



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria de l'energia**

**ANÀLISI DE LA VALORITZACIÓ ENERGÈTICA DELS RESIDUS A  
MENORCA**



**Memòria**

**Autor:** Robert Juanico Juanico  
**Director:** Roberto Villafáfila Robles  
**Convocatòria:** Juny 2019



## Resum

Actualment vivim en una societat de consum basada en l'extracció de recursos, la posterior elaboració de productes, el seu consum i finalment la seva consideració com a residu. Tot i que existeix un fort corrent decidit a canviar aquest model d'economia lineal a un altre de circular, el tancament del cicle del producte mai s'acabarà produint del tot. Aquest projecte, per tant, pretén analitzar com valoritzar energèticament aquells residus dels quals ja no se'n pot fer cap aprofitament material.

L'estudi s'ha realitzat en l'escenari de Menorca, lloc d'origen de l'autor del projecte, i que, al ser una illa, permet acotar millor el sistema a analitzar. Així doncs, tenint en compte que actualment es genera l'electricitat consumida a partir de la central tèrmica més contaminant d'Espanya i que els residus generats són depositats en un abocador, s'ha intentat cercar quina podria ser una de les maneres de millorar la gestió dels residus a l'illa.

Al llarg d'aquest document es troba un estudi dels residus generats a Menorca, així com de les tecnologies de valorització energètica disponibles. A partir d'aquí s'han seleccionat les que millor s'ajusten al sistema analitzat, per acabar dimensionant i fent l'estudi d'implantació d'una hipotètica incineradora.

## Resumen

En la actualidad vivimos en una sociedad de consumo basada en la extracción de recursos, la posterior elaboración de productos, su consumo y finalmente su consideración como residuo. Aunque haya un fuerte movimiento dispuesto a cambiar el modelo de economía lineal por otro de circular, el cierre del ciclo nunca va a producirse del todo. Por eso, este proyecto pretende analizar cómo valorizar energéticamente aquellos residuos que ya no se pueden aprovechar materialmente.

El estudio se ha realizado en el escenario de Menorca, lugar de origen del autor del proyecto, y que al ser una isla permite acotar mejor el sistema a analizar. Así pues, teniendo en cuenta que actualmente se genera la electricidad consumida mediante la central térmica más contaminante de España y que los residuos generados son depositados en un vertedero, se ha intentado buscar cuál sería una las maneras para mejorar la gestión de residuos de la isla.

A lo largo de este documento se encuentra un estudio de residuos generados en Menorca, así como las tecnologías de valorización energética disponibles. A partir de aquí se han seleccionado las que mejor se ajustan al sistema analizado, para acabar dimensionando y realizando el estudio de implantación de una hipotética incineradora.

## Abstract

At present we are living in a consumer society based on the extraction of resources, the elaboration of products, its consumption and finally the consideration of those as waste. Despite the fact that exist an increasing current which is trying to change the lineal economy model to a circular one, that will not be able to completely close the cycle. For this reason, this project has the aim to analyse how to energy recovery waste that can't be taken advantaged materially.

The study is located in Menorca, were the author is from, and because it's an island and makes possible to delimit the system which will be analysed. So, having in mind that today the electricity consumed is generated by the most polluting plant of Spain and the waste is thrown in a dump, a way to improve the waste management at the island has been searched.

In this document, at first appears a study of the kind and quantity of waste is generated in Menorca and the different technologies of energy recovery that are able. After that, those technologies which fits better with the characteristics of the system have been selected, finishing sizing and doing the implantation studio of an incinerator.



## Agraïments

Agrair especialment a la família, parella i amics pel suport i consells rebuts al llarg de l'elaboració d'aquest projecte, així com el costat que m'han fet en les decisions que he anat prenent durant aquest temps.

Donar les gràcies també al tutor del projecte, Roberto Villafáfila, pel seu assessorament i seguiment del projecte.

A part, també vull esmentar a quatre persones amb les que m'he reunit per rebre consells de caire més tècnic o fer visites a instal·lacions directament relacionades amb aquest projecte:

- Irene Estaún, directora insular de la Reserva de la Biosfera, amb la qui em vaig reunir durant l'abril perquè m'expliqués el model de gestió de residus de l'illa i el nou projecte de la planta de tractament de residus de Milà, així com els plans de futur del Consorci de Residus de Menorca.
- Josep Climent, cap d'obra de Ferrovial de la nova planta de tractament de residus, amb qui vaig tenir l'oportunitat de fer una visita a les instal·lacions de Milà.
- GOB, entitat ecologista amb la qual em vaig reunir per conèixer de primera mà el seu posicionament respecte a quin hauria de ser el model de gestió de residus per afavorir al màxim el medi ambient.
- Pere Sintès, cap de manteniment de la central tèrmica de Gesa Endesa de Maó, amb qui vaig tenir l'oportunitat de visitar-la.





# Índex

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>V</b>
<b>1. PREFACI</b>	<b>1</b>
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>3</b>
2.1. Objectius del treball.....	4
2.2. Abast del treball.....	4
<b>3. GESTIÓ ACTUAL DE RESIDUS A MENORCA</b>	<b>7</b>
3.1. Dades.....	7
3.2. Model de gestió de residus a Menorca.....	11
3.3. Model energètic actual a Menorca.....	14
<b>4. GESTIÓ DE RESIDUS</b>	<b>17</b>
4.1. Classificació.....	17
4.2. Valorització energètica de residus.....	20
4.2.1. Tecnologies basades en el tractament tèrmic.....	20
4.2.2. Tecnologia basada en la digestió anaeròbica.....	26
4.2.3. Tecnologia basada en l'ús del residu com a combustible.....	28
<b>5. ANÀLISI LEGISLATIU</b>	<b>29</b>
5.1. Normativa europea.....	29
5.2. Normativa espanyola.....	31
5.3. Normativa autonòmica balear.....	34
5.4. Normativa insular menorquina.....	37
<b>6. ELECCIÓ DELS SISTEMES DE VALORITZACIÓ</b>	<b>39</b>
<b>7. LOCALITZACIÓ DE LA PLANTA</b>	<b>41</b>
<b>8. FUNCIONAMENT DE LA INCINERADORA</b>	<b>43</b>
<b>9. DIMENSIONAMENT DE LA INCINERADORA</b>	<b>47</b>
9.1. Càlcul del PCI del combustible utilitzat.....	47

9.2.	Reaccions portades a terme durant la combustió .....	51
9.3.	Integració de la incineradora en la xarxa elèctrica menorquina .....	55
9.3.1.	Model 1 .....	56
9.3.2.	Model 2 .....	57
9.4.	Cabals màssics de combustible i aire .....	58
9.5.	Cicle de Rankine .....	59
9.5.1.	Generació de vapor .....	59
9.5.2.	Anàlisi del cicle .....	66
9.5.3.	Potència disponible i rendiment .....	70
9.5.4.	Condensació .....	71
9.6.	Neteja dels gasos de combustió .....	74
<b>10.</b>	<b>ELECCIÓ DELS ELEMENTS DE LA INCINERADORA</b> .....	<b>83</b>
<b>11.</b>	<b>ESTUDI DE VIABILITAT ECONÒMICA</b> .....	<b>91</b>
11.1.	Costos .....	91
11.2.	Ingressos .....	95
11.3.	Viabilitat de la inversió .....	96
<b>12.</b>	<b>ESTUDI D'IMPACTE MEDIAMBIENTAL</b> .....	<b>99</b>
12.1.	Emissions .....	99
12.2.	Territori .....	101
12.3.	Combustibles fòssils .....	102
	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>103</b>
	<b>PRESSUPOST</b> .....	<b>109</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>111</b>

## 1. Prefaci

Amb un fort sentiment d'arrelament cap a Menorca i amb la consciència de les diferents problemàtiques mediambientals de l'illa, en el moment de plantejar-me la temàtica de del treball de final de grau, vaig tenir clar des d'un inici que volia que aquest projecte girés entorn a alguna d'elles.

Hi havia un gran nombre de possibilitats, la majoria de les quals consistien en una substitució de la central tèrmica actual per alternatives renovables o la integració d'aquestes al sistema aïllat actual. No obstant, quan vaig investigar sobre la gestió actual de residus, em vaig adonar que aquesta constituïa un problema important pel territori i la ciutadania. És per això que vaig pensar en vincular els coneixements adquirits en matèria d'energia al llarg del grau, per aplicar-los en matèria de gestió de residus, fet que fins el moment no havia fet.

Així doncs, aquest projecte uneix l'aspecte socioambiental d'un territori com Menorca, amb els coneixements tècnics adquirits al llarg del grau i durant l'elaboració d'aquest treball.



## 2. Introducció

El present document correspon a la memòria del projecte que porta per títol *Anàlisi de la valorització energètica dels residus a Menorca* i pretén analitzar, dimensionar i avaluar les possibilitats de valoritzar energèticament els residus generats a Menorca.

Al llarg dels darrers anys s'ha anat incrementant el consum en el si de la societat en què vivim. Aquest va lligat a un esgotament dels recursos a partir dels quals aconseguim les matèries primes, un increment de l'energia requerida i una producció de residus que s'han de gestionar d'alguna manera. Per tant, davant aquest fenomen, apareixen nous reptes per fer front als problemes que se'n deriven. Problemes de gran transcendència com el canvi climàtic, la falta d'aigua o la contaminació atmosfèrica, que afecten directament al medi en què vivim.

Davant aquest repte, la principal solució és canviar el model econòmic actual, abandonant la tradicional economia lineal per passar a un model circular. D'aquesta manera, s'intenta tancar el típic procés *d'extracció, producció, utilització i eliminació*, fent que els residus puguin esdevenir recursos per propers productes. Per establir aquest nou cicle, però, es requereix d'un disseny del producte pensat no només en la seva vida útil, sinó també en la seva reutilització o reciclatge, un cop aquesta hagi acabat.

No obstant, però, aquest cicle mai s'acabarà tancant del tot, ja que sempre existiran materials que no es puguin reaprofitar o bé que, passats uns quants cicles, ja no seran útils. A més, perquè la roda funcioni es requerirà d'energia la qual s'haurà d'obtenir de qualque manera.

Per tant, fins i tot en aquest nou escenari segueix apareixent la necessitat de gestionar residus i alhora produir energia útil. Davant aquesta nova situació, apareix el concepte de valorització energètica, el qual pretén obtenir energia útil dels residus generats. Procés, per tant, que pot ajudar a solucionar aquests dos reptes.

Així doncs, aquest projecte vol analitzar la situació, avaluant les diferents possibilitats d'introduir la valorització energètica de residus i dimensionant una d'elles, i ho fa centrat a Menorca. Aquesta localització, al tractar-se d'una illa, ofereix l'oportunitat d'estudiar un sistema relativament aïllat, amb un territori clarament delimitat. Aquest fet suposa una oportunitat per analitzar com funciona la solució plantejada i poder-la extrapolar a un territori més gran i interconnectat.

## 2.1. Objectius del treball

Aquest projecte té com a objectiu principal estudiar la implantació d'un sistema de valorització energètica a l'illa de Menorca. A més, per l'autor, la realització del present projecte pretén esdevenir una oportunitat d'aprenentatge en quant a la realització de projectes d'enginyeria i el que això implica. Tenir en compte tots els aspectes a avaluar, fer front als problemes que puguin aparèixer i fer ús de la tecnologia disponible correctament aplicada per millorar en aquest cas la gestió de residus i producció d'energia elèctrica.

Per fer-ho, en primer lloc, s'avalua la gestió actual dels residus a l'illa i s'estudien les diferents tecnologies disponibles. A partir d'aquí, s'analitza la legislació vigent que s'ha de complir i, en funció dels tres aspectes, s'escull el model de valorització que millor s'adapta a les característiques del sistema. A continuació, es desenvolupa la proposta dissenyant-la i dimensionant-la, per concloure si és viable, tècnicament, econòmicament i mediambientalment.

## 2.2. Abast del treball

Amb aquest treball es té la intenció d'analitzar la capacitat de la valorització energètica per fer front als reptes de gestió de residus i generació d'energia útil a Menorca. Tot i així, s'ha de tenir en compte que com que es tracta d'un projecte amb una finalitat educativa i no pròpiament professional, hi ha aspectes com els econòmics que poden variar força, ja que les dades obtingudes no són del tot precises.

Per acomplir amb el propòsit del projecte, aquest s'estructura en tres grans blocs:

### BLOC I: ESTAT DE L'ART

Al llarg d'aquest bloc s'estudia la gestió actual de residus a Menorca, així com la producció d'energia elèctrica, recollint les dades d'interès i tenint en compte els projectes de futur en aquesta matèria. Per altra banda, s'analitzen els diferents tipus de tecnologies disponibles en quant a valorització energètica que existeixen a dia d'avui arreu del món i quines són les seves característiques. Finalment, s'avalua la legislació vigent referent a la gestió de residus i producció d'energia.

### BLOC II: DIMENSIONAMENT DE LA INCINERADORA

S'escull que el sistema més òptim de valorització és la incineració de residus procedint així al dimensionament d'aquesta. Així doncs, es realitzen els càlculs pertinents i s'escullen quins han de ser els elements que han de conformar la planta d'incineració. A més, s'analitza com s'haurà d'integrar

aquesta planta dins el mix energètic de l'illa i quina ha de ser la seva producció perquè contribueixi de la manera més òptima a reduir la producció d'electricitat a partir de combustibles fòssils.

### BLOC III: ANÀLISI DE LA VIABILITAT ECONÒMICA I AMBIENTAL

A partir de la incineradora dissenyada i dels resultats esperats de la seva posada en marxa, s'avalua per una banda la seva viabilitat econòmica i per altra l'ambiental. És a dir, si és rendible la seva construcció i operació des d'un punt de vista econòmic, i si la reducció del volum de residus i la disminució en la dependència de combustibles fòssils afavoreix al medi. Serà a partir d'aquests dos aspectes quan es podran extreure conclusions i determinar-ne la seva idoneïtat.





### 3. Gestió actual de residus a Menorca

L'elecció de Menorca com a territori a estudiar per a l'elaboració del treball, és deguda a la relació que hi guarda el seu autor. Apart però, el fet de tractar-se d'una illa relativament petita, li atorga una sèrie de peculiaritats que caracteritzen el sistema a estudiar i alhora el diferencien de la gran majoria.

Menorca és una illa situada al mig del Mediterrani que forma part de les Illes Balears. Té una superfície terrestre de 692 km<sup>2</sup> i una població de 91.606 habitants. No obstant però, el fet de tenir una economia basada principalment en un turisme fortament estacionalitzat, provoca que aquesta dada de població o de densitat demogràfica es vegi alterada en funció de l'època de l'any. Així doncs, aquesta característica té un pes important a l'hora d'avaluar l'adequació d'una gestió de residus o una altra, ja que suposa un flux clarament irregular.

A continuació, es presenten les dades obtingudes sobre els residus generats al llarg dels darrers anys a Menorca així com les perspectives de futur, sobre les quals s'elaboraran diferents escenaris i també s'explicarà el model actual de gestió de residus a l'illa. [1]

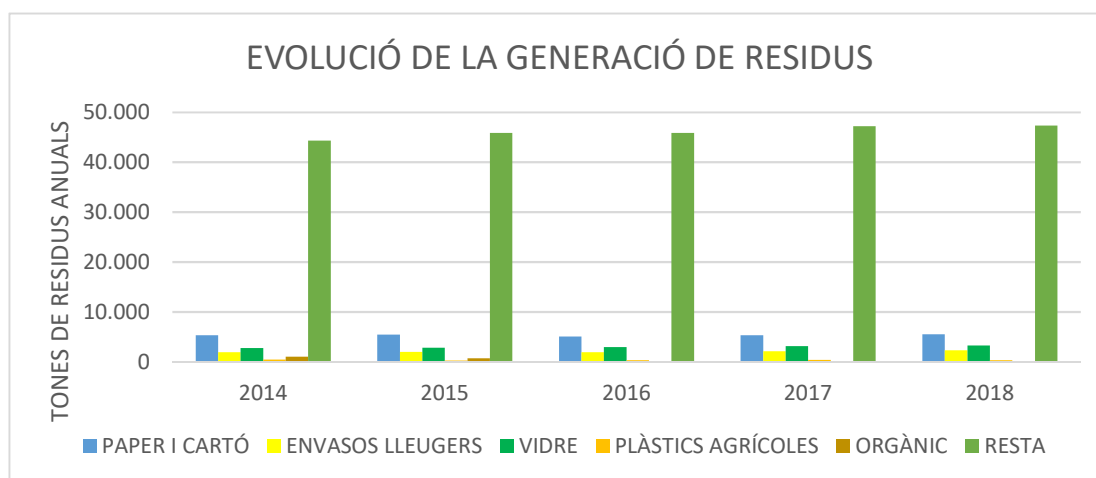
#### 3.1. Dades

Per mitjà del Consorci de Residus de Menorca s'ha tingut accés a les dades de residus generats que s'han documentat al llarg dels darrers cinc anys. Aquestes permeten elaborar una estimació de cara als pròxims anys. [2]–[6]

Les fraccions analitzades són les de paper i cartó, envasos lleugers, vidre, plàstics agrícoles i resta. A més, també es contempla la fracció d'orgànic, la qual només es recollia per separat en els pobles més petits i que es va deixar de fer al llarg del 2015. No obstant, tal com s'observarà més endavant, en l'anàlisi legislatiu, es té previst que en els propers anys, quan la planta de tractament estigui construïda i entri en funcionament, es faixi la recollida de la fracció orgànica de manera independent a la de resta [7].

	PAPER I CARTÓ [t]	ENVASOS LLEUGERS [t]	VIDRE [t]	PLÀSTICS AGRÍCOLES [t]	ORGÀNIC [t]	RESTA [t]	TOTAL [t]	INCREMENT ANUAL
2014	5.312	1.924	2.736	427	973	44.320	55.692	
2015	5.442	1.956	2.800	248	653	45.856	56.955	2,27%
2016	5.022	1.893	2.910	259	0	45.833	55.916	-1,82%
2017	5.265	2.058	3.102	346	0	47.198	57.968	3,67%
2018	5.476	2.305	3.225	307	0	47.356	58.668	1,21%

**Taula 3.1.** Generació anual de residus per fracció (Font: Memòries anuals del Consorci de Residus de Menorca)



**Figura 3.1.** Generació anual de residus per fracció (Font: Memòries anuals del Consorci de Residus de Menorca)

Com es pot observar en la **Taula 3.1.** i la gràfica **Figura 3.1.**, al llarg d'aquests darrers anys hi ha hagut un lleuger increment en la generació de residus. Tot i que del 2015 al 2016 es va produir una petita reducció, la tendència general és alcista i cal esperar que en els propers anys el creixement en la producció seguirà creixent.

Cal destacar la gran diferència existent entre la fracció resta i les altres fraccions recollides la qual és d'aproximadament un ordre de magnitud. Així doncs, es pot observar que entorn al 80% de residus recollits corresponen a RSU i orgànic, entorn del 10% a paper i cartó, mentre que aproximadament els envasos lleugers i el vidre corresponen a un 5% cadascun.

Com es pot contrastar en les memòries dels darrers anys, publicades pel Consorci, i tal com em va comentar la seva directora, a Menorca no es fa un aprofitament directe de cap de les fraccions. No obstant això, tant el paper com el vidre, s'exporten a la península on se'n recicla entorn al 98% del total enviat. Pel que fa al plàstic, també s'exporta, tot i que anteriorment se n'ha fet una classificació en funció de la seva composició.

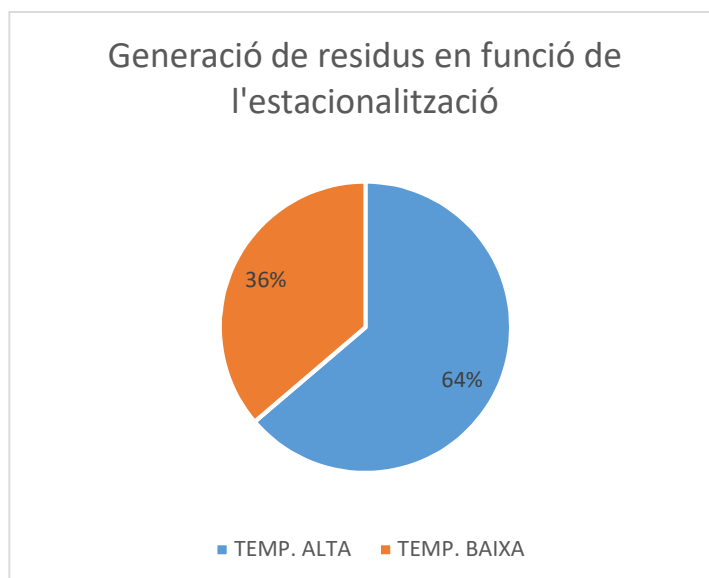
Així doncs, el problema resideix en la fracció resta, la qual està formada per una mescla de diferents tipus de residus, que actualment no es poden separar. Tal com es comenta en el següent apartat, de cara als propers anys s'espera que la resta es redueixi considerablement gràcies a dos factors; En primer lloc, amb la recollida selectiva de la fracció orgànica que es pretén instaurar, es preveu una reducció d'aproximadament el 20% de la massa. I en segon lloc, amb la futura introducció de tecnologia punta en la nova planta de tractament, la capacitat de recuperació de subproductes augmentarà.

D'aquesta manera, s'estima que quan finalitzin les obres en la nova planta i es reculli la fracció orgànica, la resta disminuirà entre un 30% i un 35% de la massa total que arriba a la planta en l'actualitat.

Tot i que es tracta d'una reducció significativa, tenint en compte el creixement que es preveu, més o menys a finals dels propers vint anys, en el cas més desfavorable, es podria estar parlant d'una generació aproximada de 40.000 tones de fracció resta per any. Una xifra similar a l'actual.

MESOS	PAPER I CARTÓ (KG)	ENVASOS LLEUGERS (KG)	VIDRE (KG)	FRACCIÓ RESTA (KG)	GENERACIÓ TOTAL (KG)
<b>GENER</b>	331.400	131.400	150.520	2.547.780	3.161.100
<b>FEBRER</b>	306.220	120.500	141.100	2.341.300	2.909.120
<b>MARÇ</b>	371.540	138.600	138.500	2.798.480	3.447.120
<b>ABRIL</b>	414.780	154.380	174.100	3.219.640	3.962.900
<b>MAIG</b>	534.460	192.380	279.880	4.290.560	5.297.280
<b>JUNY</b>	562.520	230.860	358.560	5.051.260	6.203.200
<b>JULIOL</b>	647.520	287.580	465.800	5.978.740	7.379.640
<b>AGOST</b>	663.200	318.820	527.560	6.613.960	8.123.540
<b>SETEMBRE</b>	512.920	234.340	396.060	5.100.120	6.243.440
<b>OCTUBRE</b>	455.000	203.860	257.380	4.017.420	4.933.660
<b>NOVEMBRE</b>	359.280	150.760	179.060	2.814.700	3.503.800
<b>DESEMBRE</b>	316.920	141.040	156.750	2.581.660	3.196.370
<b>TOTAL</b>	<b>5.475.760</b>	<b>2.304.520</b>	<b>3.225.270</b>	<b>47.355.620</b>	<b>58.361.170</b>
DISTRIBUCIÓ PERCENTUAL (%)	<b>9,38</b>	<b>3,95</b>	<b>5,53</b>	<b>81,14</b>	<b>100,00</b>

Taula 3.2. Generació mensual de residus (Font: Memòries anuals del Consorci de Residus de Menorca)



**Figura 3.2.** Estacionalització en la generació de residus (Font: Memòries anuals del Consorci de Residus de Menorca)

Un aspecte molt important a tenir en compte i que és vital per tal de crear unes correctes estimacions de cara al futur i per tal de triar el model de gestió adequat és l'estacionalitat de la generació.

Com es pot observar en el gràfic, durant la temporada d'estiu – Abril, Maig, Juny, Juliol, Agost i Setembre – es genera pràcticament el doble (64%) de residus que durant la temporada d'hivern (36%) – Octubre, Novembre, Desembre, Gener, Febrer i Març.

Aquesta estacionalitat està directament relacionada amb el motor econòmic de l'illa, que actualment és el turisme. Així doncs, qualsevol previsió que es vulgui fer de cara a un futur ha de tenir en compte les previsions existents respecte al turisme.

Analitzant amb més profunditat aquesta característica però, es poden treure conclusions que van més enllà de la simple relació turisme – residus. I és que, el fet de tenir una generació tan desigual en funció de l'època de l'any origina una sèrie de problemàtiques a tenir en compte.

En primer lloc, el dimensionament de les infraestructures no estarà optimitzat. Això és degut a que s'han de dimensionar totes les instal·lacions (centres de gestió, depuradores, deixalleries) per fer front a la càrrega que hi haurà durant els mesos d'estiu. Un cas similar al que es troba en la generació elèctrica. Es dimensiona el sistema per fer front als pics de demanda que hi ha al llarg del dia, però durant les hores vall, el sistema queda sobredimensionat, dificultant-ne la seva optimització tant tècnica com econòmica.

## 3.2. Model de gestió de residus a Menorca

Actualment, com ja s'ha comentat al llarg del projecte, a Menorca la competència de gestió de residus recau en el Consorci de Residus i Energia de Menorca. Aquest ens de titularitat pública el qual compta amb la representació dels vuit municipis de l'illa així com del Consell insular, és per tant l'encarregat d'assegurar una correcta gestió dels residus generats fent complir així la legislació vigent. D'aquesta manera és la propietària de les diferents instal·lacions encarregades de la gestió tot i que no n'és l'explotadora, ja que com recull l'article 17 de la Llei 22/2011 de 28 de Juliol, els municipis, que tenen l'obligació de recollir transportar i tractar els residus domèstics, poden externalitzar-ne el servei.

Pel que fa a instal·lacions, Menorca compta amb set deixalleries, tres centres de descontaminació de vehicles, deu punts de recollida de residus perillosos, dotze centres de reutilització i l'àrea de gestió de residus de Milà. Aquest darrer és el més destacat, ja que és on acaba qualsevol element que no es pot reutilitzar directament o que no és tractat a l'illa per la seva condició de residu perillós.

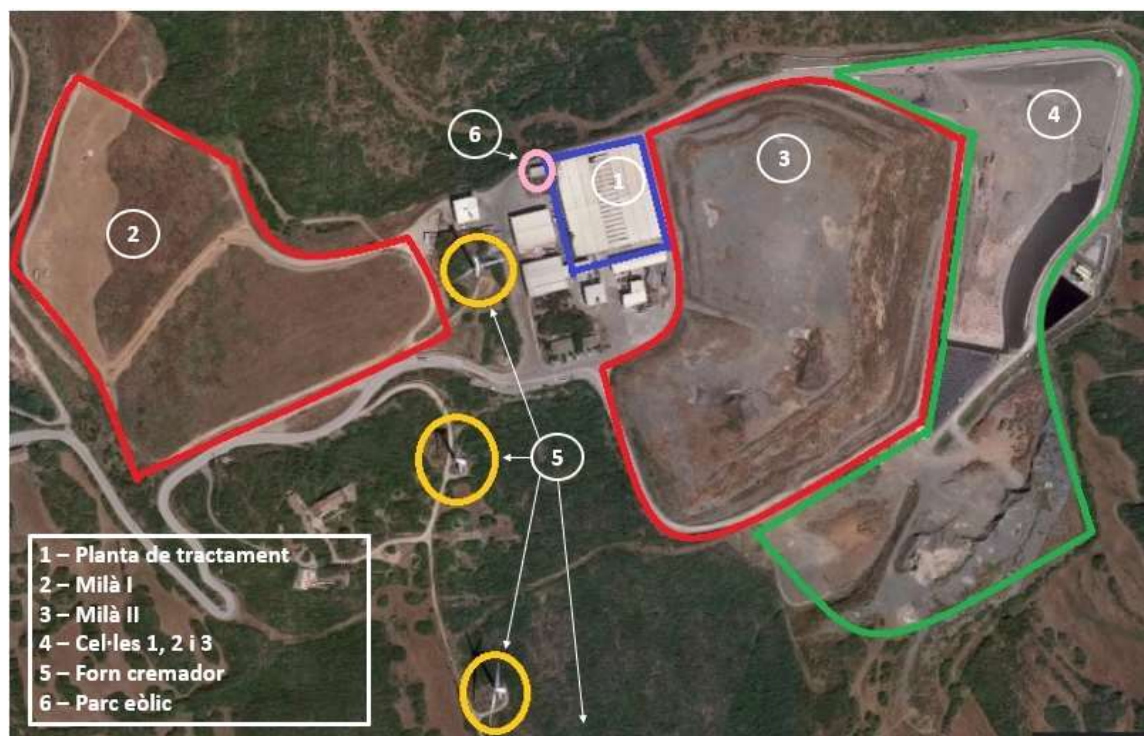
La gestió de residus a Menorca difereix en funció del tipus de residu i del seu generador. Pel que fa al residu generat pels ciutadans, aquest és abocat als diferents contenidors distribuïts pels pobles i urbanitzacions. És en aquest punt on es du a terme la recollida selectiva de paper, envasos lleugers, vidre i resta. Cadascuna d'aquestes fraccions acaba arribant a Milà on és tractada en funció de la seva naturalesa. Els residus dels ciutadans que van a les deixalleries, són classificats i avaluats. Així doncs, si els elements són aptes per ser reutilitzats o reciclats directament són recollits per les empreses encarregades del seu tractament i si no és així, acaben essent traslladats a Milà. Pel que fa als residus perillosos per norma general són enviats a la península per poder ser tractats adequadament. I finalment, pel que fa al residu provinent de la indústria o de restes de poda, arriba a Milà directament.

Així doncs, a l'àrea de gestió de residus de Milà hi acaba arribant pràcticament la totalitat dels residus que han de ser tractats a Menorca. La massa total es pot dividir en cinc grans grups: Paper, Envasos lleugers, Vidre, Resta, Orgànic, Plàstics agrícoles. A més també hi arriben altres fluxos de residus com són restes d'animals morts.

Com s'ha comentat a la introducció l'elecció de la temàtica per a l'elaboració d'aquest projecte roman en la problemàtica que des de fa anys existeix a l'illa degut en part a les instal·lacions de l'Àrea de Gestió de Residus de Milà. Al llarg de l'elaboració d'aquest document vaig tenir l'oportunitat de visitar les instal·lacions de la mà de Josep Climent, encarregat de l'explotació de la planta i de l'execució del nou projecte, per part de l'empresa *Ferrovial* que conforma l'UTE juntament amb *Adalmo*.

Actualment es Milà compta amb unes instal·lacions clarament deficitàries, amb uns abocadors que no compleixen amb la normativa estipulada i sense cap tecnologia encarregada de reaprofitar subproductes que es podrien aprofitar de la fracció resta. Davant aquesta situació, des de

l'administració pública es va encarregar un projecte per poder modernitzar les instal·lacions. Una de les persones encarregades de gestionar-ho és Irene Estaún, directora insular de la Reserva de la Biosfera, amb la qual també vaig entrevistar-m'hi.



**Figura 3.3.** Instal·lacions de la planta de gestió de residus de Milà (Font: Elaboració pròpia, Foto satèl·lit: Google Maps)

A dia d'avui la planta està formada per quatre zones clarament diferenciades:

- La primera, és la planta de recollida i selecció de residus (1). És allà on s'aboquen tots els residus que s'han recollit en contenidors per a reciclatge a cada municipi així com altres fluxos que arriben a les instal·lacions de manera directa, provinents de la indústria. Aquí és on de manera completament manual en funció de la fracció dipositada pel camió, es procedeix a tractar el residu d'una manera o una altra. Tot el vidre, passa directament a emmagatzemar-se fins que és enviat per via marítima a la Mallorca on es ven a empreses encarregades de reciclar-lo i donar-li una segona vida. Pel que fa al paper i cartó, el procediment és pràcticament idèntic, amb la peculiaritat que l'emmagatzematge es fa mitjançant bales per facilitar-ne el transport. Finalment, l'altra fracció que es descarrega en aquesta zona és la del plàstic, el qual és classificat pels operaris, de manera manual, en funció de la seva composició.
- La segona, és la formada pròpiament pels abocadors (2), (3) i (4). La planta consta de dos abocadors, Milà I i Milà II, ja clausurats i un tercer format per tres cel·les, el qual es troba actiu. Milà I, fou el primer en construir-se i es va clausurar, tot i que de manera irregular. Seguidament s'obrí Milà II que l'any 2015 quedà al límit de les seves capacitats i actualment s'està abocant els residus en un espai adequat al seu costat format per 3 cel·les.

A aquesta zona però és on resideix un dels problemes principals del sistema de tractament de residus a Menorca, ja que Milà I i II, al límit de les seves capacitats es van haver de clausurar i segellar per evitar filtratges al subsol.

