



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE DII**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA**

**ANALISI DEI DATI DI FUNZIONAMENTO DI UN  
IMPIANTO DI GASSIFICAZIONE A CIPPATO PER LA  
PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E TERMICA**

Relatore: Prof.ssa Anna Stoppato

Correlatore: Ing. Simone Michieletto

Laureando: Matteo Zanlorenzi

Matricola: 1134541

ANNO ACCADEMICO: 2017/2018



# ABSTRACT

L'obiettivo di questa tesi è la descrizione di un impianto a gassificazione di cippato per la produzione di energia elettrica e termica. Inizialmente si descrive la biomassa lignocellulosica, la sua disponibilità e i parametri tramite cui valutarne la qualità. Successivamente si passa alla descrizione del processo di gassificazione e alle varie tipologie di gassificatori presenti in commercio, evidenziandone le caratteristiche. Nel terzo capitolo si prende in considerazione un impianto esistente, descrivendone i vari componenti e i dati di funzionamento; si vedrà come sfortunatamente questo impianto non è mai riuscito a funzionare in maniera continuativa e si inizierà la descrizione dei vari problemi avuti. Nel capitolo successivo si cercherà di esporre tutti i problemi che queste tipologie di impianti hanno, soffermandoci sui TAR; inoltre si vedrà come si è cercato di agire nell'impianto oggetto della tesi per ridurre le problematiche. Nell'ultimo capitolo, infine, si vedrà come sia possibile il riutilizzo di una componente di scarto dell'impianto, cioè le ceneri: è possibile certificare questa sostanza per utilizzarla come ammendante per il suolo e ottenere un vantaggio dal punto di vista economico e ambientale.



# INDICE

## Indice

**Introduzione**.....7

**Capitolo 1: Biomassa lignocellulosica come fonte energetica**...9

1.1: Sfruttamento delle biomasse

1.1.1: Classificazione delle biomasse

1.1.2: Utilizzo energetico delle biomasse

1.1.3: Panoramica italiana

1.2: Biomassa lignocellulosica

1.2.2: Struttura della biomassa

1.2.3: Caratteristiche della biomassa

1.3: Caratterizzazione dei combustibili legnosi

1.3.1: Valutazione della qualità

1.3.2: Tipi di combustibile legnoso

1.3.3: Preparazione della biomassa

**Capitolo 2: La gassificazione di biomassa**.....29

2.1: Storia della gassificazione

2.2: Processo di gassificazione

2.2.1: Differenze tra gassificazione e combustione

2.2.2: Fase di essicamento

2.2.3: Fase di pirolisi

2.2.4: Fase di ossidazione

2.2.5: Fase di riduzione

2.3: Tipologie di gassificatori

2.3.1: Gassificatori a letto fisso

2.3.1.1: Gassificatori a letto fisso downdraft (equicorrente)

2.3.1.2: Gassificatori a letto fisso updraft (controcorrente)

2.3.2: Gassificatori a letto fluido

**Capitolo 3: Descrizione dell'impianto e analisi dei dati.....43**

3.1: Componenti dell'impianto

3.2: Descrizione del processo

3.3: Dati di processo

3.3.1: Produzione a regime

3.3.2: Analisi dei dati di funzionamento effettivi

**Capitolo 4: Criticità di un impianto a gassificazione.....59**

4.1: Problematiche più comuni

4.1.1: Problemi legati alla purezza del syngas

4.2: I TAR

4.2.1: Effetto delle condizioni operative

4.2.2: Metodi conosciuti per la rimozione dei TAR

4.2.2.1: Cracking termico

4.2.2.2: Cracking catalitico

4.2.2.3: Tecniche di rimozione fisica del TAR

4.2.3: Metodi sperimentali per la rimozione dei TAR

4.3: Problematiche dell'impianto

4.3.1: Manutenzione dell'impianto

4.3.2: Soluzioni adottate e future

**Capitolo 5: Il biochar.....79**

5.1: Cos'è il biochar

5.1.1: Effetti benefici per il terreno

5.1.2: Effetti benefici per l'ambiente

5.2: Iter tecnico per la certificazione del biochar

**Conclusioni.....97**

**Bibliografia.....99**

# INTRODUZIONE

Prima di presentare questa tesi, è doveroso fare una premessa. L'idea iniziale era quella di svolgere in un impianto già esistente un'analisi tecnico-economica sfruttando i dati di funzionamento dell'impianto e i flussi di cassa. La situazione trovata però nell'impianto ci ha fatto pensare, a me e ai dipendenti di Econsulenze, la società che si è occupata della gestione dell'impianto, di valutare i vari problemi dell'impianto e cercare delle soluzioni per risolverli nell'immediato o nel futuro.

Il problema dell'aumento della domanda energetica e dei cambiamenti climatici ha portato alla ricerca di una diversificazione di fonti energetiche e un simultaneo sviluppo delle fonti rinnovabili: il legno sembra soddisfare entrambe queste richieste e può essere sfruttato in vari modi. Il sistema più semplice per produrre energia elettrica dal legno è utilizzandolo come alimentazione in caldaie di impianti funzionanti con cicli a vapore, quindi tramite la combustione della biomassa. La gassificazione è un sistema alternativo, più raffinato che sfrutta in modo diverso l'energia chimica delle biomasse. È un processo che a differenza della combustione avviene in presenza di poco ossigeno. Se fossimo in completa assenza di ossigeno parleremmo di pirolisi. In questa tesi ci si concentrerà sulla gassificazione del legno, un processo che sta iniziando a essere sfruttato da pochi anni in Italia. Si descriveranno funzionamento, criticità e processi correlati di un impianto per la produzione congiunta di energia elettrica e termica.

Il mio lavoro di tesi è stato svolto presso la società Econsulenze S.r.l. che si occupa di progettazione, consulenza e gestione principalmente appunto di impianti di gassificazione di cippato e di impianti a teleriscaldamento. Il focus del mio lavoro di stage è stato rivolto verso l'impianto di Nove (VI), un impianto fin da subito problematico da gestire, con un gassificatore sperimentale da 99 kW<sub>el</sub>.

Si partirà da una panoramica sull'utilizzo del legno come fonte energetica descrivendo principalmente il suo utilizzo nella gassificazione; quindi si parlerà del processo vero e proprio di gassificazione della biomassa con le varie tipologie di reattori presenti in commercio. Successivamente la tesi si concentrerà sulla descrizione dei dati di funzionamento dell'impianto oggetto della tesi: sono dati che rappresentano un funzionamento

estremamente claudicante che denota molteplici problemi. Nel quarto capitolo si parlerà delle tecnologie che si utilizzano in commercio per eliminare o ridurre i problemi di questi impianti, soprattutto per l'abbattimento dei TAR, principale problema; inoltre si descriveranno le tecniche adottate per l'impianto di Nove per cercare di limitare i composti dannosi. Si utilizzerà l'ultimo capitolo, infine, per parlare del biochar e dei suoi potenziali vantaggi dal punto di vista economico e ambientale.



# CAPITOLO 1

## BIOMASSA LIGNOCELLULOSICA COME FONTE ENERGETICA

Con il termine biomassa si intende un vasto spettro di materia organica, sia di origine vegetale che animale, che comprende la parte biodegradabile dei prodotti e dei residui provenienti dall'agricoltura, dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, reflui zootecnici nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali ed urbani.

In questo capitolo si parlerà inizialmente della fonte energetica biomassa in generale, prendendo in considerazione lo sviluppo che questa fonte di energia rinnovabile ha avuto negli ultimi anni e in che posizione si colloca nella situazione energetica italiana, per poi descrivere più nel dettaglio la biomassa legnosa, valutandone provenienza e metodi di utilizzo.

### 1.1 Sfruttamento delle biomasse

L'interesse nei confronti della biomassa è esponenzialmente cresciuto negli anni. Dopo essere stata nell'antichità la fonte più sfruttata dall'uomo, se non l'unica, venne sostituita dai combustibili fossili che permettevano una produzione più lineare e con alti rendimenti. Negli ultimi anni, a causa dei problemi legati alle fonti fossili, cioè l'impatto ambientale e la loro sempre più scarsa presenza nel suolo, le biomasse sono tornate a essere considerate un'importante fonte energetica.

La biomassa rappresenta una forma di accumulo dell'energia solare: tramite la fotosintesi le piante convertono l'energia dei raggi solari in energia chimica e riescono a immagazzinarla sotto forme di molecole a elevato contenuto energetico. Possiamo così considerare la biomassa come risorsa rinnovabile e inesauribile se utilizzata nei giusti tempi, cioè il ritmo di impiego non deve superare la capacità di rigenerazione dei vegetali. Oltre agli ovvi vantaggi ambientali che l'utilizzo di questa fonte comporta,

dato che il rilascio di CO<sub>2</sub> durante l'utilizzo è circa pari all'assorbimento che avviene durante la fotosintesi clorofilliana, si va incontro a veri vantaggi economici e politici: essendo la biomassa molto versatile si ha l'opportunità di utilizzare questa fonte in energia in ogni paese, evitando così la dipendenza da quei pochi paesi possessori delle fonti fossili, politicamente poco stabili per lunghi periodi.

Lo sfruttamento della biomassa permette poi di superare due limiti presenti nei settori eolico e fotovoltaico: lo stoccaggio dell'energia e l'intermittenza della fonte. Infatti utilizzando questo tipo di FER si ha la possibilità di accumulare energia in depositi di materiale, si pensi ad esempio agli impianti a combustione di pellet, e si ha una continuità di generazione elettrica, diversamente appunto dal caso dello sfruttamento dell'energia solare in cui si è ancora altamente dipendenti dalle condizioni meteorologiche.

Esistono anche degli svantaggi collegati allo sfruttamento delle biomasse: ad esempio si dovrebbero utilizzare solo campi abbandonati per le coltivazioni riservate allo sfruttamento energetico e non terreni che potrebbero essere destinati all'alimentazione; inoltre le biomasse hanno un grado di umidità molto elevato e un potere calorifico inferiore rispetto ai tradizionali combustibili, necessitano quindi di diversi processi di trattamento e quindi spese energetiche supplementari; infine l'abbattimento di foreste per creare biomasse legnose va a inficiare la capacità del sistema boschivo di trattenere anidride carbonica.

### *1.1.1 Classificazione delle biomasse*

La principale classificazione divide le biomasse in residuali, residui e scarti di origine forestale, agricolo e industriale, e non residuali, quelle cioè derivanti da apposite colture energetiche.

Le biomasse residuali presentano il doppio vantaggio di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e di alleggerire le problematiche ambientali legate allo smaltimento dei residui in discarica, prevenendo la liberazione di metano in atmosfera derivante dai processi di degradazione. Si possono dividere a loro volta le biomasse residuali in base al comparto di provenienza: quindi quelle provenienti dall'agricoltura; le piante

oleaginose e alcoligene per la produzione di biodiesel e bioetanolo, i residui forestali; quelli industriali ossia gli scarti provenienti dall'industria del legno e della carta o dall'industria agroalimentare; i reflui zootecnici e i rifiuti urbani, cioè la parte organica dei rifiuti solidi e la parte vegetale.

Le biomasse non residuali sono classificabili in tre tipologie: colture alcoligene caratterizzate da un alto contenuto zuccherino dalle quali si produce etanolo; colture oleaginose aventi un alto contenuto di olio vegetale che può essere utilizzato direttamente o trasformato in biodiesel; colture lignocellulosiche, grandi produzioni di sostanza secca destinata a diversi fini energetici. Per quanto sia apprezzabile il doppio vantaggio derivante dalle biomasse residuali, un contributo significativo delle biomasse nel consumo mondiale di energia non può prescindere dall'utilizzo delle colture energetiche su larga scala.

### *1.1.2 Utilizzo energetico delle biomasse*

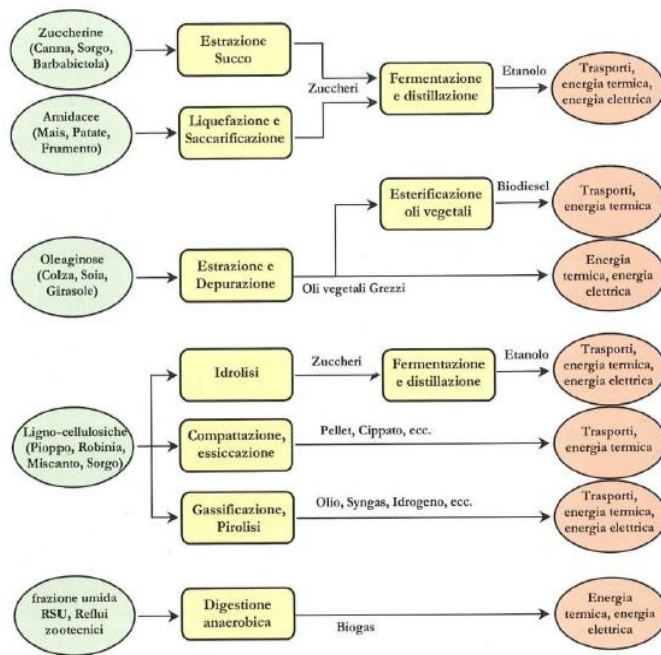
I processi di conversione della biomassa possono essere raggruppati in due diverse categorie: processi di conversione biochimica, come la fermentazione alcolica e la digestione anaerobica, per ricavare energia attraverso reazioni chimiche dovute alla presenza di enzimi e microrganismi e processi di conversione termochimica, come la combustione, la gassificazione e la pirolisi, che utilizzano l'azione del calore per sviluppare reazioni chimiche necessarie a trasformare la materia in energia. Si possono anche impiegare processi del tipo chimico-fisico per l'estrazione di oli vegetali grezzi da particolari specie vegetali o residui ricchi di oli.

La direzione da prendere verso una o l'altra soluzione è data dal rapporto carbonio/azoto e dal tenore di umidità alla raccolta: se C/N è inferiore a 30 e l'umidità supera il 30% allora solitamente si utilizzano processi biochimici. I processi termochimici diventano più interessanti quando il tenore di umidità è basso: questo poiché interessa l'azione del calore e il potere calorifico della biomassa è inversamente proporzionale al grado di umidità.

Tipologia del Processo	C/N	Umidità	Processo di conversione	Prodotto principale
Biochimico	<30	>30%	Fermentazione Digestione anaerobica Digestione aerobica	Bioetanolo Biogas Energia termica
Termochimico	>30	<30%	Combustione Gassificazione Pirolisi	Energia termica Gas di sintesi Gas di pirolisi, olio
Fisico-chimico	-	-	Estrazione di oli Transesterificazione Compattazione	Olio vegetale Biodiesel Pellets

**Figura 1.1: Processi di conversione delle biomasse**

Lo schema riportato sotto descrive schematicamente le principali filiere di conversione energetica delle biomasse. Molto utilizzate sono quelle che hanno origine da specie vegetali ad alto contenuto di zuccheri o amidi con cui si produce etanolo tramite fermentazione come sostituto della benzina o per la produzione di energia elettrica/termica in sistemi di generazione elettrica ad alta efficienza e basso impatto ambientale. Dalle colture oleaginose invece si ricava tramite un processo chimico-fisico il biodiesel, prodotto già altamente disponibile a livello industriale. L'utilizzo della biomassa lignocellulosica origina diverse filiere energetiche a seconda che si utilizzi un procedimento bio o termochimico: possiamo infatti avere la produzione di etanolo tramite idrolisi, la produzione di pellet o cippato da utilizzare poi come combustibile oppure quella di syngas. infine l'utilizzo dei reflui zootecnici o di RSU permette di alimentare la digestione anaerobica con conseguente produzione di biogas.



Principali filiere di conversione energetica delle biomasse.

Figura 1.2: Percorso da biomassa a prodotto finale

### 1.1.3 Panorama italiano

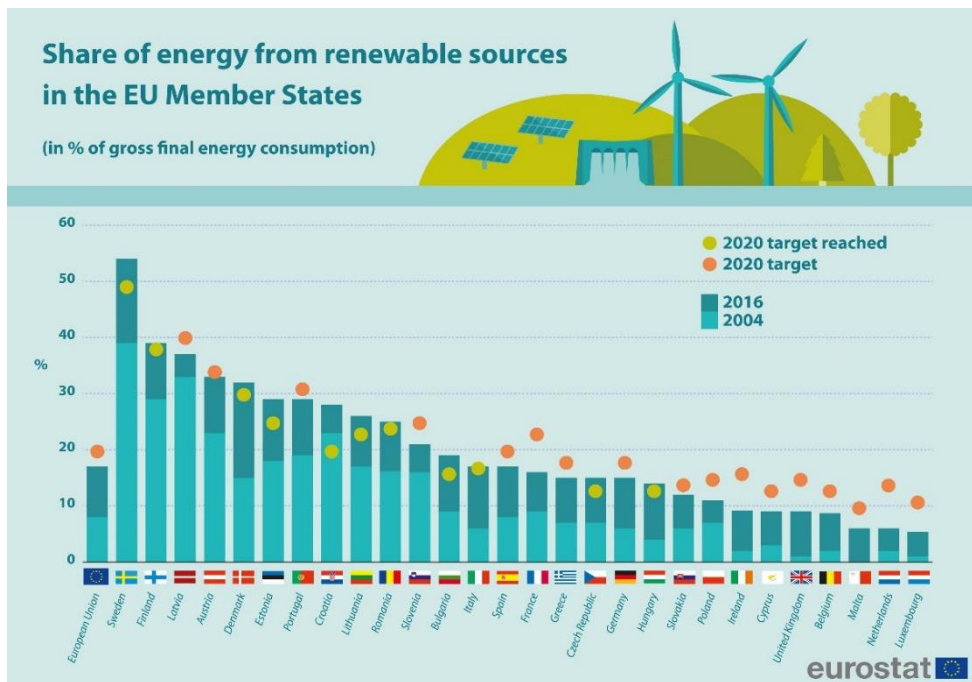


Figura 1.3: Consumi finali di energia da FER

Utilizzando i dati messi a disposizione dal GSE e da Eurostat è possibile descrivere la situazione italiana per quanto riguarda l'utilizzo delle biomasse e in generale delle fonti rinnovabili nel consumo finale lordo di energia.

Innanzitutto è interessante vedere come sia messa l'Italia nel percorso di completamento degli obiettivi al 2020 definiti dalla direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio e recepiti con il Decreto Legislativo n.28 del 3 marzo 2011. Gli obiettivi prefissati per l'Italia sono il raggiungimento di una quota dei consumi finali lordi complessivi di energia coperta da fonti rinnovabili pari al 17% e il raggiungimento di una quota dei consumi finali lordi di energia nel settore trasporti coperta da fonti rinnovabili pari al 10%.

Quota FER al 2016	Italia	Europa (EU28)
Quota FER sui consumi energetici totali	17,41%	17,04%
Quota FER nel settore Trasporti	7,24%	7,13%
Quota FER nel settore Elettrico	34,01%	29,60%
Quota FER nel settore Termico	18,88%	19,06%

Si può notare dalla tabella soprastante come l'Italia abbia già raggiunto nel 2016 il proprio obiettivo riguardo i consumi lordi coperti da FER e sia anzi più virtuosa della media europea; per quanto riguarda i trasporti, i risultati del 2016 sono in linea col percorso tracciato dal PAN (Piano d'Azione Nazionale per le energie rinnovabili), come si può desumere dai grafici del GSE. Per quanto riguarda gli obiettivi nel settore elettrico e termico, questi non sono vincolanti per la direttiva europea; prevedono comunque un utilizzo di energia rinnovabile pari al 26,4% nel settore elettrico e pari al 17,1% nel settore termico, obiettivi già ampiamente raggiunti nel 2016. Il nostro paese si posiziona al 3° posto tra i paesi dell'EU28 in termini di consumi di energia da FER, solo dietro a Germania e Francia. Tra il 2005 e il 2016 le FER in Europa sono aumentate di 85 Mtep; in Italia i consumi finali lordi di energia da FER sono raddoppiati in questo periodo, passando da 10,7 Mtep a 21.

