

**SOCIETAT CATALANA  
DE TECNOLOGIA**

*CONTAMINACIÓ INDUSTRIAL*

*I MINERA*

**VALORACIÓ DE RESIDUS SÒLIDS**

**INDUSTRIALS,**

**A CÀRREC DE**

**LLUÍS PUIGJANER,**

**DE LA UNIVERSITAT POLITÈCNICA**

**DE CATALUNYA**

## 1. INTRODUCCIÓ

La tecnologia de gasificació del carbó s'ha desenvolupat durant els últims cent anys. El desenvolupament sistemàtic de millores en el procés rau en l'interès de disposar d'energia acumulable i d'utilització flexible, com serveis de calor i potència de manera combinada i amb rendiments elevats. Avui dia hi ha més de trenta-cinc tipus diferents de gasificadors, des dels que es troben en etapa de desenvolupament fins a altres que hi ha en explotació comercial a gran escala. El fet que existeixi i estigui disponible un elevat nombre de tipus de gasificadors diferents es deu al fet que cada un ha estat dissenyat per a la utilització d'un carbó específic i per produir un gas específic.

La necessitat creixent de fer servir un carbó de manera ambientalment acceptable, la qual cosa qual suposa el control d'emissions de partícules, òxids de sofre, òxids de nitrogen i traces d'altres elements, afavoreix encara més la gasificació. En el futur, pot ser necessari gasificar carbons que són diferents d'aquells per als quals el gasificador ha estat dissenyat. Tanmateix, l'exigència d'un rendiment elevat en la utilització de l'energia fa que els requisits mediambientals s'hagin de complir sense detriment de l'eficiència de la gasificació.

Resulta essencial comparar els processos de gasificació per poder-hi actuar de manera predictable perquè es compleixin els requisits esmentats. L'estudi a què ens referim és d'una rellevància especial per a noves àrees d'aplicació, entre les quals hi ha el tema d'aquesta presentació.

El potencial energètic dels residus orgànics es mostra a la taula 1. La valorització energètica de residus orgànics ofereix diverses solucions tecnològiques potencialment viables: digestió anaeròbia, combustió i gasificació. Cada una presenta característiques específiques que la fan especialment adequada a situacions diferents. La tecnologia de gasificació ofereix una flexibilitat més gran a l'origen del residu i en el seu aprofitament energètic.

TAULA 1. *Potencial energètic dels residus sòlids orgànics a Catalunya*<sup>1</sup>

| Tipus   | Quantitat disponible<br>(tones) | Valorització energètica<br>actual (tones) | Valorització energètica<br>potencial (tones) |
|---|---------------------------------|---|--|
| Agrícola                                      | 1.367.000                       | 230.000                                   | 900.000                                      |
| RSU + RSI<br>(fracció fusta)                  | 308.000                         | 37.400<br>(incineració)                   |  |
| Subproductes ind.<br>de 1a i 2a transf. fusta | 283.000                         | 132.000                                   | 25.000                                       |
| Forestal                                      | 850.000                         | (ús domèstic)                             | 317.000                                      |
| Total   | 2.816.500                       | 400.000                                   | 1.721.000                                    |

Aquests aspectes, sens dubte fonamentals en considerar l'exploració d'una planta, fan de la gasificació una alternativa especialment atractiva i justifiquen l'elevada inversió realitzada durant aquests últims anys, tant per part d'entitats públiques (Unió Europea: programes ECSC, APAS, JOULE) com privades (projectes EPON-Holanda, TPS-Suècia).

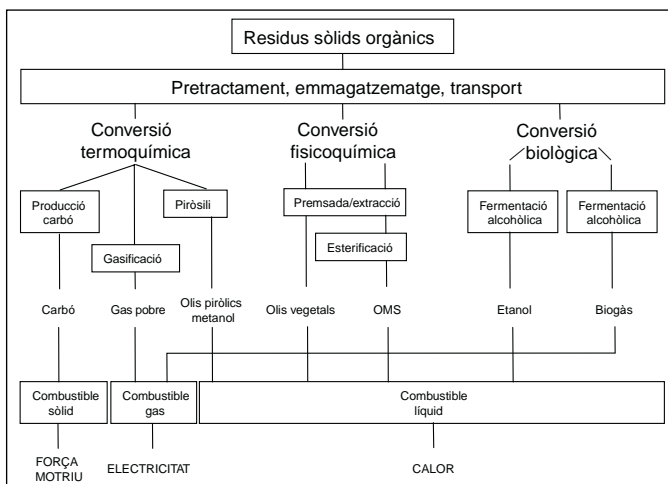


FIGURA 1. *Vies de conversió de residus sòlids orgànics (Cánovas, 1997).*

1. Dades basades en Cánovas, 1997.

En aquesta presentació tractarem de la valorització d'un tipus de residus especialment conflictius per la seva naturalesa, quantitat i dificultat d'aprofitament i recliclatge. Es tracta de les deixalles de fusta i carbó residual. Presentarem els beneficis potencials esperats i les tecnologies considerades actualment en desenvolupament i millora. Descriurem a continuació dues aplicacions concretes en l'estadi de desenvolupament de projecte. Finalment presentem una realització en curs a escala industrial.

