

## Capítol 4. COMBUSTIBLES DERIVATS DELS RESIDUS A EUROPA

### 4.1 ASPECTES GENERALS

Els països de parla anglesa solen utilitzar el terme "Refuse Derived Fuel" (RDF) o "Solid Recovered Fuel" (SRF) per referir-se a la fracció segregada d'alt poder calorífic procedent del residu tractat. A Espanya, s'utilitza el terme Combustible Derivat dels Residus (CDR) o Combustible Sòlid Recuperat (CSR). No existeix una definició formal uniforme per a tots els països de la Unió Europea.

Els CDR cobreixen un ampli rang de materials residuals, amb un elevat contingut calorífic, i inclouen els residus procedents del rebuig del reciclatge i tractament dels residus municipals i de les seves fraccions, els llots d'estacions depuradores d'aigües residuals, els residus de biomassa i els residus industrials (vehICLES fora d'ús, neumàtics fora d'ús, olis usats, plàstics, tèxtils, paper, fusta, serradures, farines i greixos animals o altres). Poden estar formats per una gran varietat de materials, dels quals alguns podrien ser reciclats però que es troben de tal forma que el reciclatge no és l'opció més adequada. [EMA09]

S'han de valoritzar energèticament únicament els residus que no s'hagin pogut evitar i que no es puguin reutilitzar ni reciclar. En aquest cas no s'aprofiten els materials que componen els residus sinó l'energia que contenen. No tot aprofitament energètic es considera valorització energètica, el poder calorífic del residu ha de ser elevat i s'ha de recuperar mitjançant un procés d'alta eficiència energètica. Normalment són residus de PCI superior o igual a 3.000 kcal/kg, amb una humitat inferior al 15% de baix contingut en metalls clor. [CIEM09],[ELOR09]

Aquests residus són sotmesos a tractaments, normalment separació mecànica i trituració, per tal d'obtenir un producte de propietats estables i alt poder calorífic que compleixi amb unes característiques de qualitat que puguin ser certificades per les instal·lacions productores ja que la valorització requereix fluxos homogenis de combustible.

Es poden utilitzar com combustible alternatiu o en substitució dels combustibles fòssils tradicionals en diferents sectors per a la producció de calor i/o energia elèctrica. Cal assenyalar que l'experiència europea en la utilització de combustibles derivats de residus és relativament alta en cimenteres i molt més reduïda en altres sectors. [EMA09]

Els factors que defineixen el procés de fabricació de CDR són: el tipus de flux residual i la qualitat demandada per l'usuari final en funció de la tecnologia tèrmica (condicions de combustió del procés, emissions atmosfèriques i qualitat dels subproductes de combustió).

Per materialitzar tot el potencial dels CDR s'han d'establir els contactes entre les Administracions Públiques competents, els responsables de la gestió dels residus a utilitzar i les plantes industrials on s'utilitzaran per planificar les infraestructures necessàries per a la fabricació i preparació dels CDR. [ALON09], [RELE09]

### 4.2 MOTIVACIONS PER PROMOUR L'ÚS

La preparació i la utilització de CDR augmenta el grau de valorització dels residus contribuint a complir amb els objectius de les noves normatives europees. [ISR08b]

Amb aquesta pràctica a més de l'aprofitament energètic del residu, s'afavoreix la reincorporació dels materials reciclables i reutilitzables al procés productiu, ja que per preparar els CDR s'han de separar aquestes fraccions.

És una bona alternativa a la disposició final, ja que l'abocament és l'opció menys favorable respecte a l'impacte ambiental i al l'ús eficient dels recursos, no obtenint-ne cap benefici de l'eliminació. [PIZA09]

La substitució de combustibles fòssils per CDR disminueix l'explotació dels recursos naturals i suposa un tractament dels residus, aprofitant al màxim l'energia sense generar impactes afegits sobre l'entorn i estalviant emissions de gasos d'efecte hivernacle. A més, contribueix a l'increment de la utilització d'energies renovables pròpies i redueix el grau de dependència d'energia exterior. [AVG10], [SPR09]

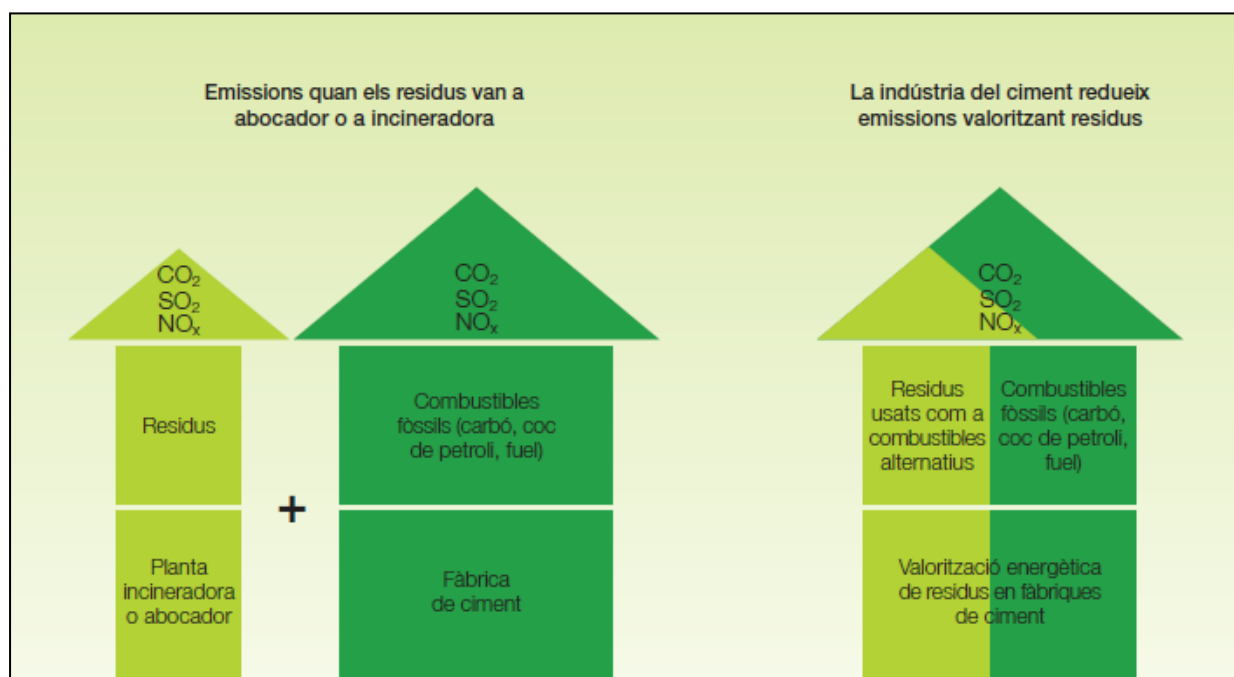


Figura 4.1- Comparativa segons la destinació del residu. Font: Ciment Català

La reducció d'emissions de gasos d'efecte hivernacle s'incrementen en els casos d'utilitzar CDR preparats amb residus de biomassa. La combustió de biomassa produeix aigua i CO<sub>2</sub>, però la quantitat emesa de CO<sub>2</sub>, va ser captada prèviament per les plantes durant el seu creixement. És a dir, el CO<sub>2</sub> de la biomassa viva forma part d'un flux de circulació natural entre l'atmosfera i la vegetació, pel que no suposa un increment del CO<sub>2</sub> a l'atmosfera. [SAMA10]

Es redueixen inversions i s'estalvia en la gestió dels residus al aprofitar instal·lacions industrials ja existents. A més, millora la competitivitat industrial, reduint costos de fabricació amb l'estalvi de combustibles, i en alguns casos, també un estalvi en matèries primeres.