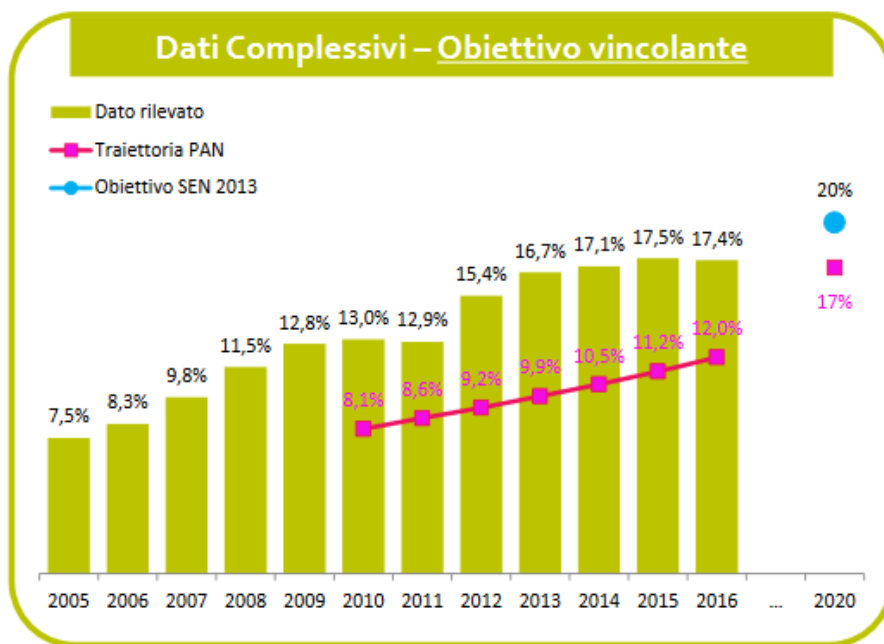


Figura 1.4: Obiettivo consumi energetici finali coperti da FER complessivi

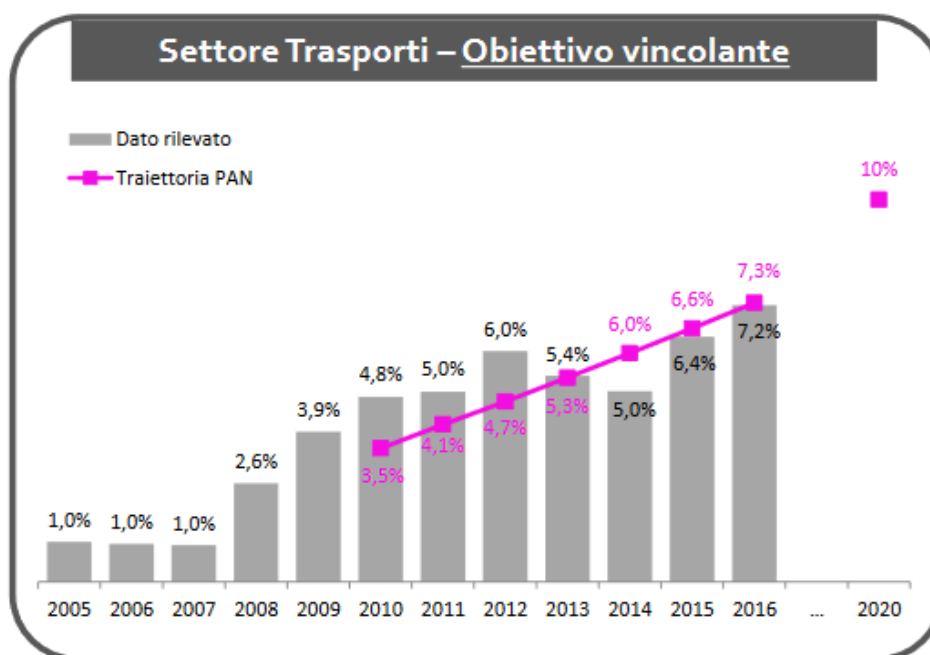


Figura 1.5: Obiettivo consumi finali energetici da FER nei trasporti

Il consumo finale lordo di energia rilevato in Italia nel 2016 ammonta a 121,1 Mtep; di questi, 21,1 Mtep sono rappresentati da energia da fonti rinnovabili. Questi 21,1 Mtep si dividono tra i tre settori termico, elettrico e dei trasporti: la metà esatta dei consumi si concentra nel settore termico (10,5 Mtep), una parte consistente nel settore elettrico (9,5 Mtep), la restante parte va nel settore dei trasporti con l'utilizzo dei biocarburanti.

Serviamoci del grafico sottostante per descrivere più nel dettaglio la situazione delle biomasse. Dei 121,1 Mtep che rappresentano i consumi finali di energia, il 17,41% è rappresentato dalle fonti rinnovabili. Il 48,9% di questa quota è rappresentato da consumi finali di energia da biomasse: in questa quota troviamo bioliquidi sostenibili, biomasse solide, l'utilizzo diretto dei rifiuti, biogas. Abbiamo quindi che di 121,1 Mtep di consumi energetici, 10,3 Mtep provengono dall'utilizzo di biomasse come combustibile, l'8,49%. I risultati sono in linea con EU28, in quanto la quota di energia primaria consumata prodotta da biomasse sul totale di quella prodotta da FER è rappresentata dal 59,3% (2016)

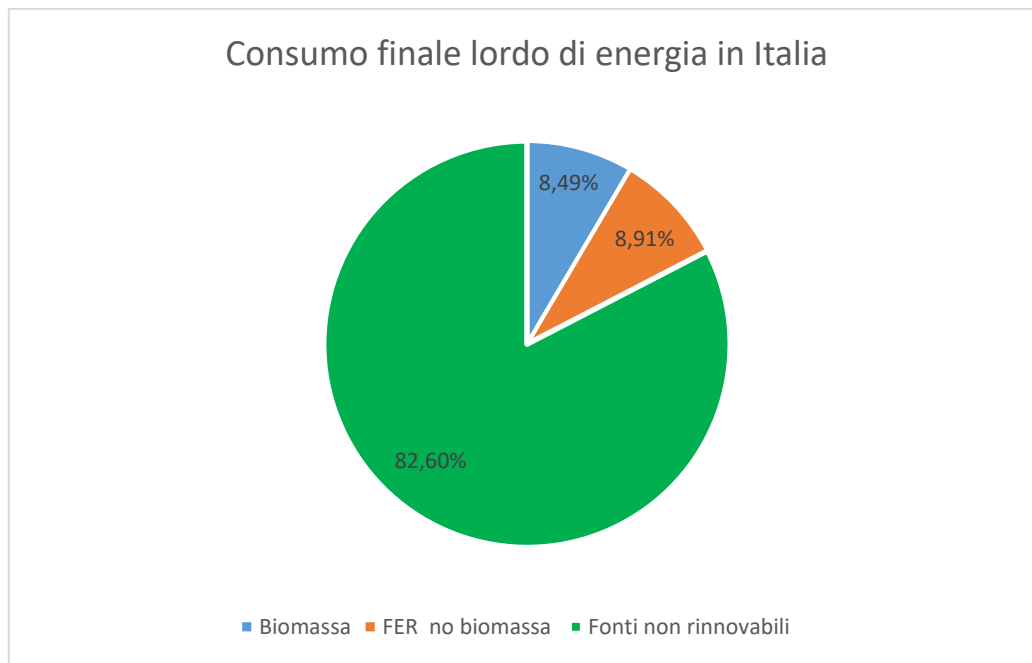


Figura 1.6: Consumo finale lordo di energia in Italia



## 1.2 Biomassa lignocellulosica

L'utilizzo principale delle biomasse lignocellulosiche era quello di sostituire i combustibili fossili nelle caldaie e nei generatori di vapore, esse dunque subivano quindi una combustione. Recentemente invece si è spinto l'utilizzo di questa biomassa in processi di gassificazione e pirolisi, così da ottenere combustibili gassosi o liquidi da utilizzare in sistemi di generazione elettrica di piccola taglia e molto efficienti.

La biomassa ligno-cellulosica è la parte fibrosa non amidacea di una pianta ed è costituita da cellulosa, emicellulosa e lignina; questi tre elementi formano la parete cellulare. Oltre a questa la biomassa si compone di ceneri, la parte inorganica, e di estrattivi, presenti nei tessuti vegetali tipo proteine, oli, amido, zuccheri.

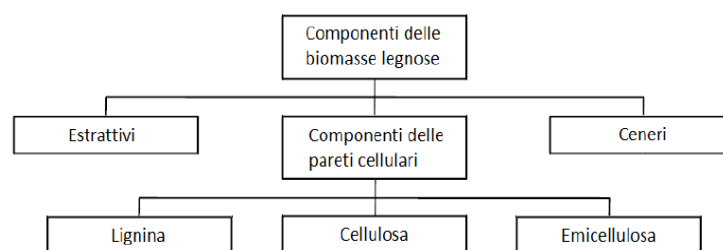


Figura 1.7: Componenti biomassa lignocellulosica

### 1.2.1 Disponibilità materia prima

In questo paragrafo si vuole descrivere la situazione italiana circa la numerosità di boschi e foreste e se questi sono abbastanza presenti da permettere l'utilizzo dei boschi come colture energetiche.

La superficie forestale nazionale è pari a 10.467.533 ha, corrispondente al 34,7% della superficie territoriale. Di questi, l'83,7% sono rappresentati dal bosco, il resto sono arbusteti principalmente. Quindi il 29,1% del territorio italiano è ricoperto da boschi. Questo periodo è il più selvoso della storia italiana degli ultimi mille anni almeno: si conta che gli italiani abbiano raggiunto la cifra record di 210 alberi a testa. Questo fatto crea un problema per l'agricoltura: dal 1971 al 2011 la natura si è ripresa circa 3,5 milioni di

ettari, l'edilizia 1,5 milioni mentre i campi coltivabili sono diminuiti di circa 5 milioni di ettari. D'altra parte è vero che con l'avvento della meccanizzazione agricola molti contadini hanno cambiato attività e si è aumentata l'efficienza del singolo terreno. È quindi una notizia positiva l'avanzata non controllabile del bosco? Non proprio, in quanto non è il risultato di una politica mirata a questo, ma anzi di una noncuranza. Infatti non solo negli ultimi tempi è aumentata la superficie boschiva, ma anche la densità: c'è molto meno spazio tra un albero e un altro, una foresta in tali condizioni è difficilmente difendibile in caso di incendio e di attacchi da parte di parassiti.

Sarebbe quindi possibile e anzi utile rendere parte di questi boschi coltura energetica, trasformando una parte del comparto forestale in combustibile, utilizzandolo in caldaie, gassificatori, pirolizzatori.

La gestione ordinaria dei boschi costituirebbe quindi la principale fonte di approvvigionamento di legna utilizzabile come combustibile ma non l'unica; si utilizza infatti anche il comparto agricolo per creare legna da ardere o cippato da utilizzare negli impianti: possiamo trovare arboreti da energia, formazioni arboree lineari costituite da latifoglie, cedui a corta rotazione, specie forestali perenni con alto tasso di accrescimento, potature di vigneti e oliveti, residui forestali, agricoli e agroindustriali.

I cedui a corta rotazione (SRF – Short rotation forestry) sono le colture più idonee al processo della gassificazione e vengono piantati con schemi e procedure tali da poter impiegare macchinari sia durante l'accrescimento che durante la raccolta. Le specie più utilizzate sono il pioppo, il salice, l'eucalipto e la robinia e permettono cicli di taglio che variano da 1 a 4-5 anni. Si cercano di evitare le colture di specie erbacee in quanto comportano un alto contenuto di ceneri.

Anche l'industria del legno produce molta biomassa utile ai fini energetici. Gli scarti della lavorazione possono essere scarti di legno vergine, di legno trattato o di legno impregnato. Per l'utilizzo che interessa nella nostra trattazione, quindi quello energetico, solo i residui non trattati chimicamente o trattati con prodotti non contenenti metalli pesanti vanno bene. L'industria italiana produce molti scarti della lavorazione del legno: l'ammontare è di circa 4,5 milioni di tonnellate all'anno; di queste ben il 55% non è trattato.

Distretto territoriale	Bosco		Altre terre boscate		Superficie forestale totale		Superficie territoriale (ha)
	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	superficie (ha)	ES (%)	
Piemonte	870 594	1.1	69 522	7.2	940 116	1.0	2 539 983
Valle d'Aosta	98 439	3.1	7 489	21.4	105 928	2.7	326 322
Lombardia	606 045	1.4	59 657	8.2	665 703	1.2	2 386 285
Alto Adige	336 689	1.6	35 485	9.9	372 174	1.3	739 997
Trentino	375 402	1.4	32 129	10.3	407 531	1.1	620 690
Veneto	397 889	1.7	48 967	8.3	446 856	1.4	1 839 122
Friuli V.G.	323 832	1.7	33 392	9.9	357 224	1.3	785 648
Liguria	339 107	1.5	36 027	9.5	375 134	1.1	542 024
Emilia Romagna	563 263	1.4	45 555	8.5	608 818	1.2	2 212 309
Toscana	1 015 728	1.0	135 811	4.9	1 151 539	0.7	2 299 018
Umbria	371 574	1.4	18 681	13.4	390 255	1.2	845 604
Marche	291 394	1.8	16 682	12.8	308 076	1.6	969 406
Lazio	543 884	1.4	61 974	7.3	605 859	1.2	1 720 768
Abruzzo	391 492	1.5	47 099	7.6	438 590	1.3	1 079 512
Molise	132 562	2.9	16 079	14.2	148 641	2.3	443 765
Campania	384 395	1.9	60 879	7.3	445 274	1.5	1 359 025
Puglia	145 889	3.4	33 151	10.0	179 040	2.6	1 936 580
Basilicata	263 098	2.4	93 329	5.6	356 426	1.5	999 461
Calabria	468 151	1.8	144 781	4.6	612 931	1.1	1 508 055
Sicilia	256 303	2.7	81 868	6.2	338 171	1.9	2 570 282
Sardegna	583 472	2.0	629 778	1.8	1 213 250	0.8	2 408 989
Italia	8 759 200	0.4	1 708 333	1.3	10 467 533	0.3	30 132 845

Figura 1.8: Disponibilità di boschi sulla superficie italiana

### 1.2.2 Struttura della biomassa

La composizione chimica media di una biomassa legnosa sulla sostanza secca, cioè il materiale senza considerare il grado di umidità, si divide in 20-30% lignina che conferisce rigidità alla pianta e ha un alto potere calorifico (circa 6.000 kcal/kg), 50% cellulosa, principale componente del legno con alto potere calorifico (3.900 Kcal/kg) e la restante parte, 10-30%, emicellulosa che ha un potere calorifico più modesto.

Rispetto alla composizione elementare che si trova attraverso l'analisi elementare, invece, il legno è composto principalmente da carbonio (circa 50%), ossigeno (41-45%) e idrogeno (5-7%), più tracce di azoto, zolfo e ceneri. In linea generale un alto contenuto di carbonio e idrogeno definisce un alto potere calorifico; al contrario un'elevata presenza di ossigeno, azoto e ceneri produce l'effetto opposto.

<b>Composizione</b>	
Cellulosa	50% della ss
Emicellulosa	10-30% della ss
Lignina	20-30% della ss
<b>Caratteristiche fisiche ed energetiche</b>	
Umidità	25-60% sul t.q.
Densità di massa	800-1.120 kg/m <sup>3</sup>
p.c.i. (considerando un'umidità del 12-15%)	3.600-3.800 kcal/kg

ss = sostanza secca

Figura 1.9: Composizione e caratteristiche biomassa lignocellulosica

	C	H	O	N	S	Cl	Ceneri	PCI <sub>0</sub>
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(MJ/kg)
Legna di abete	49,00	5,98	44,75	0,05	0,01	0,01	0,2	18,74
Legna di pioppo	48,45	5,85	43,69	0,47	0,01	0,10	1,43	18,19
Legna di faggio	51,64	6,26	41,45	-	-	-	0,65	18,63
Legna di quercia	49,98	5,38	43,13	0,35	0,01	0,04	1,61	18,33
Legna di eucaliptus	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	0,13	0,72	18,23
Paglia di frumento	43,20	5,00	39,40	0,61	0,11	0,28	11,40	16,49
Paglia di riso	41,78	4,63	36,57	0,70	0,08	0,34	15,90	15,34
Stocchi di mais	43,65	5,56	43,31	0,61	0,01	0,60	6,26	16,52
Residui potatura vite	47,14	5,82	43,03	0,86	0,01	0,13	3,01	17,86
Residui potatura mandorlo	51,30	5,29	40,90	0,66	0,01	0,04	1,80	19,93
Lolla di riso	40,96	4,30	35,86	0,40	0,02	0,12	18,34	15,27
Gusci di mandorla	44,98	5,97	42,97	1,16	0,02	-	5,60	18,17
Noccioli pesca	53,00	5,90	39,14	0,32	0,05	-	1,59	19,62
Noccioli oliva	48,81	6,23	43,48	0,36	0,02	-	1,10	21,12
Sanse esauste	32,73	5,29	37,82	-	0,64	-	12,52	15,50

Figura 1.10: Composizione elementare delle principali biomasse legnose

### 1.2.3 Caratteristiche della biomassa

Le caratteristiche più importanti della biomassa per il suo utilizzo in caldaie o gassificatori sono l'umidità e il potere calorifico. Altre caratteristiche sono la composizione chimica e fisica, la densità, la forma e dimensione delle particelle, la composizione e la temperatura di fusione delle ceneri. L'umidità e il potere calorifico sono due caratteristiche strettamente correlate e assumono un'importanza chiave nella definizione del valore commerciale e energetico della biomassa.

Per definire i vari parametri della biomassa si utilizza l'analisi approssimata con cui è possibile calcolare la quantità di umidità, le sostanze volatili, le ceneri e il carbonio fisso.

Le biomasse rispetto al carbone hanno una più alta percentuale di sostanze volatili: per questo rendono più semplice il processo di gassificazione.

L'umidità della biomassa esprime il suo contenuto d'acqua e può essere valutata sulla massa tal quale (secco + umido) o sul secco:

$$U = \frac{m_a}{m_a + m_s} \quad U = \frac{m_a}{m_s}$$

con  $m_a$  massa d'acqua e  $m_s$  massa di sostanza secca.

Il componente utile della biomassa è la componente secca, l'acqua è un componente indesiderato: si definisce allora il rapporto  $R_m$  fra la massa della biomassa tal quale e la massa di sostanza secca. Questo rapporto è molto importante in quanto rappresenta l'incremento dei quantitativi di biomassa tal quale da raccogliere, trasportare e stoccare per unità di sostanza secca; è un'informazione utilissima poiché i costi di raccolta, trasporto e stoccaggio sono dell'ordine del 20-40% dei costi totali di approvvigionamento di biomasse da colture energetiche e del 100% per biomasse residuali:

$$R_m = \frac{m_a + m_s}{m_s} = 1 + U_0 = \frac{1}{1 - U}$$

Il rapporto è circa pari a 2 per la biomassa legnosa che ha valori tipici di umidità alla raccolta del 50-55%, mentre è pari a 5 per biomasse erbacee che hanno un grado di umidità ben più elevato.

L'altro parametro fondamentale è il potere calorifico: lo si valuta a partire dalla biomassa secca mediante un calorimetro che fornisce il valore dell'energia termica liberata dalla combustione. Si misura così il potere calorifico superiore espresso su base secca ( $PCS_0$ ): si ottiene un potere calorifico superiore poiché viene recuperato parte del calore latente di condensazione del vapore che è contenuto nei fumi. Possiamo trovare valori di questo PC per biomasse secche tra 19 e 22 MJ/kg. Risulta però più interessante il valore del potere calorifico inferiore (PCI) perché la condensazione dei fumi di combustione è vietata di norma. Il PCI si valuta sottraendo al  $PCS_0$  il calore di condensazione dell'acqua:

$$PCI_0 = PCS_0 - 9 H r$$

con  $PCI_0$  potere calorifico inferiore sul secco,  $r$  calore di condensazione dell'acqua e  $H$  rappresenta la frazione di massa di idrogeno. Il 9 sta a rappresentare il fatto che il quantitativo di acqua prodotto è nove volte quello dell'idrogeno. La differenza tra  $PCS_0$  e  $PCI_0$  è dell'ordine di 1-1,5 MJ/kg: valori tipici del  $PCI_0$  sono quindi 18-20 MJ/kg.