## 2. APROFITAMENT ENERGÈTIC DE RESIDUS DE FUSTA

Les deixalles de fusta procedents dels processos primaris de la fusta i de les demolicions presenten un problema potencial. Si s'utilitzen com a farciment en terraplens, ocupen grans volums, es podreixen i produeixen metà, diòxid de carboni i altres gasos d'hivernacle. Com a font d'energia utilitzada en una planta que crema carbó redueixen el consum de combustibles fòssils i també s'alterna l'efecte hivernacle de manera significativa. Com a avantatges addicionals es pot esmentar la reducció de volum de cendres i de les emissions de  $\text{SO}_2$  i  $\text{NO}_x$ . Els residus de fusta requereixen diverses operacions: recollida, emmagatzematge, tractament i gasificació/combustió.

L'aposta de futur es decanta per la gasificació, que presenta els següents beneficis potencials i resultats esperats (Puigjaner, 1997):

- Utilització aprofitable de residus semiurbans.
- Valorització de materials residuals.
- Producció neta d'energia via gasificació.
- Utilització del gas integral en un cicle combinat (IGCC).
- Utilització en plantes de calor i potència (CHP).
- Aspectes mediambientals socials i econòmics.

Els tipus de residus de fusta a considerar tenen un origen divers. Resulten d'especial importància, pel seu volum i repercussió en origen i destinació, les següents:

- Residus de fusta urbans i semiurbans: demolicions, moble vell, màquines escurabutxaques.
- Residus de fusta industrial: palets, encenalls.
- Biomassa residual: residus de neteja del bosc.
- Mescles de residus de fusta d'origen divers.
- Mescles de fusta i altres residus: carbó residual, escombraries, plàstics, pneumàtics...

La consideració de cada tipus de residu incideix en les diverses operacions del procés i té un impacte tecnicoeconòmic que ha de ser analitzat amb detall en l'estudi de viabilitat del projecte en qüestió.

205

### 3. DESENVOLUPAMENT DE TECNOLOGIES NETES I EFICIENTS PER A L'APROFITAMENT DE RESIDUS

El desenvolupament de tecnologies netes i eficients per a l'aprofitament i valorització de residus té l'origen, en gran manera, en la necessitat de millorar metodologies i tècniques de l'ús del carbó. Aquesta constatació resulta una mica òbvia, tenint en compte que, només dins la Unió Europea, el carbó és la font del 80 % de l'energia consumida i que el 40 % de la potència generada es produeix mitjançant l'ús de carbó.

En l'última dècada s'ha fet un esforç important per millorar el rendiment del procés de gasificació amb una reducció simultània d'emissions nocives, especialment CO<sub>2</sub>. S'han aconseguit avenços significatius en la integració del gasificador en un cicle combinat de calor i potència. En aquest sentit s'han posat al punt sistemes de neteja de gasos

de nova generació integrats a la mateixa planta. Aquestes millores ofereixen una perspectiva de més eficiència, flexibilitat en la utilització de carbó/biomassa/residus, reducció en les emissions, especialment les de  $\text{CO}_2$ , i un cost econòmic més baix del sistema de producció de potència.

A continuació s'indiquen aquelles tecnologies de gasificació que ofereixen perspectives més bones, i els seus avantatges i inconvenients.

#### Combustió en llit fluïditzat a pressió (PFBC)

- Elevada eficiència elèctrica en disposició de cicle combinat (42-45 % amb vapor supercrític).
- Temperatura moderada d'entrada a la zona d'expansió de la turbina (850 °C).
- Flexibilitat de combustibles.
- Excel·lent control mediambiental: 95 % de separació del sofre en absència de  $\text{NO}_x$ .
- Problemes de materials a la caldera (erosió dels tubs).

#### Gasificació integrada amb cicle combinat (IGCC)

- Eficiència tèrmica més elevada (45-47 %).
- Utilització més eficient de les turbines.
- Bon control mediambiental.
- Flexibilitat d'utilització.
- Problemes de materials més reduïts.

#### Combustió en llit fluïditzat a pressió atmosfèrica (AFBC)

- Eficiència elèctrica més baixa (36-38 %).
- Cost d'inversió inferior.

## Cicles combinats híbrids

- Gasificació parcial + combustió residual (PFBC/AFBC).
- Eficiència neta molt elevada (47-52 %).
- Problemes de materials de combustió.
- Més complexitat tecnològica  $\Rightarrow$  cost de manteniment elevat.

Els gasificadors emprats i les seves característiques típiques són a la taula 1 (s'expliquen amb detall en un altre treball).

TAULA 2. *Característiques típiques dels gasificadors emprats (propulsats per aire)*