És una pràctica comuna a la indústria cementera i està reconeguda internacionalment com la millor tecnologia disponible, però l'experiència en altres sectors industrials potencials d'utilitzar CDR és encara molt reduïda. [CEMA08], [CEMB09]

La situació varia molt en funció de la normativa i dels models de gestió de cada país. Les noves directrius europees tendeixen a potenciar la valorització energètica augmentant el grau de substitució de combustibles fòssils per residus i cada cop són més els tipus de residus utilitzats però encara no s'ha arribat al màxim aprofitament i s'ha de continuar treballant. [PAYE09]

Amb l'estandardització europea dels CDR, actualment en desenvolupament, es preveu un augment de l'ús segur i eficient, així com l'acceptació al mercat d'aquests combustibles a Europa. [M325]

### **4.3 NORMATIVA, REGULACIÓ I ESTANDARDITZACIÓ**

A Espanya, les operacions de coïncineració de residus estan regulades principalment per la Directiva 2000/76/CE sobre incineració de residus i per la seva transposició al Real Decret 653/2003. [PIZA09]

A més han de complir amb l'establert a la normativa genèrica en matèria de residus com la Directiva 2008/98/CE, amb altres normatives com la Directiva 2008/1/CE sobre prevenció i control integrats de la contaminació (IPPC), la Directiva 2001/77/CE sobre energies renovables i el Real Decret 661/2007 de promoció de l'electricitat en règim especial, i amb els requisits legals específics en funció del tipus de residu utilitzat i de la activitat industrial en qüestió. En tots els casos han d'estar autoritzades per l'Òrgan Ambiental de la Comunitat Autònoma on es realitzi l'activitat.

L'autorització com instal·lació de coïncineració, atorgada per la Comunitat Autònoma, indicarà els residus i les quantitats d'aquests autoritzats a coïncinerar, la capacitat de la instal·lació i els procediments de mesurament de contaminants emesos a l'atmosfera, entre d'altres aspectes. [COCA07]

L'estandardització europea dels CDR, actualment en desenvolupament, és imprescindible per augmentar-ne l'ús segur i eficient, així com per aconseguir-ne l'acceptació al mercat dels combustibles a Europa.

El 26 d'agost de 2002 la Comissió Europea va donar un Mandat M/325 sobre Combustibles Sòlids Recuperats al Centre Europeu de Normalització (CEN) per a l'elaboració de l'estandardització o normalització d'aquests combustibles.

En relació amb els aspectes de mercat, la Comissió demana tenir normes tècniques que contribueixin eficaçment al desenvolupament a Europa d'un mercat dels CDR, i que proporcionin clares referències tècniques a:

- Productors, de manera que coneguin el que demana el mercat.
- Usuaris, de manera que tinguin garanties respecte a la qualitat del combustible que compren i utilitzen.
- Constructors de tecnologies de combustió, de manera que puguin dissenyar plantes per als diferents tipus de combustibles que es definiran.

La Comissió sol·licita que aquestes normes tècniques sobre els CDR serveixin per:

- Dotar la Directiva 2000/76/CE, relativa a la incineració de residus, d'instruments tècnics d'aplicació en línia amb els objectius de la Directiva; en aquest sentit, la Comissió considera sobretot la necessitat d'especificacions tècniques comercials per a combustibles destinats a la coïncineració.
- Definir una metodologia per determinar analíticament la fracció biodegradable i la fracció biogènica dels CDR, d'acord amb les especificacions de la Directiva 2001/77/CE de promoció de l'electricitat a partir de fonts renovables.
- Proporcionar a les autoritats competents, comunitàries, nacionals i locals referències per a la gestió dels processos d'autorització i per a la definició dels límits d'emissió.

Així doncs, l'objectiu del CEN/TC 343 ha estat l'elaboració d'estàndards, normes específiques i informes tècnics sobre els CDR, entenent per aquests els combustibles preparats a partir dels residus no perillosos per ser utilitzats en instal·lacions d'incineració o coïncineració.

Per arribar a aquest objectiu, el CEN/TC 343 es va estructurar en cinc grups de treball (GT):

- GT1: Terminologia i gestió per la qualitat.
- GT2: Especificacions i classificació del combustible.
- GT3: Mostreig, reducció de la mostra i mètodes d'assaig suplementaris.
- GT4: Mètodes per determinar les propietats físiques i mecàniques.
- GT5: Mètodes per determinar les propietats químiques. [ARC05], [EMA09], [M325]

D'acord amb l'Especificació Tècnica CEN/TS 15357, aprovada el maig de 2006, es defineix CDR com un combustible sòlid preparat a partir de residus no perillosos per a la seva valorització energètica en plantes d'incineració o coïncineració i que compleix la classificació i els requeriments de la CEN/TS 15359.

El sistema de classificació dels CDR segons la CEN/TS 15359 es basa en els valors límit de tres propietats importants dels combustibles:

- PCI.
- Contingut de clor.
- Contingut de mercuri.

Cada propietat es divideix en cinc classes. A cada CDR se li ha d'assignar un número de classe de 1 a 5 per a cada propietat. La combinació dels números de classe per un determinat CDR dóna lloc a un codi de classe.

L'associació dels números de classe amb els valors dels tres paràmetres es mostra a la taula següent:

Taula 4.1- Equivalències per classificar els CDR segons la CEN/TS 15359.

Paràmetre	Mesura Estadística	Unitat	Classes				
			1	2	3	4	5
<b>PCI</b>	Mitjana	MJ/kg (base humida)	≥25	≥20	≥15	≥10	≥3
<b>Clor</b>	Mitjana	% (base seca)	≤0,2	≤0,6	≤1,0	≤1,5	≤3,0
<b>Mercuri</b>	Mediana	mg/MJ (base humida)	≤0,02	≤0,03	≤0,08	≤0,15	≤0,50
	Percentil 80		≤0,04	≤0,06	≤0,16	≤0,30	≤1,00

Les especificacions dels CDR que s'han d'aportar (segons també la CEN/TS 15359) es divideixen en dos grups, les que són obligatòries i les que no.

Especificacions obligatòries:

- Codi de classificació: segons PCI, clor i mercuri.
- Origen: per text o amb codificació del Catàleg Europeu de Residus.
- Forma: pèl·lets, bales, briquetes, encenalls, flocs, pols o altres.
- Mida: dimensions i distribució de les partícules segons CEN/TS 15405.
- Contingut de cendres: segons CEN/TS 15403.

- Contingut d'humitat: segons CEN/TS 15414.
- PCI segons CEN/TS 15400.
- Propietats químiques: En aquest punt s'ha d'incloure el contingut en clor, el contingut de cada metall per separat (antimoni, arsènic, cadmi, crom, cobalt, coure, plom, manganès, mercuri, níquel, tali i vanadi) i la suma de tots ells. El cadmi, mercuri i tali no s'han d'incloure a la suma.