L'energia che però interessa veramente dal punto di vista pratico è il potere calorifico inferiore sul tal quale e non sul secco (PCI). Possiamo calcolare questo valore abbastanza facilmente tenendo conto del fatto che l'energia chimica relativa alla massa di sostanza tal quale è data dall'energia della sostanza secca diminuita del calore di vaporizzazione dell'acqua:

$$(m_a + m_s) PCI = PCI_0 m_s - m_a r$$

$$PCI = (1 - U) PCI_0 - U r = PCI_0 - U (PCI_0 + r)$$

Il PCI, come si può notare dal grafico nella pagina seguente, diminuisce linearmente con l'aumento dell'umidità, addirittura si annulla per valori di  $U$  dell'ordine di 88-90%. Per la combustione quindi valori di umidità sopra il 65-70% non sono sostenibili e pure per la gassificazione sono valori limiti per cui il processo non può sostenersi.

Per capire quanto può incidere l'umidità sul potere calorifico basti pensare che se abbiamo una sostanza con  $PCI_0$  uguale a 18-19 MJ/kg con  $U=10-15\%$  (come per il legno stagionato/essiccato) troviamo un PCI pari a 15-16 MJ/kg;

se l'umidità è invece del 50-55% (legno fresco) troviamo un PCI di 7-8 MJ/kg.

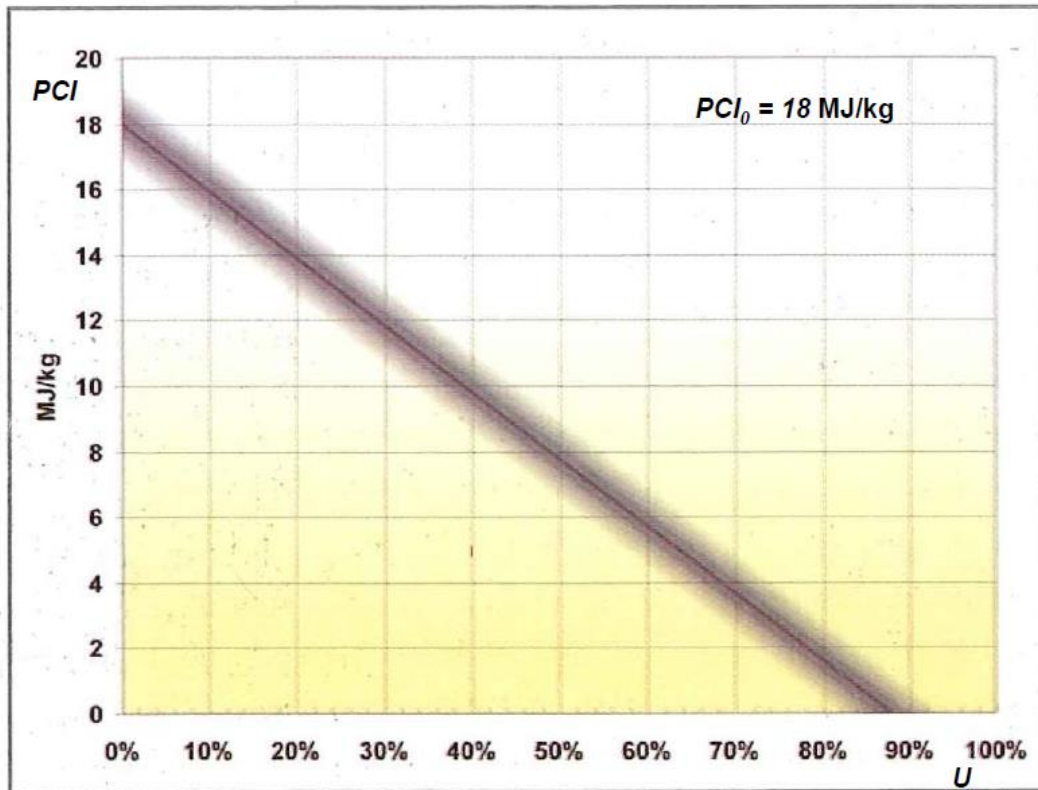


Figura 1.11: Dipendenza reciproca tra PCI e tenore di umidità

Può risultare interessante descrivere altri tre parametri:  $R_H$  definisce il rapporto tra PCI e  $PCI_0$ ,  $R_E$  rappresenta la frazione di energia che può essere effettivamente utilizzata mentre  $R_P$  rappresenta la frazione di energia persa ed è il completamento a 1 del rapporto  $R_E$ .

$$R_H = \frac{PCI}{PCI_0} = 1 - U \left( 1 + \frac{r}{PCI_0} \right)$$

$$R_E = \frac{(m_a + m_s)PCI}{m_s PCI_0} = R_M R_H = \frac{1}{1 - U} \left( 1 - U \left( 1 + \frac{r}{PCI_0} \right) \right)$$

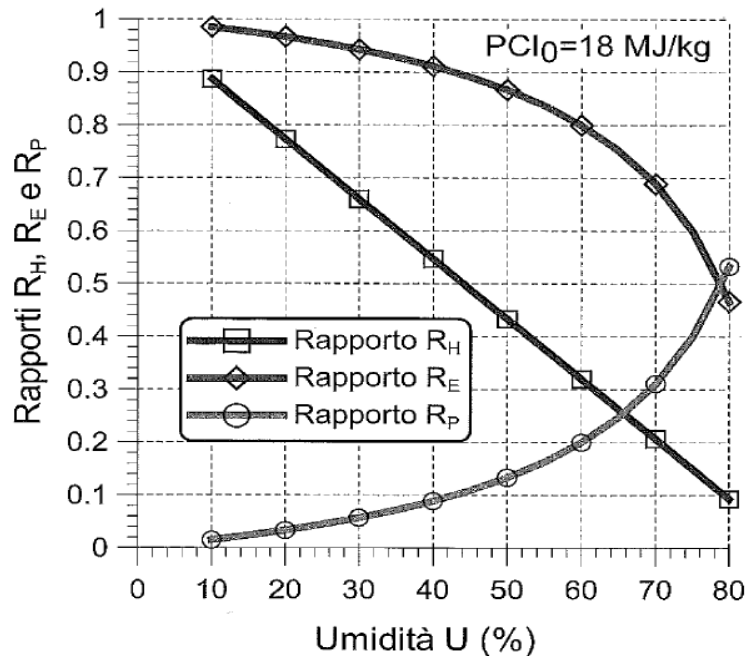


Figura 1.12: Dipendenza dei rapporti  $R_H$ ,  $R_E$  e  $R_P$  da  $PCI_0$  e dal tenore di umidità

Anche il tenore delle ceneri, la parte inorganica alla fine del processo, è un parametro estremamente importante, soprattutto per quanto riguarda la gassificazione: elevati valori di cenere comportano una riduzione del potere calorifico, un aumento dei costi per lo smaltimento e problemi vari legati a incrostazioni, intasamenti, erosioni. Solitamente si ha un tenore di ceneri tra lo 0,5% e 1,5% anche se si può arrivare per biomasse erbacee a valori del 10-15%.

### 1.3 Caratterizzazione dei combustibili legnosi

Le biomasse legnose subiscono un processo di trasformazione tale da conferire a queste particolari caratteristiche fisiche ed energetiche che le rendono utilizzabili in comuni impianti.

Il costo finale della biomassa molto dipende dalle fasi di raccolta, trasporto e preparazione. La raccolta è l'abbattimento delle piante e la loro estrazione fino al loco di accumulo e carico.

Un'altra fase può essere la cippatura della biomassa, in modo tale da ridurre il legno in frammenti di pochi cm. Questo step avviene nel caso in cui non si vogliano ciocchi di legna da ardere o non si voglia trasformare il legno in pellet.



### 1.3.1 Valutazione della qualità

I parametri da valutare sono:

- tenore di umidità della biomassa raccolta: la biomassa deve essere il più possibile secca per non avere una diminuzione troppo eccessiva del potere calorifico;
- concentrazione di elementi minerali: la presenza di questi elementi può provocare corrosioni all'impianto e generare emissioni di NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, HCl e diossina;
- contenuto in ceneri: un alto contenuto di ceneri diminuisce il PCI, aumenta i costi di smaltimento e crea problemi all'impianti come corrosioni e incrostazioni;
- analisi della frazione fibrosa: anche il contenuto in ossigeno dei componenti della biomassa influenza il PCI; la lignina ha valori di potere calorifico elevati proprio perché ha una minor concentrazione di ossigeno; quindi maggior contenuto di lignina significa PCI più elevati.

### 1.3.2 Tipi di combustibile legnoso

A seconda della pezzatura e del metodo di preparazione possiamo avere legna da ardere, cippato o pellet.

Abbiamo all'inizio le fasi di abbattimento e sramatura in bosco (nel caso di colture energetiche), successivamente il legname è trasportato nel sito di lavorazione. La legna in pezzi si misura comunemente in metri steri (ms), un'unità di misura che corrisponde al volume di 1 m<sup>3</sup> di pezzi di legna accatastati in maniera ordinata, comprensivo degli spazi vuoti. Le caratteristiche della legna da ardere pronta all'uso sono: contenuto di umidità circa del 20% e un PCI pari a 14,4 MJ/kg. L'utilizzo della legna da ardere è ormai in declino, si utilizza ancora principalmente a livello domestico.

Il cippato è il legno ridotto in scaglie tramite cippatrice, operazione che si fa per rendere più omogenea la composizione del legno, così da poterlo utilizzare anche con un'alimentazione automatica. Le principali caratteristiche del cippato sono: pezzatura, contenuto idrico e ceneri. La dimensione dei chips è variabile, dipende molto dal tipo di macchina utilizzato. Il cippato deve essere però il più omogeneo possibile per non creare possibili interruzioni durante il processo di combustione. Il tenore di

umidità desiderato è ottenuto dopo un tempo di stoccaggio; la biomassa iniziale deve comunque avere un valore compreso tra il 25 e il 50%, non al di sopra o al di sotto di questa soglia.

Il pellet è invece un combustibile derivante da processo industriale che trasforma la materia prima in piccoli cilindri di diametro tra i 6 e gli 8 mm e lunghezza tra 5 e 40 mm. La materia prima viene pressata e compressa in pellet; il raggiungimento di elevate temperature fa in modo che i materiali che costituiscono il legno si rammolliscano: la lignina può fungere così da collante naturale. Il pellet viene utilizzato nelle stufe, principalmente domestiche; deve essere quindi un legno di ottima qualità: la sola materia prima concessa per la realizzazione del pellet è il legno vergine non contaminato.

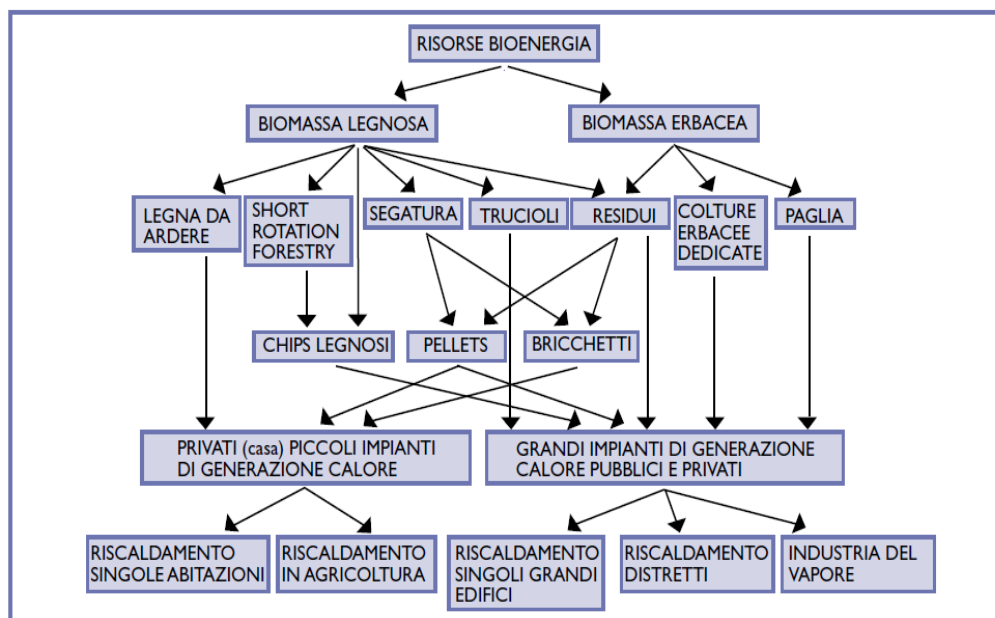


Figura 1.13: Utilità finali dei vari combustibili legnosi

### 1.3.3 Preparazione della biomassa

La filiera della biomassa lignocellulosica segue un percorso comune a tutte le tipologie, sia quindi per le colture energetiche sia per quelle residuali. Il primo stadio è quello della raccolta, successivamente troviamo un pre-trattamento che anticipa il trasporto del materiale, dopo di che c'è un altro pre-trattamento seguito dalla fase di stoccaggio e da quella di conversione per produrre calore e elettricità oppure dei bioprodotto. A seconda del

prodotto che si vuole ottenere, le varie fasi possono subire delle variazioni nel tempo e nel metodo di esecuzione.

L'operazione di essiccazione è fondamentale per ridurre il contenuto di umidità; può avvenire in tre diverse modalità:

- essiccazione naturale della materia prima: la biomassa viene lasciata essiccare in loco e la quantità di umidità dipende dalla durata di questa fase: varia solitamente tra il 40 e il 55% se la biomassa viene lasciata per una stagione, tra il 18 e il 25% se dura invece due stagioni;
- essiccazione naturale della materia lavorata: si utilizza questa tecnica principalmente con il cippato che presenta un alto grado di umidità e lo stoccaggio può avvenire d'estate all'aperto o nei periodi invernali al chiuso; il contenuto d'acqua passa dal 50 al 30%; importante è non avere cumuli di chips troppo alti (non più di 7-8 m): le parti interne si riscaldano e si potrebbero innescare fenomeni di autocombustione;
- essiccazione forzata della materia lavorata: si espone la biomassa a sorgenti di calore in maniera forzata; si riduce chiaramente l'efficienza energetica e si aumentano i costi, si applica quindi solo se l'essiccazione naturale non è sufficiente e impiegando il calore residuo da altri processi.



# CAPITOLO 2

## LA GASSIFICAZIONE DI BIOMASSA

In questo capitolo si vuole descrivere il processo della gassificazione della biomassa legnosa per l'ottenimento del syngas da utilizzare poi come combustibile in un motore elettrico. Per gassificazione si intende un processo termochimico ad elevata temperatura che decompone una sostanza solida in un gas di sintesi (syngas).

Si partirà dalla storia della gassificazione e dalla chimica del processo per poi concentrarsi sulle attuali tecnologie utilizzate nella gassificazione di biomassa legnosa. Questo capitolo è introduttivo alla descrizione dell'impianto preso in esame in questa tesi.

### 2.1 Storia della gassificazione

La gassificazione della biomassa legnosa non è un processo venuto fuori dal nulla negli ultimi anni, anzi è stato sfruttato molto in passato.

Fu sviluppato per la prima volta nell'Ottocento per la produzione di gas per le città e per l'illuminazione pubblica; si usava gassificare il carbone. L'avvento del gas naturale e dell'elettricità rimpiazzarono la gassificazione. Durante la seconda guerra mondiale si pensava che il petrolio stesse finendo e si voleva riservare quei pochi giacimenti rimasti per fini militari; vennero costruiti allora quasi un milione di gassificatori in tutta Europa per alimentare generatori elettrici o mezzi di trasporto. Finita la guerra e con la conseguente diminuzione dei prezzi del petrolio per l'aumentare della disponibilità, si iniziò ad abbandonare queste tecnologie. La gassificazione tornò in auge dopo la crisi petrolifera del 1973.

Il problema però fu proprio che il ritorno di questo processo era sempre correlato all'andamento dei prezzi e quindi della disponibilità dei combustibili fossili: questo portò a non spendere mai troppo tempo e denaro nella ricerca e nello sviluppo commerciale della tecnologia.

Negli ultimi anni si stanno sviluppando diverse nuove tecnologie riguardo la gassificazione della biomassa, per impianti di taglia più o meno grande.

## 2.2 Processo di gassificazione

La gassificazione è un processo chimico endotermico grazie a cui combustibili solidi ricchi di carbonio vengono convertiti in un gas di sintesi. Si possono convertire quindi sostanze organiche di poco valore in un prodotto versatile, dal maggior potere calorifico e pulito. Il gas prodotto è una miscela i cui componenti principali sono monossido di carbonio (CO), biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>) e idrogeno (H<sub>2</sub>) con tracce di metano (CH<sub>4</sub>) più o meno consistenti a seconda della materia prima utilizzata. Inoltre si ottengono anche ammoniaca, acido solforico e acido cloridrico più una parte non gassificabile composta da ceneri e polveri. Le percentuali possono essere molto variabili e dipendono fortemente dalla materia utilizzata, dall'umidità, dalla configurazione del reattore, dal tipo di agente gassificante e dalle condizioni operative.

Semplificando, la gassificazione può essere suddivisa in 4 fasi: essiccamento, pirolisi, riduzione, ossidazione. Non si deve però pensare a quattro fasi distinte che avvengono una in successione all'altra, in quanto succedono anche contemporaneamente all'interno di un reattore in regime. La suddivisione viene studiata a livello teorico per cercare di capire quanto le condizioni operative influenzino ciascuna fase.

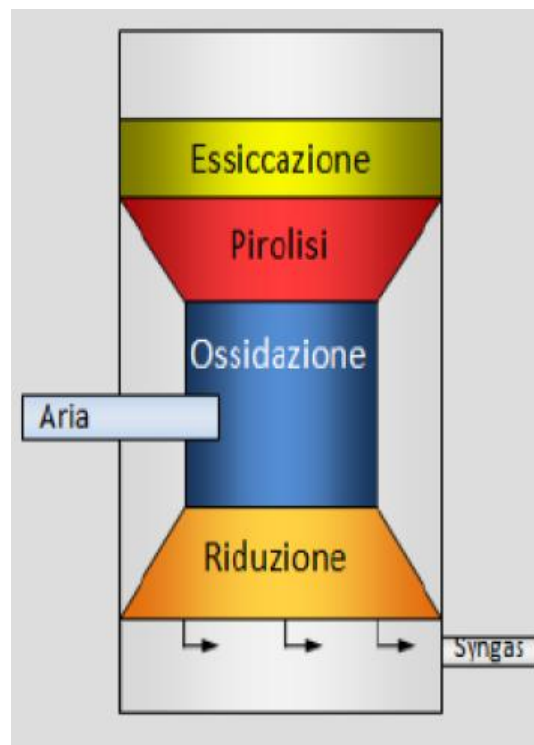


Figura 2.1: suddivisione teorica delle fasi all'interno di un reattore

### 2.2.1 Differenze tra gassificazione e combustione

La gassificazione, come la combustione, è un processo termochimico che avviene a elevata temperatura; i due processi però presentano importanti differenze.

Innanzitutto, la combustione sfrutta tutta l'energia contenuta nel combustibile solido per produrre calore; la gassificazione al contrario trasferisce l'energia contenuta nella biomassa al gas di sintesi. Vedremo che non tutta l'energia del combustibile sarà trasmessa al syngas, perché oltre alle perdite si avrà anche una produzione di calore. Troviamo poi che la quantità di ossigeno utilizzata nei due procedimenti è differente. Se prendiamo in considerazione la quantità stechiometrica di ossigeno, cioè la quantità minima che comporta la totale combustione della biomassa, la gassificazione lavorerà con un valore inferiore alla quantità minima, mentre la combustione con un valore superiore. Aiutandoci col rapporto di equivalenza, cioè il rapporto tra la quantità di ossigeno effettivamente utilizzata e quella stechiometrica:

$$ER = \frac{[O_2]_{eff}}{[O_2]_{stech}}$$

la gassificazione lavorerà con  $ER < 1$ , solitamente tra 0,2 e 0,4, mentre per avere una combustione totale della biomassa troveremo  $ER > 1$ . La gassificazione può allora essere definita come una combustione parziale.

