apartat 3.2.3.1.

**Taula 3.2.1.6.1** Especificacions aire d'instrumentació (Ref. 3.1)

| <i>Utility</i>      | $P_{min}$ [barg] | $P$ [barg] | $P_{max}$ [barg] | $T$ [°C] | Humitat [°C]     |
|---------------------|------------------|------------|------------------|----------|------------------|
| Aire instrumentació | 6.5              | 7          | 7.5              | 20       | Punt rosada. -40 |

### 3.2.2. Preus de les utilities

A continuació es detallen els preus de les *utilities* emprades en l'estudi econòmic del projecte, apartat 9.

**Taula 3.2.2.1** Preus *utilities* (Ref.3.1)

| Gas Natural [€/GJ] | Off-Gas [€/GJ] | Electricitat [€/kWh] |
|--------------------|----------------|----------------------|
| 7                  | 5              | 0.064                |

### 3.2.3. Dades de l'emplaçament

El *site* de *BASF Española SL* es troba ubicat a Tarragona, el qual és el centre de producció més gran de *BASF* a Espanya i Portugal. A més, és la seu central de *BASF Española SL*. Es troba en el polígon sud de Tarragona dins de la localitat de La Canonja, amb una extensió de 7.32 km<sup>2</sup> i una població de 5.740 habitants. Aquest complex industrial té una superfície de 112 hectàrees. (Ref. 5.1)

**Taula 3.2.3.1** Dades de la localitat de la Canonja (Ref. 5.2)

| Ítem     | Paràmetre   | Ítem      | Paràmetre  |
|----------|-------------|-----------|------------|
| Longitud | 41° 07' 24" | Província | Tarragona  |
| Latitud  | 1° 10' 42"  | Comarca   | Tarragonès |

### 3.2.3.1. Climàtic, Pluviomètric, Sísmics

El clima del Tarragonès és mediterrani litoral Sud amb una distribució de precipitació irregular. L'estació més plujosa és la tardor i la menys plujosa l'estiu. El període àrid està comprès entre juny i juliol. En règim tèrmic, tota la comarca es caracteritza per tenir estius calorosos i hiverns moderats. Les glaçades són poc freqüents, exceptuant els tres mesos d'hivern. (Ref.3.3)

**Taula 3.2.3.1.1** Climatologia del Tarragonès (Ref. 3.3)

|                                 | <b>G</b> | <b>F</b> | <b>M</b> | <b>A</b> | <b>M</b> | <b>J</b> | <b>JL</b> | <b>A</b> | <b>S</b> | <b>O</b> | <b>N</b> | <b>D</b> |
|---------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>T. màxima [°C]</b>           | 20.8     | 24       | 28.2     | 29.1     | 30.6     | 31.3     | 34.5      | 35.2     | 33.3     | 30.7     | 25.5     | 21       |
| <b>T. mitjana [°C]</b>          | 10       | 11.9     | 14.1     | 15.9     | 18.8     | 22.8     | 25.9      | 26.7     | 24       | 19.1     | 13.9     | 10.7     |
| <b>T. mínima [°C]</b>           | -1.6     | 0.3      | 0.6      | 4.5      | 9        | 13.3     | 16        | 14.3     | 13       | 9        | 2.7      | 0        |
| <b>Precipitació mitjana[mm]</b> | 37.2     | 19.1     | 36.6     | 38.2     | 53.2     | 33.3     | 15.7      | 52.8     | 68.2     | 63.7     | 46.9     | 44.7     |

El risc sísmic a Catalunya està localitzat en la zona de la Garrotxa en la província de Girona, per tant la localització de la planta no es troba en una zona de rics sísmic.

### 3.2.3.2. Elevació i estructura del terreny

La major part del terreny situat a La Canonja presenta un pendent suau, inferior al 5%. En alguna zona presenta algun pendent destacat, el qual es situa al nord-oest amb un pendent descendent cap a nord-oest (10 i el 20%). El sector presenta orientacions diverses depenent del terreny. Els terrenys centrals i meridionals miren cap al sud i, per altra banda la zona del nord l'orientació és cap al nord. A l'oest i l'est, ambdós s'orienten cap al sentit contrari, est i oest respectivament.

Segons l'Informe preliminar de riscos geològics (abril 2008, referència AP-079/08) redactat i realitzat per l'Institut Geològic de Catalunya cita que en aquest sector no s'ha detectat indicis, ni es té constància documental que en el passat s'hagin desenvolupat processos de perillositat geològica que justifiquin la realització d'un estudi de detall previ a la definició dels usos del sòl.

### **3.2.4. Normes oficials de disseny a aplicar**

Les normes oficials de disseny aplicades en aquest projecte estan establertes en l'àmbit de la revisió, disseny mecànic i seguretat.

Els equips auxiliars o accessoris que treballen amb pressió s'han dissenyat aplicant el codi ASME secció VIII divisió 1.

Les canonades internes de les calderes s'ha dissenyat seguint el codi ASME secció I.

Les bombes seleccionades compleixen amb els requisits de la ISO 5199/ EN 25199.

L'especificació de l'aigua d'alimentació en les calderes ve regida per la norma UNE 9.075.

La legislació d'emissions de gasos contaminants i de compostos d'efecte hivernacle emprada és el Reial Decret 430/2004, el Decret 319/1998 i la llei 1/2005.

Finalment, degut que l'atmosfera de la planta està catalogada com explosiva, tots els equips han de complir, per motius de seguretat, la norma ATEX (directiva 94/9/CE i 1999/92/CE).

---

## **4. DESENVOLUPAMENT DE L'ENGINYERIA BÀSICA**

### **4.1. Elaboració de diagrames**

#### **4.1.1. Detall caldera**

S'ha cregut necessari realitzar un plànol d'una caldera que detalli els elements que la configuren per tal d'aclarir alguns aspectes tractats en aquest projecte. Aquest diagrama es troba en el plànol N°1 del projecte.

#### **4.1.2. Blocs**

El primer pas en la realització del projecte és identificar quins són els elements del procés que intervenen amb la nova unitat a instal·lar. La forma més senzilla de visualitzar els elements que intervenen és mitjançant un diagrama de blocs.

El projecte presenta dos diagrames de blocs: el primer, mostra de forma esquematitzada les unitats de la planta que intervenen amb la nova instal·lació (plànol N° 2); el segon, en canvi, mostra els elements de la nova instal·lació, juntament, amb dos diagrames dels equips que necessiten el vapor produït, *splitter* i compressor (plànol N° 3).

#### **4.1.3. Flux de Procés**

El diagrama de flux del procés o *PFD* mostra el recorregut del flux des de que entra en el sistema de generació de vapor fins que surt. Aquest diagrama detalla el nombre de línies que té la instal·lació i tota la informació important dels corrents (pressions, temperatures, cabals i composició).

En referència al plànol presentat cal citar que els cabals es troben representats com a intervals. Aquest fet és degut que la unitat pot operar, tal que s'esmenta en el projecte, en diverses

---

carregues i els cabals que hi circulen poden variar. Aquest diagrama es troba disponible en el plànol N°4.

#### **4.1.4. Plot Plan**

Un aspecte important a tenir en compte alhora de dissenyar una nova unitat és l'emplaçament d'aquest en la planta. El *plot plan* és el diagrama que permet veure quina és la ubicació de la nova instal·lació en la planta.

El diagrama presentat s'observen tots els equips que componen la nova unitat i la torxa de planta. Per motius de confidencialitat, no es permet detallar tot l'emplaçament del procés. Aquesta informació es troba en el plànol N°5.

#### **4.1.5. P&ID**

El plànol més importat d'una instal·lació és el *P&ID* perquè conté tota la informació de la unitat. Els *P&ID's* detallen tots els elements i accessoris instal·lats (instrumentació, analitzadors, vàlvules, purgues...etc), permet conèixer l'estratègia de control establerta (elements de control i vàlvules de control) i l'especificació de les canonades (nom de les línies).

El projecte presenta dos *P&ID's*. El primer fa referència al desgasificador (plànol N°6) i, el segon, detalla el sistema de bombeig, l'alimentació del combustible i les calderes (plànol N°7).

## 4.2. Disseny bàsic

En aquest apartat es presenten tot el conjunt de càlculs que componen el disseny del sistema de generació de vapor. Aquests càlculs consten del balanç de matèria i d'energia, del disseny mecànic i del dimensionament dels equips i accessoris de la nova unitat.

### 4.2.1. Dimensionament dels tubs del sistema de generació de vapor

Degut a que tot el sistema de generació de vapor està sotmès, per la part de l'aigua, a pressió cal dimensionar el gruix dels tubs tenint en compte el codi ASME Secció I, el qual defineix l'espessor de les parets a partir de les pressions de disseny, apartat A.2.5 de l'annex 2. (Ref.3.4)

Primerament cal citar que les canonades treballen a pressió interna. En el dimensionament, cal tenir en compte la temperatura de la paret, ja que aquesta determina el material a emprar i, per tant, les propietats mecàniques d'aquest. Tal i com descriu el codi, el dimensionament d'aquestes s'ha realitzat en les condicions més desfavorables les quals es donen quan l'equip opera a la seva màxima capacitat, 150 t/h.

La temperatura de la paret s'ha calculat realitzant un balanç tèrmic de resistències entre l'ambient i la paret. Amb aquest balanç es troba la temperatura mitjana de la paret.

**Taula 4.2.1.1** Temperatures de les parets

|                  | <b>Sobreescalfador</b> | <b>Evaporador</b> | <b>Economitzador</b> |
|------------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| $T_{paret}$ [°C] | 871                    | 734               | 285                  |
| $T_{dis}$ [°C]   | 891                    | 754               | 305                  |

Amb les condicions de les parets del conjunt, es determina el material a emprar en cadascun dels elements. Pel que fa al economitzador, on la seva temperatura no és molt extrema s'ha seleccionat un acer inoxidable austenític anomenat AISI 316 el qual pot operar satisfactòriament a temperatures moderadament altes. Degut a les condicions més extremes que es donen en l'evaporador i el sobreescalfador, s'ha hagut de seleccionar un material que pugui suportar les condicions en aquest elements. Aquest material és un acer resistent al calor

anomenat RA 253 MA, el qual és un material usat en aquests equips perquè és resistent a les molt altes temperatures. La descripció més detallada dels materials emprats es troba en l'annex 2 apartat A.2.5. (Ref.3.6)

Previ al càlcul del gruix s'ha de determinar l'àrea de pas. Per aquest dimensionament, s'ha realitzat una separació dels trams segons l'estat del fluid per tal de poder realitzar les estimacions de velocitat pertinents. S'ha estimat que el vapor té una velocitat màxima de 30 m/s i una mínima de 10 m/s; per altra banda, el rang de velocitats pel líquid és d'1 m/s fins a 3 m/s. Amb les velocitats estimades i el cabal màxim de pas s'ha calculat l'àrea de pas i s'ha seleccionat un model de canonada. Amb el model, s'ha tornat a calcular la velocitat de pas i s'ha comparat amb el rang establert.

**Taula 4.2.1.2** Diàmetres interns i rang de velocitats en el sistema de generació de vapor

|                 | <b>Sobreescalfador</b> | <b>Evaporador</b> | <b>Economitzador</b> |
|-----------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| $d_i$ [mm]      | 25.6                   | 13.8              | 13.5                 |
| $v_{max}$ [m/s] | 32.6                   | 22.4              | 2.67                 |
| $v_{min}$ [m/s] | 10.9                   | 7.48              | 0.89                 |

Detallades les velocitats i els diàmetres interns dels tres elements, es calcula el gruix requerit en cada element seguint els criteris del codi ASME Secció I, tenint en compte que la pressió de disseny és un 110% de la pressió màxima d'operació, la qual correspon a 55 barg.

**Taula 4.2.1.3** Dimensionat canonades internes calderes

|            | <b>Sobreescalfador</b> | <b>Evaporador</b> | <b>Economitzador</b> |
|------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| $t_i$ [mm] | 10.6                   | 7.42              | 2.61                 |

Sobre el càlcul realitzat i els diàmetres interns s'obtenen els diàmetres externs requerits. Els diàmetres externs venen donats per la suma del gruix calculat i el diàmetre intern.

**Taula 4.2.1.4** Diàmetres externs dels elements del sistema de generació de vapor

|            | <b>Sobreescalfador</b> | <b>Evaporador</b> | <b>Economitzador</b> |
|------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| $d_o$ [mm] | 35.6                   | 20.9              | 13.4                 |

Observant els diàmetres exteriors obtinguts, es comprova que els valors d'aquests són inusuals i poc freqüents quan s'instal·len canonades. Per aquest motiu, s'ha optat per emprar diàmetres externs amb dimensions més estàndards.

**Taula 4.2.1.5** Diàmetres externs estandarditzats dels elements del sistema de generació de vapor

|            | <b>Sobreescalfador</b> | <b>Evaporador</b> | <b>Economitzador</b> |
|------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| $d_o$ [mm] | 36                     | 21                | 13.5                 |

#### 4.2.2. Dimensionament tèrmic i mecànic del sistema

A continuació es mostra el dimensionament tèrmic del sistema de generació de vapor. Aquest dimensionament consta de: balanç de matèria i energia, els quals s'han de realitzar paral·lelament; el disseny mecànic de cada part i la selecció dels elements de l'hogar.

El dimensionament tèrmic es realitza en cada element independentment, ja que cadascun té una funció i una transferència diferent. Els procediments de càlcul es troben des de l'apartat A.2.6 fins al A.2.9 de l'annex 2. A més aquest dimensionament s'ha realitzat per les quatre configuracions d'operativa, taula 4.2.2.1, les quals es poden classificar en dues: càrrega total o càrrega parcial (apartat 3.1.6)

**Taula 4.2.2.1** Configuracions del sistema de generació de vapor

| <b>Configuració</b> | <b>Càrrega</b> | <b>Calderes operatives</b> | <b>Producció total [t/h]</b> |
|---------------------|----------------|----------------------------|------------------------------|
| 1                   | Total          | 1                          | 150                          |
| 2                   | Parcial        | 1                          | 100                          |
| 3                   | Total          | 2                          | 150                          |
| 4                   | Parcial        | 2                          | 100                          |

També cal destacar que s'ha dimensionat tenint en compte la solidesa mecànica per a totes les configuracions. En gran mesura, s'ha aproximat el disseny a la realitat tenint en compte que el disseny sigui coherent per a les condicions més desfavorables i que, alhora, sigui viable per a les configuracions on les calderes operen a càrrega parcial.

Tal i com s'ha esmentat anteriorment, es detalla també la quantitat de Gas Natural requerit. En referència al combustible, cal destacar que en les configuracions 1 i 3 (càrrega total) no s'empra *Off-Gas*, ja que aquestes dues operatives tenen lloc quan la planta es troba en posada en marxa i, en aquest punt, el procés no produeix *Off-Gas*.



### 4.2.3. Dimensionament de l'hogar

L'hogar és la part del conjunt de la caldera aquotubular on es realitza la combustió del combustible amb l'aire i és on s'obté la màxima energia de tot el sistema.

Una de les aplicacions més importants de la transferència de calor radiant es troba en els hogars de les calderes de vapor. El càlcul del calor radiant és complex, ja que intervenen molts factors que afecten amb diversos y diferents efectes. Degut això, s'ha decidit emprar un mètode simplificat de càlcul, el qual, mitjançant correlacions de aproximació, s'obté la quantitat de calor en l'hogar i la temperatura de sortida dels gasos.

En aquest apartat es detalla la quantitat de combustible secundari a introduir en el sistema per a cada configuració.

Tot l'entramat de càlcul es resol seguint un sistema iteratiu establert entre l'energia produïda i la quantitat de combustible a introduir. Tot el procediment de càlcul té la peculiaritat que: els gasos produïts depenen de la quantitat de combustible introduït i dels requeriments energètics, a més la temperatura de sortida afecta a la selecció del material i depèn de les dimensions de l'hogar. El mètode iteratiu comença amb la suposició d'una quantitat de Gas Natural, d'una relació entre el combustible, l'aire i els gasos produïts, i d'un volum de l'hogar. El valors inicials de les relacions s'han pres dels resultats obtinguts amb el càlcul de l'*Off-Gas*, apartat 3.1.3. Aquest sistema iteratiu és de vital importància en tot el projecte perquè, amb aquest, s'obté la quantitat de Gas Natural, el cabal màssic de gasos de combustió, les temperatures de sortida i el dimensionament de l'hogar, tots ells necessaris pel desenvolupament del projecte. El procediment de càlcul es troba en l'annex 2 apartat A.2.6.

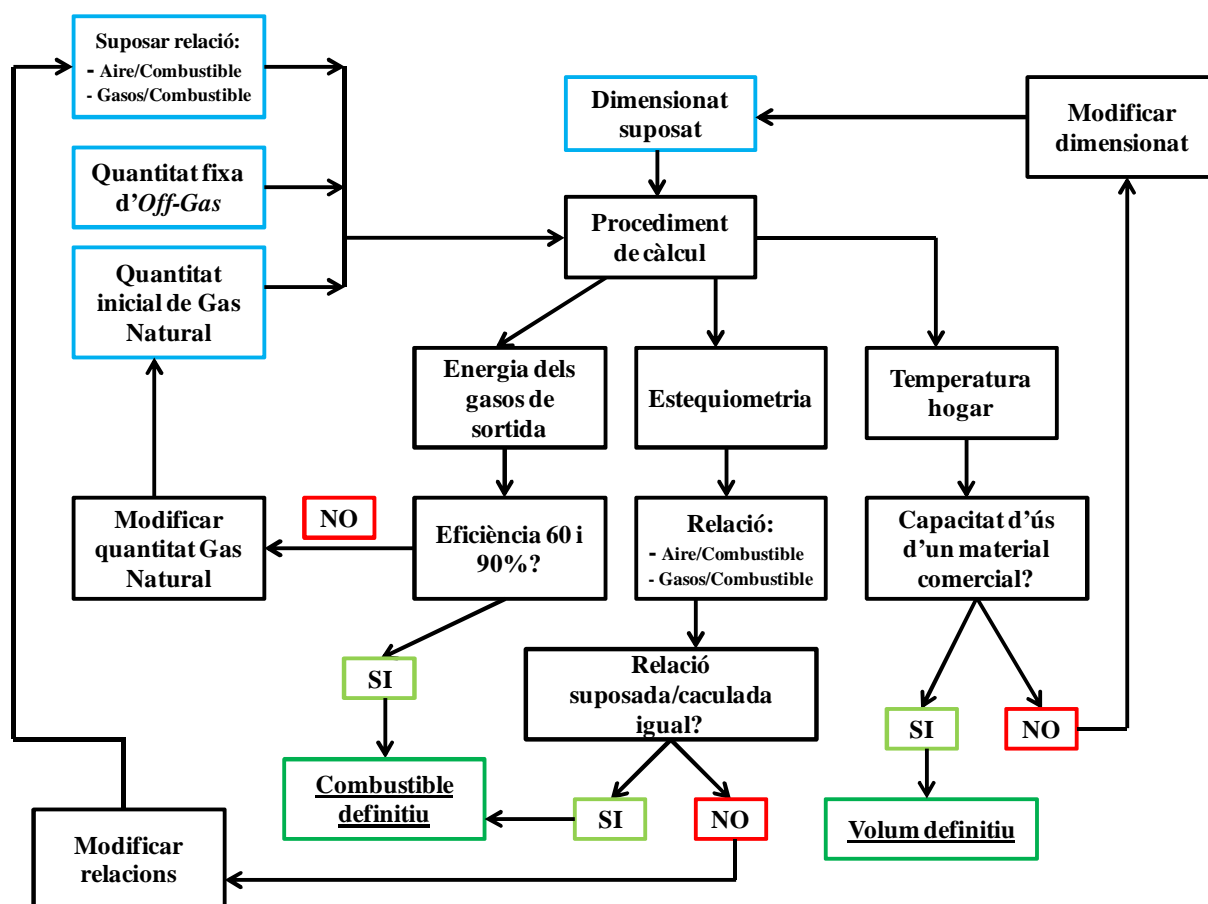


Figura 4.2.3.1 Esquema del sistema iteratiu emprat

Taula 4.2.3.1 Dimensionament de l'hogar

|                       | Esquerra | Dreta | Terra | Sostre | Posterior | Frontal |
|-----------------------|----------|-------|-------|--------|-----------|---------|
| $L$ [m]               | 5        | 5     | 5     | 5      | 0         | 0       |
| $H$ [m]               | 8        | 8     | 0     | 0      | 8         | 8       |
| $A$ [m]               | 0        | 0     | 6     | 6      | 6         | 6       |
| $s$ [m <sup>2</sup> ] | 40       | 40    | 30    | 30     | 48        | 48      |

A continuació, es detallen els resultats obtinguts de la reacció de combustió, ja que tal com s'ha citat anteriorment, és molt important conèixer el cabal màssic de fums generats per tal de dissenyar els elements que configuren la caldera.

Taula 4.2.3.2 Resultats reacció de combustió

| Configuració | $W_f$ [t/h] | $W_a$ [t/h] | $W_g$ [kg/h] | $G_{fa}$ | $G_f$ |
|--------------|-------------|-------------|--------------|----------|-------|
| 1            | 11.1        | 39.9        | 235          | 3.61     | 21.2  |
| 2            | 8.24        | 28.0        | 166          | 3.39     | 20.1  |
| 3            | 6.36        | 22.9        | 135          | 3.61     | 21.2  |
| 4            | 4.78        | 16.2        | 95.7         | 3.38     | 20.0  |

Per altra banda es detallen altres paràmetres que determinen si la combustió és correcta o si la caldera opera de forma segura.

**Taula 4.2.3.3** Resultats obtinguts en l'hogar per a cada configuració

| Configuració | $\eta$ (%) | OG [t/h] | GN [t/h] | $G_{fa}$ | $T_g$ [°C] | $x_{O_2}$ [%] |
|--------------|------------|----------|----------|----------|------------|---------------|
| 1            | 72.7       | 0        | 11.1     | 3.61     | 1660       | 2.51          |
| 2            | 62.0       | 3.51     | 4.74     | 3.39     | 1580       | 2.50          |
| 3            | 63.4       | 0        | 6.36     | 3.61     | 1470       | 2.51          |
| 4            | 53.8       | 1.75     | 3.02     | 3.38     | 1390       | 2.50          |

Resulta tot el procediment iteratiu, cal seleccionar el tipus de material a instal·lar en l'hogar. Generalment, el material en l'hogar pot ser de dos tipus: maó refractari o parets d'aigua. Pel que fa a les calderes de grans dimensions no es recomana construir l'hogar solament de maó, ja que, degut a l'alçada, l'esforç de compressió creat pel pes dels maons és major que la resistència mecànica (les temperatures internes són elevades) i la dilatació de l'estructura i de la caldera origina problemes en la construcció. Degut als inconvenients, s'empra una combinació de maons i tubs d'aigua. D'aquesta manera, es pot emprar materials refractaris que suportin menys temperatura ja que aquests són protegits pels tubs d'aigua. Per tant, s'ha decidit instal·lar maons refractaris d'argila perquè la seva resistència mecànica augmenta a temperatures elevades i la seva conductivitat tèrmica és mínima degut a la seva gran porositat.

Els refractaris d'argila segons les normes *ASTM* i en funció a la seva resistència a la corrosió, a l'estabilitat del volum, a la capacitat de treball sota càrrega calenta i a la resistència als canvis de temperatura es classifiquen en: *Super duty*, *High duty*, *Semi-silice*, *Medium duty* i *Low duty*. Degut a les condicions d'operació de l'hogar s'empra un maó refractari d'argila de categoria *high duty*, ja que dintre de les condicions extremes de la càmera de combustió aquesta no pateix canvis de temperatura perquè la seva operativa és en continu.

**Taula 4.2.3.4** Composició química del material refractari en %

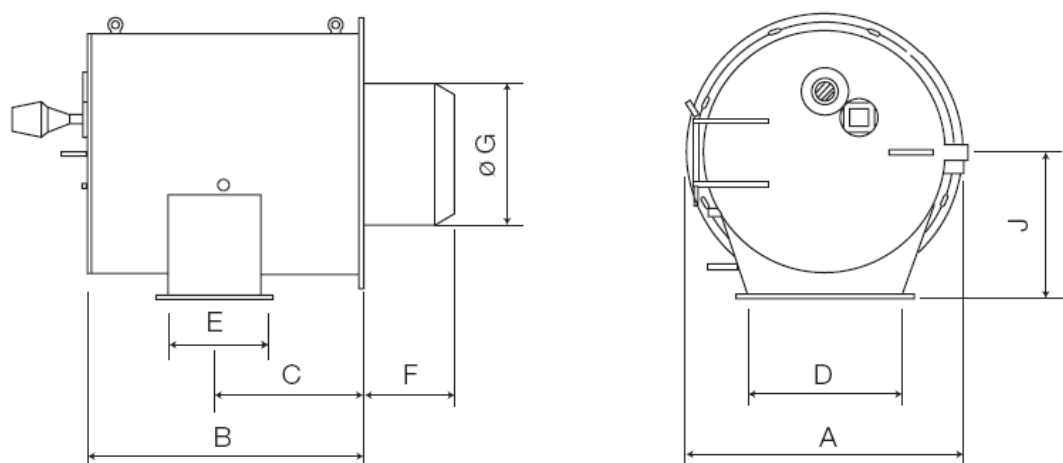
| Refractari | Varietat         | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $TiO_2$ | $Cr_2O_3$ |
|------------|------------------|---------|-----------|-----------|-----|-----|---------|--------|---------|-----------|
| Argila     | <i>High duty</i> | 55      | 39        | 2.6       | 0.3 | 0.3 | 1.2     | ---    | 1.6     | ---       |

Per tal de finalitzar el dimensionament de l'hogar es decideix quin tipus de cremador s'instal·la, quants d'aquests i quina operativa segueixen. La selecció dels cremadors és un punt important del sistema de generació de vapor, ja que, són aquests els que permeten canviar la operativa o configuració de la caldera. A més, segons les millors tècniques

disponibles, es recomanable instal·lar cremadors de baix generació de  $NO_x$  en les noves instal·lacions de combustió, per tal d'evitar l'emissió d'aquest contaminant. Aquest paràmetre és molt important mediambientalment i cal minimitzar-lo. Aquest compost s'origina quan degut a les altes temperatures d'operació el nitrogen present s'oxida amb l'oxigen i forma  $NO_x$ . D'aquesta manera, emprant aquest tipus de cremadors es redueix notablement els nivells de  $NO_x$  en els fums de combustió i, a més, es minimitza la generació de  $CO$  quan s'opera amb un excés d'oxigen petit. Per aquests motius, s'ha realitzat una recerca en el mercat dels cremadors disponibles per tal de decidir quin cremador instal·lar. (Ref.3.8)(Ref.3.9)

**Taula 4.2.3.5** Especificacions del cremador seleccionat (Ref.3.8)

| Model  | Tipus | Potència [MW] | $O_2$ [%] | $NO_x$ [mg/Nm <sup>3</sup> ] |
|--|-------|---------------|-----------|------------------------------|
| <i>Duobloc low-<math>NO_x</math> modulating burner</i> | TA 7  | 20            | 2         | < 100                        |



**Figura 4.2.3.2** Diagrama del *Duobloc low  $NO_x$  modulating burner* (Ref.3.8)

**Taula 4.2.3.6** Dimensions especificades del *Duobloc low  $NO_x$  modulating burner* en mm (Ref.3.8)

| Cremador | A    | B    | C   | D   | E   | F   | G   | H  | I    | J   |
|----------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|-----|
| TA 7     | 1100 | 1120 | 400 | 606 | 506 | 690 | 582 | 12 | 1060 | 600 |

En l'hogar s'instal·len set cremadors, quatre dels quals (cremadors principals) es troben en la paret frontal disposats en forma quadrada i els tres restants (cremadors secundaris) es troben en la paret esquerra format una línia recta. Els cremadors de la paret frontal operaren amb totes les configuracions, mentre que els tres de la paret esquerra només operen quan la caldera funciona amb al configuració 1 i 2. Per la configuració 1, els tres cremadors secundaris romanen encesos i el central s'apaga quan la caldera treballa amb la configuració 2.

#### 4.2.4. Dimensionament del sobreescalfador

Els equips que tenen operacions d'escalfament fins a temperatures superiors a la de saturació reben el nom de sobreescalfadors. Aquests elements estan comunicats amb el calderí el qual emet vapor saturat. Apartat 2.5.1.1.

Tot seguit es determina el dimensionament d'aquest primer element del sistema de generació de vapor d'alta pressió. El mètode de càlcul consta d'un sistema de prova i ajust, en el qual es suposen unes dimensions inicials i, en finalitzar tot el procediment, es verifica si la suposició inicial ha estat correcta, en cas contrari es modifica i es torna a comprovar.

Degut a que ja es coneix el cabal de gasos de combustió generats i la temperatura de sortida de l'hogar es pot realitzar el balanç d'energia en aquest element. Aquest balanç es calcula amb la finalitat d'obtenir la temperatura de sortida dels gasos del sobreescalfador. En aquesta part es considera que tota l'energia obtinguda en la part de l'aigua és despresada pels fums, juntament amb les pèrdues per radiació. D'aquesta manera i coneixent els cabals, s'obté la temperatura dels gasos a la sortida.

**Taula 4.2.4.1** Temperatures costat vapor

| $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|---------------|----------------|
| 257.5         | 400            |

**Taula 4.2.4.2** Temperatures costat fums

| Configuració | $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|--------------|---------------|----------------|
| 1            | 1660          | 1460           |
| 2            | 1580          | 1390           |
| 3            | 1470          | 1290           |
| 4            | 1390          | 1220           |

Paral·lelament es calcula el flux d'energia emesa pels gasos de combustió, els quals tenen un valor més elevat donat que existeixen pèrdues de calor en forma de radiació.

**Taula 4.2.4.3** Flux de calor per a cada un dels costats

| Configuració | $Q_{w,sobres}$ [MW] | $Q_{g,sobres}$ [MW] | $Q_{p,sobres}$ [MW] |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1            | 16.9                | 17.3                | 0.346               |
| 2            | 11.3                | 11.5                | 0.231               |
| 3            | 8.48                | 8.65                | 0.173               |
| 4            | 5.65                | 5.77                | 0.115               |

Aplicant el mètode descrit s'obtenen els respectius coeficients de transferència de calor  $i$ , un cop obtinguts, es calcula, mitjançant un balanç global en el sobreescalfador, el coeficient global de transferència de calor.

**Taula 4.2.4.4** Coeficient de transferència global i salt tèrmic

| Configuració | $U_{sobres}$ [kJ/h·m <sup>2</sup> ·C] | $\Delta T_m$ [°C] |
|--------------|---------------------------------------|-------------------|
| 1            | 934                                   | 1230              |
| 2            | 825                                   | 1150              |
| 3            | 741                                   | 1050              |
| 4            | 641                                   | 973               |

Finalment, es calcula l'àrea d'intercanvi i el nombre de files i tubs. Es comprova si el nombre d'aquestes correspon amb l'inicial i s'ajusten en el cas de no coincidir. Es determina el volum de l'equip a partir alçada, la separació i la longitud dels tubs.

**Taula 4.2.4.5** Resultats mecànics del sobreescalfador

| $L$ [m] | $A$ [m] | $H$ [m] | $V_c$ [m <sup>3</sup> ] | $(SC)$ [m <sup>2</sup> ] | $n_{total}$ | $n_{fila}$ | $N_{pT}$ |
|---------|---------|---------|-------------------------|--------------------------|-------------|------------|----------|
| 3.10    | 3.80    | 4       | 47.0                    | 53.1                     | 128         | 2          | 1        |

Per últim, es calcula les pèrdues de pressió per a cada costat.

**Taula 4.2.4.6** Pèrdues de càrrega en el sobreescalfador

| Configuració | $\Delta P_g$ [barg]  | $\Delta P_v$ [barg] |
|--------------|----------------------|---------------------|
| 1            | $1.91 \cdot 10^{-2}$ | 1.72                |
| 2            | $9.57 \cdot 10^{-3}$ | 0.766               |
| 3            | $6.10 \cdot 10^{-3}$ | 0.432               |
| 4            | $3.08 \cdot 10^{-3}$ | 0.193               |

#### 4.2.5. Dimensionament de l'evaporador

En l'evaporador es transmet el calor a l'aigua saturada que circula generant vapor saturat. Habitualment, s'empren tubs d'acer d'alta resistència tèrmica i sense aletes degut a les elevades temperatures dels gasos. Apartat 2.5.1.1. Pel càlcul de la transmissió de calor des de la paret dels tubs a l'aigua es precís efectuar el càlcul de la circulació natural dels aigua.

A continuació, es mostra el dimensionament del generador de vapor el qual, igual que en els sobreescalfador, es segueix un procediment de prova i ajust. El disseny s'inicia pel balanç d'energia ja que els cabals d'aigua/vapor i fums es coneixen. El balanç energètic es comença pel costat fred per tal de conèixer la quantitat d'energia absorbida, coneguda aquesta energia i amb les pèrdues es troba l'energia transmesa pels fums. Finalment amb la temperatura de sortida del sobreescalfador (mateixa que l'entrada a l'evaporador), es troba la temperatura de sortida dels gasos de combustió de l'evaporador.

**Taula 4.2.5.1** Temperatures costat vapor

| $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|---------------|----------------|
| 257.5         | 257.5          |

**Taula 4.2.5.2** Temperatures costat fums

| Configuració | $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|--------------|---------------|----------------|
| 1            | 1460          | 577            |
| 2            | 1390          | 545            |
| 3            | 1290          | 507            |
| 4            | 1220          | 475            |

Es troben els fluxos d'energia emesa i absorbida en el generador per a cada configuració. Com es pot comprovar, l'energia dels gasos de combustió pren valors més elevats que el del vapor, ja que existeixen pèrdues de calor en forma de radiació.

**Taula 4.2.5.3** Flux de calor per a cada un dels costats

| Configuració | $Q_{w,evap}$ [MW] | $Q_{g,evap}$ [MW] | $Q_{p,evap}$ [MW] |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1            | 69.8              | 71.3              | 1.43              |
| 2            | 46.6              | 47.5              | 0.950             |
| 3            | 34.9              | 35.6              | 0.712             |
| 4            | 23.3              | 23.8              | 0.475             |

Un cop realitzat el balanç d'energia de l'evaporador, es continua amb el càlcul dels coeficients de transferència pels dos costats, calent i fred. Coneguts els coeficients de transferència de calor per ambdós costats, s'obté el coeficient global de transferència de calor de cada configuració.

**Taula 4.2.5.4** Coeficient de transferència global i salt tèrmic

| Configuració | $U_{evap}$ [kJ/h·m <sup>2</sup> ·C] | $\Delta T_m$ [°C] |
|--------------|-------------------------------------|-------------------|
| 1            | 1190                                | 667               |
| 2            | 1090                                | 616               |

**Taula 4.2.5.4** Coeficient de transferència global i salt tèrmic (*Continuació*)

| Configuració | $U_{evap}$ [kJ/h·m <sup>2</sup> ·C] | $\Delta T_m$ [°C] |
|--------------|-------------------------------------|-------------------|
| 3            | 992                                 | 552               |
| 4            | 892                                 | 501               |

Per últim es troba l'àrea requerida d'intercanvi de calor i el nombre de files necessàries i es comprova si aquestes corresponen amb les suposades inicialment. En aquest punt, s'ajusten els paràmetres: nombre de tubs per fila i longitud del tub per tal d'obtenir un disseny complet i coherent per les quatre configuracions.

**Taula 4.2.5.5** Resultats mecànics de l'evaporador

| $L$ [m] | $A$ [m] | $H$ [m] | $V_c$ [m <sup>3</sup> ] | $n_{total}$ | $n_{fila}$ | (SC) [m <sup>2</sup> ] |
|---------|---------|---------|-------------------------|-------------|------------|------------------------|
| 4       | 5.44    | 10      | 218                     | 546         | 3          | 317                    |

Per últim es calculen les pèrdues de pressió obtingudes en aquest tram del sistema tant pel costat calent com pel fred. Les pèrdues de càrrega del costat vapor en l'evaporador dista del procediment típic ja que, en aquest element, la pèrdua de pressió a de garantir la circulació natural. El principi de la circulació natural és basa en que la columna més pesada estableixi un flux que s'estabilitza quan la pressió (motriu, en aquest cas) s'equilibra amb les pèrdues de càrrega produïdes per la circulació. Quan existeix aquest equilibri hi ha circulació natural.