- La tercera, és un petit forn cremador (5) en el qual s'incinera la fracció de SANDACH, bàsicament animals morts els quals per normativa han de ser cremats per evitar possibles malalties i que anteriorment han estat congelats. Aquest fet provoca que el consum de combustible requerit per la incineració sigui considerable. Així doncs, tot i que en quant a superfície i flux de residus gestionats es tracta d'una zona petita en comparació a la resta de la planta, en quant al cost energètic, aquest és força elevat i suposa un alt percentatge del consum total de les instal·lacions.
- Finalment, la quarta correspon a un parc eòlic (6), que tot i no formar part del sistema de gestió de residus es troba dins l'Àrea de Gestió de Residus des Milà i és propietat del Consorci. La instal·lació eòlica construïda entre el 2004 i el 2005, compta amb quatre aerogeneradors de 800 kW cadascun, tenia previst generar una energia anual de 7.040 kWh/any, tot i que durant els darrers anys aquesta s'ha vist reduïda pràcticament a la meitat, per culpa del deteriorament dels molins i diverses averies.

Davant la problemàtica que suposa un sistema de gestió de residus tan deficitari a nivell tècnic, ambiental i econòmic, a finals de 2015 es va aprovar un nou projecte que s'està executant i que consisteix en diverses fases. Aquest, inclou la part corresponent a les noves infraestructures així com a la concessió per a la gestió durant els pròxims 25 anys.

Tal com s'ha comentat anteriorment, el concurs el va guanyar la UTE de Ferrovia i Adalmo, i a dia d'avui s'està executant.

El projecte en qüestió consta de quatre fases [9]:

- 1- La primera fase consisteix en la millora del segellament de Milà I, que fou clausurat fa més d'una dècada de manera deficient.
- 2- La segona fase consisteix en la construcció de la nova planta de tractament, la qual inclourà tecnologia punta per tal de classificar els residus i separar-ne les diferents fraccions que es troben dins la resta i així poder-ne millorar el seu reciclatge.
- 3- La tercera fase consisteix en la clausura de Milà II el qual, com s'ha comentat anteriorment, està al màxim de les seves capacitats i per tant s'ha de procedir a segellar-lo i restaurar-lo correctament. La finalitat és evitar la filtració de lixiviats al subsol i assegurar l'escapament i posterior aprofitament del gas metà originat degut a la digestió anaeròbica de la fracció orgànica que es produeix de forma natural a l'abocador.
- 4- La quarta fase consisteix en l'ampliació de Milà II, amb la creació i l'adequació de tres cel·les on abocar els residus. Paral·lelament a la creació de les cel·les també es preveu la creació d'una bassa de lixiviats per tal d'evitar-ne la seva filtració, contaminant així els aqüífers.

Encara que el projecte aprovat contempla aquestes quatre fases, des del consorci de residus es preveu elaborar-ne d'altres que simultàniament i complementàriament ajudin a assolir l'objectiu de fer una illa més sostenible en l'àmbit més ampli del concepte.

Aquests projectes estan enfocats a la producció d'energia a partir de fonts renovables tal com em va comentar la directora insular de la Reserva de la Biosfera, Irene Estaún. En primer lloc, es preveu cobrir els abocadors de Milà I i Milà II, ja clausurats, amb panells fotovoltaics. En segon lloc, es té previst la substitució del parc eòlic actual per tres nous aerogeneradors, més moderns i eficients amb una potència nominal d'1,8 MW per unitat. L'altra proposta consisteix en l'aprofitament del biogàs generat en els abocadors així com el provinent d'un hipotètic biodigestor per tal de generar electricitat.

### 3.3. Model energètic actual a Menorca

En aquest apartat, de la mateixa manera que s'ha fet anteriorment amb la gestió de residus, s'analitzarà el model energètic de l'illa. Es tracta del segon punt clau a tenir en compte per avaluar quina tecnologia de valorització energètica de residus és la més adequada i quin és el seu potencial.

El model energètic de Menorca en l'actualitat es tracta d'un model aïllat centralitzat. És a dir, la totalitat de l'energia consumida és generada a l'illa i pràcticament tota prové de la central tèrmica ubicada al port de Maó.

No obstant, en aquests moments, s'està procedint a la substitució del cable submarí que uneix Menorca amb Mallorca, i que des del gener del 2018 havia deixat d'estar operatiu. Aquest fet suposarà la possibilitat de tornar a tenir la capacitat d'intercanviar energia amb Mallorca i alhora fer-ho amb la península, ja que existeix una connexió entre València i Calvià que permet un flux energètic peninsular – balear.

Pel que fa a la generació, com ja s'ha comentat, pràcticament el total de l'energia elèctrica generada a Menorca és d'origen fòssil. Tan sols un 2,5 % prové de fonts renovables; Aquest petit percentatge té el seu origen en el parc eòlic format per 4 aerogeneradors instal·lats a l'àrea de gestió de residus des Milà i gestionats pel Consorci, i en les plantes fotovoltaïques de Son Salomó i Binisafúller.

Per parts :

- Central Tèrmica:  
La central tèrmica és propietat d'Endesa i compta amb una potència instal·lada de 271,6 MW a partir de dues tecnologies diferents: Motors dièsel i turbines de gas.
  - o 3 motors dièsel Man-Burmeister & Wain de 2 temps i 10 cilindres. Són els grups amb una major prioritat a l'hora d'entrar en funcionament.



- Combustible: Fueloil
    - Potència màxima de cada grup: 15,8 MW
  - 2 Turbines de gas amb cicle Brayton General Electric
    - Combustible: Gasoil
    - Potència màxima de cada grup: 37,5 MW i 38,5 MW
  - 3 Turbines de gas dobles aeroderivades Pratt & Whitney operant amb cicle de Brayton.
    - Combustible: Gasoil
    - Potència màxima de cada grup: 45 MW, 51,6 MW i 51,6 MW
- Parc eòlic:
 

Consta de quatre aerogeneradors model MADE AE-50 de 800 kW cadascun. Tenen una alçada de torre de 50 metres i un diàmetre d'aspes de 59 metres. Tenen un rang de funcionament que va des dels 11,16 km/h fins els 90 km/h, essent a 36,3 km/h la velocitat a la que s'obté la potència màxima de generació.
- Parcs fotovoltaics:
  - Son Salomó (Ciutadella): Actualment disposa d'una potència instal·lada de 4 MWp, una potència d'inversors de 3 MW i ocupa una superfície de 14,3 ha.
  - Binisafúller (Sant Lluís): Actualment disposa d'una potència instal·lada d'1,1 MWp, una potència d'inversors d'1 MW i ocupa una superfície de 2,5 ha.

A continuació, es presenten les corbes de generació de dos dies tipus del 2018. [10]

- ESTIU 16/08/2018

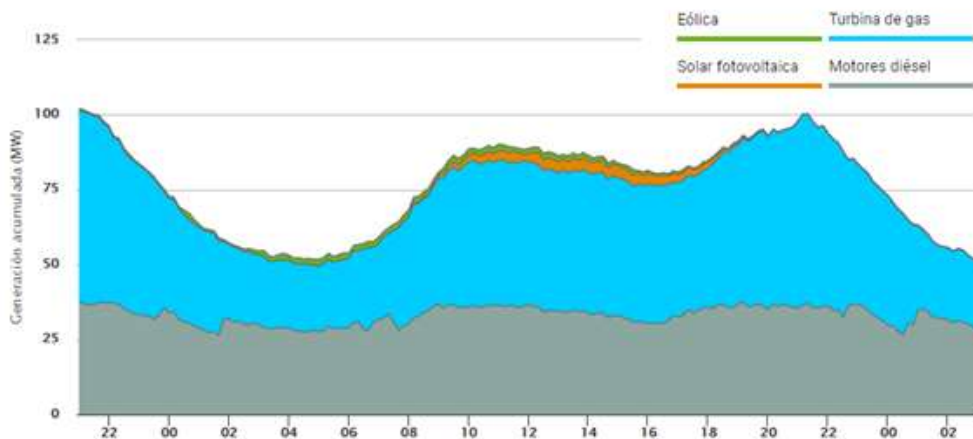
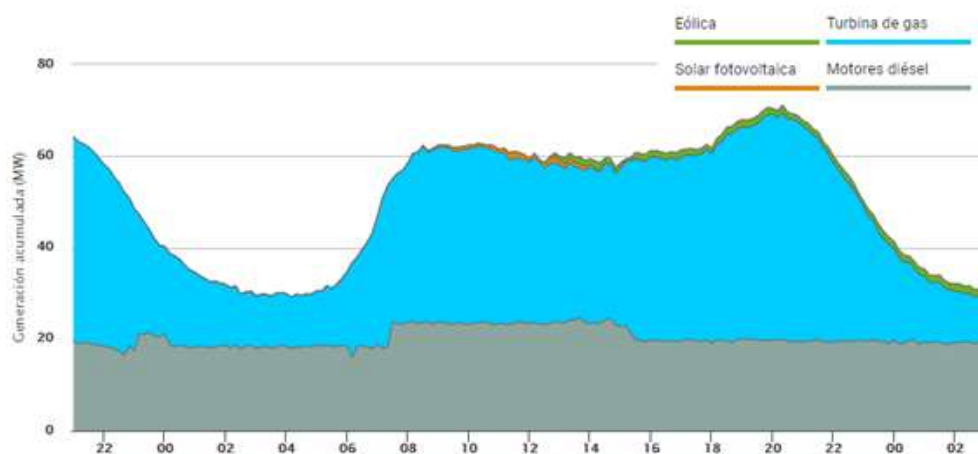


Figura 3.4. Mix energètic en la generació elèctrica a Menorca del 16-08-2018 (Font: REE)

- HIVERN 06/02/2018



**Figura 3.5.** Mix energètic en la generació elèctrica a Menorca del 06-02-2018 (Font: REE)

Com es pot observar en ambdós dies tipus, els elements de generació són els mateixos i es corresponen als detallats anteriorment. El funcionament del sistema és força similar encara que els consums variïn considerablement.

En els dos dies, apareix una franja de generació pràcticament a potència constant i que serveix com a fonament del sistema, el qual és assolit pels motors dièsel. Per altra banda, el petit percentatge de renovables entra en el mix de generació sempre i quan les condicions meteorològiques permetin que hi hagi producció. Finalment, són les turbines de gas, tant les industrials com les aeroderivades, les que van variant la seva producció per tal de permetre ajustar la corba de generació amb la de demanda. Això és degut a la seva gran capacitat de regular la potència entregada a la xarxa amb un marge de temps molt reduït.

La principal diferència entre els dos dies, recau en els valors de potència demandats. I és que durant els mesos d'estiu, els pics de potència poden arribar fins als 110 MW, mentre que durant els mesos d'hivern els pics diaris màxims poden ser d'entorn a 70 MW. Aquesta característica del sistema energètic menorquí, és un problema pel seu dimensionament, ja que dificulta l'optimització econòmica. Degut a que una gran part de la infraestructura requerida per cobrir la demanda a l'estiu durant la resta de l'any estarà inutilitzada o si més no sobredimensionada.

No obstant, aquesta problemàtica pot esdevenir una oportunitat per introduir noves tecnologies d'emmagatzematge o sistemes de generació que permetin aplanar la corba de generació diària i per altra banda intentar sobredimensionar el sistema per fer front a la demanda d'estiu.

## 4. Gestió de residus

Un cop analitzada la gestió actual de residus que es fa a Menorca així com el sistema elèctric, a continuació es procedeix a estudiar els tipus de residus existents i les tecnologies disponibles per valoritzar-los energèticament.

Es defineix com a residu tota aquella substància o objecte de la qual el seu posseïdor se'n desprèn o té la intenció o obligació de fer-ho. Amb una definició tant àmplia com aquesta hi tenen cabuda un nombre enorme de substàncies o objectes que alhora es poden classificar de moltes maneres. Les més utilitzades són les que ho fan en funció del seu origen (residus domèstics, comercials, industrials...) i les que ho fan en funció de les seves característiques fisicoquímiques. Com que l'objectiu d'aquest apartat és determinar quines tecnologies existeixen i s'utilitzen per valoritzar els residus, s'utilitzarà la segona classificació.

### 4.1. Classificació

En funció de la composició dels residus, es poden classificar en els següents tipus [11]:

- **Orgànic:** S'entén per residu orgànic aquell residu capaç de descompondre's en un període de temps relativament ràpid. Provenen generalment de matèries derivades d'animals, vegetals o restes d'aliments. La seva descomposició es basa en la fermentació, procés que és aprofitat per la valorització.  
Existeixen bàsicament dos mètodes de valorització de l'orgànic que són el compostatge i la biometanització. Amb el primer, s'obté el compost utilitzat com a fertilitzant, mentre que amb el segon, s'obté biometà utilitzat com a combustible.
- **Vidre:** El residu del vidre, es tracta d'un residu inert format bàsicament per sílice, el qual es pot reciclar un gran nombre de vegades. Per tant, la seva forma de valorització més comú és el reciclatge, procés mitjançant es reaprofita el material.  
El reciclatge del vidre consisteix generalment en un procés de tres etapes. En primer lloc, es selecciona i neteja el material, per tal que estigui lliure d'impureses. A continuació, es tritura el vidre, per obtenir un granulat idoni per passar a la darrera etapa. El vidre granulat, també conegut com a casc de vidre s'escalfa a altes temperatures fins que es rompen els cristalls que donaven la rigidesa al vidre i es forma una massa viscosa homogènia. A partir d'aquest moment, en funció de la finalitat, es mescla amb un cert percentatge de vidre nou i finalment es procedeix a donar el tractament específic per obtenir el producte desitjat.
- **Plàstic:** Existeix una gran varietat de residus plàstics que alhora són classificats en diferents subgrups en funció de la seva composició, la qual determinarà el seu procés de valorització. Alguns exemples són: Politereftalat d'etilè (ampolles d'aigua), Polipropilè (taps d'ampolles), Polietilè d'alta densitat (garrafes), Plàstics vinílics (PVC), Polietilè de baixa densitat (bosses de

plàstic transparents), Polipropilè (cables), Policarbonat (carcasses d'electrodomèstics), Poliòxid de metilè(aïllaments)...

Així doncs, en funció del tipus de plàstic i de la seva qualitat es poden portar a terme diferents valoritzacions.

El primer tipus, consisteix en el reciclatge mecànic que a la vegada es pot classificar en reciclatge de pre-consum o de post-consum. El primer està basat en la reutilització del material en el mateix punt de generació. D'aquesta manera, el material consta de menys impureses i no s'ha de transportar, fet pel qual es tracta d'una valorització barata. El segon està basat en el reaprofitament del material un cop el producte ja s'ha utilitzat. En aquest cas, el residu és més heterogeni i consta d'impureses per la qual cosa el seu procediment és més costós.

El segon tipus, consisteix en el reciclatge químic. Es basa en l'aprofitament de qualque reacció química (hidròlisi, piròlisi, glicòlisi o alcoholisi) per trencar els enllaços del material i obtenir-ne monòmers, els quals serviran de matèria prima per formar nous polímers. Aquest tipus de valorització requereix de processos força costosos tan econòmicament com energèticament i per tant no és molt utilitzat.

Finalment, el tercer tipus consisteix en la valorització energètica, la qual es basa en l'aprofitament del poder calorífic dels plàstics per generar qualque tipus d'energia útil.

- **Paper i Cartró:** Aquest tipus de residu està format bàsicament per fibres de cel·lulosa i coles, a més de tintes o colorants.

La seva forma de valorització més comú consisteix en el reciclatge. Generalment es fa un cop se n'ha fet un ús del producte i per tant el primer pas consisteix en la separació i classificació en funció de la qualitat del residu. Seguidament es desintegra dissolent-lo en aigua, obtenint així una pasta. Aquesta pasta es depura, extraient-ne així les impureses que s'hi puguin trobar. Finalment la pasta ja està a punt per acabar convertint-se en paper seguint el mateix procés que si s'utilitzés matèria prima.

- **RAEE:** Els Residus d'Aparells Elèctrics i Electrònics són aquells que es generen un cop els aparells deixen de funcionar o passen a trobar-se inutilitzats. No obstant, generalment estan composts per un gran nombre d'altres components o fins i tot subcomponents que poden ser reaprofitats per fabricar nous aparells.

Així doncs, la forma de valorització dels RAEE consisteix amb la descomposició dels aparells elèctrics i electrònics en els diferents components i la classificació dels quals poden ser reutilitzats directament i els que no. Un cop feta procurar reparar aquells que no són òptims i en cas contrari reciclar-los per tal de reaprofitar el seu material.

- **Tèxtil:** Els residus tèxtils on també s'hi pot trobar el calçat és aquell format per roba o teixits que o bé estan romputs o es troben en desús. El fet d'estar vivint en una societat on la moda ràpida cada cop té més pes així com la pressió estètica, provoca que es llencin o es passin a considerar residus algunes peces que poden ser aprofitades.

D'aquesta manera el procés de gestió del residu tèxtil es basa majoritàriament en la preparació per a la reutilització, ja que és relativament fàcil i econòmic. Pròpiament la valorització pot

constar de dues parts. La primera, consisteix en el reciclatge del material. És a dir, aprofitar els teixits per extreure'n el fil o per crear-ne de nou i poder elaborar nous productes. La segona, consisteix en la valorització energètica. És a dir, agafar el teixit que no es pot ni reutilitzar ni reciclar i aprofitar-lo per generar energia, ja sigui en forma de calor o electricitat.

- **Ferralla i Metall:** Els residus de ferralla i metall poden tenir orígens i composicions molt diverses, per tant, seran característiques a tenir en compte a l'hora d'escollir com s'han de gestionar. No obstant, la gran majoria d'ells es pot reciclar, com ja passava amb el vidre. Així doncs, el procediment de valorització és força similar.

En primer lloc, el més important és classificar el residu en funció de la composició del material i de la seva puresa i es procedeix a premsar-lo i cisellar-lo. En segon lloc, es porta a terme el procés de neteja i es retira el major número possible d'impureses. Finalment, generalment es procedeix a realitzar el reciclatge del material per generar-ne de nou. Aquest consisteix en trossejar-lo i crear retalls encara més petits per a continuació escalfar-los fins arribar al punt de fusió.

A partir d'aquest moment, en funció de l'ús que se li vulgui donar al material, es mesclarà el metall fos amb material verge per tornar-lo a refredar i donar forma a un nou producte.

- **Pintures i Olis:** Els residus de pintures i olis entre els quals també s'hi poden incloure vernissos i coles, tenen un tractament especial. Normalment no es recullen al mateix lloc que la resta de residus, per la seva perillositat. Tot i que no s'engloben directament en la categoria de residus perillosos, molts hi poden acabar un cop classificats en plantes específiques.

El procés de valorització generalment consisteix en l'aprofitament dels olis per generar nous productes gràcies a la seva composició. Els olis són triglicèrids, un tipus de lípid format per cadenes de molècules de glicerol. Aquesta característica química fa que siguin òptims per produir biocombustibles, sabons o vernissos, mitjançant processos com la transesterificació.

- **Bateries i Piles:** Els residus de bateries i piles tenen una valorització complexa per la seva composició la qual inclou metalls pesats i altres materials perillosos.

Per norma general, el procés de valorització de bateries i piles comença de la mateixa manera que la resta de residus, fent una classificació i ordenació dels diferents tipus per a continuació, avaluar el seu estat i analitzar quin és el tractament més òptim. El següent pas consisteix en aprofitar tots aquells components, generalment bateries, que encara se'ls hi pot donar un ús que en alguns casos pot ser diferent a l'inicial, però pel qual no necessiten cap tractament. Les que han de ser tractades segueixen el següent procés.

Es descomponen les piles i les bateries en els subcomponents que les conformen i es separen en elements no perillosos com els fèrrics, no fèrrics, plàstics o papers. La resta passa a ser tractada per evitar que elements nocius acabin a l'atmosfera. Així doncs, els gasos són filtrats mentre que els líquids i sòlids es processen mitjançant reaccions químiques, obtenint diferents materials per separat: Grafit, Mercuri, Coure, Zinc, Níquel, Vapor d'aigua entre d'altres.

- **Perillosos:** Els residus perillosos són aquells que no són inerts i la seva alliberació sense cap tractament previ pot constituir un risc pel medi. Així doncs, per norma general, el tractament

que se li dona prioritza la seguretat abans que la valorització. A més a l'haver-hi molts tipus diferents de residus perillosos cadascun es tracta d'una manera diferent i per tant no seran objecte d'explicació en aquest apartat.

- **Runes:** El residu runes es constitueix de diferents materials, d'origen petri normalment provinent del món de la construcció. Majoritàriament es tracta d'un residu inert el qual no constitueix cap risc per l'entorn i que la seva valorització es basa en el reciclatge del material. Generalment les runes poden tornar a ser utilitzades un cop han seguit el procés de trituració i garbellament el qual permet esdevenir nova matèria primera. En cas en que aquest procediment no sigui possible o per altres circumstàncies no es pugui portar a terme, el residu normalment no és vàlid per valoritzar-lo energèticament. Així doncs, es passa a la seva eliminació, la qual pot acabar derivant en un darrer ús si les runes són depositades en noves construccions contribuint així a fixar els fonaments.
- **Resta:** El darrer residu a classificar és la resta. Aquesta està composta per qualsevol tipus de material que no s'englobi en cap de les anteriors categories o que per diferents motius no s'hagi pogut separar correctament. Així doncs, normalment es tracta de residus que no han estat separats i classificats en el seu origen i que per la seva mida, no es poden separar o no surt rendible econòmicament i energèticament. Així doncs, es pot considerar la resta com aquell residu que esdevé una mescla dels altres i per tant la valorització material no és possible. És per això que el procés de valorització més comú és l'energètica.

## 4.2. Valorització energètica de residus

Un cop completada la classificació dels diferents tipus de residus en funció del seu material així com els seus principals mètodes de valorització, a continuació, s'expliquen més detalladament els processos de valorització energètica, les diferents tecnologies utilitzades i els mètodes existents.

Actualment existeixen tres categories diferents de tecnologies per a la valorització energètica. La primera d'elles es basa en el tractament tèrmic, tecnologia dintre de la qual s'hi poden trobar quatre mètodes: La incineració, la gasificació, la piròlisis i la gasificació per plasma. La segona es basa en la digestió anaeròbica, mentre que la tercera fa referència a la utilització directa del residu com a combustible [12].

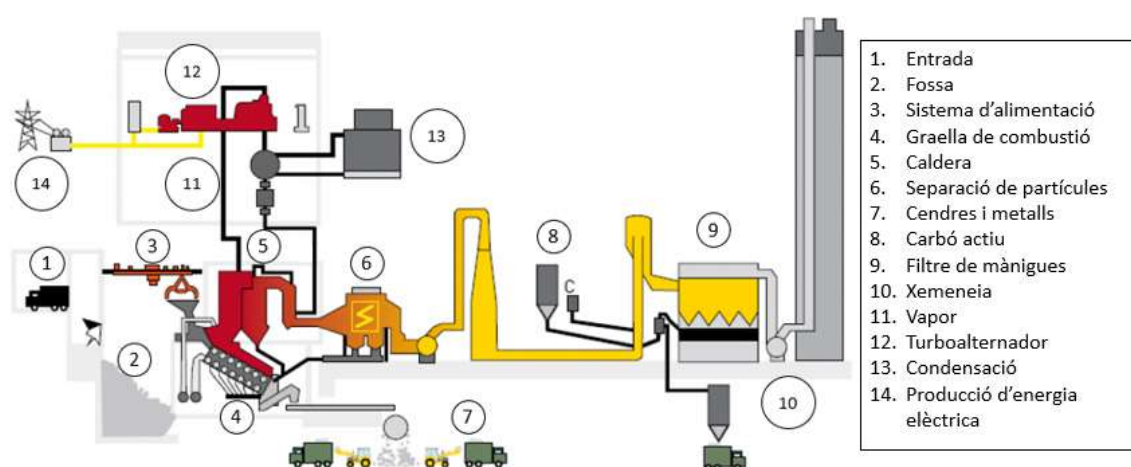
### 4.2.1. Tecnologies basades en el tractament tèrmic

Les tecnologies basades en el tractament tèrmic són aquelles que sotmeten els residus a diferents processos tèrmics amb la finalitat d'extreure i poder aprofitar l'energia disponible en ells. A continuació, s'expliquen les diferents tecnologies existents:

#### 4.2.1.1. Incineració

El procés d'incineració consisteix en la combustió del residu amb la finalitat d'obtenir energia en forma de calor i/o electricitat i reduir considerablement el volum de residu. Perquè es produeixi la reacció de combustió, es requereix de combustible, en aquest cas el residu, i de comburent, l'oxigen comprès en l'aire.

D'aquesta manera, a l'iniciar-se la reacció, el comburent oxida el combustible i alhora aquest redueix el comburent. Per tal que sigui completa, es porta a terme amb excés d'oxigen del que estequiomètricament seria necessari. Així doncs, a la sortida de la reacció s'obté  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , calor i altres compostos que es trobaven originalment mesclats amb el combustible.



**Figura 4.1.** Esquema de les parts d'una incineradora (Font: IDAE, *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos*)

El procés comença amb la combustió del residu, la qual es produeix a una temperatura entre els  $850^{\circ}\text{C}$  i els  $1000^{\circ}\text{C}$ , en funció del poder calorífic del residu i de l'excés d'aire en la reacció. A continuació, els gasos de la combustió transfereixen part de la seva calor a l'aigua per obtenir vapor i a partir d'aquí utilitzar-lo, bé directament o bé per generar electricitat mitjançant el cicle de Rankine. Per altra banda, els gasos són filtrats per tal de separar-ne partícules contaminants i les cendres i escòries resultants es tracten per finalment poder ser depositades i donar lloc a la fi de condició de residu.

Es considera que mitjançant aquest procés es pot extreure entre un 80% i un 85% de l'energia interna del residu, tot i que aquest percentatge es veu considerablement reduït a l'hora de valorar l'energia final obtinguda. Això és degut als rendiments termodinàmics els quals limiten l'aprofitament que se'n pot fer de l'energia després pel combustible.

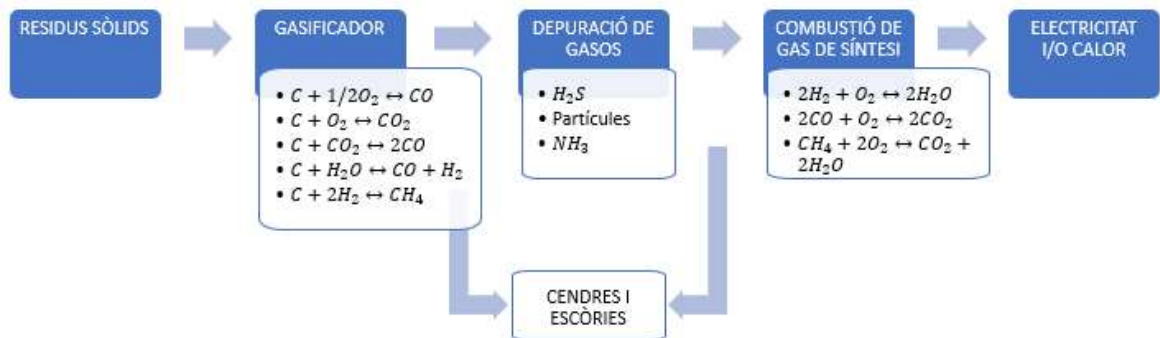
En funció de la tecnologia utilitzada per portar a terme la combustió es poden trobar tres tipus diferents d'incineració: Incineració en forn de graella, Incineració en forn rotatiu, Incineració en forn de llit fluid.

- Incineració en forn de graella: Es tracta d'un forn en que la combustió es va desenvolupant progressivament a mesura que el residu va avançant per una graella inclinada. D'aquesta manera s'aconsegueix que el residu es mescli i homogeneïtzi correctament. A més al llarg de tot el procés es va injectant aire perquè la combustió sigui completa. Aquest tipus de forn s'utilitza per a la incineració de residus de composició molt heterogènia tot i que no permet que continguin líquids i altres materials com segons quins plàstics que es puguin fondre en la pròpia graella. Aquestes característiques, juntament amb el fet de no haver de requerir combustible addicional, fa que es tracti de la tecnologia més utilitzada i estesa arreu.
- Incineració en forn rotatiu: Es tracta d'un forn en que la combustió es desenvolupa a l'interior d'un tambor horitzontal en rotació amb l'eix lleugerament inclinat. S'utilitzen per tractar pràcticament qualsevol tipus de residu, ja que no hi ha risc que quedi fos en la paret, però requereix d'un pretractament previ d'adequació. L'inconvenient principal del forn rotatiu recau en la seva estructura física, ja que al tractar-se d'un cilindre estanc, no permet la regulació de l'entrada d'aire durant el procés de combustió. Això dificulta el control de la temperatura a la que es porta a terme la reacció, fet pel qual generalment s'utilitzen combustibles addicionals.
- Incineració en forn de llit fluid: Es tracta d'un forn format per una cambra vertical en la qual en la part inferior, s'hi troba el material de llit, col·locat a sobre d'unes reixes o filtre. Per sota hi entra l'aire primari ja calent que actua com a comburent un cop entra dins la cambra. Mesclat amb el material de llit, normalment arenes, s'hi va introduint el residu que actua com a combustible, el qual suposa al voltant del 3% del pes del material de llit. Un cop el comburent i el combustible es troben dins, es produeix la ignició i la posterior combustió. Perquè aquesta sigui completa, normalment hi ha una entrada d'aire secundària i inclús s'hi pot introduir combustible addicional. De la combustió del residu, en la part superior del llit apareixen els gasos de combustió a una temperatura d'entre 850°C i 950°C així com les cendres. Mentre que en el llit es filtren les escòries i acaben caient a través de les reixes o filtres. Els gasos es van concentrant al llarg de la cambra, formant un gradient de temperatures. Posteriorment, es segueix el mateix procés que amb les tecnologies anteriors. Aprofitament de l'energia tèrmica, filtratge de gasos i eliminació d'escòries. La incineració en forn de llit fluid és força utilitzada per tractar residus provinents de depuradores com poden ser fangs o també biomassa. Requereixen d'un tractament previ força rigorós basat en un procés de granulat, que enquereix el procés.



#### 4.2.1.2. Gasificació

El procés de gasificació és bastant similar al d'incineració, amb la peculiaritat que aquest no es basa en una reacció d'oxidació complerta i per tant no s'arriba a donar la combustió. És a dir, la gasificació consisteix en l'obtenció d'un gas amb un cert contingut energètic a partir de l'oxidació parcial dels residus. Així doncs, els elements principals d'aquest procés són: Per una banda un residu amb un contingut considerable de carboni i per l'altra banda una font d'oxigen, normalment aire o vapor.



**Figura 4.2.** Esquema del procés d'una planta de gasificació (Font: IDAE, *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos*)

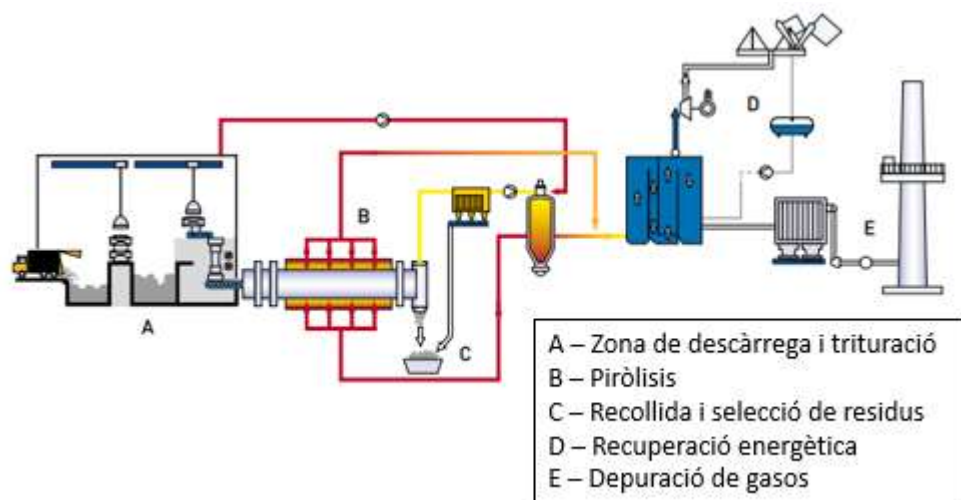
Del procés de gasificació s'obtenen una sèrie de gasos a més de cendres i escòries que no es poden aprofitar energèticament. Els més comuns són: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O i N<sub>2</sub>. Aquests poden ésser utilitzats com a combustibles per produir energia elèctrica en turbines de gas o motors de combustió interna, per alimentar calderes i forn o per produir composts orgànics com l'amoníac o el metanol.

Aquest procés de valorització energètica normalment es produeix en reactors, similars als utilitzats en la combustió de les plantes d'incineració. Es poden classificar en dos tipus en funció del llit del reactor: Gasificadors de llit fixe i Gasificadors de llit fluïditzat.

Els residus més utilitzats en aquesta tecnologia de valorització són aquells amb un alt contingut de carboni i que alhora tinguin un poder calorífic el més elevat possible. Per altra banda, generalment, per poder dur a terme la gasificació el residu ha de ser sotmès a un procés de pretractament enfocats a aconseguir la mida adequada i la màxima homogeneïtzació.