### 2.2.2 Fase di essiccamento

In questa fase è richiesta una certa quantità di calore per riscaldare e vaporizzare l'umidità della biomassa. La fase di essiccamento avviene all'interno del reattore, ma può iniziare anche nel momento del deposito della biomassa all'impianto. Infatti come fase preliminare è possibile usare un essiccatore per abbassare il tenore di umidità della biomassa. All'interno del reattore poi il calore richiesto varierà a seconda del grado di umidità con cui il combustibile legnoso entra nel reattore. Solitamente la biomassa utilizzata non ha un grado di umidità superiore al 25%. Dopo aver fatto evaporare tutta l'umidità, il riscaldamento nel reattore continua fino a una temperatura di circa 200°C. Il calore necessario per questo riscaldamento è recuperato dalla reazione stessa e il modo tramite cui avviene lo scambio di

calore dipende fortemente dalla configurazione del reattore: in quasi tutti i casi il calore arriva per irraggiamento nella zona di essiccazione, nella configurazione in controcorrente tra biomassa e syngas invece, il gas riscalda la biomassa durante la sua risalita. Fondamentale è comunque controllare bene la fase di deumidificazione tra la raccolta e l'arrivo della biomassa al generatore ed essere certi di avere un combustibile con buoni tenori di umidità.

### 2.2.3 Fase di pirolisi

La pirolisi è un processo chimico che avviene in assenza di ossigeno. Può essere un processo a sé stante tramite cui si ottiene del bio-olio, un gas combustibile e una frazione solida; è una reazione che avviene a temperature piuttosto elevate (tra 400 e 800°C) e l'energia liberata dalla reazione è sufficiente a sostenere tutto il processo.

A noi interessa parlare della reazione di pirolisi come stadio del processo di gassificazione. Questa fase consiste quindi in una decomposizione termochimica della biomassa in un ambiente anaerobico (o comunque con una piccolissima percentuale di ossigeno); da questa fase si forma una miscela di gas composta principalmente da CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, dei vapori condensabili (tar) e una parte solida formata principalmente da carbonio (char):

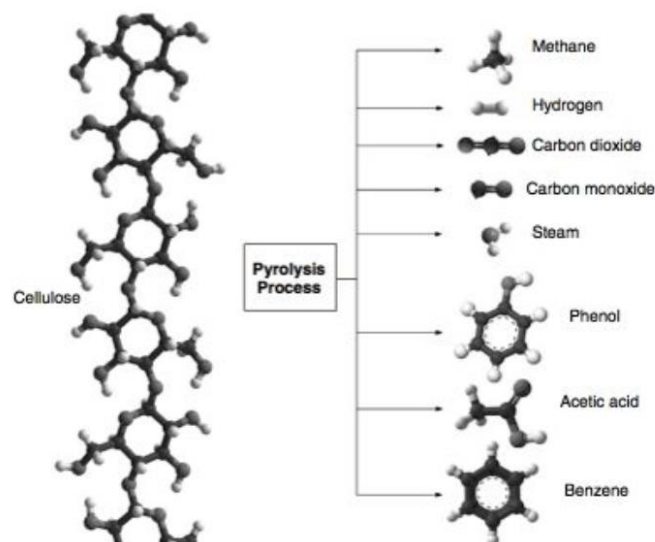
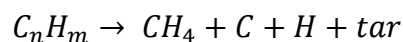


Figura 2.2: prodotti della pirolisi



Al termine della pirolisi la fase liquida e quella gassosa rappresentano circa l'80% dei prodotti. La formazione dei prodotti e la percentuale più o meno elevata dei vari componenti è determinata dalla velocità della reazione, dal tempo di residenza della biomassa nel reattore, dalla temperatura che si raggiunge, dalla dimensione delle particelle e dalla presenza di eventuali catalizzatori. Affinché la produzione di gas sia massimizzata sono necessari lunghi tempi di residenza, bassi heating rate ( $\sim 1^\circ\text{C}/\text{s}$ ) ed elevate T finali dell'ordine dei  $700^\circ\text{C}$ ; queste caratteristiche sono utili anche per ridurre al minimo la produzione di tar, come vedremo, molto dannoso per il corretto funzionamento dell'impianto.

La reazione di pirolisi, a seconda dei diversi parametri che entrano in gioco, può essere lenta, convenzionale, veloce o ultra veloce.

La pirolisi lenta è caratterizzata da temperature di reazione più basse (tra  $300$  e  $500^\circ\text{C}$ ), un heating rate basso, lunghi tempi di permanenza della biomassa nel reattore e una produzione elevata di char, infatti circa il 35% della biomassa di partenza è trasformato in ceneri carboniose.

La pirolisi convenzionale produce, invece, quantità circa identiche di prodotti gassosi, liquidi e solidi e lavora con temperatura un po' più elevate ( $600^\circ\text{C}$ ), heating rate di circa  $\sim 20^\circ\text{C}/\text{s}$  e tempi di residenza più ridotti.

Con la fast pirolisi si massimizza invece la produzione di bio-olio: la frazione liquida può raggiungere il 70% della biomassa di partenza. Si ottiene ciò grazie a tempi di permanenza del combustibile nel reattore brevissimi (circa 2 secondi) e a temperature inferiori ai  $600^\circ\text{C}$ ; se la T supera i  $700^\circ\text{C}$  abbiamo invece una produzione elevata di componente gassosa, questo perché i prodotti volatili reagiscono prima.

La flash pirolisi, o pirolisi ultra veloce, avviene con temperature superiori ai  $650^\circ\text{C}$  e con tempi di contatto nel reattore inferiori al secondo: i prodotti gassosi possono aumentare fino all'80% in peso della biomassa; se avviene invece a T inferiori vi è un'elevata produzione di sostanza oleosa.

Comunque, come visto in precedenza, la reazione di pirolisi dipende da vari fattori, tra cui la forma e dimensione delle particelle di biomassa: difficilmente si troverà un carico di cippato avente tutti i chips di grandezza omogenea, quindi la reazione di pirolisi che avviene in un reattore sarà sempre una media tra le varie tipologie di processo. Possiamo affermare che per particelle piccole (raggio inferiore a  $0,05\text{ cm}$ ) la temperatura è uniforme in tutta la particella e a pirolisi procede all'incirca uniformemente su tutta la particella: i gas riescono a uscire dalla particella facilmente e si produce meno char. Se le particelle sono grandi (raggio superiore a  $3\text{ cm}$ ) si forma

uno strato che procede verso l'interno e i prodotti fuoriescono con più difficoltà dalla particella: il gas sarà composto da molecole più leggere e sarà presente più char.

Reazione di pirolisi	Condizioni operative	Sostanza liquida	Char	Gas
Lenta	T=300-500°C Tempo*=diversi minuti	30%	35%	35%
Convenzionale	T=450-500°C Tempo=da 10 secondi a 10 minuti	33%	33%	33%
Fast	T=circa 600°C Tempo=2 secondi	70%	15%	15%
Flash	T=circa 700° Tempo= < 1 secondo	80%	10%	10%

\*con tempo si intende il tempo di residenza della biomassa nel reattore.

Parlando della velocità di riscaldamento, un riscaldamento a elevata velocità riduce i tempi di permanenza alle basse temperature e limita quindi la decomposizione delle sostanze volatili: diminuisce la produzione di gas e char a favore della fase liquida. Con velocità minori invece, avvengono più reazioni secondarie e quindi vengono più sfruttate le sostanze volatili con conseguente produzione di gas e char.

Quindi troviamo che i prodotti della pirolisi possono variare molto a seconda di diversi parametri; sarà comunque la successiva fase del processo a determinare la formazione del syngas, quindi la determinazione esatta della composizione dei prodotti della pirolisi risulta fortunatamente marginale.

#### 2.2.4 Fase di ossidazione

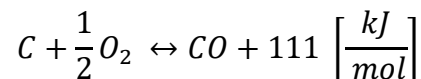
Il processo di ossidazione o di combustione avviene nel momento in cui i prodotti gassosi provenienti dalla pirolisi e parte del carbone reagiscono con l'ossidante (aria o ossigeno) che viene iniettato nel reattore. Viene così a crearsi una zona in cui il rapporto tra combustibile e comburente è tale da sviluppare una ossidazione parziale. Il calore liberato da questa ossidazione

si propaga per irraggiamento e va a alimentare le reazioni che avvengono nelle diverse zone del reattore, dall'essiccamento alla riduzione. In rare configurazioni il calore può anche essere fornito dall'esterno, ma questa tipologia di impianto è utilizzata solo se è presente una fonte termica non sfruttata. Quindi le varie reazioni che avvengono durante l'ossidazione servono a fornire il calore necessario durante tutto il processo di gassificazione, infatti il 30% della biomassa è usato solamente per fornire calore.

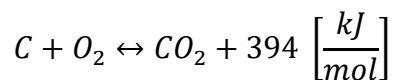
Le temperature raggiunte durante questa fase sono comprese tra i 700°C e i 2000°C: è necessaria quindi un'accurata progettazione delle pareti del reattore.

Le reazioni che incontriamo durante questa fase sono:

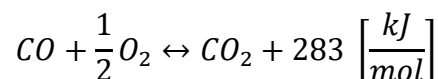
- ossidazione parziale del carbonio:



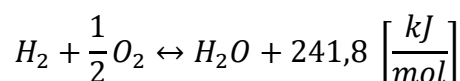
- ossidazione completa del carbonio:



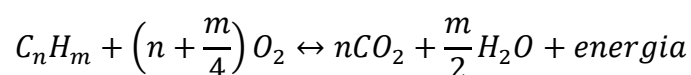
- ossidazione del monossido di carbonio:



- ossidazione dell'idrogeno:



- ossidazione degli idrocarburi:

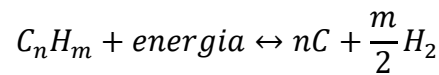


- ossidazione della cellulosa:

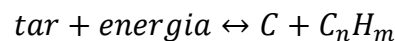


Durante l'ossidazione, oltre alle sopracitate reazioni esotermiche, avvengono delle reazioni endotermiche, che servono a rompere le strutture degli idrocarburi e a ridurre i tar:

- decomposizione degli idrocarburi:



- decomposizione del tar:

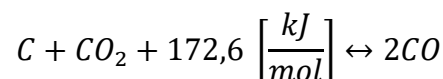


### 2.2.5 Fase di riduzione

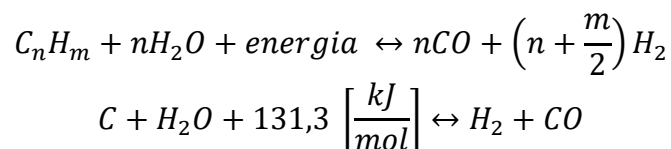
L'ultima fase è quella che fissa la composizione del syngas. Le temperature che si raggiungono durante questo processo sono molto elevate, dagli 800 a 1100°C. Durante questa fase il biossido di carbonio e il vapor d'acqua sono convertiti in monossido di carbonio, idrogeno e tracce di metano. Il CO prodotto poi reagisce con l'acqua (reazione "water-gas shift") per produrre a sua volta CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> aumentando il potere calorifico del gas.

La composizione finale è quindi definita da reazioni che rendono il processo di riduzione un processo endotermico:

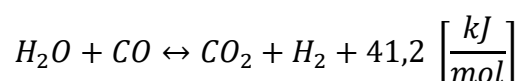
- reazione di Boudouard:



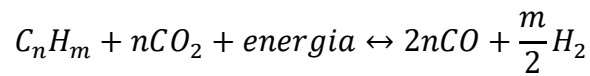
- reazione di water-gas:



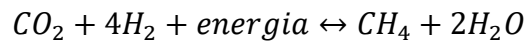
- reazione di water-gas shift:



- reazione di reforming del biossido di carbonio:



- reazione di rimozione del biossido di carbonio:



## 2.3 Tipologie di gassificatori

I reattori utilizzati per la gassificazione della biomassa possono essere divisi a seconda di varie caratteristiche, come i fenomeni di trasporto coinvolti, l'agente ossidante, la forma, la pressione di esercizio. La caratteristica principale è però sicuramente il design costruttivo: possiamo avere reattori a letto fisso, a letto fluido o a letto trascinato. Questi ultimi difficilmente sono utilizzati per le biomasse perché richiedono una pezzatura molto fine della biomassa. I gassificatori a letto fisso si dividono poi a seconda del flusso di biomassa rispetto a quello dell'agente gassificante, possono essere quindi a equicorrente (downdraft) o controcorrente (updraft).

È importante sapere le caratteristiche della biomassa a disposizione, la potenza richiesta, il budget a disposizione: solo così si potrà scegliere la miglior configurazione possibile.

In questo paragrafo saranno descritte brevemente le caratteristiche delle principali tecnologie utilizzate per la gassificazione della biomassa; i reattori più utilizzati in commercio sono quelli a letto fisso downdraft.

### 2.3.1 Gassificatori a letto fisso

Sono caratterizzati da una griglia che separa la zona di riduzione da quella di gassificazione. Sono senza dubbio la tecnologia più conosciuta e quindi più sviluppata. Il loro utilizzo è limitato a piccole/medie potenze, con portate di combustibile fino a 2500 kg/h, hanno dimensioni limitate (per dimensioni superiori si hanno problemi relativi al deflusso non omogeneo del gas) e velocità di reazione basse. Le temperature possono variare molto all'interno: da 200°C fino anche a 1200°C, per arrivare anche a 1500°C in

condizioni critiche. Uno dei principali problemi è l'intasamento del letto: è importante che la pezzatura del cippato sia il più uniforme possibile.

I vantaggi di questa tecnologia sono quindi: produzione di un syngas di buona qualità e pulito, alto valore di conversione del char e pochi problemi legati alla pulizia interna. Gli svantaggi invece si possono riassumere nelle ridotte dimensioni e nella difficoltà di avere taglie anche di poco maggiori per questi reattori; inoltre il combustibile dovrebbe avere già un basso grado di umidità (<30%, per il caso equicorrente) prima di entrare nel reattore.

### 2.3.1.1 Gassificatori a letto fisso downdraft (equicorrente)

La biomassa in questo caso viene immessa dall'alto nel reattore e incontra i diversi stadi del processo; il syngas segue lo stesso percorso del cippato e quindi lascia il reattore dal basso. È presente una gola a forma di V che delimita la zona dove succede la vera gassificazione: si cerca di creare una zona a elevata T per il cracking dei TAR.

I tempi di residenza che si trovano solitamente per questo tipo di reattore sono nell'ordine di ore.

L'ossidante, generalmente aria, può essere introdotto in un unico condotto centrale oppure da più aperture laterali sopra la gola.

Il gas prodotto fuoriesce molto caldo dal reattore, tra 800 e 900°C; deve quindi essere raffreddato prima dell'utilizzo. Dovrebbe avere una bassa presenza di TAR, grazie al thermal cracking che avviene nella gola. È necessaria però una fase di filtraggio poiché il gas presenta molto particolato.

Il principale vantaggio della tecnologia downdraft è la produzione di un gas con ridotta presenza di tar, ma è necessario usare una biomassa piuttosto secca, dato che non c'è scambio termico tra il gas ad alta temperatura e la biomassa in ingresso, e di pezzatura fine (1-3 cm) e piuttosto regolare.

Questi gassificatori sono limitati a portate di 500 kg/h e per generazioni elettriche sotto il MW.

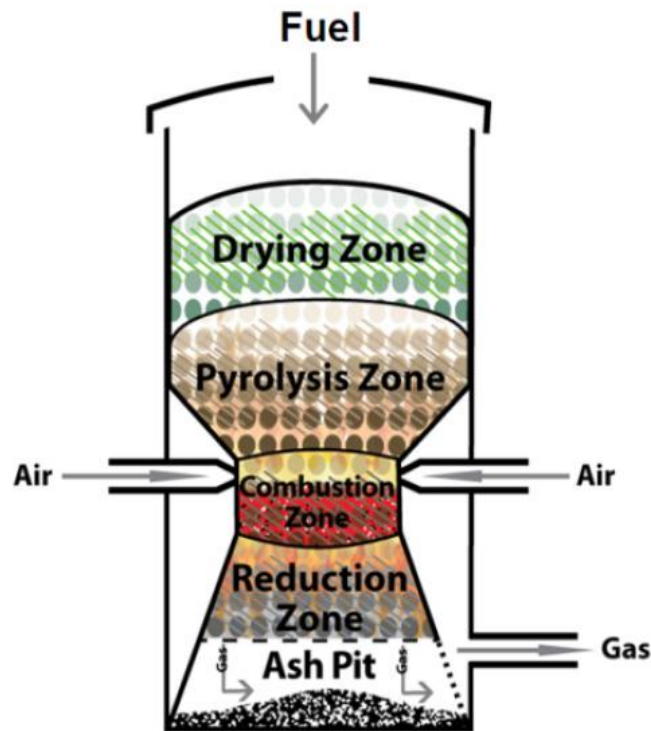


Figura 2.3: gassificatore a letto fisso downdraft

### 2.3.1.2 Gassificatori a letto fisso updraft (controcorrente)

Il moto della biomassa è opposto a quello del gas e dell'ossidante: la biomassa viene alimentata dall'alto ma stavolta anche l'estrazione del gas avviene dall'alto, le ceneri vengono prese dal basso così come dal basso viene alimentata l'aria. La fase di gassificazione precede la combustione e il syngas contiene quindi meno particolato e ceneri, ma ha una grossa quantità di tars.

I vantaggi sono quindi la poca presenza di ceneri dovute alla combustione del char, l'ottimo scambio termico tra correnti opposte che permette di avere un gas in uscita con basse temperature (circa 300°C) e di utilizzare una biomassa con un tenore di umidità un po' più elevato rispetto al caso precedente (anche fino al 60%). La grossa presenza di tars (non avviene un thermal cracking come prima) che si formano nella pirolisi causa molti problemi poiché essi condensano facilmente e sporcano o intasano l'impianto, soprattutto nella zona dello scambiatore. Quindi il gas uscente, a seconda del suo utilizzo, va più o meno trattato: se è destinato a un motore a combustione interna ha bisogno di un grado di pulizia molto elevato.

I tempi di residenza sono dell'ordine di decine di minuti.

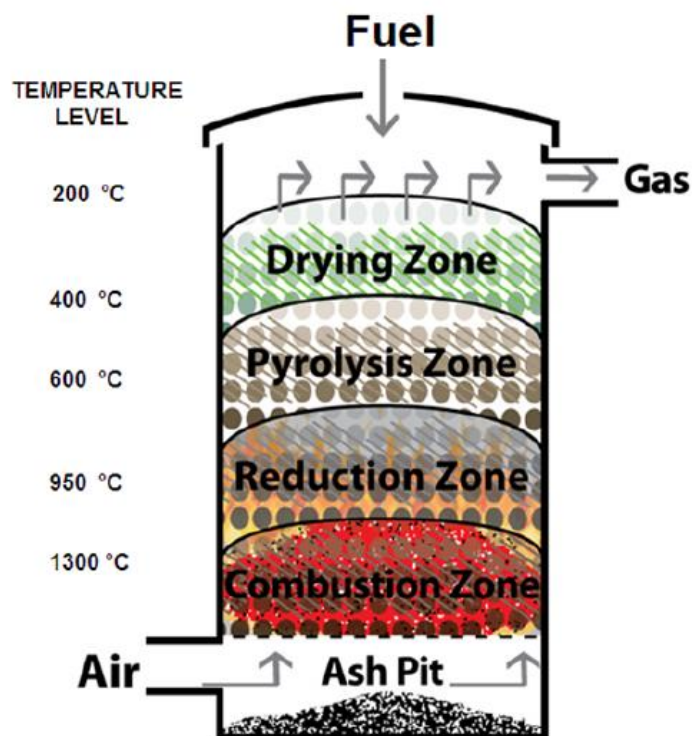


Figura 2.4: gassificatore a letto fisso updraft

### 2.3.2 Gassificatori a letto fluido

La biomassa che entra nel reattore si mescola in questo caso subito con il letto fluido, cioè una sospensione di particelle ad elevata temperatura che fa sì che il letto composto da una fase gassosa e una solida si comporti come un fluido: ciò comporta che tutte le reazioni avvengono simultaneamente ed è ancora più difficile definire dei confini precisi di quando inizia o finisce un processo.