|  | Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) |             |         | Partícula | Capacitat                 |      |      |
|--|------------------------------------|-------------|---------|-----------|---------------------------|------|------|
|  | Reacció                            | Gas sortida | Quitrà  |           | Màx. ( $\text{th}^{-1}$ ) | Mín. | Màx. |
| <b>Llit fix</b>                            |                                    |             |         |           |                           |      |      |
| Corrent descendent<br>( <i>downdraft</i> ) | 1.000                              | 800         | m. sota | moderat   | 0,5                       | 0,1  | 1    |
| Corrent ascendent<br>( <i>updraft</i> )    | 1.000                              | 250         | m. alt  | moderat   | 10                        | 1    | 10   |
| Contracorrent                              | 900                                | 900         | m. alt  | alt       | 1                         | 0,1  | 2    |
| <b>Llit fluid</b>                          |                                    |             |         |           |                           |      |      |
| Reactor únic                               | 850                                | 300         | normal  | alt       | 10                        | 1    | 20   |
| Llit f. ràpid                              | 850                                | 350         | sota    | m. alt    | 20                        | 2    | 50   |
| Llit circulant                             | 850                                | 350         | sota    | m. alt    | 20                        | 2    | 100  |
| Llit d'arrossegament                       | 1.000                              | 1.000       | sota    | m. alt    | 20                        | 5    | 100  |
| Reactors bessons                           | 800                                | 700         | alt     | alt       | 10                        | 2    | 50   |
| <b>Llit mòbil</b>                          |                                    |             |         |           |                           |      |      |
| Múltiple                                   | 700                                | 600         | alt     | sota      | 5                         | 1    | 10   |
| Horizontal                                 | 700                                | 600         | alt     | sota      | 5                         | 1    | 10   |
| Inclinat                                   | 800                                | 700         | sota    | sota      | 2                         | 0,5  | 4    |
| De cargol                                  | 800                                | 700         | alt     | sota      | 2                         | 0,5  | 4    |
| <b>Altres</b>                              |                                    |             |         |           |                           |      |      |
| Forn rotatori                              | 800                                | 800         | alt     | alt       | 10                        | 2    | 30   |
| Reactor ciclo                              | 900                                | 900         | sota    | m. alt    | 5                         | 1    | 10   |

2. A una eficiència global del 36 %.

#### 4. APLICACIONS

##### 4.1. *Estudis de valorització de mescles fusta/carbó*

L'ús de carbons subbituminosos de baixa potència calorífica i alt contingut en sofre i cendres barrejat amb biomassa sembla interessant, atesa la complementarietat de propietats dels dos combustibles, ja que, contràriament a les característiques pròpies dels carbons pobres, la biomassa té un contingut baix en cendres (generalment inferior al 20%) i un contingut elevat en volàtils, cosa que és favorable tant des del punt de vista tècnic com del mediambiental, per a una combustió i gasificació neta del tipus de carbó considerat.

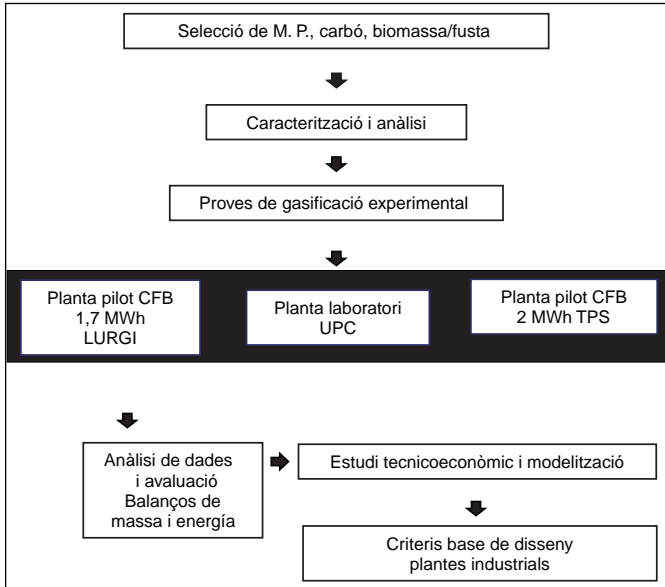
Per tant, la utilització combinada d'ambdós materials —biomassa i carbons pobres— en un procés de cogasificació podria ser potencialment atractiva des d'un punt de vista econòmic, mediambiental i social. El procés, si resultés satisfactori, faria possible usar un nombre definit de carbons locals pobres, que es troben en àrees urbanes i semiurbanes, on causen problemes mediambientals i socials amb conseqüències econòmiques importants. Aquestes circumstàncies, al costat de l'escassa experiència prèvia, van justificar la realització d'un ambiciós projecte patrocinat per la Comunitat Europea (Apas Clean Coal Technology, CT92-0001), que va tenir com a objectius els següents (Puigjaner, Pan, Velo, 1995):

- Demostrar la viabilitat del llit fluïditzat com a tecnologia neta per a la gasificació de mescles de carbó de baixa qualitat/biomassa i l'optimització del procés sota criteris energètics i mediambientals.
- Desenvolupar els criteris bàsics d'enginyeria de disseny de plantes industrials, segons els resultats assolits en la fase experimental, i determinar la tecnologia més adequada tenint en compte diferents



factors, com són la mida de les instal·lacions i les característiques de les mescles a emprar com a combustibles, fent èmfasi en l'equip i els sistemes necessaris per assegurar un procés net i eficient.

L'organització del projecte per acomplir els objectius previstos es reflecteix a la figura 2.



209

FIGURA 2. Metodologia del projecte.

La matèria primera seleccionada va consistir en biomassa d'origen divers (fusta de pi, palla, fangs de depuradores) i carbó de baixa qualitat (carbó residual, lignit negre). La seva composició (anàlisi immediata i elemental) i el poder calorífic inferior (PCI) s'indiquen a la taula 3.