Especificacions no obligatòries:

- Contingut de biomassa: segons CEN/TS 15440.
- Composició: percentatge en pes per fraccions principals de paper, plàstics, tèxtils, fusta o altres.
- Preparació del combustible.
- Propietats físiques: per exemple, densitat aparent o contingut de volàtils.
- Propietats químiques.
- Altres: olor i temperatura d'ignició, per exemple. [CEN05]

En resum, en el context de la Comissió, segons el Mandat M/325, s'han desenvolupat les especificacions tècniques (TS) per al CDR per validar-les, posteriorment, com a estàndards europeus (EN). Actualment aquestes es troben en fase de desenvolupament com a esborrany.

A banda de l'estandardització del CEN, alguns països de la Unió Europea, com Finlàndia, Itàlia o Alemanya, han desenvolupat especificacions per a CDR per al seu propi mercat per a determinades aplicacions de coïncineració [RELE09]:

- Finlàndia: SFS5875 (2000).
- Itàlia: UNI 9903 (1992).
- Alemanya: marca RAL-GZ724 (2001).

Per exemple en el cas d'Alemanya, el RAL Gutezeichen Sekundarbrennstoffe (RAL-GZ) ha desenvolupat una etiqueta de certificació i determina una sèrie de requeriments de control i seguiment que els productors han de complir per obtenir l'acreditació. Aquesta organització també defineix requeriments de qualitat que proporcionen una guia per als productors i fixa requeriments específics per als límits de metalls pesants i altres paràmetres (poder calorífic, humitat, cendres i contingut de clor). [EMA09]

En l'actualitat a Espanya no existeix una demanda consolidada de CDR produït amb la especificació tècnica CEN/TS 15359 sinó que es tracta d'una demanda emergent i creixent de CDR que compleixi els requisits tècnics definits per la instal·lació de coïncineració i els requisits mediambientals definits per l'Òrgan Ambiental de la Comunitat Autònoma on s'ubiqui la instal·lació. [ALON09]

Tot i així, a moltes plantes cimenteres espanyoles s'estan aplicant aquestes especificacions tècniques, parcialment o en la seva totalitat, per realitzar els controls d'acceptació dels CDR. [CEMA08]

Amb la creació del Comitè Tècnic de Normalització - AEN/CTN 301 de Combustibles Sòlids Recuperats es preveu una normalització Estatal (AENOR) en els pròxims anys. [AEN10]

## 4.4 SITUACIÓ ACTUAL

La substitució de combustibles fòssils per residus és una pràctica assentada a la majoria dels països europeus des de fa més de vint anys, amb diferències en el grau de substitució i en els tipus de residus emprats. Alemanya, Àustria, França i Bèlgica són els països europeus pioners en la utilització de residus com combustibles alternatius. [GARR08], [MORA08], [ROMA09]

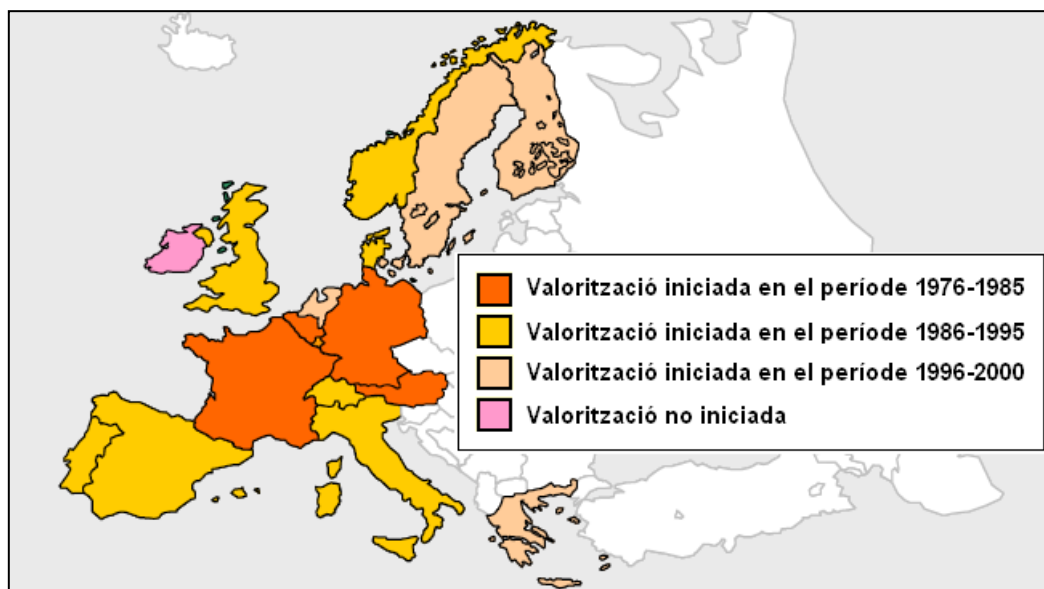


Figura 4.2- Inici de la valorització energètica de residus en plantes cimenteres a Europa. Font: Oficemen

S'ha observat que la utilització de CDR està més desenvolupada als països amb una elevada recollida selectiva amb bona separació i alt reciclatge ja que es generen rebutjos de gran valor energètic.

Aquest és el cas de països com Holanda, Suïssa, Àustria, França, Alemanya o Bèlgica on els sistemes de gestió porten dècades orientats a prevenir l'abocament i aprofitar la capacitat de tractament de les fàbriques de ciment. [MORA08]

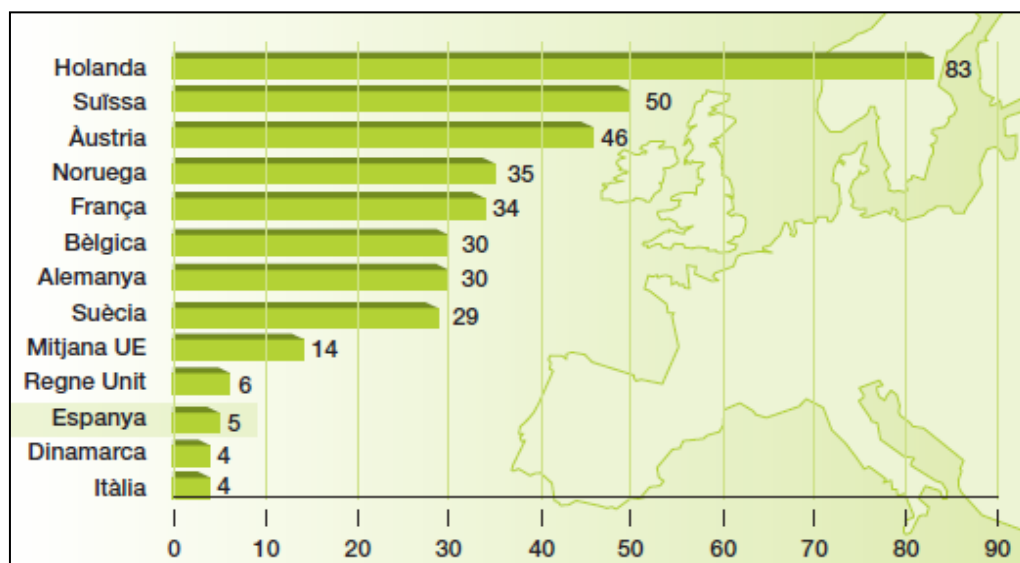


Figura 4.3- Consum de combustibles alternatius en la indústria cimentera de diversos estats europeus (%). Dades del 2002 al 2005. Font: Cement Català.