Il materiale inerte fluidizzante può essere sabbia, silice o dolomite principalmente e si riesce a mantenerlo fluido e ad elevata T grazie a un flusso costante di agente ossidante. L'aria viene introdotta dal basso mentre il syngas viene aspirato dalla parte superiore. La temperatura all'interno del reattore è piuttosto uniforme (800-850°C).

Uno dei principali problemi è che a elevate T può esserci la sinterizzazione della sabbia silicea (unione delle particelle polverulente a formare una sostanza indivisibile): basta sostituire tale sabbia silicea in presenza di biomassa ad alto contenuto di ceneri con composti metallici come sabbia



cromatica. Il syngas prodotto contiene una significativa quantità di tars e di char, sono quindi necessarie operazioni di pulizia.

Il miscelamento tra biomassa e agente gassificante in questi reattori è ottimo, è possibile utilizzare diversi tipi di combustibili e aumentare così la flessibilità del gassificatore. I rendimenti sono più elevati in questi reattori rispetto a quelli a letto fisso, di contro si hanno costi di investimento maggiori e la convenienza si ha per potenze superiori ai 30 MW; si impiegano quindi per impianti di grandi dimensioni. La pezzatura del combustibile deve essere più controllata rispetto al caso del letto fisso: non si possono utilizzare chips troppo fine che rischiano di essere asportate dal syngas.

I gassificatori a letto fluido in commercio sono essenzialmente divisi in base alla velocità con cui viene iniettato l'agente ossidante: possiamo trovare gassificatori a letto fluido bollente (BFB) o gassificatori a letto fluido circolante (CFB).

Nel primo tipo l'altezza del letto fluido è compresa tra 1 e 2 metri: dimensioni ridotte a causa della velocità limitata (0,8-2 m/s). In questi reattori non sempre si trova il materiale inerte. Si hanno temperature superiori rispetto agli altri reattori a letto fluido, un minor contenuto di TAR ma un maggior pericolo di fusione delle ceneri. Si cerca di utilizzare quindi una biomassa con elevato punto di fusione: quindi preferibilmente biomassa di natura lignocellulosica e non erbacea. Le portate sono dell'ordine di 10-15 t/h.

Nei gassificatori a letto fluido circolante invece, la più elevata velocità dell'aria fa compiere alle particelle un moto rotatorio attraverso le varie pareti. Il reattore si sviluppa in altezza arrivando anche a 8 metri; la velocità può superare i 4 m/s. Il nome "circolante" deriva dal fatto che le particelle solide possono venire trascinate in sospensione fino ad uscire dalla colonna principale del reattore che quindi sarà affiancato da un ciclone che separa dal gas le particelle rimaste solide che poi vengono reintrodotte alla base. Il combustibile in questo caso è introdotto nella parte inferiore del reattore. Nella colonna principale si possono distinguere tre zone: una fase densa dove si formano delle bolle di gas che tendono a salire nel reattore, una fase intermedia, dove il flusso delle particelle solide crea un fenomeno di instabilità e una zona diluita, dove la miscelazione è più omogenea e quindi

la densità minore. Le portate possono superare le 15 t/h, le taglie degli impianti vanno da qualche MW fino anche a 100 MW.

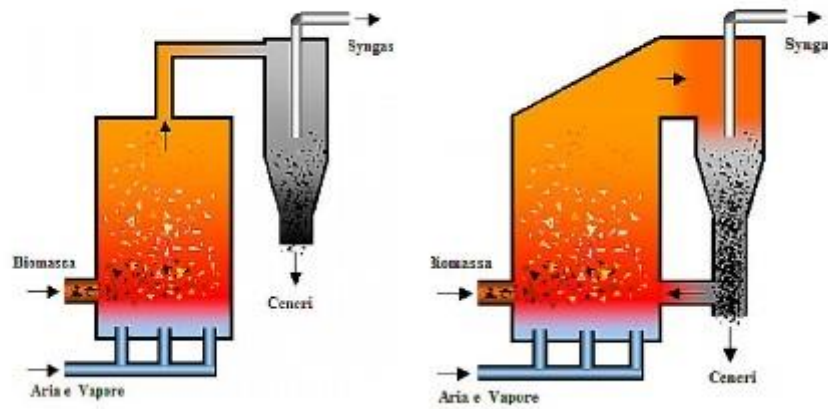


Figura 2.5: gassificatori a letto fluido bollente e circolante

# CAPITOLO 3

## DESCRIZIONE IMPIANTO E ANALISI DEI DATI

In questo capitolo si vuole descrivere l'impianto studiato in questa tesi. L'impianto è a gassificazione di cippato di legno per la produzione di 99 kW di energia elettrica e 220 kW di energia termica.

### 3.1 Componenti dell'impianto

Il sistema è composto da più sezioni: la sezione alimentazione del cippato serve a caricare le chips di legno attraverso delle coclee nel reattore; il gassificatore è composto dal reattore, da un sistema di estrazione e trasporto ceneri, da un filtro a cartucce ceramiche, uno scambiatore, un filtro a cartuccia, un sistema di pompaggio e commutazione dell'uscita, un quadro elettrico; il cogeneratore presenta un motore a combustione alimentato dal syngas, un alternatore, uno scambiatore a piastre con circuito di recupero termico, uno scambiatore fumi di scarico-acqua; il quadro di parallelo gestisce la connessione del cogeneratore con la rete pubblica.

Il legno, opportunamente essiccato, arriva alla camera di combustione del reattore tramite le coclee. Nel reattore avviene il processo di gassificazione, il calore necessario al processo è fornito da una combustione parziale in ambiente povero di ossigeno. Dal reattore esce il syngas che deve essere opportunamente trattato prima di arrivare al motore. Il gas di sintesi esce a una temperatura di circa 650°C e viene sottoposto ai seguenti trattamenti: passa in una camera di espansione (camera di calma) dotata di scarico di fondo dove si depositano le polveri più pesanti, successivamente attraversa due cicloni per la separazione delle particelle più leggere e un filtro a cartucce ceramiche dove vengono separate le polveri in sospensione, a questo punto il syngas viene raffreddato a fino a circa 100°C mediante uno scambiatore tubo in tubo gas-acqua, viene nuovamente filtrato e infine viene pompato verso il cogeneratore. L'energia elettrica generata dal motore a ciclo otto viene venduta alla rete, l'energia termica viene

recuperata dall'acqua di raffreddamento del motore stesso tramite uno scambiatore a piastre con cui si riscalda ulteriore acqua per i successivi utilizzi di parti terze (si vorrebbe implementare l'impianto con una rete di teleriscaldamento per riscaldare due capannoni adiacenti); uno scambiatore fumi/acqua recupera inoltre il calore dei gas di scarico del motore.

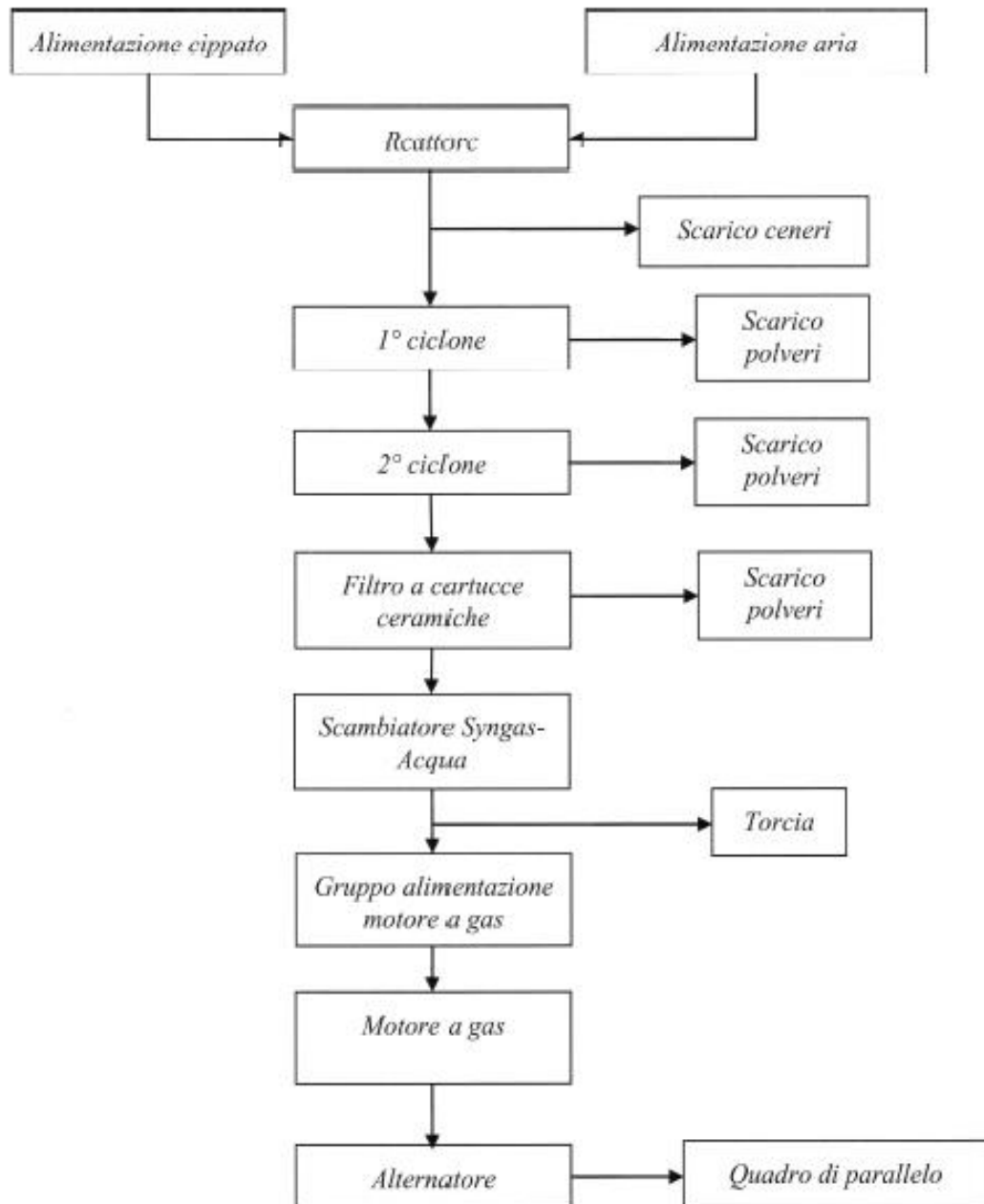


Figura 3.1: Componenti del processo

## 3.2 Descrizione del processo

La materia prima alimentata nel reattore deve avere determinate caratteristiche: la classe è definita dalla UNI EN 14961-4 e può essere A1, A2 o B1 (non possono essere utilizzati sottoprodotti e residui della prima lavorazione del legno e legno post consumo); le dimensioni sono definite dalla norma AT 7133 e possono essere di classe G30 o G50 (il chip non deve superare i 50 mm di grandezza); l'umidità deve essere inferiore al 15% e il contenuto di polveri della biomassa deve essere al massimo del 20%. Il tenore di umidità è molto basso, questo perché si vuole rendere più efficiente possibile il processo; un cippato con un grado così basso di umidità ha un costo piuttosto elevato (circa 200 €/tonnellata), nell'impianto è iniziata l'installazione quindi di un essiccatore che utilizza del calore di recupero dal reattore per abbassare l'umidità del cippato così da poterlo comprare a un prezzo ridotto.

Il sistema di stoccaggio e alimentazione permette di regolare correttamente la quantità di combustibile in transito verso il reattore: una coppia di valvole a ghigliottina permette di controllare la quantità di aria che entra assieme al combustibile; una serie di sensori posti lungo il percorso del cippato inviano segnali al sistema di controllo che provvede all'avviamento o all'arresto delle coclee e all'apertura o chiusura delle valvole.

Durante la fase di preavviamento si utilizza un bruciatore a gasolio per raggiungere la temperatura desiderata in un tempo variabile tra 8-12 ore. L'operatore spegne il bruciatore e avvia la fase di caricamento del cippato. La reazione che avviene nel reattore è stata descritta nel capitolo precedente. L'alimentazione del cippato avviene tramite un bocchello previsto nella parte superiore, lo scarico del gas attraverso una camera di calma e lo scarico delle ceneri nel fondo inferiore. Il reattore è un recipiente cilindrico verticale composto da più parti: un condotto di ingresso del cippato, la camera di combustione, una camera di raccolta delle ceneri con coclea per il trasporto delle ceneri, un bocchello di entrata del comburente primario (aria) che viene preriscaldato tramite passaggio attraverso uno scambiatore, un bocchello per la linea di entrata del comburente secondario, un bocchello per l'uscita del syngas, un boccaporto di ispezione posto sulla parte superiore e uno posto sul fondo. La struttura principale è realizzata in carbonio rivestito internamente con materiale refrattario; il reattore è a letto fisso downdraft come si evince dai flussi di combustibile e gas e ha una griglia mobile.



**Fig 3.2: foto del gassificatore**

L'aria necessaria al sostentamento del processo è iniettata attraverso un collettore che ne garantisce l'apporto nella quantità stabilita; la combustione viene agevolata dal comburente secondario (sempre aria) che controlla che la combustione avvenga secondo le modalità previste. Il controllo delle temperature è affidato a 10 sensori di temperatura, il controllo della pressione viene svolto grazie a 4 sensori e completano la strumentazione 3 sensori di livello per determinare l'altezza del cippato.

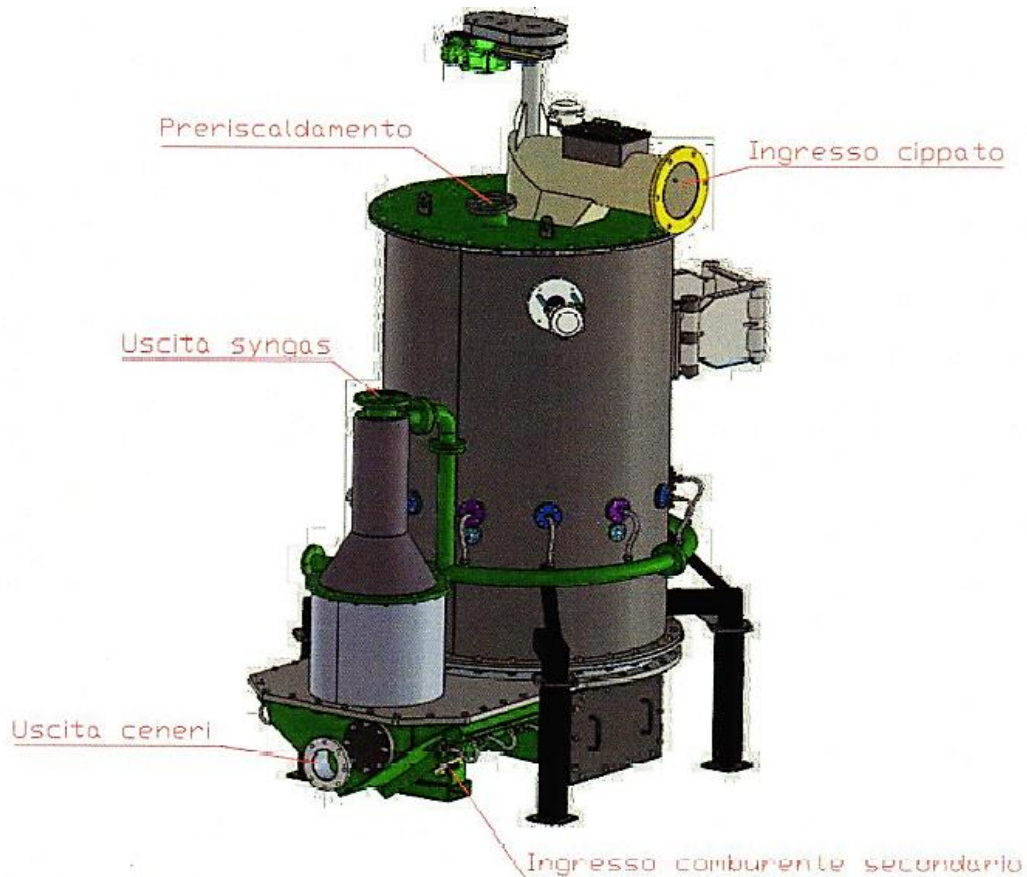


Figura 3.3: disegno del reattore

Il gas in uscita dal reattore ha le caratteristiche descritte nella tabella 3.4.

CH <sub>4</sub>	2 ÷ 4 % vol.
N <sub>2</sub>	50 % vol.
CO <sub>2</sub>	7 ÷ 10 % vol.
CO	18 ÷ 28 % vol.
H <sub>2</sub>	12 ÷ 18 % vol.

Figura 3.4: specifiche syngas

Il syngas raggiunge la sezione cicloni formata da due cicloni, uno primario e uno secondario, che hanno il compito di separare le particelle fini che non sono state separate precedentemente nella camera di calma. Il ciclone primario è in grado di separare il 90% delle particelle solide di dimensioni

superiori a 10 micron, mentre il ciclone secondario è in grado di separare il 90% delle particelle di dimensioni superiori ai 5 micron.

Il syngas in uscita dai cicloni può contenere ancora polveri sottili che devono essere eliminate prima di immetterlo nello scambiatore: si utilizza in questo impianto un filtro a cartucce ceramiche; il livello di saturazione delle polveri viene monitorato attraverso il controllo del valore della pressione differenziale a monte e a valle dello scambiatore. Le ceneri precipitano nella camera di raccolta e vengono rimosse tramite coclea.

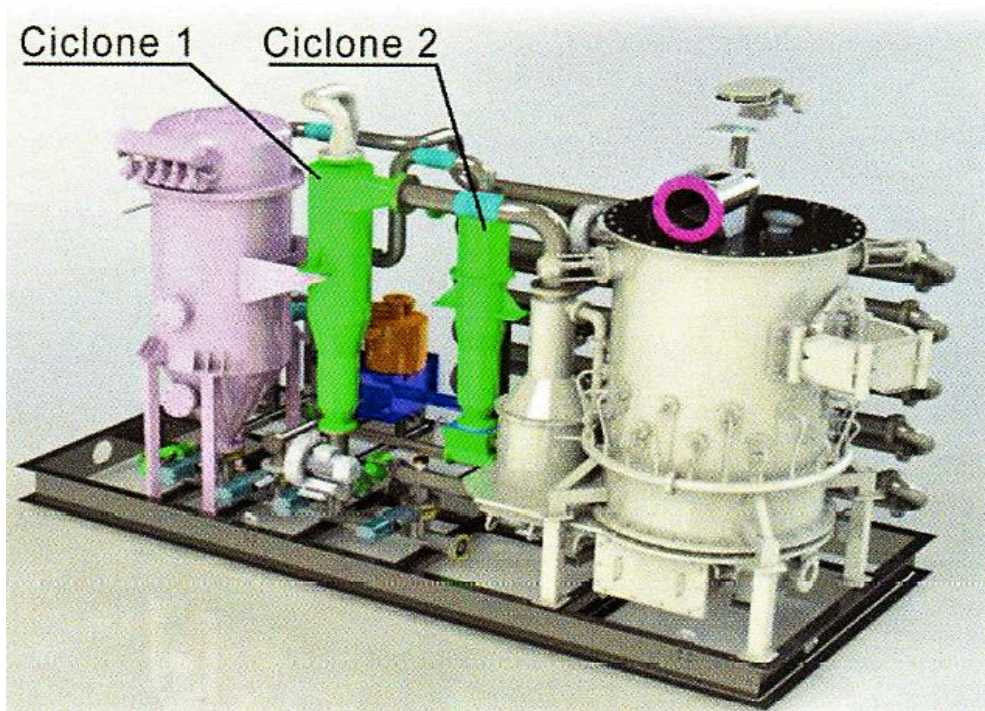


Figura 3.5: disegno dell'impianto con evidenziati i cicloni

Lo scambiatore a tubi concentrici è costituito da 8 tubi nei quali il gas passa nella parte più interna, mentre l'acqua di raffreddamento (acqua al 70% e glicole etilenico al 30%) nel mantello. Il syngas si raffredda da circa 550°C a 100°C, l'acqua si riscalda da 70°C a 80°C.