**Taula 4.2.5.6** Dades i característiques dels accessoris emprats en l'evaporador

| Accessoris   | $n$ | $d_i$ [m] | $H/L$ [m] | $K$ | $f$   |
|--------------|-----|-----------|-----------|-----|-------|
| Reg          | 2   | 0.289     | 12        | 2.5 | 0.013 |
| Connexió     | 36  | 0.078     | 0         | 3   | 0     |
| Tubs         | 546 | 0.052     | 10        | 1.5 | 0.022 |
| Transició    | 36  | 0.078     | 0         | 0.5 | 0     |
| Despreniment | 8   | 0.240     | 2         | 1   | 0.014 |
| Col·lector A | 4   | 0.267     | 0         | 2.5 | 0     |
| Col·lector B | 9   | 0.173     | 0         | 0.5 | 0     |
| Col·lector C | 8   | 0.240     | 0         | 0.5 | 0     |

Realitzat el càlcul de la pressió motriu, la qual correspon al sumatori de les pèrdues majors i característiques, s'obté la pèrdua de pressió pel costat fred. Paral·lelament es troba, mitjançant el càlcul del factor de fricció i el balanç d'energia mecànica, les pèrdues en el costat dels gasos de combustió.



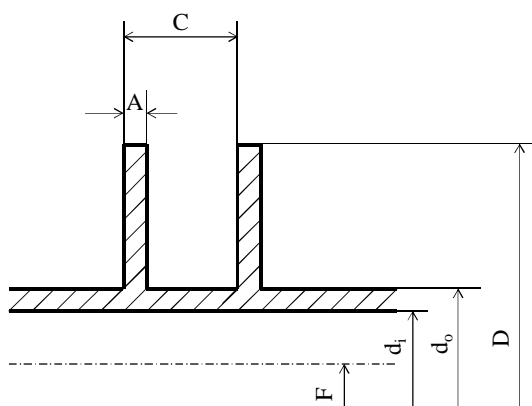
**Taula 4.2.5.7** Pèrdues de càrrega en l'evaporador

| Configuració | $\Delta P_g$ [barg]  | $\Delta P_v$ [barg] |
|--------------|----------------------|---------------------|
| 1            | $1.53 \cdot 10^{-3}$ | 0.560               |
| 2            | $7.67 \cdot 10^{-4}$ | 0.539               |
| 3            | $4.91 \cdot 10^{-4}$ | 0.520               |
| 4            | $2.49 \cdot 10^{-4}$ | 0.490               |

#### 4.2.6. Dimensionament de l'economitzador

Els economitzadors escalfen l'aigua d'alimentació de la caldera reduint la temperatura dels gasos i augmentant el rendiment de la caldera. És habitual emprar en la fabricació dels economitzadors la tecnologia de les superfícies extenses. Aquesta tecnologia consisteix en crear elements en l'exterior dels tubs de forma que augmenti la superfície exterior i, en conseqüència, s'incrementi els calor transmès per una mateixa longitud de tubs.

A continuació, es mostra el mètode emprat en el dimensionament de l'economitzador juntament amb els balanç d'energia. Primer de tot, es detallen les dimensions i especificacions de les altes emprades en els tubs.

**Figura 0.1** Esquema aletes economitzador**Taula 0.1** Especificacions aletes economitzador

| $d_o$ [mm] | $d_i$ [m] | $A$ [m]             | $C$ [m]             | $D$ [m] |
|------------|-----------|---------------------|---------------------|---------|
| 13.5       | 10.8      | $3.5 \cdot 10^{-4}$ | $2.2 \cdot 10^{-3}$ | 0.027   |

**Taula 0.2** Eficiència aletes

| Configuració | $\Omega$ [%] |
|--------------|--------------|
| 1            | 59.1         |
| 2            | 66.0         |
| 3            | 69.7         |
| 4            | 74.7         |

De la mateixa forma que en els dos darrers equips, s'inicia el disseny amb el balanç d'energia amb l'objectiu de conèixer la temperatura de sortida dels gasos. Degut que els cabals són coneguts i les temperatures del costat fred també es calcula l'energia absorbida per l'aigua. Sabent que en la transferència té un 2% de pèrdues per radiació, es troba l'energia despresa pels fums i es troba la temperatura de sortida.

**Taula 0.3** Temperatures costat vapor

| $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|---------------|----------------|
| 57            | 257.5          |

**Taula 0.4** Temperatures costat fums

| Configuració | $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|--------------|---------------|----------------|
| 1            | 577           | 85.1           |
| 2            | 545           | 79.6           |
| 3            | 507           | 74.4           |
| 4            | 475           | 69             |

Cal tenir present que la temperatura de sortida dels gasos ha de ser petita per tal de poder treure la màxima energia del flux calent i alhora reduir l'àrea requerida en l'intercanvi de calor. No obstant, aquesta temperatura de sortida no ha de ser, en cap moment, inferior a la temperatura de rosada de l'aigua continguda en els gasos. La concentració més elevada d'aigua es dona quan la caldera opera amb *Off-Gas* i Gas Natural, la qual correspon a un 18.2% i, amb aquesta concentració, la temperatura de rosada és de 58°C. Comparant aquesta temperatura amb els valors obtinguts, es conclou que no hi ha condensació interna en l'economitzador.

**Taula 0.5** Flux de calor per a cada un dels costats

| Configuració | $Q_{w,eco}$ [MW] | $Q_{g,eco}$ [MW] | $Q_{p,eco}$ [MW] |
|--------------|------------------|------------------|------------------|
| 1            | 34.6             | 35.3             | 0.706            |
| 2            | 23.1             | 23.5             | 0.471            |
| 3            | 17.3             | 17.7             | 0.353            |
| 4            | 11.5             | 11.8             | 0.235            |

En el moment que el balanç d'energia es troba tancat per les quatre configuracions, es prossegueix amb el disseny de l'element, el qual té l'objectiu d'obtenir els coeficients de transferència de calor per a cadascun dels costats: fred i calent. Quan els coeficients d'ambdós costats es troben calculats, es troba el coeficient global de transferència de calor mitjançant el balanç tèrmic.

**Taula 0.6** Coeficient de transferència global i salt tèrmic

| Configuració | $U_{sobres}$ [kJ/h·m <sup>2</sup> ·C] | $\Delta T_m$ [°C] |
|--------------|---------------------------------------|-------------------|
| 1            | 250                                   | 120               |
| 2            | 212                                   | 104               |
| 3            | 182                                   | 87.2              |
| 4            | 139                                   | 71                |

Per últim, es troba l'àrea d'intercanvi requerida i el nombre de files a emprar. Es verifica si l'estimació inicial es bona i es modifica la longitud i el nombre de tubs per ajustar el disseny a l'operativa de la caldera.

**Taula 0.7** Resultats mecànics de l'economitzador

| $L$ [m] | $A$ [m] | $H$ [m] | $V_c$ [m <sup>3</sup> ] | $n_{total}$ | $n_{fila}$ | $N_{pT}$ | (SC) [m <sup>2</sup> ] |
|---------|---------|---------|-------------------------|-------------|------------|----------|------------------------|
| 3       | 2.83    | 6       | 85                      | 1015        | 13         | 1        | 4180                   |

Realitzat el disseny mecànic de l'economitzador s'obtenen les pèrdues de càrrega per a cada costat de l'element.

**Taula 0.8** Pèrdues de càrrega en l'economitzador

| Configuració | $\Delta P_g$ [barg]  | $\Delta P_w$ [barg] |
|--------------|----------------------|---------------------|
| 1            | 0.145                | 0.854               |
| 2            | $7.34 \cdot 10^{-2}$ | 0.402               |
| 3            | $4.77 \cdot 10^{-2}$ | 0.238               |
| 4            | $2.44 \cdot 10^{-3}$ | 0.115               |

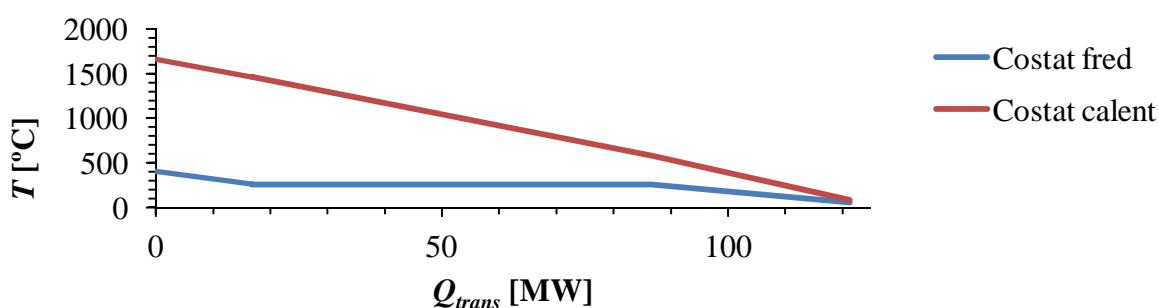
#### 4.2.7. Perfils de temperatures i punt pinch

En aquest apartat es mostren els perfils de temperatures que descriuen els dos fluids (fred i calent) al llarg de tot el sistema de generació de vapor per a cadascuna de les quatre operatives descrites. Es mostra el punt *pinch* del sistema el qual es troba on la diferència de

temperatures és menor. A continuació es detallen els perfils d'energia i temperatura del sistema de generació. A més, s'adjunta una taula on es troben les temperatures, l'energia transmesa i la potència de cada element del sistema.

**Taula 4.2.7.1** Perfil d'energia i temperatura configuració 1

|                  | Hogar | Sobreescalfador | Evaporador | Economitzador |
|------------------|-------|-----------------|------------|---------------|
| $Q_{trans}$ [MW] | 0     | 16.9            | 86.7       | 121           |
| $T_g$ [°C]       | 1660  | 1460            | 577        | 85.1          |
| $T_a$ [°C]       | 400   | 258             | 258        | 57            |
| $Q_i$ [MW]       | 0     | 16.9            | 69.8       | 34.6          |

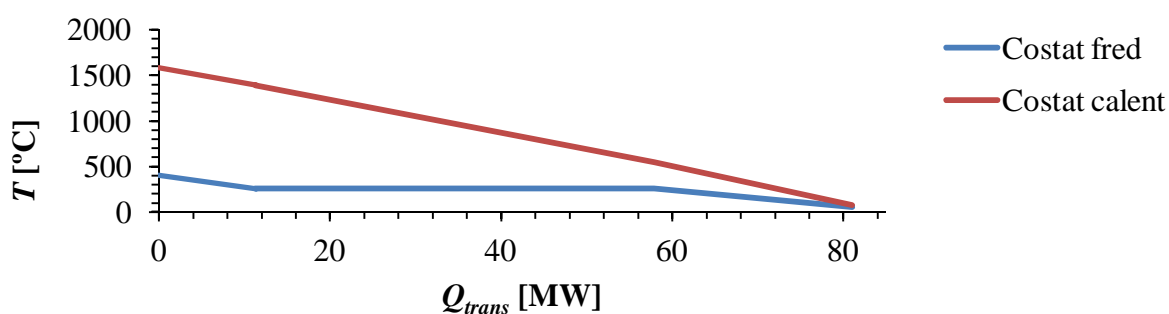


**Figura 4.2.7.1** Perfil d'energia i temperatura configuració 1

Tot seguit, es detalla el gràfic i la taula de l'energia intercanviada i les temperatures en cada punt del sistema, quan aquest opera en la configuració 2.

**Taula 4.2.7.2** Perfil d'energia i temperatura configuració 2

|                  | Hogar | Sobreescalfador | Evaporador | Economitzador |
|------------------|-------|-----------------|------------|---------------|
| $Q_{trans}$ [MW] | 0     | 11.3            | 57.9       | 81            |
| $T_g$ [°C]       | 1580  | 1390            | 545        | 79.6          |
| $T_a$ [°C]       | 400   | 258             | 258        | 57            |
| $Q_i$ [MW]       | 0     | 11.3            | 46.6       | 23.1          |

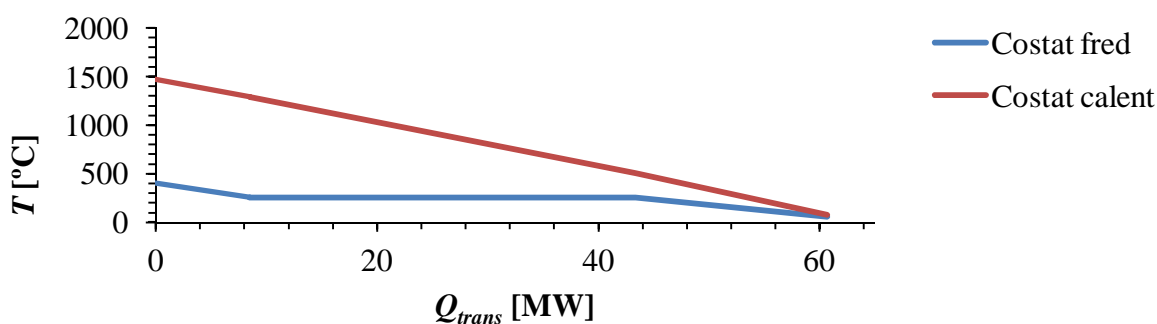


**Figura 4.2.7.2** Perfil d'energia i temperatura configuració 2

Igual que per als dos darrers casos, es mostren les dades obtingudes de temperatures i energia de la configuració 3 en forma gràfica i especificada en la taula 4.2.7.3.

**Taula 4.2.7.3** Perfil d'energia i temperatura configuració 3

|                  | Hogar | Sobreescalfador | Evaporador | Economitzador |
|------------------|-------|-----------------|------------|---------------|
| $Q_{trans}$ [MW] | 0     | 8.48            | 43.4       | 60.7          |
| $T_g$ [°C]       | 1470  | 1290            | 507        | 74.4          |
| $T_a$ [°C]       | 400   | 258             | 258        | 57            |
| $Q_i$ [MW]       | 0     | 8.48            | 34.9       | 17.3          |

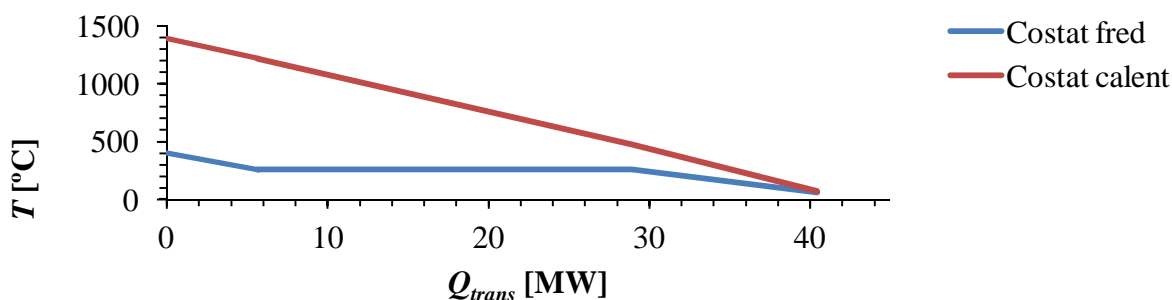


**Figura 4.2.7.3** Perfil d'energia i temperatura configuració 3

Per últim, es mostren els perfils de temperatura i energia per la configuració número quatre. S'adjunta la taula resum i el gràfic.

**Taula 4.2.7.4** Perfil d'energia i temperatura configuració 4

|                  | Hogar | Sobreescalfador | Evaporador | Economitzador |
|------------------|-------|-----------------|------------|---------------|
| $Q_{trans}$ [MW] | 0     | 5.65            | 29.0       | 40.5          |
| $T_g$ [°C]       | 1390  | 1220            | 475        | 69            |
| $T_a$ [°C]       | 400   | 257.5           | 257.5      | 57            |
| $Q_i$ [MW]       | 0     | 5.65            | 23.3       | 11.5          |



**Figura 4.2.7.4** Perfil d'energia i temperatura configuració 4

Observant els quatre perfils s'observa com la tendència de les quatre és la mateixa. Es comprova com la línia vermella (gasos de combustió) decreix linealment, mentre que la línia blava segueix una primera tendència creixent, la qual es dona en l'economitzador i és on l'aigua passa de 57 °C a la temperatura de saturació 257.5 °C; tot seguit es troba una zona recta la qual correspon al canvi de fase i, per últim, es troba la línia on l'aigua passa de vapor saturat a vapor sobreescalfat (400°C) que correspon al sobreescalfador. Si les tendències s'observen conjuntament es pot concloure que el punt on les dues línies (vermella i blava) es troben més juntes és en l'entrada del economitzador. Aquest punt és el punt *pinch* del sistema. Segons la bibliografia aquest punt de contacte o *pinch* ha d'estar entre 10 i 30 °C per tal que el disseny no proporcioni una àrea excessiva. (Ref.2.3)

A continuació es detallen els punts *pinch* obtinguts per a cada configuració i es comprova si aquests punts es troben dins dels rang de valors teòrics. Com es pot comprovar els valors es troben dins dels rang establert en la teoria.

**Taula 4.2.7.5** Punt *pinch* per a cada configuració

| Configuració | Punt <i>pinch</i> |
|--------------|-------------------|
| 1            | 28.1              |
| 2            | 22.6              |
| 3            | 17.4              |
| 4            | 12                |

#### 4.2.8. Selecció del sistema de bombeig

Un cop dissenyat tot el conjunt de les calderes, s'han de seleccionar els accessoris que tota la instal·lació requereix. Una part d'aquests accessoris és el sistema de bombeig el qual s'ha seleccionat tenint en compte les necessitat de la unitat.

Inicialment, es va estimar col·locar quatre bombes dividides en parelles (una parella per a cada caldera), però es va estudiar que era il·lògic separa el corrent i bombeja'l fins a les calderes quan es podia bombejar primer i separa'l després. D'aquesta manera es redueix el cost d'inversió, ja que es col·loquen menys equips secundaris i menys instrumentació.

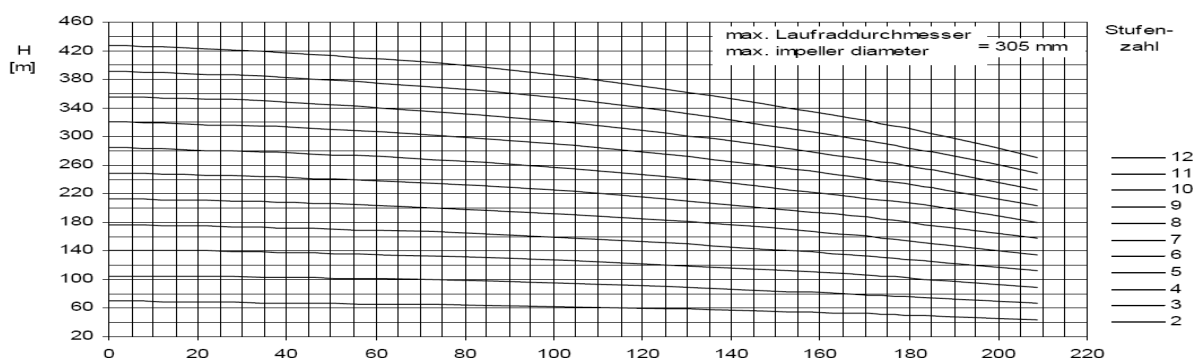
L'emplaçament de les bombes es troba entre el corrent 5 i el corrent 7, veure *PDF* plànol N°4. Degut això, s'han calculat les pèrdues de pressió des de l'impulsió de la bomba fins al retorn al procés per tal de conèixer la pressió de descarrega de la bomba i garantir el compliment de l'especificació de producte, apartat 3.1.5. Calculades les pèrdues, es determina que la pressió de descàrrega de les bombes ha de ser de 50.3 barg amb una alçada de 258 m i una potència útil de 105 kW. Coneguda l'alçada i el cabal impulsat, 150 t/h, es selecciona el model i tipus de bomba a instal·lar. S'ha optat, observant les condicions d'operació, que el tipus de bomba més adient per aquesta instal·lació és una bomba multi etapa. Aquest tipus de bombes permeten tenir un cabal de servei elevat i, alhora, obtenir una altura de columna de líquid elevada.

**Taula 4.2.8.1** Informació bomba seleccionada (Ref.3.11)

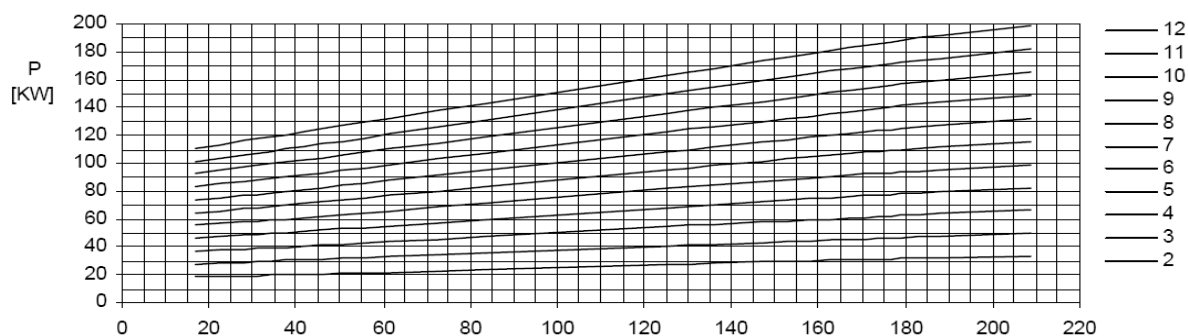
| Model                  | Sèrie      | Normativa         | $n_{rodet}$ | $P$ [kW] | $\eta$ [%] | $NPSH_R$ [m] |
|------------------------|------------|-------------------|-------------|----------|------------|--------------|
| <i>SIHI Multi 125C</i> | <i>MSL</i> | ISO 5199/EN 25199 | 9           | 130      | 80         | 1.75         |

Les bombes *SIHIMulti* sèrie *MSM* són bombes horitzontals, multi etapa i centrífugues de secció anular, les quals compleixen amb tots els requeriments tècnics de la ISO 5199/ EN 25199. Una de les aplicacions d'aquest tipus de bombes és en alimentació de les calderes de vapor. (Ref.5.6)

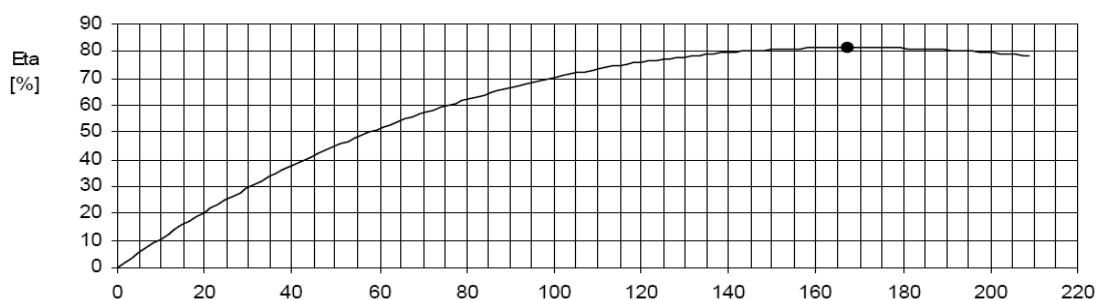
Com es pot comprovar, el paràmetre de potència necessària es justifica amb les dades de potència subministrada i rendiment obtinguts, ja que el producte d'ambdós correspon a la potència necessària calculada. A més, tenint en compte que la pressió a l'aspiració ve donada per la pressió a la sortida del *V-8001* i a la pressió del recicla, s'ha calculat el  $NPSH_D$  que ha de ser superior al obtingut en la figura 4.2.8.4. i, efectivament, el  $NPSH_D$  és superior al requerit perquè, amb aquestes condicions, aquest pren un valor de 254m.



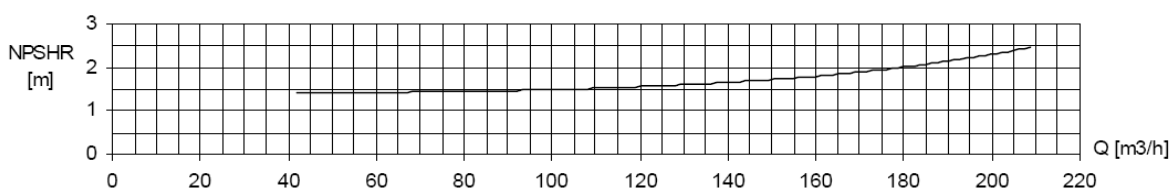
**Figura 4.2.8.1** Corba de la bomba en funció dels diversos rodets disponibles (Ref.3.11)



**Figura 4.2.8.2** Potència de la bomba en funció dels diversos rodets disponibles (Ref.3.11)



**Figura 4.2.8.3** Corba del rendiment de la bomba (Ref.3.11)



**Figura 4.2.8.4** Corba del  $NPSH_R$  (Ref.3.11)

#### 4.2.9. Equips auxiliars

El conjunt del sistema de generació consta de diversos equips auxiliars els quals són essencials pel bon funcionament de les calderes i per l'allargament de la vida funcional de la nova unitat. Llevat del sistema de bombeig que es trunca en una altra secció, apartat 4.2.8, el sistema de generació de vapor consta d'una unitat auxiliar anomenada unitat purificadora d'incondensables. L'objectiu d'aquesta unitat és eliminar els gasos (generalment oxigen i diòxid de carboni) que puguin estar presents en el condensat de retorn mitjançant una desgasificació tèrmica i, aprofitant energia, precalentar el condensat. L'aportació d'energia ve donada pel vapor de baixa pressió.



Aquesta unitat consta de dos parts: la purificació de l'aigua i la recuperació del condensat. En el primer grup es troba, en la part superior, el desgasificador que realitza la separació dels gasos i, en la part inferior, un tanc on s'emmagatzema el condensat desgasificat. Per altra banda, es troba la zona de recuperació que consta d'un intercanviador que condensa i recupera la fracció de vapor i allibera els incondensables a l'atmosfera.

El condensat o aigua de retorn s'introdueix pel cap del desgasificador a través d'un polvoritzador que atomitza l'aigua. L'aigua polvoritzada arriba ràpidament a la temperatura de servei i es realitza la primera desgasificació on s'elimina la major part de l'oxigen. Tot seguit, el condensat passa per la segona zona de desgasificació, la càmera de la mescla. L'interior d'aquesta es troba perforada per tal de permetre el pas del vapor que, en ascensió fins al cap del desgasificador, es posa en contacte amb el condensat que baixa en contracorrent. Aquest procés dona lloc a un rentat del condensat que produeix una reducció del contingut en gasos incondensables. Finalment, el condensat desgasificat arriba a la zona interna on s'emmagatzema. Per altra banda, la quantitat d'incondensables extrets en la primera part es dirigeixen cap a la zona de recuperació. (Ref.5.5)

#### **4.2.9.1. Paràmetres operacionals i dimensionament de la unitat purificadora**

En aquest apartat es troba el dimensionament del tanc d'emmagatzematge de l'unitat purificadora, els paràmetres d'operació de la unitat i el material a emprar. El dimensionament del tanc s'ha realitzat emprant els criteris descrits en el codi ASME secció VIII divisió 1.

El desgasificador superior opera a 0.2 barg i a una temperatura de 100°C. El material seleccionat per aquesta unitat és un acer inoxidable AISI 316 perquè té excel·lents propietats pel conformat, consta de bones característiques per la soldadura i presenta una gran resistència a la corrosió.

**Taula 4.2.9.1** Composició química del AISI 316 en %

| <b>Qualitat</b> | <b>C</b> | <b>Cr</b>    | <b>Mo</b> | <b>Ni</b> |
|-----------------|----------|--------------|-----------|-----------|
| 316             | <0.07    | [16.5, 18.5] | [2, 2.5]  | 10 - 13   |

A continuació es mostren els paràmetres de disseny mecànics del tanc d'emmagatzematge de la unitat purificadora.

**Taula 4.2.9.2** Paràmetres del tanc d'emmagatzematge

| Tipus       | Capacitat [m <sup>3</sup> ] | Nivell [%] | $P_{op}$ [barg] | $T_{op}$ [°C] |
|-------------|-----------------------------|------------|-----------------|---------------|
| Horitzontal | 75                          | 70         | 0.2             | 60            |

El tanc d'emmagatzematge horitzontal consta d'un cilindre central i dos caps el·lipsoidals 2:1 que fan que el conjunt resulti un cos tridimensional tancat. Les dimensions del tanc són: longitud del cos central, 5.5 m i, el diàmetre intern, 3.5 m. Tot el conjunt s'ha calculat tenint en compte que treballa a pressió interna i que les seves soldadures es troben parcialment radiografiades.

**Taula 4.2.9.3** Paràmetres mecànics del tanc d'emmagatzematge

| $P_{dis}$ [barg] | $T_{dis}$ [°C] | $t_{cilindre}$ [mm] | $t_{el·lipsoidal}$ [mm] | MAWP [barg] | $P_{hidro}$ [barg] |
|------------------|----------------|---------------------|-------------------------|-------------|--------------------|
| 1.55             | 80             | 3.14                | 3.14                    | 1.2         | 1.76               |

Finalment es construeix el tanc amb xapa de 3.5 mm, ja que aquesta és més estàndard i, per tant, més barata que la xapa de 3.14 mm, la qual s'hauria de fabricar expressament per aquest equip.

#### 4.2.10. Disseny de canonades i determinació de la pèrdua de càrrega

És essencial pel disseny del conjunt detallar totes les canonades que componen i intervenen en el sistema de calderes.

La selecció dels diàmetres nominals de les canonades s'inicia amb el càlcul de l'àrea de pas requerida pel fluid quan tot el sistema opera a càrrega total. Obtinguda l'àrea de pas necessària a partir de les velocitats inicials suposades, es busca en un catàleg de canonades el perfil que millor s'ajusta i, amb aquest, es calcula la velocitat real de pas i es comprova que aquesta es troba dins dels límits de velocitat típics segons l'estat. Alhora cal comprovar si el perfil escollit és resistent a la pressió màxima de treball. Per aquest motiu, s'ha aplicat el codi

---

ASME Secció I i es verifica si el gruix del perfil seleccionat és igual o superior al requerit amb el codi. (Ref.3.10)

Seleccionats els diàmetres nominals de les línies que formen el sistema, es determina a partir de les temperatures d'operació i dels diàmetres nominals el gruix de calorifugat a emprar. El aïllant seleccionat és la llana de vidre rígida la qual és molt usada en l'aïllament de sistemes de canonades incloent les de transport de vapor. (Ref.3.13)

Finalment es determinen les longituds, les alçades i els accessoris de cadascuna de les línies. Part d'aquesta determinació, s'ha realitzat mitjançant el *Plot Plant* del projecte, apartat 4.1.4 plànol N°5, i l'observació de l'emplaçament en planta. Un cop realitzat el dimensionament de les canonades i la selecció del nombre d'elements que componen cada línia del sistema, es realitza el balanç d'energia mecànica del conjunt per tal de conèixer la pressió de sortida de cada línia. Coneguda aquesta pressió es determina si es necessiten instal·lar bombes secundaries.

Les especificacions de les canonades així com les pressions a les entrades i sortides de cada tram es troben en l'apartat A.2.10 de l'annex 2. Amb els resultats obtinguts, s'ha decidit no instal·lar bombes secundaries.

#### **4.2.11. Disseny de la instrumentació i control**

Cada dia és més necessari tenir una bona automatització en les instal·lacions per tal d'obtenir un millor rendiment i seguretat. En aquest camp, els generadors de vapor no són cap excepció. En aquest apartat es detalla l'estratègia de control implantada en tot el conjunt del sistema així com la instrumentació necessària a instal·lar. Veure amb detall *P&ID* 1 i 2.

#### 4.2.11.1. Estratègia de control

A continuació es detalla l'estratègia de control establerta per a cada equip de la nova unitat. Veure amb detall *P&ID's* 1 i 2.

Tots els elements de control consten de tres elements clau: els indicadors, els quals capten les dades del procés; els controladors, encarregats de rebre les senyals dels indicadors i, mitjançant el punt de consigna, generar l'acció correctora al tercer element, la vàlvula de control que regula el procés. Els elements de control es poden combinar entre ells per tal d'establir accions de control més ràpides i precises.

L'estratègia de control del sistema s'inicia en el desgasificador que és on es dona lloc l'alimentació del condensat i la regulació d'aquest amb l'aigua desmineralitzada. El desgasificador, apartat 4.2.9, consta d'un tanc d'emmagatzematge *V-8001*. En aquest tanc es controla l'alimentació del sistema de generació de vapor mitjançant un controlador *FIC* en el fons del tanc. A banda del controlador de cabal, el tanc consta d'un controlador de nivell que evita que aquest es quedi buit, ja que el controla mitjançant el cabal d'alimentació del tanc. Amb aquesta estratègia, s'assegura que, encara que el procés es quedi sense condensat, les calderes operaran satisfactòriament amb aigua desmineralitzada. La pressió del tanc es controlada per un controlador *PIC* instal·lat en el cos del tanc que regula la pressió amb l'alimentació del vapor. Els controls de pressió actuen, si la pressió del tanc augmenta, tancant les vàlvules *PV8001* i *PV8002* de l'alimentació del vapor i obrint la vàlvula *PV8003*, en canvi si la pressió baixa, el sistema de control actua de forma contrària al augment de pressió.

El control del sistema de bombeig té com objectiu donar la pressió adient al cabal d'aigua d'alimentació a les calderes per tal d'obtenir un producte dintre de les especificacions, apartat 3.1.5. En aquest punt es troben dues bombes bessones que funcionen al 100% de la seva potència i que la seva posada en servei és automàtica des de sala de control. El fet que operin a la seva màxima potència pot derivar en problemes de cavitació quan el sistema opera en un règim inferior, per això, el sistema consta d'un controlador de pressió *PIC* en l'impulsió de les bombes que, mitjançant un punt de consigna, regula la vàlvula *PV8004* de la recirculació cap a l'aspiració. Amb aquest controlador es garanteix la pressió del producte i alhora la protecció de les bombes contra la cavitació.

Després del sistema de bombeig hi ha la bifurcació del cabal impulsat. Per tal de que el cabal sigui el mateix en cada divisió, el sistema consta de dos controladors *FIC* en cada bifurcació i un controlador de rati que regula les dues alimentacions de les calderes (*FV8002* i *FV8003*).

Finalment es troba l'estratègia de control de les calderes. En aquest equip es troba un control en cascada entre el *FIC* de la bifurcació i el *LIC* del calderí. Aquest control de nivell és un controlador important, ja que, regula el nivell de líquid en el calderí i evita que aquest es quedi buit. Paral·lelament, es controla la temperatura del vapor d'alta pressió amb l'alimentació del cabal de fuel. Aquesta operació, igual que el *LIC* del nivell del calderí, dóna lloc a un control en cascada entre el *TIC* i el *PIC* de l'alimentació del fuel. Aquest *PIC*, amb transmissors 2 de 3, està instal·lat per motius de seguretat, ja que l'alimentació del fuel no pot sobrepassar la pressió crítica (3.5 barg) per no apagar la flama pilot dels cremadors. Per últim, la vàlvula automàtica dels cremadors secundaris (*FV8011* i *FV8013* respectivament) s'actua des de sala de control.

#### **4.2.11.2. Instrumentació del sistema**

En qualsevol instal·lació és necessari conèixer els valors de determinats paràmetres de les diverses parts del procés. En aquest apartat, es detallen els indicadors que romanen instal·lats amb la finalitat d'obtenir aquesta informació del procés. A continuació, es detalla tota la instrumentació del sistema.

##### Vàlvules de control

Un dels elements més importants de la instrumentació d'una unitat o equip són les vàlvules de control. El sistema de generació de vapor consta de diverses d'aquestes que permeten realitzar les accions de control. La selecció d'aquestes depèn del cabal a controlar, el tipus de fluid i les condicions.

### Indicador de temperatura:

El primer indicador de temperatura es troba en el tanc *V-8001*, el qual indica la temperatura interna del mateix. Aquest està lligat a una alarma de temperatura mínima, ja que aquest paràmetre ha de tenir un valor determinat per obtenir una bona desgasificació.

En les calderes, es troben indicadors de temperatura en l'alimentació. Per la part freda de la caldera, es troben indicadors de temperatura a la sortida de l'economitzador, dins del calderí i en diversos punts del sobreescalfador. En referència al costat calent, hi ha indicadors en la línia de sortida de la caldera i en les entrades i sortides dels elements interns de la mateixa.