### 4.2.1.3. Piròlisi

El procés de piròlisi, de la mateixa manera que la gasificació, consisteix en l'obtenció de gasos amb una alta densitat energètica a partir dels residus tractats. En aquest cas però, no s'hi aporta oxigen. Així doncs, la piròlisi tracta de descompondre les substàncies mitjançant l'aportació de calor.



**Figura 4.3.** Esquema de les parts d'una planta de piròlisi (Font: IDAE, *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos*)

Del procés generalment s'obtenen tres tipus de productes a la sortida de la reacció. En primer lloc, el gas de síntesi, amb un poder calorífic comprès entre els 10 MJ/m<sup>3</sup> i 20 MJ/m<sup>3</sup> que posteriorment podrà tenir els mateixos usos que els que tenia en el procés de gasificació. En segon lloc, apareixen líquids normalment composts per hidrocarburs, que condensen a elevades temperatures. I finalment, també s'obté un residu sòlid format per aquell material no combustible.

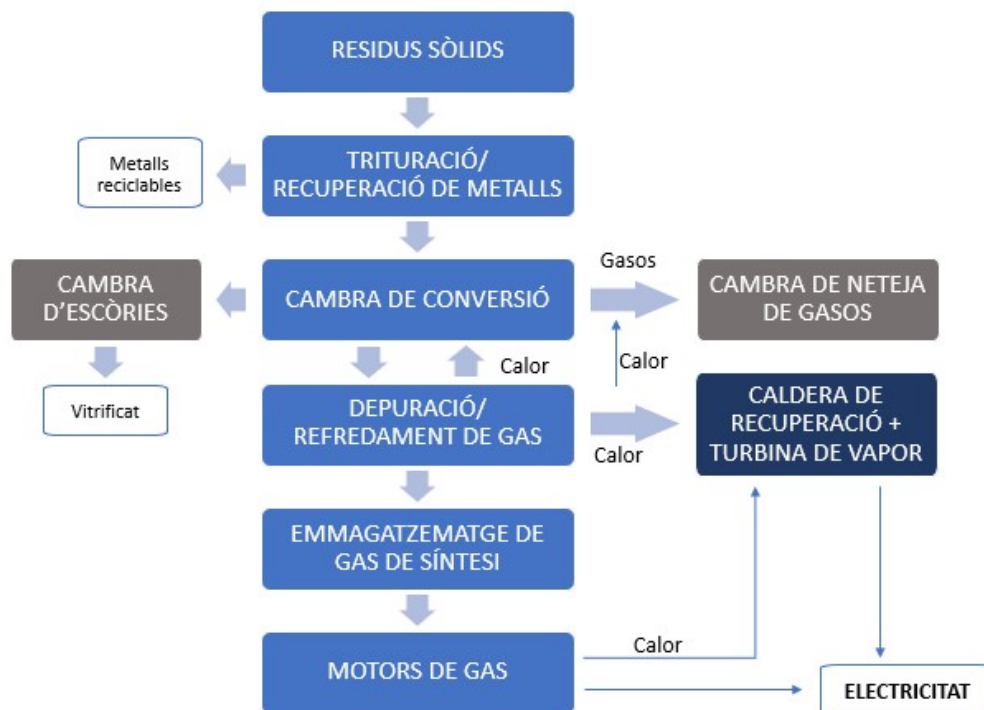
Aquest procés es caracteritza per desenvolupar-se a temperatures inferiors als dos anteriors i en funció d'aquestes varien els productes obtinguts de les reaccions: Procés a baixa temperatura, < 550 °C la majoria de productes són líquids (quitrà, olis i carbó). Procés a temperatura mitja, entre 550 °C i 800 °C s'obté gas amb un elevat PCI. Procés a alta temperatura, > 800 °C es produeix gran quantitat de gas.

Generalment la piròlisi es du a terme en forns rotatius similars als utilitzats per a la incineració o en forns de tubs calent, que es troben en les mateixes plantes d'aprofitament del gas. D'aquesta manera, s'eviten els costos associats a l'emmagatzematge i transport.

Els residus utilitzats per aquest procés de valorització són molt diversos. Al requerir una alta densitat de carboni i que alhora els enllaços dels materials que el conformen siguin fàcils de trencar, és comú utilitzar residus biodegradables i també segons quins tipus de plàstics.

#### 4.2.1.4. Gasificació per plasma

El procés de valorització energètica de gasificació per plasma té el mateix objectiu que el de gasificació termoquímica, és a dir, el d'obtenir gas amb una gran densitat energètica, però en aquest cas utilitzant plasma.



**Figura 4.4.** Esquema de les parts d'una planta de gasificació per plasma (Font: IDAE, *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos*)

El plasma és un dels quatre estats de la matèria i consisteix bàsicament en gas ionitzat. És a dir, quan a un gas se li aplica suficient energia com perquè els àtoms xoquin entre ells i es vagin desprenent electrons formant el gas ionitzat. Generalment, s'aconsegueix plasma sotmetent un gas dielèctric a un diferència de potencial. D'aquesta manera si el camp elèctric originat és prou fort, fa que els electrons es desprenguin del nucli i se'n vagin cap l'ànode mentre que els nuclis ho fan cap al càtode, donant lloc així a la ionització. Perquè aquesta ruptura tingui lloc es requereix d'una gran quantitat d'energia en forma de calor que fa que es treballi en temperatures compreses entre els 5000°C i els 15000°C.

Pel tractament de residus la utilització de la tecnologia de la gasificació per plasma s'utilitza seguint la **Figura 4.4**. Com es pot observar, a través de les torxes de plasma, s'obté gas, compost bàsicament per monòxid de carboni, i residu sòlid inert generalment vitrificat. La gràcia principal d'aquesta tecnologia és que el plasma utilitzat prové del propi gas després dels residus, el qual ha estat ionitzat mitjançant l'aplicació d'un camp elèctric.

Aquesta tecnologia és força utilitzada amb residus perillosos. Per una banda, pel que fa als gasos, al treballar a tan elevades temperatures, es destrueixen els enllaços i per tant s'elimina el risc. I per altra banda, pel que fa als sòlids que no es gasifiquen, a l'aconseguir una massa vitrificada inerta, desapareix la perillositat del residu.

Així doncs, les principals avantatges de la gasificació per plasma són que al treballar a temperatures tan altes l'energia romanent en les escòries i quitrans formats és inferior que en el cas de la gasificació o la piròlisis, per tant s'extreu una major quantitat d'energia dels residus. A més, els gasos formats tenen menor percentatge d'elements contaminants com els NO<sub>x</sub>, fet que en facilita el seu filtratge. Per altra banda, els principals inconvenients són l'elevat consum energètic requerit per formar el plasma, així com el desaprofitament que se'n fa de l'energia romanent en les escòries vitrificades.

Cal comentar que aquesta tecnologia, encara es troba en fases d'investigació i hi ha pocs exemples d'aplicació arreu del món.

#### 4.2.2. Tecnologia basada en la digestió anaeròbica

El procés de valorització energètica basat en la digestió anaeròbica consisteix en l'obtenció de metà a partir de residus biodegradables, generalment la fracció orgànica o els fangs provinents de depuradores o indústries. Es tracta d'una tecnologia força implementada arreu i que aprofita el procés de metanització, que es dona de forma natural en la biodegradació de segons quins residus, per obtenir biocombustibles.

El procés per valoritzar els residus mitjançant la digestió anaeròbica consta de diferents fases:

En primer lloc, es recull el residu per a continuació classificar-lo i adequar-lo per tal de poder extreure'n impureses i facilitar el tractament posterior. L'adequació es pot donar per mitjà de quatre pretractaments: Mecànics, Tèrmics, Químics o Biològics. Els pretractaments mecànics tenen la funció de reduir la mida de les partícules per així afavorir la biodisponibilitat dels residus. Els tèrmics i els químics, tenen la funció de trencar alguns enllaços que formen macromolècules així com eliminar alguns microorganismes no desitjats que es puguin trobar en el residu. Finalment, els biològics tenen la funció de inocular alguns bacteris específics o afegir enzims que facilitin i millorin la posterior digestió anaeròbica.

Un cop passat el procés de pretractament el residu entra dins el digester el qual pot ser de **mescla completa** o de **flux per pistó**.

Els **digestors de mescla completa** són relativament senzills, característica que fa que siguin molt utilitzats. Es basen en un dipòsit estanc en el qual a la part baixa s'hi troba la matèria prima juntament amb un agitador el qual té la funció de mantenir-la el més homogènia possible a una temperatura determinada. Per aquest fet, també disposen d'un sistema de calefacció així com d'un altre de control per poder regular la temperatura en tot moment. A la part de sobre s'hi troba el gasòmetre que té la funció d'emmagatzemar el gas que es va formant, bàsicament compost per metà, diòxid de carboni i vapor d'aigua. Aquests tipus de digestors destaquen per ser bastant simples i barats i per poder tractar residus orgànics de tot tipus, sempre i quan es trobi majoritàriament en estat líquid. No obstant, també presenta alguns inconvenients com poden ser: El complicat manteniment, ja que per accedir al sistema de calefacció normalment s'ha de buidar completament el dipòsit. El control dels paràmetres que s'han de regular de la matèria com la humitat i la calor, el qual és més difícil que en els digestors de flux per pistó. I el fet que els digestors no fixin la biomassa, que provoca que els microorganismes abandonin el dipòsit juntament amb la massa restant, un cop s'acaba la metanització.

Els **digestors de flux** per pistó són relativament més complexos i tenen un cost d'operació lleugerament superior als dels de mescla completa. Es basen en un dipòsit normalment cilíndric el qual transversalment és travessat per un agitador generalment de pales. El seu moviment és lent i constant i alhora que va mesclant el residu a valoritzar, també el va empenyent cap a la sortida. D'aquesta manera s'aconsegueix que constantment vagi entrant i sortint residu i que el temps que tarda la matèria orgànica en degradar-se gràcies a l'acció dels diferents microorganismes encarregats de dur a terme les diferents reaccions sigui inferior. Pel que fa a la resta és pràcticament igual que a digestor de mescla completa. El dipòsit es troba envoltat per un sistema de calefacció i un altre de control que permeten regular els paràmetres del substrat. A més, també disposen d'un gasòmetre en la part superior que s'encarrega de recollir i emmagatzemar el biogàs format. Aquests tipus de digestors normalment tenen una mida inferior, al voltant dels 1000 m<sup>3</sup> i es caracteritzen per poder tractar un percentatge lleugerament superior de residus sòlids, al voltant del 40%.

Un cop el residu orgànic o substrat ha passat pel digestor, procés que es pot fer en una o dues etapes, per una banda s'obté biogàs, que com s'ha comentat anteriorment està format per metà, diòxid de carboni i vapor d'aigua, i per l'altre digestat, és a dir, el material resultant del procés de digestió. El biogàs pot ser consumit en la mateixa planta o transportat i generalment l'ús més comú és el de servir com a combustible en plantes de cogeneració. Mentre que el digestat passa per diferents fases per acabar d'aprofitar-ne el seu potencial energètic.

En primer lloc, en sortir del digestor, es separa el digestat en funció de la seva fase, líquida o sòlida. Així doncs, un cop obtinguda cada fracció, es pot destinar la sòlida al compostatge i la líquida a la fertirrigació (aplicació simultània d'aigua i fertilitzants per mitjà d'un sistema de reg). Cal comentar que en funció de l'ús concret que se n'hagi de fer de cadascuna es poden sotmetre a altres processos per

adequar-les. Ja sigui recuperant nutrients que poden ser reaprofitats de manera separada o disminuint les concentracions de nitrogen per evitar contaminacions per nitrats.

#### **4.2.3. Tecnologia basada en l'ús del residu com a combustible**

Finalment el tercer tipus de tecnologia utilitzada per tal de valoritzar energèticament els residus es la de l'ús d'aquests com a combustible. Es tracta d'una tecnologia que algunes referències l'inclouen dins del primer grup, ja que es basa amb l'aprofitament del residu com a combustible, per extreure'n la seva energia interna i transformar-la en energia útil. No obstant, la principal diferència és que en aquest procés el residu no pateix cap transformació química prèvia en forma de reacció i per tant, només es sotmet a processos d'adequació mitjançant processos mecànics.

L'objectiu principal per l'aprofitament, és transformar el residu original en CSR (Combustible Sòlid Recuperat) o CDR (Combustible Derivat de Residus). Per aconseguir-ho, es segueix els següent procediment. En primer lloc, es classifica i separa el residu per tal d'intentar tractar cada fracció de la millor forma possible. En segon lloc, es passa al procés de trituració de tal manera que s'obté un residu el més homogeni possible. A continuació, s'asseca el residu per tal d'afavorir la posterior combustió alhora que es torna fer un garbell intentant extreure'n les impureses al màxim. Un cop fet, s'obté la matèria prima per l'elaboració del CSR o CDR. La seva producció variarà en funció del material que compona la matèria prima, però els més comuns són els de granulació, pel·letització i briquetació. D'aquesta manera s'obté el combustible ja llest per ser cremat amb la mida adequada i amb una composició força homogènia perquè la reacció es doni amb les condicions idònies.

Els residus més utilitzats per aquesta tecnologia són els residus forestals, dels quals se n'obté la biomassa. Els residus sòlids urbans també poden servir, encara que el seu tractament previ es complica degut a la seva composició. Aquesta tecnologia és la més senzilla i alhora la més econòmica. Tot i això, els rendiments obtinguts són inferiors, ja que el PCI del combustible resultant generalment és inferior als aconseguits amb la digestió anaeròbica o els processos d'incineració i gasificació.

## 5. Anàlisi legislatiu

Per tal de poder desenvolupar el projecte, un cop analitzat l'estat de l'art, el següent pas és tenir en compte el marc regulador que li afecta. És a dir, sota quines lleis es veurà sotmès, i per tant, quina legislació ha de tenir en compte per tal que es pugui dur a terme dins l'estricta legalitat.

El cas de l'estat espanyol, tot i no ser únic, és especial, ja que el fet de comptar amb comunitats autònomes, cadascuna amb unes atribucions diferents, fa que hi hagi un gran nombre de lleis i decrets a tenir en compte a l'hora de fer l'anàlisi legislatiu.

En primer lloc, les primeres directrius a seguir es troben dictades des del Parlament europeu i el Consell de la Unió Europea. Així doncs, tot i que no són pròpiament lleis d'estricta compliment, sí que constitueixen un conjunt d'objectius que s'han de complir per part dels estats membres de la Unió Europea.

En segon lloc, l'estat espanyol, en funció dels objectius fixats per la UE, elabora un seguit de lleis a nivell general i alhora estipula quin serà l'òrgan que disposarà de la competència en qüestió. D'aquesta manera, pel que fa als residus, el govern central trasllada les competències a les comunitats autònomes.

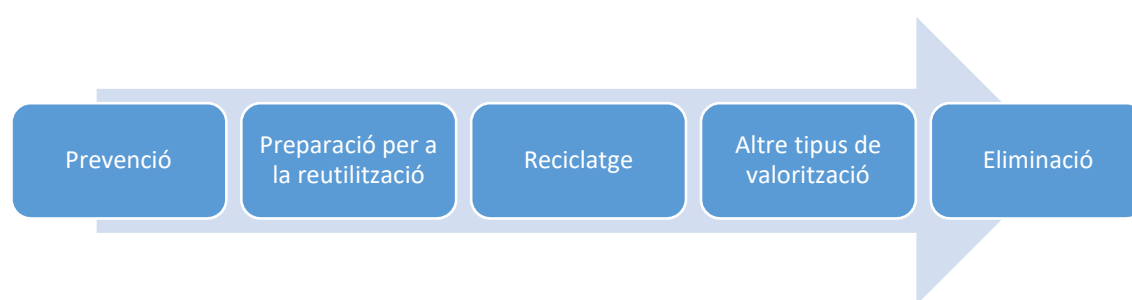
Finalment, les CCAA són les encarregades de regular i elaborar les lleis per tal que en el seu territori es compleixi la normativa estatal que alhora es troba supeditada a les directrius europees. El darrer esglaió es troba en les altres administracions encara més petites, com en el cas de les Illes Balears, els Consells insulars i ajuntaments, que són els encarregats de gestionar la infraestructura necessària per poder complir la llei.

### 5.1. Normativa europea

[13]–[15] Pel que fa a la normativa europea, les primeres directrius en regular els residus dels estats membre, són la *Directriu 1991/156/CEE de 18 de Març* i la *Directriu 1994/62/CE de 20 de Desembre*. Anteriorment hi havia hagut altres directrius però que els estats no havien acabat de complir. Així doncs, el 1991 s'aprova la directiva amb l'objectiu de poder gestionar de manera més eficaç els residus mitjançant la definició d'una terminologia comuna. A continuació, el 1994 s'aprova una nova directiva que complementava l'anterior posant el focus en els residus d'envasos. Aquestes directrius van estar vigents al llarg de més d'una dècada, tot i que al llarg d'aquest període es van anar modificant alguns articles i afegint-ne d'altres.

Posteriorment, amb la finalitat de modernitzar la normativa i adequar-la als nous temps s'aprova la *Directriu 2008/98/CE de 19 de Novembre*. Aquesta, no deroga completament les anteriors directius però sí que en modifica moltes d'elles.

La *Directriu 2008/98/CE de 19 de Novembre* té com a objectiu «*protegir el medi ambient i la salut humana mitjançant la prevenció o la reducció dels impactes de la generació i gestió de residus, la reducció dels impactes globals associat a l'ús de recursos i la millora en l'eficàcia del seu ús*». A continuació, detalla l'àmbit d'aplicació excoent-ne, entre d'altres, aquells «*materials d'origen natural, agrícola o silvícola, no perillosos i que puguin esdevenir biomassa mitjançant mètodes o procediments que no malmetin el medi ambient*». Posteriorment, es detalla l'ordre de prioritats a l'hora de legislar la prevenció i la gestió dels residus.



**Figura 5.1.** Esquema de l'ordre de prioritats en la gestió de residus (Font: Elaboració pròpia)

Aquesta jerarquia és molt important, ja que no només s'ha de tenir en compte a l'hora de regular sinó també en el moment de gestió en qualsevol àmbit.

Un cop definit l'àmbit d'aplicació i elaborat el llistat de definicions la directriu especifica les responsabilitats que tenen els diferents actors que intervenen en la gestió de residus i fixa objectius per a les cinc etapes de les que es compona la gestió. També presenta tot un seguit de normes sobre l'etiquetatge tant de productes com de residus i sobre les autoritzacions i registres dels mateixos.

Finalment parla de plans de gestió de residus i programes enfocats a la prevenció i de com s'han d'anar avaluant i revisant al llarg del temps.

La *Directriu 2008/98/CE de 19 de Novembre* segueix vigent en la seva majoria de punts en l'actualitat. No obstant, com és evident, hi ha alguns articles que s'han hagut d'anar canviant i d'altres nous que s'han introduït, amb la finalitat d'adaptar-se als nous temps. A part dels articles merament legislatius, els objectius fixats i els plans presentats, també s'han anat actualitzant en funció dels resultats obtinguts i de les necessitats requerides.

Així doncs, s'han anat presentant noves directrius la darrera de les quals és la *Directriu 2018/851/UE de 30 de Maig*.



La *Directriu 2018/851/UE de 30 de Maig* bàsicament modifica i complementa la *2008/98/CE* amb la característica principal que es tracta de la primera directriu que tracta el tema dels residus aprovada després que tots els estats membre de la UE haguessin firmat els *Acords de París* sobre el canvi climàtic. Aquest fet és força significatiu, ja que en la directriu s'introdueixen nous conceptes que fins el moment no apareixien. Es parla de la necessitat de facilitar la transició cap a un model d'economia circular, de la importància que la Unió Europea deixi de dependre de les importacions de matèries primes, del problema que suposa l'abocament massiu de residus al medi marí, entre molts altres temes.

Pel que fa a la majoria d'articles que la directriu modifica o amplia, l'objectiu és el d'endurir les responsabilitats sobre els productors i posseïdors de residus, tal com s'especifica a l'*article 8 apartat 1*. Per altra banda, també s'exigeix als estats membres que ofereixin més informació a la població sobre l'origen dels materials de cada producte i que alhora siguin més transparents amb la informació i dades referents als residus. A més, també s'insta a prevenir la generació de residus, fomentant, models de producció sostenible, la reutilització de productes, el reparament de dispositius evitant així l'obsolescència programada, *article 9*.

## 5.2. Normativa espanyola

[16]–[18] Pel que fa a la normativa espanyola, la llei de referència és la *Llei 22/2011 de 18 de Juliol*, també coneguda com *Llei de Residus i Sòls Contaminats*. Aquesta, s'aprovà el 2011 emesa per la directriu europea del 2008 explicada anteriorment i substitueix la *Llei 10/1998 de 21 d'Abril*.

La *Llei 22/2011 de 18 de Juliol* s'estructura en vuit títols, compostos per capítols, cadascun amb una temàtica diferent i un seguit de disposicions referents a aspectes concrets que cal mencionar apart.

En primer lloc, el Títol I es divideix en dos capítols. El primer recull els conceptes bàsics presentats a la *Directriu 2008/98/CE de 19 de Novembre* i els incorpora a la legislació espanyola. Així doncs, apareix l'objecte de la llei, l'àmbit d'aplicació, les definicions, que es poden trobar al glossari i la classificació dels residus. Per altra banda, el segon capítol fa referència a la política de residus, en la que s'inclou la jerarquia a l'hora de gestionar els residus, **Figura 5.1.**, i a les competències administratives. És a dir, es defineixen les competències que tindrà cada òrgan administratiu de l'Estat. Segons l'Article 12:

- El Ministeri de Medi Ambient, Medi Rural i Marí elaborarà un Pla Nacional de gestió de residus i alhora establirà uns objectius mínims de reducció i gestió dels residus. A més, és l'encarregat d'exercir la vigilància i inspecció, i té la potestat sancionadora.
- Les Comunitats Autònomes, han d'elaborar els programes i plans autonòmics per a la prevenció i gestió de residus. També disposa de la potestat d'autoritzar així com vigilar i sancionar, activitats relacionades amb la producció i gestió.
- Les Entitats Locals seran les encarregades de portar a terme i executar els plans elaborats per les autonomies, i alhora, vetllar perquè es compleixi. Aquestes, estan obligades a efectuar la recollida transport i tractament de residus domèstics generats en llars, comerços i serveis.

A més, L'article 12 deixa en potestat de les Comunitats Autònomes el grau de traspàs de competències a les Entitats Locals i especifica qui té la capacitat de comercialitzar internacionalment amb residus. Si es tracta de països membres de l'UE, és competència de la Comunitat Autònoma pertinent i si es tracta de països que no siguin membres de l'UE, la competència és de l'Estat.

El Títol II desenvolupa les bases del *Pla Estatal Marc de Gestió de Residus (PEMAR) 2016 – 2022* i del *Programa de prevenció de Residus*. En primer lloc, el PEMAR té l'objectiu de canviar l'enfocament en la gestió de residus i inclús en el model d'economia. Per altra banda, el Programa de prevenció de Residus, tal com diu el nom, té l'objectiu d'evitar la generació de residus i alhora disminuir la seva perillositat amb la finalitat de minimitzar l'impacte d'aquests en les persones i en el medi.

Ambdós pretenen abandonar l'actual model lineal, per un de circular, en què els residus siguin reintroduïts en el procés productiu esdevenint recursos i evitant així l'extracció de noves matèries primes.

El PEMAR, es desenvolupa seguint la jerarquia de la **Figura 5.1.** basat en la prevenció, és a dir, evitant generar qualsevol tipus de residu. Un cop generat el residu, procurar que el producte es pugui reaprofitar o tenir un segon ús. En cas en que no sigui possible, reciclar-lo, és a dir, donar valor als materials dels quals està compost. Un cop acabat aquest procés, intentar efectuar un altre tipus de procés de valorització, com pot ser la seva incineració per tal d'obtenir electricitat o calor útil. I finalment, finalitzar el cicle amb la seva eliminació.

Els punts claus del PEMAR per dur a terme els objectius són els següents:

- Un cop efectuat el procés de reciclatge, considerar la incineració com a mètode de valorització, sempre i quan sigui eficient energèticament.
- Millorar la gestió i afavorir l'aprofitament dels bioresidus a partir de mesures com la recollida selectiva o el tractament biològic.
- Fomentar la reutilització i el reciclatge a partir de la introducció dels conceptes de subproducte i finalització de la condició de residu.
- Afavorir la conscienciació de la ciutadania entorn als residus, incrementant la informació disponible i aportant més transparència en la gestió.
- Incrementar el control i endurir les sancions a qualsevol empresa o establiment que no compleixi amb les lleis establertes respecte la gestió de residus.
- Crear una Comissió coordinadora, transversal a totes les administracions públiques capaç d'oferir suport a qualsevol Entitat ja sigui pública o privada.

Pel que fa al Programa Estatal de prevenció de Residus, aprovat 27.11.2013, no es detallarà el seu contingut, ja que tot i ser de vital importància, la prevenció de residus no esdevé el tema principal d'aquest projecte i per tant, la seva normativa no li afecta directament.

Tornant a la llei de residus, el Títol III tracta les responsabilitats i obligacions dels diferents actors que intervenen en la gestió de residus. Aquest, es divideix en tres capítols:

El primer capítol està enfocat al productor o posseïdor inicial dels residus. En el cas en que aquest vulgui desfer-se'n, segons l'article 17, l'agent està obligat a donar-li el tractament correcte estipulat per llei o encarregar-lo a una entitat o empresa, degudament registrat i en ple compliment de la legalitat vigent, i en tot moment, haurà de poder aportar la informació requerida sobre el seu residu. En el cas en que el productor o posseïdor vulgui emmagatzemar-lo o mesclar-lo, segons l'article 18, aquest ho haurà de fer seguint els següents requisits. Els residus hauran d'estar correctament emmagatzemats i etiquetats, complint amb la normativa i mantenint les condicions adequades d'higiene i seguretat. En el cas en que el residu estigui destinat a la valorització podrà estar emmagatzemat un màxim de dos anys, mentre que si està destinat a l'eliminació, el temps màxim serà d'un any.

El segon capítol fa referència pròpiament a la gestió dels residus. Aquest compta amb quatre seccions. La primera tracta les obligacions dels gestors, les quals són pràcticament iguals que les dels productors disposats a emmagatzemar els residus. A més s'hi afegixen altres obligacions com la d'haver de disposar d'una assegurança en cas de manipular residus perillosos. La segona secció tracta la recollida, preparació per a la reutilització, reciclatge i valorització de residus, segons la qual qualsevol entitat ja sigui pública o privada té l'obligació de fomentar la reutilització i el reciclatge d'alta qualitat. A més, obliga a que tota administració competent a realitzar una recollida selectiva per almenys: Paper, metalls, plàstic i vidre. La tercera secció tracta els bioresidus, en la qual s'insta a tota entitat competent a efectuar-ne una recollida separada per tal de poder-los destinar al compostatge o a la digestió anaeròbica, permetent així la seva valorització. Finalment, la quarta secció fa referència al trasllat de residus dins del territori nacional o entre altres països. Per ambdós casos, els productes hauran d'estar degudament etiquetats i el trasllat prèviament notificat i autoritzat, i es regiran per la regla de proximitat territorial. En el cas dels trasllats interns les CCAA el podran vetar-lo, si aquests tenen la finalitat de ser eliminats o si no tenen la comunitat autònoma receptora, no té capacitat de tractar-los com és degut. En el cas dels trasllats internacionals, el Ministeri de Medi Ambient i Medi Rural i Marí, es reserva el dret de vetar-los en funció de la normativa europea.

Finalment, el tercer capítol va dirigit a com s'ha d'organitzar i fer efectiva la normativa i s'enfoca principalment a l'administració dictaminant com s'han d'efectuar les autoritzacions, quina informació es requereix i les exempcions.

La resta de Títols de la Llei de Residus i Sòls Contaminats tracten diferents temes interessants però que no són objecte del treball, com són els sòls contaminats, la responsabilitat vigilància i control, i la informació i comunicació entorn als residus. No obstant, sí que és força important comentar una disposició i un annex que fan referència directament als residus a les Illes Balears.

La disposició en qüestió és la *Disposició Addicional tercera*, titulada «Residus a les Illes Balears, Canàries, Ceuta i Melilla». Segons aquesta, l'Administració General de l'Estat establirà les mesures pertinents per fer front al cost addicional associat a la valorització dels residus generats en territoris no peninsulars. Aquestes mesures, aniran acompanyades de plans i programes enfocats a la prevenció i gestió de residus, amb la finalitat de reduir la quantitat a transportar i consegüentment reduint-ne el cost associat.

L'annex en qüestió és el número cinc titulat «Contingut dels plans autonòmics de residus». Aquest annex no fa referència directament a les Illes Balears, però sí que especifica els punts que la normativa autonòmica, explicada a continuació haurà d'incorporar. El contingut mínim ha de ser:

- a) El pla ha de comptar amb una previsió dels residus que es generaran en el territori on s'especificaran també el seu tipus, l'origen i la quantitat, així com quin serà el seu destí.
- b) El pla ha d'incorporar els sistemes de recollida de residus de la seva comunitat així com un llistat de les instal·lacions dedicades a la gestió, valorització o eliminació de residus.
- c) Per altra banda, ha d'analitzar les instal·lacions llistades i avaluar-ne el seu estat, presentant plans de millora o fins i tot el seu tancament.
- d) El pla ha de contemplar diferents escenaris de futur i analitzar diferents emplaçaments capaços d'assumir les previsions realitzades.
- e) També ha d'incorporar polítiques de gestió de residus, en les que s'incloguin la incorporació de noves tecnologies i mètodes de gestió més eficients, que puguin solucionar problemes específics de gestió.

Finalment, els plans o normes, també hauran d'especificar les competències que delegaran a altres Entitats Locals, així com altres aspectes que es considerin oportuns.

### 5.3. Normativa autonòmica balear

[19], [20] Finalment, per acabar l'estudi legislatiu, s'analitza la normativa autonòmica, que com s'ha comentat anteriorment, ve ordenada per l'Estat mitjançant la *Llei 22/2011 de 18 de Juliol*. El cas de les Illes Balears, és un cas especial, ja que al tractar-se de territoris insulars, regular un aspecte com és la gestió de residus de manera genèrica pot ser complicat. Així doncs, s'observa que existeix un seguit de lleis autonòmiques i alhora altres lleis i normatives pròpies de cada illa, elaborades pels Consells Insulars.

La llei de referència de les Illes Balears, és la *Llei 8/2019 de 19 de Febrer, de residus i sòls contaminats de les Illes Balears*, que s'ha aprovat i entra en vigor de manera simultània a la realització d'aquest projecte.

La llei compleix amb la Llei de Residus i Sòls Urbans del Govern central, la qual, com s'ha comentat anteriorment, obliga a les respectives Comunitats Autònomes a desenvolupar la seva pròpia normativa ajustant-se als criteris preestablerts.

La *Llei 8/2019 de 19 de Febrer, de residus i sòls contaminats de les Illes Balears* consta de nou títols, sis disposicions addicionals, cinc disposicions transitòries, una disposició derogatòria i quatre disposicions finals, que en total sumen un total de vuitanta-un articles i vuit annexes.

Els dos primers títols tracten el mateix que la llei espanyola, que alhora es basava en la directriu europea 2008/98/CE.

El Títol I presenta les disposicions generals, defineix l'objectiu i l'abast de la llei. El més destacat d'aquest primer títol és l'obligatorietat de la recollida selectiva de la matèria orgànica i que aquesta tingui un màxim d'un 5% d'impropis perquè el seu tractament sigui adequat, aspectes que no eren d'obligat compliment en la llei estatal.

A més, es presenten un seguit de definicions, i també es dona molta importància a les accions d'educació, conscienciació i formació en qualsevol àmbit i per a totes les edats. La llei també especifica que és a Menorca concretament on, pel fet de ser Reserva de Biosfera, s'experimenti i s'estudii el desenvolupament sostenible.

El Títol II presenta el règim competencial. Pel que fa a la gestió genèrica de residus, cada consell insular tindrà la seva pròpia competència i els ajuntaments seran els encarregats de la recollida domiciliària i del transport. Per alta banda, pel que fa a la gestió de residus perillosos, la competència romandrà en el Govern Balear.

En aquest títol, també es prohibeix la importació de residus per tractar-los en instal·lacions públiques i s'anuncien els plans a partir dels quals es realitzarà la planificació de residus.

- a) Plans directors sectorials de prevenció i gestió de residus no perillosos – Consells insulars
- b) Pla director sectorial de prevenció i gestió de residus perillosos – Govern Balear
- c) Programes locals de caràcter no obligatori.

També en aquest títol s'especifica sota quins conceptes es pot externalitzar el servei. El Govern Balear es guarda la possibilitat de declarar el servei de transport de residus com a servei públic, tot i que pot seguir essent operat per entitats privades en cas de ser necessari. Pel que fa a les concessions en règim de monopoli, aquestes només es podran aprovar si anteriorment han estat autoritzades per llei.