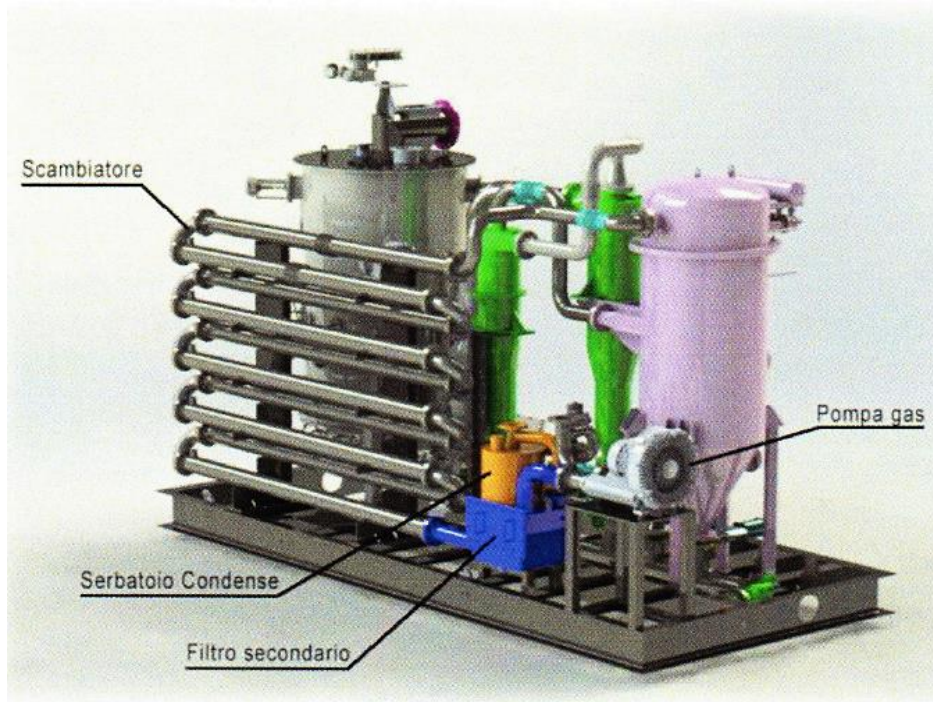
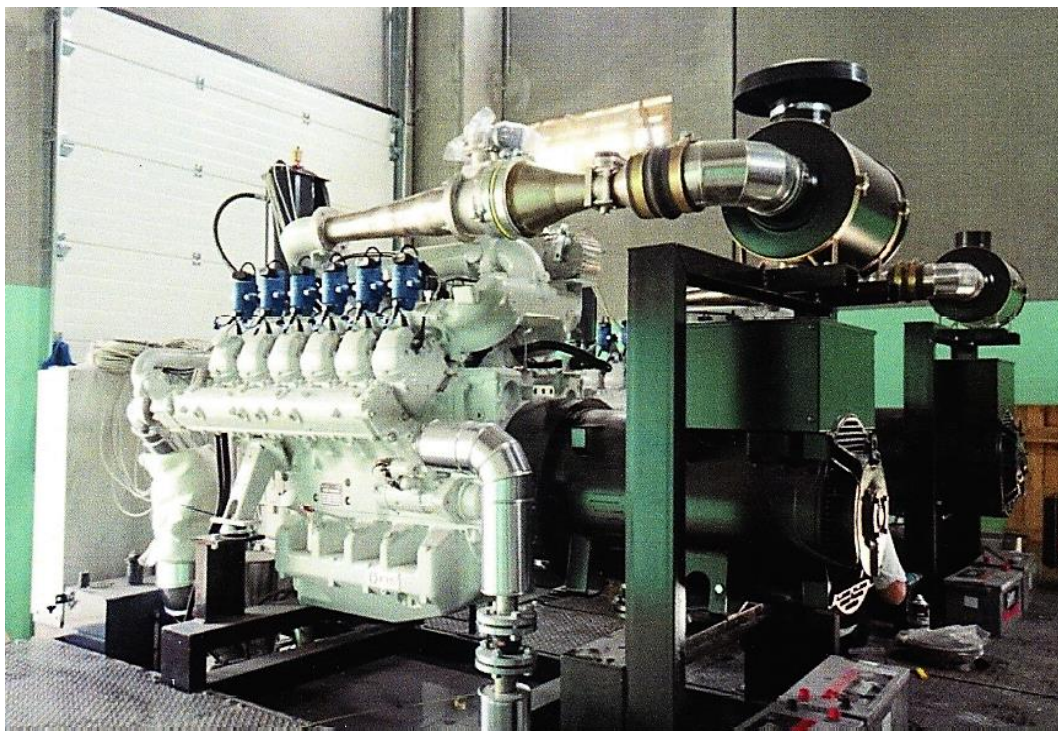


Figura 3.6: disegno dell'impianto con vista sullo scambiatore

Il gas di sintesi uscito dallo scambiatore viene convogliato in un'ultima camera con filtro di lana di roccia per poi essere immesso verso il motore a combustione. Nella linea di alimentazione è presente un bypass con la torcia verso cui mandare il gas nei 15 minuti antecedenti la messa in marcia del motore e nei 30 minuti successivi lo spegnimento del motore. Nella torcia il gas viene decomposto in  $H_2O$ ,  $CO$  e  $CO_2$ .

Il cogeneratore è composto da un motore a combustione alimentato a syngas, un sistema di raffreddamento del motore e un alternatore. Il motore è il componente principale per la generazione di energia elettrica e termica. Il calore viene prodotto utilizzando in circuito chiuso l'acqua di raffreddamento del motore a combustione: questa dovrebbe trasferire il calore asportato dal funzionamento del motore tramite scambiatore a piastre all'acqua di rete del futuro sistema di teleriscaldamento. Per ora però il calore viene disperso. L'accoppiamento dell'albero motore con un alternatore produce l'energia elettrica che viene poi venduta alla rete.



**Figura 3.7: fotografia del cogeneratore**

Il sistema di recupero ceneri è formato da un sistema di raccolta e movimentazione e da un sistema di stoccaggio. Le ceneri provengono dalle coclee di scarico del reattore principalmente, ma anche dalla sezione dei cicloni e dallo scarico del filtro a cartucce ceramiche e confluiscono tutte in un sistema principale; da questo sistema vengono inviate al sistema di stoccaggio e qui raccolte in big bags. Il sistema di controllo deve principalmente monitorare la temperatura delle ceneri poiché questa non deve essere troppo elevata per non rischiare di danneggiare il big bag o peggio provocare un incendio.

### **3.3 Dati di processo**

#### *3.3.1 Produzione a regime*

L'azienda produttrice dell'impianto a gassificazione fornisce i dati che dovrebbe avere l'impianto durante il suo funzionamento.

Il reattore dovrebbe consumare 100 kg/h di cippato e produrre circa 240 Nm<sup>3</sup>/h di syngas ( $\pm 20\%$ ). La temperatura del syngas in uscita dal reattore dovrebbe essere tra i 650°C e gli 800°C; dopo aver passato la sezione dei

cycloni dovrebbe trovarsi tra i 600°C e i 650°C; in uscita dal filtro a cartucce ceramiche la temperatura dovrebbe essere tra i 250°C e i 450°C; passato lo scambiatore, dove il gas cede calore all'acqua di raffreddamento, il syngas si trova tra i 90°C e i 110°C; in ingresso al cogeneratore, infine, si ha un gas di sintesi tra i 65°C e i 95°C. La quantità di ceneri prodotte dall'impianto si aggira sui 5 kg/h. La potenza elettrica e termica generate, come da specifiche dell'impianto, dovrebbero essere rispettivamente 99 kW<sub>el</sub> e 220 kW<sub>th</sub>.

Come vedremo dalla seguente analisi dei dati, questo impianto purtroppo per pochi giorni ha funzionato a regime. In questa analisi e nel prossimo capitolo, aiutandoci con degli studi, si cercherà di spiegare cosa non è andato per il verso giusto e cosa si potrebbe fare per migliorare la situazione di questo impianto.

### *3.3.2 Analisi dei dati di impianto*

Innanzitutto, bisogna ammettere che l'impianto soggetto di questa tesi è piuttosto sperimentale in quanto esistono pochi gassificatori da 99kW<sub>el</sub>. La maggioranza di queste macchine è adibita alla produzione di 20kW<sub>el</sub>, 33kW<sub>el</sub>, 45kW<sub>el</sub>, troviamo anche qualcuna da 66kW<sub>el</sub>; vengono poi montati più gassificatori nello stesso impianto per arrivare a produrre l'energia voluta. Sono impianti che dovrebbero essere abbastanza semplici da gestire e che dovrebbero funzionare 24 h al giorno per circa 7000/7500 h annue.

I giorni in cui questo impianto ha funzionato a regime producendo 99 kW<sub>el</sub> sono stati pochi. La gestione di questo impianto è iniziata a gennaio 2018 e si è conclusa a ottobre 2018; l'impianto, però, ha funzionato fino a metà giugno 2018. In questo periodo, come vedremo meglio nel capitolo successivo, si è provato a modificare qualcosa in corso d'opera per cercare di evitare i continui blocchi dell'impianto. Probabilmente si poteva fare qualcosa in più, aggiungendo qualche componente extra, aumentando il tempo di permanenza della biomassa nel reattore o la quantità di agente ossidante, ad esempio. La speranza del produttore e dell'investitore che l'impianto iniziasse a funzionare bene solo grazie a una più accurata gestione ha vinto sulla voglia di investire altri soldi su tecnologie aggiuntive o su modifiche più importanti.

I grafici seguenti aiutano a visualizzare al meglio il funzionamento di questo impianto in particolare, a livello giornaliero, settimanale e mensile. Innanzitutto, il grafico 3.8 mostra come doveva essere una giornata tipica di lavoro dell'impianto. Dalla mattina, infatti, inizia il preriscaldamento

dell'impianto, che dovrebbe durare circa 8 ore. Arrivati in temperatura (circa 500°C), si fa partire il gassificatore e dopo un paio d'ore, in funzione della produzione di syngas, si fa partire il motore. La produzione elettrica si aggira quindi sui 99 kW, con una temperatura del gas in uscita dal reattore stabile a 750°C che si abbassa a circa 630°C dopo aver passato i ciclone, in uscita dal filtro a ceramiche la temperatura arriva a 500°C per poi scendere a 100°C passato lo scambiatore. Sono tutti dati in linea con quelli di progetto. Tutti dati che avrebbero portato a una resa ottimale dell'impianto, a una produzione massima e a un guadagno economico per quanto riguarda l'investitore.

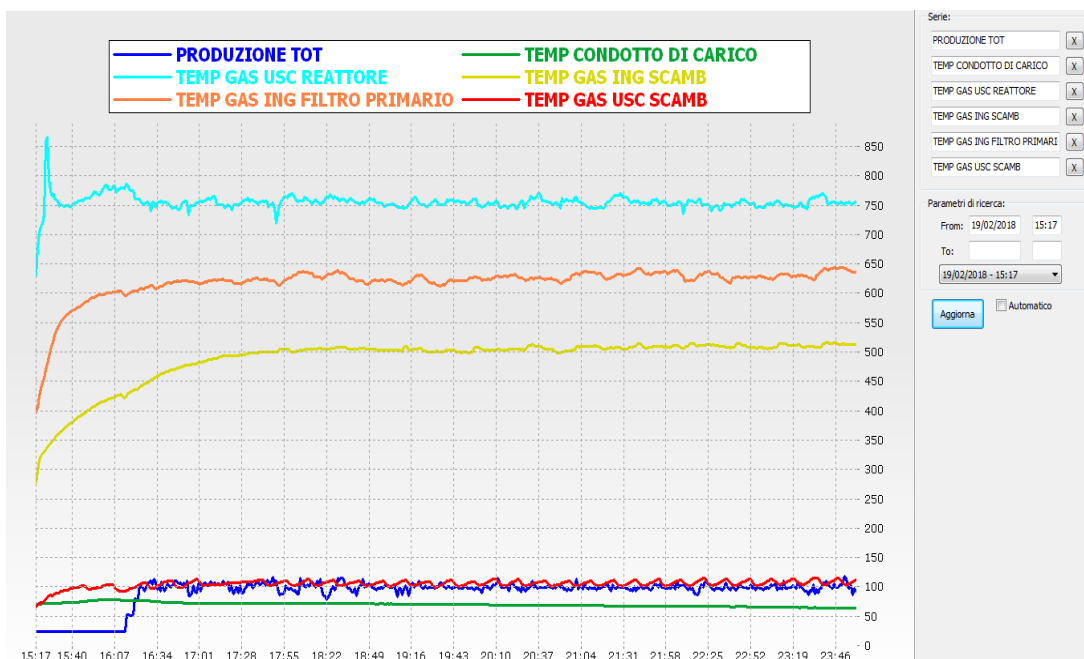


Figura 3.8: dati di impianto 19/02/2018

Già il giorno successivo, però, come si vede dall'immagine che segue, la produzione a regime si è fermata. Da registro si risale che il problema in quei giorni erano le porte delle coclee per l'alimentazione del cippato al gassificatore: queste non si chiudevano ermeticamente e ciò causava una fuoriuscita del syngas che portava alla formazioni di condense acide che avrebbero portato a una erosione dei materiali; lo scambiatore, inoltre, iniziava a sporcarsi: questo sarà il principale problema della macchina che costerà all'impianto svariati blocchi.

Come si può notare, la produzione va solamente per cinque ore, e con un ritmo molto poco lineare rispetto al giorno precedente: probabilmente il catrame presente nello scambiatore non facilita la produzione del gas di

sintesi, inoltre il fatto che le porte delle coclee facciano passare un po' di aria fa calare leggermente le temperature del gas.

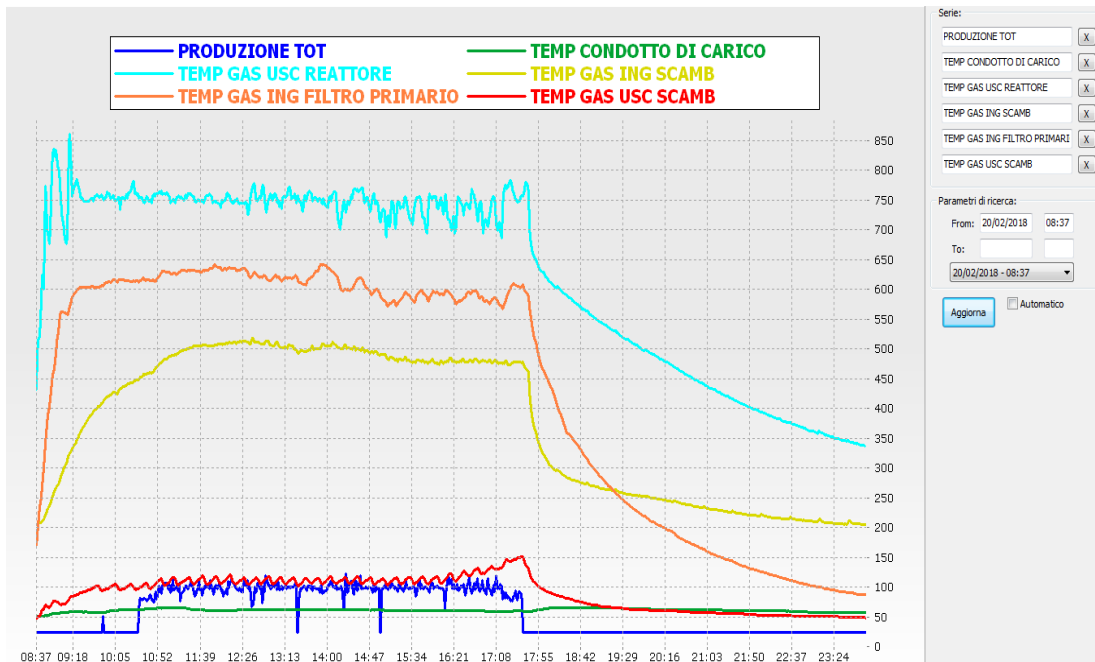


Figura 3.9: dati di impianto 20/02/2018

Il giorno successivo si decide allora di pulire lo scambiatore a tubi concentrici per far ripartire l'impianto. La situazione che si trova si apprezza dalle successive foto. Per la pulizia di questo componente si utilizza soda caustica per sciogliere tutto il catrame presente. Successivamente a questo intervento l'impianto produce energia per un paio di giorni, non è una produzione lineare ma avviene con un andamento incostante, a volte producendo 99 kW, a volte 60 o 80.



Figura 3.10: stato dello scambiatore di calore lato gas dopo apertura delle curve

L'immagine 3.11 descrive la giornata tipo di lavoro dell'impianto nel mese di Aprile. Nell'arco della giornata si potevano tranquillamente constatare più di due blocchi, di durata variabile. La spiegazione di questi continui blocchi si legge nella curva della temperatura di uscita del gas dallo scambiatore; questo si scaldava troppo e raggiungeva temperature troppo elevate (circa 140°C) mandando in blocco l'impianto. Andando a vedere le altre temperature, si nota come il syngas esce dal gassificatore alla temperatura di progetto, ma già dopo la sezione dei cicloni è calata troppo, scendendo a circa 450°C. Di conseguenza, la temperatura del gas in ingresso allo scambiatore non è più a 500°C ma è scesa a circa 350°C. Una delle cause di questo calo di temperature è stato fatto ricadere sul gruppo cicloni+filtro a candele ceramiche: aprendo il coperchio del filtro si è scoperto che delle candele erano rotte, il gas quindi non si puliva a sufficienza e faceva calare la temperatura.

Anche la linea che descrive la produzione denota qualche problema: la produzione, infatti, è abbastanza costante ma non si produce quanto si dovrebbe, i kW prodotti sono circa 60/70; da registro il problema viene fatto ricadere sul grado di umidità del cippato: non avendo un essicatore, se il cippato non è sufficientemente secco la produzione cala e soprattutto si alza la presenza di condense indesiderate e la probabilità di sporcamento dei componenti dell'impianto.

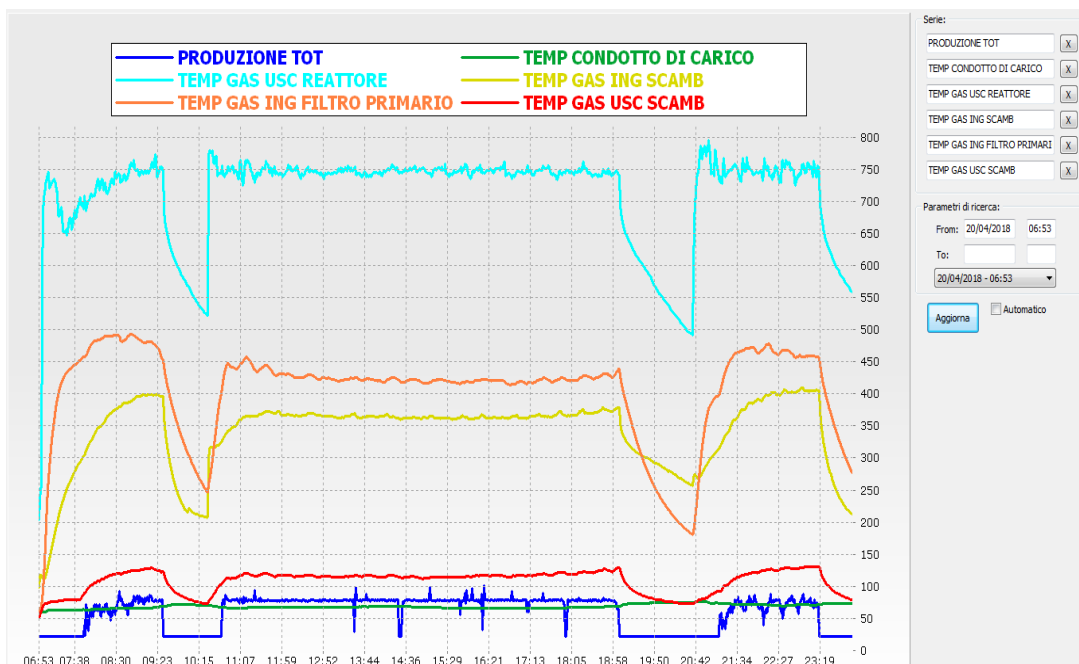


Figura 3.11: dati di impianto 20/04/2018

Nell'immagine 3.12 si è voluto provare a far vedere l'andamento di una settimana di lavoro dell'impianto. Si può notare il blocco dell'impianto durante tutto il giorno 5/03 causa controllo della coclea per il caricamento del cippato. Inoltre durante gli altri giorni si possono notare vari blocchi di durata variabile: il problema viene fatto risalire a delle infiltrazioni di ossigeno nel reattore.