Per últim, es mesura la temperatura de la mescla entre l'*Off-Gas* i el Gas Natural a la sortida del *M-8001*. Aquest paràmetre, juntament amb el de la pressió indica de forma indirecta la viscositat del combustible.

### Indicador de pressió:

Primerament, s'indica la pressió en l'aspiració del sistema de bombeig i en la impulsió d'aquest. D'aquesta forma, s'obté l'augment de pressió que donen les bombes i es pot veure si la seva operació és correcta.

Igual que en el cas de l'indicador de temperatura, es mesura la pressió del combustible a la sortida del *M-8001*.

Els indicadors de pressió de les calderes es poden separar en dos tipus: els indicadors de pressió de gasos i els indicadors de pressió del vapor. El primer grup es mesuren amb manòmetres de rang petit, ja que mesuren les pèrdues de càrrega dels diferents elements que componen la caldera. Per altra banda, el segon grup s'empren manòmetres per majors pressions i es troben en: el calderí (entrada i sortida) i en la sortida de la caldera (sobreescalfador). L'indicador de pressió a la sortida de la caldera es troba lligat a una alarma que indica si el vapor es troba en especificació.

### Indicador de cabal:

En l'unitat desgasificadora es troben tres transmissors de cabal: en l'aigua de refrigeració del E-8001, en la línia del condensat i en la de l'aigua desmineralitzada.

Les línies d'entrada de l'*Off-Gas* i del Gas Natural tenen un *FI* que permeten veure quin consum de cada combustible té el sistema de generació de vapor.

Es mesura el caudal de vapor d'alta pressió generat en cada caldera i un tercer en el col·lector que uneix el vapor generat en la caldera A amb el generat en la caldera B, d'aquesta manera es pot comprovar que les calderes no tenen cap fuita. Per últim, s'instal·la un *FI* que mesura el caudal de fums que emeten les calderes.

### Analitzador:

El sistema consta també d'analitzadors que permeten garantir la qualitat i seguretat de l'operació. Primerament, es troba un analitzador de conductivitat [ $\mu\text{S}$ ] de l'alimentació del condensat, el qual detecta les sals que pot tenir el corrent.

En la sortida per fons del V-8001 i després dels elements de control es troben dos analitzadors de l'alimentació a les calderes. Un d'ells és un controlador del *pH* i el segon és un mesurador de oxigen [ $\text{mg/ml}$ ].

Es troba instal·lat un analitzador a la sortida del M-8001 que analitza, en continu, el poder calorífic del corrent. Tanmateix, s'instal·len tres transmissors *TDL* "Tuneable Diode Laser" en disposició 2 de 3 i dos analitzadors en la sortida de l'hogar de cada caldera. Aquests transmissors permet fer una lectura de la sortida dels gasos i mesurar la concentració de metà, oxigen i monòxid de carboni.

Per últim es troben els analitzadors d'oxigen [ $\text{mg/ml}$ ] a la sortida de cada caldera. Aquests permeten veure si la combustió que es genera en l'hogar de les calderes és completa i si, alhora, es troba dins del rang segur d'excés d'aire. En el mateix punt, es troben analitzadors de  $\text{NO}_x$  tal i com dicta la llei vigent (Real Decret 430/2004) per aquest tipus d'instal·lacions.

## **5. SEGURETAT EN EL DISSENY DE LES INSTAL·LACIONS**

En aquest apartat es determinen les situacions conflictives que pot sofrir la nova instal·lació i les accions que es prenen per tal d'evitar el risc associat. En equips com les calderes cal considerar els danys i les pèrdues de vides que podrien resultar en cas d'accident. El principal risc d'aquest tipus de instal·lacions és l'alliberació sobtada de pressió en forma d'explosió.

Les explosions es poden classificar en: explosions físiques o explosions químiques. Les primeres es produeixen per la vaporització instantània i l'expansió brusca de l'aigua continguda en l'evaporador donant lloc a la ruptura de l'element. Per altra banda, les explosions químiques són produïdes per la combustió instantània dels vapors del combustible acumulat en l'hogar. (Ref.2.3)

La nova unitat té realitzat el manteniment establert, apartat 7, per tal de garantir la seguretat i el bon funcionament. Llevat del manteniment cal tenir present un aspecte molt important: conèixer les limitacions de l'equip i evitar sobrepassar-les durant l'operativa.

### **5.1. Seguretat de la unitat per falta d'aigua**

Un dels possibles punts de risc en l'operativa de les calderes és la fallida en l'alimentació d'aigua. Aquest punt pot ocasionar el sobreescalfament del líquid intern i desencadenar en una pèrdua potencial de les propietats mecàniques dels tubs o, fins i tot, ocasionar una explosió física de l'equip. La fallida en l'alimentació d'aigua pot ser ocasionada per un error en la purificació d'aquesta (incrustacions) o per problemes en el funcionament del sistema de bombeig. (Ref.2.3)

L'equip ha de ser purgat i netejat en cada parada de planta, sobretot, els conductes per on circula l'aigua, ja que és on es pot formar incrustacions. Diàriament, s'ha de comprovar, apartat 7.9, el funcionament general de la unitat i observar l'absència de soroll o vibracions en el sistema de bombeig, així com inspeccionar les juntes i els nivells d'oli amb la freqüència establerta en el manual de manteniment de la plata o unitat.



---

Quan l'equip pateix la falta d'aigua es desconnecta automàticament la font de calor de l'equip (alimentació combustible). En aquest cas, s'ha de seguir el procediment d'aturada d'emergència, apartat 8.4.

### **5.2. Seguretat de la unitat per excés de pressió**

Històricament han hagut greus accidents deguts a l'explosió de les calderes de generació de vapor on, la principal causa de l'explosió, és la superació de la pressió de disseny de l'equip.

El sistema de generació de vapor es troba sotmès a una pressió interna elevada. En ocasions es pot incrementar aquesta pressió i causant greus conseqüències com la pèrdua de bens i personal. Amb la finalitat d'evitar les conseqüències, l'equip consta de dues vàlvules de seguretat, una ubicada en el calderí de l'evaporador i l'altra en el sobreescalfador, les quals es troben tarades a la pressió de disseny de l'equip, quan aquesta és sobrepassada, s'obren i alliben l'excés de pressió. A més del elements físic de seguretat quan el sistema detecten una sobrepressió en el sistema de generació salta una alarma de sobrepressió i, aquesta continua augmentant, el control talla el subministrament de combustible a la caldera. (Ref.2.3)

Per tal de garantir la seguretat a sobrepressió de l'equip, les vàlvules es revisaran segons el procediment de manteniment preventiu, apartat 7.9.

### **5.3. Seguretat de la unitat per falla en la flama**

Un dels riscos dels generadors de vapor és la combustió instantània en l'hogar. Aquesta combustió es dona quan la flama opera de forma irregular donant lloc a un excés de combustible en l'hogar el qual explota quan la flama torna a operar de forma normal. A més, aquesta operació dona lloc a un risc de sofrir afebliment mecànic dels components i a una generació major d'elements contaminants. Per tal de conèixer l'estat de la flama, les calderes

tenen instal·lats de detectors de flama que permeten tenir un control del comportament d'aquesta dins de l'hogar i detectors de baix nivell d' $O_2$  (<1%).

Per últim, cal conèixer l'estat de les línies d'alimentació del gas amb les inspeccions pertinents i la realització de les neteges de les línies. Diàriament i per part de l'operativa, s'ha de realitzar una inspecció periòdica del funcionament dels cremadors i de la forma de la flama. A més, s'han de realitzar les inspeccions establertes pel fabricant dels cremadors.

#### **5.4. Seguretat diversa de la unitat**

Periòdicament i com indica el manual de manteniment, apartat 7.9, s'ha de realitzar una inspecció total de l'equip de control, incloent la comprovació del sistema d'instrumentació i medicació amb la presa de dades a camp i amb la comprovació amb les dades de sala de control. Tanmateix, es verifica el bon estat de l'equip, comprovant les unions, les connexions del *tubbing* i l'estat del calorifugat.

#### **5.5. Seguretat diversa de sala de control**

Coneguts els problemes que poden ocasionar un risc potencial, es comprova que moltes accions de risc s'aturen amb el tall en el subministrament del combustible. Aquesta acció es genera per una anomalia la qual es cataloga com: anomalia amb risc potencial. Aquestes anomalies són detectades i emeses al sistema de control. El sistema respon amb diverses senyals a les vàlvules de control tallant de forma automàtica i immediata el subministrament de combustible. Les anomalies controlades es refereixen a la combustió i a les seves conseqüències, però també hi ha les anomalies que poden afectar a la unitat. Algunes d'aquestes anomalies només produeixen una alarma, sense tall, ja que la seva aparició pot ser no crítica. (Ref.1.1)

Tot seguit, es determinen situacions on poden sorgir anomalies juntament amb la senyal emesa en sala de control i l'acció prendre (per part d'operativa o per par del *software* del sistema de control).

**Taula 5.5.1** Sistema d'enclavament de control

| <b>Paràmetre</b>    | <b>Valor</b> | <b>Sistema</b>              | <b>Acció</b>    |
|---------------------|--------------|-----------------------------|-----------------|
| Temperatura V-8001  | Baix         | Alarma                      | Operativa       |
|                     | Alta         | Alarma                      | Operativa       |
|                     | Molt alta    | Tall vapor                  | Sistema control |
| Pressió alimentació | Baixa        | Alarma                      | Operativa       |
|                     | Alta         | Alarma                      | Operativa       |
|                     | Molt baix    | Parada combustió            | Sistema control |
| Nivell              | Baix         | Alarma                      | Operativa       |
|                     | Molt baix    | Parada sistema de combustió | Sistema control |
| Pressió vapor       | Alta         | Alarma                      | Operativa       |
|                     | Molt alta    | Parada sistema de combustió | Sistema control |
| Pressió combustible | Alta         | Alarma                      | Operativa       |
|                     | Baix         | Alarma                      | Operativa       |
| Flama pilot         | Error        | Alarma                      | Operativa       |
|                     | Error greu   | Parada combustió            | Sistema control |

## 5.6. Mesures de protecció individual

En aquest apartat es detallen les mesures de protecció individual que han de dur tot el personal autoritzat quan entri a planta per realitza quelcom. Primerament, cal tenir en compte que la protecció del personal és el darrer pas en la seguretat de la planta, ja que, en primera instància s'han de minimitzar els riscos i dissenyar i implementar les instal·lacions de la forma més segura possible.

El personal de planta ha de dur en tot moment els elements de protecció individual (*EPI*) corresponents quan s'entra a planta. Els elements de seguretat es poden classificar en dos, el primers són els *EPI's* mínims i són aquells elements que s'han de portar sempre, en canvi, els segons corresponen als *EPI's* especials i són aquells que s'han de dur quan s'entra a planta a realitzar treballs especials els quals requereixen elements de seguretat extra. Els elements de seguretat mínims són: pantalons i camisa antiestàtica, botes i ulleres de seguretat, protecció auditiva, guants i casc. En referència al segon grup, la planta consta d'informació disponible

sobre els diversos treballs que es realitzen i, en aquesta informació, s'adjunta la protecció individual extra a portar. Per la qual cosa, quan el personal autoritzat ha de realitzar un treball especial s'indicaran els *EPI's* a dur en el permís de treball necessari.

Tot el personal de planta gaudeix de la formació pertinent en l'àmbit de la seguretat al treball. A més, el personal responsable manté cursos de formació i xerrades informatives per tal que tot el personal de planta conegui els riscos i perills del procés, la protecció que ha de dur i els procediments d'actuació en diverses situacions de perill.

## 6. MEDIAMBIENT EN EL DISSENY DE LES INSTAL·LACIONS

El mediambient és un punt a tenir sempre present quan es realitza qualsevol disseny. Aquesta significació recau en el compliment de la legislació vigent perquè, encara que el disseny sigui molt eficient, aquest sempre ha de complir amb tots els marges legals.

Aquest projecte s'ha basat en Real Decret 430/2004, el Decret 319/1998 i la Llei 1/2005. El primer fa referència a la limitació de les emissions a l'atmosfera de determinats agents contaminants procedents de grans instal·lacions de combustió; el segon també fa referència a la limitació d'emissions però de instal·lacions inferiors a 50MWt de potència o de cogeneracions superior a 1MWe de producció i el tercer fa referència a la regulació del dret d'emissió de gasos d'efecte hivernacle.

Primer de tot cal definir que és una gran instal·lació de combustió. Segons el Reial Decret 430/2004 una instal·lació de combustió és: *“Qualsevol dispositiu tècnic en el que s'oxidin productes combustibles amb la finalitat d'emprar el seu calor produït.”*. Per tant, coneguda la definició de instal·lació de combustió, cal definir què és una gran instal·lació de combustió. Degut que hi ha una legislació que regula les emissions per a les instal·lacions de combustió amb potència tèrmica inferior a 50MWt i una altra legislació per aquelles que tinguin una potència tèrmica superior aquesta, es defineix com gran instal·lació de combustió, aquella unitat que tingui una potència tèrmica superior a 50MWt.

Tot seguit es determinen les potències tèrmiques del sistema de generació de vapor quan aquest opera amb les 4 configuracions establertes, apartat 4.2.2. Segons el Decret 319/1998 es defineix potència tèrmica com: *“Potència tèrmica nominal lliurada per la instal·lació en forma de calor utilitzable, en MW tèrmics [MWt].”*

**Taula 6.1** Potència tèrmica generada pel sistema de generació de vapor

| <b>Configuració</b> | <b>Potència tèrmica unitària [MWt]</b> | <b>Potència tèrmica sistema [MWt]</b> |
|---------------------|--|---------------------------------------|
| 1                   | 123                                    | 123                                   |
| 2                   | 82.3                                   | 82.3                                  |
| 3                   | 61.7                                   | 123.4                                 |
| 4                   | 41.1                                   | 82.2                                  |

Segons la taula anterior la nova instal·lació ha d'estar subjecta al Reial Decret 430/2004 que fa referència al límit d'emissions per a les grans instal·lacions de combustió perquè la suma de les potències tèrmiques destinades a la mateixa finalitat donen valors superiors a 50MWt. Amb el Reial Decret, és conclou que la nova unitat correspon al tipus de instal·lacions que es troben descrites en l'apartat 2 de l'article 5. Per tant s'empra l'annex V, VI i VII per obtenir els límits d'emissió de:  $SO_2$ ,  $NO_x$  i partícules. A continuació, es detallen els límits d'emissió dels tres contaminants citats, els quals estan establerts per un 3% d'oxigen. Això significa, que si el corrent no es troba en aquestes condicions de concentració d'oxigen la mesura s'ha de corregir.

**Taula 6.2** Límits segons Reial Decret 430/2004

| <b>Contaminant</b> | <b>Límit [mg/Nm<sup>3</sup>]</b> |
|--------------------|----------------------------------|
| $SO_2$             | 35                               |
| $NO_x$             | 150                              |
| Partícules         | 5                                |

El Reial Decret 430/2004 descriu, també, quins contaminants han de tenir instal·lats analitzadors en continu. Segons el tipus de instal·lació, aquesta ha de tenir instal·lat un analitzador en continu pel  $NO_x$ .

Tal i com s'ha citat anteriorment en aquest projecte, apartat 3.1.3.2, és importantíssim que una combustió no generi monòxid de carboni perquè, llevat de la pèrdua d'eficiència tèrmica, és un dels contaminants atmosfèrics per excel·lència. Malgrat això, el Reial Decret 430/2004 no esmenta ni limita res sobre aquest compost. Per aquest motiu, s'ha emprat el Decret 319/1998 que, encara que sigui per instal·lacions de combustió amb potència tèrmica inferior a 50MWt, sí que limita les emissions del monòxid de carboni i dels compostos orgànics volàtils, els quals es troben absents en el Reial Decret 430/2004. El Decret 319/1998 en l'annex 1 apartat 3 "*Instal·lacions que funcionen amb combustible gasós*" descriu els límits pel monòxid de carboni i pels compostos orgànics volàtils referits a un contingut d'oxigen del 3%.

**Taula 6.3** Límits segons Decret 319/1998

| <b>Contaminant</b> | <b>Límit [mg/Nm<sup>3</sup>]</b> |
|--------------------|----------------------------------|
| $CO$               | 100                              |
| Compostos orgànics | 20                               |

En definitiva, la nova instal·lació de generació de vapor es troba sota el Reial Decret 430/2004 i el Decret 319/1998 ja que juntament limiten les emissions a l'atmosfera dels contaminants més significatius.

No obstant, les dues legislacions no estableixen límits legals d'emissió de gasos contaminants en la posada o fora servei de l'equip (en la posada en servei es genera més monòxid de carboni degut a les baixes temperatures de l'hogar). Malgrat això, el personal de la planta està conscienciat i estableix la unitat en règim estacionari en el menor temps possible i, així, s'evita una emissió de llarga durada del contaminant.

Segons les millors tècniques disponibles aplicables a les calderes de generació de vapor, les tècniques a emprar per la reducció de les emissions de  $NO_x$  és la instal·lació de cremadors de baixa generació de  $NO_x$  (*Low  $NO_x$  burners*), ja que aquest tipus de cremadors introdueixen l'aire i el fuel de forma diferent a la clàssica i, aquesta modificació, dóna lloc a la reducció de la generació de  $NO_x$  mantenint la mateixa eficiència de flama; per altra banda, les millors tècniques disponibles esmenten que no s'ha d'emprar un excés d'aire molt elevat perquè aquest excés pot generar, a altes temperatures, l'oxidació del nitrogen i resultar  $NO_x$ . Les millors tècniques disponibles detallen que cal arribar a un compromís amb l'excés per tal de no produir monòxid de carboni ni  $NO_x$ . Per tal d'obtenir un excés acurat, la unitat opta de dos analitzadors i tres *TDL "Tuneable Diode Laser"* disposats en 2 de tres en la sortida de l'hogar. D'aquesta forma, es tenen lectures en continu del monòxid de carboni generat i del metà i l'oxigen no reaccionat i es pot controlar l'excés d'aire d'una forma més eficaç i arribar al millor compromís possible d'excés d'aire per tal d'evitar l'emissió d'aquests contaminants.

Per altra banda, s'han d'avaluar les emissions de diòxid de carboni generades i es busca quina és la legislació que regula aquest compost. Tal i com s'ha esmentat anteriorment la legislació reguladora del diòxid de carboni és la llei 1/2005.

**Taula 6.4** Emissió de  $CO_2$  del sistema de generació de vapor

| Configuració | Emissió unitària $CO_2$ [t/h] | Emissió real $CO_2$ [t/h] |
|--------------|-------------------------------|---------------------------|
| 1            | 31.1                          | 31.1                      |
| 2            | 19.5                          | 19.5                      |
| 3            | 17.8                          | 35.6                      |
| 4            | 11.4                          | 22.8                      |

En aquesta llei es troben els requisits legals que ha de complir una instal·lació en termes d'emissió de  $CO_2$ . L'annex 1 de la llei 1/2005 estableix que totes instal·lacions de combustió que tinguin una potència tèrmica nominal superior a 20MWt han de regular la seva emissió. La regulació es realitza mitjançant l'entrega d'un informe anual d'emissions per tal que, en el cas de ser verificat en el Registre Nacional, obtenir l'autorització d'emissió de gasos d'efecte hivernacle i poder operar dintre de la legalitat. En el moment que l'empresa consta d'aquesta autorització, aquesta ha de pagar un impost sobre la tona de diòxid de carboni emesa equivalent a 6 € En el cas de no trobar-se registrada les sancions oscil·len entre les accions econòmiques i les de clausura.



## **7. MANTENIMENT DE LES INSTAL·LACIONS**

En aquest apartat es descriuen i es detallen els procediments de manteniment a realitzar per garantir una bona operativa de la nova instal·lació. Tipus de manteniment hi ha dos: el manteniment correctiu i preventiu. El primer dels dos es produeix quan ha hagut una averia en la instal·lació. Usualment s'efectua sota emergència per tal de procurar evitar caigudes de la producció. Per altra banda, el manteniment preventiu sorgeix com la necessitat de minimitzar els defectes del manteniment correctiu. Aquest estil de manteniment consisteix en la programació de les intervencions o canvis d'alguns components o peces segons el temps d'operació o el nombre d'esdeveniments. Generalment, els intervals de revisions estan establerts pels fabricants. El manteniment preventiu té un rang de diverses activitats a realitzar: revisions, neteges i protecció anticorrosiva, lubricacions, inspeccions i reparacions. Aquest manteniment es troba documentat, planificat i actualitzat per tal d'evitar un sobremanteniment (estricta) o per un submanteniment (poca planificació), ja que, ambdós errors es troben lligats al desconeixement de la unitat i de la planta. Tot seguit, es detallen les tasques i freqüències d'aquestes en referència al manteniment preventiu i correctiu del sistema de generació de vapor.

### **7.1. Neteges**

Netejar els tubs i les superfícies calentes del sistema de generació de vapor sempre que aquest ho necessiti i si el procés ho permet. La freqüència o periodicitat es troba lligada a la realització de proves i inspeccions i al seguiment de l'equip, ja que no tots els generadors de vapor tenen les mateixes prediccions.

La brutícia o *fouling* existent en els tubs es coneix per l'augment de pressió en la unitat o per la reducció de la transferència de calor. Si aquest paràmetre és rellevant, es realitza l'inspecció de l'equip quan la planta es trobi en parada i es neteja.

---

## **7.2. Drenat**

El sistema de vapor no ha de ser drenat excepte si aquest ha acumulat una quantitat considerable de brutícia, l'aigua es troba molt bruta o l'equip necessita una reparació. Quan l'equip s'hagi de buidar, el procediment es realitza mitjançant les diverses purgues existents que han d'estar connectades a una xarxa de mànegues instal·lades prèviament per part de l'operativa de la planta.

## **7.3. Vàlvules de seguretat**

Les vàlvules de seguretat del conjunt han de ser provades, com a mínim, en cada parada de planta per garantir la seguretat del sistema. Si una vàlvula no opera de forma satisfactòria, aquesta ha de ser reemplaçada automàticament per una altra igual a l'anterior.

## **7.4. Cremadors**

Els cremadors, igual que altres parts del sistema de generació de vapor, es revisen durant la parada de planta. Degut a que aquests tenen un manteniment molt acurat i disposen d'un sistema de funcionament especialitzat, el manteniment i revisió es realitza per part dels especialistes de la companyia dels cremadors juntament amb un operari de planta que supervisa les tasques a realitzar.

## **7.5. Circuit aigua**

El sistema d'alimentació a les calderes ha de ser desmuntat en cada parada de planta per personal qualificat per tal de verificar el bon funcionament del sistema i assegurant-se que no existeixen obstruccions en les línies d'entrada. Tanmateix un cop desmuntat, s'inspeccionen i

es comprova si hi ha acumulació de brutícia i, si s'escau, es realitza una neteja. Alhora, s'inspeccionen els cordons de soldadura de les tapes del generador.

#### **7.6. Generador de vapor**

Respecte a les superfícies calentes cal netejar-les del carbó o fums que poden acumular i generar una reducció en l'eficiència de l'intercanvi de calor. Aquestes superfícies són bufades per remoure els possibles sediments. Aquestes accions es realitzen quan la planta i l'equip es troben aturats.

En el cas que l'aigua no circuli adequadament, s'atura l'equip i es posa en càrrega l'altra caldera. Es deixa refredar l'equip i es drena per després ser netejat pel costat fred amb aigua a alta pressió. Si els sediments són excessius per la neteja amb aigua d'alta pressió s'empren productes químics els quals han de ser manipulats per personal qualificat.

#### **7.7. Tubs amb fissures**

Si durant l'operativa de l'equip es detecta que un tubs del generador de vapor tenen una fissura d'escapament d'aigua o vapor significa que el tub ha sofert corrosió i s'ha trencat. En aquest cas, pot ser que la resta de tubs restin oxidats o danyats pel mateix efecte. En aquest cas, s'atura l'equip i, un cop refredat i drenat, és examinat per un expert abans de realitzar cap acció de manteniment. En el cas de que els tubs es trobin en un estat precari o lamentable és preferible i menys costós canviar tots el tubs danyats de cop.

#### **7.8. Sistema de bombeig**

S'han d'inspeccionar i netejar les brides de la bomba i drenar el tanc del condensat, així com, lubricar les parts mòbils. S'han de revisar totes les tanques de la bomba i els

interruptors. En el cas de l'existència d'una fuga es posa en marxa la bomba secundària i es repara la primera.

### **7.9. Freqüència de les accions de manteniment**

Les accions de manteniment estan orientades al allargament de la vida útil de l'equip i a la garantia del seu funcionament adequadament i segur. A continuació, es detallen les accions temporals de manteniment que es realitza pel tot el personal de *PDH*.

#### Diari:

Controlar des de sala de control el comportament de la pressió i la temperatura d'operació, així com el nivell d'aigua i les condicions generals (*pH* de l'aigua, cabals...etc). Observar i detectar en camp si cap equip causa algun soroll estrany, realitzar una comprovació general dels cremadors, conductes de gas i sistema elèctric i verificar que la unitat es troba en bon estat.

#### Setmanal:

Provar el funcionament des de sala de control de l'alimentació d'aigua. Els mecànics de planta verificaran els nivell d'oli del sistema de bombeig i els analistes del laboratori prenen mostres del condensat per comprovar la qualitat de l'aigua. Es realitzen inspeccions sobre la flama, la línia de gas i l'entrada d'aire.

#### Mensual:

Inspeccionar les vàlvules de seguretat. Els instrumentistes de planta proven els dispositius de detecció de la flama, els controls límits, els controls d'operació i els indicadors de pressió. Per part de mecànica, es comprova el funcionament de les bombes (posada en marxa i parada). S'examinen les línies dels combustibles, les condicions de les superfícies i l'estat del material refractari.

---

Trimestral/semestral:

Comprovació de les alarmes contra falla de flama. Revisar les vàlvules de control de flux i la instrumentació de medició. Realitzar la prova del  $CO_2$ . També es revisen els analitzadors.

En parada:

Quan la planta es troba en parada, les tasques de manteniment a realitzar sobre la instal·lació són: la inspecció interna i externa i la neteja; la revisió del refractari dels tubs (realitzar neteja química si s'escau); la revisió acurada dels cremadors i del sistema de control de combustió; la realització de proves en la combustió i sobre les vàlvules de seguretat; l'examinació de les línies d'alimentació del combustible i la inspecció de la ventilació; es realitza la prova hidrostàtica de l'equip a la pressió d'operació (cada 10 anys) i el test de fuites; es canvia l'oli de les bombes i comprova l'estat d'aquestes i, per últim, es revisa de forma general totes les vàlvules i accessoris.

## **8. MANUAL D'OPERACIÓ**

L'operació de l'equip ha de seguir el següent concepte: l'equip ha estat dissenyat per operar sota unes certes condicions i aquestes no ha de ser sobrepassades.

Tot seguit, es detallen diverses accions d'operació realitzades sobre el sistema de generació que permeten poder posar en servei la instal·lació, operar-la i posar-la fora de servei. A més, es detalla com realitzar una aturada d'emergència quan el procés ho necessita.

### **8.1. Posada en servei**

La posada en servei del sistema és un procediment operacional que es realitza en totes les posades en marxa de la planta o quan una de les dues calderes es troba fora de servei i es torna arrancar. Prèviament a la posada en servei, es comprova per part d'operativa que s'han finalitzat totes les tasques ha realitzar sobre la unitat. A partir d'aquí, el mecànics i personal autoritzat giren tots els discs cecs de la unitat a la posició inicial i es comprova que la sortida del vapor es troba cap a torxa.

S'encén el sistema de bombeig, s'omple la caldera d'aigua fins que el nivell del calderí es trobi al 50% i es posa el sistema de bombeig en recirculació total (poca alimentació d'aigua). En aquest punt i quan aquesta es troba en posició *ready*, s'engega la flama pilot de dos dels quatre cremadors principals.

Mentre la temperatura interna de l'hogar augmenta progressivament, es regula el nivell del calderí tancant el recicle de les bombes. Quan la temperatura de l'hogar no augmenta més s'encén els dos cremadors restants. Es continua regulant el nivell del calderí i es comprova la temperatura del vapor generat.

Poc a poc i observant el desenvolupament de la pressió i la temperatura de cada tram de la caldera s'augmenta l'alimentació a les calderes. Quan la temperatura i pressió de la sortida del vapor es troba dins de l'especificació, apartat 3.1.5, es posa el vapor en servei al procés.

---

Si la planta es troba aturada i es necessiten 150 t/h de vapor per encendre els compressors. En aquest cas, abans de donar el pas del vapor al procés s'encenen els cremadors secundaris, l'hogar pren més temperatura i quan la sortida del vapor es troba en especificació i en estat estacionari es dona pas al procés.

## **8.2. Funcionament en estat estacionari**

El funcionament en estat estacionari del sistema de generació de vapor és part de la feina habitual que han de realitzar els operadors de la planta destinats a sala de control i a càrrec de la generació de vapor. Aquesta part de l'operativa de les calderes és la més rutinària, però amb rellevància molt important, ja que si el sistema de generació funciona correctament els equips requeridors de vapor operen satisfactòriament i el procés transcorre sense alteracions. En canvi, si aquest no funciona correctament la producció es veu afectada.

Igual que pels altres equips que formen la planta, els operadors han de comprovar freqüentment el funcionament de la unitat, verificar els paràmetres establerts (temperatura, pressió, cabals...etc) segons les necessitats de la planta i alhora avaluar que ambdues calderes operen dins dels intervals de disseny. Per tal que els paràmetres establerts es compleixin, els operadors encarregats han de vigilar les alarmes i prendre les decisions de correcció adequades.

Quan la instal·lació opera en règim estacionari la funció dels operadors de planta és mantenir aquest règim. Per tal de mantenir-lo cal tenir en compte totes les possibles fallides de la unitat, apartat 5; conèixer el funcionament de l'enclavament del sistema de control, apartat 5.5; i complir amb les mesures i procediments establerts del manteniment preventiu, apartat 7 i més detalladament l'apartat 7.9.

### **8.3. Posada en fora de servei**

L'aturada normal del sistema és un procediment operacional que es realitza quan el sistema es troba en condicions d'operació normals. Generalment, aquest tipus d'acció es dona quan s'han de realitzar reparacions o perquè el procés ho necessita. (Ref.5.7)

El procediment de fora de servei de les calderes es realitza entre la coordinació dels operaris en planta i els de sala de control. Prèviament a la parada controlada de l'equip, es col·loquen mànegues auxiliars sobre la instal·lació per a poder posar-lo en fora de servei de forma segura. Aquestes mànegues es connecten de: la purga del V-8001 i la purga del calderí al tanc auxiliar i la purga del col·lector amb el V-8001.

Primerament, es baixa gradualment la càrrega tèrmica de les calderes fins al 50% de la seva operativa normal (configuració 4) i es passa a operativa manual de l'equip. S'obre totalment el *vent rate* del sobreescalfador i es continua baixant càrrega. Quan el nivell del calderí supera el 70% del nivell, s'obre progressivament la sortida auxiliar del col·lector per mantenir el nivell de líquid dins del calderí constant. S'apaguen els cremadors dels superiors als inferiors, d'esquerra a dreta i dels secundaris al principals. Es comprova el tall de pressió baixa en el combustible amb el darrer cremador encès. En el moment que els cremadors es troben fora de servei, es tanquen les vàlvules de bloqueig de les línies dels cremadors i es giren els discs cecs. Quan el sistema deixa de generar vapor, s'aturar l'alimentació principal del V-8001 i s'obre totalment la sortida auxiliar del col·lector. Es deixa recircular l'aigua amb el sistema de bombeig fins que la temperatura de la caldera es troba per sota dels 60°C. En el moment que la temperatura interna és inferior a 60°C, s'atura el sistema de bombeig i s'obren les purgues del calderí i del V-8001 amb la finalitat de buidar la instal·lació. Quan la instal·lació es troba buida del tot es considera que la unitat es troba en fora de servei.

### **8.4. Aturada d'emergència**

L'aturada d'emergència del sistema de generació de vapor és un procediment operatiu que posa fora de servei un equip quan aquest presenta un problema operacional o quan presenta una falla en el mateix. L'aturada pot ser manual o automàtica segons si el problema



---

és detectat per l'enclavament del sistema o per l'operador encarregat. Les aturades d'emergència es realitzen amb la finalitat d'evitar accidents en persones y equips, ja que es coneix l'existència d'un risc potencial degut a una anomalia o perill. Generalment, aquestes aturades es generen amb el tall sobtat del combustible o perquè el compressor de la planta s'ha aturat (C-3001). (Ref.5.7)

El procediment en una parada d'emergència d'una instal·lació s'inicia amb l'observació de les alarmes en el quadre de control o per la notificació de talls en l'alimentació del combustible. La diferència entre la parada controlada o el fora de servei amb la parada d'emergència és que aquesta darrera no consta de procediments operatius previs i tot el procediment es realitza sense una preparació o planificació prèvia.

Es posa en càrrega total l'altra caldera i, en la caldera amb fallida, es tanquen des de sala de control les vàlvules de l'alimentació del combustible (si no es troben tancades), es tanquen les vàlvules de bloqueig situades en planta. S'obre el *vent rate* del sobreescalfador i es controla el nivell del calderí mantenint per tal de refrigerar les canonades. Es controla la producció de vapor mitjançant l'ajust de la producció de l'altra caldera. Controlada la producció de vapor, s'investiguen les causes de l'aturada i es prenen accions. Alhora, si la caldera no a sofert cap dany s'inicia el procés de posada en marxa, en cas contrari, s'informa a manteniment i es prenen les accions correctores pertienents.

## **9. ESTUDI ECONÒMIC**

Un cop realitzat el disseny del sistema de generació de vapor cal comprovar si l'opció autoproducció és econòmicament viable en comparació a la situació actual de la planta. Per tal d'avaluar la viabilitat d'aquesta opció, cal determinar la situació econòmica actual de la planta en referència als elements que intervenen. Per tant cal identificar aquests elements i realitzar el balanç econòmic per tal de comprovar quin benefici té la situació actual. Coneguda la situació actual de la planta, es realitza el pressupost de la nova instal·lació, seguint els criteris econòmics de *BASF Española S.L.*, i s'estableixen els paràmetres econòmics per poder realitzar el balanç econòmic de la nova instal·lació. Finalment, es realitza el compte de resultats per tal de comprovar la viabilitat econòmica entre la situació actual i amb l'opció d'autoproducció.

Les hipòtesis establertes en aquest estudi són: el consum de vapor d'alta pressió és de 100 t/h tenint en compte que aquesta funciona en estat estacionari i sense modificacions de càrrega; que, aproximadament, la planta genera i ven 10000 Nm<sup>3</sup>/h d'*Off-Gas* els quals corresponen a 3.51 t/h; que la configuració de l'operativa de les calderes correspon al 20% amb una sola caldera (configuració 2) i al 80% restant a les dues calderes (configuració 4); s'estableix que la planta opera 8000 hores; segons la política d'empresa la recuperació de l'amortització és de màxim 10 anys; els impostos establerts són del 35% i la taxa d'interès del 5%.

### **9.1. Balanç econòmic actual**

La planta obté el vapor d'una planta tercera per tant existeix un cost variable associat al consum de vapor d'alta pressió. Per altra banda, el corrent residual ric en hidrocarburs anomenat *Off-Gas*, veure apartat 3.1.2, és venut a la mateixa planta que subministra el vapor i s'obté un guany d'aquesta venda.

Llevat de la compra i venda, cal indicar que amb l'actual situació es genera a un cost associat a les parades de planta derivades de la falta de vapor.

**Taula 9.1.1** Costos parada puntual (Ref. 3.1)

| <i>Utilities</i> [€/dia] | <b>Dies parada</b> | <b>Producció diària [t/dia]</b> | <b>Cost product [€/t]</b> |
|--------------------------|--------------------|---------------------------------|---------------------------|
| 83300                    | 3                  | 1040                            | 350                       |

Amb les dades actuals es realitza el balanç econòmic i s'extrau que aquest exercici té unes pèrdues de 9.06 M€ En la taula 9.1.2 es pot observar els paràmetres que intervenen en l'exercici econòmic.