A Espanya el percentatge de substitució de combustibles tradicionals per alternatius està molt per sota de la mitjana europea i no es van començar a utilitzar de forma continuada fins l'any 1997. En els darrers anys hi ha hagut un creixement ràpid de l'ús de CDR, encara que aquest continua sent baix en comparació amb altres països europeus. [CEMA08], [CEMB09]

Entre els residus més utilitzats a Europa, es troben: farines i greixos d'origen animal, neumàtics fora d'ús, serradures, fusta, llots de depuradora, plàstics lleugers i altres tipus de residus industrials. [CEMA08], [ELOR09]

A partir de les noves polítiques de gestió de reduir els residus a dipòsit controlat fent necessari un tractament previ o les referents a energia i emissions de gasos d'efecte hivernacle es van iniciant estudis i experiències sobre l'ús de residus municipals com a CDR.

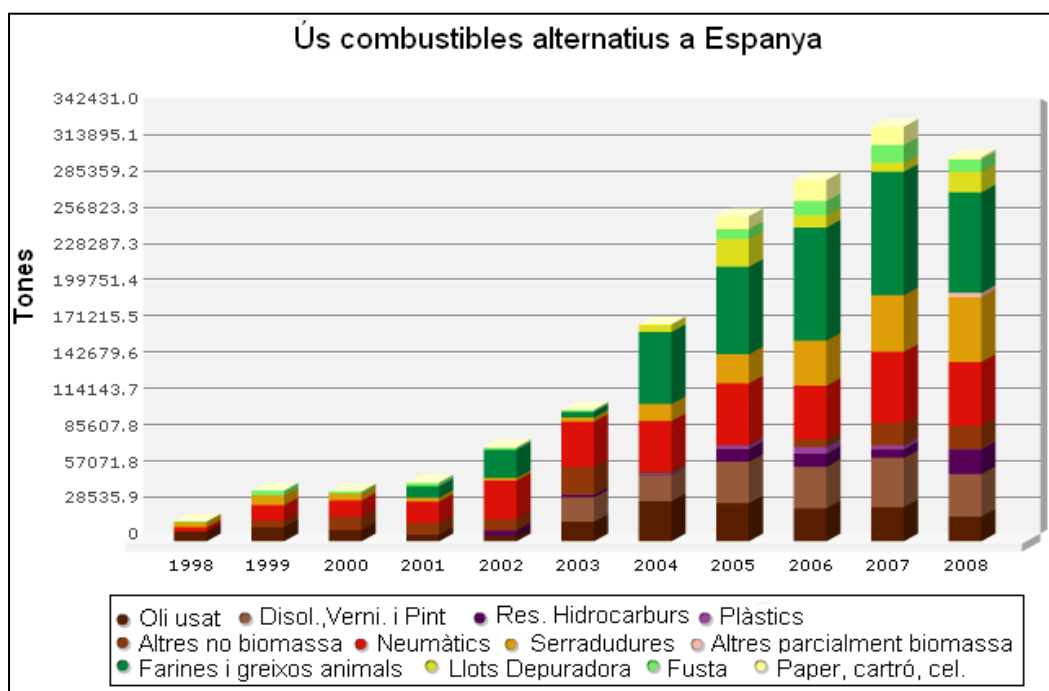


Figura 4.4- Ús combustibles alternatius a Espanya per residus 1998-2008. Font: Oficemen.

El sector del ciment va ser el pioner en adoptar els combustibles de substitució i actualment és el principal consumidor de residus donada l'elevada demanda energètica i la facilitat d'adaptació tècnica dels seus equips.

L'ús de CDR en altres aplicacions industrials ha trigat més temps a sorgir, principalment pel fet de que les qüestions tècniques són més difícils i costoses de resoldre. La coïncineració s'ha desenvolupat a la indústria del paper, on es barreja el CDR amb residus del procés de fabricació del paper (llots de paper i residus de fusta). També existeixen aplicacions a la indústria de l'acer, ceràmiques o qualsevol sector d'elevat consum energètic.

També es poden utilitzar CDR en centrals elèctriques, però al igual que amb les calderes industrials, les majors restriccions procedeixen de la compatibilitat amb els equips existents i les especificacions ambientals derivades de la utilització d'aquests combustibles. [CIEM09]

Per a un màxim aprofitament del potencial energètic dels residus, no s'ha de limitar la utilització d'aquests combustibles alternatius a plantes cimenteres, sinó que s'han de contemplar totes les instal·lacions on tècnicament es pugui donar la valorització energètica d'aquests materials, sempre i quan es compleixin els requisits ambientals exigibles.

## 4.5 PROCESSOS I TECNOLOGIES

### 4.5.1 Tipologia i classificació

La coïncineració pot ser directa o indirecta, en funció de que el CDR es combustioni com a tal o prèvia conversió energètica mitjançant un tractament tèrmic.

L'elecció de la tecnologia correcta s'ha de realitzar darrere d'un estudi detallat de la generació dels diferents tipus de residus, de l'estructura de recollida i dels diferents objectius ambientals que es pretenen assolir.

En relació amb aquests tipus d'instal·lacions de preparació de CDR, s'han de tenir en compte una sèrie de consideracions:

- Verificar que les tecnologies seleccionades són tècnicament resolutives. Es poden provar a plantes de dimensions menors com, per exemple, plantes pilot d'unes 30.000-40.000 t/any de capacitat.
- Verificar que el preu del tractament dels residus mitjançant aquests tipus d'instal·lacions és competitiu amb la resta de tractaments ja implantats pel mateix residu.
- Abans d'implantar-les, cal assegurar un compromís de sortida del producte obtingut i consolidar unes especificacions de qualitat mínimes perquè sigui admès a plantes de coïncineració.
- Atès que aquests processos requereixen un tractament previ, cal destinar la fracció no seleccionada a dipòsit controlat o incineració.

L'existència de varies vies de preparació dels CDR, de manera directa o mitjançant tractaments tèrmics, permet tenir més garanties en la valorització energètica de residus. [EMA09]

### 4.5.2 Aplicació directa

Consisteix en la preparació dels rebuigs dels diferents fluxos de residus, siguin municipals o industrials, a partir de tractaments de separació i homogeneïtzació, per tal d'obtenir una fracció d'elevat poder calorífic.

Generalment, els residus requereixen de diferents tècniques de blending i/o pretractament abans de poder ser utilitzats com combustibles alternatius.

En el cas de residus sòlids el més habitual i senzill és realitzar tractaments mecànics o manuals per a la separació de components complementats amb processos de trituració i homogeneïtzació. Posteriorment la fracció seleccionada es condiona segons el destí final com flocs (*fluff*), pel·letitzat (*softpellet*) o en briquetes (*hardpellet*). [EMA09]



Figura 4.5- Detall de *fluff*, *hardpellet* i *softpellet*, respectivament.



En els cas de residus líquids, com per exemple olis o dissolvents, es realitzen tractaments de neteja i d'homogeneïtzació.

El grau de tractament depèn de diversos factors específics en cada cas, com ara:

- Tipus de residu d'entrada.
- Contingut de materials recuperables i reciclables del residu.
- Requeriments de l'usuari final i destí dels materials de sortida.
- Quantitat requerida de recuperació i reciclatge dels materials.

Com a conseqüència dels factors i objectius específics en cada cas, els diferents processos poden presentar tractaments més o menys complexos i intensius amb diferents configuracions.