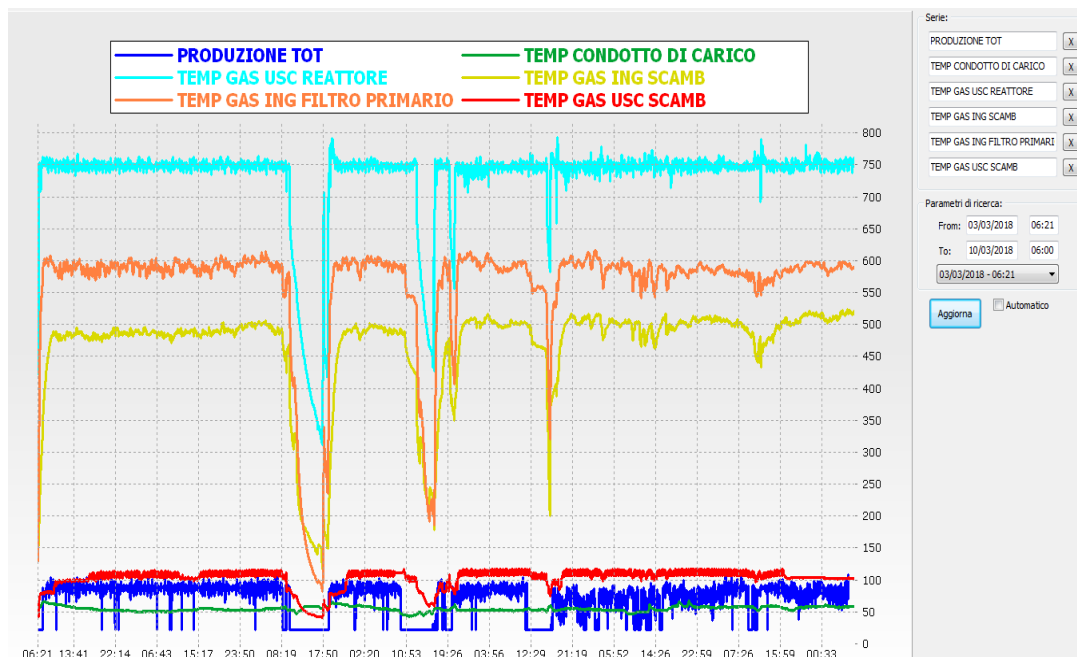


Figura 3.12: dati di impianto 3-10/03/2018

Le infiltrazioni di ossigeno fanno scendere la temperatura del gas in uscita dal reattore; i sensori di temperatura leggono quindi una temperatura troppo inferiore a quella impostata e mandano in blocco l'impianto. Inoltre l'aria che entra a contatto con il gas non è riscaldata e l'impatto tra il combustibile caldo e l'ossigeno fa sì che il gas che si va a formare risulti molto sporco. Solo dopo un'attenta manutenzione del reattore per chiudere tutte le possibili vie di infiltrazione si può far ripartire l'impianto.

L'immagine seguente descrive invece il funzionamento tipo mensile dell'impianto. Da questo fermo immagine si può notare quanto grave fosse la situazione.



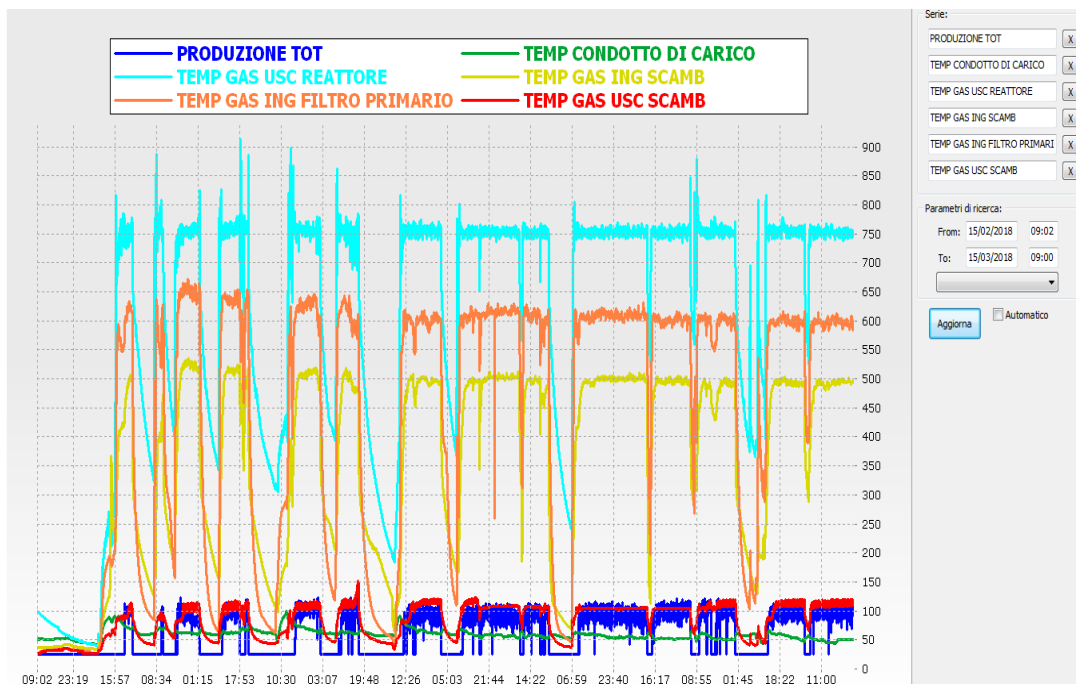


Figura 3.13: dati di impianto 15/02/2018-15/03/2018

Un ultimo problema, che però come si vedrà dal capitolo 5 può diventare un vantaggio o comunque una cosa del tutto negativa, è la produzione di cenere di questo impianto. Come visto prima dai dati di progetto, questa dovrebbe aggirarsi sui 5 kg/h, quindi si dovrebbe riempire un contenitore adibito alla raccolta delle ceneri, o big bag, circa in 80 h contando un funzionamento costante dell'impianto. I big bag, infatti, sono contenitori aventi una base di 90x90 cm per un'altezza di 1 m e contengono all'incirca 400 kg di cenere, con questo dato dipendente molto anche dal grado di umidità della cenere. Nel caso di questo impianto la produzione sale molto e il cambio del big bag avviene circa ogni 36 h, per una produzione oraria di 11 kg/h. Questo sarebbe un grosso problema economico per lo smaltimento delle ceneri come rifiuto speciale; certificando le ceneri come biochar, però, si riesce a far diventare questo problema una risorsa economica e, come vedremo, ambientale.

In un caso del genere probabilmente la cosa migliore poteva essere la chiusura dell'impianto e la vendita dei vari pezzi. È ovviamente una scelta difficile sia per l'investitore che per il produttore, vista come ultima spiaggia. Si è voluto quindi proseguire cercando di mettere a posto o modificare quelli che potevano sembrare i problemi principali dell'impianto. Purtroppo le modifiche apportate sono ancora in corso d'opera e non si è quindi potuto ancora constatare l'effettiva efficacia. Nel prossimo capitolo saranno descritte queste aggiunte o variazioni

all'impianto, cercando di capire cosa si possa fare per migliorare nel futuro le prestazioni. Inoltre si cercherà di capire cosa si poteva fare per evitare un funzionamento così poco lineare della macchina, fermo restando che la principale causa di un malfunzionamento impiantistico rimane una progettazione errata o approssimativa.

# CAPITOLO 4

## CRITICITÀ DI UN IMPIANTO A GASSIFICAZIONE

Come detto, l'impianto soggetto della tesi è piuttosto sperimentale data la sua taglia; la sua gestione è stata fin da subito problematica e, come visto nel capitolo precedente, sono stati pochi i giorni in cui ha funzionato correttamente.

In questo capitolo andremo a descrivere cosa non ha funzionato nell'impianto, come si è cercato di risolvere queste problematiche e cosa si sarebbe potuto fare per non avere tutti questi intoppi. Si partirà descrivendo i problemi tipici degli impianti a gassificazione, per poi concentrarci sui problemi derivanti dai TAR e sulla soluzione per l'eliminazione di questi; successivamente si descriveranno i problemi avuti dall'impianto oggetto della tesi, tutte le azioni per la manutenzione e le soluzioni adottate.

Molti problemi dell'impianto sono problemi tipici di tutti i gassificatori, sia a biomassa che a carbone, macchine che dovrebbero essere in realtà facilmente gestibili. Ci si concentrerà sul reattore di gassificazione e sui componenti a valle di questo, in quanto la parte delle coclee per il carico del combustibile e la parte del motore non hanno dato quasi mai problemi o hanno dato problemi esclusivamente per la mancanza o per la poca pulizia del syngas. Si vedrà infatti come i problemi avuti dall'impianto al motore sono correlati al grado di sporco del gas.

Inoltre si analizzeranno delle tecniche sperimentali per la rimozione e l'abbattimento dei TAR, principale problema di queste macchine.

Per scrivere questo capitolo utilizzerò la letteratura, il registro d'impianto dove vengono aggiornate tutte le azioni svolte nell'impianto e l'esperienza che ha acquisito la ditta Econsulenze Srl in questi mesi come gestore dell'impianto.

## 4.1 Problematiche più comuni

Le criticità di questi impianti dipendono da vari fattori. La gestione dovrebbe essere piuttosto semplice ma, come vedremo più avanti, un componente progettato male o un bullone poco stretto possono comportare problematiche che necessitano di un continuo controllo e manutenzione.

I problemi principali di queste macchine riguardano:

- infiltrazioni: creano un problema sia quella verso il gassificatore sia quelle uscenti; è importante avere dei sistemi ermetici di chiusura per l'alimentazione della biomassa e lo scarico della cenere, ma soprattutto per evitare fuoriuscita del gas. Inoltre non si possono avere infiltrazioni di ossigeno che possono portare alla formazione di una miscela esplosiva dentro il gassificatore: per questo motivo viene installato un rilevatore nella sommità del reattore per controllare in tempo reale la concentrazione di ossigeno e che può mandare in blocco l'impianto nel caso si superi il livello consentito;
- temperature troppo elevate: all'interno dei vari componenti si raggiungono temperature elevate, soprattutto nel reattore; queste possono portare alla corrosione di alcune parti ed è importante quindi sviluppare uno studio fluidodinamico preciso per evitare eccessive velocità e impiegare materiali adatti, con un'adeguata resistenza;
- chiusura del condotto di alimentazione del cippato e di scarico delle ceneri: questi condotti spesso si ostruiscono a causa di una non accurata progettazione, se il cippato che viene utilizzato è di dimensioni molto variabili o se il gas trascina con sé del combustibile non totalmente gassificato;
- gassificazione anticipata: se il condotto di alimentazione non è ermeticamente sigillato si rischia di anticipare la gassificazione nel condotto di alimentazione col problema di avere un flusso di gas caldo che va verso il combustibile;

Tutte queste problematiche comportano il blocco del reattore che è il primo sistema di sicurezza nel caso di problemi nell'impianto; i vari blocchi però rischiano di diventare a loro volta un problema in quanto comportano un funzionamento a singhiozzo che non facilita la vita dell'impianto dal punto di vista tecnologico e la vita dell'investitore dal punto di vista economico.

#### 4.1.1 Problemi legati alla purezza del syngas

Il gas prodotto della gassificazione, come abbiamo detto, può essere utilizzato per scopi termici, quindi come combustibile per stufe o caldaie, oppure può alimentare un motore a combustione interna, come nel nostro caso, o una turbina a gas per la produzione di energia elettrica.

Nel secondo caso la qualità del syngas è molto importante per il corretto funzionamento del motore ed è necessario quindi prestare attenzione alla sua composizione. I componenti più pericolosi sono le polveri, il particolato e i TAR.

Le polveri sono presenti a causa della non completa combustione della biomassa, ma non presentano particolari complicazioni e possono essere rimosse piuttosto facilmente attraverso dei sistemi di filtraggio.

Il particolato è un insieme di sostanze sospese in aria sotto forma di aerosol che hanno dimensioni variabili da pochi nm a 100 µm che si può ottenere nel nostro caso come sottoprodotto della combustione incompleta di una qualsiasi sostanza organica.

Il composto TAR è una sostanza nera e viscosa che si addensa nelle zone più fredde del gassificatore e di tutto l'impianto, causa occlusioni e corrosioni; è un prodotto inevitabile e difficilmente rimovibile: il metodo più efficace per non avere questo problema, o, meglio, per ridurlo al minimo, è un'accurata progettazione del gassificatore.

Tipologia	Concentrazione di TAR nel gas [g/Nm <sup>3</sup> ]	TAR come % delle biomassa introdotta
Downdraft	< 1	< 2
Letto fluido	10	3
Updraft	50	15
Flusso trascinato	/	/

**Figura 4.1: composizione medie di TAR in base alla tipologia di gassificatore**

La presenza dei TAR, che secondo la definizione di Milne et al. (1998) sono una vasta gamma di composti organici aromatici, poliaromatici e lineari prodotti durante la conversione termica di biomassa a syngas tramite gassificazione, genera diversi problemi come lo sporco dei componenti, la contaminazione delle correnti con cui vengono a contatto e la conseguente necessità di purificare le correnti d'acqua con cui i TAR vengono assorbiti per la rimozione.

## 4.2 I TAR

Questi indesiderati sottoprodotti si formano tra i 400 e i 1000°C, sono presenti nel syngas in fase vapore, ma condensano e formano un aerosol quando la temperatura scende tra i 150 e i 300°C. La quantità e la composizione dei TAR dipende fortemente dal tipo di materia prima utilizzata e dal processo di gassificazione.

Le principali classificazioni per questi prodotti sono tre, le prime due si concentrano più sulla formazione dal punto di vista chimico del composto, mentre la terza si basa sull'impatto che questo ha sulle prestazioni della macchina.

La prima divide i TAR in leggeri e pesanti a seconda della temperatura di ebollizione: se questa è inferiore a 200°C avremo dei tar leggeri, tutti gli altri sono tar pesanti che sono i principali responsabili dello sporco.

La seconda classificazione divide i TAR in primari, secondari e terziari: i primi sono prodotti dalla decomposizione di cellulosa, emicellulosa e lignina a una temperatura tra 350 e 750°C, i secondi sono idrocarburi poliaromatici ottenuti da reazioni che coinvolgono i TAR primari, i terziari comprendono condensati presenti in quantità non trascurabile nel momento in cui si raggiunge una temperatura di 750°C.

La terza, infine, divide il TAR in cinque classi: la classe 1 comprende gli elementi più pesanti che rimangono in fase condensata anche alle temperature più alte e concentrazioni più basse; la classe 2 è rappresentata da composti eterociclici molto solubili in acqua; la classe 3 è quella dei composti aromatici leggeri che non creano problemi di condensazione; la classe 4 sono i poliaromatici leggeri che condensano a concentrazioni alte e temperature intermedie; la classe 5, infine, sono idrocarburi policromatici pesanti che condensano a concentrazioni basse e temperature relativamente alte passando per la classe.

Sono diversi i fattori che influenzano la formazione di questo composto; oltre al tipo di biomassa e al processo di gassificazione, i più importanti sono la temperatura nel gassificatore, il tempo di permanenza della biomassa nel reattore e la quantità di agente ossidante utilizzata. La temperatura raggiunta all'interno del gassificatore incide principalmente sulla composizione del composto TAR: al crescere della temperatura saranno meno presenti TAR come etano e fenolo di classe 2, ma aumenterà la resa di idrocarburi poliaromatici di classe 4. Aumentando poi il tempo di permanenza della biomassa nel reattore, si è notato che si può avere

cracking termico dei tar leggeri anche a temperature leggermente inferiori, ad esempio intorno a 850°C; si ha però un aumento di TAR di classe 5, i più complicati da gestire ed eliminare. All'aumentare del rapporto equivalente tra ossidante iniettato e quello necessario per la completa combustione (ER), si trova che la massima temperatura si sposta verso il basso nel reattore a causa del maggior contenuto di ossigeno e delle maggiori velocità in gioco; questo permette una maggiore combustione e quindi maggiore decomposizione dei TAR; diminuiscono principalmente i TAR leggeri (con peso molecolare minore di 300 g/mole) e si ha un aumento di quelli pesanti. Non è quindi sufficiente aumentare ER per eliminare i TAR, ma è chiaramente necessario aggiungere sistemi a valle per avere un gas di sintesi sufficientemente pulito per le proprie applicazioni.

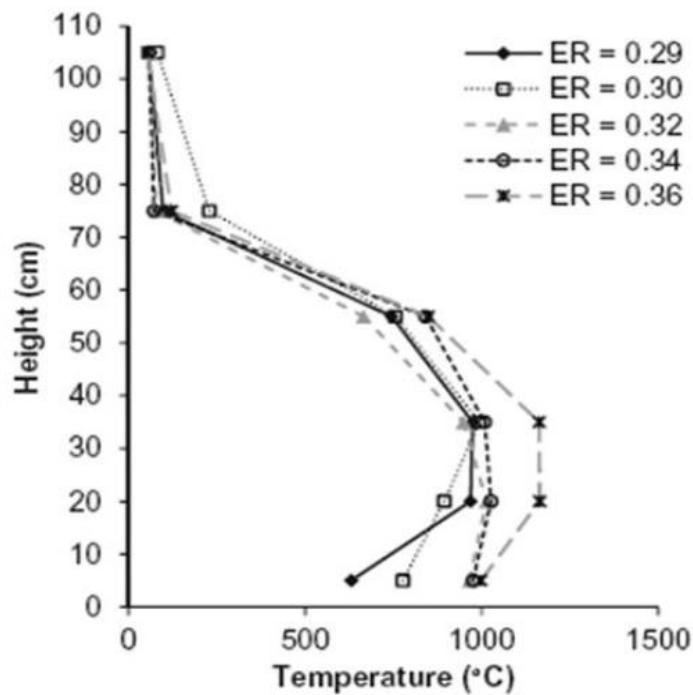


Figura 4.2: profilo di temperatura all'interno di un gassificatore downdraft

Il livello massimo di TAR dovrebbe essere compreso tra 60 e 600 mg/Nm<sup>3</sup> se il fine è pompare e comprimere il gas; se invece il gas va utilizzato per un motore a combustione interna o una turbina a gas la presenza di TAR deve essere minore: circa 50 mg/Nm<sup>3</sup> per il MCI e meno di 30 mg/Nm<sup>3</sup> per la turbina. I metodi per la rimozione dei TAR possono essere suddivisi in due categorie: metodi primari e secondari. I primi sono tecniche impiegate all'interno del gassificatore: è necessario quindi ottimizzare le condizioni operative e la progettazione oppure aggiungere un catalizzatore. È sempre

preferibile integrare questi metodi con uno di tipo secondario perché essi non garantiscono un abbattimento dei TAR tale da garantire il rispetto dello standard. I metodi secondari, per l'appunto, sono le tecnologie che utilizzano un reattore secondario.

In questa tesi si divideranno le tecnologie in base alla loro affidabilità e a quanto siano conosciute e utilizzate.

#### *4.2.1 Effetto delle condizioni operative*

La prima azione da compiere per rallentare la formazione dei TAR è la regolazione delle condizioni operative. Infatti, è possibile ridurre la quantità di TAR in uscita dal gassificatore controllando la temperatura, il rapporto ER (equivalence ratio), il rapporto vapore/biomassa e la portata di combustibile. Come regola generale, maggiori valori di temperature, ER e rapporto vapore/biomassa portano alla distruzione dei prodotti liquidi della gassificazione. Uno studio svolto da Baker et al. dimostra l'esistenza di una relazione tra la quantità di TAR prodotta e la temperatura di reazione: se ci si spinge a temperature superiori ai 1000°C all'interno del reattore si riesce a ridurre il contenuto di prodotti indesiderati. Inoltre anche una maggiore disponibilità di ossigeno riduce la presenza di TAR a discapito, però, di un aumento di CO<sub>2</sub> e una diminuzione di CO e H<sub>2</sub> e quindi del potere calorifico del gas. Un accorgimento molto utilizzato, poi, è l'iniezione secondaria di comburente o la creazione di una gassificazione in due stadi. Nel secondo caso, il TAR formato durante la pirolisi del primo stadio è decomposto nella zona di reazione del secondo stadio. Anche per la pressione, si è visto che spingendosi oltre i 20 bar all'interno del reattore si riduce la quantità prodotta di TAR.