TAULA 3. Anàlisi elemental i immediata i poder calorífic de la matèria primera emprada

| Material     | Anàlisi elemental (wt %) |      |      |      | Anàlisi immediata (wt %) |     |      |     |     | PCI<br>(kJkg <sup>-1</sup> ) |
|--------------|--------------------------|------|------|------|--------------------------|-----|------|-----|-----|------------------------------|
|              | W                        | A    | VM   | FC   | C                        | H   | O    | N   | S   |                              |
| Hulla        | 7,4                      | 68,7 | 10,1 | 13,8 | 16,8                     | 1,5 | 3,7  | 0,6 | 1,3 | 5.303                        |
| Lignit negre | 1,0                      | 34,3 | 39,8 | 24,9 | 37,4                     | 2,9 | 15,8 | 0,5 | 8,0 | 17.955                       |
| Fusta de pi  | 15,0                     | 1,0  | 65,8 | 18,2 | 44,0                     | 5,2 | 34,3 | 0,5 | 0,1 | 16.162                       |

També es va portar a terme un estudi termogravimètric preliminar que va permetre caracteritzar l'etapa de piròlisi i determinar les condicions inicials d'operació i desenvolupament del model cinètic (Cánovas, 1997).

### Proves experimentals

Les proves experimentals es van portar a terme en una unitat de laboratori amb reactor de llit fluid (BFB) a petita escala que permetia una gran flexibilitat en tractament de matèria primera i condicions d'operació (UPC), i en dues plantes pilot de llit circulant (CFB) a dues escales diferents.

La planta de laboratori flexible (1.250 kg/m<sup>2</sup>h) va permetre fer assaigs experimentals en condicions d'operació diverses (figura 3). Les variables observades van ser la relació òptima carbó/biomassa, temperatura òptima d'operació i influència de l'aire secundari per obtenir un gas de poder calorífic acceptable i una major eficiència tèrmica del procés de gasificació (Puigjaner, Pan, Velo, 1995; Pan, Velo, Puigjaner, 1996; Pan *et al.*, 2000).

L'escala de laboratori fixava les condicions d'operació nominals que eren reproduïdes a una escala més gran en planta pilot de llit fluid circulant proveïda de tractament dels gasos calents (LURGI) per passar finalment a una escala de 2 MWth (ACFBG de TPS).



residual disponible no és limitant, ja que hi ha més de sis-centes zones de dipòsit al nord d'Espanya. La biomassa disponible en un província com Terol limitaria la capacitat màxima de la planta a 32,5 MWth.

L'avaluació tecnicoeconòmica de generació de potència basada en cogasificació de biomassa de pi i carbó residual utilitzant un sistema de gasificació de llit circulant es va dur a terme mitjançant simulació (simulador de processos Eclipsi) i amb la informació proporcionada pels resultats de les plantes experimentals i assaigs cinètics en termobalança.

Suposant un cost de 8 ECU/t per al lignit/carbó residual i 40 ECU/t per a la biomassa, el cost de producció d'energia elèctrica resultaria ser de 79 ECU/MWh utilitzant lignit, i de 100 ECU/MWh en el cas del carbó residual, cosa que implica un estalvi del 20% en cas d'utilitzar lignit.

L'impacte ambiental resultant d'aquests processos mostra l'efecte favorable de la presència de biomassa en les emissions. En condicions d'operació òptimes s'aconsegueix un nivell d'emissions de:  $\text{CO}_2 < 900 \text{ g/kWh}$ ,  $\text{NO}_x < 0,33 \text{ g/kWh}$  i  $\text{SOTA}_2 < 1 \text{ g/kWh}$ .

Es pot concloure que l'ús de fusta per a cogasificació permet:

- En l'aspecte energètic:
  - un augment de conversió del carbó,
  - millores en el rendiment net i disminució de pèrdues,
  - la utilització en turbines de gas (IGCC) i màquines de combustió interna.
- En l'aspecte mediambiental:
  - una reducció substancial d'emissions,
  - una reducció del contingut de sofre en el gas,
  - una baixa emissió de  $\text{NO}_x$ ,
  - una reducció en cendres.

— Aspecte econòmic:

- la utilització de carbó pobre i residus de carbó,
- l'aprofitament i valorització de residus de carbó.

#### 4.2. *Tractament de residus de fusta/biomassa mitjançant gasificació en reactor de llit fluïditzat*

La biomassa està àmpliament considerada com el combustible de més potencial com a font d'energia del futur. Com a recurs energètic, pot representar el 50 % de la demanda energètica total a Europa, utilitzant per a cultiu de biomassa específic el terreny innecessari per a aliments, i considerant també altres rebuigs i residus d'agricultura, comerç i consumidors (Bridgwater, 1995; Parkinson, Foully, 1996).

Un dels problemes més grans de la biomassa com a cultiu energètic és el cost associat de mà d'obra, collita i transport, atesa la dispersió en grans àrees de conreu. En canvi, quan es tracta d'altres tipus de residus sòlids urbans (RSU) i industrials, els esmentats costos són molt més baixos, i poden arribar a ser negatius en el cas de RSU, encara que en aquests casos es requereixen pretractaments extensius per fer-los compatibles amb el procés de conversió. Existeix, per tant, un límit en la mida de les plantes generadores de potència a partir de residus de biomassa, i que oscil·la entre 10 i 100 MWe segons la localització.

L'objectiu del projecte que aquí es presenta preveu la posada al punt de metodologies i tècniques per al tractament i la valorització energètica de mescles de biomassa residual i residus de fusta (Projecte C-2364 UPC, Junta de Residus, Generalitat de Catalunya). L'estudi se centra en el procés de gasificació que utilitza un reactor de llit fluïditzat. Les matèries primeres són residus de fusta d'origen divers: palets, demolició d'obra civil, màquines recreatives, crostes

de vegetals, biomassa de tala i neteja del bosc. L'agent gasificador és aire atmosfèric barrejat en parts convenients amb vapor d'aigua. El resultat final ha estat el desenvolupament de l'enginyeria de disseny preliminar per a un procés de gasificació en què s'obté un gas net i amb potència calorífica suficient per al seu aprofitament per a combustió en un motor o turbina.