El Títol III estableix les mesures necessàries per poder aconseguir els objectius anunciats en el primer. El paquet de mesures es divideixen en diferents finalitats. La prevenció, la reutilització i la disminució de la condició de perillositat dels residus.

La majoria de mesures van destinades a la disminució de residus, fomentant la compra i venda a granel, afavorint els envasos reutilitzables i potenciant incentius econòmics enfocats a premiar bons comportament envers el la gestió de residus.

El que és força destacat d'aquest Títol és l'article 23, pel qual es regulen els productes d'un sol ús. Segons aquest, amb la finalitat d'aplicar la Directiva 94/62/CE, a partir del 2021, no es permetrà la venda de coberteria, bastonets per fer net orelles, càpsules de cafè, infusions o brous, entre d'altres, que estiguin fetes de plàstic d'un sol ús. Finalment, pel que fa a les bosses de plàstic lleugeres o molt lleugeres, hauran d'estar constituïdes per almenys un 50% de plàstic reciclat i que no es pugui fragmentar.

Altres tipus de productes que també es veuran afectats per aquesta normativa són tots aquells productes que continguin microplàstics o altres que, tot i no ser d'un sol ús, puguin tenir una vida més llarga com són els cartutxos i tòners no reutilitzables i els encenedors no recarregables.

Finalment, pel que fa al Títol III, el que més afecta al projecte que s'està elaborant són els següents articles:

- Article 29, titulat *Recollida de residus, preparació per a la reutilització, el reciclatge i la valorització*; L'article 29 entre altres punts, obliga a que tot establiment públic o privat tingui establerta la separació en origen dels seus residus i a més que es prevegi en els contractes de manteniment i neteja de l'immoble. Paral·lelament, també facilita i obra la porta al compostatge domèstic i comunitari, sempre i quan aquest compleixi una sèrie de restriccions i estigui degudament notificat i autoritzat. Per últim, insta a les administracions a fomentar la valorització material i en darrer terme l'energètica, dels residus biodegradables.
- Article 32, titulat *Tractament finalista dels residus*; L'article 32 complint amb la llei estatal obliga a que tot residu sigui sotmès a un tractament abans de ser eliminat, mitjançant la seva deposició en un abocador o mitjançant la seva incineració/valorització energètica.

El Títol V entre altres temes detalla les obligacions dels productors, posseïdors i gestors de residus. Degut a l'enfocament del projecte, l'interès d'aquest títol recau en les obligacions dels gestors, especificades al Capítol III, article 43 i 46.

- Article 43, titulat *Obligacions dels gestors de residus*. L'article 43 supedita qualsevol activitat relacionada amb la gestió de residus que es faixi a les Illes Balears a que segueixi la normativa en tot moment i que tant la persona física o jurídica i la instal·lació estiguin degudament autoritzades. Les autoritzacions tenen un termini de vuit anys, període el qual superat, s'han de tornar a demanar. En el cas en què es vulgui fer qualsevol modificació en les instal·lacions

durant aquest temps, s'haurà de fer una petició a l'administració pertinent i així poder estar autoritzats.

- Article 46, titulat *Autorització per a les persones físiques o jurídiques que realitzen operacions de tractament de residus*. L'article 46 especifica qui pot esdevenir gestor de residus i com. En primer lloc, el principal requisit és que el gestor, persona física o jurídica, tingui residència a les Illes Balears. Per esdevenir gestor s'ha d'estar correctament autoritzat i les activitats a realitzar s'han de correspondre a les quals s'ha donat l'autorització. A més, l'operador està obligat a dipositar una fiança si l'autorització així ho reclama.

Pel que fa a la resta de títols, no són d'especial interès pel desenvolupament d'aquest projecte, ja que tracten la temàtica dels sòls contaminats o altres com el règim sancionador, el qual no és objecte de treball.

## 5.4. Normativa insular menorquina

[21] En darrer lloc, s'analitza la darrera normativa a tenir en compte que és la desenvolupada pel Consell Insular de Menorca. Aquesta, a diferència de les anteriors, no és pròpiament una llei sinó més bé un Reglament. Es tracta del *Reglament regulador del servei públic de tractament, valorització i eliminació de residus a l'àrea de gestió de residus de Milà*, publicat al BOIB el 1 de gener de 2015.

Segons el reglament, es deleguen totes les competències referents a la gestió de residus i també les referents a la promoció, execució i explotació de projectes i programes relacionats amb energies renovables al Consorci de Residus Urbans i Energia de Menorca. I és el propi Consorci l'encarregat de l'Àrea de Gestió de Residus de Milà.

Així doncs, tal com s'especifica, *el reglament regula les activitats de tractament, valorització i eliminació de residus de l'Àrea de Gestió de Residus de Milà derivades de l'explotació de les següents instal·lacions:*

- *Planta de tractament mecanicobiològic de residus domèstics*
- *Planta de preparació per al reciclatge de recollida separada*
- *Forn incinerador*
- *Abocadors*

El reglament té dues vessants, una més burocràtica que fa referència a la titularitat de l'Àrea de Gestió de Residus de Milà, la qual és pública i gestionada pel Consorci, però que pot ser operada per entitats privades en règim de concessions. I una vessant més tècnica que és la que afecta més al projecte que s'està desenvolupant. En ella es fixen els principals objectius de la instal·lació així com la classificació de residus permesos i no permesos.

Els objectius es classifiquen en cinc punts:

- 1) Tractar adequadament els residus admissibles
- 2) Generar el mínim impacte ambiental, aplicant les millors tècniques possibles
- 3) Obtenir el major número de productes, subproductes o energia útil
- 4) Minimitzar la producció de rebuig
- 5) Maximitzar la vida útil de l'abocador

El llistat amb els residus admissibles i els no admissibles, al ser extens i directament transcrit del Reglament. Es pot trobar directament al web del consorci.



## 6. Elecció dels sistemes de valorització

Al llarg del projecte s'han presentat els diferents tipus de sistemes de valorització energètica existents, així com les tipologies i quantitats de residus generats a l'illa. A partir d'aquests dos punts, per tant, és fàcil determinar quins serien els sistemes de valorització més adequats.

Al llarg d'aquest punt llavors, s'escollirà el sistema de valorització energètica de residus òptim, es farà un dimensionament el més acurat possible a la realitat per a continuació determinar-ne la seva viabilitat tècnica i econòmica.

El primer que s'ha de tenir en compte a l'hora de d'escollir correctament el sistema de valorització, és la piràmide de prioritats, exposada a l'inici d'aquest projecte. Així doncs, la valorització energètica es realitzarà un cop s'hagi reutilitzat i reciclat el màxim percentatge dels residus generats. D'aquesta manera, en cap cas, s'ha d'abandonar el reciclatge de cadascuna de les fraccions possibles per maximitzar la generació energètica.

Aquest és un dels perills d'apostar per la valorització energètica i així ho va manifestar durant la reunió que vam mantenir amb Irene Estaún. De fet, fou aquest el principal motiu pel qual des de l'administració pública es va desestimar la possibilitat de generar directament electricitat a partir dels residus.

Així doncs, evitar aquest perill comporta dues implicacions diferents:

- 1- La massa de residus a valoritzar serà la més petita possible
- 2- El potencial energètic a valoritzar no serà el més elevat possible

La segona implicació és degut al baix percentatge de fraccions amb una alt poder calorífic, com és el cas dels plàstics.

Tenint en compte aquestes premisses i coneixent les característiques de la producció de residus a l'illa, la tecnologia de valorització energètica escollida ha de ser capaç de:

- Generar energia a partir d'un residu amb un nivell de poder calorífic relativament baix.
- Modular la seva producció, per tal d'ajustar-se tant a la demanda energètica com al flux desigual de residus que es genera al llarg de tot l'any.
- Operar amb volums de residus relativament petits.

A més, també ha de guardar equilibri des dels tres pilars fonamentals de qualsevol projecte d'enginyeria.

- Tècnicament factible
- Econòmicament viable
- Mediambientalment sostenible

Així doncs, tenint en compte totes aquestes pautes, de les diferents tecnologies exposades en l'estat de l'art, les més adequades per les característiques del projecte són:

- a) Incineració – Tecnologia basada en el tractament tèrmic
- b) Digestió anaeròbica – Tecnologia basada en l'obtenció de biogàs

Ambdues tecnologies són òptimes i no són excloents entre elles, és a dir, que es podrien complementar.

En primer lloc, la incineració s'ha considerat la millor tecnologia per l'aprofitament directe dels residus per generar energia elèctrica, passant per davant d'altres tecnologies com la gasificació, la piròlisi o la gasificació per plasma. Això és degut a que es tracta d'una tecnologia completament desenvolupada i establerta que permet una generació molt flexible i no requereix d'un combustible amb un gran poder calorífic, el que alhora permet fer un correcte reciclatge de cada fracció.

Per altra banda, la digestió anaeròbica es tracta d'una altra tecnologia òptima per tal d'aprofitar el potencial dels residus orgànics generats a Menorca mitjançant la producció de biogàs. Així doncs, mitjançant la instal·lació d'un digestor anaeròbic es podria generar biogàs, que juntament amb el que a dia d'avui s'està desaprofitant, provinent dels dos abocadors clausurats, podria servir bé per generar electricitat o bé per generar calor (Utilització com a combustible pel forn crematori de SANDACH, anteriorment explicat).

Així doncs, al llarg d'aquest apartat es presentarà el funcionament principal i es dimensionaran les dues tecnologies escollides per, posteriorment, fer-ne la valoració de la seva viabilitat tècnica i econòmica.

## 7. Localització de la planta

Un cop escollida la tecnologia de valorització energètica que més s'adequa a les característiques de Menorca, pel que fa a generació de residus i demanda energètica, el següent pas és trobar la localització adequada.

Com es pot observar en la següent captura hi ha dues possibles localitzacions, cadascuna de la qual presenta uns avantatges i uns inconvenients.

Pel que fa a la planta de tractament i gestió de residus des Milà, és allà on arriben tots els residus, es classifiquen per reciclar-los i els emmagatzemen. Al comptar amb un parc eòlic, disposa de connexió a la xarxa i per tant no s'hauria de realitzar una gran inversió per fer l'escomesa. Per altra banda però, el principal inconvenient és que no té accés a aigua, fet que dificulta tot el procés de refrigeració de la incineradora.

Pel que fa a la central tèrmica, ubicada a la colàrsega del port de Maó té el principal avantatge que pel que fa a instal·lacions relacionades amb la refrigeració i la seguretat, ja estan en funcionament i es podrien aprofitar. L'inconvenient principal és que requeriria del transport del combustible des de la planta de tractament de residus fins a la planta de valorització energètica.



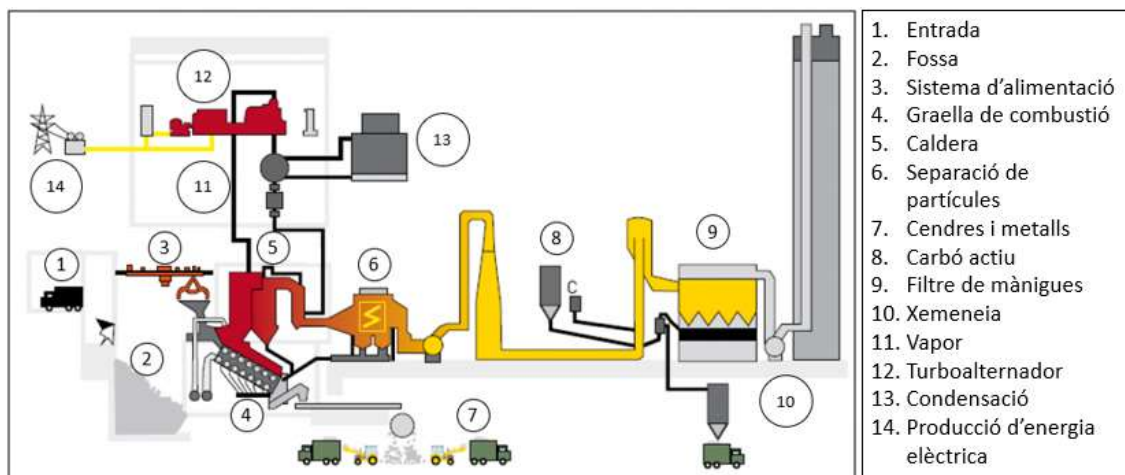
**Figura 7.1.** Possibles ubicacions de la incineradora (Font: Elaboració pròpia, Foto satèl·lit: Google Maps)

Finalment, pel que fa a la decisió d'ubicar la incineradora, s'ha decidit que el més òptim seria al costat de l'actual central tèrmica, aprofitant així tot el sistema de refrigeració, filtratge i expulsió de gasos, fet que redueix el cost econòmic. Per contra, aquesta localització implicarà que es s'hagin de transportar els residus i també les cendres. Trajecte d'aproximadament deu minuts en camió.



## 8. Funcionament de la incineradora

Al llarg de l'estat de l'art s'han comentat per sobre les diferents tecnologies existents per a la valorització energètica de residus. Al llarg d'aquest punt però, un cop escollida la incineració, com la tecnologia més adequada per implementar a Menorca, es procedeix a explicar més detalladament el seu funcionament així com les parts de les quals està formada [22].



**Figura 8.1** Esquema de les parts d'una incineradora (Font: IDAE, *Situación y potencial de valorización energética directa de residuos*)

1. **Entrada:** Format per un moll de descàrrega perquè els camions puguin abocar els residus prèviament seleccionats. En funció del tractament que se li hagi donat al combustible, el recinte d'entrada haurà d'estar equipat amb unes condicions o amb unes altres. S'ha de procurar que la mescla sigui el més homogènia possible per tal d'aconseguir una bona combustió i també s'ha d'evitar l'acumulació de gasos fruit de la descomposició de matèria orgànica que es pugui trobar en els residus.
2. **Fossa:** Dipòsit on s'aboquen els residus que s'utilitzaran de combustible. Degut a que el funcionament de la incineradora anirà en funció de la demanda energètica, també podrà fer la funció de magatzem, fet pel qual requereix de la infraestructura pertinent per recollir els lixiviats i per reconduir el metà que es forma.
3. **Sistema d'alimentació:** Format per una pala pneumàtica és l'encarregada d'introduir el combustible dins del forn. Aquesta està controlada per un operari, el qual haurà de tenir en compte la quantitat i qualitat que introdueix al forn, per tal de mantenir sempre una correcta combustió. En funció de la fossa, pot estar lligada a un braç mecànic o penjant de sostre en una biga mòbil la qual li atorga una completa llibertat de moviments. La pala diposita els

residus en una tremuja d'alimentació, la qual juntament amb un empenyedador pneumàtic situat just a sota permet l'entrada dosificada del combustible a les graelles.

4. Graella de combustió/Forn: Esdevé el lloc on es realitza la combustió. Es tracta d'un espai recobert amb material refractari per tal de poder aguantar les altes temperatures, que poden arribar a ser d'aproximadament 1000°C. A la part inferior s'hi troba la graella, que és on es depositen els residus els quals van baixant a mesura que es va produint la reacció de combustió. A través de les graelles s'insereix gran part de l'aire necessari, per evitar que el residu es pugui fondre a sobre, aconseguir un cremat del residu més homogeni i també per ajudar a desplaçar el residu cap a baix de la graella. Finalment, després de les graelles hi ha un dipòsit on s'acumulen l'escòria i les cendres, que han anat caient. Aquestes posteriorment són recollides i separades. La ferralla, passa a dipositar-se en un abocador i les escòries normalment són utilitzades per pavimentar carreteres o altres utilitats similars.
5. Caldera: Situada per sobre del forn i directament connectats compleix la funció d'intercanviador de calor. Al seu interior hi passen els gasos de combustió, que prèviament han passat per una càmera de postcombustió, que té la funció d'assegurar que els gasos es mantenen a una temperatura suficientment elevada (mínim 850°C) durant un període de temps (entorn a 2 segons), per tal de permetre la destrucció dels components perillosos dels residus.

La caldera és un dels elements més importants en el disseny de la incineradora, ja que d'ella depèn en gran part el rendiment de la instal·lació. És per tant, de vital importància dimensionar correctament com s'haurà de fer la transferència de calor entre ambdós fluids. Per això, a la caldera s'hi poden distingir tres zones.

- Zona de radiació: Es troba a l'entrada dels gasos precisament quan aquests es troben a major temperatura. La transferència de calor es produeix per radiació, fet pel qual els tubs on es forma el vapor, es troben protegits evitant així l'exposició directa al gas. D'aquesta manera es redueixen les abrasions i corrosions a les parets de la caldera.
  - Zona de convecció: Es troba a continuació de la de radiació i en aquesta zona la transferència es du a terme per convecció. El vapor passa per dins feixos de tubs entre els quals hi passen els gasos a una temperatura d'entre 600°C i 700°C.
  - Zona de recuperació: Finalment, existeix la zona de recuperació, en la qual la calor dels gasos no s'utilitza per seguir produint vapor, sinó per pre-escalfar l'aigua de recuperació energètica. La transferència en aquesta zona també es realitza per convecció. S'ha de tenir en compte que la temperatura mínima dels gasos no pot ser inferior a 250°C per evitar que els components àcids dels gasos no condensin i puguin malmetre la caldera.
6. Separació de partícules: Un cop feta la transferència de calor dels gasos de combustió al vapor d'aigua, els gasos han de passar un procés per posteriorment poder ser alliberats a l'atmosfera emetent les mínimes partícules i gasos contaminants possibles. Aquest procés comença amb la separació de partícules que es troben en estat sòlid suspeses en els gasos. Per separar-les, s'utilitzen un cicló i un filtre electroestàtic. El primer, s'aprofita de la velocitat i pressió dels gasos i la forma cònica de l'element per separar partícules sòlides suspeses en els gasos. Els

gasos entren per la part superior seguint un moviment helicoidal descendent provocant que les partícules a eliminar adquireixin inèrcia i es vagin depositant al fons. El segon, consisteix en l'aprofitament de l'aplicació d'un corrent elèctric per crear un camp magnètic que atrau les partícules i deixa passar els gasos.

7. Escòries: Són la fracció sòlida que queda com a resultat de la combustió dels residus. Es van recollint i conduïnt fins a un dipòsit situat després de les graelles, on s'acumulen l'escòria i les cendres, que han anat caient. Aquestes, posteriorment són recollides i separades. La ferralla, passa a dipositar-se en un abocador i les cendres normalment són utilitzades per pavimentar carreteres o altres utilitats similars.
8. Carbó actiu: Un cop eliminades les partícules del gas, el següent filtre serveix per eliminar els gasos àcids. Per aconseguir-ho es polvoritza carbó actiu i calç. Aquests components reaccionen amb els gasos àcids neutralitzant-los i donant com a productes sòlids alguns dels quals romanen en suspensió, mentre que d'altres precipiten. La majoria d'aquests són compostos orgànics i metalls pesats volàtils que queden absorbits pel carboni actiu.
9. Filtre de mànigues: Per acabar amb el filtratge dels gasos de combustió, es procedeix a eliminar els productes que queden en suspensió de les reaccions de neutralització. Per fer-ho s'utilitzen uns filtres de mànigues, que no són més que canonades cobertes per diferents teixits o malles cadascun amb un diàmetre de forat diferent. A través, hi circulen els gasos, els quals poden passar, mentre que les partícules queden atrapades. Aquests filtres són força efectius, tot i que s'han d'anar canviant periòdicament per evitar el taponament de les mànigues.
10. Xemeneia: Finalment els gasos de combustió filtrats són alliberats per la xemeneia. Generalment la xemeneia és força alta, ja que compleix diferents funcions. La principal és la d'acabar de refredar els gasos a una temperatura pràcticament ambient, per tal d'influir el més mínim en l'entorn. Les altres funcions són principalment la instal·lació d'altres tipus de filtres i sobretot la monitorització i anàlisi dels fums que s'expulsen. Això és degut, a que com anteriorment ja s'ha vist, per normativa, aquests tipus d'instal·lacions tenen un màxim d'emissions que poden abocar a l'atmosfera.
11. Vapor: A la sortida de la caldera per una banda s'extreu els gasos de combustió i per l'altre vapor d'aigua a alta pressió. Aquest vapor circula per un circuit tancat, completant el cicle Rankine. En altres incineradores ubicades en zones geogràficament més fredes o amb una important demanda calor, en comptes d'utilitzar el 100% del vapor sobreescalfat per generar energia mitjançant el cicle de vapor, una part se'n deriva als anomenats "district heatings". Mitjançant aquest sistema es pot proveir d'energia tèrmica per a calefacció i fins i tot també per a aire condicionat a barris sencers, optimitzant molt més el procés. És el cas de la Planta de Valorització Energètica del Besós, la qual a més de generar electricitat, subministra calor i fred al districte 22@.
12. Turboalternador: És la màquina encarregada de transformar l'energia tèrmica del vapor sobreescalfat en energia elèctrica. Està format per dos components: la turbina de vapor i el

generador. En el primer, s'extreu energia del vapor per mitjà de la seva expansió. D'aquesta manera el vapor surt de la turbina a menys pressió i temperatura, havent cedit part de la seva energia interna a la màquina, en forma d'energia cinètica de rotació. Al mateix eix que a la turbina, s'hi troba el generador, que funciona de la mateixa manera que un motor elèctric però a la inversa. Així doncs, s'aconsegueix transformar l'energia cinètica de rotació en energia elèctrica.

13. Condensació: Procés pel qual es refrigera el vapor a la sortida de la turbina per passar-lo a fase líquida i poder tornar a començar el cicle. Aquest procés d'intercanvi de calor, normalment es fa amb aigua, ja que és abundant i es requereix d'una infraestructura menor que si es fes amb aire. Aquest, és un dels principals motius per l'elecció de la ubicació de la planta, a més que els conductes per canalitzar l'aigua, en aquest cas, aigua salada, ja estan fets.
14. Producció d'energia elèctrica/Connexió a xarxa: Un cop generada l'electricitat, com qualsevol altra central generadora vessa la seva energia a la xarxa per abastir als consumidors. Perquè això sigui possible, s'ha d'adaptar als valors específics de freqüència i voltatge de xarxa. Motiu pel qual entre la xarxa i l'alternador s'hi troba un transformador, que adapta la tensió i alhora protegeix la xarxa i la màquina.



## 9. Dimensionament de la incineradora

A continuació, al llarg d'aquest punt s'anirà dissenyant la incineradora a partir de les dades disponibles i d'altres que s'aproximaran.

### 9.1. Càlcul del PCI del combustible utilitzat

El primer càlcul a realitzar és el de l'energia disponible. És a dir, aquella que es troba inherent en la matèria, en aquest cas en els residus. Es tracta d'una energia de tipus químic una part de la qual gràcies a la reacció de combustió es podrà alliberar en forma de calor. Serà llavors aquesta calor la que seguidament es podrà aprofitar per dur a terme el cicle de Rankine i així generar electricitat.

El paràmetre interessant a conèixer per determinar l'energia tèrmica disponible dels residus és el PCI, conegut com a Poder Calorífic Inferior. El qual es pot definir com la quantitat de calor que emet una substància al sofrir un procés de combustió, suposant que l'aigua que se'n deriva de la reacció roman a l'ambient en estat vapor. S'expressa amb unitats energètiques partit unitats de massa o volum i en el cas en què el combustible estigui format per diferents components, s'han de tenir en compte les proporcions.

Pel que fa al cas que s'està dimensionant, el residu a utilitzar com a combustible està format bàsicament per la fracció rebuig, ja que l'orgànica que s'ha pogut recollir per separat, es valoritzaria per mitjà de digestors.

El primer pas per determinar el PCI del combustible utilitzat, és conèixer la seva composició. S'ha cercat informació al respecte, però a nivell de Menorca, no es tenen dades concretes sobre el percentatge de les diferents fraccions que componen el rebuig, així que s'han agafat les de Catalunya. Els percentatges massics es presenten en la següent taula, juntament amb el PCI de cada fracció [23]:

TIPUS DE RESIDU	PERC. EN PES [%]	PCI [KWh/kg]
ORGÀNICA	29,63	4,32
ENVASOS LLEUGERS DOMÈSTICS	8,46	9,09
ENVASOS LLEUGERS COMERCIALS	0,91	9,5
PAPER – CARTRÓ	11,26	5,28
ENVASOS VIDRE	8,69	0
CEL·LULOSA	3,1	3,85
TÈXTIL	4,11	5,13
TÈXTIL SANITARI	3,63	4,52
VOLUMINOSOS	4,12	5,04
RESTES DE JARDINERIA I PODA	7,65	4,41
RUNES	3,87	0
ALTRES	11,17	4,12
HUMITAT	4,41	0

Taula 9.1. Composició dels RSU (Font: ECA, *Estudi de la Composició dels Residus Municipals de Catalunya*)

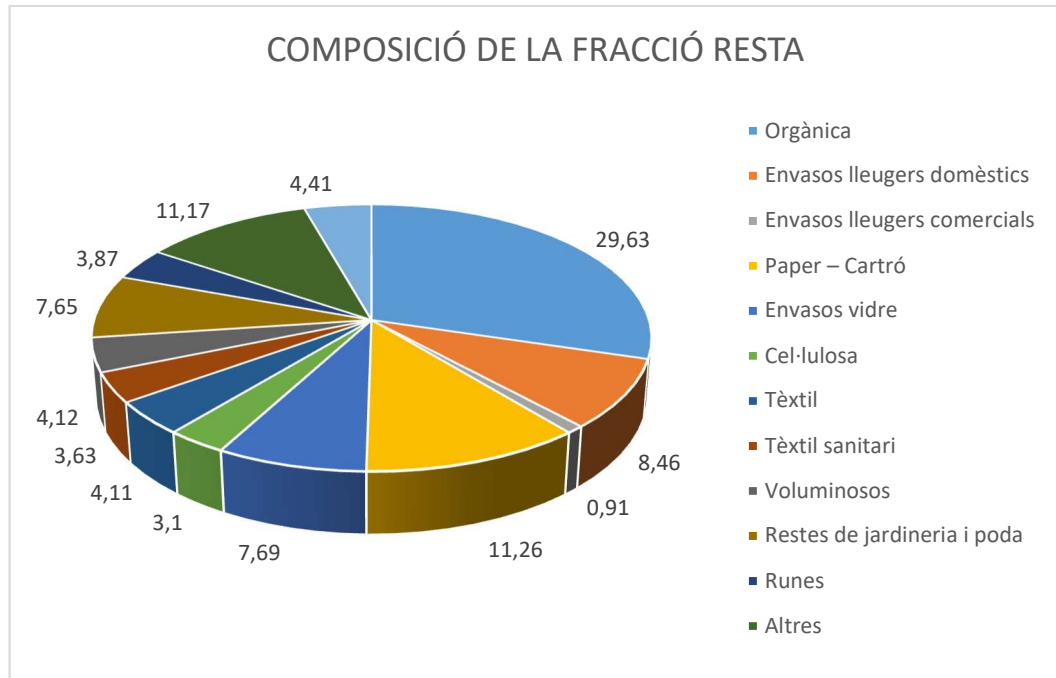


Figura 9.1. Composició dels RSU (Font: ECA, *Estudi de la Composició dels Residus Municipals de Catalunya*)

$$PCI_{Resta} = \sum_{i=1}^j n_i \cdot PCI_i \quad \text{Eq. ( 1)}$$

$$PCI_{Resta} = 0,30 \cdot 4,32 + 0,85 \cdot 9,09 + 0,01 \cdot 9,5 + 0,11 \cdot 5,28 + 0,03 \cdot 3,85 + 0,04 \cdot 5,13 + 0,04 \cdot 4,52 + 0,045,04 + 0,08 \cdot 4,41 + 0,11 \cdot 4,12 = 4,23 \frac{kWh}{kg}$$

Una altra manera de calcular el PCI analíticament és mitjançant diverses fórmules que, en funció de la composició atòmica dels residus, estimen el PCI. La més coneguda és la forma de Dulong, que relaciona l'energia que es desprèn dels principals enllaços que es formen en la combustió, per determinar la calor que es pot aprofitar:

$$PCI = 8140 \cdot C + 29000 \cdot (H - O/8) + 2220 \cdot S - 600 \cdot H_2O \quad \text{Eq. ( 2)}$$

Cada variable que apareix a la fórmula correspon amb la quantitat centesimal de cada molècula en pes per kg de combustible, valors que s'obtenen de la següent taula:

TIPUS DE RESIDU	C %	H2 %	O2 %	N2 %	S %	ALTRES %
ORGÀNICA	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
ENVASOS LLEUGERS DOMÈSTICS	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
ENVASOS LLEUGERS COMERCIALS	85,2	14,2	-	<0,1	<0,1	0,4
PAPER – CARTRÓ	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6
ENVASOS VIDRE	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
CEL·LULOSA	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6
TÈXTIL	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2
TÈXTIL SANITARI	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2
VOLUMINOSOS	60	7,2	22,8	0	0	10
RESTES DE JARDINERIA I PODA	46,0	6,0	38,0	3,4	0,3	6,3
RUNES	0,8	4,2	3,1	<0,1	0,4	91,4
ALTRES	30,0	5,0	28,0	2,0	0,2	34,8
HUMITAT	0	11,1	88,89	0	0	0

	C %	H2 %	O2 %	N2 %	S %	H <sub>2</sub> O %	ALTRES %
<b>TOTAL</b>	39,43	5,45	29,65	1,48	0,22	4,41	19,36

Taula 9.2. Composició atòmica dels diferents components dels RSU (Font: IDAE, *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos*)

Fent la substitució dels valors, s'obté el valor del PCI calculat mitjançant la fórmula de Dulong [24].

$$PCI = 8140 \cdot 0,39 + 29000 \cdot \left(0,054 - \frac{0,30}{8}\right) + 2220 \cdot 0,0022 - 600 \cdot 0,044 = 3631,58 \frac{kcal}{kg}$$

Que passat a kWh/kg:

$$PCI = 3631,58 \frac{kcal}{kg} \cdot \frac{4,19kJ}{1kcal} \cdot \frac{1kWh}{3600kJ} = 4,23 \frac{kWh}{kg}$$

Com es pot observar, els valors obtinguts d'ambdós càlculs són pràcticament idèntics, per tant, es considera correcte el valor del PCI.

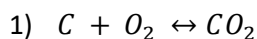
## 9.2. Reaccions portades a terme durant la combustió

Un altre aspecte important a tenir en compte en el dimensionament de la incineradora són les reaccions químiques que es duen a terme durant el procés de combustió. Mitjançant aquest càlcul es pot determinar el cabal d'aire requerit per assegurar un bona combustió. És a dir, aconseguir que la presència d'oxigen sigui la més pròxima a l'estequiomètricament requerida.

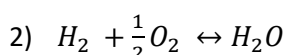
D'aquesta manera s'aconsegueix que hi hagi una combustió total, és a dir, que no apareguin no-cremats, però que, per altra banda, no hi hagi un excés d'aire que provoqui la pèrdua d'eficiència.

Aquest càlcul però, no és trivial, ja que el combustible utilitzat, la fracció resta, com s'ha pogut veure anteriorment està format per una gran varietat d'altres substàncies. Així doncs, s'ha agafat la **Taula 9.2.** per fer una estimació global de les molècules que es poden trobar en el combustible i que reaccionaran amb l'oxigen, per fer una aproximació del cabal d'aire que es requerirà.

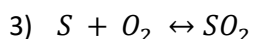
A continuació, es presenten les reaccions corresponents. Cal tenir en compte, que tot i que no sigui real, s'ha suposat que el carboni es troba sol en cada substància. Això en la realitat no passa, ja que forma enllaços amb altres àtoms, no obstant per simplificar el càlcul, s'ha efectuat així.



	C	O2	N2	CO2	N2	Total Comb	Total Aire	Total Fums
kmol	1	1	3,76	1	3,76			
kg/kmol	12	32	28	44	28			
kg	12	32	105,28	44	105,28			
%	39,43	105,15	345,93	144,58	345,93	39,43	451,08	490,51



	H2	O2	N2	H2O	N2	Total Comb	Total Aire	Total Fums
kmol	1	0,5	1,88	1	1,88			
kg/kmol	2	32	28	18	28			
kg	2	16	52,64	18	52,64			
%	5,45	43,60	143,44	49,05	143,44	5,45	187,04	192,49



	S	O2	N2	SO2	N2	Total Comb	Total Aire	Total Fums
kmol	1	1	3,76	1	3,76			
kg/kmol	32	32	28	64	28			
kg	32	32	105,28	64	105,28			
%	0,22	0,22	0,72	0,44	0,72	0,22	0,94	1,16

Un cop determinades les diferents reaccions que es portaran a terme en el procés de combustió, per tal de determinar l'aire necessari, es fixa l'atenció en l'oxigen requerit. Cal tenir en compte dos factors: (1) el combustible ja té un percentatge d'oxigen i que per tant, s'ha de restar al total obtingut de les reaccions. (2) perquè la combustió sigui completa hi ha d'haver un excés d'oxigen que normalment és d'entorn al 90%. Així doncs:

$$\text{Oxigen requerit: } m_{\text{oxigen}} = 105,15 + 43,60 + 0,22 - 29,65 = 119,32 \frac{\text{kg oxigen}}{100 \text{ kg combustible}}$$

$$\text{Excés del 90\%: } m'_{\text{oxigen}} = 119,32 \cdot 1,9 = 226,71 \frac{\text{kg oxigen}}{100 \text{ kg combustible}}$$

D'aquesta manera, coneixent la massa d'oxigen requerida i sabent el percentatge en pes d'oxigen en l'aire (23,3%) es pot determinar la massa d'aire sec que es necessitarà per a la combustió de 100 kg de residus.

$$m_{air} = \frac{226,71}{0,233} = 973,0 \frac{kg \text{ aire sec}}{100 kg \text{ combustible}}$$

Existeixen altres factors però a tenir en compte per tal de poder determinar de manera més exacte la quantitat d'aire que es requerirà a la incineradora. El més important és la humitat. Fins ara, els càlculs s'han efectuat suposant que el que entra a la cambra de combustió és aire sec, però això en la realitat no és així, sinó que entra aire directament des de l'atmosfera. Així doncs, s'ha de tenir en compte les característiques d'aquest aire i la més destacada és la humitat, més tenint en compte la ubicació de la planta.