**Taula 9.1.2** Exercici econòmic anual actual

| <b>Cost Vapor [M€]</b> | <b>Cost Parada [M€]</b> | <b>Guany <i>Off-Gas</i> [M€]</b> | <b>Benefici exercici [M€]</b> |
|------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 16.4                   | 1.34                    | 8.68                             | -9.06                         |

## 9.2. Pressupost i balanç econòmic amb calderes

El primer pas en un estudi econòmic d'una nova unitat a instal·lar és l'estimació de la inversió inicial. Aquesta inversió s'ha calculat mitjançant la recollida de tots els costos associats des de que s'inicia la idea de realitzar el projecte fins que la unitat es troba llesta per ser posada en marxa. El recull de tots els costos s'anomena pressupost de la unitat. El pressupost del sistema de generació de vapor es troba detallat en l'apartat A.2.11 de l'annex 2.

El pressupost s'ha realitzat seguint els criteris que *BASF Española SL* empra quan ha de realitzar estimacions econòmiques o pressupostos rigorosos. Els criteris establerts es basen en la divisió del projecte en vuit àrees d'interès o de treball les quals corresponen a: obra civil, equips mecànics, canonades i accessoris, instrumentació, electricitat, muntatge, enginyeria i imprevistos.

En l'apartat d'obra civil s'estableixen els costos que comporta la ubicació de la nova unitat en la planta, és a dir, s'identifiquen quins són els costos dels moviments de terres, fonaments, cimentació i estructura mecànica. L'àrea dels equips mecànics és la divisió on es quantifica, segons l'especificació de l'equip, el cost que té cadascun dels equips mecànics necessaris. En la part de canonades i accessoris s'estableix el cost de totes les línies, així com les vàlvules de bloqueig, manuals i discs cecs. En l'apartat d'instrumentació es detalla tot el cost associat als transmissors, sistemes de control, enclavament de control, analitzadors i vàlvules de control.

En associació directa amb els equips centrífugs instal·lats i al enclavament elèctric, s'estableixen en l'apartat d'electricitat el cost dels motors elèctrics i de les noves cel·les i cablejat a instal·lar. El cost del muntatge de tota la instal·lació es troba en l'apartat del muntatge mecànic. Per últim es troba el cost d'enginyeria i d'imprevistos que cadascun correspon al 10% del cost total del projecte.

En l'annex 2 apartat A.2.11 es troba el pressupost del sistema de generació de vapor on no hi ha l'apartat del muntatge. Aquest fet es degut a, quan l'equip a instal·lar és un equip complex, el muntatge ja es troba com un cost en l'apartat d'equips mecànics perquè la mateixa empresa venedora és l'encarregada de muntar la instal·lació.

Coneguts els criteris i realitzat el pressupost es conclou que el cost de la inversió del sistema de generació de vapor és de 13.2 M€

A partir d'aquí es realitza l'estudi dels paràmetres econòmics a tenir en compte quan les calderes es troben operatives per realitzar el balanç econòmic pertinent i observar quin és el benefici associat a l'autoproducció de vapor. Els paràmetres a tenir en compte són el cost del gas natural i el cost d'emissió del diòxid de carboni.

**Taula 9.2.1** Exercici econòmic anual amb el sistema de generació de vapor

| <b>Cost Gas Natural [M€]</b> | <b>Cost CO<sub>2</sub> [M€]</b> | <b>Benefici exercici [M€]</b> |
|------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 17.8                         | 1.06                            | -18.9                         |

Comprovat el balanç econòmic anual, sense tenir en compte la inversió inicial, es comprova que l'exercici té unes pèrdues de 18.9M€

### **9.3. Comparativa de les dues opcions**

Un cop s'ha realitzat el balanç econòmic per a cadascuna de les situacions es realitza el compte de resultats de les dues situacions de forma conjunta. En aquest exercici econòmic, s'estableix com a guanys l'estalvi de la compra del vapor i s'introdueix com a costos el cost d'operativa (cost del gas natural més import per emissió de gasos d'efecte hivernacle).

D'aquesta manera s'obté com a benefici l'estalvi que comporta la instal·lació del sistema de generació de vapor.

En referència a la inversió inicial, s'estableix un amortització seguint el sistema francès d'amortització que consisteix en pagar, en les primeres quotes, quasi tota la part corresponent als interessos, mentre que en les darreres tota la quota correspon a l'amortització.

**Taula 9.3.1** Quotes d'amortització de la inversió segons el model francès

| Període [any] | Interessos [€] | Capital amortitzat [€] | Capital pendent [€] |
|---------------|----------------|------------------------|---------------------|
| 1             | 655000         | 1040000                | 12100000            |
| 2             | 603000         | 1090000                | 11000000            |
| 3             | 548000         | 1150000                | 9820000             |
| 4             | 491000         | 1210000                | 8610000             |
| 5             | 431000         | 1270000                | 7350000             |
| 6             | 367000         | 1330000                | 6020000             |
| 7             | 301000         | 1390000                | 4620000             |
| 8             | 231000         | 1470000                | 3150000             |
| 9             | 158000         | 1540000                | 1620000             |
| 10            | 80800          | 1620000                | 0                   |

Per últim, s'ha establert que cada 10 anys es sofreix una gran parada de planta deguda a la parada de planta dels generadors de vapor. Per tal d'avaluar aquest cost, s'ha identificat quin és el cost total d'aquesta parada i, a partir del resultat obtingut, s'ha dividit aquest cost total en els deu anys que hi ha el risc de parada.

**Taula 9.3.2** Costos relacionats amb la parada de planta (10 anys)

| Utilities [€/dia] | Dies parada | Producció [t/dia] | Cost producte [€/t] | Cost associat [M€] | Cost total [M€] | Cost prorrogat [M€/any] |
|-------------------|-------------|-------------------|---------------------|--------------------|-----------------|-------------------------|
| 83300             | 30          | 1040              | 400                 | 5                  | 18.4            | 1.84                    |

Establerts els guanys i els costos (apartats 9.1 i 9.2 respectivament), el tipus d'amortització i el cost relacionat amb la parada de la planta, s'estableix el compte de resultats a 10 anys, taula A.2.12.1 de l'apartat A.2.12 de l'annex 2. Analitzant el compte de resultats s'observa com l'exercici econòmic és deficitari. Degut això s'ha realitzat un estudi de com afectaria al compte de resultats i la viabilitat econòmica del projecte si el cost del vapor augmentés fins al cost actual (30-31€).

**Taula 9.3.3** Evolució de la viabilitat econòmica segons el encariment del producte

| <b>Encariment</b><br>[%] | <b>Benefici net (&lt;10 anys)</b><br>[M€] | <b>VAN</b><br>[M€] | <b>TIR</b><br>[%] | <b>Payback</b><br>[any] |
|--------------------------|---|--------------------|-------------------|-------------------------|
| 0                        | -10.8                                     | -86.5              | ---               | ---                     |
| 10                       | -8.58                                     | -69.4              | ---               | ---                     |
| 20                       | -6.36                                     | -52.3              | ---               | ---                     |
| 30                       | -4.15                                     | -35.2              | ---               | ---                     |
| 40                       | -1.93                                     | -18.1              | ---               | ---                     |
| 50                       | 0.280                                     | -1.01              | 3.47              | 8                       |
| 60                       | 2.49                                      | 16.1               | 25.3              | 3                       |

El preu mínim del vapor perquè l'autoproducció fos rentable és de 30.5 €/t. Paral·lelament, s'ha realitzat un estudi econòmic sobre quina viabilitat té el projecte si el sistema només operés amb una de les dues calderes, amb una carga de 100t/h i amb el mateix preu pel vapor que en 2009/2010. El compte de resultats es troba en la taula A.2.12.4 de l'apartat A.2.12 de l'annex 2.

**Taula 9.3.4** Viabilitat econòmica en configuració 2 (100 t/h)

| <b>Benefici net (&lt;10 anys) [M€]</b> | <b>VAN [M€]</b> | <b>TIR [%]</b> | <b>Payback [any]</b> |
|--|-----------------|----------------|----------------------|
| 2.92                                   | 19.4            | 29.0           | 3                    |

El preu mínim del vapor perquè la configuració 2 sigui rentable és de 26.3 €/t.

## 10. CONCLUSIONS

Finalitzat el projecte de disseny del sistema de generació de vapor es poden extreure diverses conclusions que engloben tot l'abast del projecte.

Realitzat l'estudi sobre el combustible disponible en la planta, annex 3, es pot concloure que és un corrent molt variable dependent del procés i útil per ser emprat com a fuel en les calderes, ja que es un corrent molt ric en hidrocarburs, veure apartat A.3.8 de l'annex 3. Tanmateix, és un corrent amb una concentració molt elevada d'hidrogen, fet que fa que la generació de diòxid de carboni sigui reduïda. Avaluades les necessitats d'energia del procés i el poder calorífic de l'*Off-Gas* s'ha comprovat que el sistema necessita d'un segon combustible, el Gas Natural.

Legalment, la instal·lació dissenyada en aquest projecte es troba sota el compliment del Real Decret 430/2004, el Decret 319/1998 i la llei 1/2005, els quals estableixen els límits d'emissió de contaminants i regulen la producció de gasos d'efecte hivernacle. A més, s'han introduït algunes de les millors tècniques disponibles aplicables a la reducció de la producció i emissió de gasos contaminants. En termes humans, tot el personal de *BASF Espanyola SL* es troba conscienciat amb la protecció i prevenció del mediambient tal i com s'expressa en la política d'empresa.

El model seleccionat per les calderes i el sobredimensionament de les calderes donen lloc a unes eficiències tèrmiques baixes que resulten en un consum elevat de combustible. Cal revisar les hipòtesis de disseny tèrmic, apartat 3.1.8, i optimitzar el disseny presentat estudiant la possibilitat d'aprofitar l'energia radiada. A més, cal revisar les bases de disseny, apartat 3.1, per tal d'estudiar l'opció de generar el vapor amb una sola caldera.

Econòmicament es conclou que el projecte presentat amb les bases de disseny establertes no és rentable en comparació amb la situació econòmica actual. Si el preu del vapor és superior a 30.5 €/t, el projecte de les calderes és econòmicament viable.

## 11. **BIBLIOGRAFIA**

### Llibres:

(Ref.1.1) - Luis A. Molina Igartua & Jesús M<sup>a</sup>. Alonso Girón, *Calderas de vapor en la industria*. Candem Grupo EVE (1996).

### Articles i apunts:

(Ref.2.1) - Dieter Boer. *Apunts de Producció i Gestió de l'Energia* (2011).

(Ref.2.2) - Compañía Suramericana de Seguros S.A. Curso de calderas.

(Ref.2.3) - Guberna Alpunte, Sigale Puello, *Dimensionamiento de Caldera de Recuperaicón de tubos de Agua*, Ing. Química, Agost 1992.

(Ref.2.3) - Capítulo 9. *Manual de reglas de seguridad*.

(Ref.2.4) - Coordinadors del PFC, *dades disponibles pel PFC*.

### Informació industrial i oficial:

(Ref.3.1) - Basf Sonatrach PropanChem. *Dades i informació general de la planta de PDH* (2011).

(Ref.3.2) - TESTO. *Manual práctico Tecnología de medición en calderas*, 3a Edición

(Ref.3.3) - Generalitat de Catalunya Departament de Medi Ambient i Habitatge. *Climatologia del Tarragonès* (1961-1990)

(Ref.3.4) - Codi ASME Secció I i Secció VII Divisió 1. *Calderes i Equips a pressió*.

(Ref.3.5) - Ingenieros Consultores S.L. *Características de Tuberias*.

(Ref.3.6) - ThyssenKrupp Aceros y Servicios S.A. *Catalogo comercial del acero AISI 316 i 316L*.

(Ref.3.7) - RA Rolled Alloys. *Alloy Performance Guide*

(Ref.3.8) - BABCOCK WANSON burners. Industrial burners TA-LNTA. *The boiler house solution equipment*.

(Ref.3.9) European Commission. Integrated Pollution Prevention and Control, *Best Available Techniques for Large Combustion Plants*. Juny 2006

(Ref.3.10) - Catàleg de canonades, *Tubería i características del acero inoxidable*, Tubinox.

(Ref.3.11) - SIHI multi, *STERLING SIHI*



---

(Ref.3.12) - Modular multistage pumps - SIHI multi Type MSL & MSM -, *STERLING SIHI*

(Ref.3.13) - FIBER GLASS Colombia S.A. *Aislamiento industrial*

*Especificacions tècniques dels compostos:*

(Ref.4.1) - PEMEX. Hoja de datos de seguridad para sustancias químicas GAS NATURAL.

*Internet:*

(Ref.5.1) - Ajuntament de La Canonja, <http://www.lacanonja.cat/> (2011)

(Ref.5.2) - Pla director urbanístic de les AREs del Camp de Tarragona. <http://www.gencat.cat>

(Ref.5.3) - Red de Vigilancia Sísmica. Geográfico Nacional (IGN). <http://www.geo.ign.es>

(Ref.5.4) - RA Rolled Alloys. <http://www.rolledalloys.com>

(Ref.5.5) - CERNEY S.A Calderas de vapor. <http://www.cerney.es>

(Ref.5.6) - SIHI Group – Serie SHImulti. <http://www.sterlingsihi.com>

(Ref.5.7) - *Scribd*, Calderas. <http://es.scribd.com/doc/17302206/Calderas>



# **PROJECTE FINAL DE CARRERA**

*“Disseny d’un sistema de generació de vapor”*

- 112071 -

## **ANNEX**

|                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| <u>Ensenyament:</u>    | Enginyeria Química |
| <u>Tutor ETSEQ:</u>    | Josep M. Chillida  |
| <u>Tutor extern:</u>   | José A. Díaz       |
| <u>Alumne:</u>         | Joan Benet         |
| <u>Equip:</u>          | 7                  |
| <u>Data d’entrega:</u> | 11 de maig 2012    |

**ÍNDEX**

|         |   |    |
|---------|---|----|
| A.1.    | ANNEX 1: <i>Simbologia</i> .....  | 1  |
| A.2.    | ANNEX 2: <i>Càlculs justificats</i> .....   | 4  |
| A.2.1.  | Balanç de matèria reacció de combustió .....  | 4  |
| A.2.2.  | Temperatura de flama adiabàtica.....  | 5  |
| A.2.3.  | Poder calorífic de l' <i>Off-Gas</i> .....  | 6  |
| A.2.4.  | Requeriments energètics.....  | 8  |
| A.2.5.  | Dimensionament del les canonades a pressió.....                                     | 8  |
| A.2.6.  | Dimensionament tèrmic i mecànic del sistema: <i>Hogar</i> (Ref.1.1) .....           | 11 |
| A.2.7.  | Dimensionament tèrmic i mecànic del sistema: <i>Sobreescalfador</i> (Ref.1.1) ..... | 13 |
| A.2.8.  | Dimensionament tèrmic i mecànic del sistema: <i>Evaporador</i> (Ref.1.1) .....      | 20 |
| A.2.9.  | Dimensionament tèrmic i mecànic del sistema: <i>Economitzador</i> (Ref.1.1) .....   | 27 |
| A.2.10. | Especificació canonades .....   | 35 |
| A.2.11. | Pressupost unitat .....   | 36 |
| A.2.12. | Compte de resultats .....   | 38 |
| A.3.    | ANNEX 3: Anàlisi de l' <i>Off-Gas</i> .....   | 40 |
| A.3.1.  | Objectius.....  | 40 |
| A.3.2.  | Presa de mostra.....  | 40 |
| A.3.3.  | Mètodes d'anàlisi.....  | 41 |
| A.3.4.  | Sulfurats.....  | 41 |
| A.3.5.  | Hidrocarburs i hidrogen.....  | 42 |
| A.3.6.  | Monòxid i diòxid de carboni .....   | 44 |
| A.3.7.  | Resultats obtinguts.....  | 45 |
| A.3.8.  | Conclusions .....   | 53 |
| A.4.    | ANNEX 4: <i>Fulls d'especificació</i> .....   | 54 |
| A.4.1.  | Bombes .....  | 54 |
| A.4.2.  | V-8001 .....  | 55 |
| A.4.3.  | Caldera.....  | 56 |

A.1. **ANNEX 1: Simbologia****Taula A.1.1** Simbologia

| <b>Paràmetre</b> | <b>Descripció</b>                                 |
|------------------|---|
| $(PP)_l$         | Perímetre projectat                               |
| $(S)_l$          | Secció unitària lliure de pas de gasos            |
| $(SC)$           | Superfície de calefacció                          |
| $(SC)_l$         | Superfície unitària de calefacció dels tubs       |
| $A$              | Amplada/Gruix aleta                               |
| $a$              | Coefficient per a l'eficiència de l'aleta         |
| $b$              | Coefficient per a l'eficiència de l'aleta         |
| $C$              | Pas entre aletes                                  |
| $CF$             | Flux de caixa                                     |
| $c_i$            | Calor específic mitja                             |
| $D$              | Diàmetre extern aleta                             |
| $d_{ev}$         | Diàmetre equivalent per a la transmissió de calor |
| $D_{ev}$         | Diàmetre equivalent per a la pèrdua de càrrega    |
| $d_i$            | Diàmetre  |
| $E$              | Eficiència de les soldadures                      |
| $eco$            | Economitzador                                     |
| $evap$           | Evaporador  |
| $E_x$            | Excés d'aire                                      |
| $F$              | Pas entre tubs                                    |
| $f$              | Factor de fricció                                 |
| $F_r$            | Factor de radiació                                |
| $g$              | Gasos de combustió o fums                         |
| $G_{fa}$         | Relació aire/combustible                          |
| $G_{fh}$         | Relació gasos/combustible                         |
| $G_i$            | Velocitat màssica                                 |
| $H$              | Alçada  |
| $H_d$            | Pèrdues zona de pujada                            |
| $h_f$            | Pèrdues majors                                    |
| $h_g$            | Coefficient de gasos                              |
| $h_{gc}$         | Coefficient de pel·lícula dels gasos              |
| $h_{gr}$         | Coefficient de radiació de gasos                  |
| $h_{grb}$        | Coefficient bàsic de radiació de gasos            |
| $H_h$            | Càrrega de calor en l'hogar                       |
| $h_i$            | Entalpia  |

**Taula A.1.1** Simbologia (*Continuació*)

| <b>Paràmetre</b> | <b>Descripció</b>                             |
|------------------|---|
| $h_i$            | Coefficient de transmissió interior           |
| $h_o$            | Coefficient de transmissió exterior           |
| $H_r$            | Pèrdues zona de descens                       |
| $h_{sg}$         | Coefficient d'embrutiment gasos               |
| $h_{sv}$         | Coefficient d'embrutiment vapor/aigua         |
| $h_v$            | Coefficient de pel·lícula vapor               |
| $h_w$            | Coefficient pel·lícula aigua                  |
| $h_x$            | Pèrdues singulars                             |
| $i$              | Intern  |
| $in$             | Entrada                                       |
| $K$              | Coefficient de pèrdua de carrega singular     |
| $k$              | Conductivitat del metall del tub              |
| $K_f$            | Coefficient de forma                          |
| $k_i$            | Conductivitat gasos                           |
| $L$              | Longitud                                      |
| $L_r$            | Longitud radiant                              |
| $M$              | Coefficient d'entalpia pels gasos             |
| $MAWP$           | Pressió de treball màxima permisible          |
| $m_i$            | Cabal màssic                                  |
| $N$              | Coefficient d'entalpia pels gasos             |
| $n$              | Nombre d'elements                             |
| $fila$           | Files de tubs                                 |
| $n_i$            | Coefficient estequiomètric                    |
| $NPSH_D$         | <i>Net Positive Suction Head</i> (disponible) |
| $NPSH_R$         | <i>Net Positive Suction Head</i> (requerit)   |
| $N_{pT}$         | Número de passos del vapor pels tubs          |
| $o$              | Extern  |
| $OG$             | Sigles de l' <i>Off-Gas</i>                   |
| $out$            | Sortida                                       |
| $P$              | Pressió                                       |
| $p$              | Pèrdues                                       |
| $P$              | Potència                                      |
| $PCI$            | Poder calorífic inferior                      |
| $P_{dis}$        | Pressió de disseny                            |
| $P_{hidro}$      | Pressió de prova hidrostàtica                 |
| $P_m$            | Pressió motriu                                |

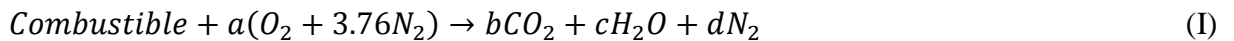
**Taula A.1.1** Simbologia (*Continuació*)

| <b>Paràmetre</b> | <b>Descripció</b>                   |
|------------------|-------------------------------------|
| $pm_i$           | Pes molecular                       |
| $P_r$            | Pressió parcial dels gasos radiants |
| $Pr_i$           | Nombre de <i>Prandtl</i>            |
| $Q_i$            | Flux d'energia                      |
| $r_b$            | Radi de la base de l'aleta          |
| $r_e$            | Radi extrem de l'aleta              |
| $Re_i$           | Nombre de <i>Reynolds</i>           |
| $r_i$            | Radi                                |
| $S$              | Superfície efectiva                 |
| $s$              | Superfície                          |

## A.2. ANNEX 2: Càlculs justificats

### A.2.1. Balanç de matèria reacció de combustió

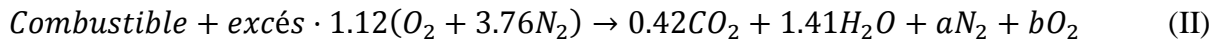
El balanç de matèria d'una reacció de combustió es basa en l'ajust de l'estequiometria de la reacció. Això es realitza aplicant el balanç sobre els compostos presents. Aplicant el balanç per compostos es troben els coeficients pertinents.



**Taula A.2.1.1** Estequiometria de la combustió sense excés d'aire

| <b>Coefficient</b> | <b>Estequiometria</b> |
|--------------------|-----------------------|
| a                  | 1.12                  |
| b                  | 0.420                 |
| c                  | 1.41                  |
| d                  | 4.23                  |

Obtinguts els coeficients estequiomètrics es realitza el mateix balanç però aplicant un excés d'aire. Els coeficients pel diòxid de carboni i l'aigua es mantenen igual que pel cas sense excés.



Amb la finalitat d'obtenir l'excés d'aire adient s'avalua la quantitat d'oxigen present en els gasos de combustió, el qual a de ser suficient per tal de garantir una combustió completa. La combustió incompleta es dona quan algun compost del combustible no arriba al seu grau màxim d'oxidació. Quan es generen aquestes reaccions, no s'obté l'energia màxima disponible del combustible i, per tant, es perd eficiència. Resultat d'això és la necessitat de proporcionar un excés d'aire al combustible per augmentar la possibilitat que la reacció amb l'oxigen sigui ràpida i total. La forma més habitual de conèixer si la reacció es genera amb l'excés correcte d'oxigen és analitzar la quantitat d'oxigen en els gasos de combustió. Els valors típics de concentració d'oxigen en els gasos de combustió quan la caldera opera amb un combustible gas és del 2% al 6%. (Ref.3.2.)



**Taula A.2.1.2** Quantitat d'oxigen en els gasos de combustió segons l'excés.

| Excés Aire [%] | $x_i$ [%] | Excés Aire [%] | $x_i$ [%] |
|----------------|-----------|----------------|-----------|
| 1              | 0.186     | 30             | 4.40      |
| 5              | 0.885     | 40             | 5.48      |
| 10             | 1.70      | 50             | 6.44      |
| 15             | 2.46      | 75             | 8.37      |
| 20             | 3.16      | 100            | 9.84      |

Igualment, és molt important en el control i operació de les cambres de combustió conèixer la relació màssica entre el combustible, l'aire i el gasos de combustió produïts. Per aquest motiu es calcula la relació aire/combustible ( $G_{fa}$ ) i la relació gasos/combustible ( $G_{fh}$ ).

$$G_{fa} = \frac{m_{aire} \cdot p_{m_{aire}}}{m_{comb} \cdot p_{m_{comb}}} \quad (\text{A.2.1.1})$$

$$G_{fh} = \frac{m_{GC} \cdot p_{m_{GC}}}{m_{comb} \cdot p_{m_{comb}}} \quad (\text{A.2.1.2})$$

### A.2.2. Temperatura de flama adiabàtica

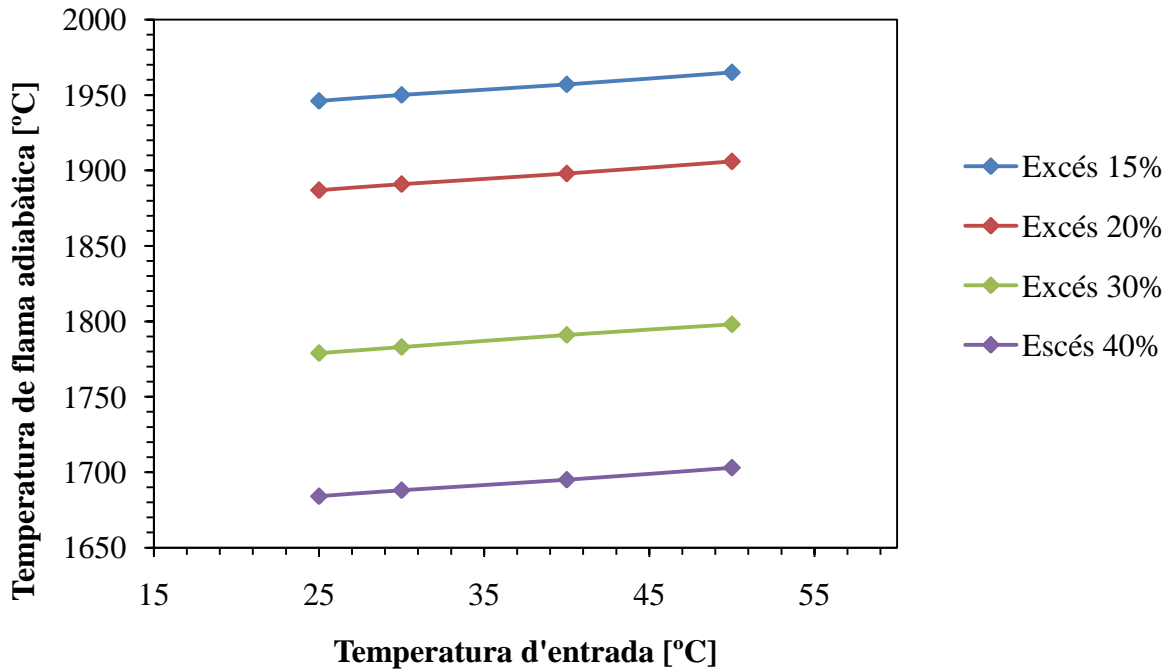
La forma més ràpida per obtenir la temperatura dels gasos de combustió és amb el càlcul de la temperatura de flama adiabàtica, la qual s'obté quan tota la cambra de combustió es considera adiabàtica. D'aquesta manera els gasos de la combustió augmenten notablement la seva energia, la qual s'expressa amb una temperatura superior als 1000°C. Aquesta temperatura s'obté realitzant el balanç d'energia de la reacció per a cada excés, on la generació de calor ( $\dot{Q}_{combustió}$ ) és zero, equació A.2.2.1 Per tant, tota la generació de calor és absorbida pels gasos de combustió, augmentant així la seva temperatura. Tanmateix, s'ha determinat l'efecte del preescalfament del combustible i de l'aire sobre la temperatura de flama adiabàtica, la temperatura d'entrada d'ambdós està compresa entre 25°C i 50°C.

$$\sum_{prod.} n_i h_i - \sum_{reac.} n_i h_i = Q_{combustió} \quad (\text{A.2.2.1})$$



**Taula A.2.2.1** Temperatura de flama adiabàtica segons l'excés d'aire i de la temperatura d'entrada

| Excés d'aire [%] | Temperatura flama adiabàtica [°C] |       |       |       |
|------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|
|                  | 25 °C                             | 30 °C | 40 °C | 50 °C |
| 15               | 1946                              | 1950  | 1957  | 1965  |
| 20               | 1887                              | 1891  | 1898  | 1906  |
| 30               | 1779                              | 1783  | 1791  | 1798  |
| 40               | 1684                              | 1688  | 1695  | 1703  |

**Figura A.2.2.1** Temperatura de flama adiabàtica segons l'excés d'aire i de la temperatura d'entrada

### A.2.3. Poder calorífic de l'Off-Gas

El valor del poder calorífic s'avalua tenint en compte la reacció de combustió. Aquest valor canvia si les dades termodinàmiques de l'aigua en els productes s'obtenen en vapor o en líquid. Per aquest cas, es calcula el poder calorífic inferior s'han emprat les dades termodinàmiques de l'aigua en estat vapor. A continuació es mostren les entalpies, a 25°C, emprades per a cada compost que intervé en la reacció, les quals s'han extret del *EES*.

**Taula A.2.3.1** Entalpies de formació dels compostos de l'Off-Gas

| Compost  | $x_i$ (molar) | $h_i$ [kJ/kmol] |
|----------|---------------|-----------------|
| Hidrogen | 0.737         | 0               |

**Taula A.2.3.1** Entalpies de formació dels compostos de l'Off-Gas (Continuació)

| Compost | $x_i$ (molar) | $h_i$ [kJ/kmol] |
|---------|---------------|-----------------|
| Metà    | 0.122         | -74600          |
| Età     | 0.122         | -83800          |
| Etilà   | 0.010         | 52500           |
| Propà   | 0.003         | -105000         |
| Propilè | 0             | -110.0          |
| Butà    | 0.006         | -126000         |

**Taula A.2.3.2** Entalpies de formació dels compostos de l'aire

| Compost  | $n_i$ (estequiometria) | $h_i$ [kJ/kmol] |
|----------|------------------------|-----------------|
| Oxigen   | 1                      | 0               |
| Nitrogen | 3.76                   | 0               |
| Aire     | 1.29                   | 0               |

**Taula A.2.3.3** Entalpies de formació dels compostos dels productes

| Compost           | $n_i$ (estequiometria) | $h_i$ [kJ/kmol] |
|-------------------|------------------------|-----------------|
| Diòxid de carboni | 0.420                  | -393000         |
| Aigua             | 1.41                   | -242000         |
| Nitrogen          | 4.86                   | 0               |
| Oxigen            | 0.169                  | 0               |

Amb les dades anteriors es troba el valor de l'entalpia de combustió la qual es calcula amb l'expressió A.2.3.1. Coneguda l'entalpia de combustió es calcula el poder calorífic inferior, equació A.2.3.2.

$$\sum_{\text{productes}} n_i \cdot h_i - \sum_{\text{reactius}} n_i \cdot h_i = \Delta H_{\text{combustió}} \quad (\text{A.2.3.1})$$

$$PCI = -\Delta H_{\text{combustió}} \quad (\text{A.2.3.2})$$

**Taula A.2.3.4** Poder calorífic inferior Off-Gas

| PCI [kJ/kmol] | PCI [kJ/Nm <sup>3</sup> ] |
|---------------|---------------------------|
| 486000        | 21.7                      |

$$Q_f = PCI \cdot W_f \quad (\text{A.2.3.3})$$

**Taula A.2.3.5** Disponibilitat de l'Off-Gas

| $v_f$ [Nm <sup>3</sup> /h] | $W_f$ [kg/s] | $Q_f$ [MW] |
|----------------------------|--------------|------------|
| 10000                      | 0.91         | 56.3       |

#### A.2.4. Requeriments energètics

Cal conèixer la quantitat d'energia requerida per part de l'aigua, per tal de ser transformada d'aigua a 57°C i 45 barg a vapor sobreescalfat 400°C. Primerament, cal conèixer les entalpies de l'aigua en l'estat inicial i final. S'ha emprat el *software EES* per tal d'obtenir la informació requerida.

**Taula A.2.4.1** Entalpies aigua

| $h_{in}$ [kJ/kg] | $h_{out}$ [kJ/kg] | $\Delta H_{aigua}$ [kJ/kg] |
|------------------|-------------------|----------------------------|
| 242.4            | 3205              | 2960                       |

Amb els valors de la taula anterior es calcula, emprant l'equació A.2.4.1, l'energia requerida de l'aigua. Aquesta energia s'ha calculat per a la càrrega normal i la total del sistema de generació de vapor.

$$Q_w = W_w \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad (\text{A.2.4.1})$$

**Taula A.2.4.2** Energia requerida

| Operació       | $W_w$ [t/h] | $Q_w$ [MW] |
|----------------|-------------|------------|
| Càrrega normal | 100         | 82.4       |
| Càrrega total  | 150         | 123        |

#### A.2.5. Dimensionament del les canonades a pressió

En aquest apartat es detallen els materials emprats en els tubs dels components de la caldera i el procediment de càlcul per l'obtenció del sobregruix en les canonades.

En l'economitzador es troben temperatures moderades en comparació amb la resta de temperatures. Per aquest motiu, s'ha seleccionat un acer inoxidable austenític anomenat AISI 316 el qual pot operar satisfactòriament a temperatures moderadament elevades. Aquest acer és resistent a la corrosió cristal·lina fins als 300°C sota condicions d'operació continua. L'acer AISI 316 correspon a un acer inoxidable amb un component afegit molt important, el molibdè. Aquesta addició dóna lloc a unes millors propietats anticorrosives que els de la família 304. Presenta una molt bona resistència a la oxidació en condicions intermitents a

temperatures no superiors a 870°C i en continu a 970°C. No obstant, no es recomanable emprar aquest tipus d'acer en temperatures entre 420 i 860°C, però en valors per sota i per sobre d'aquest, el seu comportament és bo. Això és degut a la possibilitat de que precipiti el carbur de crom. (Ref.3.6)

**Taula A.2.5.1** Composició química del AISI 316

| Qualitat | C     | Cr          | Mo      | Ni      |
|----------|-------|-------------|---------|---------|
| 316      | <0.07 | 16.5 – 18.5 | 2 – 2.5 | 10 - 13 |

**Taula A.2.5.2** Propietats físiques del AISI 316

| Densitat [kg/dm <sup>3</sup> ] | Conductivitat tèrmica [W/m·K] | Calor específic [J/kg·K] |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 7.98                           | 15                            | 500                      |

Per altra banda i degut a les condicions més extremes que es donen en l'evaporador i el sobreescalfador, s'ha hagut de seleccionar un material que pugui suportar unes condicions de temperatura superior. Aquest material és un acer resistent a la calor anomenat RA 253 MA, el qual és un material usat en aquests tipus equips perquè és resistent a molt altes temperatures. Aquest acer austenític és conegut per la seva resistència a la calor i per la seva gran i excel·lent resistència a la oxidació. La gran resistència a la calor del RA 253 MA es degut a que, en la seva fabricació, es troba sotmès un unes microaddicions de *alloy* les quals donen lloc aquesta propietat. Generalment, aquest material és emprat en la construcció de calderes, ciclons i tubs radiants. (Ref.5.4)

**Taula A.2.5.3** Composició química del RA 253 MA (Ref.3.7)

| Alloy     | Ni | Cr | Fe | Si  | Altres                           |
|-----------|----|----|----|-----|----------------------------------|
| RA 253 MA | 11 | 21 | 65 | 1.7 | Ce: 0.04 N:0.17<br>C:0.08 Mn:0.6 |

Amb el material, els diàmetres interns i seguint els criteris del codi ASME en la secció I es defineixen les pressions de disseny i el gruix corresponent dels tubs. Primerament cal definir la pressió de disseny, la qual correspon a la pressió tarada en la vàlvula de seguretat

$$P_{dis} = 1.1 \cdot P_{op} \quad (\text{A.2.5.1})$$

Sabent que els tubs són de secció circular es pren, de la divisió corresponent del codi ASME, l'equació que correspon a la configuració de la canonada i que permet obtenir el gruix a aplicar.

$$t = \frac{P_{dis} \cdot d_i}{2 \cdot S_{ASME} + P_{dis}} + 0.005 \cdot d_i + e \quad (\text{A.2.5.2})$$

El valor de  $S_{ASME}$  correspon a la tensió màxima admissible del material a la temperatura de disseny ( $T_{dis}$ ). Tanmateix, el valor del terme  $e$  correspon al factor d'espessor per a tubs expandits, els qual s'empra segons els següents criteris.