L'estudi comprèn dues fases:

1. Estudi de valorització pilot
  - Disseny de les instal·lacions apropiades per a cogasificació de fustes.
  - Tractament de nivells de composicions variades.
  - Proves experimentals de gasificació.
  - Valoració dels resultats i conclusions per a la segona fase.
2. Etapa de demostració pilot
  - Tractament de fusta fins a 75 t/dia.
  - Sistema de condicionament dels gasos.
  - Planta de cogeneració de 3 MW.

Les matèries primeres van ser seleccionades segons la localització de la planta de demostració. El disseny preliminar havia de considerar una planta flexible per a una utilització de sòlids d'un sol tipus o bé de mescles de diversos tipus en proporcions diverses. Així s'obtindrien els paràmetres d'operació òptima (temperatura, proporció aire/sòlid, identificació de composició de mescles òptimes) per mantenir un gas de potència calorífica estable. L'anàlisi immediata determinada per termogravimetria i humitat relativa s'expressa a la taula 4, i l'anàlisi elemental i la potència calorífica inferior obtinguts a partir de la composició s'indiquen a la taula 5.

TAULA 4. *Anàlisi immediata determinada per termogravimetria i humitat relativa*

| Tipus                | Humitat<br>(% base humida) |       | Anàlisi immediata<br>(% base seca) |         |
|----------------------|----------------------------|-------|------------------------------------|---------|
|                      | C fix                      |       | Volàtils                           | Cendres |
| Bosc                 | 7,38                       | 17,64 | 72,98                              | 2,00    |
| Moble vell           | 3,79                       | 17,55 | 77,46                              | 1,20    |
| Màquines recreatives | 6,90                       | 17,85 | 74,05                              | 1,20    |
| Palets               | 2,59                       | 15,03 | 79,98                              | 2,40    |
| Fusta de demolicó    | 4,75                       | 17,41 | 74,84                              | 3,00    |

TAULA 5. *Anàlisi elemental i potència calorífica inferior obtinguts a partir de la composició*

|                      | Anàlisi elemental<br>(% base humida) |      |      |   |       | Potència calorífica<br>(kJ/kg) (calculada) |        |        |        |
|----------------------|--------------------------------------|------|------|---|-------|--|--------|--------|--------|
|                      | C                                    | H    | N    | S | O     | PCS  |        | PCI    |        |
|                      |                                      |      |      |   |       | b. s.                                      | b. h.  | b. s.  | b. h.  |
| Moble vell           | 46,16                                | 5,77 | 0,80 | 0 | 37,87 | 23,361                                     | 21,453 | 18,863 | 17,287 |
|                      | 44,59                                | 6,32 | 1,57 | 0 | 42,83 | 22,523                                     | 21,575 | 17,627 | 16,864 |
| Màquines recreatives | 43,17                                | 5,72 | 4,42 | 0 | 38,59 | 22,093                                     | 20,395 | 17,534 | 16,152 |
| Palets               | 45,37                                | 5,69 | 0,07 | 0 | 43,88 | 21,852                                     | 21,221 | 16,897 | 16,395 |
| Fusta de demolicó    | 45,58                                | 5,89 | 2,22 | 0 | 38,56 | 22,639                                     | 21,445 | 18,186 | 17,203 |

215

La planta de laboratori dissenyada va anar precedida d'un estudi hidrodinàmic per caracteritzar el comportament del sòlid en règim de fluïdització, el sistema d'alimentació i descàrrega en continu i subsistemes de calefacció i control. Es va utilitzar com a base la planta de la figura 3, amb les modificacions convenients per potenciar la seva flexibilitat d'ús, millores en el transport i el maneig del sòlid i modificacions del sistema de neteja de gasos, així com la possibilitat d'ús d'aportacions d'aire secundari a diverses altures del reactor de llit fluid. Les característiques del reactor s'indiquen a la taula 6.

TAULA 6. *Característiques del reactor de llit fluiditzat*

|                        |                      |
|------------------------|----------------------|
| Temperatura de disseny | 1.000-1.050 °C       |
| Pressió de disseny     | 1,4 bar              |
| Secció                 | 12,6 cm <sup>2</sup> |
| Volum                  | 4,57 litres          |
| Columna principal      | AISI-904-L           |
| Columna d'alimentació  | Flexiglas-XT         |
| Resta de materials     | AISI 316-L           |

El sistema d'anàlisi en línia permet avaluar els components del gas net (CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> i C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) i les traces de NH<sub>3</sub>HCL i H<sub>2</sub>S. Els quitrans es condensen, i es determina la quantitat per unitat de gas produït.

El resultat de la fase d'enginyeria de predisseny va resultar satisfactori. El gas obtingut és un gas combustible de baix contingut en oxigen i poder calorífic inferior (PCI) que oscil·la entre els 4.000-5.000 kJ/m<sup>3</sup> c.n., en el qual el valor més baix correspon a la fusta de palets, i el més alt a la biomassa (vegeu la figura 4). L'eficiència de la gasificació (el poder calorífic del gas sobre el poder calorífic del sòlid) és de l'ordre del 40 al 60 % (vegeu la figura 5).