Menorca al llarg de tot l'any, a l'estar devora el mar, té un percentatge força elevat d'humitat relativa. Aquest depèn d'altres factors com el vent i la temperatura, tot i que de mitja està entorn al 74% [25].

A continuació, es determina mitjançant la psicometria la massa total d'aire atmosfèric (aire humit) que es requerirà.

Condicions de l'aire:

- Pressió: 1 atm
- Temperatura: 25 °C
- Humitat relativa: 74 %

A partir d'aquestes dades es pot determinar la massa d'aigua compresa en l'aire i per tant recalculer la nova quantitat d'aire requerit en la combustió. Existeixen dues formes diferents de fer-ho, la primera, mitjançant expressions analítiques i la segona mitjançant un àbac.

En primer lloc es presenta la resolució mitjançant expressions analítiques:

Aquesta es basa en dues fórmules. La primera fa referència a la humitat específica i es basa en la llei dels gasos ideals, fet pel qual es tracta d'una expressió que no és del tot real. La segona fa referència a la humitat relativa i es basa en les pressions reduïdes [26]:

$$- W = \frac{m_w}{m_a} = 0,622 \cdot \frac{p_w}{p-p_w} \quad \text{Eq. ( 3)}$$

$$- \varphi = \frac{p_w}{p-p_w} \quad \text{Eq. ( 4)}$$

De les expressions, l'objectiu final és el de trobar  $m_a$  que és la massa d'aigua. La resta de paràmetres o es coneixen o es poden obtenir.

- $p_{ws} = 0,0327 \rightarrow$  Obtingut de la taula d'aigua (Líquid – Vapor)
- $p = 1,3442 \rightarrow$  Obtingut de la taula de propietats de l'aire (Tractament com a gas ideal)
- $\varphi = 74\%$

Així doncs, fent les pertinents substitucions:

$$p_w = \varphi \cdot p_{ws} = 0,74 \cdot 0,0327 = 0,0242$$

$$W = 0,622 \cdot \frac{p_w}{p - p_w} = 0,622 \cdot \frac{0,0242}{1,3443 - 0,0242} = 0,0114$$

$$m_w = W \cdot m_a = 0,0114 \cdot 973 = 11,09 \frac{\text{kg aigua}}{100 \text{ kg comb}}$$

En segon lloc es presenta la resolució mitjançant àbac extret de proves experimentals:

Aquesta es basa en la introducció en un àbac de les dades disponibles. Humitat relativa i temperatura per obtenir la humitat específica.

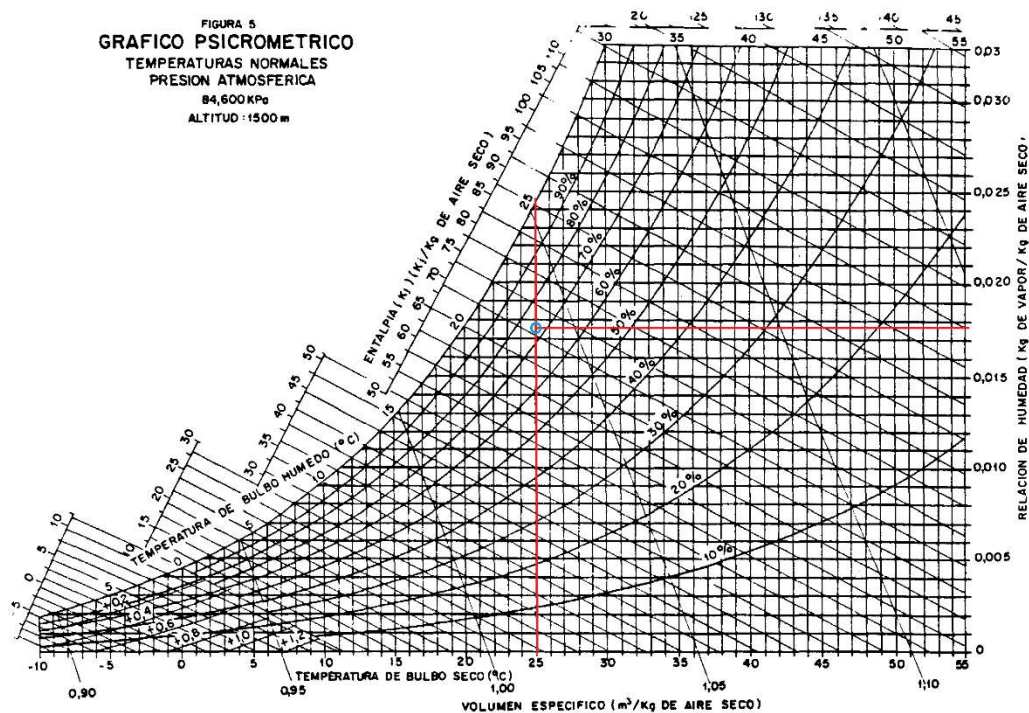


Figura 9.2. Diagrama psicromètric (Font: INAC)

Com es pot observar en la imatge anterior s'obté que la humitat específica a 25 °C, una atmosfera de pressió i un 73% d'humitat relativa, és de 0,0175.



Així doncs:

$$m_w = W \cdot m_a = 0,0175 \cdot 973 = 17,03 \frac{\text{kg aigua}}{100 \text{ kg comb}} \quad \text{Eq. ( 5)}$$

Hi ha una diferència considerable tot i que acceptable entre ambdós mètodes utilitzats. Davant aquesta diferència, s'ha optat per agafar la 'més desfavorable', que a més coincideix amb el mètode experimental (àbac). Així doncs, s'agafa com a massa d'aigua continguda dins l'aire el valor de 17,03 kg d'aigua per cada 100 kg de combustible.

$$m_{a\_atm} = m_a + m_w = 9,73 + 0,17 = 9,9 \frac{\text{kg aire atmosfèric}}{\text{kg combustile}} \quad \text{Eq. ( 6)}$$

Expressat d'una altra manera, es requerirà un total d'aproximadament 10 kg d'aire atmosfèric per cada kg de combustible que es vulgui cremar.

### 9.3. Integració de la incineradora en la xarxa elèctrica menorquina

Un aspecte clau a determinar és el cabal del combustible, és a dir, dels residus. Anteriorment, s'ha presentat la disponibilitat del recurs mitjançant dades mensuals i anuals. Com es pot constatar i tal i com era de preveure, degut a les dimensions de l'illa, la generació de residus i el consum energètic, la producció elèctrica de la incineradora que s'està dimensionant, no podrà cobrir la demanda total.

Per evidenciar aquesta tesis, s'ha fet una primera aproximació molt superficial per poder tenir una idea dels percentatges en els quals es mourà la producció elèctrica de la incineradora respecte de la producció elèctrica total.

En primer lloc, mitjançant dades de REE i la memòria del 2017 publicada pel Consorci de Residus i Energia de Menorca, s'obté la generació elèctrica anual total a Menorca: 513,3 GWh d'energia elèctrica generada per cobrir la demanda elèctrica a Menorca.

En segon lloc i de manera simplista es calcula l'energia elèctrica que es podria obtenir utilitzant la fracció resta dels residus com a combustible. Per fer-ho s'ha agafat el PCI calculat anteriorment [4,23kWh/kg], la massa de combustible corresponent a la quantitat de residu que es va depositar a l'abocador durant el 2017 [50346 t] (memòria del 2017 publicada pel Consorci de Residus i Energia de Menorca) i suposat un rendiment del 25%. Així doncs:

$$E_{gen \text{ aprox}} = PCI_{comb} \cdot m_{comb} \cdot \eta = 4,23 \cdot 50346 \cdot 10^3 \cdot 0,25 = 53,24 \text{ GWh}_e \quad \text{Eq. ( 7)}$$

D'aquesta manera, es pot resoldre que potencialment, l'electricitat que es podria generar a partir de la crema de residu seria d'aproximadament un 10% de l'electricitat generada per fer front a la demanda.

Arribats a aquest punt, per tant, cal establir una estratègia de funcionament de la incineradora, la qual ha d'optimitzar el sistema i que alhora sigui viable tècnicament. A continuació, es presenten dues possibles solucions a avaluar.

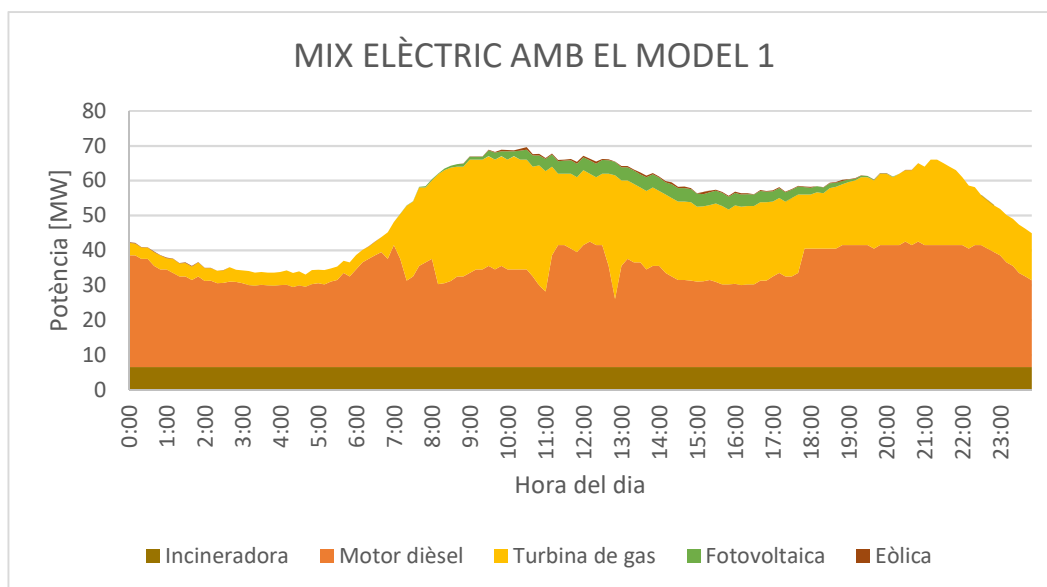
### 9.3.1. Model 1

Utilitzar aquest 10% que pot subministrar la incineradora de forma pràcticament constant al llarg de tot l'any, realitzant un paper similar al que en l'actualitat fan els motors dièsel. Per determinar la potència elèctrica que subministraria, caldria dividir l'energia obtinguda pel nombre d'hores anuals que pogués estar en funcionament.

$$P_1 = \frac{E}{t} = \frac{54,24 [GWh]}{365 \cdot 24 \cdot 0,9[h]} = 6,88 MW \quad \text{Eq. (8)}$$

$$E_{incineradora} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta t = 6,88 \cdot 24 = 165,12 MWh/dia \quad \text{Eq. (9)}$$

Aquesta estratègia de funcionament tindria un impacte similar en el mix energètic similar al presentat en la següent gràfica d'un dia tipus.



**Figura 9.3.** Simulació del mix energètic amb la integració de la incineradora operant amb el Model 1, 15-05-2018 (Font: Elaboració pròpia)

### 9.3.2. Model 2

Utilitzar aquest 10% d'electricitat que pot subministrar la incineradora de forma irregular, fent-la entrar en funcionament només durant el dia quan apareixen els pics de demanda, aconseguint així poder reduir la infraestructura requerida consumidora de combustibles fòssils.

Per tal que operativament la incineradora sigui rendible i tingui un funcionament adequat es suposa que operarà cada dia, excepte un petit percentatge per averies i manteniment. Les hores diàries de funcionament així com la potència a entregar, dependran de la demanda.

Per fer aquest model, s'ha de tenir en compte que la potència elèctrica generada mitjançant una incineradora, tot i que pot anar variant, no és tan flexible com la d'una turbina de gas o la d'un cicle combinat. Així doncs, es procurarà que no variï en excés.

Com es pot observar en el dia tipus escollit, el que es pretén és que la generació amb recursos fòssils en cap cas durant el dia superi els 50 MW de potència.

L'altre aspecte a tenir en compte és l'energia total obtinguda mitjançant la incineradora, la qual equival a l'àrea de color verd militar. Si es disposés de la funció de la corba, es podria fer una integral per obtenir l'energia, però no és el cas. Així doncs, s'agafen els valors de potència prèviament modificats, originalment obtinguts de Red Eléctrica i es multipliquen pel temps de mesura.

$$E_{incineradora} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta t = 183,78 \text{ MWh/dia} \quad \text{Eq. ( 10)}$$

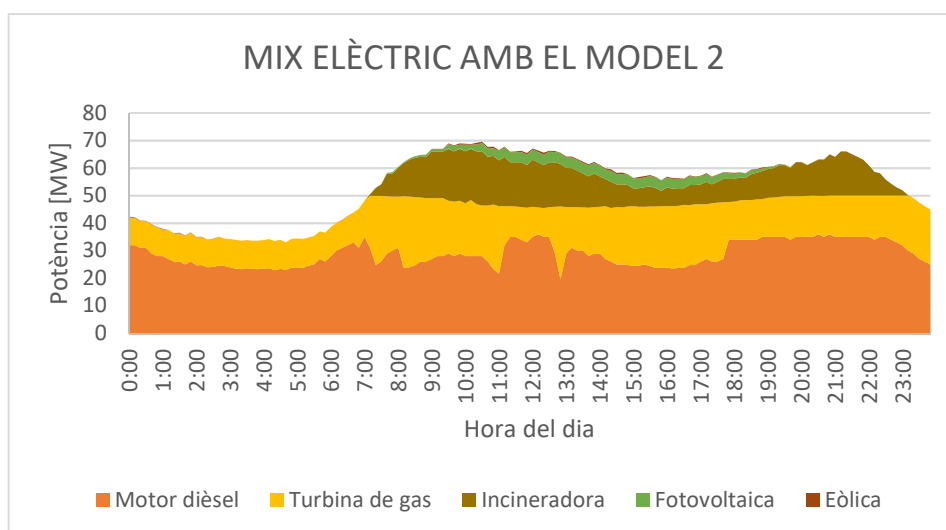


Figura 9.4. Simulació del mix energètic amb la integració de la incineradora operant amb el Model 2, 15-05-2018 (Font: Elaboració pròpia)

D'aquesta manera, comparant ambdós models per avaluar la integració de la incineradora dins el mix energètic, es pot observar com l'energia generada al llarg del dia tipus (15-05-2018) és força similar.

Pel que fa al model 1 mentre que s'optimitza el dimensionament de la incineradora, la resta de tecnologies que utilitzen combustibles fòssils no ho estan, havent de fer front així, als pics de demanda durant el dia.

Pel que fa al model 2 s'aconsegueix aplanar la corba de generació amb combustibles fòssils, reduint-ne així el seu consum i dependència. Per altra banda, la incineradora haurà de ser més gran que en el model 1.

Feta la comparació entre ambdós models, s'ha optat per escollir el model 2 com a estratègia a implementar a l'hora de gestionar la producció elèctrica de la incineradora. A continuació, es procedeix a calcular els cabals, tant de combustible com d'aire que hauran d'entrar.

#### 9.4. Cabals màssics de combustible i aire

El cabal màssic nominal de combustible es determina a partir de la potència de la incineradora. És a dir, de la potència elèctrica nominal de generació. Com s'ha pogut observar amb el model 2, aquesta potència màxima per un dia tipus és de 19,6 MW. No obstant, la majoria de temps, la incineradora no estarà generant a aquesta potència. Per això, s'escull que la potència elèctrica nominal de la instal·lació serà de 15 MW. Tot i que en alguns moments tindria sentit fer la planta més gran, cal tenir en compte que seria més difícil d'amortitzar econòmicament i que l'illa no genera suficient quantitat de residus per fer-la viable.

A partir de la potència, el PCI i d'una aproximació del rendiment global de la planta es pot determinar el cabal màssic de combustible.

$$\dot{m}_{combustible} = \frac{P_e}{\eta \cdot PCI} = \frac{15 [MW]}{0,25 \cdot 4,23 \left[ \frac{MWh}{t} \right]} = 14,2 \left[ \frac{t}{h} \right] \quad \text{Eq. (11)}$$

A partir del cabal nominal de combustible es pot conèixer el de l'aire d'entrada, mitjançant el càlcul d'aire necessari realitzat anteriorment a partir de les reaccions.

$$\dot{m}_{aire} = \dot{m}_{combustible} \cdot m_{a\_atm} = 14,2 \cdot \frac{1000 [kg]}{3600 [s]} \cdot 9,9 \left[ \frac{kg_a}{kg_c} \right] = 39,05 \left[ \frac{kg_a}{s} \right] \quad \text{Eq. (12)}$$

Pel que fa a l'aire, normalment s'avalua volumètricament.

Eq. ( 13)

$$\dot{V}_{aire} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{aire}} = \frac{39,05 \left[ \frac{kg_a}{s} \right]}{1,293 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]} = 30,2 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

## 9.5. Cicle de Rankine

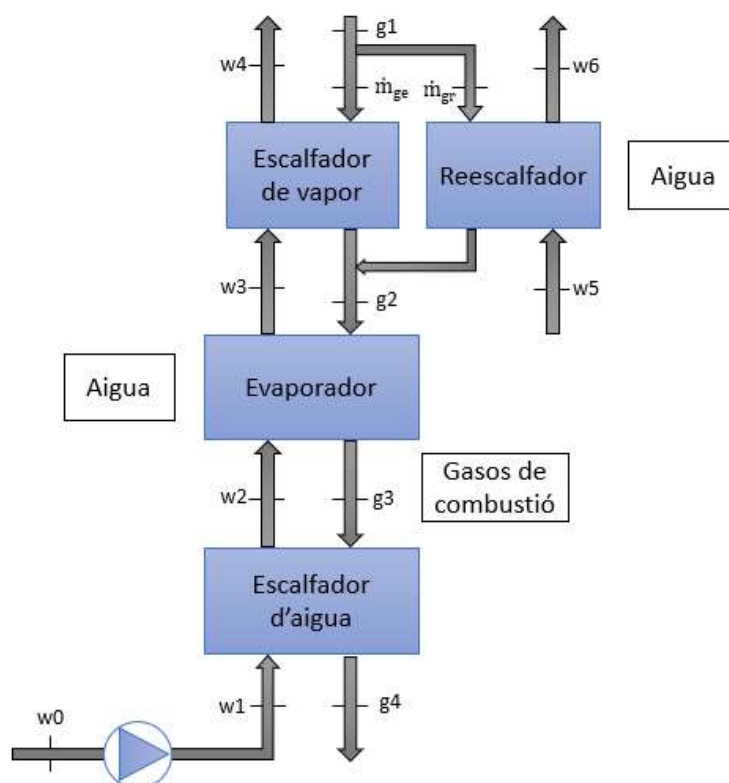
A partir de les dades que s'han anat presentant de cabals i poders calorífics i altres dades referents als fluids que intervenen en el cicle de Rankine, com pressions i temperatures, s'aniran calculant els paràmetres destacats per poder dimensionar correctament la instal·lació. D'aquesta manera es podrà determinar el cabal d'aigua que ha de circular per dins el cicle de vapor, la potència de la turbina i per tant l'electricitat que es generarà, la calor que s'ha d'evacuar per mitjà del condensador o el treball que ha d'efectuar la bomba [27], [28].

### 9.5.1. Generació de vapor

En primer lloc s'analitzarà el procés de transferència de calor que es desenvolupa a la caldera, és a dir, el canvi de fase de líquid a gas sobreescalfat de l'aigua de recuperació energètica.

Com s'ha comentat anteriorment, la caldera consta de tres zones cadascuna de les quals aconsegueix una funció concreta. En primer lloc s'hi troba l'escalfador d'aigua, en el qual l'aigua que surt a pressió de la bomba s'escalfa fins aproximadament la temperatura de saturació. En segon lloc s'hi troba l'evaporador, en el qual es desenvolupa el canvi de fase, passant de líquid a vapor, sense variar ni pressió ni temperatura. Finalment, en tercer lloc s'hi troba l'escalfador de vapor, el qual sobreescalfa el vapor més enllà del punt de saturació mantenint la pressió, amb la finalitat que a la sortida de la turbina no hi hagi una gran quantitat de fase líquida, que pot malmetre-la. En el cas que ens ocupa, aquesta tercera zona estarà dividida en dues parts, ja que el cicle de Rankine disposarà de reescalfament entre la turbina d'alta pressió i la de baixa pressió.

Així doncs, es presenta el següent esquema a mode de resum entre els dos fluids que intervenen en l'intercanvi de calor i les tres zones.



**Figura 9.5.** Esquema del procés de generació de vapor a la caldera (Font: Elaboració pròpia)

L'objectiu principal dels següents càlculs és el de determinar els paràmetres de l'aigua al llarg de l'intercanviador així com el seu cabal. A més també es calcularà superfície d'intercanvi, tenint en compte que s'utilitzaran intercanviadors de carcassa i tubs.

Dades disponibles:

- Temperatura dels gasos a l'entrada  $T_{g1} = 900 \text{ }^\circ\text{C}$
- Calor específic dels gasos (considerant-los gasos ideals)  $C_p = 1,97 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- Cabal dels gasos (Balanç màssic entre entrades i sortides al forn)  $\dot{m}_g = (39,05 + 3,94) \cdot 0,9 = 38,7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \approx 40 \text{ kg/s}$
- Pressió de l'aigua a l'entrada de la bomba  $P_{w0} = 0,3 \text{ bar}$
- Pressió de l'aigua a la sortida de la bomba  $P_{w1} = 103 \text{ bar}$
- Pressió de l'aigua a la sortida de la turbina d'alta pressió  $P_{w5} = 10 \text{ bar}$
- Temperatura del vapor sobreescalfat  $T_{w4} = 360 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura del vapor després de l'etapa de reescalfament  $T_{w6} = 320 \text{ }^\circ\text{C}$

A partir de les dades introduïdes, referents als càlculs realitzats anteriorment i a la bibliografia consultada [29] amb les taules de propietats de l'aigua i amb les següents fórmules, es pot determinar la següent taula:

- $W_b = \frac{P_2 - P_1}{\rho}$
- $h_2 = w_b + h_1$
- $\dot{Q} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1)$

	P [BAR]	T [°C]	h [KJ/KG]	ESTAT DEL FLUID
W_0	0,3	69,1	289,23	Líquid Saturat
W_1	103	69,58	299,73	Líquid Refredat
W_2	103	313,23	1420,35	Líquid Saturat
W_3	103	313,23	2718,97	Vapor Saturat
W_4	103	360	2975,48	Vapor Sobreescalfat
W_5	10	179,9	2539,33	Líq – Vap $x = 0,88$
W_6	10	320	3093,9	Vapor Sobreescalfat

**Taula 9.3.** Paràmetres destacats en els diferents punts de la caldera referents a l'aigua (Font: Elaboració pròpia)

Nota: Els punts W\_5 i W\_6, s'han pogut conèixer un cop analitzat el cicle de Rankine en la seva totalitat, tenint en compte els rendiments isentròpics de les turbines. Els càlculs corresponents es troben en el següent apartat.

1) Pressions:

Per trobar les pressions, es sap que a l'entrada, l'aigua es troba a 0,3 bar, que s'incrementa a 103 bar a la sortida de la bomba i que a partir d'allà, el seu valor roman constant al llarg del pas pels bescanviadors.

2) Entalpies:

- Per trobar l'entalpia de W\_0, W\_2 i W\_3, s'utilitzen les taules d'aigua saturada a les diferents temperatures. En els dos primers casos, tenint un 100% d'aigua i en el tercer, tenint un 100% de vapor.
- Per trobar l'entalpia de W\_1, s'utilitzen les dues primeres fórmules presentades anteriorment, tenint en compte que la densitat és la inversa del volum específic en les condicions de P1. Per tant:

$$W_b = \frac{(103 - 0,3) \cdot 10^5}{\frac{1}{1,0223 \cdot 10^{-3}}} = 10499,02 \frac{J}{kg} \quad \text{Eq. (14)}$$

$$h_{w_1} = 10,50 + 289,23 = 299,73 \frac{kJ}{kg} \quad \text{Eq. (15)}$$

## 3) Cabal màssic de vapor:

Per calcular el cabal màssic de vapor s'utilitza la tercera fórmula en la que es considera un intercanvi de calor ideal i es suposa que tota la calor que cedeixen els gasos de combustió passa a l'aigua. Per poder aplicar aquesta relació, falta la dada corresponent a la temperatura de sortida dels gasos. Fent una recerca, les referències consultades [30] estimen aquest valor entorn als 250°C, per evitar la condensació de partícules àcides dins la pròpia caldera. Així doncs, per conèixer el cabal màssic d'aigua que circula per dins el circuit s'utilitzaran els 250 °C, que posteriorment seran ajustats en funció dels càlculs realitzats. Així doncs:

$$\dot{m}_w = \frac{c_{p_g} \cdot \dot{m}_g \cdot (T_{g1} - T_{g4})}{(h_{w4} - h_{w1}) + (h_{w6} - h_{w5})} \quad \text{Eq. (16)}$$

$$\dot{m}_w = \frac{1,97 \cdot 40 \cdot (900 - 250)}{(2975,48 - 299,73) + (3093,9 - 2539,33)} = 15,86 \frac{kg}{s} \approx 16 \frac{kg}{s}$$

## 4) Seguidament es procedeix a trobar les temperatures dels gasos a cada punt de l'esquema per després poder trobar les superfícies de bescanvi que hauran de tenir cadascun dels components de la caldera.

Per trobar les temperatures en els punts G\_2 i G\_3 i corroborar que la temperatura G\_4 s'apropa als 250°C suposats, es considera que els bescanviadors estan perfectament aïllats i que per tant, tota la calor que perden els gasos passa a l'aigua.

$$T_{g2} = T_{g1} - \frac{\dot{m}_w \cdot [(h_{w4} - h_{w3}) + (h_{w6} - h_{w5})]}{\dot{m}_g \cdot c_{p_g}} \quad \text{Eq. (17)}$$

$$T_{g2} = 900 - \frac{16 \cdot [(2975,48 - 2718,97) + (3093,9 - 2539,33)]}{40 \cdot 1,97} = 735,31 \text{ °C}$$

$$T_{g3} = T_{g2} + \frac{\dot{m}_w \cdot (h_{w3} - h_{w2})}{\dot{m}_g \cdot c_{p_g}} \quad \text{Eq. (18)}$$

$$T_{g3} = 735,31 - \frac{16 \cdot (2718,97 - 1420,35)}{40 \cdot 1,97} = 471,63 \text{ °C}$$

$$T_{g4} = T_{g3} + \frac{\dot{m}_w \cdot (h_{w2} - h_{w1})}{\dot{m}_g \cdot c_{p_g}} \quad \text{Eq. (19)}$$

$$T_{g4} = 471,63 - \frac{16 \cdot (1420,35 - 299,73)}{40 \cdot 1,97} = 244,10 \text{ °C}$$



	T [°C]
G_1	900
G_2	735,31
G_3	471,63
G_4	244,1

**Taula 9.4.** Paràmetres destacats en els diferents punts de la caldera referents als gasos (Font: Elaboració pròpia)

Nota: Com es pot observar, el valor en el punt g\_4, s'aproxima força als 250°C, suposats en un inici, fet que dona validesa al procediment utilitzat.

- 5) A continuació es calcula el cabal de gas que ha de circular per cada part de l'escalfador de vapor. És a dir, a la sortida de la cambra de postcombustió, el flux dels gasos es dividirà en dos. Una servirà per sobreescalfar el vapor a alta pressió, que a la sortida passarà per la primera etapa de la turbines i l'altra servirà per reescalfar el vapor a baixa pressió, que després passarà per la segona etapa de turbines. Per saber el cabal de cada bescanviador es planteja un sistema de dues equacions i incògnites.

$$\begin{cases} \dot{m}_{g1} \cdot c_g \cdot (T_{g1} - T_{g2}) = \dot{m}_w \cdot (h_{w4} - h_{w3}) \\ \dot{m}_{g1} + \dot{m}_{g2} = \dot{m}_g \end{cases} \quad \text{Eq. (20)}$$

Substituint els paràmetres pels valors disponibles i resolent el sistema d'equacions s'obtenen els següents:

- $\dot{m}_{g1} = 12,65 \frac{kg}{s}$
- $\dot{m}_{g2} = 27,35 \frac{kg}{s}$

- 6) El darrer càlcul referent a la transferència de calor que es dona a la caldera, és l'àrea de bescanvi de cada part. D'aquesta manera ja es disposarà de totes les dades i paràmetres per poder buscar una caldera de les característiques desitjades per la incineradora que s'està dimensionant.

L'àrea de bescanvi depèn del tipus de bescanviador utilitzat. En el cas que ens ocupa, es tracta d'un de carcassa i tubs amb un nombre parell de passos. Aquesta característica determinarà el factor corrector i la diferència de temperatura mitja logarítmica, paràmetres que apareixen a la fórmula.