**Taula A.2.5.4** Criteris factor  $e$

| <b>e [in]</b> | <b><math>d_o</math></b> |
|---------------|-------------------------|
| 0.095         | < 1 ¼"                  |
| 0.105         | [1¼", 2"]               |
| 0.12          | [2", 3"]                |
| 0.135         | [3", 4"]                |
| 0.15          | [4", 5"]                |

$$T_{dis} = T_{op} + 20^{\circ}\text{C} \quad (\text{A.2.5.3})$$

**Taula A.2.5.5** Tensió màxima admissible i eficiència de la soldadura

| <b><math>S_{ASME,RA\ 253\ MA}</math> [MPa]</b> | <b><math>S_{ASME,AISI\ 316}</math> [MPa]</b> |
|--|--|
| 5.86   | 125  |

En realitat segons els catàleg del material RA 253 MA aquest té una tensió màxima admissible de 6.89, però el fabricant esmenta que si el material s'empra com a canonades cal aplicar-li un factor de seguretat del 0.85. A continuació es detalla el dimensionament de les canonades per a cada secció cadascun corresponen al material adient.

**Taula A.2.5.6** Dimensionament canonades internes calderes

|                              | <b>Sobreescalfador</b> | <b>Evaporador</b> | <b>Economitzador</b> |
|------------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| <b><math>t_i</math> [mm]</b> | 9.99                   | 7.11              | 2.59                 |

Aplicant el codi s'obtenen els espessors per a cada secció, d'aquest s'extrau el diàmetre exterior a instal·lar.

**Taula A.2.5.7** Diàmetres externs dels elements del sistema de generació de vapor

|            | <b>Sobreescalfador</b> | <b>Evaporador</b> | <b>Economitzador</b> |
|------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| $d_o$ [mm] | 35.6                   | 20.9              | 13.4                 |

Degut a que els diàmetres externs obtinguts són valors poc usuals en la construcció de canonades. Aquests han estat estandarditzats, taula A.2.5.8.

**Taula A.2.5.8** Diàmetres externs estandarditzats dels elements del sistema de generació de vapor

|            | <b>Sobreescalfador</b> | <b>Evaporador</b> | <b>Economitzador</b> |
|------------|------------------------|-------------------|----------------------|
| $d_o$ [mm] | 36                     | 21                | 13.5                 |

### A.2.6. Dimensionament tèrmic i mecànic del sistema: Hogar (Ref.1.1)

Aquest dimensionament tèrmic s'ha realitzat per quatre configuracions diferents. En aquest apartat es troba la quantitat de Gas Natural necessària a introduir en el conjunt. El procediment del mètode s'inicia en la quantitat de calor màxima disponible i es finalitza amb el calor de transport dels gasos de combustió.

Calor aportat pel combustible:

$$Q_f = W_f \cdot (PCI)_h \quad (\text{A.2.6.1})$$

Superfície efectiva total:

$$S = \sum s_i \cdot \alpha_i \quad (\text{A.2.6.2})$$

Aquest paràmetre depèn del dimensionament de l'hogar i depèn del sumatori de les superfícies efectives. Amb la configuració de l'hogar es troben els valors d'alfa els quals depenen de la situació i de l'orientació d'aquests a la flama.

**Taula A.2.6.1** Valors d'alfa en l'hogar segons la seva configuració

|          | <b>Esquerra</b> | <b>Dreta</b> | <b>Terra</b> | <b>Sostre</b> | <b>Posterior</b> | <b>Frontal</b> |
|----------|-----------------|--------------|--------------|---------------|------------------|----------------|
| $\alpha$ | 0               | 1            | 0            | 1             | 1                | 0              |

El valor d'alfa és 1 quan el contacte entre la flama i el cos és directe, per contra quan el cos és refractari, com el cas del terra, el coeficient alfa pren el valor de 0.

Càrrega de calor en l'hogar:

$$H_h = \frac{Q_f}{s} \quad (\text{A.2.6.3})$$

Temperatura dels gasos a la sortida, correlació emprada pel Gas Natural:

$$T_g = 343 \cdot \ln(0.0001225 \cdot H_h) \quad (\text{A.2.6.4})$$

Caudal de gasos:

$$W_g = G_{fh} \cdot W_F \quad (\text{A.2.6.5})$$

Calor en els gasos de combustió en la sortida de l'hogar:

$$Q_r = W_g \cdot (M \cdot T_g + N \cdot T_G^2) \quad (\text{A.2.6.6})$$

Amb aquest procediment juntament amb el balanç de matèria de la reacció de combustió es realitza un sistema iteratiu, per tal de trobar la quantitat de Gas Natural a introduir, definir el dimensionat de l'hogar i trobar la temperatura de sortida del gasos. El balanç de matèria es realitza de la mateixa forma que el mostrat en l'apartat A.2.1 de l'annex.

L'eficiència de la caldera es descriu com:

$$\eta = \frac{Q_v}{Q_f} \cdot 100 \quad (\text{A.2.6.7})$$

**Taula A.2.6.2** Resultats disseny tèrmic

| Configuració | $Q_f$ [MW] | $Q_w$ [MW] | $H_h$ [kW/m <sup>2</sup> ] | $T_g$ [°C] | $\eta$ [%] |
|--------------|------------|------------|----------------------------|------------|------------|
| 1            | 170        | 123        | 1199                       | 1660       | 72.7       |
| 2            | 133        | 82.3       | 938                        | 1580       | 62.0       |
| 3            | 97.4       | 61.7       | 688                        | 1470       | 63.4       |
| 4            | 76.4       | 41.1       | 540                        | 1390       | 53.8       |

**Taula A.2.6.3** Resultats reacció de combustió

| Configuració | $W_f$ [t/h] | $W_a$ [kg/h] | $W_g$ [kg/h] | $G_{fa}$ | $G_{fh}$ |
|--------------|-------------|--------------|--------------|----------|----------|
| 1            | 11.1        | 39.9         | 235          | 3.61     | 21.2     |
| 2            | 8.24        | 28.0         | 166          | 3.39     | 20.1     |
| 3            | 6.36        | 22.9         | 135          | 3.61     | 21.2     |
| 4            | 4.78        | 16.2         | 95.7         | 3.38     | 20.0     |

**Taula A.2.6.4** Resultats combustible

| Configuració | $W_f$ [t/h] | Off-Gas [t/h] | Gas Natural [t/h] | $x_{OG}$ [%] | $x_{GN}$ [%] |
|--------------|-------------|---------------|-------------------|--------------|--------------|
| 1            | 11.1        | 0             | 11.1              | 0            | 100          |
| 2            | 8.24        | 3.51          | 4.74              | 42.5         | 57.5         |
| 3            | 6.36        | 0             | 6.36              | 0            | 100          |
| 4            | 4.78        | 1.75          | 3.02              | 36.7         | 63.3         |

Per últim, es mostren els resultats del dimensionament, els quals són constants a les quatre configuracions i estan obtinguts a partir del càlcul de la configuració 1. Aquesta configuració dóna lloc a un hogar de 234 m<sup>3</sup>.

**Taula A.2.6.5** Dimensionament de l'hogar

|                     | Esquerra | Dreta | Terra | Sostre | Posterior | Frontal |
|---------------------|----------|-------|-------|--------|-----------|---------|
| L [m]               | 5        | 5     | 5     | 5      | 0         | 0       |
| H [m]               | 8        | 8     | 0     | 0      | 8         | 8       |
| A [m]               | 0        | 0     | 6     | 6      | 6         | 6       |
| s [m <sup>2</sup> ] | 40       | 40    | 30    | 30     | 48        | 48      |

### A.2.7. Dimensionament tèrmic i mecànic del sistema: Sobreescalfador (Ref.1.1)

Calor necessari de l'aigua per passar de vapor saturat a vapor sobreescalfat:

$$Q_{v,sobres} = W_w \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad (\text{A.2.7.1})$$

La transferència entre el fluid fred i el calent es considera que té una pèrdua per radiació del 2%, per tant:

$$Q_{p,sobres} + Q_{v,sobres} = Q_{g,sobres} \quad (\text{A.2.7.2})$$

A partir d'aquí es realitza el balanç d'energia sobre els gasos per obtenir l'entalpia de sortida i obté la temperatura de sortida dels gasos de combustió.

$$Q_{g,sobres} = W_g \cdot (h_{in} - h_{out}) \quad (\text{A.2.7.3})$$

**Taula A.2.7.1** Temperatures costat vapor

| $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|---------------|----------------|
| 257.5         | 400            |



**Taula A.2.7.2** Temperatures costat fums

| Configuració | $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|--------------|---------------|----------------|
| 1            | 1660          | 1460           |
| 2            | 1580          | 1390           |
| 3            | 1470          | 1290           |
| 4            | 1390          | 1220           |

**Taula A.2.7.3** Flux de calor per a cada un dels costats

| Configuració | $Q_{v,sobres}$ [MW] | $Q_{g,sobres}$ [MW] | $Q_{p,sobres}$ [MW] |
|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 1            | 16.9                | 17.3                | 0.346               |
| 2            | 11.3                | 11.5                | 0.230               |
| 3            | 8.48                | 8.65                | 0.173               |
| 4            | 5.65                | 5.77                | 0.115               |

Conegudes les temperatures d'entrada i sortida de cada fluid i el flux d'energia transmès, es realitza el disseny mecànic, el qual s'inicia amb el càlcul de la superfície unitària d'escalfament dels tubs.

$$(SC)_1 = \pi \cdot d_o \quad (A.2.7.4)$$

La secció unitària lliure de pas de gasos:

$$(S)_1 = F - d_o \quad (A.2.7.5)$$

On  $F$  és la separació entre els tubs. El tubs es disposaran de forma regular, per tant i segons els Reglament d'Equips a Pressió i la seva I.T.C MIE-AP1, la distància entre els centre ha de ser la següent:

$$F = 1.25 \cdot d_o \quad (A.2.7.6)$$

**Taula A.2.7.4** Resultats referents als tubs

| $(SC)_I$ [m <sup>2</sup> /m] | $(S)_I$ [m <sup>2</sup> /m] | $F$ [m] |
|------------------------------|-----------------------------|---------|
| 0.113                        | $9.0 \cdot 10^{-3}$         | 0.045   |

A continuació es detalla el disseny del sobreescalfador pel costat dels gasos. Primer de tot es calcula la velocitat màssica dels gasos de combustió:

$$G_g = \frac{W_g}{3600 \cdot (S)_1 \cdot L \cdot n} \quad (A.2.7.7)$$

Viscositat dels gasos:

$$\mu_g = 157 \cdot 10^{-7} + 132 \cdot 10^{-9} \cdot \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right)^{0.788} \quad (A.2.7.8)$$

Número de Reynolds:

$$Re_g = \frac{G_g \cdot d_o}{\mu_g} \quad (\text{A.2.7.9})$$

Conductivitat mitjana:

$$k_g = 376 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right) + 0.023 \quad (\text{A.2.7.10})$$

Calor específic mitjà:

$$c_g = M + N \cdot \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right) \quad (\text{A.2.7.11})$$

**Taula A.2.7.5** Propietats dels fums en el sobreescalfador

| Configuració | $\mu_g$ [kg/s·m <sup>2</sup> ] | $k_g$ [kJ/h·m·°C] | $c_g$ [kJ/kg·°C] |
|--------------|--------------------------------|-------------------|------------------|
| 1            | $5.90 \cdot 10^{-5}$           | 0.343             | 1.19             |
| 2            | $5.73 \cdot 10^{-5}$           | 0.331             | 1.18             |
| 3            | $5.51 \cdot 10^{-5}$           | 0.314             | 1.17             |
| 4            | $5.33 \cdot 10^{-5}$           | 0.301             | 1.16             |

Coefficient de pel·lícula (convecció):

$$h_{gc} = 17.54 \cdot G_g^{0.6} \cdot d_o^{-0.46} \cdot c_g \quad (\text{A.2.7.12})$$

Coefficient bàsic de radiació:

$$h_{grb} = 0.085 \cdot T_{sat,w} + 0.044 \cdot \Delta T_m - 17.2 \quad (\text{A.2.7.13})$$

Salt tèrmic sobreescalfador:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{g,in} - T_{w,out}) - (T_{g,out} - T_{w,in})}{\ln \left( \frac{T_{g,in} - T_{w,out}}{T_{g,out} - T_{w,in}} \right)} \quad (\text{A.2.7.14})$$

**Taula A.2.7.6** Paràmetres de disseny del sobreescalfador, costat calent

| Configuració | $G_g$ [kg/s·m <sup>2</sup> ] | $Re_g$ | $\Delta T_m$ [°C] |
|--------------|------------------------------|--------|-------------------|
| 1            | 28.3                         | 17200  | 1230              |
| 2            | 20                           | 12600  | 1150              |
| 3            | 16.2                         | 10600  | 1050              |
| 4            | 11.5                         | 7800   | 973               |

Longitud radiant:

$$L_r = \frac{V_c}{S_c} \quad (\text{A.2.7.15})$$

Pressió parcial dels fums:

$$P_r = 0.29 - 0.0015 \cdot E_x \quad (\text{A.2.7.16})$$

El terme  $E_x$  equival a l'excés d'aire establert en la reacció de combustió el qual és del 15%.

Factor de radiació:

$$F_r = 0.25 + P_r \cdot L_r \quad (\text{A.2.7.17})$$

Els tres paràmetres anteriors són constants. La longitud radiant pren el valor de 12.4 m, la pressió parcial té el valor de 0.289 barg i el factor de radiació val 3.84. Coeficient de radiació:

$$h_{gr} = h_{grb} \cdot F_r \quad (\text{A.2.7.18})$$

Coeficient de pel·lícula:

$$h_g = h_{gc} + h_{gr} \quad (\text{A.2.7.19})$$

Coeficient de transmissió exterior:

$$h_o = \frac{1}{\frac{1}{h_g} + \frac{1}{h_{sg}}} \quad (\text{A.2.7.20})$$

**Taula A.2.7.7** Coeficients de transferència costat calent en  $\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$

| Configuració | $h_{gc}$ | $h_{grb}$ | $h_{gr}$ | $h_g$ | $h_o$ |
|--------------|----------|-----------|----------|-------|-------|
| 1            | 586      | 247       | 946      | 1530  | 1300  |
| 2            | 473      | 232       | 892      | 1370  | 1170  |
| 3            | 414      | 213       | 821      | 1240  | 1080  |
| 4            | 335      | 199       | 766      | 1100  | 971   |

Pèrdua de càrrega costat gasos:

- Factor de fricció:

$$f_g = \left( 0.044 + \frac{0.08 \cdot F}{d_o \left( \frac{F}{d_o} - 1 \right)^n} \right) \cdot Re_g^{-0.15} \quad (\text{A.2.7.21})$$

$$n = 0.43 + \frac{1.13 \cdot d_o}{F} \quad (\text{A.2.7.22})$$

- Pèrdua de càrrega:

$$\Delta P_g = f_g \cdot n_{fila} \cdot G_g^2 \cdot \left( \frac{574 + T_{in} + T_{out}}{4868} \right) \quad (\text{A.2.7.23})$$

**Taula A.2.7.8** Pèrdues de càrrega costat fums

| Configuració | $f_g$ | $\Delta P_g$ [m.m.c.a.] | $\Delta P_g$ [barg]  |
|--------------|-------|-------------------------|----------------------|
| 1            | 0.157 | 191                     | $1.91 \cdot 10^{-2}$ |
| 2            | 0.165 | 95.7                    | $9.57 \cdot 10^{-3}$ |
| 3            | 0.169 | 61                      | $6.10 \cdot 10^{-3}$ |
| 4            | 0.177 | 30.8                    | $3.08 \cdot 10^{-3}$ |

Un cop conegut el disseny del sobreescalfador per la part calenta o fums, cal realitzar el disseny pertinent pel costat del vapor. Velocitat màssica:

$$G_v = \frac{W_w}{3600 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_i^2}{4}\right) \cdot \left(\frac{n \cdot n_{fila}}{N_{PT}}\right)} \quad (\text{A.2.7.24})$$

Volum específic del vapor saturat:

$$v_s = \left(4.662 - \left(\frac{273 - T_{sat,w}}{536.8}\right)^{5.835}\right) \cdot \frac{(T_{sat,w} + 273)}{P} \cdot 10^{-3} \quad (\text{A.2.7.25})$$

Volum específic del vapor sobreescalfat:

$$v_v = v_s \cdot \left(1 + \frac{(T_{out} - T_{in})}{(T_{in} + 273)} \cdot \left(1.03 + \frac{P}{74.3}\right)\right) \quad (\text{A.2.7.26})$$

Calor específic mitja del vapor sobreescalfat:

$$c_v = \frac{1}{1 + \frac{1}{12.2 \cdot P}} \cdot \left(0.485 + (P + 6) \cdot \left(\frac{0.88}{(T_{out} - T_{in}) + 90}\right)\right) \quad (\text{A.2.7.27})$$

Els volums específics del vapor en estat saturat o sobreescalfat i el calor específic tenen valors constants per a les quatre configuracions els quals són presentats en la següent taula.

**Taula A.2.7.9** Valors constants en el disseny

| $v_s$ [m <sup>3</sup> /kg] | $v_v$ [m <sup>3</sup> /kg] | $c_v$ [kJ/kg·°C] |
|----------------------------|----------------------------|------------------|
| 0.044                      | 0.059                      | 2.83             |

Velocitat mitjana:

$$V_m = G_v \cdot \left(\frac{v_s + v_v}{2}\right) \quad (\text{A.2.7.28})$$

Viscositat del vapor:

$$\mu_v = \frac{1}{10000 \cdot \left(\frac{v_v + v_s}{2}\right)} \cdot \left(0.2074 \cdot P^{-0.8362} + 0.00197 \cdot P^{-0.945} \cdot (T_{out} - T_{in})\right) \quad (\text{A.2.7.29})$$

La propietat de la viscositat és constant, ja que les temperatures són iguals per a les quatre configuracions. Aquest pren el valor de  $3.16 \cdot 10^{-5}$  kg/s·m. Número de Reynolds:

$$Re_v = \frac{G_v \cdot d_i}{\mu_v} \quad (\text{A.2.7.30})$$

**Taula A.2.7.10** Paràmetres de disseny del sobreescalfador, costat fred

| Configuració | $G_v$ [kg/s·m <sup>2</sup> ] | $V_m$ [m/s] | $Re_v$            |
|--------------|------------------------------|-------------|-------------------|
| 1            | 632                          | 32.6        | $5.13 \cdot 10^5$ |
| 2            | 421                          | 21.7        | $3.16 \cdot 10^5$ |
| 3            | 316                          | 16.3        | $2.56 \cdot 10^5$ |
| 4            | 211                          | 10.9        | $1.71 \cdot 10^5$ |

Coefficient de pel·lícula del vapor:

$$h_v = 10.91 \cdot G_v^{0.8} \cdot d_i^{-0.2} \cdot c_v \quad (\text{A.2.7.31})$$

Coefficient de transferència interior:

$$h_i = \frac{1}{\frac{1}{h_v} + \frac{1}{h_{sv}}} \quad (\text{A.2.7.32})$$

**Taula A.2.7.11** Coeficients de transferència costat fred en kJ/h·m<sup>2</sup>·°C

| Configuració | $h_v$ | $h_i$ |
|--------------|-------|-------|
| 1            | 11200 | 7290  |
| 2            | 8080  | 5820  |
| 3            | 6450  | 4940  |
| 4            | 4650  | 3810  |

Pèrdua de càrrega en el vapor:

- Coeficient de pèrdua de càrrega: expressió de *Colebrook*

$$\frac{1}{\sqrt{f_v}} + 2 \cdot \log \left( \frac{2.51}{Re_v \cdot \sqrt{f_v}} + \frac{0.046}{3700 \cdot d_i} \right) = 0 \quad (\text{A.2.7.33})$$

- Pèrdua de càrrega

$$\Delta P_v = 5.1 \cdot 10^{-6} \cdot V_m \cdot G_v \cdot \left( \frac{f_v \cdot L \cdot n_{fila} \cdot N_{pT}}{d_i} + 0.5 \cdot \left( \frac{F}{2 \cdot d_i} \right)^{-0.6} \cdot n_{fila} \cdot N_{pT} + 8 \right) \quad (\text{A.2.7.34})$$

**Taula A.2.7.12** Pèrdues de càrrega costat vapor

| Configuració | $f_v$ | $\Delta P_v$ [barg] |
|--------------|-------|---------------------|
| 1            | 0.023 | 1.72                |
| 2            | 0.023 | 0.766               |
| 3            | 0.024 | 0.432               |

**Taula A.2.7.12** Pèrdues de càrrega costat vapor (*Continuació*)

| Configuració | $f_v$ | $\Delta P_v$ [barg] |
|--------------|-------|---------------------|
| 4            | 0.024 | 0.193               |

Es realitza el balanç global en el sobreescalfador. Coeficient de transferència global:

$$U_{sobres} = \frac{K_f}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_o}{a_i \cdot h_i}} \quad (\text{A.2.7.35})$$

El paràmetre  $K_f$  equival al coeficient de forma el qual pren valor de 0.9.

**Taula A.2.7.13** Coeficient de transferència global

| Configuració | $U_{sobres}$ [kJ/h·m <sup>2</sup> ·C] |
|--------------|---------------------------------------|
| 1            | 934                                   |
| 2            | 825                                   |
| 3            | 741                                   |
| 4            | 641                                   |

Superfície de calefacció:

$$(SC) = \frac{Q_{v,sobres}}{U_{sobres} \cdot \Delta T_m} \quad (\text{A.2.7.36})$$

Nombre de files:

$$n_{fila} = \frac{(SC)}{(SC)_1 \cdot L \cdot n} \quad (\text{A.2.7.37})$$

Amb el valor obtingut del nombre de files es calcula el nombre de tubs necessaris i es comproven si coincideixen amb el suposat inicialment, si no s'ajusten. Per últim es calcula l'amplada del sobreescalfador:

$$A_{sobres} = n \cdot d_o + F \cdot \left( \frac{n}{n_{fila} + 1} \right) \quad (\text{A.2.7.38})$$

**Taula A.2.7.14** Resultats mecànics del sobreescalfador

| $L$ [m] | $A$ [m] | $H$ [m] | $V_c$ [m <sup>3</sup> ] | $(SC)$ [m <sup>2</sup> ] | $n$ | $n_{fila}$ | $N_{pT}$ |
|---------|---------|---------|-------------------------|--------------------------|-----|------------|----------|
| 3.10    | 3.80    | 4       | 47.0                    | 58.1                     | 128 | 2          | 1        |

### A.2.8. Dimensionament tèrmic i mecànic del sistema: Evaporador (Ref.1.1)

Balanç tèrmic del generador de vapor o evaporador es realitza de la mateixa forma que el sobreescalfador, ja que es coneixen les temperatures a l'entrada i sortida del costat fred i només es coneix la temperatura d'entrada dels gasos de combustió. Com s'estima que hi ha un 2% de pèrdues per radiació es realitza els següent balanços tèrmics:

$$Q_{w,evap} = W_w \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad (A.2.8.1)$$

La transferència entre el fluid fred i el calent es considera que té una pèrdua per radiació del 2%, per tant:

$$Q_{p,evap} + Q_{w,evap} = Q_{g,evap} \quad (A.2.8.2)$$

A partir d'aquí es realitza el balanç d'energia sobre els gasos amb la finalitat de conèixer l'entalpia de sortida i obtenir la temperatura de sortida dels fums.

$$Q_{g,evap} = W_g \cdot (h_{in} - h_{out}) \quad (A.2.8.3)$$

**Taula A.2.8.1** Temperatures costat vapor

| $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|---------------|----------------|
| 257.5         | 257.5          |

**Taula A.2.8.2** Temperatures costat fums

| Configuració | $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|--------------|---------------|----------------|
| 1            | 1460          | 577            |
| 2            | 1390          | 545            |
| 3            | 1290          | 507            |
| 4            | 1220          | 475            |

**Taula A.2.8.3** Flux de calor per a cada un dels costats

| Configuració | $Q_{w,evap}$ [MW] | $Q_{g,evap}$ [MW] | $Q_{p,evap}$ [MW] |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1            | 69.8              | 71.3              | 1.43              |
| 2            | 46.6              | 47.5              | 0.95              |
| 3            | 34.9              | 35.6              | 0.712             |
| 4            | 23.3              | 23.8              | 0.475             |

A continuació es realitza el disseny mecànic, el qual s'inicia amb el càlcul de la superfície unitària d'escalfament dels tubs.

$$(SC)_1 = \pi \cdot d_o \quad (A.2.8.4)$$

La secció unitària lliure de pas de gasos:

$$(S)_1 = F - d_o \quad (\text{A.2.8.5})$$

On  $F$  és la separació entre els tubs. El tubs es disposaran de forma regular, per tant i segons els Reglament d'Equips a Pressió i la seva I.T.C MIE-API, la distància entre els centre ha de ser la següent:

$$F = 1.25 \cdot d_o \quad (\text{A.2.8.6})$$

**Taula A.2.8.4** Resultats referents als tubs

| $(SC)_I$ [m <sup>2</sup> /m] | $(S)_I$ [m <sup>2</sup> /m] | $F$ [m] |
|------------------------------|-----------------------------|---------|
| 0.066                        | $5.30 \cdot 10^{-3}$        | 0.026   |

A continuació es detalla el disseny de l'evaporador pel costat dels gasos. Primer de tot es calcula la velocitat màssica dels gasos de combustió:

$$G_g = \frac{W_g}{3600 \cdot (S)_1 \cdot L \cdot n} \quad (\text{A.2.8.7})$$

Viscositat dels gasos:

$$\mu_g = 157 \cdot 10^{-7} + 132 \cdot 10^{-9} \cdot \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right)^{0.788} \quad (\text{A.2.8.8})$$

Número de Reynolds:

$$Re_g = \frac{G_g \cdot d_o}{\mu_g} \quad (\text{A.2.8.9})$$

Conductivitat mitjana:

$$k_g = 376 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right) + 0.023 \quad (\text{A.2.8.10})$$

Calor específic mitjà:

$$c_g = M + N \cdot \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right) \quad (\text{A.2.8.11})$$

**Taula A.2.8.5** Propietats dels fums en l'evaporador

| Configuració | $\mu_g$ [kg/s·m <sup>2</sup> ] | $k_g$ [kJ/h·m·°C] | $c_g$ [kJ/kg·°C] |
|--------------|--------------------------------|-------------------|------------------|
| 1            | $4.67 \cdot 10^{-5}$           | 0.255             | 1.13             |
| 2            | $4.54 \cdot 10^{-5}$           | 0.247             | 1.13             |
| 3            | $4.38 \cdot 10^{-5}$           | 0.239             | 1.13             |
| 4            | $4.25 \cdot 10^{-5}$           | 0.230             | 1.12             |



Coefficient de pel·lícula (convecció):

$$h_{gc} = 17.54 \cdot G_g^{0.6} \cdot d_o^{-0.46} \cdot c_g \quad (\text{A.2.8.12})$$

Coefficient bàsic de radiació:

$$h_{grb} = 0.085 \cdot T_{sat,w} + 0.044 \cdot \Delta T_m - 17.2 \quad (\text{A.2.8.13})$$

Salt tèrmic sobreescalfador:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{g,in} - T_{w,out}) - (T_{g,out} - T_{w,in})}{\ln\left(\frac{(T_{g,in} - T_{w,out})}{(T_{g,out} - T_{w,in})}\right)} \quad (\text{A.2.8.14})$$

**Taula A.2.8.6** Paràmetres de disseny de l'evaporador, costat calent

| Configuració | $G_g$ [kg/s·m <sup>2</sup> ] | $Re_g$ | $\Delta T_m$ [°C] |
|--------------|------------------------------|--------|-------------------|
| 1            | 6.82                         | 3070   | 667               |
| 2            | 4.82                         | 2230   | 616               |
| 3            | 3.91                         | 1880   | 552               |
| 4            | 2.78                         | 1380   | 501               |

Longitud radiant:

$$L_r = \frac{V_c}{S_c} \quad (\text{A.2.8.15})$$

Pressió parcial dels fums:

$$P_r = 0.29 - 0.0015 \cdot E_x \quad (\text{A.2.8.16})$$

El terme  $E_x$  equival a l'excés d'aire establert en la reacció de combustió el qual és del 15%.

Factor de radiació:

$$F_r = 0.25 + P_r \cdot L_r \quad (\text{A.2.8.17})$$

Els tres paràmetres anteriors són constants a les quatre configuracions, ja que depenen de valors invariables de cada configuració. Per aquest motiu la longitud radiant pren el valor de 40 m, la pressió parcial té el valor de 0.289 barg i el factor de radiació val 11.8. Coeficient de radiació:

$$h_{gr} = h_{grb} \cdot F_r \quad (\text{A.2.8.18})$$

Coeficient de pel·lícula:

$$h_g = h_{gc} + h_{gr} \quad (\text{A.2.8.19})$$

Coeficient de transmissió exterior:

$$h_o = \frac{1}{\frac{1}{h_g} + \frac{1}{h_{sg}}} \quad (\text{A.2.8.20})$$

**Taula A.2.8.7** Coeficients de transferència costat calent en  $\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$

| Configuració | $h_{gc}$ | $h_{grb}$ | $h_{gr}$ | $h_g$ | $h_o$ |
|--------------|----------|-----------|----------|-------|-------|
| 1            | 1240     | 595       | 7080     | 8330  | 6700  |
| 2            | 1000     | 557       | 6570     | 7580  | 6240  |
| 3            | 879      | 528       | 6030     | 6910  | 5780  |
| 4            | 712      | 469       | 5530     | 6280  | 5320  |

Pèrdua de càrrega costat gasos:

- Factor de fricció:

$$f_g = \left( 0.044 + \frac{0.08 \cdot F}{d_o \left( \frac{F}{d_o} - 1 \right)^n} \right) \cdot Re_g^{-0.15} \quad (\text{A.2.8.21})$$

$$n = 0.43 + \frac{1.13 \cdot d_o}{F} \quad (\text{A.2.8.22})$$

- Pèrdua de càrrega:

$$\Delta P_g = f_g \cdot n_{fila} \cdot G_g^2 \cdot \left( \frac{574 + T_{in} + T_{out}}{4868} \right) \quad (\text{A.2.8.23})$$

**Taula A.2.8.8** Pèrdues de càrrega costat fums

| Configuració | $f_g$ | $\Delta P$ [m.m.c.a.] | $\Delta P$ [barg]    |
|--------------|-------|-----------------------|----------------------|
| 1            | 0.204 | 15.3                  | $1.53 \cdot 10^{-3}$ |
| 2            | 0.214 | 7.67                  | $7.67 \cdot 10^{-4}$ |
| 3            | 0.219 | 4.91                  | $4.91 \cdot 10^{-4}$ |
| 4            | 0.230 | 2.49                  | $2.49 \cdot 10^{-4}$ |

Un cop conegut el disseny de l'evaporador per la part calenta o fums, cal realitzar el disseny pertinent pel costat del vapor. Velocitat màssica:

$$G_w = \frac{W_w}{3600 \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \right) \cdot (n \cdot n_{fila})} \quad (\text{A.2.8.24})$$

Viscositat de l'aigua:

$$\mu_w = 0.0148 \cdot T_{sat,w}^{-0.872} \quad (\text{A.2.8.25})$$

La propietat de la viscositat no es modifica en les quatre configuracions, ja que les temperatures en el sobreescalfador són iguals per a les quatre configuracions. Aquest pren el valor de  $1.17 \cdot 10^{-4}$  kg/s·m. Número de *Reynolds*:

$$Re_w = \frac{G_w \cdot d_i}{\mu_w} \quad (\text{A.2.8.26})$$

**Taula A.2.8.9** Paràmetres de disseny de l'evaporador, costat fred

| Configuració | $G_w$ [kg/s·m <sup>2</sup> ] | $Re_w$            |
|--------------|------------------------------|-------------------|
| 1            | 510                          | $60.2 \cdot 10^4$ |
| 2            | 340                          | $40.1 \cdot 10^4$ |
| 3            | 255                          | $30.1 \cdot 10^4$ |
| 4            | 170                          | $20.1 \cdot 10^4$ |

Numero de *Prandtl*:

$$Pr_w = 131 \cdot T_{sat,w}^{-0.932} \quad (\text{A.2.8.27})$$

Calor específic:

$$c_w = 1 + \frac{(T_{sat,w}-93) \cdot (T_{sat,w}-30) \cdot 10^{-5}}{1.627 \cdot (385-T_{sat,w})^{0.357}} \quad (\text{A.2.8.28})$$

El valor per al nombre de *Prandtl* és constant en les quatre configuracions i és de 0.743. Igual que en el cas del calor específic, el qual té un valor de 4.35 kJ/kg·°C. Coeficient de pel·lícula:

- Per a  $Re_w > 10000$ :

$$h_w = 82.8 \cdot G_w \cdot Re_w^{-0.2} \cdot Pr_w^{-(2/3)} \cdot c_w \quad (\text{A.2.8.29})$$

Coeficient de transferència interior:

$$h_i = \frac{1}{\frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_{sw}}} \quad (\text{A.2.8.30})$$

**Taula A.2.8.10** Coeficients de transferència costat fred en kJ/h·m<sup>2</sup>·°C

| Configuració | $h_w$ | $h_i$ |
|--------------|-------|-------|
| 1            | 24800 | 11400 |
| 2            | 18000 | 9670  |

**Taula A.2.8.10** Coeficients de transferència costat fred en  $\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$  (Continuació)

| Configuració | $h_w$ | $h_i$ |
|--------------|-------|-------|
| 3            | 14300 | 8500  |
| 4            | 10300 | 6910  |

Per tal d'avaluar les pèrdues de càrrega en el costat de l'aigua cal realitzar un procediment diferent al emprat en el sobreescalfador, ja que, aquesta pèrdua depèn directament de la convecció natural que hi ha entre el calderí, els col·lectors i la quantitat d'aigua que es recircula. Tota la pèrdua de càrrega en el costat fred de l'evaporador té que garantir la circulació natural. El principi de la circulació natural es basen en la estabilització del flux. Aquesta estabilització es dona quan la pressió motriu, diferència en columnes, s'equilibra amb les pèrdues de càrrega originades per la circulació. La pressió motriu be donada per l'equació A.2.8.31.

$$P_m = \frac{1}{10^4} \left( \frac{H}{v_a} - \frac{W_a \cdot H}{W_v \cdot (v_v - v_a)} \cdot \ln \left( 1 + \frac{W_v}{W_a} \cdot \left( \frac{v_v}{v_a} - 1 \right) \right) \right) \quad (\text{A.2.8.31})$$

En general, les pèrdues en la zona de descens en el circuit són:

$$H_r = h_f - h_x \quad (\text{A.2.8.32})$$

De igual forma, però de pujada:

$$H_d = h_f - h_x \quad (\text{A.2.8.33})$$

Tenint en compte l'equilibri esmentat:

$$P_m = H_r + H_d \quad (\text{A.2.8.34})$$

Per tal de calcular les pèrdues s'empen els procediments típics per l'avaluació de les pèrdues de càrrega: majors ( $h_f$ ) i menors o singulars ( $h_x$ ).

$$h_f = 5.1 \cdot 10^{-6} \cdot v \cdot G^2 \cdot f \cdot \frac{L}{d_i} \quad (\text{A.2.8.35})$$

$$h_x = 5.1 \cdot 10^{-6} \cdot v \cdot G^2 \cdot K \quad (\text{A.2.8.36})$$

Tot seguit, es mostra el conjunt d'accessoris que es troben en el costat fred de l'evaporador amb el nombre d'elements i les característiques emprades en el càlcul de les pèrdues.

**Taula A.2.8.11** Dades i característiques dels accessoris emprats en l'evaporador

| Accessoris   | <i>n</i> | <i>d<sub>i</sub></i> [m] | <i>H/L</i> [m] | <i>K</i> | <i>f</i> |
|--------------|----------|--------------------------|----------------|----------|----------|
| Reg          | 2        | 0.289                    | 12             | 2.5      | 0.013    |
| Connexió     | 36       | 0.078                    | 0              | 3        | 0        |
| Tubs         | 546      | 0.052                    | 10             | 1.5      | 0.022    |
| Transició    | 36       | 0.078                    | 0              | 0.5      | 0        |
| Despreniment | 8        | 0.240                    | 2              | 1        | 0.014    |
| Col·lector A | 4        | 0.267                    | 0              | 2.5      | 0        |
| Col·lector B | 9        | 0.173                    | 0              | 0.5      | 0        |
| Col·lector C | 8        | 0.240                    | 0              | 0.5      | 0        |

On la velocitat màssica (*G*) s'expressa com:

$$G = \frac{W}{n \cdot \left(\pi \cdot \frac{d_i^2}{4}\right) \cdot 3600} \quad (\text{A.2.8.37})$$

Un cop calculades totes les pèrdues major i singulars dels accessoris que es troben en l'evaporador, costat aigua, es troba la quantitat d'aigua saturada que es recircula per tal de garantir la circulació natural.