Actualment aquesta és la manera més habitual i senzilla de preparar CDR a Europa, però gràcies als avanços en els darrers anys, els tractaments tèrmics es comencen a considerar com una possible via de valorització energètica de residus. [ROMA09]

#### **4.5.3 Tractaments tèrmics**

Existeixen tres tipus de tecnologies disponibles per al tractament tèrmic dels residus amb la finalitat d'obtenir un producte combustible, la gasificació autotèrmica, la piròlisis o, més recentment, la gasificació a alta temperatura per plasma.

Històricament, els processos de gasificació i piròlisis de carbó eren ben coneguts i aplicats. La piròlisis de carbó produïa coc i gas carbó, mentre que el seu tractament per gasificació en una corrent d'aire i vapor, produïa un combustible gasós denominat gas de síntesi. No obstant, ha sigut recentment, quan s'han desenvolupat en l'aplicació en el tractament de residus.

Així mateix, la tecnologia de plasma ha sigut desenvolupada per a la vitrificació de residus perillosos, obtenint bons resultats. No obstant, per al cas de residus es disposa encara de menys experiència que en els processos de gasificació i piròlisis.

Com que aquestes tecnologies estan orientades a la obtenció d'una alta eficiència en la transformació a energia elèctrica, els fluxos de residus de partida han d'estar seleccionats per garantir un alt PCI, poca humitat i una reduïda quantitat d'inerts. La presència de volàtils o de molta humitat es considera perjudicial al suposar una pèrdua d'energia i l'aparició de quitrans en els processos de gasificació, de la mateixa manera la presència d'inerts suposa una clara pèrdua energètica.

Amb aquests processos es poden tractar diferents tipus de rebuigs d'origen municipal i/o industrial complementats entre si, segons sigui necessari. [ARC05], [EMA09], [ISR06]

## Piròlisis

La piròlisis és una degradació tèrmica, en absència d'oxigen afegit, pel que les substàncies es descomponen únicament mitjançant calor, sense que es produeixin les reaccions de combustió com en el cas de la incineració.

L'objectiu fonamental de la piròlisis, que diferencia aquest procés de la gasificació, és la transformació tèrmica dels residus en productes combustibles sòlids (a vegades líquids), que puguin ser valoritzats externament en instal·lacions diferents a les de tractament de residus.

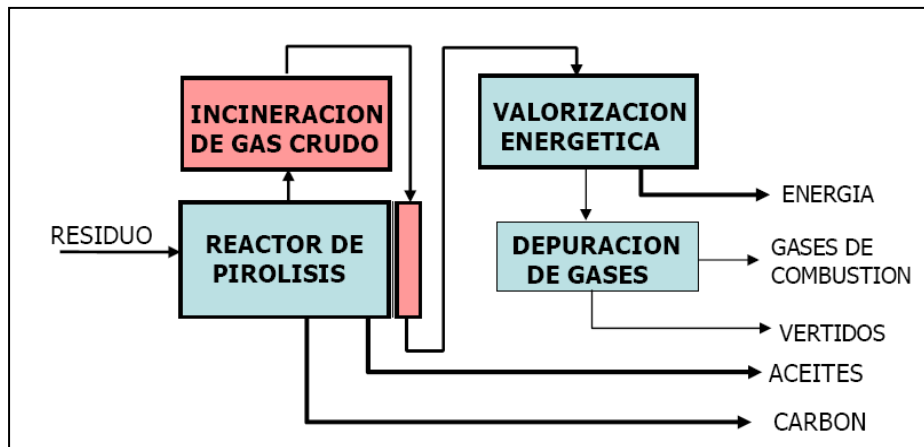


Figura 4.6- Esquema simplificat del procés de piròlisis. Font: Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos, ISR.

Com a resultat del procés de piròlisis s'obtenen els següents productes:

- Gas: Els components bàsics del qual són CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i compostos més volàtils procedents del cracking de les molècules orgàniques, conjuntament amb els ja existents en els residus.  
Aquest gas és molt similar al gas obtingut en la gasificació, excepte en el fet que la piròlisi treballa a temperatures inferiors a la gasificació i, per tant, hi ha una presència més elevada de quitrans i ceras.
- Residu líquid: Compost bàsicament per hidrocarburs de cadenes llargues com quitrans, olis, fenols i ceras formades al condensar a temperatura ambient.
- Residu sòlid: Compost per tots aquells materials no combustibles, els quals o bé no han estat transformats, o bé procedeixen d'una condensació molecular amb un alt contingut en carbó, metalls i altres components inerts dels residus.

Les característiques bàsiques d'aquest procés són:

- L'únic oxigen present és el contingut en el residu que s'ha de tractar.
- Les temperatures de treball són inferiors a les de la gasificació, oscil·len entre els 300°C i els 800°C.
- Totes aquestes reaccions químiques depenen de:
  - El residu d'entrada: composició i contingut en aigua.
  - Les condicions d'operació: temperatura i temps de reacció.

Les condicions d'operació amb les quals es porta a terme la piròlisi poden variar. N'hi ha tres tipus:

- Piròlisis lenta: Procés discontinu, ( $p = \text{atm}$ ,  $T = 400^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$ ) en el qual la velocitat d'escalfament és reduïda ( $< 2^\circ\text{C/s}$ ), i es prolonga el seu temps de reacció entre 5 minuts i diverses hores. En aquest procés, els vapors romandran un cert temps en contacte amb els sòlids, i es produiran reaccions de condensació que donaran lloc a productes més característics i definits.
- Piròlisis ràpida: Procés al buit i a temperatures elevades. La velocitat de reacció és més elevada que en el cas anterior. Els productes volatilitzats romandran uns segons als reactors, i evitaran així les reaccions de condensació. S'utilitza sovint per a biomassa.
- Piròlisis i flash: Procés en el qual el temps de residència dels gasos és  $< 0,5 \text{ s}$ , i la transmissió de calor és molt ràpida. S'aplica a casos en els quals el material que s'ha de pirolitzar té un alt contingut en volàtils.

Així mateix, depenent de la temperatura de reacció, es classifiquen en:

- Processos de baixa temperatura: Operen a temperatures  $< 550^\circ\text{C}$ , i produeixen principalment quitrans, olis i un residu carbonós.
- Processos de temperatura mitjana: Operen en el marge de temperatures entre  $550^\circ\text{C}$  i  $800^\circ\text{C}$ , i s'obtenen elevats rendiments de gas.
- Processos a alta temperatura: Operen a temperatura  $> 800^\circ\text{C}$ , i produeixen elevades quantitats de gas, a causa del cracking de quitrans.

L'ús de les fraccions obtingudes depèn fonamentalment de les seves característiques, en general, es poden considerar els següents usos principals:

- La fracció gasosa, gas cru produït en el reactor de piròlisis, es sol utilitzar com combustible en cambres de combustió dins de la pròpia instal·lació de tractament, per aportar el calor necessari pel procés, l'excés d'energia tèrmica pot valoritzar-se en cicles de vapor convencionals; excepte casos molt específics, no compensa la depuració de aquesta fracció gasosa per la seva transformació en gas de síntesi que pugui ser valoritzat externament.
- La fracció líquida és una barreja de diferents compostos orgànics, amb predomini d'hidrocarburs  $\text{C}_5$  a  $\text{C}_9$ ; la característica fonamental és el seu poder calorífic, que permet l'ús com combustible en alguns processos industrials.
- La fracció sòlida, que depenent del residu alimentat pot constituir el producte principal, pot utilitzar-se per a usos molt diversos, ja sigui com combustible en aplicacions industrials (principalment cimenteres) o com matèria prima per algunes aplicacions concretes o per la recuperació dels materials presents en la mateixa; ha de fer-se notar que, en general, serà una barreja complexa, que exigirà tractaments complementaris abans de la seva valorització o eliminació com subproducte del tractament.