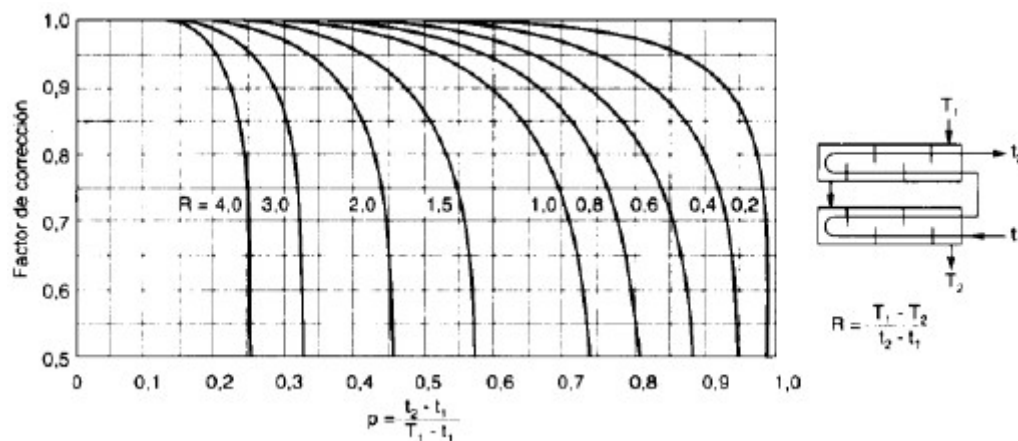
$$\dot{Q} = U_m \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{Eq. (21)}$$

- $U_m =$  Coeficient global mitjà
- $A =$  Àrea de bescanvi
- $F =$  Factor corrector (depèn de l'àbac)
- $\Delta T_{ml} =$  Diferència de temperatura mitja logarítmica

Per aplicar l'expressió s'ha buscat els coeficients globals mitjans típics de cada part de la caldera, de manera que s'han considerat els següents:

- $U_{m_w} = 0,75 \frac{kW}{m^2 \cdot K}$
- $U_{m_{ev}} = 0,55 \frac{kW}{m^2 \cdot K}$
- $U_{m_v} = 0,15 \frac{kW}{m^2 \cdot K}$

Per altra banda s'ha anat a buscar el factor corrector al següent àbac:



**Figura 9.6.** Àbac de factors de correcció per bescanviadors de carcassa i tubs (Font: Apunts Calderes, Joan Grau)

Per trobar-lo primer es calcula  $p$  i  $R$ :

$$p = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad i \quad R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad \text{Eq. (22)}$$

a) Escalfador d'aigua:

$$p = \frac{313,23 - 69,58}{471,63 - 69,58} = 0,61 \quad i \quad R = \frac{471,63 - 244,1}{313,23 - 69,58} = 0,93$$

Factor  $F = 0,92$

b) Evaporador:

L'evaporador, al treballar amb l'aigua durant el seu canvi de fase i per tant durant el procés en que aquesta no experimenta variacions de temperatura, serà avaluat sense tenir en compte el factor corrector.

c) Escalfador de vapor a alta pressió:

$$p = \frac{360 - 313,23}{900 - 313,23} = 0,08 \text{ i } R = \frac{900 - 735,31}{360 - 313,23} = 3,52$$

Factor F = 1

d) Reescalfador de vapor a baixa pressió:

$$p = \frac{320 - 179,9}{900 - 179,9} = 0,19 \text{ i } R = \frac{900 - 735,31}{320 - 179,9} = 1,18$$

Factor F = 1

El darrer paràmetre que s'ha de conèixer abans de poder aplicar la fórmula de l'àrea de bescanvi és el de diferència de temperatura mitja logarítmica, el qual també és diferent per a cada part de la caldera.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad \text{Eq. ( 23)}$$

$$\Delta T_1 = T_{ce} - T_{fs} ; \Delta T_2 = T_{cs} - T_{fe} \quad \text{Eq. ( 24)}$$

a) Escalfador d'aigua:

- $\Delta T_1 = T_{g3} - T_{w2} = 471,63 - 313,23 = 158,4$
- $\Delta T_2 = T_{g4} - T_{w1} = 244,1 - 68,58 = 175,52$

$$\Delta T_{ml} = \frac{175,52 - 158,4}{\ln \frac{175,52}{158,4}} = 166,81 \text{ } ^\circ\text{C}$$

b) Evaporador:

- $\Delta T_1 = T_{g2} - T_{w3} = 735,31 - 313,23 = 422,08$
- $\Delta T_2 = T_{g3} - T_{w2} = 471,63 - 313,23 = 158,4$

$$\Delta T_{ml} = \frac{158,4 - 422,08}{\ln \frac{158,4}{422,08}} = 269,04 \text{ } ^\circ\text{C}$$

c) Escalfador de vapor a alta pressió:

- $\Delta T_1 = T_{g1} - T_{w4} = 900 - 360 = 540$
- $\Delta T_2 = T_{g2} - T_{w3} = 735,31 - 313,23 = 422,08$

$$\Delta T_{ml} = \frac{422,08 - 540}{\ln \frac{422,08}{540}} = 478,62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

d) Reescalfador de vapor a baixa pressió:

- $\Delta T_1 = T_{g1} - T_{w6} = 900 - 320 = 580$
- $\Delta T_2 = T_{g2} - T_{w5} = 735,31 - 179,9 = 555,41$

$$\Delta T_{ml} = \frac{521,67 - 540}{\ln \frac{521,67}{540}} = 567,62 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Així doncs utilitzant la fórmula presentada anteriorment fent la corresponent substitució s'obtenen les següents àrees de bescanvi per cada part de la caldera:

$$A = \frac{\dot{m}_w \cdot (h_{i+1} - h_i)}{U_m \cdot F \cdot \Delta T_{ml}} \quad \text{Eq. (25)}$$

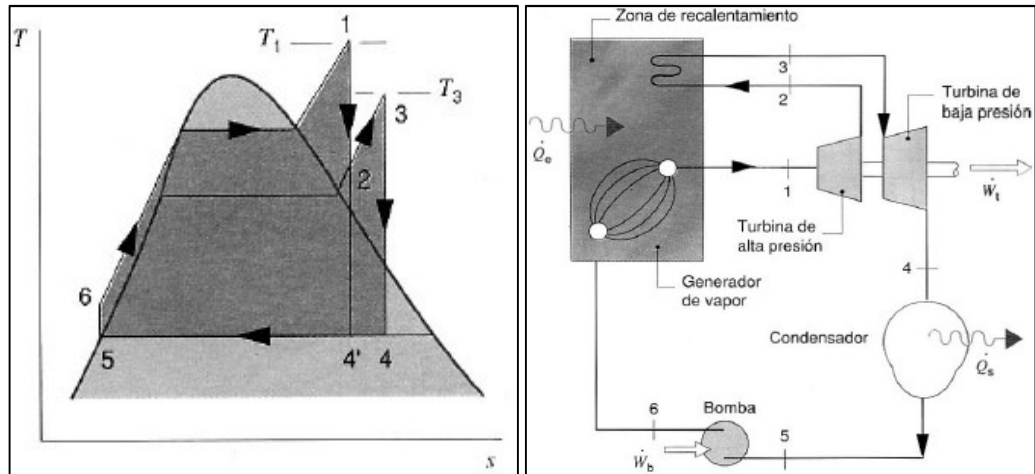
- Escalfador d'aigua:  $A_w = 155,78 \text{ m}^2$
- Evaporador:  $A_{ev} = 140,42 \text{ m}^2$
- Escalfador de vapor a alta pressió:  $A_{shp} = 57,17 \text{ m}^2$
- Reescalfador de vapor a baixa pressió:  $A_{slp} = 104,21 \text{ m}^2$

A partir de les quatre àrees obtingudes, ja es pot buscar una caldera que compleixi amb les condicions. Com es pot observar, les parts més petites de la caldera són les dels escalfadors de vapor. Això és degut a que és la part on hi ha el salt tèrmic major entre el fluid calent i el fred. Per aquest motiu, encara que el coeficient global mitjà de transferència sigui bastant petit, degut a l'aïllament dels materials que han de fer front a la càrrega tèrmica dels gasos a la sortida de la cambra de combustió, l'escalfador de vapor requereix d'una superfície de bescanvi inferior a la de l'evaporador i a la de l'escalfador d'aigua.

### 9.5.2. Anàlisi del cicle

Un cop analitzat el procés d'intercanvi de calor que es dona entre els dos fluids a la caldera es procedeix a estudiar la resta del cicle de Rankine. És a dir, tot el circuit que segueix el vapor d'aigua des que surt de la caldera fins que torna a arribar-hi en fase líquida.

El cicle de Rankine a analitzar és el de la següent imatge el qual es caracteritza per tenir sobreescalfament i reescalfament amb l'objectiu de millorar el rendiment.



**Figura 9.6.** Diagrama T,s i esquema del Cicle de Vapor amb reescalfament (Font: Apunts Cicle de Vapor, Joan Grau)

El cicle de potència de vapor es tracta d'un cicle bifàsic, és a dir que el fluid utilitzat al llarg del recorregut es troba en dues fases diferents, en aquest cas fase líquida i fase vapor. Consta de quatre processos cadascun del qual s'efectua en un element diferent.

- Expansió: Es du a terme a la turbina o turbines i en el cicle ideal es tracta d'un procés isentròpic. Consisteix en l'extracció d'una part de l'energia interna del vapor per convertir-la en energia cinètica de rotació.
- Condensació: Es du a terme al condensador i consisteix en el refredament del vapor. Es tracta d'un procés isòbar el qual requereix d'un focus fred amb la capacitat d'evacuar gran quantitat de calor. Per fer-ho, normalment s'utilitza aigua, tot i que també es pot evacuar per mitjà d'aire.
- Augment de pressió: Es du a terme a la bomba o grup de bombeig i en el cicle ideal es tracta d'un procés isentròpic. En ell a partir del treball de la bomba s'augmenta la pressió del fluid en estat líquid.
- Escalfament: Es du a terme a la caldera i es tracta d'un procés isòbar. Per mitjà de la transferència de calor, el fluid experimenta un canvi de fase passant a vapor, dotant-lo així de l'energia interna necessària que posteriorment serà aprofitada a la turbina.

Els quatre processos descrits es poden trobar més d'un cop en el cicle, amb la finalitat d'augmentar l'eficiència del cicle. En el cas que ens ocupa, tal com es pot observar en l'esquema i en el gràfic Temperatura – Entropia, es compta amb una etapa de reescalfament.

L'etapa de reescalfament consisteix en dividir l'expansió isentròpica de la turbina en dos, per aconseguir que la diferència de pressions sigui la major possible (Major rendiment del cicle). A la sortida de la primera turbina (Expansió a alta pressió) es fa passar el vapor de nou per la caldera reescalfant-lo i posteriorment es redirigeix a la segona turbina (Expansió a baixa pressió). D'aquesta manera, amb el reescalfament s'evita que el títol de vapor sigui baix (Aspecte que pot danyar la turbina).

Amb aquesta modificació del cicle, s'origina una corba característica, similar a una dent de serra. Així doncs, s'aconsegueix reduir l'àrea del cicle (l'àrea compresa dins del cicle és proporcional al calor que s'ha d'aportar), disminuint-ne així l'energia necessària i per tant augmentant-ne el rendiment.

A continuació es presenta una taula elaborada a partir dels valors coneguts en els punts estudiats anteriorment (entrada i sortida de la caldera) juntament amb altres valors necessaris que s'han hagut de fixar.

	T [°C]	P [MPa]	h [kJ/kg]	s [kJ/(kg·K)]	Fase
<b>1</b>	360	10,3	2952,14	5,98	Vapor sobreescalfat
<b>2S</b>	179,9	1	2503,43	5,98	0,8637
<b>2</b>	179,9	1	2539,33	5,06	0,8815
<b>3</b>	320	1	3093,9	7,1962	Vapor sobreescalfat
<b>4S</b>	69,1	0,03	2429,37	7,1962	0,9161
<b>4</b>	69,1	0,03	2482,53	7,3524	0,9389
<b>5</b>	69,1	0,03	289,23	0,9439	Líquid saturat
<b>6</b>	69,58	10,3	299,73	0,9439	Líquid refredat

**Taula 9.5.** Resum dels paràmetres destacats als diferents punts del Cicle de Rankine (Font: Elaboració pròpia)

Valors fixats amb anterioritat per tal de poder completar la resta de la taula:

<b>P1</b>	<b>10,3 MPA</b>
<b>T1</b>	360 °C
<b>P2</b>	1 MPa
<b>T3</b>	320 °C
<b>P4</b>	0,3 MPa

**Taula 9.6.** Valors fixats pel càlcul del Cicle de Rankine (Font: Elaboració pròpia)

A més dels valors fixats també s’han suposat alguns dels estats en que es trobarà l’aigua en els punts d’estudi. Aquests són:

1 1 3	VAPOR SOBRESALFAT
5	Líquid saturat

**Taula 9.6’.** Valors fixats pel càlcul del Cicle de Rankine (Font: Elaboració pròpia)

Cal comentar que en el procés de condensació el vapor es refreda per sota del punt de saturació. És a dir, a la sortida s’obté líquid refredat, per tal d’assegurar que al grup de bombeig no existeix cap aigua en fase vapor, fet que podria malmetre les bombes.

A partir de les dades de partida amb l’ajuda de les taules de propietats de l’aigua del llibre *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* de J. Moran i N.Shapiro i de les següents expressions s’ha pogut determinar tota la taula.

- (1) Rendiments isentròpics de les turbines. Tot i que es suposa que el vapor disposa de la mateixa entropia a l’entrada i la sortida de les turbines, a la realitat aquest procés comporta unes pèrdues. Aquestes s’han estimat en un 92% per les dues turbines.

$$\eta_{ts} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \quad \text{Eq. ( 26)}$$

- (2) Percentatge màssic de vapor en la zona de vapor humit. En els punts en què el fluid es troba en la zona de canvi de fase, és important conèixer quin percentatge hi ha de cadascuna. Això s’aconsegueix o bé coneixent l’entropia o l’entalpia total.

$$h = (1 - x) \cdot h_{liq} + x \cdot h_{vap} \quad \text{Eq. ( 27)}$$

$$s = (1 - x) \cdot s_{liq} + x \cdot s_{vap} \quad \text{Eq. ( 28)}$$

- (3) La darrera fórmula utilitzada, és per conèixer el treball que realitza la bomba (diferència de pressions partit densitat del fluid) i per tant, l’energia que guanya el fluid. Cal comentar que no s’ha considerat cap rendiment isentròpic en la bomba, ja que per norma general són molt elevats i per altra banda no tenen una gran influència en la resta de càlculs.

$$w_b = \frac{(P_6 - P_5)}{\rho} \quad \text{Eq. ( 29)}$$

$$h_6 = w_b + h_5 \quad \text{Eq. ( 30)}$$

Un cop trobats els valors de cadascun dels punts claus del cicle, es procedeix a analitzar-los per tal de poder definir els paràmetres clau del cicle de Rankine estudiat.

- Rendiment tèrmic:

$$\eta = \frac{w_t - w_b}{\dot{Q}_g} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) - (h_6 - h_5)}{(h_1 - h_6) + (h_3 - h_2)} \cdot 100 = 31,61\% \quad \text{Eq. (31)}$$

- Treball realitzat a les turbines:

$$w_t = \frac{N_t}{\dot{m}_w} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) = 1024,18 \text{ kJ/kg} \quad \text{Eq. (32)}$$

- Calor aportada per la caldera:

$$\frac{\dot{Q}_g}{\dot{m}_w} = (h_1 - h_6) + (h_3 - h_2) = 3206,98 \text{ kJ/kg} \quad \text{Eq. (33)}$$

- Calor extreta al condensador:

$$\frac{\dot{Q}_c}{\dot{m}_w} = h_4 - h_5 = 2193,3 \text{ kJ/kg} \quad \text{Eq. (34)}$$

Així doncs, un cop coneguts els principals paràmetres referents als salts entàlpics de cada procés, queden dos aspectes claus a tractar referent al cicle. El primer d'ell és conèixer la potència disponible provinent de l'energia cinètica de rotació de la turbina. El segona consisteix en dimensionar el cabal d'aigua necessari per poder evacuar la calor requerida en el condensador.

### 9.5.3. Potència disponible i rendiment

Potència mecànica disponible, la qual gràcies a l'alternador, que és solidari a l'eix de la turbina podrà convertir-se en potència elèctrica. Cal tenir en compte l'aplicació d'un rendiment, per contemplar les pèrdues per fregament o les de l'entreferro que apareixen a l'alternador.

$$P_e = \dot{m}_w \cdot w_t \cdot \eta_a = 16 \cdot 1024,18 \cdot 0,98 = 16059,14 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} = 16 \text{ MW} \quad \text{Eq. (35)}$$

Com es pot apreciar, el valor resultant de la potència elèctrica de la incineradora és bastant similar al desitjat des d'un inici (15 MW). El MW de diferència correspon principalment a l'estimació a la baixa del rendiment del cicle. En primera instància s'havia suposat un rendiment del 25%, mentre que un cop analitzat tot el cicle, aquest ha resultat esser del 31,61%. No obstant això, es considera el resultat acceptable, ja que independentment de la potència nominal de la planta, aquesta té la capacitat de modular la potència elèctrica que entrega a la xarxa en funció del cabal de combustible i d'aire que entra al forn. Així doncs, en funció de la demanda d'energia elèctrica de la xarxa la incineradora generarà més o menys, seguint un patró similar al presentat en la figura x. Mix energètic model 2.



#### 9.5.4. Condensació

L'últim càlcul referent al cicle de Rankine que queda per realitzar és el referent al condensador.

Com s'ha explicat anteriorment, a la sortida de la turbina, l'aigua, a baixa pressió, es troba en fase líquid – vapor. Abans de passar pel grup de bombeig i tornar a iniciar el cicle, s'ha de condensar completament. És per això que es necessita evacuar la calor per mitjà d'un condensador.

Existeixen dues maneres normalment utilitzades per condensar l'aigua del cicle. Una és mitjançant grans quantitats d'aire i aigua, utilitzada en torres de refrigeració (Grans generadors d'energia elèctrica). L'altra és mitjançant la utilització d'aigua. Mètode que s'utilitzarà en la incineradora objecte d'aquest projecte. Això és degut a que és més econòmic i el sistema ja està muntat, ja que es troba ubicada al costat de l'actual central elèctrica. A més, optar per una torre de refrigeració hagués estat força complicat, ja que l'aire atmosfèric de l'illa és molt humit, reduint així la capacitat d'absorbir calor a través de l'evaporació de l'aigua calenta.

Així doncs, es procedeix a calcular el cabal d'aigua de mar necessari per condensar l'aigua del cicle, així com l'àrea de bescanvi que es requerirà.

El procediment a seguir és similar al practicat en el punt 1 d'aquest apartat per calcular l'intercanvi de calor a la caldera, tot i que en aquest cas els dos fluids que intervindran seran aigua.

- Fluid calent: Aigua, a l'entrada en fase líquid – vapor i fase líquida a la sortida.
- Fluid fred: Aigua de mar

Pel que fa als valors de l'aigua del cicle són coneguts tant a l'entrada com a la sortida, mentre que els valors de l'aigua de refrigeració s'han de buscar i analitzar.

En primer lloc, s'han buscat les dades referents a la temperatura de l'aigua del mar a l'interior del port de Maó per cada mes de l'any:

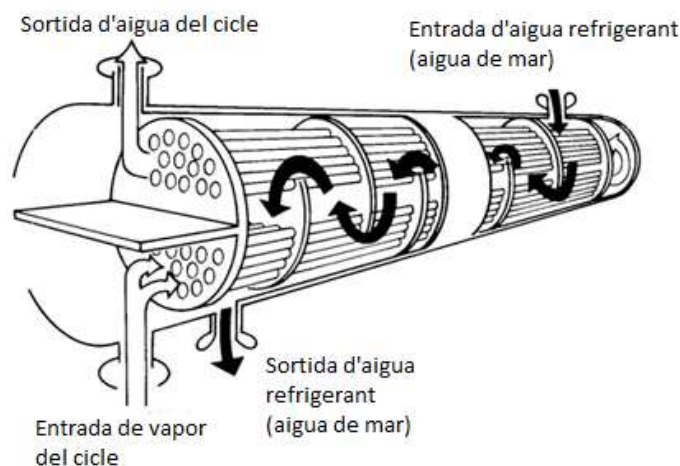
	GEN	FEB	MAR	ABR	MAIG	JUNY	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DES
T [°C]	15	14	14	15	18	22	25	27	25	22	19	18

Taula 9.7. Temperatura mitja mensual del mar al Port de Maó (Font: Clima i Temperatura de Menorca)

Un cop obtingudes les dades de temperatura de l'aigua s'ha optat per agafar com a valor de càlcul la més desfavorable, que és durant l'agost, per diferents motius. En primer lloc, perquè al situar-se el punt d'absorció a la colàrsega del port, pot ser que la temperatura sigui lleugerament superior a la dada de referència. Per altra banda, perquè precisament quan més demanda elèctrica hi ha i per tant quan la incineradora funcionarà a més potència és durant l'agost. A més cal tenir en compte, que es preveu que en un futur la temperatura del mar augmenti per culpa del canvi climàtic.

Per altra banda, la temperatura de sortida ve fixada per normativa. Aquesta diu que l'increment que l'aigua pot experimentar és de màxim 7 °C respecte la temperatura d'entrada.

El bescanviador utilitzat en aquest cas és de carcassa i tubs, ja que és el més utilitzat per a condensació en processos de generació d'energia elèctrica i perquè és modular. Per tant, en cas d'haver d'augmentar o disminuir l'àrea de bescanvi es podria fer de manera relativament senzilla. A més presenta una avantatge important, i és que permet invertir el sentit de flux dels fluids. D'aquesta manera, s'evita que s'incrustin microorganismes o que plàstics i altres petites partícules taponin la placa disminuint així l'eficiència.



**Figura 9.7.** Esquema del funcionament d'un bescanviador de carcassa i tubs (Font: Grupo Metalúrgica Marina)

Resum de dades disponibles:

- Calor a dissipar:  $2193,3 \cdot 16 = 35092,8 \frac{kJ}{s} = 35MW$
- $T_{fe} = 27^{\circ}C$ ;  $T_{fs} = 34^{\circ}C$
- $T_c = 69,1^{\circ}C$

A partir de les dades disponibles es pretén calcular per una banda l'àrea de bescanvi i per altra banda el cabal d'aigua de mar necessària.

1) Àrea de bescanvi:

Per trobar-la s'aplica la següent expressió. Tenint en compte que el coeficient global mitjà de transferència  $U_m$  és de  $1,7 \frac{kW}{m^2 \cdot K}$ .

$$A = \frac{\dot{Q}}{U_m \cdot \Delta T_{ml}} = \frac{35092,8}{1,7 \cdot 38,49} = 536,26 m^2$$

Tenint en compte que l'increment de temperatura mig logarítmic es calcula amb la següent expressió:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} = \frac{35,1 - 42,1}{\ln \frac{35,1}{42,1}} = 38,49^\circ\text{C}$$

- $\Delta T_1 = T_{ce} - T_{fs} = 69,1 - 27 = 42,1^\circ\text{C}$
- $\Delta T_2 = T_{cs} - T_{fe} = 69,1 - 34 = 35,1^\circ\text{C}$

2) Cabal d'aigua del mar requerit:

Suposant que no hi ha pèrdues de calor en el bescanviador, s'iguala la calor que perd l'aigua del cycle amb la que guanya l'aigua de mar, expressant-ho amb la següent fórmula:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{sw} \cdot c_{p_{sw}} \cdot (T_{f2} - T_{fe})$$

Prenent com a valor del calor específic de l'aigua salada a  $20^\circ\text{C} = 0,93 \text{ kcal/kg}\cdot\text{K}$ :

$$\dot{m}_{sw} = \frac{35092,8}{0,93 \cdot 4,18 \cdot (34 - 27)} = 1289,62 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Normalment el cabal d'aigua s'expressa mitjançant el volumètric, ja que permet fer-se una idea més aproximada de la quantitat requerida i a part s'utilitza per dimensionar el grup de bombeig. Valor de la densitat de l'aigua de mar =  $1,027 \text{ kg/l}$

$$\dot{V}_{sw} = \frac{\dot{m}_{sw}}{\rho_{sw}} = \frac{1289,62}{1,027} = 1255,71 \frac{\text{l}}{\text{s}} = 1,26 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Aquest valor aparentment és força gran. Per aquest motiu s'han consultat fonts per contrastar-lo. En aquest cas s'ha contactat amb Francesc J. Rosa, cap d'exploració de la planta de valorització energètica de TERSA. Segons la seva aportació, el volum d'aigua que per línia pot arribar a moure la instal·lació és de  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ , aproximadament el volum que s'ha obtingut. No obstant, la seva instal·lació, com a molt arriba a moure'n la meitat.

Aquest fet, és degut a dos factors:

- En primer lloc, perquè l'increment de temperatura de l'aigua del mar pot ser major. De fet, és de  $14^\circ\text{C}$ , concretament el doble que el permès dins el port de Maó.
- En segon lloc, perquè el seu cycle de Rankine, contempla un aprofitament de part de la calor despresada durant el procés de condensació per preescalfar l'aigua entre el bombeig i la de generació de vapor. Etapa que en aquest projecte no s'ha contemplat per tal de simplificar els cas d'estudi.

## 9.6. Neteja dels gasos de combustió

Finalment, el darrer aspecte a tenir en compte pel dimensionament de la incineradora és la neteja dels gasos de combustió. Aquests, cedeixen part de la seva calor a l'aigua del cicle i a continuació, segueixen un procés de filtratge i neteja per poder ésser alliberats a l'atmosfera. Emetent la mínima quantitat de partícules i gasos nocius pel medi ambient, respectant sempre la legislació.

El punt de partida per poder dimensionar correctament el sistema de tractament de gasos de combustió (TGC) i després poder-lo aplicar és conèixer amb precisió la composició exacta dels gasos de combustió. Anteriorment, amb les reaccions analitzades, s'ha pogut fer una aproximació a les diferents molècules que es formaran: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> i N<sub>2</sub>. No obstant, en la realitat n'apareixen d'altres degut a la composició dels residus o a la imperfecció de la combustió, que s'han de tractar, com per exemple: CO, HF, HCl o NO<sub>x</sub>.

Per aquest motiu, s'agafaran com a valors de composició dels gasos de combustió, dades experimentals d'altres incineradores que utilitzin uns residus similars a la que s'està dissenyant.

COMPONENT	UNITAT	VALOR (INCINERADORA DE RSU)
POLS	mg/Nm <sup>3</sup>	1000 - 5000
CO	mg/Nm <sup>3</sup>	5-50
DIOXINES I FURANS	ngTEQ/Nm <sup>3</sup> *	0,5 – 10
HCL	mg/Nm <sup>3</sup>	500 – 2000
HF	mg/Nm <sup>3</sup>	5 – 20
SO <sub>2</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	200 - 1000
NO <sub>x</sub>	mg/Nm <sup>3</sup>	250 – 500
CO <sub>2</sub>	%	5 – 10
H <sub>2</sub> O	%	10 – 20

**Taula 9.8.** Rang de possibles emissions d'una incineradora (Font: IDAE, *MTD\_Incineración\_Residuos\_ES*)

\*Nano gram de dioxina tòxica equivalent

Com es pot observar en la taula, la referència consultada contempla un rang bastant elevat entre els valors dels components que es poden generar després de la combustió. Això és degut a la gran varietat que hi pot haver en els residus cremats així com en la tecnologia utilitzada en la incineradora.

Tenint en compte que la incineradora serà de nova construcció i per tant utilitzarà la tecnologia més avançada disponible i amb la intenció de tenir un marge de seguretat, s'agafarà com a valor estimat de les emissions un 0,75 del valor màxim.

Per altra banda, s'ha consultat el Reial Decret 815/2013 annex 2 part 5, per tal de conèixer els valors màxims acceptats per una incineradora de nova construcció. Amb aquesta informació i amb la premissa establerta anteriorment s'ha elaborat la següent taula.

COMPONENT	UNITAT	VALOR (INCINERACIÓ DE RSU)	VALORS MÀXIMS MITJANS DIARIS
<b>PARTÍCULES TOTALS</b>	mg/Nm <sup>3</sup>	3750	10
<b>CO</b>	mg/Nm <sup>3</sup>	37,5	50
<b>DIOXINES I FURANS</b>	ngTEQ/Nm <sup>3*</sup>	7,5	0,1
<b>HCL</b>	mg/Nm <sup>3</sup>	1500	10
<b>HF</b>	mg/Nm <sup>3</sup>	15	1
<b>SO<sub>2</sub></b>	mg/Nm <sup>3</sup>	750	50
<b>NO<sub>x</sub></b>	mg/Nm <sup>3</sup>	375	200
<b>CO<sub>2</sub></b>	%	5 – 10	-
<b>H<sub>2</sub>O</b>	%	10 – 20	-

**Taula 9.9.** Emissions estimades de la incineradora i valors màxims permesos (Font: IDAE, *MTD\_Incineración\_Residuos\_ES*)

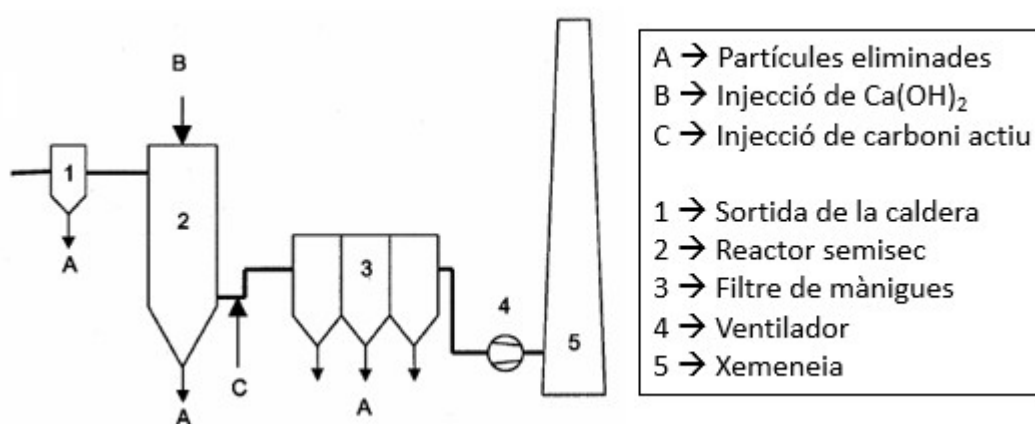
Cal comentar que ambdues columnes de dades estan preses a temperatura de 273,15 K, pressió de 101,3 kPa i normalitzats a l'11% d'oxigen en el gas residual.

Un cop presentada la taula, s'observen els components que s'hauran de filtrar. Aquests alhora són agrupats en tres grups, en funció del filtre requerit per a la seva eliminació:

- $\text{NO}_x$
- $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$
- Dioxines i furans
- Partícules

Pel filtratge d'aquests tres grups de partícules s'utilitzarà un sistema semisec i cada un d'ells s'eliminarà utilitzant una tècnica diferent.

L'esquema a seguir és força similar al presentat a continuació:



**Figura 9.8.** Esquema de funcionament d'un sistema de neteja semisec (Font: GUZINA S.L.)

En primer lloc, tot i que no s'aprecia a l'esquema, juntament amb l'aire injectat al forn, també s'hi introdueix urea per evitar la formació de  $\text{NO}_x$ . Un cop efectuada la combustió i la transferència de calor a la caldera els gasos passen per dins el reactor semisec on s'hi afegeix hidròxid de calci per reaccionar amb els gasos àcids. Els productes de la reacció en forma de partícules volàtils, són filtrats per mitjà del cicló i el filtre electroestàtic ubicat a la sortida del reactor. Posteriorment s'injecta carboni actiu, perquè reaccionin amb les dioxines i els furans que s'hagin pogut formar en la combustió. Finalment el gas passa per un filtre de mànigues on s'acaben depositant totes les partícules que quedaven en els fums. Ja per acabar, un ventilador els empeny perquè siguin alliberats a l'atmosfera passant per la xemeneia, on s'ubica el sistema de control d'emissions.

#### 1- Procés de reducció d'emissions de $\text{NO}_x$

La formació d'òxids de nitrogen pot ser deguda a diferents factors. No obstant, es tracta de components contaminants els quals s'han de minimitzar al màxim en les emissions.

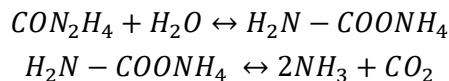
La primera acció per reduir-ne la seva formació és disminuir la temperatura de combustió. Per aquest motiu, des d'un primer moment s'ha fixat en 950 °C, ja que per sota dels 1300 °C, es redueix significativament la formació dels anomenats NO<sub>x</sub> tèrmics.

Tot i així, encara que es redueixi la temperatura de combustió poden seguir apareixent NO<sub>x</sub> degut a la falta d'oxigen en moments determinats. És per això que s'utilitza una tècnica secundària per a la seva reducció, la injecció d'amoníac o derivats seus com la urea (CON<sub>2</sub>H<sub>4</sub>).

S'utilitza un procés de Reducció No Catalítica Selectiva (RNCS) pel qual els òxids de nitrogen (NO i NO<sub>2</sub>) són eliminats per mitjà d'una reacció de reducció. L'agent reductor, en aquest cas urea, és injectat en el forn crematori i reacciona amb els NO<sub>x</sub>, eliminant-ne així més d'un 80%.

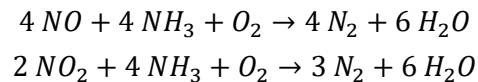
Així doncs, es procedeix a calcular la quantitat d'urea necessària per a neutralitzar el NO<sub>x</sub> aparegut en la combustió.

- a) En primer lloc es formula la reacció per passar d'urea a amoníac que serà el que directament reaccionarà amb el NO i el NO<sub>2</sub>:



Així doncs, de la reacció de la urea, que s'introdueix al forn dissolta en aigua, per cada mol, se n'obtenen dos d'amoníac. Serà precisament el NH<sub>3</sub> el que s'utilitzarà per a la reacció de reducció, necessària per neutralitzar els òxids de nitrogen.

- b) En segon lloc es formula la reacció que es du a terme entre l'amoníac i els òxids: el NO i el NO<sub>2</sub>:



Un cop conegudes les reaccions es procedeix a calcular la quantitat d'urea dissolta que caldrà subministrar per assegurar que les emissions de NO i NO<sub>2</sub> es troben dins els límits permesos marcats pel RD 815/2013.

- c) Per determinar la quantitat d'urea cal fixar els percentatges de formació de cadascun dels òxids. Aquests són aproximadament els següents:

- NO = 90 %
- NO<sub>2</sub> = 10 %

Aplicant les corresponents masses molars de cada component de les reaccions es pot determinar la massa d'urea necessària per eliminar 1 kg d'òxid:

$$\begin{aligned} \circ \quad 1 \text{kgNO} &\cdot \frac{1 \text{ kmol NO}}{30 \text{ kg NO}} \cdot \frac{4 \text{ kmol NH}_3}{4 \text{ kmol NO}} \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}_2\text{H}_4}{2 \text{ kmol NH}_3} \cdot \frac{60 \text{ kg CON}_2\text{H}_4}{1 \text{ kmol CON}_2\text{H}_4} = 1 \text{ kgCON}_2\text{H}_4 \\ \circ \quad 1 \text{kgNO}_2 &\cdot \frac{1 \text{ kmol NO}_2}{46 \text{ kg NO}_2} \cdot \frac{4 \text{ kmol NH}_3}{2 \text{ kmol NO}_2} \cdot \frac{1 \text{ kmol CO}_2\text{H}_4}{2 \text{ kmol NH}_3} \cdot \frac{60 \text{ kg CON}_2\text{H}_4}{1 \text{ kmol CO}_2\text{H}_4} = 1,3 \text{ kgCON}_2\text{H}_4 \end{aligned}$$

Així doncs, aplicant les ponderacions corresponents als percentatges de cada òxid, s'obté que per cada kilogram de  $\text{NO}_x$  es requeriran 1,03 kg d'urea.