**Taula A.2.8.12** Pressions motrius, pèrdues de càrrega i aigua recirculada

| Configuració | <i>P<sub>m</sub></i> [barg] | <i>W<sub>a</sub></i> [t/h] | <i>h<sub>f</sub></i> [barg] | <i>h<sub>x</sub></i> [barg] |
|--------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1            | 0.560                       | 161                        | 0.550                       | $9.67 \cdot 10^{-3}$        |
| 2            | 0.539                       | 158                        | 0.529                       | $9.29 \cdot 10^{-3}$        |
| 3            | 0.520                       | 155                        | 0.511                       | $9.0 \cdot 10^{-3}$         |
| 4            | 0.490                       | 151                        | 0.481                       | $8.44 \cdot 10^{-3}$        |

Finalment conegudes les pèrdues en el costat fred, es realitza el balanç global per tal d'obtenir el coeficient de transferència global en l'evaporador:

$$U_{evap} = \frac{K_f}{\frac{1}{h_o} + \frac{d_o}{d_i \cdot h_i}} \quad (\text{A.2.8.38})$$

El paràmetre *K<sub>f</sub>* equival al coeficient de forma el qual pren valor de 0.9.

**Taula A.2.8.13** Coeficient de transferència global

| Configuració | <i>U<sub>evap</sub></i> [kJ/h·m <sup>2</sup> ·C] |
|--------------|--|
| 1            | 1190   |
| 2            | 1090   |
| 3            | 992  |
| 4            | 892  |

Superfície de calefacció:

$$(SC) = \frac{Q_{w,evap}}{U_{evap} \cdot \Delta T_m} \quad (A.2.8.39)$$

Nombre de files:

$$n_{fila} = \frac{(SC)}{(SC)_1 \cdot L \cdot n} \quad (A.2.8.40)$$

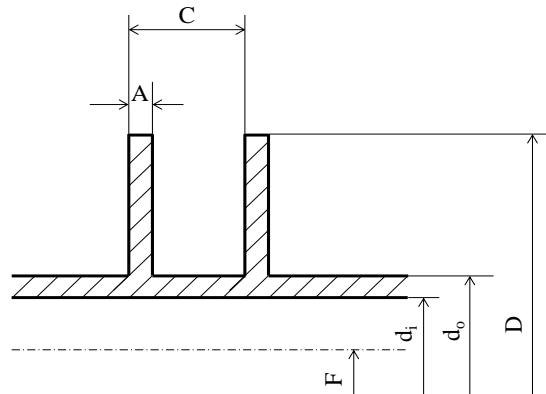
Amb el valor obtingut del nombre de files i de quantitat de tubs necessaris es comprova si coincideixen amb els suposats inicialment, en el cas de no coincidir es modifiquen fins que s'ajusti. Per últim es calcula l'amplada de l'evaporador:

$$A_{evap} = n \cdot d_o + F \cdot \left( \frac{n}{n_{fila} + 1} \right) \quad (A.2.8.41)$$

**Taula A.2.8.14** Resultats mecànics de l'evaporador

| $L$ [m] | $A$ [m] | $H$ [m] | $V_c$ [m <sup>3</sup> ] | $n$ | $n_{fila}$ | $(SC)$ [m <sup>2</sup> ] |
|---------|---------|---------|-------------------------|-----|------------|--------------------------|
| 4       | 5.44    | 10      | 218                     | 546 | 3          | 273                      |

### A.2.9. Dimensionament tèrmic i mecànic del sistema: Economitzador (Ref.1.1)



**Figura A.2.9.1** Esquema aletes economitzador

**Taula A.2.9.1** Especificacions aletes economitzador

| $d_o$ [mm] | $d_i$ [mm] | $A$ [m]             | $C$ [m]             | $D$ [m] |
|------------|------------|---------------------|---------------------|---------|
| 13.5       | 10.8       | $3.5 \cdot 10^{-4}$ | $2.2 \cdot 10^{-3}$ | 0.027   |

Coefficients d'eficiència de les aletes:

$$r_e = \frac{D}{2} \quad (\text{A.2.9.1})$$

$$r_b = \frac{d_o}{2} \quad (\text{A.2.9.2})$$

$$y_b = \frac{A}{2} \quad (\text{A.2.9.3})$$

$$a = \left( 0.22 + 0.093 \cdot \left( \frac{r_e}{r_b} - 1 \right)^{0.8} \right) \cdot \left( \frac{r_e - r_b}{\sqrt{k \cdot y_b}} \right)^{2 \cdot b} \quad (\text{A.2.9.4})$$

$$b = \frac{1}{2} \cdot \left( 1.56 - 0.153 \cdot \left( \frac{r_e}{r_b} - 1 \right)^{0.918} \right) \quad (\text{A.2.9.5})$$

**Taula A.2.9.2** Coeficients d'eficiència de les aletes

| $r_e$ | $r_b$                | $y_b$                | $a$                  | $b$  | $k$ [kJ/h·m·C] |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|------|----------------|
| 0.014 | $6.75 \cdot 10^{-3}$ | $1.75 \cdot 10^{-4}$ | $9.61 \cdot 10^{-3}$ | 0.70 | 167            |

Calor necessari de l'aigua per passar de la temperatura d'alimentació a la de saturació:

$$Q_{v,eco} = W_w \cdot (h_{out} - h_{in}) \quad (\text{A.2.9.6})$$

La transferència entre el fluid fred i el calent es considera que té una pèrdua per radiació del 2%, per tant:

$$Q_{p,eco} + Q_{v,eco} = Q_{g,eco} \quad (\text{A.2.9.7})$$

A partir d'aquí es realitza el balanç d'energia sobre els gasos per obtenir l'entalpia de sortida i, d'aquesta manera, obtenir la temperatura de sortida dels gasos de combustió del sistema de generació de vapor.

$$Q_{g,eco} = W_g \cdot (h_{in} - h_{out}) \quad (\text{A.2.9.8})$$

**Taula A.2.9.3** Temperatures costat vapor

| $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|---------------|----------------|
| 57            | 257.5          |

**Taula A.2.9.4** Temperatures costat fums

| Configuració | $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|--------------|---------------|----------------|
| 1            | 577           | 85.1           |
| 2            | 545           | 79.6           |
| 3            | 507           | 74.4           |

**Taula A.2.9.4** Temperatures costat fums (*Continuació*)

| Configuració | $T_{in}$ [°C] | $T_{out}$ [°C] |
|--------------|---------------|----------------|
| 4            | 475           | 69             |

**Taula A.2.7.5** Flux de calor per a cada un dels costats

| Configuració | $Q_{w,eco}$ [MW] | $Q_{g,eco}$ [MW] | $Q_{p,eco}$ [MW] |
|--------------|------------------|------------------|------------------|
| 1            | 34.6             | 35.3             | 0.706            |
| 2            | 23.1             | 23.5             | 0.471            |
| 3            | 17.3             | 17.7             | 0.353            |
| 4            | 11.5             | 11.8             | 0.235            |

Coneguts els paràmetres anteriors, es realitza el disseny mecànic amb el càlcul de la superfície de calefacció dels tubs tenint en compte les aletes emprades.

$$(SC)_1 = \frac{\pi}{c} \cdot \left( \left( \frac{D^2 - d_o^2}{2} \right) + D \cdot A + d_o \cdot (C - A) \right) \quad (A.2.9.9)$$

La secció unitària lliure de pas de gasos:

$$(S)_1 = \frac{1}{c} \cdot (C \cdot (F - d_o) - A \cdot (D - d_o)) \quad (A.2.9.10)$$

On  $F$  és la separació entre els tubs. El tubs es disposaran de forma regular, per tant i segons els Reglament d'Equips a Pressió i la seva I.T.C MIE-API, la distància entre els centre ha de ser la següent:

$$F = 1.25 \cdot d_o \quad (A.2.9.11)$$

Volum del tub:

$$V_1 = \frac{\pi}{4} \cdot \left( \frac{A \cdot (D^2 - d_o^2)}{c} + d_o^2 \right) \quad (A.2.9.12)$$

Perímetre projectat:

$$(PP)_1 = \frac{2}{c} \cdot (D - d_o + C) \quad (A.2.9.13)$$

Diàmetre equivalent per a la transmissió de calor:

$$d_{ev} = \frac{2 \cdot (SC)_1}{\pi \cdot (PP)_1} \quad (A.2.9.14)$$

Volum lliure net:

$$VLN = F^2 - V_1 \quad (A.2.9.15)$$



Diàmetre equivalent per a la pèrdua de càrrega:

$$D_{ev} = \frac{4 \cdot VLN}{(SC)_1} \quad (A.2.9.16)$$

**Taula A.2.9.6** Resultats referents als tubs

| $(SC)_I$ [ $m^2/m$ ] | $(S)_I$ [ $m^2/m$ ]  | $F$ [m] | $V_I$ [ $m^3/m$ ]    | $(PP)_I$ [m/m] | $d_{ev}$ [m] | $VLN$ [ $m^3/m$ ]    | $D_{ev}$ [m]         |
|----------------------|----------------------|---------|----------------------|----------------|--------------|----------------------|----------------------|
| 0.418                | $2.36 \cdot 10^{-3}$ | 0.021   | $2.73 \cdot 10^{-4}$ | 12             | 0.022        | $1.50 \cdot 10^{-4}$ | $14.3 \cdot 10^{-3}$ |

Primer de tot es calcula la velocitat massica dels gasos de combustió:

$$G_g = \frac{W_g}{3600 \cdot (S)_1 \cdot L \cdot n} \quad (A.2.9.17)$$

Viscositat dels gasos:

$$\mu_g = 157 \cdot 10^{-7} + 132 \cdot 10^{-9} \cdot \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right)^{0.788} \quad (A.2.9.18)$$

Número de *Reynolds* per a la transmissió de calor:

$$Re_{g,Q} = \frac{G_g \cdot d_{ev}}{\mu_g} \quad (A.2.9.19)$$

Conductivitat mitjana:

$$k_g = 376 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right) + 0.023 \quad (A.2.9.20)$$

Calor específic mitjà:

$$c_g = M + N \cdot \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right) \quad (A.2.9.21)$$

**Taula A.2.9.7** Propietats dels fums en l'economitzador

| Configuració | $\mu_g$ [ $kg/s \cdot m^2$ ] | $k_g$ [ $kJ/h \cdot m \cdot ^\circ C$ ] | $c_g$ [ $kJ/kg \cdot ^\circ C$ ] |
|--------------|------------------------------|---|----------------------------------|
| 1            | $2.85 \cdot 10^{-5}$         | 0.151                                   | 1.07                             |
| 2            | $2.79 \cdot 10^{-5}$         | 0.147                                   | 1.07                             |
| 3            | $2.72 \cdot 10^{-5}$         | 0.142                                   | 1.06                             |
| 4            | $2.66 \cdot 10^{-5}$         | 0.138                                   | 1.06                             |

Coefficient de pel·lícula:

$$h_g = 0.0747 \cdot Re_{g,Q}^{0.749} \cdot \frac{k_g}{d_{ev}} \cdot \left( \frac{c_g \cdot \mu_g \cdot 3600}{k_g} \right)^{1/3} \quad (A.2.9.22)$$

Coefficient de transmissió exterior:

$$h_o = \frac{1}{\frac{1}{h_g} + \frac{1}{h_{sg}}} \quad (\text{A.2.9.23})$$

**Taula A.2.9.8** Coeficients de transferència costat calent en kJ/h·m<sup>2</sup>·°C

| Configuració | $h_g$ | $h_o$ |
|--------------|-------|-------|
| 1            | 917   | 825   |
| 2            | 691   | 636   |
| 3            | 603   | 561   |
| 4            | 456   | 431   |

Número de *Reynolds* per a la pèrdua de càrrega:

$$Re_{g,P} = \frac{G_g \cdot D_{ev}}{\mu_g} \quad (\text{A.2.9.24})$$

**Taula A.2.9.9** Paràmetres de disseny de l'economitzador, costat calent

| Configuració | $G_g$ [kg/s·m <sup>2</sup> ] | $Re_{g,Q}$ | $Re_{g,P}$ |
|--------------|------------------------------|------------|------------|
| 1            | 31.7                         | 24700      | 1600       |
| 2            | 22.4                         | 17800      | 1150       |
| 3            | 18.2                         | 14800      | 958        |
| 4            | 12.9                         | 10800      | 696        |

Pèrdua de càrrega costat gasos:

$$\Delta P_g = 5 \cdot 10^{-5} \cdot Re_{g,P}^{-0.134} \cdot G_g^2 \cdot n_{fila} \cdot \left(\frac{F}{D_{ev}}\right)^{0.6} \cdot (546 + T_{in} + T_{out}) \quad (\text{A.2.9.25})$$

**Taula A.2.9.10** Pèrdues de càrrega costat fums

| Configuració | $\Delta P_g$ [m.m.c.a.] | $\Delta P_g$ [barg]  |
|--------------|-------------------------|----------------------|
| 1            | 1450                    | 0.145                |
| 2            | 734                     | $7.34 \cdot 10^{-2}$ |
| 3            | 477                     | $4.77 \cdot 10^{-2}$ |
| 4            | 244                     | $2.44 \cdot 10^{-3}$ |

Un cop conegut el disseny de l'economitzador per la part calenta o fums, cal realitzar el disseny pertinent pel costat de l'aigua. Velocitat massica:

$$G_w = \frac{W_w}{3600 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_i^2}{4}\right) \cdot \left(\frac{n \cdot n_{fila}}{N_{pT}}\right)} \quad (\text{A.2.9.26})$$

$$\mu_w = 0.0148 \cdot \left(\frac{T_{in} + T_{out}}{2}\right)^{-0.872} \quad (\text{A.2.9.27})$$

La propietat de la viscositat no es modifica en les quatre configuracions, ja que les temperatures en el sobreescalfador són iguals per a les quatre configuracions. Aquest pren el valor de  $1.8 \cdot 10^{-4}$  kg/s·m. Número de *Reynolds*:

$$Re_w = \frac{G_w \cdot d_i}{\mu_w} \quad (\text{A.2.9.28})$$

**Taula A.2.9.11** Paràmetres de disseny de l'economitzador, costat fred

| Configuració | $G_w$ [kg/s·m <sup>2</sup> ] | $v_w$ [m/s] | $Re_w$            |
|--------------|------------------------------|-------------|-------------------|
| 1            | 241                          | 2.67        | $1.45 \cdot 10^4$ |
| 2            | 161                          | 1.78        | $9.65 \cdot 10^3$ |
| 3            | 121                          | 1.34        | $7.24 \cdot 10^3$ |
| 4            | 90.4                         | 0.90        | $4.82 \cdot 10^3$ |

Numero de *Prandtl*:

$$Pr_w = 131 \cdot T_{sat,w}^{-0.932} \quad (\text{A.2.9.29})$$

Calor específic:

$$c_w = \frac{\left(\frac{h_{in}}{T_{in}} + \frac{h_{out}}{T_{out}}\right)}{2} \quad (\text{A.2.9.30})$$

El valor per al nombre de *Prandtl* és constant en les quatre configuracions i és de 1.18. Igual que en el cas del calor específic, el qual té un valor de 4.35 kJ/kg·°C. Coeficient de pel·lícula de l'aigua:

- Per  $Re_w > 10000$ :

$$h_w = 82.8 \cdot G_w \cdot Re_w^{-0.2} \cdot Pr_w^{-(2/3)} \cdot c_w \quad (\text{A.2.9.31})$$

- Per  $Re_w < 10000$ :

$$h_w = 417.6 \cdot G_w \cdot c_w \cdot \left(\frac{Re_w^{2/3} - 125}{Re_w}\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{d_i}{L}\right)^{2/3}\right) \cdot Pr_w^{-(2/3)} \quad (\text{A.2.9.32})$$

Coeficient de transferència interior:

$$h_i = \frac{1}{\frac{1}{h_w} + \frac{1}{h_{sw}}} \quad (\text{A.2.9.33})$$

**Taula A.2.9.12** Coeficients de transferència costat fred en  $\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ 

| Configuració | $h_w$ | $h_i$ |
|--------------|-------|-------|
| 1            | 11100 | 7240  |
| 2            | 8750  | 6200  |
| 3            | 6660  | 5070  |
| 4            | 4270  | 3560  |

Volum específic aigua:

$$v_w = 0.001 + 582 \cdot 10^{-9} \cdot \left( \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \right)^{1.93} \quad (\text{A.2.9.34})$$

El volum específic de l'aigua en aquest tram depèn directament i exclusivament de les temperatures d'entrada i sortida, per tant i degut que en les diverses configuracions aquesta dependència no varia, el valor del volum específic és constant i pren valor de  $0.011 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

Pèrdua de càrrega en el costat fred:

- Coeficient de pèrdua de càrrega: expressió de *Colebrook*

$$\frac{1}{\sqrt{f_w}} + 2 \cdot \log \left( \frac{2.51}{Re_v \cdot \sqrt{f_w}} + \frac{0.046}{3700 \cdot d_i} \right) = 0 \quad (\text{A.2.9.35})$$

- Pèrdua de càrrega

$$\Delta P_w = 5.1 \cdot 10^{-6} \cdot v_w \cdot G_w^2 \cdot \left( 2 + n_{fila} \cdot N_{pT} \cdot \left( 0.5 \cdot \left( \frac{F}{2 \cdot d_i} \right)^{-0.6} + f_w \cdot \frac{L}{d_i} \right) \right) \quad (\text{A.2.9.36})$$

**Taula A.2.9.13** Pèrdues de càrrega costat vapor

| Configuració | $f_w$ | $\Delta P_w$ [barg] |
|--------------|-------|---------------------|
| 1            | 0.035 | 0.854               |
| 2            | 0.037 | 0.402               |
| 3            | 0.039 | 0.238               |
| 4            | 0.042 | 0.115               |

Coneguts tots els paràmetres dels dos costats i les pèrdues de càrrega es realitza el balanç global en l'economitzador. Eficiència de les aletes:

$$\Omega = 1 - a \cdot h_g^b \quad (\text{A.2.9.37})$$

**Taula A.2.9.14** Eficiència aletes

| Configuració | $\Omega$ [%] |
|--------------|--------------|
| 1            | 59.1         |
| 2            | 66.0         |

**Taula A.2.9.14** Eficiència aletes (*Continuació*)

| Configuració | $\Omega$ [%] |
|--------------|--------------|
| 3            | 69.7         |
| 4            | 74.7         |

Coefficient de transferència global:

$$U_{eco} = \frac{K_f}{\frac{1}{h_g \cdot \Omega} + \frac{(SC)_1}{d_i \cdot h_i \cdot \pi}} \quad (\text{A.2.9.38})$$

El paràmetre  $K_f$  equival al coeficient de forma el qual pren valor de 0.9.

Salt tèrmic:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{g,in} - T_{w,out}) - (T_{g,out} - T_{w,in})}{\ln\left(\frac{(T_{g,in} - T_{w,out})}{(T_{g,out} - T_{w,in})}\right)} \quad (\text{A.2.9.39})$$

**Taula A.2.9.15** Coeficient de transferència global i salt tèrmic

| Configuració | $U_{sobres}$ [kJ/h·m <sup>2</sup> ·C] | $\Delta T_m$ [°C] |
|--------------|---------------------------------------|-------------------|
| 1            | 249                                   | 120               |
| 2            | 212                                   | 104               |
| 3            | 182                                   | 87.2              |
| 4            | 139                                   | 71                |

Superfície de calefacció:

$$(SC) = \frac{Q_{w,eco}}{U_{eco} \cdot \Delta T_m} \quad (\text{A.2.7.40})$$

Nombre de files:

$$n_{fila} = \frac{(SC)}{(SC)_1 \cdot L \cdot n} \quad (\text{A.2.7.41})$$

Amb el valor obtingut del nombre de files es comprova si coincideix amb el suposat inicialment. Per últim es calcula l'amplada de l'economitzador:

$$A_{eco} = n \cdot d_o + F \cdot \left(\frac{n}{n_{fila} + 1}\right) \quad (\text{A.2.7.38})$$

**Taula A.2.9.16** Resultats mecànics de l'economitzador

| $L$ [m] | $A$ [m] | $H$ [m] | $V_c$ [m <sup>3</sup> ] | $n$  | $n_{fila}$ | $N_{pT}$ | $(SC)$ [m <sup>2</sup> ] |
|---------|---------|---------|-------------------------|------|------------|----------|--------------------------|
| 3       | 2.83    | 6       | 85                      | 1015 | 13         | 1        | 4790                     |

**A.2.10. Especificació canonades****Taula A.2.10.1** Especificacions canonades

| Corrent | Nom línia           | $D_{nominal}$ | $t$ [mm] | Fluid           | L [m] | Aïllant [mm] | $H_{in}$ [m] | $H_{out}$ [m] |
|---------|---------------------|---------------|----------|-----------------|-------|--------------|--------------|---------------|
| 1       | 8001-5''5S-L/LP     | 5'            | 2.11     | Líquid          | 68    | 38.1         | 5            | 4.5           |
| 2       | 8002-3''5S-L/LP     | 3'            | 2.11     | Líquid          | 68    | 0            | 5            | 4.5           |
| 3       | 8003-1/8''10S-CG/LP | 1/8'          | 1.24     | Combustible Gas | 67.5  | 0            | 5            | 5             |
| 4       | 8004-1/4''10S-CG/LP | 1/4'          | 1.65     | Combustible Gas | 67.5  | 0            | 5            | 5             |
| 5       | 8005-5''5S-L/LP     | 5'            | 2.11     | Líquid          | 8.05  | 38.1         | 0.5          | 0.25          |
| 6       | 8006-1/4''10S-CG/LP | 1/4'          | 1.65     | Combustible Gas | 36    | 0            | 5            | 3             |
| 7       | 8007-5''40S-L/HP    | 5'            | 6.55     | Líquid          | 32.3  | 38.1         | 0.25         | 1.5           |
| 8       | 8008-5''40S-L/HP    | 5'            | 6.55     | Líquid          | 7.67  | 38.1         | 1.5          | 7.5           |
| 9       | 8009-5''40S-L/HP    | 5'            | 6.55     | Líquid          | 7.67  | 38.1         | 1.5          | 7.5           |
| 10      | 8010-1/4''10S-CG/LP | 1/4'          | 1.65     | Combustible Gas | 1.35  | 0            | 3            | 3             |
| 11      | 8011-1/4''10S-CG/LP | 1/4'          | 1.65     | Combustible Gas | 1.35  | 0            | 3            | 3             |
| 12      | 8012-1''1/25S-V/HP  | 1/2'          | 1.65     | Vapor           | 14.3  | 76.2         | 13.5         | 8.5           |
| 13      | 8013-1''1/25S-V/HP  | 1/2'          | 1.65     | Vapor           | 4.81  | 76.2         | 13.5         | 8.5           |
| 14      | 8014-2''5S-G/LP     | 2'            | 1.65     | Gasos combustió | 7     | 38.1         | 7            | 8             |
| 15      | 8015-2''5S-G/LP     | 2'            | 1.65     | Gasos combustió | 7     | 50.8         | 7            | 8             |
| 16      | 8016-1''1/25S-V/HP  | 1/2'          | 1.65     | Vapor           | 114   | 76.2         | 8.5          | 5             |
| 17      | 8017-2''5S-G/LP     | 2'            | 1.65     | Gasos combustió | 104   | 50.8         | 8            | 5             |

ANNEX

**A.2.11. Pressupost unitat**

**Taula A.2.11.1** Pressupost sistema de generació de vapor

| <b>Camp</b>                   | <b>Detall</b>   |                      |
|-------------------------------|---|----------------------|
| <i>Obra Civil</i>             | Moviment de terres i fonaments<br>Bancada equips i estructures metàl·liques   |                      |
|                               |   | <b>Subtotal [M€]</b> |
| <i>Equips mecànics</i>        | Calderes aquotubulars<br>- Potència 120MWt<br>- 7 cremadors duobloc low Nox (20MWt)<br>- 1015 tubs AISI 316 (economitzador)<br>- 546 tubs de Alloy RA 253 MA (evaporador)<br>- 128 tubs de Alloy RA 253 MA (sobreescalfador)<br>Desgasificador<br>- Volum: 75 m <sup>3</sup><br>- Xapa AISI 316 de 3.5mm gruix<br>Bomba multietapa SIHI Multi125C<br>Muntatge mecànic |                      |
|                               |   | <b>Subtotal [M€]</b> |
| <i>Canonades i accessoris</i> | Canonades i accessoris<br>Vàlvules manuals de bloqueig<br>Vàlvules manuals<br>Disc cec  | 62<br>1<br>4<br>1    |
|                               |   | <b>Subtotal [M€]</b> |

ANNEX

**Taula A.2.11.1** Pressupost sistema de generació de vapor (*Continuació*)

*Instrumentació*

Transmissor pressió  
Transmissor temperatura  
Transmissor cabal  
Transmissor nivell  
Analitzador de conductivitat  
Analitzador concentració  $CO_2$  en aigua  
Analitzador concentració  $O_2$  en gasos de combustió  
Analitzador concentració  $NO_x$  en gasos de combustió  
Analitzador pH  
Analitzador *TDL*  
Analitzador poder calorífic  
Vàlvules de control  
Integració sistema control  
Programació sistema de control

**Subtotal [M€]**

*Electricitat*

Motors  
Cel·les i cablejat elèctric

**Subtotal [M€]**

*Enginyeria*

**Subtotal [M€]**

*Imprevistos*

**Subtotal [M€]**

**Total projecte [M€]**



**A.2.12. Compte de resultats****Taula A.2.12.1** Compte de resultats inicial

|                                     | <b>Any 1</b> | <b>Any 2</b>   | <b>Any 3</b> | <b>Any 4</b> | <b>Any 5</b> | <b>Any 6</b> | <b>Any 7</b> |
|-------------------------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Cost variable [M€]</b>           | 18.9         | 18.9           | 18.9         | 18.9         | 18.9         | 18.9         | 18.9         |
| <b>Estalvi [M€]</b>                 | 9.1          | 9.1            | 9.1          | 9.1          | 9.1          | 9.1          | 9.1          |
| <b>Estalvi parada [M€]</b>          | 1.8          | 1.8            | 1.8          | 1.8          | 1.8          | 1.8          | 1.8          |
| <b>Benefici abans impostos [M€]</b> | -8.0         | -8.0           | -8.0         | -8.0         | -8.0         | -8.0         | -8.0         |
| <b>Impostos [M€]</b>                | -2.8         | -2.8           | -2.8         | -2.8         | -2.8         | -2.8         | -2.8         |
| <b>Benefici net [M€]</b>            | -10.8        | -10.8          | -10.8        | -10.8        | -10.8        | -10.8        | -10.8        |
| <b>Amortització [M€]</b>            | 1.0          | 1.1            | 1.1          | 1.2          | 1.3          | 1.3          | 1.4          |
| <b>Flux de caixa [M€]</b>           | -9.7         | -9.7           | -9.6         | -9.6         | -9.5         | -9.5         | -9.4         |
| <b>Acumulat [M€]</b>                | -22.8        | -32.5          | -42.2        | -51.8        | -61.3        | -70.8        | -80.2        |
| <b>VAN [M€]</b>                     | -86.5        | <b>TIR [%]</b> | ---          |              |              |              |              |

**Taula A.2.12.2** Compte de resultats amb benefici net zero

|                                     | <b>Any 1</b> | <b>Any 2</b>   | <b>Any 3</b> | <b>Any 4</b> | <b>Any 5</b> | <b>Any 6</b> | <b>Any 7</b> |
|-------------------------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Cost variable [M€]</b>           | 17.1         | 17.1           | 17.1         | 17.1         | 17.1         | 17.1         | 17.1         |
| <b>Estalvi [M€]</b>                 | 1.8          | 1.8            | 1.8          | 1.8          | 1.8          | 1.8          | 1.8          |
| <b>Estalvi parada [M€]</b>          | 0            | 0              | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            |
| <b>Benefici abans impostos [M€]</b> | 0            | 0              | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            |
| <b>Impostos [M€]</b>                | 0            | 0              | 0            | 0            | 0            | 0            | 0            |
| <b>Benefici net [M€]</b>            | 1.0          | 1.1            | 1.1          | 1.2          | 1.3          | 1.3          | 1.4          |
| <b>Amortització [M€]</b>            | 1.0          | 1.1            | 1.1          | 1.2          | 1.3          | 1.3          | 1.4          |
| <b>Flux de caixa [M€]</b>           | 0.0          | 0.0            | 0.0          | 0.0          | 0.0          | 0.0          | 0.0          |
| <b>Acumulat [M€]</b>                | -22.8        | -32.5          | -42.2        | -51.8        | -61.3        | -70.8        | -80.2        |
| <b>VAN [M€]</b>                     | -3.18        | <b>TIR [%]</b> | 0            |              |              |              |              |

ANNEX

**Taula A.2.12.3** Compte de resultats amb preu vapor de 31€/t

|                                     | <b>Any 1</b> | <b>Any 2</b>   | <b>Any 3</b> | <b>Any 4</b> | <b>Any 5</b> | <b>Any 6</b> | <b>Any 7</b> |
|-------------------------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Cost variable [M€]</b>           | 18.9         | 18.9           | 18.9         | 18.9         | 18.9         | 18.9         | 18.9         |
| <b>Estalvi [M€]</b>                 | 17.5         | 17.5           | 17.5         | 17.5         | 17.5         | 17.5         | 17.5         |
| <b>Estalvi parada [M€]</b>          | 1.8          | 1.8            | 1.8          | 1.8          | 1.8          | 1.8          | 1.8          |
| <b>Benefici abans impostos [M€]</b> | 0.4          | 0.4            | 0.4          | 0.4          | 0.4          | 0.4          | 0.4          |
| <b>Impostos [M€]</b>                | 0.1          | 0.1            | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1          | 0.1          |
| <b>Benefici net [M€]</b>            | 0.6          | 0.6            | 0.6          | 0.6          | 0.6          | 0.6          | 0.6          |
| <b>Amortització [M€]</b>            | 1.0          | 1.1            | 1.1          | 1.2          | 1.3          | 1.3          | 1.3          |
| <b>Flux de caixa [M€]</b>           | 1.6          | 1.6            | 1.7          | 1.8          | 1.8          | 1.9          | 1.9          |
| <b>Acumulat [M€]</b>                | -11.5        | -9.9           | -8.2         | -6.4         | -4.6         | -2.7         | -1.1         |
| <b>VAN [M€]</b>                     | 1.07         | <b>TIR [%]</b> |              | 6.56         |              |              |              |

**Taula A.2.12.4** Compte de resultats per configuració 2 amb preu vapor del 2009/2010

|                                     | <b>Any 1</b> | <b>Any 2</b>   | <b>Any 3</b> | <b>Any 4</b> | <b>Any 5</b> | <b>Any 6</b> | <b>Any 7</b> |
|-------------------------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Cost variable [M€]</b>           | 15.5         | 15.5           | 15.5         | 15.5         | 15.5         | 15.5         | 15.5         |
| <b>Estalvi [M€]</b>                 | 15.9         | 15.9           | 15.9         | 15.9         | 15.9         | 15.9         | 15.9         |
| <b>Estalvi parada [M€]</b>          | 1.8          | 1.8            | 1.8          | 1.8          | 1.8          | 1.8          | 1.8          |
| <b>Benefici abans impostos [M€]</b> | 2.2          | 2.2            | 2.2          | 2.2          | 2.2          | 2.2          | 2.2          |
| <b>Impostos [M€]</b>                | 0.8          | 0.8            | 0.8          | 0.8          | 0.8          | 0.8          | 0.8          |
| <b>Benefici net [M€]</b>            | 2.9          | 2.9            | 2.9          | 2.9          | 2.9          | 2.9          | 2.9          |
| <b>Amortització [M€]</b>            | 1.0          | 1.1            | 1.1          | 1.2          | 1.3          | 1.3          | 1.3          |
| <b>Flux de caixa [M€]</b>           | 4.0          | 4.0            | 4.1          | 4.1          | 4.2          | 4.3          | 4.3          |
| <b>Acumulat [M€]</b>                | -9.1         | -5.1           | -1.0         | 3.1          | 7.3          | 11.6         | 15.9         |
| <b>VAN [M€]</b>                     | 19.4         | <b>TIR [%]</b> |              | 29.0         |              |              |              |

### **A.3. ANNEX 3: Anàlisi de l'Off-Gas**

En aquest annex es detalla el procediment emprat en l'anàlisi de l'*Off-Gas* des de que es prenen mostres a camp fins que s'obtenen els resultats de les cromatografies.

#### **A.3.1. Objectius**

Els objectius de l'anàlisi de l'*Off-Gas* és trobar, mitjançant els mètodes establerts en el laboratori de PDH, la composició d'aquest corrent i comprovar les dependències dels resultats respecte els paràmetres del procés. Es seleccionen els millors resultats per tal de ser normalitzats i poder ser emprats en la realització de tot el disseny del sistema de generació de vapor d'alta pressió.

#### **A.3.2. Presca de mostra**

El punt de pressca de mostres s'anomena *SN-7703*. El terme SN indica que es un punt on els analistes de la planta prenen mostres del procés per tal de conèixer les propietats del corrent. El mostreig es realitza en planta i per tant és obligatori dur els elements de protecció individual establerts per la planta, apartat 5.6. de l'informe. La presca de mostra es realitza emprant un globus de mostreig, el qual s'usa quan la mostra a prendre es troba en estat gas.

Primerament, es localitza la línia de mostreig, que es troba adaptada a la presca de mostres. Degut a que el flux de procés pot transportar o retenir traces d'aigua es purga la línia de mostreig durant uns minuts, amb la finalitat de treure l'aigua i, d'aquesta manera, no contaminar la mostra. En el moment que la línia es troba purgada, es col·loca es globus de mostreig en la presca de mostra i s'infla. Igual que la línia, el globus s'ha de purgar, ja que s'ha d'eliminar tota la quantitat d'aire contingut dins del mateix. El procediment de purga del globus és molt senzill: primer s'infla i aplicant pressió es desinfla per una sortida i que, prèviament, s'ha tret el tap. El procediment de purga del globus es realitza entre 5 i 10 vegades. Finalment un cop purgat, es pren la mostra de l'*Off-Gas*.

### **A.3.3. Mètodes d'anàlisi**

L'Off-Gas és una mescla d'hidrogen, hidrocarburs amb traces de monòxid de carboni i possibles traces de compostos sulfurats. Degut això, en el laboratori es tenen diversos mètodes d'anàlisi diferents per tal de determinar de forma acurada i precisa la composició d'aquest flux de procés.

L'anàlisi complet de l'*Off-Gas* es realitza en tres cromatògrafs de gasos diferents, els quals treballen seguint un mètode diferent que li ordena l'ordenador. Això significa que els cromatògrafs poden treballar amb diferents mostres, ja que el seu mètode d'anàlisi canvia segons l'ordre que li es enviada des de l'ordenador.

En la determinació de la composició de l'*Off-Gas* s'empren tres cromatògrafs diferents amb diferents mètodes. En el primer cromatògraf s'analitzen els sulfurats; en el segon, el hidrogen i els hidrocarburs i; en el tercer, el monòxid i el diòxid de carboni.

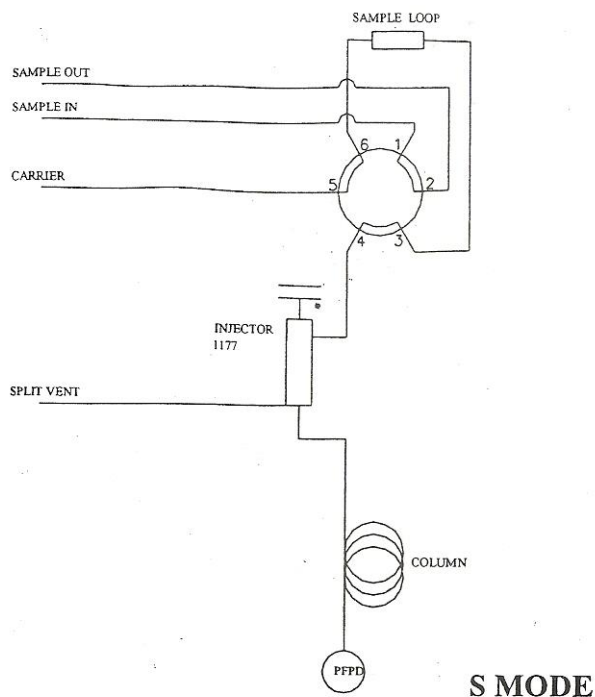
El primer de tots té un detector *PFD* (detector fotomètric de flama per polsos) el qual mesura totes les quantitats i les representa com a ppm equivalents de  $H_2S$ . Per que fa al detector d'hidrocarburs i hidrogen, analitza ambdós en dos canals diferents, és a dir, en un canal s'analitza el hidrogen i en un altre els hidrocarburs, aquest cromatògraf usa un detector *TCD* que mesura la conductivitat tèrmica. Per últim, el detector del monòxid i el diòxid de carboni empra un detector *FIT* el qual analitza la ionització de la flama.