216

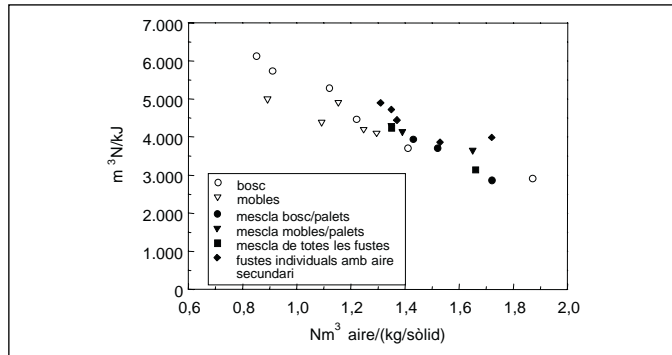


FIGURA 4. *Variació del PCI segons el material i la proporció aire/sòlid.*



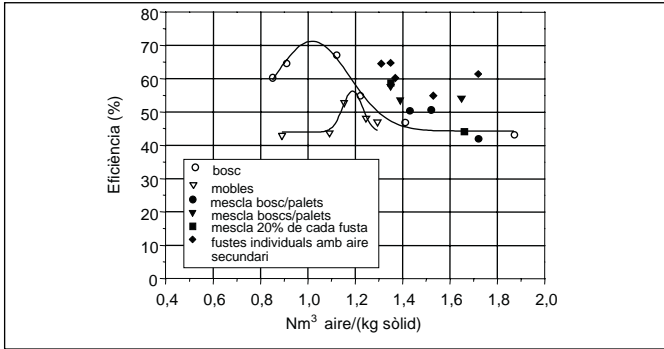


FIGURA 5. Eficiència de la gasificació segons el material i la proporció aire/sòlid.

Cal destacar la influència positiva de l'aportació d'aire secundari. Aquest aspecte és molt interessant per disminuir el contingut en quitrans, que es redueixen de 7 a valors inferiors d'1 g/m<sup>3</sup> c.n. La seva influència també és favorable a la reducció del contingut en HCl. Els components nocius analitzats, H<sub>2</sub>S, HCl i NH<sub>3</sub>, es mantenen inferiors a les 100 ppmv. Encara que aquests valors són molt inferiors als que s'obtenen en la gasificació del carbó, tanmateix el nivell de sulfhídric està per sobre del límit de 20 ppmv necessàries per a la utilització de turbines.

Els resultats d'aquest estudi permeten arribar a les conclusions següents:

- La valorització de residus de fusta té solució a curt termini per mitjà de la gasificació en llit fluïditzat.
- Permet la generació neta d'energia en cicle combinat integrat a indústries de procés consumidores d'energia vapor.
- Contribueix eficaçment a la disminució de l'impacte ambiental i a una millora social.
- Estudis en curs mostren la seva validesa tecnico-econòmica.

## 5. APLICACIONS A ESCALA INDUSTRIAL

En vista dels resultats obtinguts i com a continuació del projecte descrit a l'apartat 4.2, s'ha iniciat l'estudi d'una planta per al tractament de 50.000 kg/dia de fustes residuals (vegeu la figura 6). Les diferències respecte a altres esquemes es basen en l'objectiu de maximitzar l'extensió de l'energia i minimitzar l'impacte ambiental.

L'economia del procés afavoreix la gasificació de biomassa amb relació a la combustió per produir vapor i electricitat, atesa la major eficiència del procés de conversió (NREL, Golden, Colorado). L'electricitat pot ser produïda en plantes d'aquest tipus a un cost proper als 0,05 \$/kWh, que és el mateix que s'obté en una planta que fa servir carbó. Avantatges addicionals són el baix contingut en sofre de la biomassa, encara que el volum de cendres volants és més gran i requereix la utilització de filtres electroestàtics, ciclons separadors i rentatge de gasos.

218

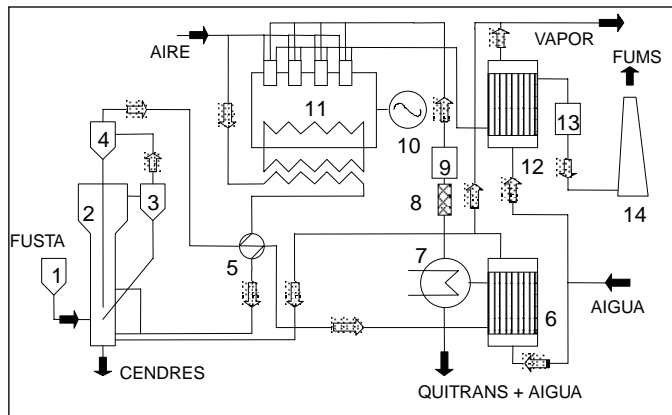


FIGURA 6. Planta de gasificació de fustes residuals. Equips principals.

No hi ha obstacles més grans a la comercialització de la gasificació de biomassa. Pel que fa a aspectes millorables, inclouen el maneig i l'alimentació del sòlid i la xarxa de recollida i seguiment (excepte a Escandinàvia). Tant és així que hi ha un bon nombre de plantes en fase de demostració, unes quantes amb el patrocini de la Unió Europea i del Departament d'Energia dels EUA (DOE). Tanmateix, la iniciativa privada està disposada a apostar per aquesta alternativa energètica: l'empresa Varkus (Finlàndia) pretén comercialitzar-ne la tecnologia en un rang de 30-60 MW a partir de 1998 (taula 7).