- d) Finalment es determina la concentració d'urea que es requerirà per metre cúbic d'aire normal a l'11% d'oxigen perquè les emissions entrin dins dels límits permessos:

$$\text{Concentració } \text{CON}_2\text{H}_4 = \text{Concentració } \text{NO}_x \text{ a eliminar} \cdot \text{Urea necessària} \quad \text{Eq. (36)}$$

$$\text{Concentració } \text{CON}_2\text{H}_4 = 175 \frac{\text{mg } \text{NO}_x}{\text{Nm}^3} \cdot 1,03 \frac{\text{mg } \text{CON}_2\text{H}_4}{\text{mg } \text{NO}_x} = 180,25 \frac{\text{mg } \text{CON}_2\text{H}_4}{\text{Nm}^3}$$

El valor obtingut s'ha d'ajustar, ja que en la pràctica dins el forn no tota la urea és capaç de reaccionar amb els òxids de nitrogen motiu pel qual com a mínim se n'ha d'introduir un 20% en excés, tal com passava amb l'oxigen.

$$\text{Conc. ajustada } \text{CON}_2\text{H}_4 = 180,25 \cdot 1,2 = 216,3 \frac{\text{mg } \text{CON}_2\text{H}_4}{\text{Nm}^3}$$

S'ha de tenir en compte que la urea entra al forn diluïda en aigua en un 50%:

$$\text{Conc. sol } \text{CON}_2\text{H}_4 = \frac{216,3}{0,5} = 413,6 \frac{\text{mg } \text{CON}_2\text{H}_4}{\text{Nm}^3}$$

- e) Un cop determinat la concentració de la solució d'urea a introduir al forn, per cada metre cúbic de gasos de combustió, es pretén determinar-ne també el cabal.

El càlcul es realitzarà a partir del valor experimental del volum dels fums per kg de residus extret de la referència «*Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos*».

$$\dot{m}_{\text{sol } \text{CON}_2\text{H}_4} = \dot{m}_{\text{residus}} \cdot v_{\text{gasos}} \cdot \text{Sol}_{\text{CON}_2\text{H}_4} \quad \text{Eq. (37)}$$

$$\dot{m}_{\text{sol } \text{CON}_2\text{H}_4} = 14200 \left[ \frac{\text{kg}_r}{\text{h}} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}_r} \right] \cdot 413,6 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{\text{kg}_{\text{CON}_2\text{H}_4}}{\text{Nm}^3} \right] = 60,2 \left[ \frac{\text{kg}_{\text{CO}_2\text{H}_4}}{\text{h}} \right]$$

Així doncs, cada hora en què la incineradora estigui funcionant a potència nominal, s'haurà d'introduir 60,2 kg de la solució aquosa d'urea per assegurar que les emissions de  $\text{NO}$  i  $\text{NO}_2$  estiguin per sota de les màximes permesses.

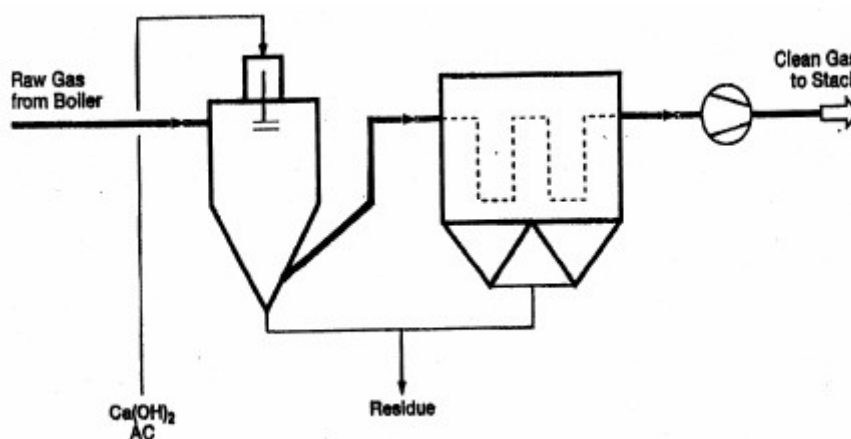
## 2- Procés de reducció de les emissions de $\text{HCl}$ , $\text{HF}$ , $\text{SO}_2$

Existeixen diferents tècniques per reduir els gasos àcids originats en la combustió de residus. La més comú, però és la utilització de reactius alcalins per neutralitzar-los i posteriorment poder-los eliminar.



En el dimensionament de la incineradora s'utilitzarà una solució aquosa de calç ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) la qual a l'entrar en contacte amb els gasos de combustió, s'evaporarà i reaccionarà. D'aquesta manera s'originarà així un producte sec, que posteriorment serà eliminat.

Aquesta reacció es produeix en el reactor ubicat a la sortida de la caldera el qual en la incineradora que s'està dissenyant serà de tipus semisec. L'esquema del funcionament del reactor és el següent.

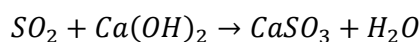
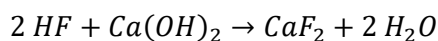
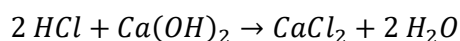


Taula 9.10. Esquema de funcionament d'un reactor semisec (Font: GUZINA S. L.)

Com es pot observar, el gas a la sortida de la caldera entra al reactor on per sobre s'injecta l'hidròxid càlcic. Durant uns 10/15 segons el gas roman a l'interior, mentre es produeix la reacció. Finalment, amb un primer filtratge ja sigui mitjançant un cicló o un precipitador electroestàtic, s'extreuen part dels productes. La resta s'eliminarà abans de la sortida, a través d'un filtre de màniga.

Així doncs, es procedeix a calcular la quantitat d'hidròxid càlcic per tal de reduir les emissions de gasos àcids i així fer que es trobin dins els límits establerts.

a) En primer lloc es presenten les reaccions corresponents:



b) Per determinar la quantitat de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  cal conèixer la quantitat de cada àcid que cal eliminar (El  $\text{SO}_2$  no és pròpiament un àcid, però pot actuar com a tal degut a la parella d'electrons que formen el doble enllaç – Àcid de Lewis) :

- $HCl$  a eliminar  $\rightarrow 1490 \frac{mg}{Nm^3}$
- $HF$  a eliminar  $\rightarrow 14 \frac{mg}{Nm^3}$
- $HCl$  a eliminar  $\rightarrow 700 \frac{mg}{Nm^3}$

c) Aplicant les corresponents masses molars de cada component de les reaccions es pot determinar la massa de  $Ca(OH)_2$  necessària per eliminar 1 kg de cada àcid:

- $1kgHCl \cdot \frac{1 kmol HCl}{36,45 kg HCl} \cdot \frac{1 kmol Ca(OH)_2}{2 kmol HCl} \cdot \frac{74 kg Ca(OH)_2}{1 kmol Ca(OH)_2} = 1,02 kg Ca(OH)_2$
- $1kgHF \cdot \frac{1 kmol HF}{20 kg HF} \cdot \frac{1 kmol Ca(OH)_2}{2 kmol HF} \cdot \frac{74 kg Ca(OH)_2}{1 kmol Ca(OH)_2} = 1,85 kg Ca(OH)_2$
- $1kgSO_2 \cdot \frac{1 kmol SO_2}{64 kg SO_2} \cdot \frac{1 kmol Ca(OH)_2}{1 kmol SO_2} \cdot \frac{74 kg Ca(OH)_2}{1 kmol Ca(OH)_2} = 1,16 kg Ca(OH)_2$

d) D'aquesta manera, multiplicant la massa necessària a neutralitzar per la quantitat d'hidròxid de calci requerit per eliminar 1 kg de cada substància s'obté la massa total de  $Ca(OH)_2$  per metre cúbic normal, és a dir la concentració:

$$\begin{aligned} Conc_{Ca(OH)_2} &= 1490 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{kg_{HCl}}{Nm^3} \right] \cdot 1,02 \left[ \frac{kg_{Ca(OH)_2}}{kg_{HCl}} \right] + 14 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{kg_{HF}}{Nm^3} \right] \\ &\quad \cdot 1,85 \left[ \frac{kg_{Ca(OH)_2}}{kg_{HF}} \right] + 700 \cdot 10^{-6} \left[ \frac{kg_{SO_2}}{Nm^3} \right] \cdot 1,16 \left[ \frac{kg_{Ca(OH)_2}}{kg_{SO_2}} \right] \\ &= 2,36 \left[ \frac{g_{Ca(OH)_2}}{Nm^3} \right] \end{aligned}$$

El valor obtingut s'ha d'ajustar, ja que en la pràctica a la sortida de la caldera, no tot l'hidròxid de calci injectat és capaç de reaccionar amb els àcids, motiu pel qual se n'ha d'introduir un mínim del 60 % en excés.

$$Conc. ajustada Ca(OH)_2 = 2,36 \left[ \frac{g_{Ca(OH)_2}}{Nm^3} \right] \cdot 1,6 = 3,78 \left[ \frac{g_{Ca(OH)_2}}{Nm^3} \right]$$

S'ha de tenir en compte que l'hidròxid s'injecta diluït en aigua en un 50 %:

$$Conc. sol Ca(OH)_2 = \frac{3,78 \left[ \frac{g_{Ca(OH)_2}}{Nm^3} \right]}{0,5} = 7,55 \left[ \frac{g_{Ca(OH)_2}}{Nm^3} \right]$$

e) Un cop determinat la concentració de la solució de  $Ca(OH)_2$ , es pretén trobar també el cabal, tal com s'ha fet anteriorment amb la urea.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{sol Ca(OH)_2} &= \dot{m}_{residus} \cdot v_{gasos} \cdot Sol_{Ca(OH)_2} \\ \dot{m}_{sol Ca(OH)_2} &= 14200 \left[ \frac{kg_r}{h} \right] \cdot 9,8 \left[ \frac{Nm^3}{kg_r} \right] \cdot 7,55 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{kg_{CO_2H_4}}{Nm^3} \right] = 1050,94 \left[ \frac{kg_{CO_2H_4}}{h} \right] \end{aligned}$$

Així doncs, cada hora en què la incineradora estigui funcionant a potència nominal, s'haurà d'introduir 60,2 kg de la solució aquosa d'hidròxid de calci per assegurar que les emissions de de HCl, HF i SO<sub>2</sub> estiguin per sota de les màximes permeses.

### 3- Eliminació de dioxines i furans

Les dioxines i els furans són compostos químics clorats que generalment són contaminants. Es produeixen de manera involuntària a partir de processos tèrmics en els quals hi intervé matèria orgànica i components que contenen clor. Es coneixen 210 tipus diferents de dioxines i furans, tot i que no es té del tot clar els paràmetres que intervenen en la seva formació. Per aquest motiu, dimensionar el seu sistema de reducció en una incineradora com la que s'està dissenyant és força complicat.

El procés generalment utilitzat és el d'introduir carboni actiu C, el qual reacciona amb les dioxines i furans presents en els gasos de combustió, ajudant a capturar-los. D'aquesta manera es formen partícules que generalment queden en suspensió i que són filtrades posteriorment.

Cal comentar que els càlculs per eliminar o reduir les emissions de NO<sub>x</sub>, gasos àcids i dioxines i furans, són aproximats. Això és degut a que els percentatges presents en els fums després de la combustió, tal com s'ha mostrat en la **Taula 9.9** poden variar molt.

És per això que un cop feta l'aproximació dels cabals a injectar d'urea, hidròxid càlcic i carboni actiu, s'hauria de corroborar de manera experimental la seva eficàcia i corregir-ne o ajustar els seus valors.

Finalment, el darrer aspecte a tenir en compte per a la neteja dels gasos, és pròpiament el filtratge. Al llarg dels tres darrers punts, s'ha explicat com neutralitzar, reduir o fer innòcues les substàncies contaminants que es troben en els fums de la combustió. A part però, una vegada acabat aquest procés, els productes de les diferents reaccions s'han d'eliminar, juntament amb altres partícules, sobretot metalls que poden estar suspeses en els fums.

El sistema més utilitzat i alhora més efectiu són els filtres de mànigues. Aquests consisteixen en un conjunt de teixits especialment preparats per fer front als gasos de combustió amb unes mides de forat determinades, per tal de no deixar passar les partícules que es volen eliminar. Els filtres de mànigues però, requereixen de bastant manteniment, ja que s'han d'anar canviant a mesura que els forats queden taponats. És per això que prèviament s'instal·len altres sistemes de filtratge per anar eliminant part d'aquestes partícules augmentant així la vida útil de les mànigues. Els sistemes més utilitzats són:

- Cyclons
- Precipitadors de partícules electrostàtiques
- Absorbidor dels productes generats en la reacció de gasos àcids i l'hidròxid de calci



## 10. Elecció dels elements de la incineradora

Un cop realitzats els càlculs pertinents de tota la planta, tenint en compte els diferents paràmetres referents a la generació de residus, el següent pas és el d'escollir els elements que la conformaran. Així doncs, al llarg d'aquest punt, es trien els diferents components que es trobaran a la incineradora. Hauran de complir amb les característiques i paràmetres detallats anteriorment i alhora procurar que siguin el més econòmic i fiable possibles.

Cal comentar, que en aquest apartat, només s'escullen els equips, de manera que la resta d'infraestructura corresponent a obra civil o instal·lacions, es comptabilitzaran en el següent apartat.

- PALA PNEUMÀTICA + BIGA MÒBIL:

La pala pneumàtica ubicada en una biga mòbil, també coneguda com pont grua, té la finalitat d'introduir a la tremuja els residus provinents del fosso que han de servir com a combustible. Aquest procés el realitzen operaris, que controlen tant la quantitat com la qualitat de residus a introduir. Això és degut a que a vegades la distribució en el fosso no és del tot homogènia i ells han de vetllar perquè dins de les possibilitats, ho sigui al màxim.

El pont grua escollit és de la casa *JASO INDUSTRIAL CRANE* model doble rail, amb una llum de biga d'uns 12m i una capacitat d'agafar uns 1250kg per palada. (La imatge correspon a un model de capacitat superior) [31].



Figura 10.1. Pont grua (Font: Jaso Industrial Crane)

- TREMUJA + SISTEMA D'ALIMENTACIÓ:

La tremuja, no és més que un contenidor d'acer on s'aboquen els residus provinents del fossó, el qual presenta una geometria adequada perquè flueixin fins el fons i un sistema que permet dosificar la seva sortida en funció de les necessitats del forn. Aquest es situa verticalment a sobre del forn i a la seva sortida, enmig d'ambdós elements s'hi troba l'empenyedor pneumàtic. L'empenyedor té la funció d'assegurar que els residus a la sortida de la tremuja entrin al forn i comencin a descendir per la graella permetent la seva combustió.

Pel sistema de tremuja i sistema d'alimentació s'ha escollit el fabricant *IMABE IBERICA*. La fabricació de la tremuja és a mida per la planta dissenyada. No així l'empenyedor que es subministra premuntat i només hi ha que acoblar-lo entre la tremuja i les graelles [32].



**Figura 10.2.** Tremuja i empenyedor (Font: IMABE IBERICA)

- GRAELLA DE COMBUSTIÓ:

La graella és l'element on es du a terme la combustió dels residus. La seva construcció es fa a mida i es subministra en forma de mòdul. Es fa així, ja que en funció de la composició dels residus, la graella haurà de tenir unes característiques o unes altres, permetent l'entrada de més o menys aire a través seu. En la seva part superior és un s'ubica la cambra d'oxidació.

Per la graella de la incineradora que s'està dimensionant es considera que la proveeix el fabricant alemany *STEINMÜLLER* i serà del tipus de rodets. En la següent imatge s'aprecia una graella de combustió sense les parets refractàries durant el manteniment o substitució de la mateixa [33].



Figura 10.3. Graelles (Font: TERSA)

○ CALDERA:

La caldera és l'element on es produeix l'intercanvi de calor entre els gasos de combustió i l'aigua, la qual canvia de fase i es converteix en vapor a alta pressió. De la seva eficiència en depèn l'àrea que es requerirà d'intercanvi, de manera que com millor sigui la caldera, menys àrea es necessitarà. La caldera va precedida de la cambra de postcombustió que ve directament instal·lada en la solució escollida. En aquest cas s'ha optat per una caldera *SIEMENS* model HTSG construïda a mida per la planta de valorització energètica. La solució escollida consisteix en un model predissenyat el qual en funció del projecte se li poden afegir diferents mòduls per aconseguir l'àrea desitjada i per tant l'intercanvi de calor adequat. A més, incorpora una xemeneia de seguretat, per poder evacuar els fums en cas d'emergència [34].



Figura 10.4. Caldera (Font: SIEMENS)

- **CICLÓ I FILTRE ELECTROSTÀTIC:**

El cicló i el filtre electroestàtic són els dos primers elements utilitzats per eliminar les partícules sòlides volàtils que es troben en els gasos de combustió. Tot i que generalment només se n'instal·la un dels dos, el present projecte contempla la possibilitat que s'utilitzin ambdós.

Els elements s'han escollit de la marca *DEFISA* els quals venen muntats de fàbrica i la seva elecció es fa en funció de l'origen dels gasos a filtrar, en aquest cas provinents de la crema de residus, i del seu cabal [35].



**Figura 10.5.** Conjunt de ciclons i filtre electroestàtic (Font: DEFISA)

- **VENTILADOR DE TIR:**

La funció principal del ventilador de tir és la d'impulsar els gasos cap a l'exterior, fent-los passar per la xemeneia. En aquest cas, a l'haver ubicat la incineradora al costat de la planta tèrmica, la xemeneia a través de la qual s'expulsin serà comuna entre ambdues centrals i per tant s'utilitzarà el mateix ventilador.

Això és possible ja que es preveu que la utilització de la incineradora vagi en favor de la substitució d'un motor dièsel . Per tant, el cabal de fums serà similar i es podrà utilitzar el mateix ventilador de tir.



○ **FILTRE DE MÀNIGUES:**

El filtre de mànigues és la darrera barrera abans d'alliberar els gasos a l'atmosfera, mitjançant la qual s'eliminen la majoria de partícules i components que queden als gasos. Originats en gran part gràcies al procés de neutralització produït gràcies a les reaccions de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , urea i carboni actiu introduïts en la fase de combustió i postcombustió.

Els filtres de mànigues són molt eficients i tenen un funcionament força senzill, però per altra banda requereixen d'un gran manteniment. Aquest ve lligat a la substitució de les mànigues, les quals un cop queden taponades fan disminuir la pressió de sortida dels gasos i per tant, han de ser substituïdes.

Per la incineradora que s'està dimensionant s'ha optat per un filtre de mànigues de la mateixa casa que l'electroestàtic i el cicló, *DEFISA*. Aquest es munta a partir de mòduls prefabricats en funció de les necessitats de la planta.



**Figura 10.6.** Filtre de mànigues (Font: DEFISA)

○ **TURBINA + GENERADOR:**

El bloc generador d'electricitat es conforma per la turbina i el generador. A cadascun d'aquests elements es troba una transformació energètica que possibilita l'obtenció d'electricitat a la sortida del generador. Entre ells van acoblats i perquè el seu rendiment sigui òptim, els fabricants recomanen que ambdós siguin de la mateixa marca.

En aquest cas s'han escollit els dos equips de la marca *SIEMENS*, tal i com s'havia fet amb la caldera.

Pel que fa a la turbina, es tracta del model SIEMENS SST – 200. És capaç d’entregar fins a 20 MW i ja està pensada pel funcionament en plantes de valorització energètica [36].



**Figura 10.7.** Turbina SST 200 (Font: SIEMENS)

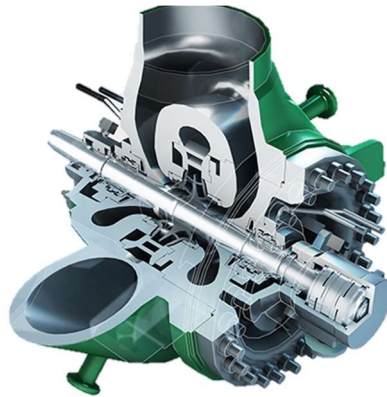
Pel que fa al generador, es tracta del model SIEMENS SIGENTICS M. Es tracta d’una màquina sense escobretes. Té una eficiència del 98,4%, genera l’electricitat a 50 Hz i un rang ampli de tensions en funció del que es requereixi a l’entrada del transformador [37].



**Figura 10.8.** Generador SIGENTCS M (Font: SIEMENS)

○ BOMBA HIDRÀULICA DEL CICLE DE RANKINE:

Un altre element important perquè el cicle de vapor funcioni correctament és la bomba d’impulsió, la qual aporta treball a l’aigua augmentant-ne la seva pressió. Normalment, els fabricants de turbines i generadors també ofereixen la seva pròpia bomba, no obstant no s’ha trobat cap opció de la casa SIEMENS. Per aquest motiu s’ha optat per un model de *GENERAL ELECTRIC*, la qual està pensada directament per plantes generadores d’electricitat amb vapor. Els paràmetres que en determinen el model són el cabal a bombejar (16 kg/s) i el salt de pressió a aportar (102,7 bar) [38].



**Figura 10.9.** Bomba hidràulica per cicles de potència de vapor (Font: General Electric)

○ BESCOBIADOR PER CONDENSACIÓ:

Per l'altre procés que es du a terme en el cicle de Rankine, la condensació, es requereix d'un bescanviador. Per la condensació s'ha escollit un bescanviador de la casa alemanya *UNIVERSAO HYDRAULIK*. En aquest cas, s'utilitza un condensador de tubs, el qual funcionarà mitjançant l'aigua del mar. Degut a la gran quantitat de calor a evacuar i per tant gran cabal d'aigua de mar a bombejar, s'utilitzaran tres unitats del mateix model. Concretament, el SCM-2484 [39].



**Figura 10.10.** Bescanviador, condensador (Font: Universao Hydraulik)



## 11. Estudi de viabilitat econòmica

Com ja s'ha anat comentant al llarg de tot el projecte, un dels punts claus per conèixer la viabilitat de la planta de valorització energètica que s'ha dissenyat és l'aspecte econòmic. Al llarg d'aquest punt s'analitza si seria rendible l'execució de la planta.

Per realitzar l'estudi s'ha procurat trobar preus aproximats als costos i ingressos relacionats directament amb la incineradora. Cal recordar que aquests preus no estan contrastats i de fet, la majoria d'ells no estan oferts directament pel fabricant. Això és degut a que al tractar-se d'un projecte elaborat en l'àmbit educatiu, gran part dels fabricants no han contestat la petició d'oferta realitzada.

És per això que a continuació es troba un estudi de viabilitat no del tot precís i no un pressupost concret, el qual seria necessari en cas que l'estudi fos favorable.

Per l'elaboració d'aquest estudi s'han avaluat dos aspectes; Ingressos i Despeses. D'aquesta manera un cop determinats ambdós, es pot calcular el VAN (Valor Actual Net). Així doncs, amb el valor obtingut, es trobarà el període de retorn, és a dir, el temps que es tardaria en amortitzar la inversió inicial i començar a obtenir beneficis. Si aquest es troba dins d'un rang raonable i dins la vida útil de la planta pot ser viable. De no ser així la inversió serà sempre deficitària i per tant es desaconsellaria.

### 11.1. Costos

Els costos s'han dividit en dos grans tipus. Costos relacionats amb la inversió inicial i els relacionats amb l'operació de la planta.

- Pel que fa als costos relacionats amb la inversió inicial es classifiquen en intangibles i en tangibles. És a dir, aquells que estan relacionats amb la pròpia elaboració del projecte, tràmits administratius i taxes pel la instal·lació de la incineradora. I aquells que fan referència als costos derivats de l'execució de l'obra i l'adquisició i instal·lació de la maquinària.
- Pel que fa als costos d'operació es té en compte totes les despeses derivades del funcionament de la planta. Alhora aquests es podrien dividir en despeses fixes i variables, però degut a la imprecisió dels valors obtinguts i per tal de simplificar la fulla de costos, no s'ha fet aquesta subdivisió. Així doncs, es contemplaran els costos dels operaris, el transport tant de residus com de cendres i el manteniment dels equips.

A continuació, es presenten les dues taules referents als costos, tant d'inversió com d'operació referents a la incineradora.

## Inversió

	<i>Unitats</i>	<i>Preu per u.</i>	<i>Total</i>
<b>Intangibles</b>			
Elaboració del projecte	1	520.000	520.000
Llicència d'obres	1	45.000	45.000
Taxa mediambiental	1	25.000	25.000
<b>TOTAL Intangibles</b>			<b>590.000</b>

## Tangibles

### Obra civil

Moviment de terres	1	22.000	22.000
Fonamentació	1	45.000	45.000
Cimentació i estructura	1	105.000	105.000
Coberta i tancaments	1	95.000	95.000
<b>TOTAL Obra civil</b>			<b>267.000</b>

### Instal·lacions

Elèctrica, Baixa i Mitja tensió	1	130.000	130.000
Automatització i Control	1	75.000	75.000
Contra incendis	1	32.000	32.000
Ventilació	1	65.000	65.000
Climatització	1	12.000	12.000
Sanejament	1	4.400	4.400
<b>TOTAL Instal·lacions</b>			<b>318.400</b>

### Equips

#### Alimentació

Pont grua	1	256.000	256.000
Tremuja	1	25.200	25.200
Empenyedor	1	28.000	28.000
<b>TOTAL Alimentació</b>			<b>309.200</b>

#### Combustió

Graelles	1	980.000	980.000
Cambra de combustió	1	480.000	480.000
Tanc i dispensador d'urea	1	85.400	85.400
Sist. recollida d'escòries i ferralla	1	72.000	72.000
<b>TOTAL Combustió</b>			<b>1.617.400</b>

#### Transferència de calor

Cambra de postcombustió	1	220.000	220.000
Caldera	1	790.000	790.000
<b>TOTAL Transferència de calor</b>			<b>1.010.000</b>

<b>Generació elèctrica</b>				
	Turbina	1	2.100.000	2.100.000
	Generador	1	950.000	950.000
	Transformador	1	90.000	90.000
	<b>TOTAL Generació elèctrica</b>			<b>3.140.000</b>
	<b>Condensador</b>	3	97.000	291.000
<b>Grups de bombeig</b>				
	Bomba hidràulica cicle	2	60.000	120.000
	Bomba hidràulica condensació	4	89.600	358.400
	<b>TOTAL Grups de bombeig</b>			<b>478.400</b>
<b>Neteja de gasos</b>				
	Tanc i dispensador de Ca(OH) <sub>2</sub>	1	134.000	134.000
	Tanc i dispensador de Carboni actiu	1	128.000	128.000
	Cicló	1	65.000	65.000
	Filtre electroestàtic	1	95.000	95.000
	Filtre de mànigues	1	280.000	280.000
	<b>TOTAL Neteja de gasos</b>			<b>702.000</b>
	<b>TOTAL Equips</b>			<b>7.548.000</b>
	<b>TOTAL Tangibles</b>			<b>8.133.400</b>
	<b>TOTAL Inversió</b>			<b>8.723.400</b>

## Costos d'operació anuals

	<i>Unitats</i>	<i>Preu per u. €</i>	<i>Total</i>
<b>Operaris</b>			
Cap de gestió de la planta	1	70.000	70.000
Cap d'operació elèctrica de la planta	2	63.000	126.000
Encarregat de la gestió i el control de la planta	3	56.000	168.000
Tècnic/a de manteniment	8	42.000	336.000
Gruista	4	35.000	140.000
Serveis externalitzats			260.000
<b>TOTAL Operaris</b>			<b>1.100.000</b>
<b>Transport</b>			
Transport de residus	8 diaris	80	292.000
Transport i tractament de cendres	4 diaris	80	73.000
<b>TOTAL Transport</b>			<b>365.000</b>
<b>Consum</b>			
Consum elèctric	1000 MWh	60	60.000
<b>TOTAL Consum</b>			<b>60.000</b>
<b>Manteniment d'equips</b>			<b>500.000</b>
<b>Taxes mediambientals</b>			<b>180.000</b>
<b>TOTAL Costos d'operació anuals</b>			<b>2.205.000</b>



## 11.2. Ingressos

Els ingressos corresponents a l'operació de la incineradora, es poden dividir en dos; Ingressos fixes i Ingressos variables.

Els primers són aquells que independentment de factors externs seran constants al llarg del temps. En aquest cas s'han considerat com a tal la venda d'escòries, ferralles i ceràmics, que al quedar separats de la resta un cop realitzada la combustió, es poden reciclar. Tot i que el preu de venda pot variar, la seva fluctuació és petita i per tant s'ha considerat com a fix.

Per altra banda, els ingressos variables, són aquells els quals poden anar canviant amb el pas del temps. En aquest cas s'ha considerat com a tal la venda d'electricitat a la xarxa. El preu de venda com que depèn del mercat elèctric va fluctuant i hi pot haver bastanta diferència al llarg de la vida útil de la planta.

Per fer una estimació dels possibles ingressos que s'obtindran, que principalment provindran de la venda d'electricitat, s'han consultat els valors mitjans dels darrers anys del mercat. Així doncs, segons els informes anuals del sistema elèctric espanyol, elaborats per REE, s'ha obtingut la següent taula:

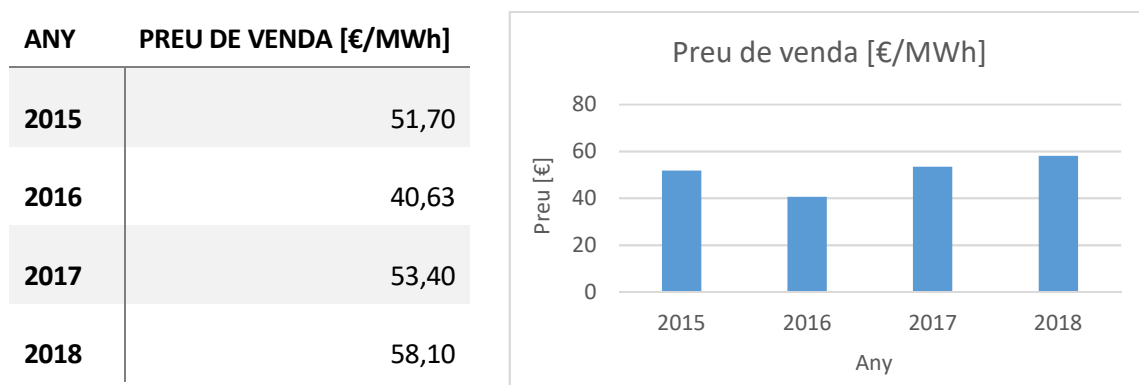


Figura 11.1. Taula i gràfic del preu de venda de l'electricitat (Font: Informes anuals REE)

Tot i que amb la mostra obtinguda sembla que la tendència és alcista, ampliant el número d'anys, es pot comprovar, com es tracta d'un comportament cíclic. De fet, el 2008 el preu de venda d'energia a la xarxa era similar al del 2018. A més, considerant el percentatge de les renovables creixerà en el mix energètic i sabent que el seu cost de generació és inferior al de les fòssils, es suposa que en els propers anys el preu de venda no augmentarà.

Així doncs, tot i saber que es tracta d'un ingrés variable, per simplificar els càlculs, es considerarà que el preu de venda d'energia elèctrica serà constant amb el valor mig dels darrers quatre anys.

## Ingressos anuals

	<i>Unitats</i>	<i>Preu per u.</i>	<i>Total</i>
<b>Fixes</b>			
Venda d'escòries, ferralles i ceràmics	4.028 t	20 €/t	80.554
<b>TOTAL Fixes</b>			<b>80.554</b>
<b>Variables</b>			
Venda d'electricitat	53.240 MWh	50,96 €/MWh	2.712.977
<b>TOTAL Variables</b>			<b>2.712.977</b>
<b>TOTAL Ingressos anuals</b>			<b>2.793.531</b>

Un cop analitzats els costos i els ingressos, es procedeix a calcular els diferents paràmetres esmentats anteriorment per avaluar la viabilitat de la planta de valorització energètica dissenyada.

### 11.3. Viabilitat de la inversió

A continuació es presenta el resum de l'estudi de viabilitat econòmica. A partir de les dades d'inversió, els costos d'operació i els ingressos, s'han calculat diferents paràmetres per tal de determinar si la inversió és recomanable o no.

#### a) VAN: Valor Actual Net

El VAN té en compte els fluxos de caixa i el tipus d'interès, per conèixer en un instant futur el valor d'una inversió. Es calcula amb la següent expressió:

$$VAN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} \quad \text{Eq. (38)}$$

- $I_o$  = Inversió inicial
- $F_t$  = Flux de caixa = Ingressos – Despeses
- $k$  = Tipus d'interès

b) PayBack

El *PayBack* és el temps de retorn de la inversió. És a dir, el moment en què es recupera la inversió inicial i es comencen a obtenir beneficis. Aquest instant coincideix amb el moment en què el VAN és igual a 0.