### **A.3.4. Sulfurats**

En aquest apartat es detalla el procediment seguit en l'anàlisi dels compostos sulfurats en l'*Off-Gas*. L'anàlisi es realitza mitjançant una cromatografia de gasos, la qual mesura totes les quantitats i les dona, com a resultats, en ppm equivalents de  $H_2S$ . Com al mostra es troba pràcticament a pressió atmosfèrica s'ha d'emprar una bomba de buit que faciliti i garanteixi l'introducció de la mostra en el cromatògraf.

Quan el globus amb la mostra es troba col·locat i la bomba de buit connectada, es purga el *loop* mitjançant la bomba de buit. L'equip necessita 30 segons per trobar-se en estat estable i és en aquest moment, quan el cromatògraf detecta que està purgat l'equip es posa en estat *ready* per tal d'introduir el mètode a emprar i el número de mostra. Arribat en aquest punt s'inicia el mètode.

### CHANNEL FOR SULFUR COMPOUNDS



**Figura A.3.4.1** Esquema cromatògraf de detecció de sulfurats

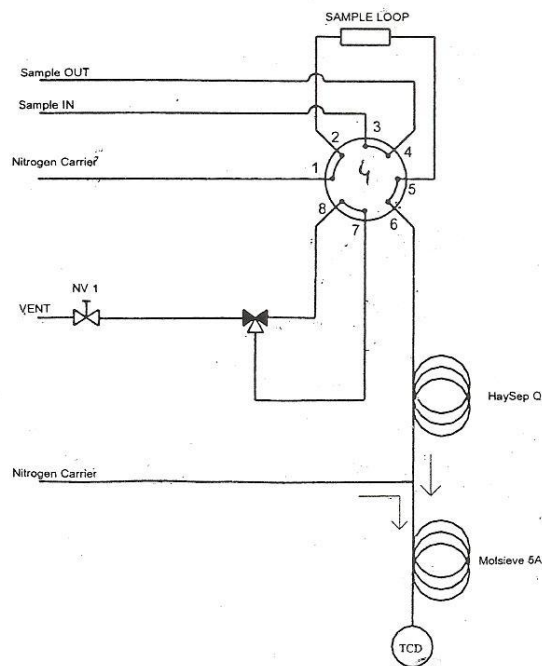
Generalment el temps d'anàlisi i detecció dels compostos sulfurats de l'*Off-Gas* dura al voltant d'uns 25 minuts.

#### **A.3.5. Hidrocarburs i hidrogen**

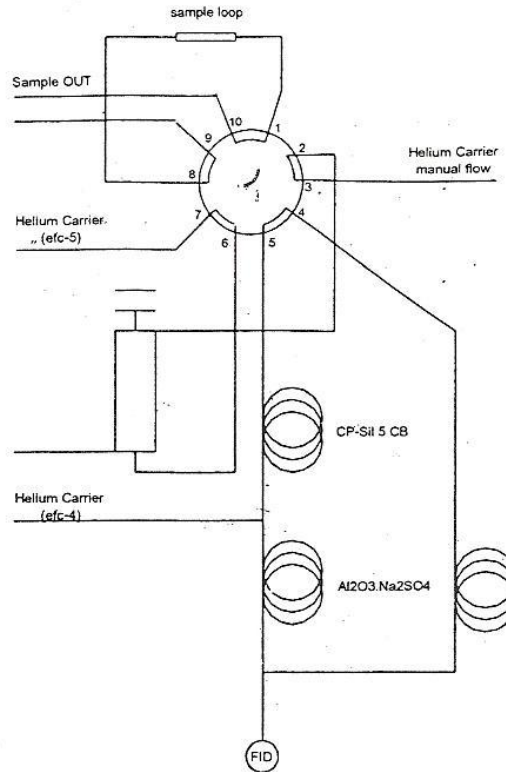
En aquest apartat es detalla el procediment que es realitza en la detecció dels hidrocarburs i el hidrogen present en la mostra. En aquest anàlisi s'usa un segon cromatògraf i s'empren d'aquest dos canals, un per la detecció del hidrogen i l'altre per l'anàlisi dels

hidrocarburs. En aquest anàlisi l'objectiu és quantificar acuradament la quantitat d'hidrogen, per aquest motiu la concentració donada sempre es en base al resultat d'hidrogen, és a dir, la quantitat d'hidrocarburs sobre hidrogen es troba normalitzada.

Per a la detecció primerament es purga l'equip mitjançant nitrogen. Un cop purgat, s'encén la bomba de buit, igual que per la detecció dels sulfurats, per tal de que es doni flux entre el globus i el cromatògraf. Quan la bomba de buit es troba encesa, s'introdueix en l'ordinador corresponent el número de mostra i el mètode requerit. S'espera 2 minuts per a què el cromatògraf es trobi ajustat, estable i llest per iniciar la detecció. Passats 2 minuts s'atura la bomba de buit, cal prestar atenció al possible retorn de la succió. Aquest pas en el mètode emprat perquè la mostra ha d'estar a pressió atmosfèrica. S'inicia la detecció. La injecció dura aproximadament 1 min. Passats 3 minuts aproximadament s'obtenen els resultats pel hidrogen i es pot iniciar, pel canal corresponent, la detecció dels hidrocarburs els quals es detecten seguin el mateix procediment que pel hidrogen.



**Figura A.3.5.1** Esquema cromatògraf de detecció hidrogen



**Figura A.3.5.2** Esquema cromatògraf de detecció hidrocarburs

### A.3.6. Monòxid i diòxid de carboni

En aquest apartat es presenta el procediment següent en la detecció del monòxid i diòxid de carboni present en les mostres d'*Off-Gas* presses. De la mateixa forma que en les dues cromatografies anteriors, es col·loca el globus de mostreig en l'entrada corresponent del cromatògraf. En aquesta detecció degut a que hi ha poca restricció, l'equip es purga sol i no necessita d'una bomba de buit.

Un cop l'equip es troba purgat, s'inicia el mètode que es desitja en l'ordinador corresponent del laboratori introduint, prèviament, el número de mostra. S'inicia el mètode de detecció i s'obtenen els resultats desitjats.

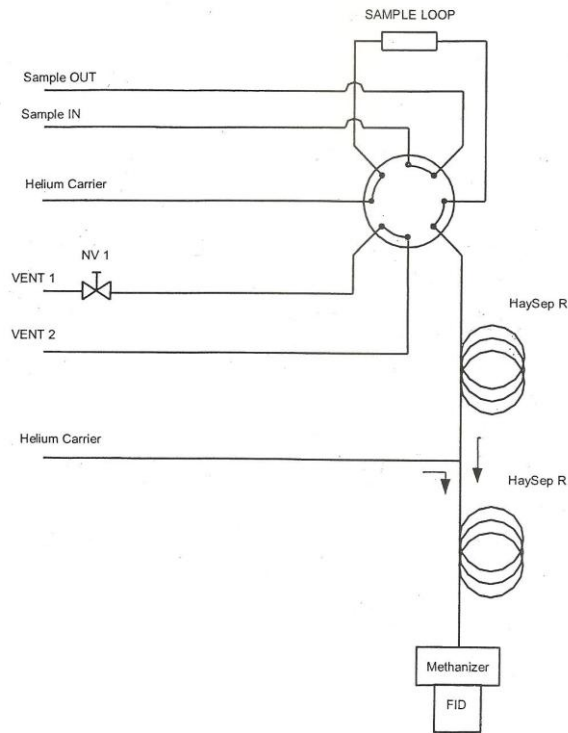


Figura A.3.6.1 Esquema cromatògraf de detecció CO/CO<sub>2</sub>

### A.3.7. Resultats obtinguts

En aquest aparta es mostren els resultats obtinguts en el laboratori de les diverses preses de mostres realitzades. Els resultats presentats van des de les concentracions d'hidrocarburs i hidrogen, juntament amb les concentracions de sulfurats i CO/CO<sub>2</sub> fins a les propietats de l'*Off-Gas*. Aquestes propietats són d'interès termodinàmic (poder calorífic) i de caràcter físic (densitats i pes molecular).

Degut a que l'objectiu d'aquest estudi és conèixer la composició d'aquest corrent i observar quina dependència hi ha respecte el comportament del procés i els paràmetres que hi intervenen, s'han pres 8 mostres del procés (amb catalitzador antic i amb un funcionament erroni del *Cold Box*) i segons el seu anàlisi s'han pres 4 (catalitzador nou) del històric de la planta per tal d'extraure conclusions sobre el comportament i incidència del procés sobre aquest.



## ANNEX

Taula A.3.7.1 Resultats *Off-Gas*

|   | M1       | M2       | M3       | M4       | M5       | M6       | M7       | M8      |   |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|---|
| <b>Data de presa</b>                        | 21/01/11 | 26/01/11 | 28/01/11 | 02/02/11 | 25/10/11 | 28/10/11 | 31/10/11 | 3/11/11 | 1 |
| <b>Hidrogen</b>                             | 77.3     | 76.9     | 75.3     | 79.5     | 73.1     | 74.3     | 73.8     | 73.4    |   |
| <b>Metà</b>                                 | 9.8      | 10.2     | 11.1     | 9.5      | 12.7     | 11.9     | 12.0     | 12.1    |   |
| <b>Età</b>                                  | 10.3     | 11.6     | 11.0     | 9.1      | 12.5     | 11.7     | 12.3     | 12.3    |   |
| <b>Etilè</b>                                | 0.692    | 0.800    | 0.921    | 0.590    | 1        | 1        | 1.03     | 1.04    |   |
| <b>Propà</b>                                | 0.437    | 0.114    | 0.342    | 0.279    | 0.187    | 0.299    | 0.225    | 0.291   |   |
| <b>Propilè</b>                              | 0.007    | 0.007    | 0.008    | 0.008    | 0.009    | 0.007    | 0.008    | 0.007   |   |
| <b>i-Butà</b>                               | 0.702    | 0.175    | 0.362    | 0.633    | 0.342    | 0.477    | 0.378    | 0.480   |   |
| <b>n-Butà</b>                               | 0.303    | 0.069    | 0.424    | 0.152    | 0.063    | 0.123    | 0.087    | 0.111   |   |
| <b>t-2-Butà</b>                             | 0.124    | 0.022    | 0.117    | 0.058    | 0.013    | 0.050    | 0.030    | 0.037   |   |
| <b>1-Butè</b>                               | 0.107    | 0.023    | 0.098    | 0.060    | 0.021    | 0.049    | 0.035    | 0.044   |   |
| <b>i-Butè</b>                               | 0.078    | 0.019    | 0.068    | 0.049    | 0.020    | 0.038    | 0.029    | 0.035   |   |
| <b>c-2-Butè</b>                             | 0.083    | 0.016    | 0.079    | 0.044    | 0.011    | 0.034    | 0.022    | 0.027   |   |
| <b>i-Pentà</b>                              | 0.01     | 0.003    | 0.009    | 0.008    | 0.003    | 0.007    | 0.005    | 0.006   |   |
| <b>n-Pentà</b>                              | 0.006    | 0.002    | 0.005    | 0.004    | 0.001    | 0.003    | 0.002    | 0.002   |   |
| <b>1,3-Butadiè</b>                          | ---      | ---      | ---      | ---      | ---      | ---      | ---      | ---     |   |
| <b>Pesats</b>                               | 0.087    | 0.020    | 0.084    | 0.042    | 0.008    | 0.041    | 0.020    | 0.025   |   |
| <b>CO [ppm-vol]</b>                         | 284      | 279      | 242      | 316      | 266      | 298      | 244      | 361     |   |
| <b>CO<sub>2</sub> [ppm-vol]</b>             | 22       | 69       | 66       | 87       | 83       | 28       | 77       | 90      |   |
| <b>H<sub>2</sub>S [ppm]</b>                 | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2    |   |
| <b>COS [ppm]</b>                            | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2    |   |
| <b>CH<sub>3</sub>SH [ppm]</b>               | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2    |   |
| <b>Sulfurats [ppm, eq. H<sub>2</sub>S]</b>  | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2     | <0,2    |   |
| <b>PCI [MJ/m<sup>3</sup>]</b>               | 21.0     | 20.3     | 21.5     | 19.6     | 21.8     | 21.6     | 21.7     | 21.9    |   |
| <b>Densitat absoluta [kg/m<sup>3</sup>]</b> | 0.334    | 0.319    | 0.346    | 0.302    | 0.354    | 0.348    | 0.351    | 0.357   |   |

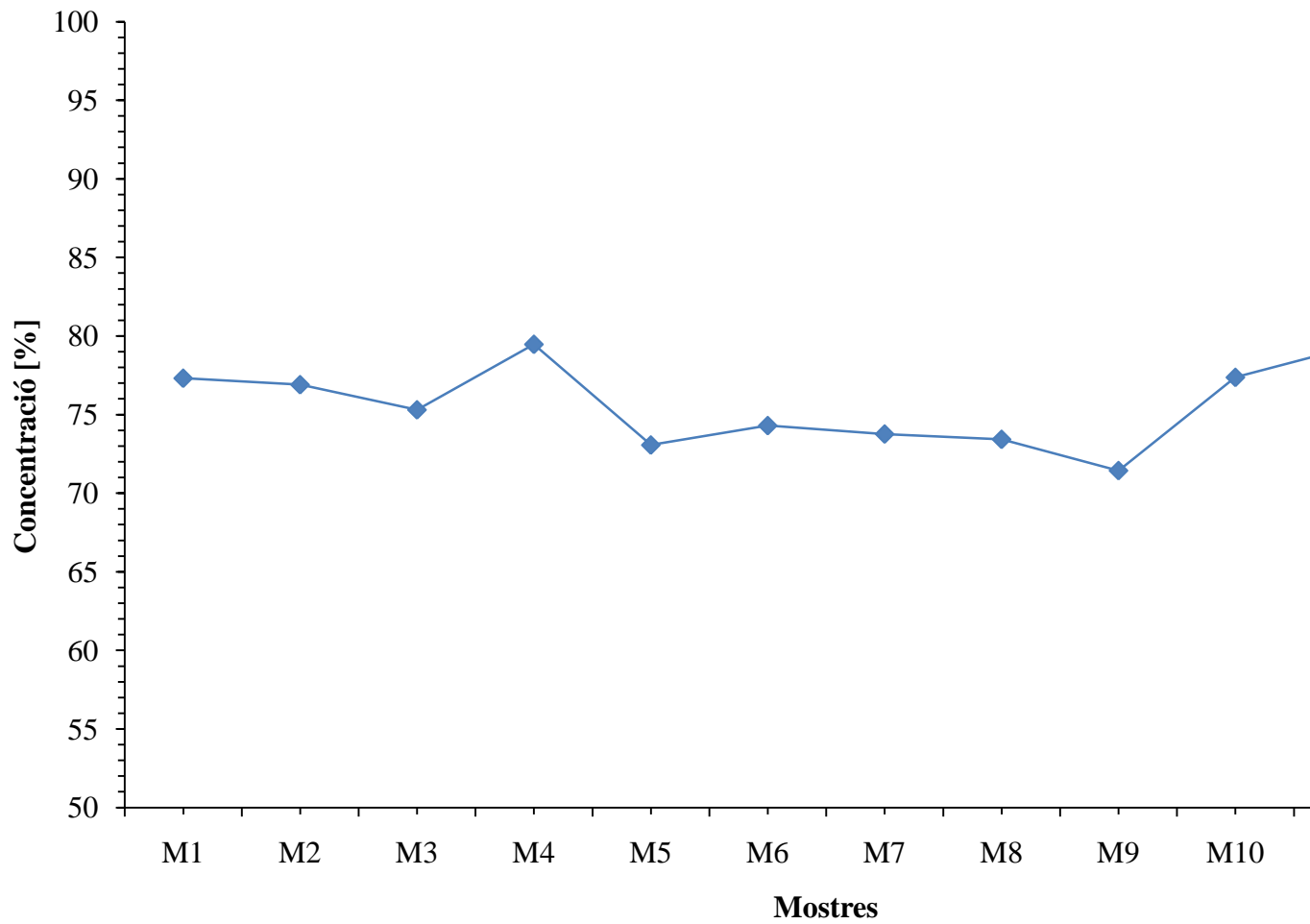


Figura A.3.7.1 Tendència hidrogen

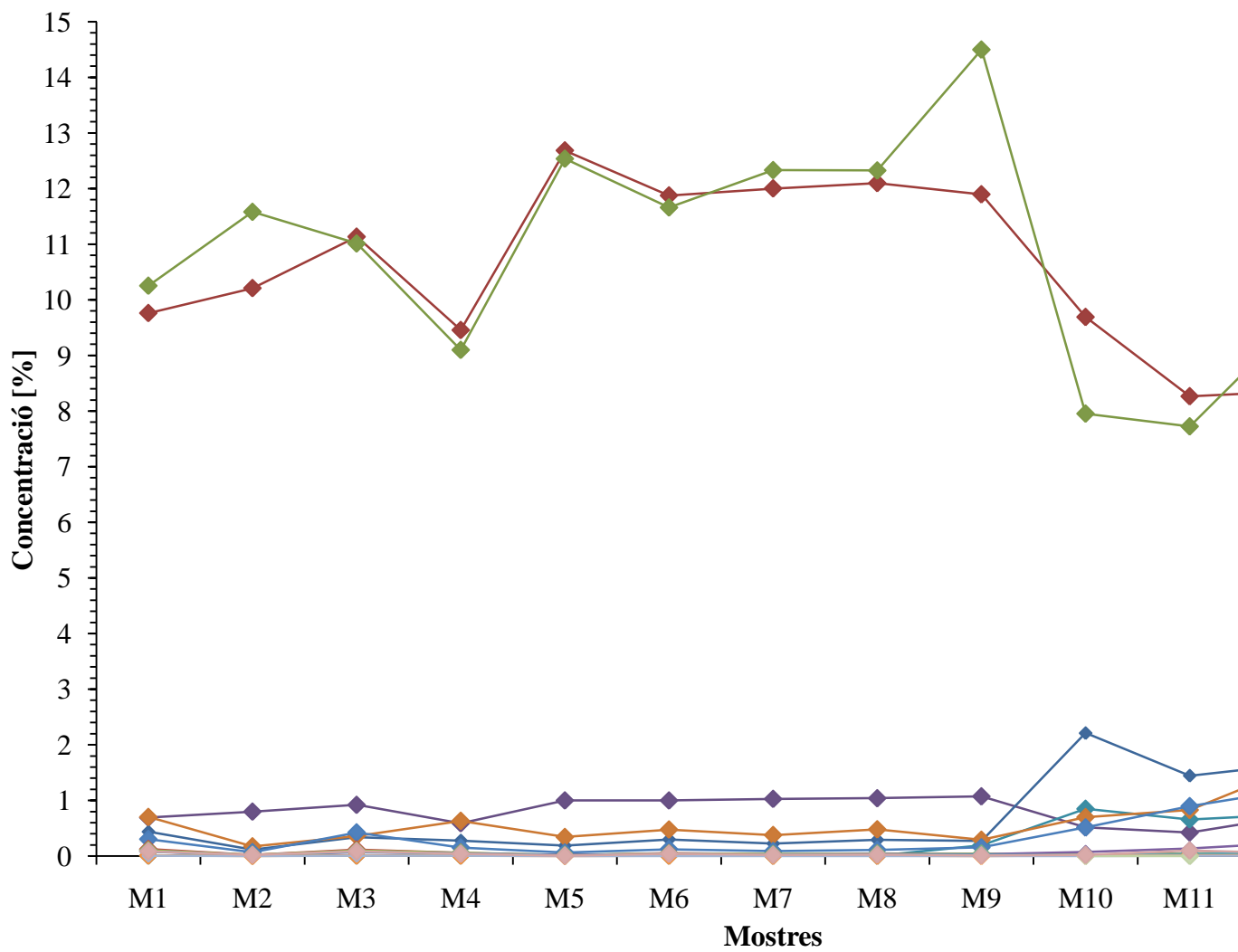


Figura A.3.7.2 Tendència hidrocarburs

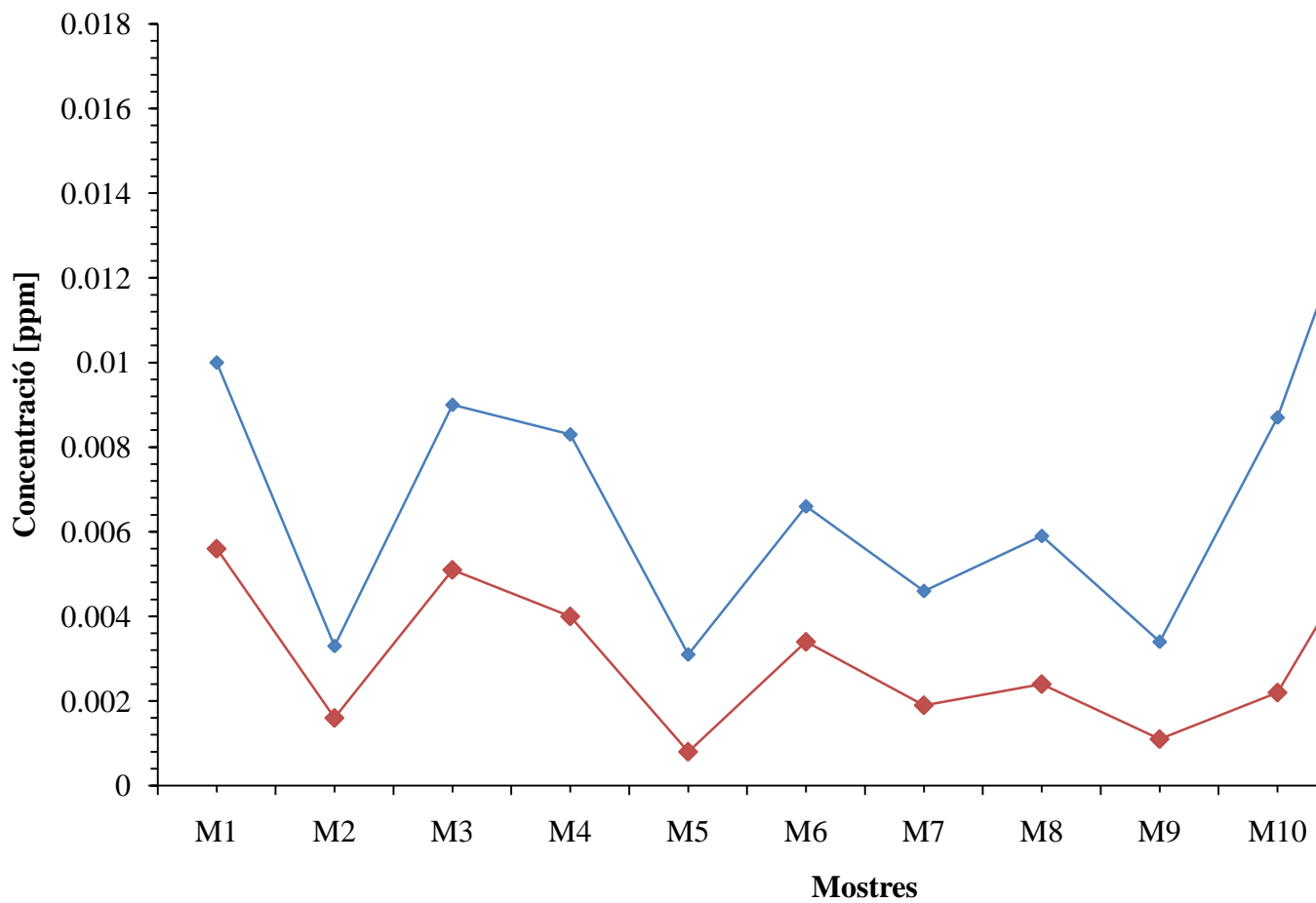


Figura A.3.7.3 Tendència monòxid i diòxid de carboni

Observant les tendències anteriors es pot confirmar les premisses i hipòtesis inicials sobre l'*Off-Gas*, les quals són les de que és un flux variable i canviant i molt dependent del procés. Aquest flux té una gran dependència de les temperatures de la reacció del procés així com de l'estat del catalitzador. Si s'observen detingudament les tendències s'aprecien tres zones característiques. En les primeres mostres les quals corresponen a les extremitats del històric, s'observa com el procés es troba operant amb un catalitzador nou, aquest fet s'observa perquè hi ha més concentració d'hidrogen i menys concentració de metà, età i etilè. Això significa que la selectivitat del catalitzador és bona i, per tant, no es generen productes no desitjats en els reactors.

Tot seguit en la zona central de la mostra 5 fins la 9, s'observa com la concentració d'hidrogen és inferior a les 4 mostres anteriors, a més si s'observa detingudament la figura A.3.7.1 s'aprecia com les concentracions d'hidrocarburs com el metà o l'età augmenta. Aquest fet és originat perquè en aquestes dates el catalitzador emprat en la planta és antic i, degut això, aquest ha perdut eficiència. L'eficiència del catalitzador s'expressa a partir de la selectivitat de la reacció i, com l'eficiència es perd al llarg del temps d'ús, hi ha més productes no desitjats en el procés originat per la pèrdua de selectivitat.

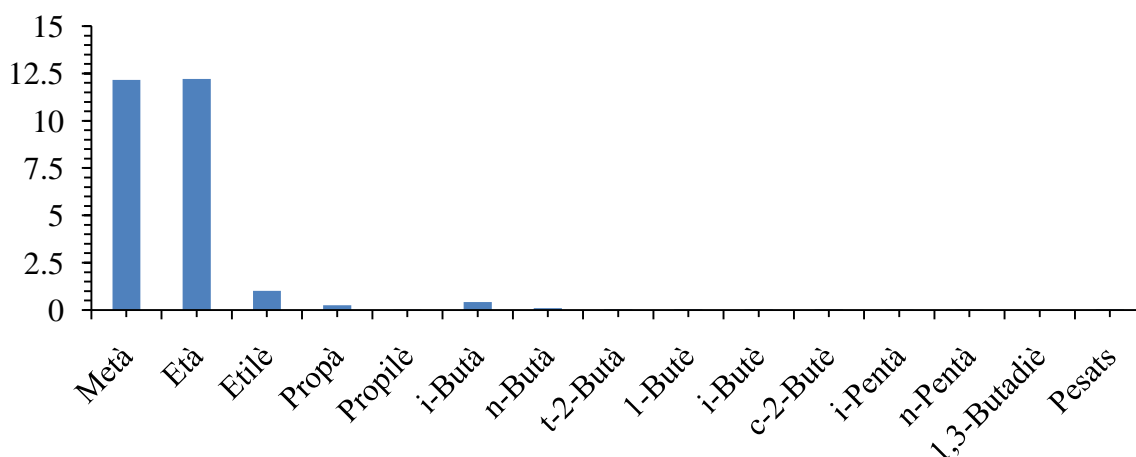
Per últim, es troben les 3 darreres mostres les quals es van analitzar quan el *Cold Box* restava trencat. Que aquest equip estigués trencat donava lloc a que la temperatura de la *Cold Box* augmentés significativament, fet que donava lloc a una separació entre els productes no desitjats, elements no reaccionats, productes i hidrogen més dolenta. Generalment, quan el *Cold Box* opera de forma satisfactòria els  $C_2$  marxen cap al deetanitzador i els  $C_3$  es condensen i es separen en l'*splitter*. En canvi quan aquest opera erròniament com és el cas, l'augment de temperatura dona lloc a un augment de la concentració de  $C_2$  i  $C_3$  en el corrent d'*Off-Gas*. Per aquest motiu, la figura A.3.7.1 mostra com la concentració de propà i propilè augmenta.

Analitzat el conjunt de resultats s'ha decidit que els resultats que millor descriuen el comportament de l'*Off-Gas* durant l'operativa de la planta és conjunt de mostres centrals, és a dir, aquelles mostres on el catalitzador és troba usat i amb menys eficiència, però amb tots els equips operant satisfactòriament. Per aquest motiu s'ha emprat el rang de mostres del 5 al 8 per tal de normalitzar la composició del flux. Com es pot observar s'ha descartat la mostra número 9 perquè donava un punt diferent en la concentració d'età. Tot seguit, es presenta

l'especificació obtinguda en el laboratori de l'*Off-Gas* juntament amb els valors màxims i mínims. A més es detallen l'error de totes les mostres respecta la mostra mitjana obtinguda.

**Taula A.3.7.2** Especificació *Off-Gas*

|   | Mínim | Mijana | Màxim |
|---|-------|--------|-------|
| <b>Hidrogen</b>                             | 73.1  | 73.6   | 74.3  |
| <b>Metà</b>                                 | 11.9  | 12.2   | 12.7  |
| <b>Età</b>                                  | 11.7  | 12.2   | 12.5  |
| <b>Etilè</b>                                | 1.00  | 1.02   | 1.04  |
| <b>Propà</b>                                | 0.187 | 0.250  | 0.299 |
| <b>Propilè</b>                              | 0.007 | 0.008  | 0.009 |
| <b>i-Butà</b>                               | 0.342 | 0.419  | 0.480 |
| <b>n-Butà</b>                               | 0.063 | 0.096  | 0.123 |
| <b>t-2-Butà</b>                             | 0.013 | 0.032  | 0.050 |
| <b>1-Butè</b>                               | 0.021 | 0.037  | 0.049 |
| <b>i-Butè</b>                               | 0.020 | 0.031  | 0.038 |
| <b>c-2-Butè</b>                             | 0.011 | 0.023  | 0.034 |
| <b>i-Pentà</b>                              | 0.003 | 0.005  | 0.007 |
| <b>n-Pentà</b>                              | 0.001 | 0.002  | 0.003 |
| <b>1,3-Butadiè</b>                          | 0     | 0      | 0     |
| <b>Pesats</b>                               | 0.008 | 0.024  | 0.041 |
| <b>CO [ppm-vol]</b>                         | 244   | 292.25 | 361   |
| <b>CO<sub>2</sub> [ppm-vol]</b>             | 28    | 69.5   | 90    |
| <b>H<sub>2</sub>S [ppm]</b>                 | <0.2  | <0.2   | <0.2  |
| <b>COS [ppm]</b>                            | <0.2  | <0.2   | <0.2  |
| <b>CH<sub>3</sub>SH [ppm]</b>               | <0.2  | <0.2   | <0.2  |
| <b>Sulfurats [ppm, eq. H<sub>2</sub>S]</b>  | <0.2  | <0.2   | <0.2  |
| <b>PCI [MJ/m<sup>3</sup>]</b>               | 21.6  | 21.7   | 21.9  |
| <b>Densitat absoluta [kg/m<sup>3</sup>]</b> | 0.348 | 0.3525 | 0.357 |



**Figura A.3.7.4** Especificació *Off-Gas* sense tenir en compte l'hidrogen

ANNEX

Taula A.3.7.3 Error en les mostres

|   | M1      | M2      | M3      | M4      | M5      | M6      | M7      | M8      |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| <b>Hidrogen</b>                             | ± 2.60  | ± 2.31  | ± 1.18  | ± 4.13  | ± 1.56  | ± 0.468 | ± 0.089 | ± 0.151 |
| <b>Metà</b>                                 | ± 1.70  | ± 1.38  | ± 0.728 | ± 1.91  | ± 0.190 | ± 0.205 | ± 0.115 | ± 0.048 |
| <b>Età</b>                                  | ± 1.39  | ± 0.447 | ± 0.849 | ± 2.20  | ± 1.62  | ± 0.391 | ± 0.084 | ± 0.079 |
| <b>Etilè</b>                                | ± 0.231 | ± 0.154 | ± 0.068 | ± 0.303 | ± 0.041 | ± 0.013 | ± 0.008 | ± 0.016 |
| <b>Propà</b>                                | ± 0.132 | ± 0.097 | ± 0.065 | ± 0.020 | ± 0.017 | ± 0.035 | ± 0.018 | ± 0.029 |
| <b>Propilè</b>                              | ± 0.001 | 0       | 0       | 0       | ± 0.130 | 0       | 0       | ± 0.001 |
| <b>i-Butà</b>                               | ± 0.200 | ± 0.173 | ± 0.040 | ± 0.151 | ± 0.090 | ± 0.041 | ± 0.029 | ± 0.043 |
| <b>n-Butà</b>                               | ± 0.147 | ± 0.019 | ± 0.232 | ± 0.040 | ± 0.042 | ± 0.019 | ± 0.006 | ± 0.011 |
| <b>t-2-Butà</b>                             | ± 0.065 | ± 0.007 | ± 0.059 | ± 0.018 | ± 0.002 | ± 0.013 | ± 0.002 | ± 0.003 |
| <b>1-Butè</b>                               | ± 0.049 | ± 0.010 | ± 0.043 | ± 0.016 | ± 0.002 | ± 0.009 | ± 0.002 | ± 0.005 |
| <b>i-Butè</b>                               | ± 0.034 | ± 0.009 | ± 0.026 | ± 0.013 | ± 0.001 | ± 0.005 | ± 0.002 | ± 0.003 |
| <b>c-2-Butè</b>                             | ± 0.042 | ± 0.005 | ± 0.039 | ± 0.014 | 0       | ± 0.008 | ± 0.001 | ± 0.003 |
| <b>i-Pentà</b>                              | ± 0.004 | ± 0.001 | ± 0.003 | ± 0.002 | ± 0.001 | ± 0.001 | 0       | ± 0.001 |
| <b>n-Pentà</b>                              | ± 0.002 | 0       | ± 0.002 | ± 0.001 | ± 0.001 | ± 0.001 | 0       | 0       |
| <b>1,3-Butadiè</b>                          | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       | 0       |
| <b>Pesats</b>                               | ± 0.044 | ± 0.003 | ± 0.043 | ± 0.013 | ± 0.008 | ± 0.012 | ± 0.002 | ± 0.001 |
| <b>CO [ppm-vol]</b>                         | ± 5.83  | ± 9.37  | ± 35.5  | ± 16.8  | ± 6.54  | ± 4.07  | ± 34.1  | ± 48.6  |
| <b>CO<sub>2</sub> [ppm-vol]</b>             | ± 33.6  | ± 0.350 | ± 2.47  | ± 12.4  | ± 13.8  | ± 29.3  | ± 5.30  | ± 14.0  |
| <b>PCI [MJ/m<sup>3</sup>]</b>               | ± 0.531 | ± 0.980 | ± 0.171 | ± 1.49  | ± 0.878 | ± 0.119 | ± 0.043 | ± 0.135 |
| <b>Densitat absoluta [kg/m<sup>3</sup>]</b> | ± 0.013 | ± 0.024 | ± 0.005 | ± 0.036 | ± 0.021 | ± 0.003 | ± 0.001 | ± 0.003 |

### A.3.8. Conclusions

Primerament concloure que, efectivament, el corrent d'*Off-Gas* és un corrent canviant i variable i que té una gran dependència del comportament del procés. Fet lògic si es té en compte que aquest flux és un fluid residual.

Els paràmetres que s'han observat que afecten a la composició d'aquest corrent són: l'estat de vida del catalitzador, ja que d'aquest depèn directament la producció de productes no desitjats com el metà o l'età entre d'altres i si la seva selectivitat es veu alterada pel temps de producció; les temperatures de reacció, aquestes van directament lligades amb l'estat de vida del catalitzador, per tant un és causa de l'altre; per últim, el funcionament del *Cold Box*, aquest té un gran efecte perquè aquest equip és l'encarregat de separar els productes de l'hidrogen i dels productes no desitjats, per tant si el seu funcionament o operativa es veu afectat els equilibris que es donen entre els compostos i que permeten la seva separació es veuen alterats i els productes que s'haurien de condensar no condensen i la composició de l'*Off-Gas* resta alterada.