La major part dels processos de piròlisis realitzen la combustió dels gasos i olis obtinguts en les pròpies plantes, utilitzant un cicle de vapor, per aportar l'energia necessària pel procés. Altres vegades la piròlisis és la etapa prèvia a un procés de gasificació. En alguns casos molt particulars, amb residus molt específics com residus plàstics seleccionats o biomassa vegetal es proposa la pirolisis per a la producció de combustibles líquids.

Els forns utilitzats típicament, en piròlisis són els forns rotatius i els forns de tubs escalfats externament. [ARC05], [EMA09], [ISR06]

### Gasificació Autotèrmica

La gasificació és un procés en el que es transforma, mitjançant l'oxidació parcial a temperatura elevada, una matèria combustible o residual, generalment sòlida, en un gas amb un moderat poder calorífic, en presència de quantitats d'oxigen inferiors a les requerides estequiomètricament.

La característica principal, des del punt de vista energètic, que diferencia la gasificació de la combustió és que, si bé en la combustió tota l'energia del gas és en forma de calor sensible, en la gasificació una part de l'energia química que conté la matèria primera passa al gas.

Quan el residu a tractar es majoritàriament orgànic sembla aconsellable utilitzar la gasificació, mentre que si la presència de material inorgànic es important seria convenient decantar-se per un procés de piròlisi.

El procés és endotèrmic i és necessari aportar-hi energia. Això es pot fer de dues maneres diferents: mitjançant una font externa o mitjançant la combustió d'una part del sòlid que s'ha de gasificar. Aquesta última alternativa és la més utilitzada i requereix un control acurat de la relació sòlid-aire. Si el procés es controla correctament (a temperatura constant), la calor aportada per les reaccions exotèrmiques (combustió) compensa la calor absorbida per les reaccions endotèrmiques. Llavors es diu que el procés és autotèrmic.

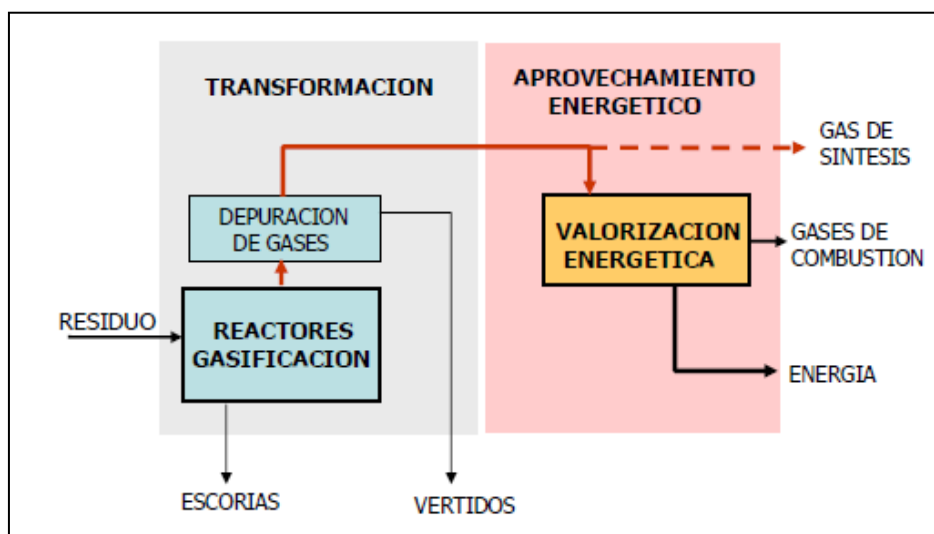


Figura 4.7- Esquema simplificat del procés de gasificació. Font: Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos, ISR.

Així doncs, com a resultat del procés de gasificació autotèrmica s'obtenen els següents productes:

- Gas de síntesi: Compost principalment per  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , petites quantitats d'altres hidrocarburs més pesants, com ara l'età i l'etilè, aigua,  $\text{N}_2$  (si s'empra aire com a gasificant) i diversos contaminants com ara petites partícules carbonoses, cendres, quitrans i olis procedents del procés de depuració del gas cru.
- Residu sòlid: Compost per materials no combustibles i inerts presents al residu alimentat; generalment conté part del carboni sense gasificar. Les característiques d'aquest residu són similars a les escòries dels forns a les plantes d'incineració.

En termes generals, les característiques per al procés de gasificació d'un corrent de residus són les següents:

- L'oxidació parcial es pot dur a terme mitjançant aire, oxigen, vapor o una barreja d'aquests.
- La temperatura de treball es situa entre els 600°C i els 1.100°C.
- Les etapes principals del procés són:
  - Assecatge: evaporació de la humitat que conté el sòlid.
  - Cracking molecular o piròlisi: descomposició tèrmica en absència d'oxigen, la temperatura provoca el trencament dels enllaços moleculars més dèbils originant molècules de menys grandària, generalment hidrocarburs volàtils.
  - Gasificació: oxidació parcial dels productes de la piròlisi, sovint hi intervé el vapor d'aigua com a reactiu.
- En general, la piròlisi té lloc molt més ràpidament que la gasificació, de manera que aquesta última és l'etapa que controla la velocitat global del procés. El gas, el líquid i el carbó produïts mitjançant la piròlisi reaccionen amb l'agent oxidant i generen gasos permanents ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2$ ) i quantitats menors d'hidrocarburs i olefines. Quan els productes de la piròlisi no es converteixen completament en gas, apareixen quitrans contaminants que són difícils d'eliminar mitjançant processos tèrmics, catalítics o físics.
- La quantitat, la composició i el poder calorífic dels gasos procedents de la gasificació dependrà de la composició dels residus, de la temperatura i de les quantitats d'aire i vapor utilitzades. Per exemple, si s'utilitza oxigen, el PCI típic del gas de síntesi pot variar entre 10 i 15  $\text{MJ/Nm}^3$  i la qualitat del gas és superior, menys productes secundaris, en canvi si s'utilitza aire el PCI típic del gas de síntesi es situa 4 i 10  $\text{MJ/Nm}^3$ .

El gas de síntesi obtingut en el procés de gasificació després de ser condicionat per eliminar les partícules i substàncies no desitjades, té potencialment diversos usos:

- Com a matèria primera per a la producció de compostos orgànics, com la síntesi directa de metanol, amoníac, o per a la seva transformació en hidrogen mitjançant el reformat amb vapor o el reformat catalític.
- Com a combustibles substitutius del gas natural en els processos de producció d'energia elèctrica mitjançant cicles tèrmics diferents dels de vapor d'aigua, ja siguin cicles combinats o simples, en turbines de gas o motors de combustió interna.
- Com a combustible en calderes tradicionals o en forns, en substitució de gas oil, fuel oil o d'altres combustibles.