Així doncs, s'han efectuat tres simulacions en funció del tipus d'interès, partint dels ingressos i costos calculats:

<b>Inversió inicial</b>	8.723.400 €
<b>Cost operació anual</b>	2.205.000 €
<b>Ingressos anuals</b>	2.793.531 €
<b>Moviment de fons</b>	588.531 €

1)  $k = 1 \%$

<b>VAN (15 anys)</b>	-563.386 €
<b>VAN (20 anys)</b>	1.896.967 €
<b>VAN (25 anys)</b>	4.237.910 €

Entre l'any 16 i el 17 el VAN es fa 0 i per tant és el moment en què es recupera la inversió. Concretament, fent la corresponent extrapolació el *PayBack* serà el febrer de l'any 16.

2)  $k = 2 \%$

<b>VAN (15 anys)</b>	-1.161.210 €
<b>VAN (20 anys)</b>	899.925 €
<b>VAN (25 anys)</b>	2.766.759 €

Entre l'any 17 i el 18 el VAN es fa 0 i per tant és el moment en què es recupera la inversió. Concretament, fent la corresponent extrapolació el *PayBack* serà el setembre de l'any 17.

3)  $k = 3 \%$

<b>VAN (15 anys)</b>	-1.697.555 €
<b>VAN (20 anys)</b>	32.455 €
<b>VAN (25 anys)</b>	1.524.777 €

Entre l'any 19 i el 20 el VAN es fa 0 i per tant és el moment en què es recupera la inversió. Concretament, fent la corresponent extrapolació el *PayBack* serà a finals d'octubre de l'any 19.

Com es pot constatar, independentment del tipus d'interès la incineradora serà rendible, ja que com a molt, comptant les diferents suposicions, el període de retorn és inferior als 20 anys, mentre que la vida útil de la instal·lació és de 30 anys.

## 12. Estudi d'impacte mediambiental

En l'apartat anterior, s'ha avaluat la viabilitat econòmica i s'ha conclòs que el projecte seria rendible. No obstant, econòmicament no presenta una millora respecte a la producció d'electricitat a l'illa ni en la gestió de residus. És a dir, pel que fa a l'aspecte monetari, seria més beneficiós continuar gestionant el sistema energètic illenc i el tractament de residus de la manera en què es fa actualment, encara que el projecte proposat sigui viable.

Per tant, és de vital importància realitzar l'estudi d'impacte mediambiental per avaluar si la solució aportada en aquest projecte és sostenible i presenta una millora respecte a la situació actual.

Per realitzar l'estudi, referent a la solució proposada, hi ha tres aspectes a tenir en compte per tal d'analitzar l'impacte mediambiental:

- Emissions: Fa referència a les emissions actuals per generar l'energia elèctrica i les que s'emetrien si s'integrés en el sistema la planta incineradora.
- Territori: Fa referència al consum de territori derivat de l'abocament actual dels residus enfront l'impacte de la planta de valorització.
- Combustibles fòssils: Fa referència al consum de combustibles fòssils utilitzats per a la generació d'energia elèctrica actualment, en contraposició a l'estalvi que suposaria la seva substitució parcial per residus, valoritzables energèticament.

### 12.1. Emissions

La construcció i la posta en marxa de la planta d'incineració de residus amb una potència nominal de 16 MW i una màxima de 20 MW, compliria la funció dels motors dièsel actuals. És a dir, passaria a ser juntament amb ells les unitats de generació elèctrica amb major prioritat a l'hora d'entrar en funcionament i es procuraria que la seva producció fos el més constant possible.

Així doncs, es substituiria un motor dièsel de 15,8 MW per la incineradora de 16 MW. D'aquesta manera per avaluar l'impacte referent a les emissions, s'haurien de comparar les emeses per un motor i les de la incineradora.

Per fer la comparativa s'han utilitzat valors publicats per REE d'emissions dels motors dièsel respecte a les tones equivalents de CO<sub>2</sub> emeses per hora. Sempre tenint en compte que aquesta depèn de la potència a la que han funcionat. El valor aproximat d'emissions, operant a una potència propera a la nominal és de  $0,6714 \frac{tCO_2}{MWh}$ .

Pel que fa al valor d'emissions de CO<sub>2</sub> de la incineradora s'ha agafat del document *MTD Incineración de Residuos*, segons el qual es troba entre el 5% i el 10% del volum de gasos emesos a l'atmosfera. Així doncs, es procedeix a calcular a què equival, tenint en compte les dades disponibles:

$$Emissions \text{ a Potència Nominal} = \frac{7,5 \text{ kgCO}_2}{100 \text{ kg}_{gasos}} \cdot 40 \frac{\text{kg}_{gasos}}{s} \cdot 3600 \frac{s}{h} = 10800 \frac{\text{kgCO}_2}{h} \quad \text{Eq. (39)}$$

A continuació, es calculen les emissions per MWh generat.

$$Emissions = \frac{10,80 \text{ tCO}_2/h}{16 \text{ MW}} = 0,6750 \frac{\text{tCO}_2}{\text{MWh}}$$

Així doncs, a priori augmentarien lleugerament les emissions de CO<sub>2</sub>. Concretament la diferència entre ambdós valors per l'energia total generada.

$$Increment \text{ anual emissions (7,5\%)} = (0,6750 - 0,6714) \frac{\text{tCO}_2}{\text{MWh}} \cdot 53240 \frac{\text{MWh}}{\text{any}} = 191,7 \frac{\text{tCO}_2}{\text{any}}$$

Per fer el càlcul s'ha utilitzat el valor mig del rang trobat a la referència. A continuació es presenten els resultats que s'obtidrien en els casos més extrems.

$$Increment \text{ anual emissions (10\%)} = 12.170,7 \frac{\text{tCO}_2}{\text{any}}$$

$$Increment \text{ anual emissions (5\%)} = -11.787,3 \frac{\text{tCO}_2}{\text{any}}$$

Com es pot observar, per tant, si es pren el valor de 7,5 % s'aprecia un petit increment en quant a les emissions de CO<sub>2</sub>. Aquest, però, s'hauria d'estudiar amb més detall a partir de valors experimentals, ja que el rang de percentatge d'emissions agafat és força ampli i per tant poc precís. No obstant, el que es pot determinar a partir d'aquests resultats és que en cap cas no hi haurà un gran estalvi ni un gran increment d'emissions.

Per altra banda, més enllà de les emissions d'efecte hivernacle hi ha les tòxiques, és a dir, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, dioxines, HCl etc. Degut a la manca de dades publicades per Endesa, propietària de la central de generació elèctrica, referents a aquestes emissions, no ha estat possible fer la comparativa. Tot i així, sense quantificar quina seria la disminució d'emissions, sí que es pot afirmar que hi hauria una reducció, com diferents estudis consultats corroboren.

## 12.2. Territori

L'aspecte més avantatjós de la instal·lació de la planta de tractament de residus és l'estalvi en el consum de territori. Això és degut a que es passa de depositar els residus generats a Menorca en un abocador controlat a incinerar-los reduint-ne així més d'un 85% de la massa original.

El 15% restant, no obstant, no es deposita directament a l'abocador, sinó que es pot classificar en diferents subproductes alhora materialment aprofitables. Aquests són: Cendres, Ferralla, Materials ceràmics i Escòries.

D'aquests quatre subproductes, només passen a l'abocador les cendres, les quals no representen més del 7 % de la massa de residus original introduïda a la planta. A més, les cendres, un cop tractades són més denses que el RSU, això implica que el volum que aquestes ocuparan serà inferior al 7 % equivalent als residus. Així doncs, anualment es passaria de depositar en l'abocador 50.346 t de residus a únicament depositar-ne 3.524 t. El que equival a una reducció de 46822 t.

El següent pas per avaluar l'estalvi en consum de territori és convertir la massa de residu enterrat, en superfície. Per fer-ho, s'utilitza el nou projecte de la planta de tractament de residus i abocadors, el qual s'està executant. El nou abocador té una superfície d'unes 6 ha i una vida útil de 20 anys. Fent un simple factor de conversió, s'estima que cada any es consumeixen 0,3 ha per abocar-hi residus. Si la incineradora entrés en funcionament, anualment només se'n consumirien uns 200 m<sup>2</sup>. Vist des d'una altra perspectiva, la vida útil de l'abocador s'allargaria fins els 300 anys de vida.

Per altra banda, cal tenir en compte el consum de territori derivat de la construcció de la planta de valorització energètica. Aquesta requeriria d'una superfície aproximada d'uns 2000 m<sup>2</sup> els quals inclouen la part corresponent a la nau que albergaria la planta (1500 m<sup>2</sup>) i un moll de càrrega i descàrrega amb capacitat de maniobra pels camions (500 m<sup>2</sup>).

Així doncs, es pot concloure que l'estalvi en quant a territori seria enorme. De fet, l'amortització dels 2000 m<sup>2</sup> requerits per la planta, es realitzaria el primer any un cop la incineradora hagués entrat en funcionament, obtenint-ne inclús un estalvi de 800 m<sup>2</sup>.

### 12.3. Combustibles fòssils

Finalment, el darrer aspecte a tractar referent a l'impacte mediambiental és l'estalvi de combustibles fòssils. Aquest estalvi ve produït per la substitució del motor dièsel per la planta incineradora. Per tant, es substitueix l'ús de fueloil per residus.

Conèixer amb exactitud el consum d'aquests motors no ha estat possible, ja que les dades no es troben disponibles, no obstant s'ha fet una aproximació de manera simplificada. Per una banda s'ha estimat el rendiment del motor i a partir del PCI del combustible i l'energia que s'hauria d'haver generat de no ser per l'existència de la incineradora, es calcula el consum de fueloil anual.

$$E = PCI \cdot m \cdot \eta \quad \text{Eq. (40)}$$

Així doncs, suposant un rendiment del 30 % i un PCI del fueloil de 11,08 kWh/kg:

$$m = \frac{E}{PCI \cdot \eta} = \frac{53,24 \cdot 10^6 \frac{kWh}{any}}{11,08 \frac{kWh}{kg} \cdot 0,3} = 16,02 \cdot 10^6 \frac{kg_{fueloil}}{any} = 16.020 \frac{t_{fueloil}}{any}$$

Per tant, es pot concloure que la introducció de la incineradora dins el mix energètic del sistema elèctric menorquí, en substitució d'un motor dièsel, suposaria un estalvi anual de 16.000 t de fueloil.



## Conclusions

El model econòmic i social en què vivim a dia d'avui, cada cop més globalitzat i basat en el consumisme, ha topat amb les limitacions del planeta. Així doncs, com a societat ens enfrontem a nous desafiaments amb els quals no ens havíem trobat mai. La manca de matèria prima, els efectes del canvi climàtic i la contaminació dels ecosistemes són alguns exemples dels reptes als quals hem de posar solució. Sens dubte el pas cap a una economia circular on els residus esdevinguin recursos reduint així l'impacte en el planeta Terra és cabdal. No obstant, aquest procés és lent i mai arribarà a ser perfecte. Així doncs, també cal pensar en com gestionar els residus que es generen per avançar cap a un model cada vegada més just i sostenible.

Aquest projecte s'ha centrat en Menorca i partia amb l'objectiu d'analitzar el model de gestió de residus i proposar una millora, centrada en la valorització dels mateixos. El model actual és clarament ineficient, ja que devers el 80 % dels residus generats, unes 50.000 tones anuals, corresponents a la fracció resta i orgànic acaben a un abocador. Això implica que el reciclatge és deficient, ja que gran part de la fracció resta podria recuperar-se materialment. I que el tractament i gestió de residus que s'efectua és ineficaç, ja que no permet aprofitar ni el material ni l'energia disponible en el residu. Pel que fa al segon punt, des de l'administració s'està intentant millorar la gestió, amb la incorporació d'una nova planta de tractament de residus que permeti incrementar el reciclatge mitjançant la selecció de materials aprofitables de la fracció resta. No obstant, pel que fa a la gestió de la part no aprofitable, es segueix contemplant la seva deposició en l'abocador de Milà.

Per altra banda, també s'ha estudiat la generació d'energia elèctrica de l'illa. Aquesta presenta diferents peculiaritats a tenir en compte. La primera, que es tracta d'un sistema aïllat, ja que es troba a una illa i el cable submarí que la comunica amb Mallorca es troba fora de servei. I la segona, que el 96 % de la generació prové de recursos fòssils, derivats del petroli els quals converteixen la central de Menorca en la més contaminant del sistema espanyol, tenint en compte que es tracta d'un territori catalogat com a Reserva de la Biosfera des del 1993.

Davant aquesta situació s'han analitzat les diferents tecnologies existents al mercat per aprofitar els residus energètics les quals es poden dividir en tres tipologies. En primer lloc, les basades en el tractament tèrmic; Incineració, Gasificació, Piròlisi i Gasificació per plasma. En segon lloc, les basades en un tractament biològic; Digestió anaeròbica i Digestió aeròbica; En tercer lloc, les basades en l'elaboració de combustibles a partir de residus. De l'anàlisi de totes elles s'ha determinat que les més adequades per a la implementació a Menorca serien la tecnologia d'incineració i la de biodigestió anaeròbica. Això és degut al desenvolupament de les tecnologies, al cost monetari d'unitat energètica disponible per unitat màssica de residu tractat i per l'impacte mediambiental de cadascuna d'elles.

Al llarg del projecte s'ha optat per explorar la viabilitat de la instal·lació d'una planta de valorització energètica basada en la incineració. Així doncs, s'ha dimensionat una planta basada en aquesta tecnologia, sense descartar la possible implementació d'un biodigestor, tot i que aquesta via no s'ha explorat en el present document.

El primer aspecte a l'hora de dissenyar la incineradora és ubicar-la geogràficament. Des d'un principi s'han contemplat dues possibilitats, ambdues explorades per altres centrals ja construïdes en l'actualitat (Son Reus, Mallorca i Besós, Barcelona). La primera és la d'ubicar-la al costat de la planta de tractament de residus, evitant així el transport dels mateixos. Aquesta opció però, presenta un inconvenient que és la condensació del vapor, ja que s'hauria d'efectuar mitjançant aire a través de grans ventiladors, fet que implica un gran cost energètic. La segona, consisteix en ubicar-la al costat de l'actual central tèrmica, fet que implica un cost energètic i econòmic degut al transport dels residus, però que facilita el procés de condensació, ja que s'efectuaria amb aigua de mar, podent aprofitar les instal·lacions de la central tèrmica, ja construïdes. Un cop avaluades ambdues possibilitats, s'ha optat per la segona.

Escollida la ubicació, el primer que s'ha fet és calcular dos paràmetres fonamentals per tal de conèixer quin podrà ser el seu potencial a l'hora d'integrar-se dins el mix energètic illenc. Aquests dos paràmetres són, per una banda el poder calorífic dels residus a disponibles (4,23 kWh/kg) i a partir d'aquí l'energia disponible, al voltant de 50 GWh/any.

A partir de l'energia disponible, el següent repte era establir una estratègia de funcionament de la planta. S'han estudiat dues possibilitats. La primera, produir electricitat de manera constant al llarg de tot l'any. La segona, engegar i aturar la incineradora cada dia per tal de poder generar més electricitat, sobretot en les hores pic. Analitzats els dos models proposats, s'ha escollit el segon, ja que tot i tenir associats costos extra d'engegada i aturada, permet durant el dia la substitució completa d'un motor dièsel, fet que no passava amb el primer model. A més, a l'estar generant durant les hores pic, representa un major benefici econòmic al tractar-se de les hores a les que el preu de l'electricitat és més elevat. Així doncs, s'ha dimensionat una incineradora de potència nominal de 15 MW.

A continuació, s'han calculat els diferents paràmetres necessaris per a la combustió, com són els cabals d'aire, tenint en compte la humitat, i combustible. Seguidament, s'han determinat els diferents paràmetres que defineixen el cicle de potència. En aquest cas, es tracta d'un cicle de vapor amb reescalfament. D'aquests càlculs s'ha obtingut diferents valors teòrics necessaris, per poder escollir els diferents components que conformen el cicle. En primer lloc, s'ha trobat la superfície de bescanvi necessària de la caldera, seguit dels valors reals de potència de la planta 16 MW i de la seva eficiència 31,6 %. Finalment, s'ha calculat la superfície de bescanvi del condensador així com el cabal d'aigua de mar requerit.

El següent pas, fonamental per assegurar el correcte funcionament i la sostenibilitat del projecte, ha estat analitzar la composició dels gasos de combustió i la seva neteja per poder ser alliberats a l'atmosfera, complint la normativa vigent. S'han trobat tres grans grups de gasos tòxics i molècules a neutralitzar abans de ser filtrats, juntament amb les partícules suspeses en els fums.

En primer lloc, s'han estudiat els  $\text{NO}_x$ . Per reduir-ne la seva formació es fixa la temperatura màxima de combustió en  $950\text{ }^\circ\text{C}$  i per la seva neutralització s'injecta una solució aquosa d'urea, la qual al reaccionar, forma aigua i nitrogen, eliminant així la toxicitat dels òxids de nitrogen.

En segon lloc, s'han estudiat els gasos àcids ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{SO}_2$ ). En aquest cas, per la seva neutralització s'utilitza una solució aquosa d'hidròxid de calci, la qual al reaccionar forma diferents partícules les quals posteriorment poden ser filtrades. D'aquesta manera s'evita així, la seva emissió a l'atmosfera.

Finalment, es contempla la injecció de carboni actiu per tal que reaccionï amb les dioxines i furans originats en la combustió i que són tòxics.

Finalment, un cop fetes les diferents reaccions químiques produïdes gràcies a la incorporació dels diferents reactius, es preveu la incorporació de tres equips de filtratge per tal d'assegurar que els gasos que s'emeten a l'atmosfera es troben el màxim de nets. En primer lloc, es troba un cicló, seguit d'un filtre electroestàtic i finalment s'instal·la el filtre de mànigues, el qual és el més efectiu però que alhora requereix de més manteniment.

Acabats els càlculs pel disseny de la planta i escollits els equips que la conformaran, s'han elaborat els dos estudis claus per valorar-ne la viabilitat de la incineradora. L'estudi de viabilitat econòmica i l'estudi d'impacte mediambiental.

L'estudi de viabilitat econòmica es basa en l'anàlisi de costos i ingressos per determinar-ne si serà rendible la inversió. En aquest cas, al tractar-se d'un projecte realitzat en l'àmbit educatiu, no ha estat possible obtenir ofertes dels proveïdors dels equips, fet pel qual el cost és estimat i per tant podria variar en el cas que es portés a terme. Pel que fa a la inversió inicial, el cost de la infraestructura, instal·lacions i equips es trobaria al voltant dels 8,7 milions d'euros. Per altra banda, s'han analitzat els costos d'operació anuals derivats del manteniment i dels operaris, entre d'altres. Aquest es situa entorn als 2,2 milions d'euros anuals. Finalment, s'han calculat els ingressos originats pràcticament en la seva totalitat de la venda d'electricitat a la xarxa. Tot i que es tracta d'uns ingressos difícils de preveure, per la fluctuació del preu del mercat. No obstant, analitzant els preus dels darrers anys s'ha estimat que els ingressos anuals rondarien els 2,8 milions. Així doncs, a partir d'aquí s'han determinat diferents paràmetres que permeten conèixer si la inversió és viable o no. El més destacat és el període de retorn. Aquest, en funció del tipus d'interès, es troba entre els 16 i els 20 anys.

Així doncs, tenint en compte que la vida útil de la planta és de 30 anys i l'amortització es du a terme abans de l'any 20, pel que fa a l'estudi econòmic, es recomanaria la instal·lació de la incineradora.

L'estudi d'impacte mediambiental té a veure amb la integració de la nova planta amb el medi natural. És a dir, com afecta la construcció i operació de la incineradora a l'entorn. Per fer-lo s'han avaluat tres aspectes diferents i s'han comparat amb la situació actual; Emissions, Territori i Combustibles Fòssils.

Pel que fa a les emissions, es distingeix entre emissions d'efecte hivernacle i emissions tòxiques. Les primeres fan referència principalment al diòxid de carboni. En aquest cas s'han comparat les dades teòriques de CO<sub>2</sub> que es pressuposen que poden ser emeses per la incineradora amb les que emet un motor dièsel, el qual seria substituït. Els resultats estimen que les emissions d'efecte hivernacle serien més o menys les mateixes per la incineradora que pel motor dièsel. En funció dels valors del rang teòric escollit, poden ser lleugerament superiors o lleugerament inferiors. Les segones fan referència a dioxines, gasos àcids, monòxid de carboni, òxids de nitrogen o altres components emesos, els quals són tòxics. En aquest cas ha estat impossible fer la comparativa, ja que l'operador de la central no informa d'aquestes emissions. No obstant, segons la informació consultada, en quant a emissions tòxiques la instal·lació de la incineradora suposaria una disminució, comparat amb el motor dièsel substituït de la central tèrmica actual.

El consum de territori és un altre aspecte important a tenir en compte, més quan es tracta d'una illa, la qual té una superfície clarament limitada. I és amb aquest aspecte en el que la construcció i entrada en funcionament de la incineradora implicaria un major estalvi. Això és degut a que de les aproximades 50.000 tones anuals depositades anualment a l'abocador, es passaria a un total de 3.500 tones, una disminució del 93 %. Només passarien a enterrar-se les cendres, mentre que altres productes de la combustió de residus, com la ferralla, materials ceràmics o escòries, es podrien reaprofitar. D'aquesta manera, en quant a territori, durant els 30 anys de vida útil de la incineradora, s'aconseguiria estalviar 8,2 ha destinades a l'abocament de residus, l'equivalent al 0,01% del total de la superfície de l'illa.

L'altre aspecte a valorar és l'estalvi de combustibles fòssils. En aquest cas, al substituir el fueloil pels residus completament, l'estalvi és el total del consumit per un motor al llarg d'un any sencer. Aproximadament, 16.000 tones de fueloil en un any. Aquest fet, és força important, ja que redueix la dependència energètica de l'illa i a més, suposa també un estalvi monetari per l'economia de l'illa.

Així doncs, un cop analitzats els diferents estudis de viabilitat, es pot concloure que la construcció i integració a la xarxa de la incineradora seria factible, tant econòmicament com mediambientalment. Cal tenir en ment però que no és la única solució a la problemàtica de la gestió de residus. Per tant, abans de tirar endavant el projecte, s'haurien de valorar diferents opcions com la del tractament biològic mitjançant digestors anaeròbics. Per altra banda, cal recordar que la valorització energètica es tracta del darrer pas a realitzar a l'hora de gestionar un residu. Per tant, no per tal d'optimitzar la planta

o per maximitzar-ne els seus beneficis econòmics s'hauria de trencar l'ordre de prioritats en la gestió. És aquí per tant, on resideix un dels perills de la construcció d'una planta d'aquests tipus. Independentment de la rendibilitat de la incineradora s'ha de procurar seguir cap un model basat en l'economia circular. En el qual, els productes ja es dissenyin pensant en el seu reaprofitament, un cop acabada la seva vida útil. On els usuaris, tinguin la consciència i l'hàbit de reutilitzar-los tants cops com sigui possible i que un cop deixi de ser útil, es recicli aprofitant-ne els seus materials. I que només en el cas que aquests no es puguin tornar a utilitzar, entri en joc la valorització energètica dels mateixos. La qual permeti obtenir energia útil, capaç de seguir fer rodar la roda, a partir d'allò que ja no tenia cap utilitat. Només prenent consciència de la situació actual del planeta i actuant en conseqüència es podrà avançar cap a una societat més sostenible i alhora més justa.



## Pressupost

A continuació es presenta el pressupost referent a l'elaboració del present projecte. Per la seva elaboració s'han diferenciat dues tipologies de costos: Directes i Indirectes. Els primers fan referència directe al cost associat a les hores treballades. Els segons fan referència a despeses derivades de l'elaboració del projecte.

### Costos directes

El projecte es va registrar el 8/02/2019 i es va començar a elaborar a partir de dia 18/02/2019. A partir de llavors, s'ha estat treballant en ell de dilluns a divendres una mitja de dues hores i mitja per dia fins el Juny. A partir de llavors, i fins la seva finalització dia 2/10/2019, s'ha treballat una mitja de tres hores i mitja diàries entre setmana.

<b>Data d'inici</b>	18/02/2019
<b>Data de finalització</b>	02/10/2019
<b>Dies treballats</b>	162 dies
<b>Hores treballades</b>	473 hores

El preu per hora és de 20 €/h. Així doncs, el **cost directe** total és de **9.460,00 €**.

El preu es justifica amb el sou que pot tenir un enginyer projectista junior, tenint en compte totes les despeses que de la seva feina se'n deriven: Seguros de responsabilitat, quota de col·legiat etc. I tenint en compte la retenció d'IRPF que com treballador donat d'alta a la seguretat social ha de tributar, que és del voltant del 15 %.

### Costos indirectes

Els costos indirectes són despeses derivades de l'elaboració del projecte. Aquests generalment són difícils de calcular completament, tot i així se'n fa una aproximació.

<b>Material d'oficina</b>	20,00 €
<b>Consum elèctric</b>	50,00 €
<b>Amortització d'equipament informàtic</b>	100,00 €
<b>Desplaçaments</b>	120,00 €
<b>Varis</b>	50,00 €

El preu referent als **costos indirectes** és de **340 €**.

Com es pot observar en la taula, les partides amb un cost més destacat són les de consum elèctric, amortització d'equipament informàtic i desplaçaments.

- El consum elèctric es justifica comptabilitzant cada hora de funcionament amb un gasto energètic de 210 W (Consum de l'ordinador) i 25 W (Il·luminació), que tenint en compte la tarifa contractada, dona un cost aproximat de 50 €.
- L'amortització de l'equipament informàtic contempla el valor del hardware i software utilitzat (950 €) amb una vida útil de 6 anys. Per tant, suposant una amortització constant de 13 € al mes i tenint en compte que l'elaboració del projecte ha estat de 8 mesos, en resulta un cost total de 104 €. Aproximadament 100 €.
- Finalment, el cost referent a desplaçaments fa referència a un viatge Barcelona – Maó, Maó – Barcelona (120 €). Aquest tenia la finalitat d'anar a visitar la planta de tractament de residus des Milà, la central elèctrica d'Endesa i realitzar les reunions amb la directora insular de Menorca Reserva de la Biosfera, Irene Estaun i el col·lectiu ecologista el GOB.

El cost total de l'elaboració del projecte, per tant, ha estat de **NOU MIL VUIT-CENTS EUROS, 9.800 €**.

Tenint en compte l'aplicació de l'impost del valor afegit IVA, del 21% el preu de venda del projecte és de **ONZE MIL VUIT-CENTS CINQUANTA-VUIT EUROS, 11.858 €**.

El pressupost data del 03 – 10 – 2019 i té un període de validesa de tres mesos

Signat,

Robert Juanico Juanico



## Bibliografia

- [1] Xavi Camps; Jesús Cardona; Marc Pons; , “La primera transició energètica de Menorca Diagnosi del sistema energètic,” p. 97, 2018.
- [2] Consorci de residus de Menorca, “Memoria 2013,” *Consorci residus i Energ. Menorca*, p. 36, 2013.
- [3] Consorci de residus de Menorca, “Memoria 2014,” *Consorci residus i Energ. Menorca*, p. 61, 2014.
- [4] Consorci de residus de Menorca, “Memoria 2015,” *Consorci residus i Energ. Menorca*, p. 84, 2015.
- [5] Consorci de residus de Menorca, “Memoria 2016,” *Consorci residus i Energ. Menorca*, p. 74, 2016.
- [6] Consorci de residus de Menorca, “Memoria 2017,” *Consorci residus i Energ. Menorca*, p. 29, 2017.
- [7] C. de R. de Menorca, “Consorci de Residus Sòlids Urbans - Consell Insular de Menorca.” [Online]. Available: <http://cremenorca.org/portal.aspx>. [Accessed: 03-Oct-2019].
- [8] D. O. F. Philosophy, C. E. Thesis, E. P. Ferrer, P. C. Barcelona, R. Tecnol, and C. Engineering, “EFFECTS OF LONG - TERM FOREST FIRE RETARDANTS ON FIRE INTENSITY , HEAT OF COMBUSTION OF THE FUEL AND FLAME EMISSIVITY,” no. September 2009.
- [9] Ferrovial, “Noves instal·lacions a la planta de tractament de residus de Milà - YouTube.” [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=o1-JKM3bHoA>. [Accessed: 03-Oct-2019].
- [10] REE, “Demanda de energía eléctrica en tiempo real, estructura de generación y emisiones de CO2.” [Online]. Available: <https://demanda.ree.es/visiona/baleares/menorca/total>. [Accessed: 03-Oct-2019].
- [11] I. V. P. Físicas and B. D. L. Rsu, “Gestión de RSU Propiedades 16,” pp. 15–26.
- [12] A. G. O. Farré, “SITUACIÓN Y POTENCIAL DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DIRECTA DE RESIDUOS,” *IDAE*, p. 136, 2011.
- [13] D. Oficial, P. Europeo, L. Directiva, L. Directiva, P. Europeo, and P. Europeo, “DECISIÓN UE 18.12.2014. Modificación Lista Eu Residuos,” vol. 7, pp. 44–86, 2014.
- [14] P. E. Y. Consejo, ; “rect. DOL , núm. 42, [pág. 43]. (castellano) ;DOL , núm. 21, [pág. 22]. (castellano),” pp. 1–42, 2019.
- [15] P. Expositiva, P. Final, A. Ii, and A. Iii, “PARLAMENTO EUROPEO Y CONSEJO,” pp. 1–21, 2019.

- [16] D. E. Agricultura and M. Ambiente, "GESTIÓN DE RESIDUOS ( PEMAR )," pp. 2016–2022, 2016.
- [17] J. D. E. L. Estado, "RESIDUOS. Residuos y suelos contaminados. JEFATURA DEL ESTADO BOE 29 julio 2011, núm. 181, [pág. 85650].," pp. 1–62, 2019.
- [18] D. E. Agricultura and Y. M. Ambiente, "Programa\_de\_prevençion\_aprobado\_actualizado\_ANFABRA\_11\_02\_2014\_tcm7-310254," 2013.
- [19] GOIB, "Avantprojecte de la llei de residus i sòls contaminats de les Illes Balears," *GOIB*, pp. 1–87.
- [20] GOIB, "PROJECTE DE LLEI DE RESIDUS I SÒLS CONTAMINATS DE LES ILLES BALEARS," *Cons. Medi Ambient. Agric. i Pesca*, p. 26.
- [21] J. Pantoja *et al.*, "Menorca," 2006.
- [22] TERSA, "TERSA - Planta de Valorización Energética | Tersa." [Online]. Available: [http://www.terse.cat/es/planta-de-valorización-energética\\_2172](http://www.terse.cat/es/planta-de-valorización-energética_2172). [Accessed: 03-Oct-2019].
- [23] ECA, "Estudi de la composició de residus municipals de Catalunya," 2014.
- [24] I. J. D. D. De Cais, "CAI de Microanálisis Elemental ! Universidad Complutense !," pp. 1–18, 2016.
- [25] "Clima i temperatures de Menorca – Illes Balears." [Online]. Available: <http://ibalears.com/ca/blog/menorca-ca/clima-i-temperatures-de-menorca/>. [Accessed: 03-Oct-2019].
- [26] J. Grau, "Generació."
- [27] J. Grau, "Tema 5. Cicles de Potència de Vapor," pp. 1–31, 2017.
- [28] Michael Moran; Howard Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 5th ed. 2006.
- [29] C. D. E. Publicaciones, *para Incineración de Residuos*. .
- [30] S. L. Guzina, "Master En Ingenieria Y Gestion Mediaambiental Migma 2007 / 2008," 2008.
- [31] JASO Industrial Cranes, "Grúa birraíl - JASO Industrial Cranes." [Online]. Available: <https://jasoindustrial.com/es-es/gruas-industriales/birraíl/>. [Accessed: 03-Oct-2019].
- [32] I. Ibérica, "Imabe Ibérica · Fabricante de maquinaria de recuperación de residuos." [Online]. Available: <https://www.imabeiberica.com/es/>. [Accessed: 03-Oct-2019].
- [33] S. Engineering, "Steinmüller Engineering - Home." [Online]. Available: <http://www.steinmueller.com/en/>. [Accessed: 03-Oct-2019].
- [34] "SIEMENS." .
- [35] "Inicio." [Online]. Available: <http://www.defisa.es/>. [Accessed: 03-Oct-2019].

- [36] Siemens AG, "Efficiency : More value to your facility Steam turbines from 1 MW," pp. 1–45, 2017.
- [37] Siemens, "The swift, reliable, and efficient solution SIGENTICS industrial generators for maximum power yield."
- [38] GE, "Power Plant Pumps | GE Steam Power." [Online]. Available: <https://www.ge.com/power/steam/pumps>. [Accessed: 03-Oct-2019].
- [39] U. Hydraulik, "Hydraulic systems, cooling systems, and heat exchangers / Universal Hydraulik GmbH." [Online]. Available: <https://universalhydraulik.com/>. [Accessed: 03-Oct-2019].