TAULA 7. *Projectes de demostració de gasificació de biomassa*

| <i>Tecnologia</i>            | <i>Lloc</i>            | <i>Finançament</i>        | <i>Típus d'unitat</i> | <i>Capacitat</i> | <i>Alimentació</i>      | <i>Estat</i>                    |
|------------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Bioflow Oy Varkus, Finlàndia | Varnamo, Suècia        | Privada                   | PFB                   | 6 MWe/<br>9 MWt  | Fusta residual          | Operativa                       |
| Renugas (IGT)                | Hawaii, EUA            | U. S. DOE, Hawaii         | PFB                   | 6 MWe            | Residus agrícoles       | Posada en marxa                 |
| TPS AB Suècia                | Bahia, Brasil          | Banc Mundial              | CFB atmosfera         | 32 MWe           | Eucaliptus              | Completat el disseny            |
|                              | Eggborough, Regne Unit | Unió Europea              | CFB atmosfera         | 10 MWe           | Residus forestals       | Lliurada el 1998                |
|                              | Holanda                | Privada                   | CFB atmosfera         | 30 MWe           | Residus forestals       | En planificació                 |
| Enviropower Helsinki         | Tampere, Finlàndia     | Privada, Govern finlandès | CFB pres.             | 60 MWt           | Fusta residual i lignit | Temporalment fora de servei     |
|                              | Summa, Finlàndia       | Govern finlandès          | CFB pres.             | 60 MWt           | Fusta                   | Completat el disseny            |
|                              | Elkraft, Dinamarca     | Unió Europea              | CFB pres.             | 8 MW             | Residus forestals       | En fase de disseny              |
| Lurgi Energie                | Di Cascans, Itàlia     | Unió Europea              | CFB atmosfera         | 14,3 MWe         | Fusta residual          | En fase de disseny              |
| Batelle, Columbus, Ohio      | Vermont, EUA           | U.S. DOE, Privada         | atmosfera             | 15 MWe           | Fusta residual          | Inici de la fase de construcció |

| Tecnologia      | Lloc                 | Finançament  | Tipus d'unitat | Capacitat | Alimentació    | Estat                          |
|-----------------|----------------------|--------------|----------------|-----------|----------------|--------------------------------|
| Free University | Brussel·les, Bèlgica | Unió Europea | BFB atmosfera  | 2,5 MWt   | Fusta residual | Prevista per funcionar el 1996 |
| Stewag/ABB      | Graz, Àustria        | Unió Europea | atmosfera      | 5 MWe     | Fusta residual | Per lliurar en 1998/99         |

El potencial de la tecnologia de gasificació integrada a cicle combinat (IGCC) s'estén al tractament eficient de tot tipus de residus (residus de la indústria petroquímica, olis pesants, coc, residus del descarnament en automòbils, pneumàtics i plàstics no reciclables) on altres tecnologies resultarien tecnològicament impossibles o econòmicament inviables (taula 8). Addicionalment, les indústries de procés químic (CPI) semblen decidides a una inversió que va més enllà de la producció de vapor i electricitat per produir també hidrogen per al seu ús en refineria, recuperació de sofre i producció d'amoniac i metanol (en plantes que usen oxigen com a agent gasificant (vegeu la figura 7)).

TAULA 8. *Plantes IGCC per a utilització d'oli residual*

| Tecnologia | Localitat      | Finançament | Capacitat | Data d'inauguració |
|------------|----------------|-------------|-----------|--------------------|
| Texaco     | Isab, I        | Privat      | 500 MWe   | 1998               |
|            | Saras, I       | Privat      | 500 MWe   | 1998               |
|            | API, I         | Privat      | 220 MWe   | 1998               |
| Shell      | El Dorado, EUA | Privat      | 40 MWe    | 1997               |
|            | Permis, NL     | Privat      | 80 MWe    | 1997               |

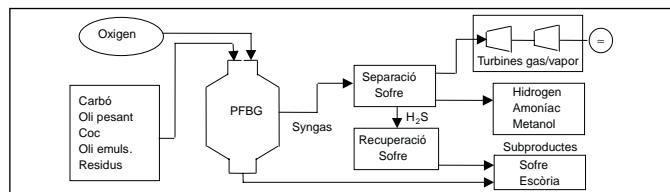


FIGURA 7. *Procés Texaco per a producció de vapor i electricitat i productes de síntesi ( $H_2$ ,  $NH_3$ ,  $MeOH$ ) i recuperació de sofre.*

## 6. PERSPECTIVES DE FUTUR

Per tot el que s'ha exposat anteriorment, la tecnologia de gasificació és summament atractiva per tractar d'una manera eficient i mediambientalment acceptable els residus sòlids urbans, encara que la seva utilització comercial depèn essencialment del tipus de residu i els molts casos d'una posada al punt perquè es puguin tractar les diverses classes de residus. A continuació indicarem diversos aspectes que resumeixen les tendències de l'esforç continuat per millorar la tecnologia de gasificació per al tractament de RSU.

Les millores previstes en un futur pròxim se circumscriuen dins de l'àmbit d'intensificació i integració del procés (*process integration/process intensification*).