Existeixen diversos tipus de gasificadors. Els més utilitzats per al tractament de residus són els de llit fluiditzat. En l'aprofitament energètic de biomassa també s'utilitzen els de llit fix per la seva simplicitat tecnològica. [ARC05], [EMA09], [ISR06]

### Gasificació per Plasma

La gasificació per plasma és una tecnologia emergent per a la valorització de residus. Consisteix en un tractament tèrmic a alta temperatura orientat a la producció de combustibles gasosos més rics que els obtinguts en els processos de gasificació autotèrmica que, com s'ha comentat anteriorment, obté el calor necessari en la pròpia transformació dels residus.

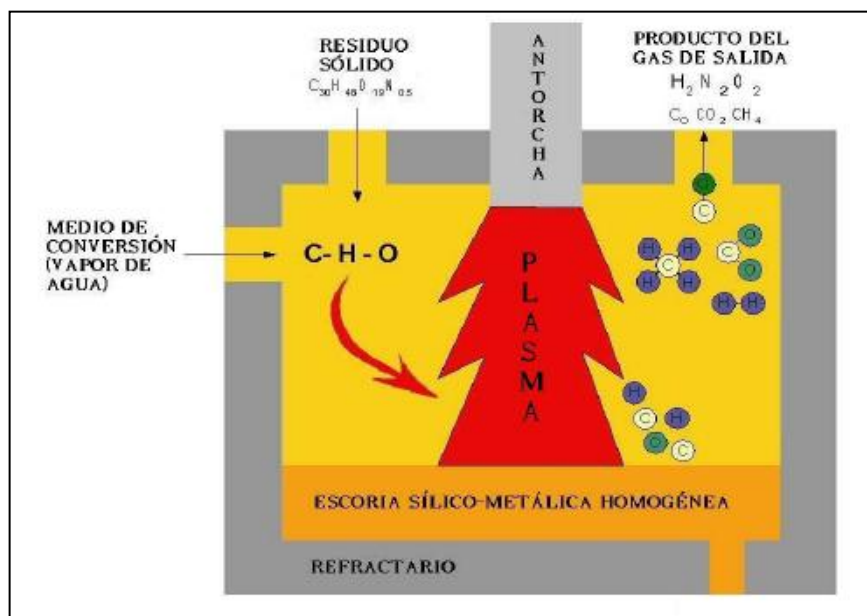


Figura 4.8- Esquema del procés intern que té lloc al reactor de gasificació per plasma. Font: HERA

La diferència fonamental dels processos de plasma respecte a d'altres processos tèrmics radica en la font d'energia tèrmica necessària per que tinguin lloc les reaccions de transformació del residu en gas:

- En el cas de la piròlisi aquesta energia sol provenir de la combustió externa dels gasos produïts en el propi procés; el calor es introdueix en el reactor de diverses formes, generalment per transferència conductiva a través de parets metàl·liques.
- En el cas de la gasificació autotèrmica, la font d'energia són els propis residus; en algun cas la demanda tèrmica de la reacció pot exigir l'aportació de quantitats d'aire superior a les estequiomètriques del procés de transformació del residu en gas de síntesi ( $CO+H_2$ ), donant lloc a la formació de quantitats excessives de  $CO_2$ , que suposen una pèrdua de rendiment i una disminució de la qualitat del gas de síntesi produït, com a causa de la dilució per la presència de major quantitat de  $CO_2$  i a la del  $N_2$  que acompanya a l'aire de combustió.
- En la gasificació per plasma a alta temperatura s'utilitza una font energètica externa, el plasma, constituïda per un flux de gasos dissociats i/o ionitzats, plasma, a temperatura molt elevada, que s'obté fent passar aire, o un altre gas plasmogen, a través d'un camp elèctric molt intens que s'introdueix controladament en els punts adequats del reactor.

El procés està basat en la dissociació molecular que és produeix quan la matèria entra en contacte amb un gas inert en estat de plasma, les molècules són dissociades fins als seus elements primaris.

Aquesta font energètica permet la aportació de potències tèrmiques molt elevades amb quantitats relativament petites de massa i que, en alguns casos, pot fer-se completament independent de la aportació de l'oxigen necessari en el procés.

El plasma, com a tècnica tèrmica per al tractament dels residus presenta tres possibilitats:

- Tractament de gasos perillosos: Els quals se sotmeten a les temperatures de treball, i es destrueix així la seva estructura molecular. Un exemple clar és l'aplicació per a la destrucció de PCB, dioxines, furans i pesticides.
- Vitrificació de residus perillosos: Tant per als residus orgànics, destruint la seva estructura molecular, com per als inorgànics, mitjançant la seva fusió dins d'una massa vítria. Després de refredar i solidificar, els residus romanen físicament capturats dins de la massa vítria i, per tant, es converteixen en un sòlid inert, minimitzant les possibilitats de lixiviació.
- Gasificació per plasma: S'utilitza com a font de calor l'energia tèrmica continguda en el propi plasma a partir de l'energia (normalment elèctrica) consumida per a la generació del mateix, obtenint els següents productes:
  - Gas de síntesi: Compost fonamentalment per CO i H<sub>2</sub>, igual que l'obtingut en la gasificació autotèrmica però amb menor quantitat de líquids i quitrans per desenvolupar-se el tractament a temperatures més elevades; això és important perquè afavoreix la depuració del gas cru i facilita el seu ús com gas de síntesi. Així mateix, la qualitat del gas de síntesi és millor (majors concentracions de H<sub>2</sub> i CO, i menors de N<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub>) donada la menor quantitat d'aire introduït en la reacció.
  - Residu sòlid: Consistent en una escòria inert vitrificada que no lixivia gràcies a la seva estructura cristal·lina.

Actualment les instal·lacions de gasificació per plasma combinen les tres aplicacions. S'haurien de modificar les condicions d'operació en funció de l'objectiu principal establert.

El gas de síntesi, després del seu condicionament per eliminar les partícules presents, pot tenir les mateixes aplicacions que l'obtingut en la gasificació autotèrmica:

- Com a matèria primera per a la producció de compostos orgànics, com la síntesi directa de metanol, amoníac, o per a la seva transformació en hidrogen mitjançant el reformat amb vapor o el reformat catalític.
- Com a combustibles substitutius del gas natural en els processos de producció d'energia elèctrica mitjançant cicles tèrmics diferents dels de vapor d'aigua, ja siguin cicles combinats o simples, en turbines de gas o motors de combustió interna.
- Com a combustible en calderes tradicionals o en forns, en substitució de gas oil, fuel oil o d'altres combustibles.

El residu sòlid vitrificat pot tenir diverses aplicacions com a material de construcció.

Com a resultat de les proves efectuades en planta pilot, algunes fonts asseguren que aquesta tecnologia podria arribar a tractar una àmplia varietat dels residus, com residus municipals, residus industrials, biomassa, residus sanitaris, de desballestaments de vehicles, pneumàtics, plàstics i residus especials o perillosos, encara que no tots estan provats al mateix nivell.

El procés més utilitzat per la generació de plasma és l'arc de plasma, que consisteix en fer fluir un gas inert a través d'un camp elèctric format per dos elèctrodes. [ARC05], [EMA09], [ISR06]

## Referències

Actualment a Europa aquestes tecnologies es troben en fase de desenvolupament i existeixen plantes pilot industrials a petita escala.