Un cop analitzat l'*Off-Gas* es conclou que independentment de l'operativa del procés és un corrent ric en hidrogen. Per altra banda, l'*Off-Gas* consta d'una altra gran part que el conforma, 20 o 25%, la qual correspon a una mescla d'hidrocarburs. D'aquesta mescla s'observa com els compostos majoritaris són el metà i l'età. Coneguda la composició de l'*Off-Gas*, es determina que és un corrent útil per emprar com a combustible encara que s'hauria d'estudiar les necessitat energètiques per tal de garantir la potència requerida i, alhora, observar i comprovar la necessitat d'emprar un segon combustible en el conjunt de les calderes a dissenyar.

Per últim i en referència al ús d'aquest corrent com a combustible citar que la concentració de sulfurats és molt petita. Aquest fet característic en la composició de l'*Off-Gas* és positiu perquè, si la presència dels sulfurats és tant reduïda, no hi hauran problemes de corrosió àcida provinent d'aquests compostos en les calderes.



## A.4. ANNEX 4: Fulls d'especificació

### A.4.1. Bombes


| PUMP CALCULATION SUMMARY SHEET |                             |                          |                    |                  |   |                    |       |
|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|------------------|---|--------------------|-------|
| P-8001 A/B                     |                             |                          |                    |                  |   |                    |       |
| 1                              | Nº OF PUMPS                 | 2                        | RUN:               | SPARE:           | <p style="text-align: center;"><b>SKETCH</b></p>  |                    |       |
| 2                              | SERVICE                     |                          |                    |                  |   |                    |       |
| 3                              |                             |                          |                    |                  |   |                    |       |
| 4                              |                             |                          |                    |                  |   |                    |       |
| 5                              | MAT'L PUMPED                |                          |                    |                  |   |                    |       |
| 6                              | OPER. TEMP                  | 57                       |                    | °C               |   |                    |       |
| 7                              | DENSITY                     | 983                      |                    | kg/m3            |   |                    |       |
| 8                              | VISCOSITY                   | 4.61·10 <sup>-4</sup>    |                    | Pa.s             |   |                    |       |
| 9                              | VAPOR PRESS.(abs.)          | 0.17                     |                    | bar              |   |                    |       |
| 10                             | NORM.CAPACITY               | 150                      |                    | m3/s             |   |                    |       |
| 11                             | EXCESS CAPACITY             | 150                      |                    | m3/s             |   |                    |       |
| 12                             | MAX.CAPACITY                | 150                      |                    | m3/s             |   |                    |       |
| 13                             |                             |                          |                    |                  |   |                    |       |
| 14                             | <b>SUCTION CONDITIONS</b>   |                          |                    |                  |   |                    |       |
| 15                             | NET LIQUID HEAD ON          | 0.25                     |                    | m                |   |                    |       |
| 16                             | SUCTION                     | 25.2                     |                    | bar              |   |                    |       |
| 17                             | PR. AT EQUIPM.(abs.)        |                          |                    | bar              |   |                    |       |
| 18                             | LINE PRESS.DROP             | 0.131                    |                    | bar              |   |                    |       |
| 19                             | TOTAL SUCT.PR.(abs.)        |                          |                    | bar              |   |                    |       |
| 20                             | NPSH (m.w.c.)               | 254                      |                    | m                |   |                    |       |
| 21                             |                             |                          |                    |                  |   |                    |       |
| 22                             | <b>DISCHARGE CONDITIONS</b> |                          |                    |                  |   |                    |       |
| 23                             | LIQUID HEAD                 |                          |                    | bar              |   |                    |       |
| 24                             | PR. AT EQUIP.(abs.)         |                          |                    | bar              |   |                    |       |
| 25                             | EQUIP.PR.DROP               |                          |                    | bar              |   |                    |       |
| 26                             | EQUIP.PR.DROP               |                          |                    | bar              |   |                    |       |
| 27                             | EQUIP.PR.DROP               |                          |                    | bar              |   |                    |       |
| 28                             | EQUIP.PR.DROP               |                          |                    | bar              |   |                    |       |
| 29                             | EQUIP.PR.DROP               |                          |                    | bar              |   |                    |       |
| 30                             | LINE PRESS. DROP            | 0.123                    |                    | bar              |   |                    |       |
| 31                             | TOTAL DISCH.PR.(abs.)       | 50.3                     |                    | bar              |   |                    |       |
| 32                             | DIFF.PRESSURE               | 25.1                     |                    | bar              |   |                    |       |
| 33                             | DIFF.HEAD (m.w.c.)          | 258                      |                    | m                |   |                    |       |
| 34                             | <b>PUMP REQUIREMENTS</b>    |                          | <b>SUCTION</b>     |                  | <b>DISCHARGE</b>  |                    |       |
| 35                             | TYPE PUMP                   | Modular MultiStage       | LINE SIZE          | 8.1              | LINE SIZE   | 32.25              |       |
| 36                             | ESTIMATED EFF.              | 80                       | %                  | HORIZON.RUN      | 7.8   | m                  |       |
| 37                             | ESTIMATED Rot.freq.         |                          | s-1                | VERT.RUN         | 0.3   | m                  |       |
| 38                             | ESTIMATED Power             | 130                      | kw                 | ELBOW L.R.       | 2x 0.35   | m                  |       |
| 39                             | TYPE DRIVER                 |                          |                    | ELBOW M.R.       | PCS   | m                  |       |
| 40                             | STEAM (abs.)                |                          | bar                | CHECK VALVE      | PCS   | m                  |       |
| 41                             | EXHAUST (abs.)              |                          | bar                | BALL VALVE       | PCS   | m                  |       |
| 42                             | ELECTRICITY                 | V:                       | Ph:                | Hz               | GATE VALVE  | PCS                |       |
| 43                             | ENCLOSURE                   |                          |                    | PLUG VALVE       | PCS   | m                  |       |
| 44                             |                             |                          |                    | GLOBE VALVE      | PCS   | m                  |       |
| 45                             |                             |                          |                    | DIAPHR. VALVE    | PCS   | m                  |       |
| 46                             | <b>PUMP MATERIALS</b>       |                          | CONTR. VALVE       | PCS              | m   | CONTR. VALVE       | PCS   |
| 47                             | CASE                        | GC-25/EN-GJL 250         | STRAINER           | PCS              | m   | STRAINER           | PCS   |
| 48                             | IMPELLER                    | GC-25/EN-GJL195          | TEE                | 0.35             | m   | TEE                | PCS   |
| 49                             | SHAFT                       | X20Cr 13                 | OTHERS             |                  | m   | OTHERS             | m     |
| 50                             | SHAFT SLEEVE                | X35CrMo 17               | TOTAL              | 1.34             | m   | TOTAL              | 1.25  |
| 51                             | SEAL/PACKING                | various Material Options |                    |                  |   |                    |       |
| 52                             | GASKETS                     | various Material Options | FRICITION          |                  | bar/m   | FRICITION          | bar/m |
| 53                             | GEAR                        |                          | LINE PRESSURE DROP | 0.131            | bar   | LINE PRESSURE DROP | 0.123 |
| 54                             | PISTON                      |                          | (FILL IN LINE 18)  |                  |   | (FILL IN LINE 18)  |       |
| 55                             |                             |                          |                    |                  |   |                    |       |
| JOB NO.                        |                             | CHARGE NO.               |                    |                  |   |                    |       |
| MS NO.                         |                             | P.O.NO.                  |                    |                  |   |                    |       |
| NO.UNITS                       |                             |                          |                    |                  |   |                    |       |
| DR.BY                          |                             | DATE:                    |                    |                  |   |                    |       |
| CK.BY                          |                             | DATE:                    |                    |                  |   |                    |       |
| REV                            | BY                          | OK                       | DATE               |                  |   |                    |       |
|                                |                             |                          |                    |                  |   |                    |       |
|                                |                             |                          |                    | SHEET No. 1 OF 3 |   |                    |       |

Figura A.4.1.1 Full d'especificació bomba

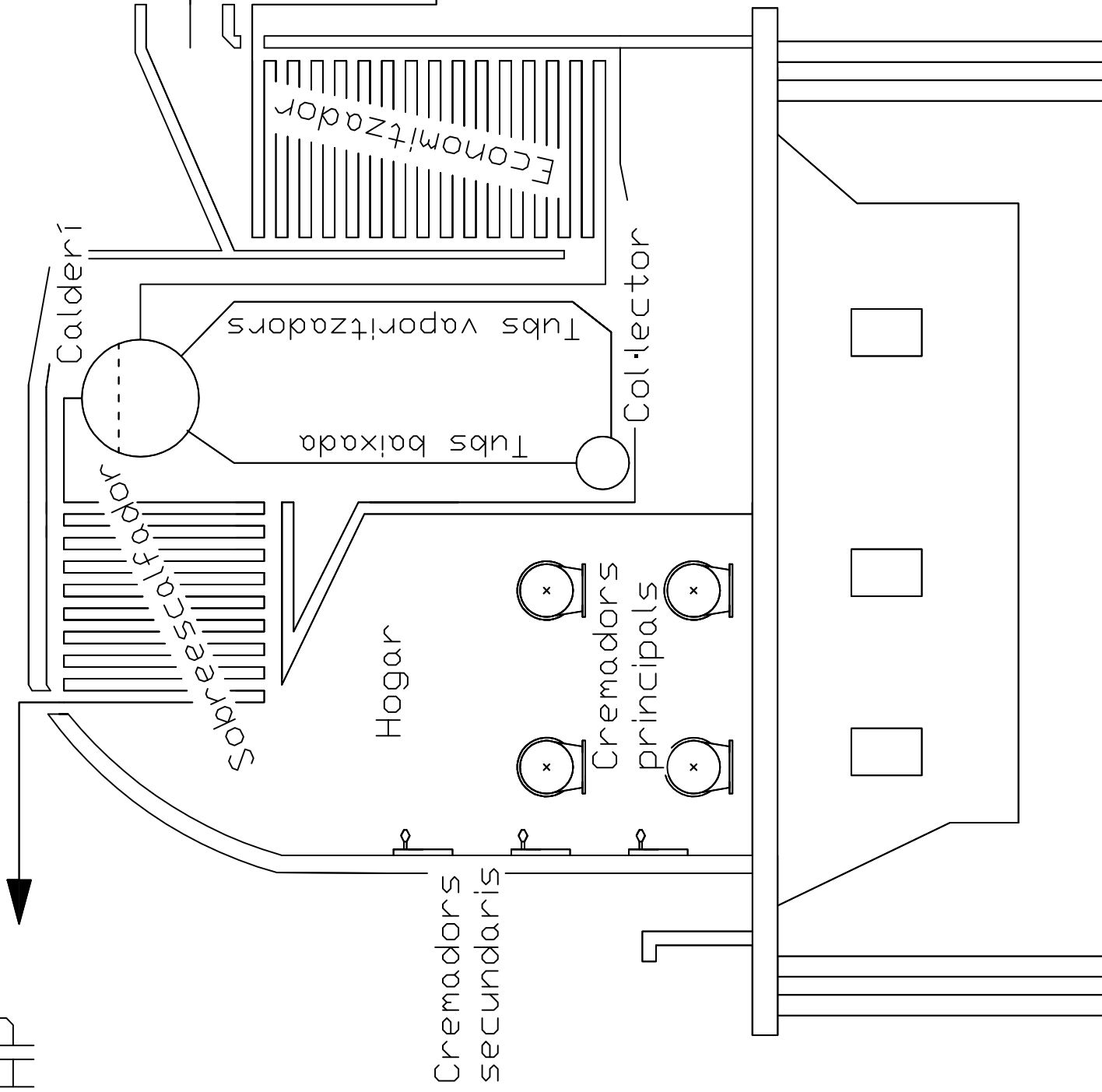
A.4.2. V-8001

| V-8001   |                            |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
|--|----------------------------|-------------------------------|------------------|------|------------------------------------|--|---------------|---------------------|---------------|--|
| 1  | DESIGN DATA                | Manufacturer:                 |                  |      | Total Volume: 75 m3                |  |               |                     |               |  |
| 2  |                            | Operating Pressure (eff.) bar |                  | 0    | Type Supports:                     |  |               |                     |               |  |
| 3  |                            | Operating Temperature °C      |                  | 60   | Insulation: 1.5 in                 |  |               |                     |               |  |
| 4  |                            | Liquid Density Kg/m3          |                  | ##   | Fire proofing                      |  |               |                     |               |  |
| 5  |                            | Contents Lethal               |                  | No   | Sand blast:                        |  |               | Paint:              |               |  |
| 6  |                            | Design Pressure (eff.) bar    |                  | 2    | Manhole: Hinged - Davited - Other: |  |               |                     |               |  |
| 7  |                            | Design Temperature °C         |                  | 80   | Platform clips:                    |  | Ladder clips: |                     | Insul. Rings: |  |
| 8  |                            | MAWP (eff.) bar               |                  | 1    |                                    |  |               |                     |               |  |
| 9  |                            | Limited by                    |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 10   |                            | Hydrostatic Test (eff.) bar   |                  | 2    | Wt. Empty N                        |  |               | Wt. Full of Water N |               |  |
| 11   | Shell                      | Heads Corr. Allow. mm         |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 12   | Shell                      | Heads Joint Eff.              |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 13   | Code: ASME Sec. VII div. 1 |                               | Certificate :    |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 14   | Radiograph : Partial       |                               | Stress Relieve : |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 15   | Seismic: Yes - No          |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 16   | MATERIALS                  | Item                          | Thickness        | Type | Mat'l Min. Quality                 |  |               |                     |               |  |
| 17   |                            | Cylinder                      | 4 mm             |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 18   |                            | Ellipsoidal Head              | 4 mm             | 2:1  |                                    |  |               |                     |               |  |
| 19   |                            | Lining                        | mm               |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 20   |                            |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 21   |                            |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 22   |                            | Cylinder                      | AISI 316         |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 23   |                            | Ellipsoidal Head              | AISI 316         |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 24   |                            | Nozzle Necks                  |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 25   |                            | Flanges                       |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 26   | Coupling                   |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 27   | M.H.Cover                  |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 28   | Supports                   |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 29   | Bolts/Studs                |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 30   | Nuts                       |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 31   | Gaskets                    |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| 32   |                            |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| * Nozzle to be plugged or blinded                                    |                            |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| Vendor to complete all applicable information not given by Purchaser |                            |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| JOB NO.  |                            |                               | CHARGE NO.       |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| M/S NO   |                            |                               | P.O. NO.         |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| NO. UNITS  |                            |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| DR. BY   |                            |                               | DATE             |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| CK. BY   |                            |                               | DATE             |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| REV.   | BY                         | CK                            | DATE             |      |                                    |  |               |                     |               |  |
|  |                            |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
|  |                            |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |
| SHEET No. 2 OF 3   |                            |                               |                  |      |                                    |  |               |                     |               |  |

Figura A.4.2.1 Full d'especificació V-8001



Vapor HP



Condensat

Aire

Gas Natural

Sistema de generació de vapor

Vapor HP

Torre d'absorció clor+secadors

REC Compressor

Reactors DLEFLEX

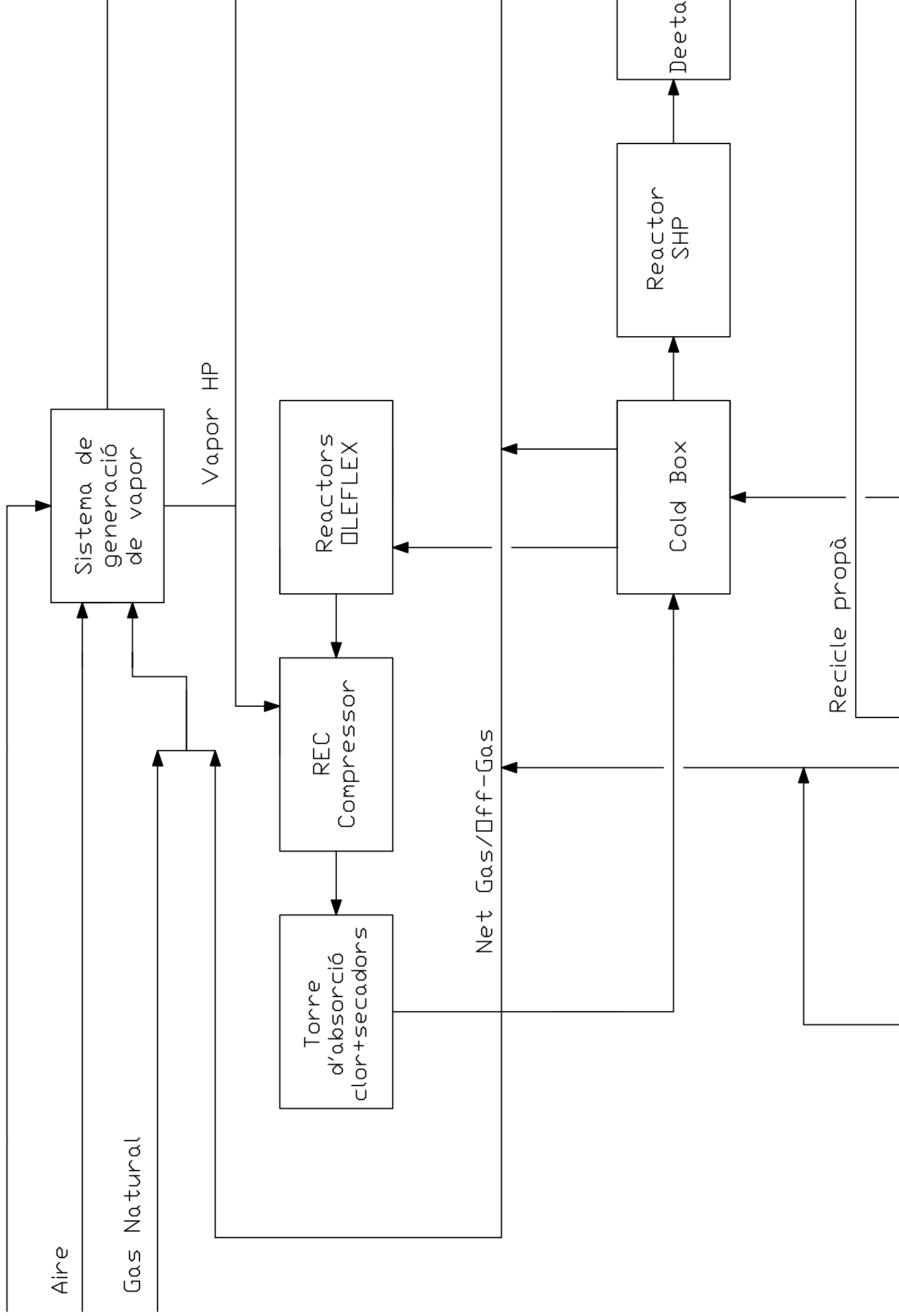
Net Gas/Off-Gas

Cold Box

Reactor SHP

Deeto

Recicle propà



Condensat  
Aigua Desmineralitzada  
Off-Gas  
Gas Natural

SISTEMA  
D'ELIMINACIÓ  
DE  $O_2/CO_2$

SISTEMA  
DE  
BOMBEIG

CALDERA  
A

CALDERA  
B

SISTEMA DE GENERACIÓ  
DE VAPOR

BOMBA CALOR  
(SPLITTER)

Propà  
Propilè

V-4502

C-4501

CT-4501

Efluent R.

Propà  
Propilè

Vapor LP

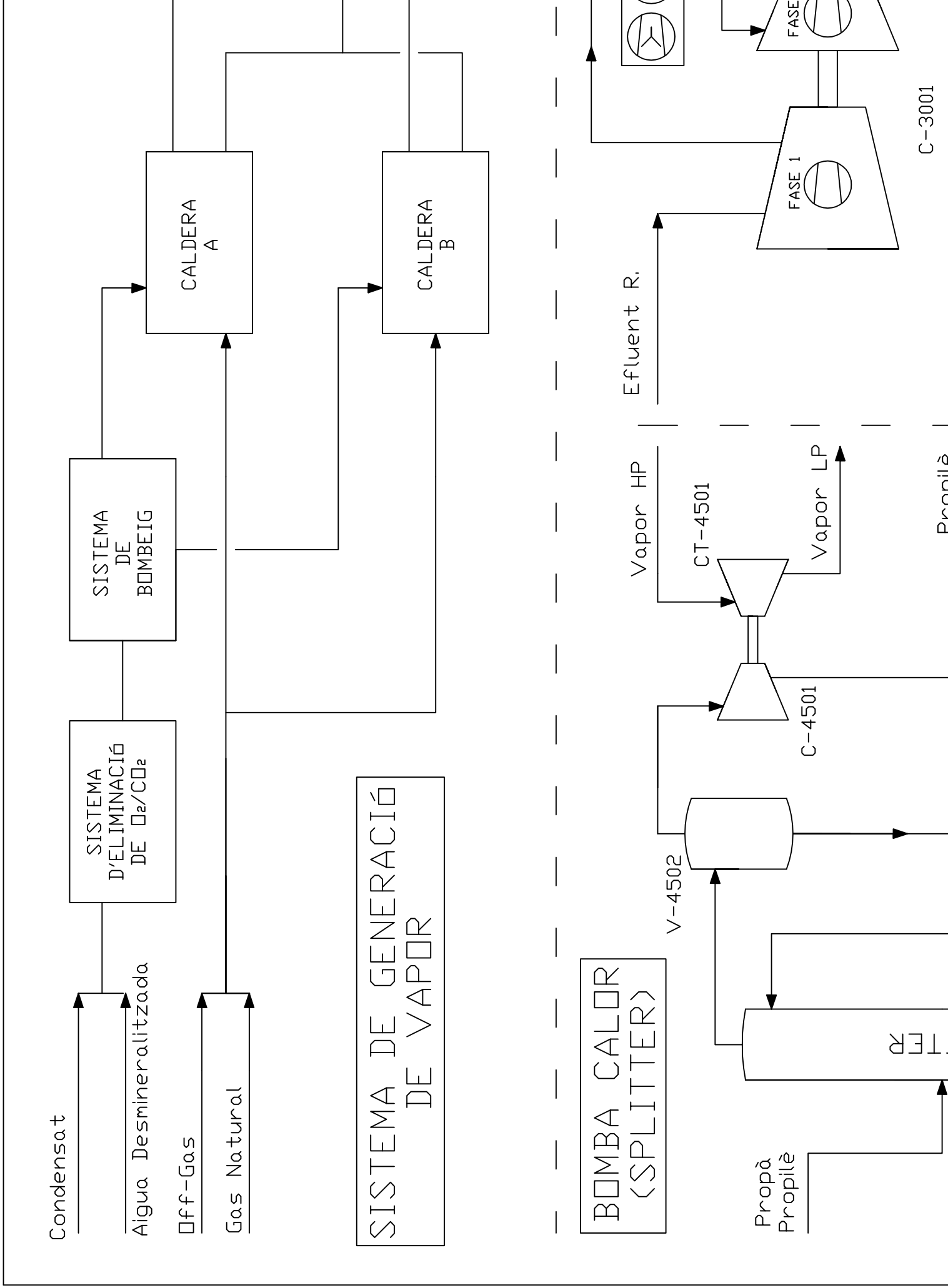
FASE 1

FASE 1

Propà  
Propilè

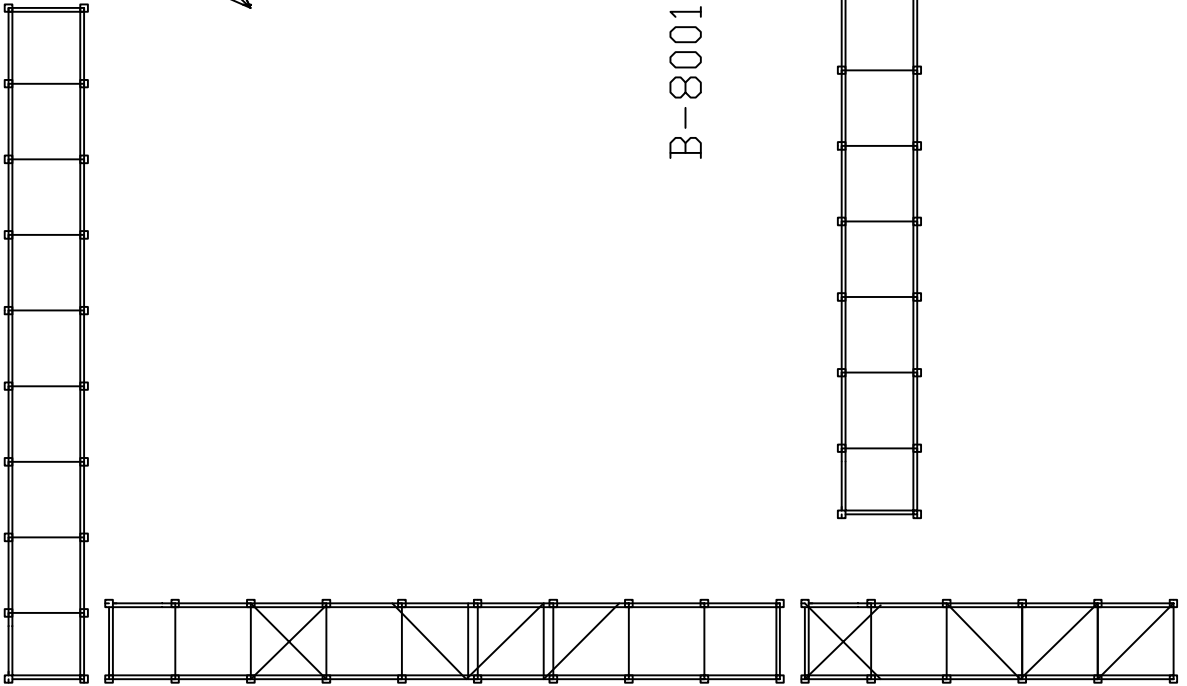
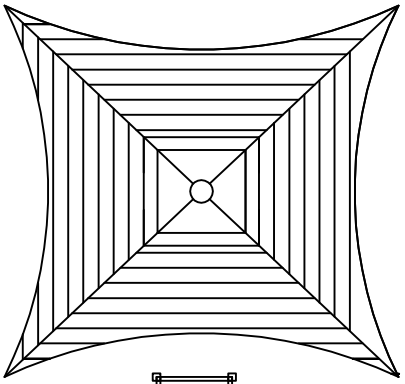
Propà  
Propilè

C-3001



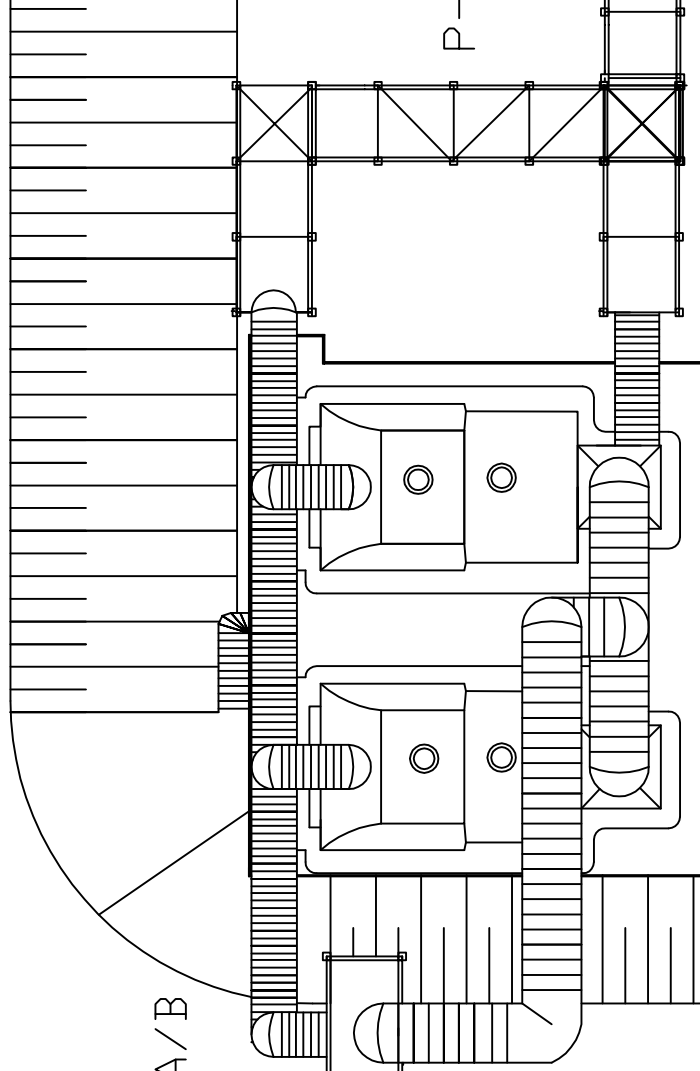


TORTXA



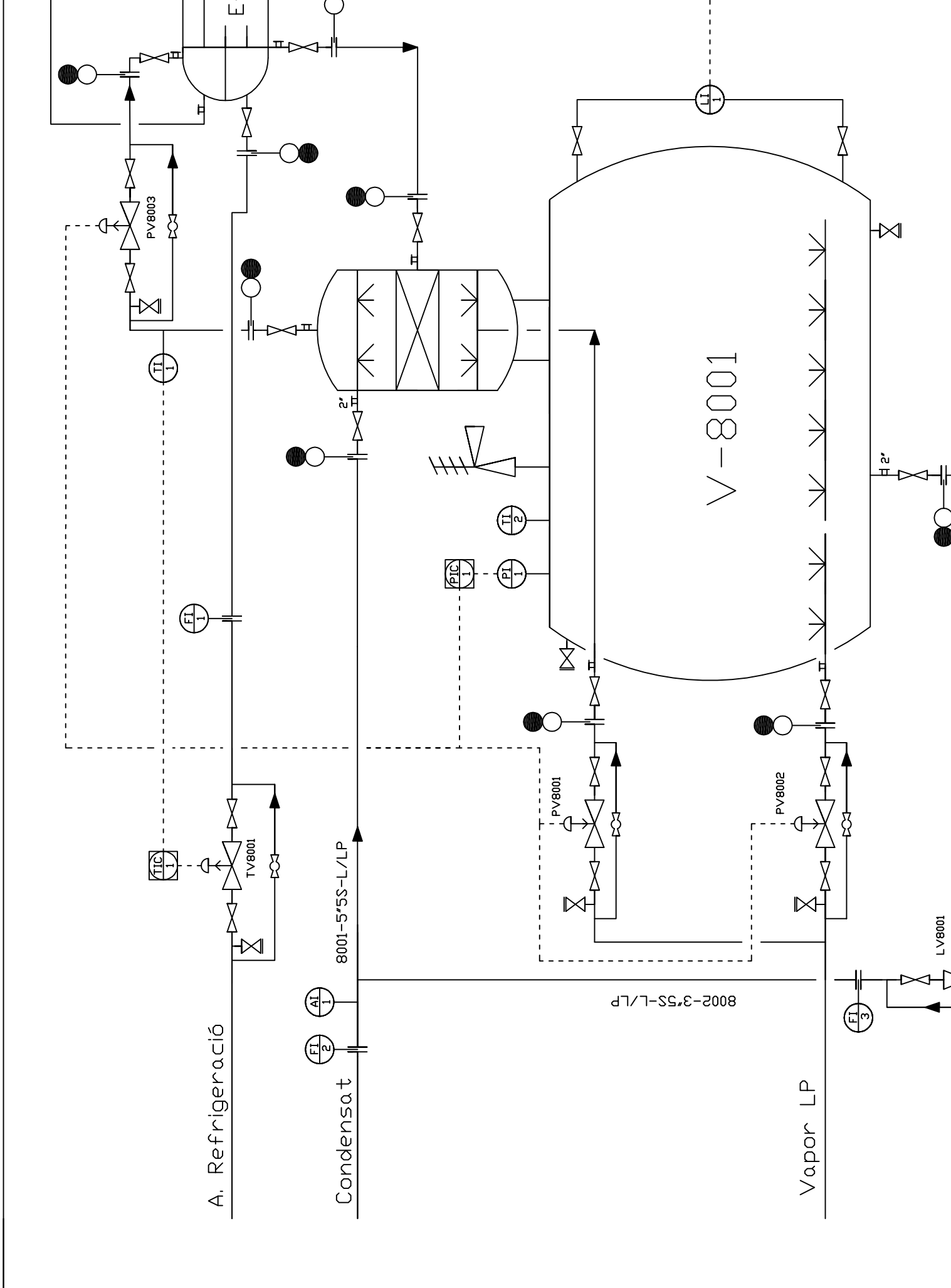
- RACK DE CAN
- COMBUSTIBL
- CONDENSAT
- A.DESMINERA
- VAPOR HP
- OFF-GAS/GA

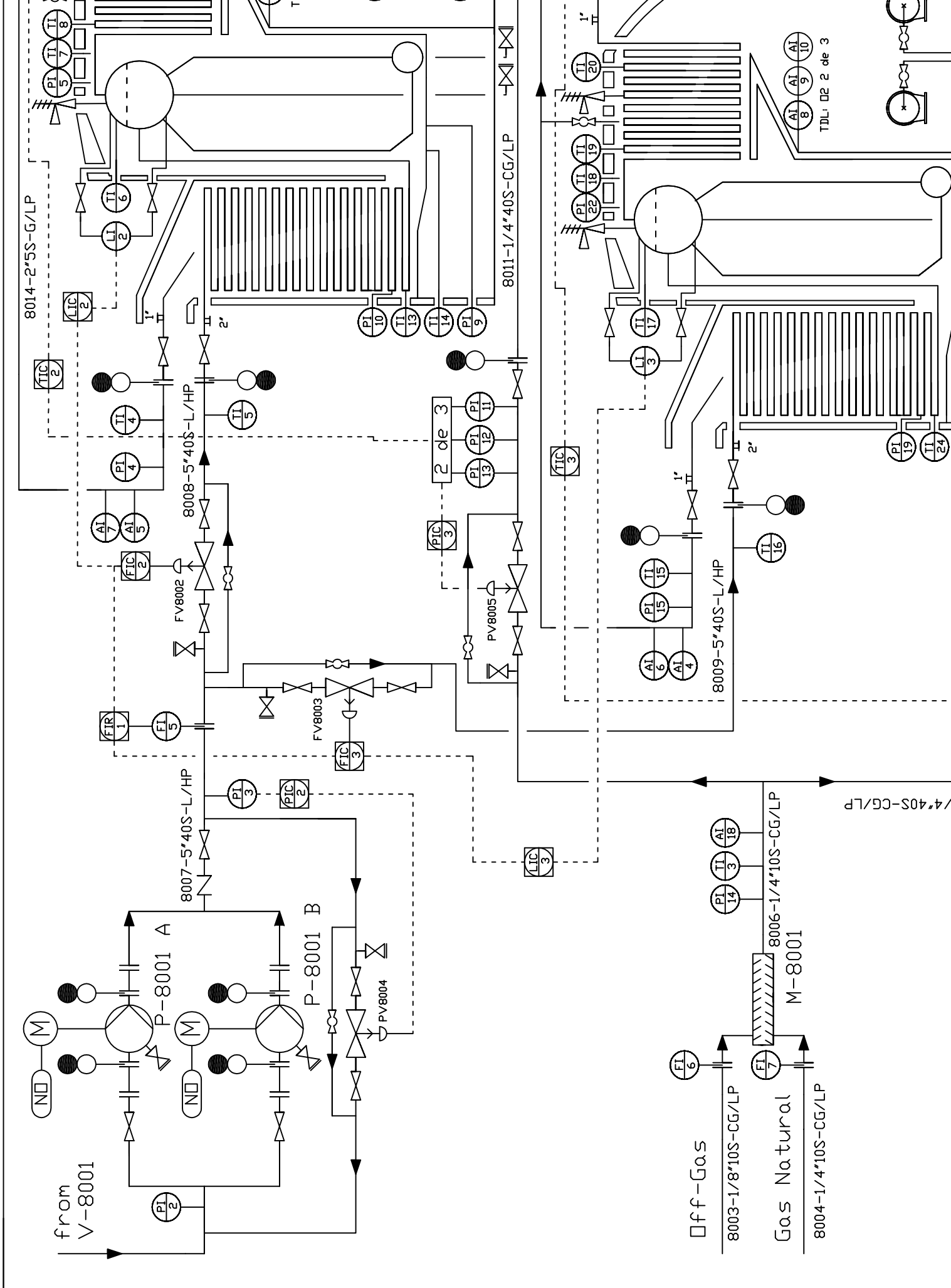
B-8001 A/B



P-













Disseny d'un sistema de generació de vapor by [Benet Jiménez, Joan Chillida, Josep M.](#) is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional License](#).

Puede hallar permisos más allá de los concedidos con esta licencia en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ca>