En particular, es preveuen avenços importants en:

- Reducció significativa del contingut en quitrans en els gasos producte ( $< 1 \text{ g/Nm}^3$ ) mitjançant una dosificació precisa d'aire secundari (Pan, Roca, Velo, Puigjaner, 1999).
- Reducció complementària del contingut en HCl,  $\text{H}_2\text{EL S}$ ,  $\text{NH}_3$  ( $< 1 \text{ g/Nm}^3$ ) mitjançant sistemes de pressió i tractament a alta temperatura (Pan *et al.*, 2000).
- Reducció de la mida i augment de l'eficiència del gasificador mitjançant modelització precisa del procés de gasificació (models cinètics i hidrodinàmics en estat estacionari) (Reina, Velo, Puigjaner, 1998; 2000).
- Modelització dinàmica del procés mitjançant la utilització de models híbrids (basats en models matemàtics complementats amb informació transparent de models neuronals evolutius) (Puigjaner, 2000).

- Automatització intel·ligent de la planta gasificadora que integri un sistema de gestió basat en la qualitat del gas, el sistema de supervisió i diagnosi i el control a baix nivell (Nougués, Pan, Velo, Puigjaner, 2000).
- Optimització del procés en temps real (RTO) que preveuen els dos últims apartats anteriors sota criteris de funció-objectiu en termes de qualitat ambiental del gas, potència calorífica i rendiment de la instal·lació (Puigjaner, no publicat).

Tots aquests aspectes, es preveu que estiguin presents en projectes actualment en desenvolupament en fase precompetitiva, en gran part finançats per la Comunitat Europea (programes ECSC i ENERGY), que ha mostrat decididament el seu suport a la tecnologia de gasificació com a tractament més adequat dels residus sòlids urbans.

Finalment, la consideració de nous processos que obrin un nou cicle de vida i contribueixin a un desenvolupament sostenible han de merèixer una atenció especial amb vista al futur. En aquest sentit existeixen noves propostes que preveuen gasificació en cicle tancat amb generació de productes d'alt valor afegit i disminució d'emissions de gas amb efecte hivernacle ( $\text{CO}_2$  i  $\text{CH}_4$ ) (Gasifuel, 2000).

## 7. AGRAÏMENTS

Aquest treball ha estat realitzat gràcies al patrocini de la Unió Europea (APAS project CT92-0001; ECSC-7220-ED/81) i de la Junta de Residus de la Generalitat de Catalunya (C-2364). En els esmentats projectes han participat els professors Enric Velo, Pa Ying Gang, Xavier Roca i altres col·laboradors del Laboratori del Centre de Medi Ambient (LCMA).

## 8. BIBLIOGRAFIA

- BRIDGWATER, A. V. (1995). «The technical and economic feasibility of biomass gasifications for power generation». *Fuel*, núm. 74, p. 631.
- CÁNOVAS, R. (1997). «Potencial energético de los residuos orgánicos». A: FLOTATS, X. [ed.]. *Aprofitament energètic de residus orgànics*. P. 1.
- GASIFUEL. «Biomass and plastic wastes co-gasification interconnected with methanol production for vehicle fuel cells» (ECSC-PL-NNE5-2000-00194).
- NOUGUÉS, J. M.; PAN, Y. G.; VELO, E.; PUIGJANER, L. (2000). «Identification of a Pilot Scale Fluidised-Bed Coal Gasification Unit by Using Neural Network». *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, p. 1561-1575.
- PAN, Y. G.; ROCA, X.; VELO, E.; PUIGJANER, L. (1999). «Removal of tar by secondary air in fluidized bed gasification of residual biomass and coal». *Fuel*, núm. 78, p. 1703-1709.
- PAN, Y. G.; VELO, E.; PUIGJANER, L. (1996). «Pyrolysis of Blends of Biomass with Poor Coals». *Fuel*, núm. 75, p. 412-418.
- PAN, Y. G.; VELO, E.; ROCA, X.; ROIG, S.; MANYÀ, J. J.; SÁNCHEZ, G.; PUIGJANER, L. (2000). «Fluidized-Bed Co-Gasification of Residual Biomass/Poor Coal Blends for Fuel Gas Production». *Fuel*, núm. 79, p. 1317-1326.
- PARKINSON, G.; FOUHY, K. (1996, març). «Gasification: new life for an old technology». *Chemical Engineering*, p. 37.
- PUIGJANER, L. (1997). «Aplicación de las tecnologías de gasificación a la valorización de residuos sólidos». A: FLOTATS, X. [ed.]. *Aprofitament energètic de residus orgànics*. P. 223-236.
- (2000). «Modeling and Optimisation of Process Operations: Recent Advances and Industrial Validation». A: MUJTABA, I. M.; HUSSAIN, M. A. *Application of Neural Network*

*and Other Learning Technologies in Process Engineering.*

Londres: Academic Press.

— «Real-time Optimisation in the Process Industries: Closing the Loop». *Can. J. Chem. Eng.* [Acceptat]

PUIGJANER, L.; PAN, Y. G.; VELO, E. (1995). «Fluidized Bed Gasification of Low Grade Coals and Biomass in Different Mixtures in Pilot Plants Aiming to High Efficiency and Low Emission Processes». *Final Report*, Apas Contract CT92-0001.

REINA, J.; VELO, E.; PUIGJANER, L. (1998). «Kinetic study of the Pyrolysis of Waste Wood». *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 37, p. 4290-4295.

— (2001). «Fluidization of waste wood particles with mechanical agitation of the bed». *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 40, p. 393-397.