Al Japó és on estan més desenvolupades atès que la legislació els obliga a vitrificar les escòries, la qual cosa es realitza a la part baixa del forn. Així doncs, la majoria de les instal·lacions japoneses en funcionament no estan orientades a la producció de gas de síntesi, aplicable a motors tèrmics o cicles combinats, sinó a produir escòries vitrificades.

A continuació es presenten algunes referències dels principals tecnòlegs de piròlisis, gasificació i gasificació per plasma [ARC05], [COCA07], [EMA09], [ENER10]:

Taula 4.2- Referències dels principals tecnòlegs de piròlisis, gasificació autotèrmica i gasificació per plasma.

Tractament	Tecnologia	Any	Ubicació	Capacitat (t/any)	Pot. (MW)	Residus
Piròlisis	Siemens	1984-1994	Ulm, Alemanya	700		RM
		1994-1998	Fürth, Alemanya	175.000		RM
	Mitsui Babcock	2000	Fukuoka, Japó	2x40.000		RM
		2002	Aichi, Japó	2x73.000		RM
		2002	Hokkaido, Japó	2x25.500		RM
		2002	Hokkaido, Japó	2x4.750		RM
		2003	Fukuoka, Japó	2x38.000		RM
		2003	Yamanashi, Japó	2x38.000		RM
	Thide Environment	2002	Itolgawa, Japó	25.000		RM
		2003	Izumo, Japó	70.000		RM
		2004	Arras, França	50.000		RM, llots
	Von Roll	1996-2005	Bremerhaven, Alemanya	52.000		RM
	Wastegen	1986	Burgau, Alemanya	35.000		RM, RI, llots
		2000	Hamm-Uentrop, Alemanya	100.000		RM, RI
Gasificació	Compact Power	2001	Avonmouth, Anglaterra	5.500	2,5	Sanitaris
	Ebara	2002	Kawaguchi, Japó	3x50.000	21	RM
		2002	Ube City, Japó	3x24.000	9,5	RM
		2003	Chuno Union, Japó	3x20.000	7,3	RM
		2003	Minami-shinshu, Japó	2x17.000	4,5	RM
		2004	Nagareyama City, Japó	3x25.000	9,3	RM
		2006	Kuala Lumpur, Indonèsia	5x110.000	33,3	RM
		2006	Tokyo Rinkai, Japó	2x100.000	-	RM
		2007	Hino City, Japó	3x22.000	5,2	RM
	Energos	1997	Ranhelm, Noruega	10.000	3	RM, RI
		2000	Averay, Noruega	34.000	7	RM
		2001	Hurum, Noruega	36.000	9,5	RM, RI
		2001	Minden, Alemanya	37.000	10,6	RM, RI
		2002	Forus, Noruega	38.000	10,6	RM
		2002	Sarpsborg, Noruega	75.000	20	RM, RI
		2009	Isle of Wight, Regne Unit	30.000	0,2	RM
		2010	Sarpsborg, Noruega	78.000	24	RM
		2012	Irvine, Regne Unit	78.000	7,5	RM
		2012	Knowsley, Regne Unit	78.000	9	RM
	Enerkem	2002	Sherbrooke, Canadà	900	-	RM
		2000	Ribesalbes, Espanya	25.000	8,2	Plàstics
	Nippon Steel	1979	Kamaishi City, Iwate Pref., Japó	2x18.000	-	RM, CFC
		1980	Ibaraki City, Osaka Pref., Japó	3x55.000	3,2	RM, CFC
		1996		2x55.000	5	
		1999		55.000	2,8	
		1997	Hyogo Pref., Japó	2x22.000	1,1	RM
		1997	Kaagawa Pref., Japó	2x24.000	1,6	RM, cendres
		2002		24.000	1,1	
		1998	Lizuca City, Fukuoka Pref., Japó	2x33.000	1,2	RM, llots
		2000	Fukuoka Pref., Japó	2x37.000	3	RM, llots, CFC, cendres



Tractament	Tecnologia	Any	Ubicació	Capacitat (t/any)	Pot. (MW)	Residus
Gasificació	Nippon Steel	2000	Kameyama City, Mie Pref., Japó	2x14.500	1,3	RM
		2002	Akita City, Akita Pref., Japó	2x73.000	8,5	RM, llots, cendres
		2002	Maki Town, Niigata Pref., Japó	2x22.000	1,5	RM, llots, CFC
		2002	Chiba Pref., Japó	2x36.500	3	RM, llots
		2002	Takizawa Village, Iwate Pref., Japó	2x18.000	1,2	RM
		2002	Narashino City, Chiba Pref., Japó	3x24.000	2,4	RM, llots
		2002	Kochi Pref., Japó	2x25.500	1,8	RM, llots
		2003	Tajimi City, Gifu Pref., Japó	2x31.000	2	RM, llots
		2003	Aichi Pref., Japó	2x24.000	1,8	RM, cendres, llots
		2003	Oita City, Oita Pref., Japó	3x47.000	9,5	RM, llots
		2003	Fukuoka Pref., Japó	2x29.000	2,4	RM, llots
		2005	Fukuoka Pref., Japó	2x58.000	13,6	RI, VFU
		2006	Shizuoka Pref., Japó	2x27.000	2	RM, llots
		2006	Chiba Pref., Japó	2x27.000	5	RM, llots
	Thermoselect	1994-1999	Fondotoce, Itàlia	30.000	-	RM
		1999-2004	Karlsruhe, Alemanya	225.000	-	RM
		2000	Chiba, Japó	100.000	-	RM, RI
		2003	Mutsu, Japó	45.000	-	RM
		2005	Kurashiki, Japó	185.000	-	RI
		2005	Nagasaki, Japó	100.000	-	RM
		2005	Yoril, Japó	130.000	-	RI
		2005	Tokushima, Japó	40.000	-	RM
	TPS Termiska	1991	Grève in Chianti, Itàlia	110.000	6,7	CDR RM
Plasma	Hitachi Metals	2002	Utashinai, Japó	110.000	8	RM, VFU
	Plasco Hera	2003	Castellgalí, Espanya	1.800	-	RM
		2007	Otawa, Canadà	27.000	12	RM

A la pràctica, la major part de les instal·lacions no responen a models de processos purs, sinó a instal·lacions combinades, en les que participen diferents processos. A continuació es citen alguns exemples [ISR06]:

- *Mitsui Babcock*: És una combinació de piròlisis i combustió a altes temperatures amb fosa d'escòries.
- *Compact Power*: És un sistema integrat per piròlisis, gasificació i combustió a altes temperatures.
- *Thermoselect*: Consisteix en una piròlisis lenta seguida d'una gasificació a alta temperatura.
- *Ebara*: Està basat en un gasificador seguit d'una cambra de fosa de cendres.
- *Energos*: Consisteix en una gasificació seguida d'una combustió total a altes temperatures.
- *Nippon Steel*: Consta d'una primera etapa que engloba piròlisis i gasificació, seguit d'una combustió a altes temperatures.

Actualment es continua investigant sobre aquestes tecnologies per tal de millorar els aspectes tècnics, econòmics, ambientals i socials associats als diferents processos de tractament.

A Espanya, al Centre de Desenvolupament de Energies Renovables (CEDER), podem trobar una plataforma d'instal·lacions a escala pilot de combustió i gasificació de residus sòlids, disposen de plantes pilot de gasificació en llit fluiditzat junt amb una instal·lació de neteja de gasos que permet una avaluació de la neteja en diferents etapes. [CDER10]