#### *4.2.2 Metodi conosciuti per la rimozione dei TAR*

Come detto precedentemente, oltre a migliorare la progettazione dell'impianto e le condizioni operative, l'altro modo attraverso il quale tenere sotto controllo il contenuto dei TAR nel gas di sintesi è utilizzare dei processi a valle del gassificatore.



### 4.2.2.1 Cracking termico

La prima opzione è il cracking termico che consiste in un processo ad alta temperatura che va a decomporre le molecole di TAR presenti nel gas; è un processo che avviene senza utilizzo di catalizzatori ad una temperatura maggiore di 850°C. In questo modo vengono anche favorite le reazioni di reforming e di shift così da aumentare la presenza di idrogeno nel gas. Chiaramente la temperatura dipenderà molto dalla tipologia di TAR che si va a trattare, infatti già a 500°C si ha l'eliminazione dei TAR primari. Se non si vuole arrivare a temperature troppo elevate, si può aumentare il tempo di permanenza dei composti nel reattore di cracking. Il grande vantaggio di questa tecnologia è il fatto che sia molto conosciuta e affidabile, inoltre si ha la totale rimozione dei composti indesiderati; d'altro canto, date le alte temperature, si devono utilizzare dei materiali particolari e l'efficienza termica dell'impianto tende a diminuire perché per generare il calore necessario si brucia parte del gas di sintesi e si aggiunge ossigeno al syngas.

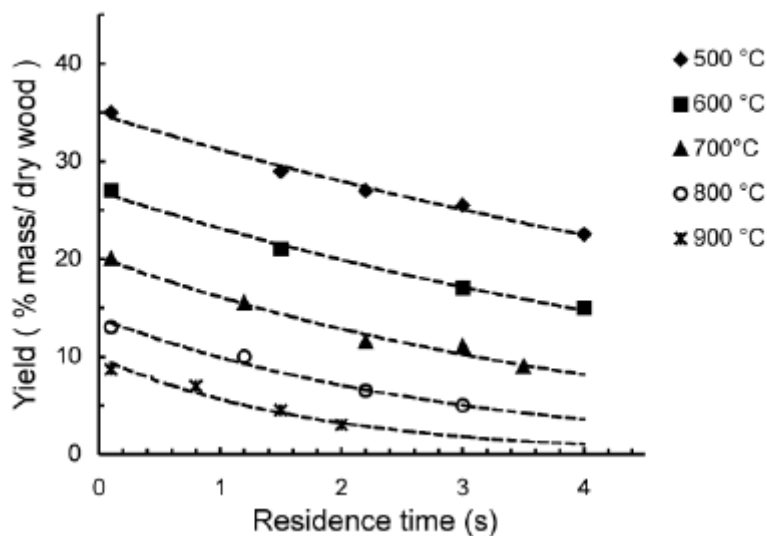


Figura 4.3: resa percentuale di tar in funzione del tempo di residenza e della temperatura di cracking

Uno studio eseguito da Brandt, che utilizza l'ossidazione parziale dei prodotti della gassificazione, ha ottenuto un livello minimo di TAR pari a 0,5 g/kg di biomassa secca, rimuovendo circa il 98% a 900°C con un rapporto ER pari a 0,5.

#### 4.2.2.2 Cracking catalitico

Un'altra operazione tecnologica diffusa, ma nello stesso tempo sempre in evoluzione è quella del cracking catalitico, dove il composto TAR è in contatto con un catalizzatore con cui reagisce. Questa opzione permette innanzitutto di lavorare a temperatura decisamente inferiori, quindi non si ha la necessità di bruciare una parte di gas e diminuire il potere calorifico. Il cracking catalitico può avvenire all'interno del gassificatore stesso oppure in un reattore a valle; nel primo caso è necessario avere un gassificatore a letto fluido e si impiega come letto proprio il catalizzatore. I catalizzatori sono divisi in minerali e sintetici; quelli minerali possono essere la dolomite, l'olivina, materiali ferrosi o argillosi, quelli sintetici sono a base di metalli alcalini, di transizione o allumina attiva e sono più costosi di quelli minerali. L'uso della dolomite è interessante dal punto di vista commerciale in quanto è un materiale poco costoso, d'altra parte è un materiale poco resistente e tende a rompersi facilmente e va quindi preferibilmente utilizzata in un reattore secondario. Un altro problema della dolomite è che non si riescono a eliminare totalmente i TAR e deve quindi essere utilizzata in coppia con catalizzatori a base di nichel, molto più costosi. In alternativa, molto utilizzata è anche l'olivina; è meno efficiente, ma ha maggiore resistenza meccanica. Sostituendo la dolomite o l'olivina alla sabbia del gassificatore a letto fluido si aumenta la quantità di gas prodotto del 50% e si ha una riduzione del Tar di 20 volte. Il problema di questa soluzione è il costo del catalizzatore che si disattiva dopo diversi utilizzi, può avvelenarsi e va smaltito con un sistema apposito. Inoltre ogni gassificatore e ogni tipo di TAR necessiterebbero di un catalizzatore specifico per riuscire a eliminare il materiale catramoso in maniera completa.

#### 4.2.2.3 Tecniche di rimozione fisica del TAR

Il lavaggio con acqua è una tecnologia molto interessante, soprattutto perché si utilizza acqua, quindi un liquido disponibile e conosciuto. È importante che la temperatura dei gas all'ingresso dello scrubber sia la minore possibile per minimizzare la quantità d'acqua necessaria, ma non deve essere troppo bassa così da rimanere sopra il punto di rugiada dei TAR. I wet scrubbers rimuovono sia il TAR che il particolato a bassa temperatura (tra i 35 e i 60°C). Con questo sistema si riesce a ottenere una quantità di TAR tra 20 e 40 mg/Nm<sup>3</sup>; si produce però, anche una

componente liquida contaminata da trattare. Il componente è costruito in modo tale da sviluppare un flusso controcorrente tra il gas e l'acqua di lavaggio, quindi funziona come uno scambiatore di calore. Il gas proviene dal gassificatore e passa per un ciclone così da abbattere prima la maggior parte delle particelle solide. Si è dimostrato che l'efficienza di rimozione del TAR più il particolato è circa del 90%, con un gas in uscita dal gassificatore non troppo sporco. Un altro fattore che determina l'efficienza del sistema è la pulizia dell'acqua di lavaggio; è necessario un trattamento apposito per depurare l'acqua e rimuovere i TAR condensati. Il problema dell'utilizzo dell'acqua è che la maggior parte delle sostanze che formano il TAR sono idrofobiche quindi l'acqua rimuove solo le goccioline di TAR in fase aerosol; se si utilizzano come liquido di lavaggio fluidi come il bio-olio, questi funzionano come solventi per il TAR.

Ci sono poi dei componenti atti alla rimozione delle particelle più grosse delle impurità presenti nei gas. I cicloni sono utilizzati per rimuovere il materiale solido più grosso; non vengono utilizzati per il TAR poiché queste particelle creerebbero problemi di sporcamento attaccandosi alle pareti del componente. Nei filtri a maniche invece, il syngas entra dal basso, passa attraverso le maniche ed esce dalla parte superiore; si manda poi un flusso d'aria in verso opposto attraverso le maniche per rimuovere le particelle che sono rimaste attaccate.

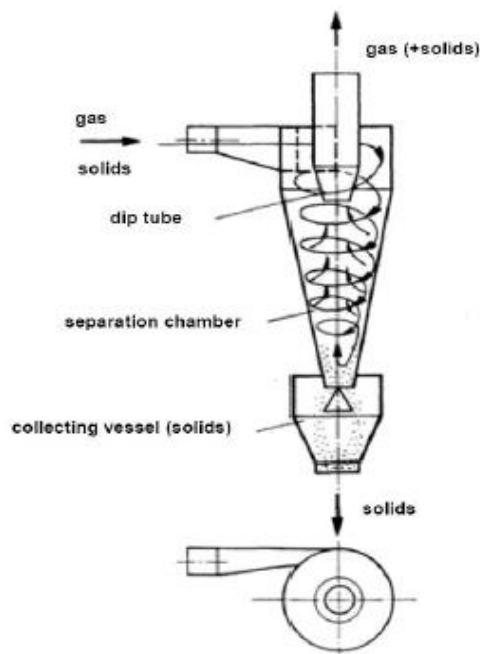


Figura 4.4: rappresentazione di un ciclone industriale

### 4.2.3 Metodi sperimentali per la rimozione dei TAR

I precipitatori elettrostatici a umido (tecnologia WESP) sono una tecnologia nota da tempo, ma che solo negli ultimi 15 anni è stata coinvolta nelle grandi industrie. La precipitazione elettrostatica utilizza forze elettrostatiche per rimuovere da un gas le particelle solide indesiderate o le gocce di liquido. Il principio di funzionamento del precipitatore elettrostatico a secco consiste nel far passare il gas attraverso un elettrodo con un elevato potenziale e un altro a terra; il gas si ionizza originando l'effetto corona. Gli ioni che vanno a prodursi si depositano sulle particelle di polvere, TAR e acqua che si caricano e si depositano sull'elettrodo a terra a causa del campo elettrico presente. Le impurità formano quindi uno strato sull'elettrodo che va periodicamente rimosso. Questa tecnica ha il vantaggio di poter separare particelle anche submicroniche, di trattare elevate portate di gas con basse perdite di carico, di avere bassi costi operativi; ha però alti costi iniziali e grandi dimensioni.

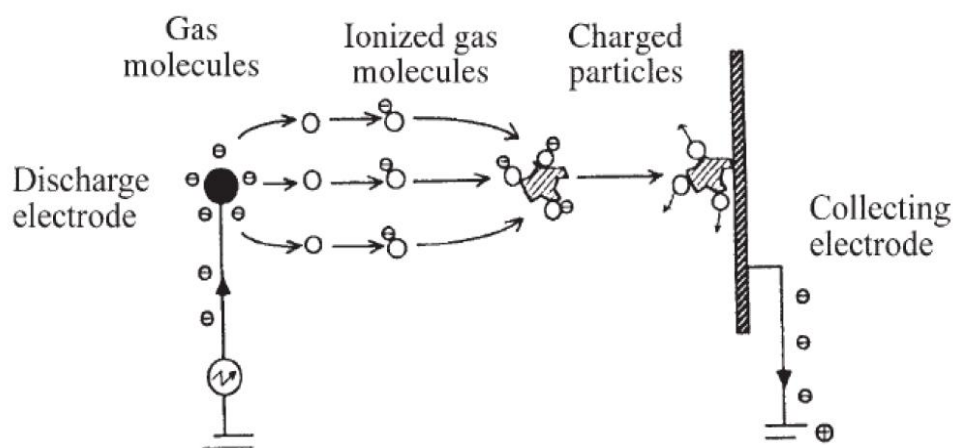


Figura 4.5: funzionamento precipitatore elettrostatico

Il principio di funzionamento del precipitatore a umido è il medesimo di quello a secco; la differenza sta nel sistema di rimozione dei composti indesiderati. Sono sistemi indicati per rimuovere particelle liquide e quando il gas presenta alta umidità. È importante in questa tecnologia tenere irrigata la superficie dell'elettrodo dove si raccolgono le impurità: si possono direttamente utilizzare l'umidità del gas e si può aiutare la condensazione facendo circolare dell'aria fredda esternamente. Con la tecnologia a umido, rispetto a quella a secco, non si ha il rischio che, rimuovendo dall'elettrodo le impurità, il gas si riprenda nel suo corso le

polveri; però, data la presenza dell'acqua, non si può lavorare a temperature elevate e inoltre si hanno problemi di corrosione. Una sperimentazione svolta dall'ECN (Energy research Center of Netherlands) ha dimostrato come la tecnologia WESP sia particolarmente efficiente per la rimozione di TAR generati da gassificazione di biomassa; avendo un gas con circa 1000 mg/m<sup>3</sup> di TAR e 250 mg/m<sup>3</sup> di particolato e sfruttando un tempo di permanenza di 4 s, si ottiene l'abbattimento completo del particolato e il 50% di TAR.

Un'altra tecnologia sperimentale sviluppata da Ledesma et al. che sfrutta l'ossidazione parziale è una tecnica a due stadi separati: prima è presente un reattore a letto fluido dove avviene la reazione di pirolisi a 600°C, successivamente c'è un reattore tubolare in cui passa il gas insieme al TAR; in questo secondo reattore c'è la rimozione del TAR per via termica attraverso un'ossidazione parziale.

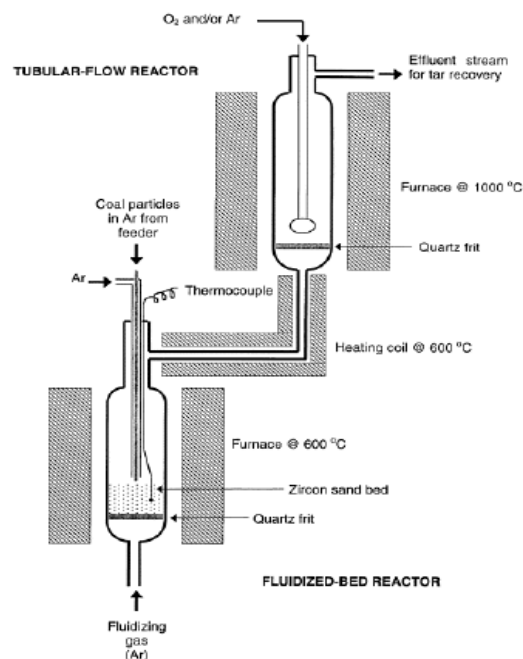


Figura 4.6: reattore tubolare per l'ossidazione parziale

Il sistema RFTC (Reverse Flow Tar Converter), sviluppato dalla BTG (Biomass Technology Group), invece, serve per la rimozione del TAR attraverso un sistema a basso consumo energetico, utilizzando come catalizzatore il nichel. Il gas viene prodotto in un reattore ed esce a una temperatura compresa tra 350 e 650 °C; viene quindi alimentato nel reattore RFTC dove viene riscaldato fino a circa 900°C. Nella sezione centrale di questo reattore, in presenza del nichel, avviene lo steam reforming e quindi

la conversione del TAR e degli idrocarburi compreso il metano in CO e H<sub>2</sub>; inoltre anche tutta l'ammoniaca viene convertita in azoto e idrogeno.

Component	Conversione %
Benzene	82
Naphtalene	99
Phenol	96
Total aromatic	94
Total phenol	98
Total tar	96
Total ammonia	99

Figura 4.7: conversione del TAR con reattore RFTC

Esiste poi una tecnologia denominata OLGA che utilizza olii come liquido di lavaggio. Deriva dalla fusione di due metodi di rimozione del TAR: quella fisica e la sua distruzione all'interno del reattore. Si mette a contatto il gas con un particolare olio che sta all'interno di una colonna di assorbimento; il gas viene pretrattato per eliminare il particolato. Il flusso di syngas viene alimentato alla colonna di assorbimento e il liquido che esce, saturo di tar, viene purificato tramite uno stripper. Il TAR viene quindi recuperato nel gas di stripping che viene utilizzato come combustibile nel gassificatore distruggendo così i TAR presenti.

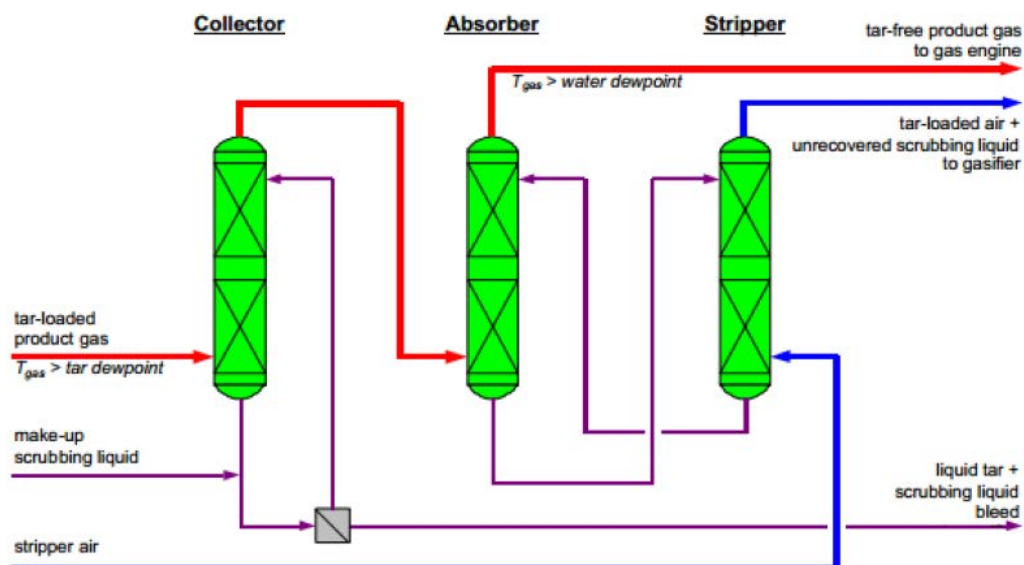


Figura 4.8: tecnologia OLGA

ENEA ha presentato una tecnologia per la rimozione del TAR basata sul contatto tra delle polveri adsorbenti e il flusso di syngas. È necessario che il flusso gassoso abbia una temperatura prossima a quella di condensazione delle molecole da eliminare, la polvere quindi fornisce la superficie ove far condensare, depositare e adsorbire le molecole di TAR. Successivamente la polvere viene separata dalla corrente di gas e rigenerata. La tipologia di polvere da utilizzare dipende molto dal tipo di TAR; il brevetto ENEA suggerisce di utilizzare la cenere dell'impianto se come combustibile si utilizza biomassa poiché essa contiene alte quantità di metalli alcalini. La sperimentazione ha mostrato una riduzione del TAR superiore al 50%.

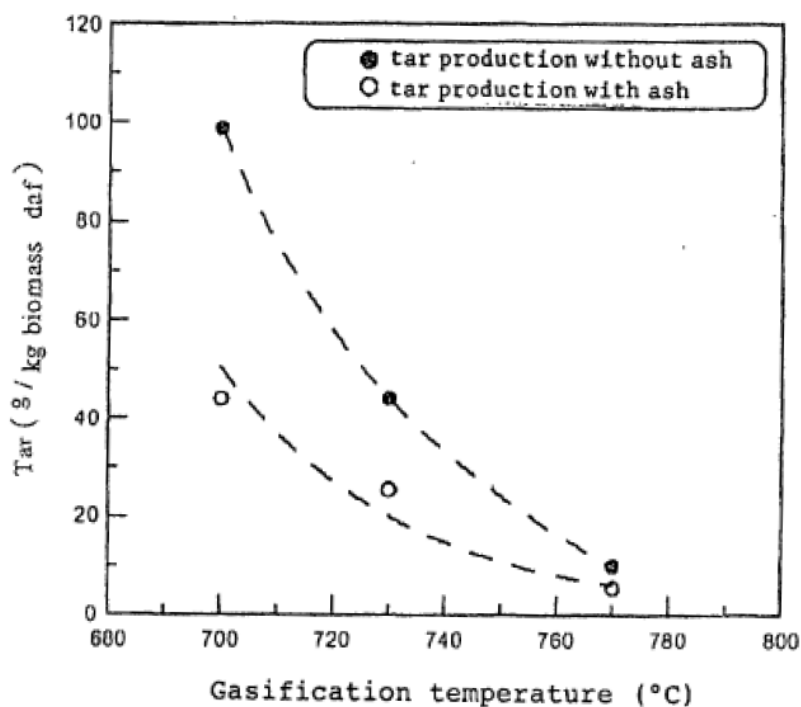


Figura 4.9: produzione di TAR con e senza abbattitore a polveri

### 4.3 Problematiche dell'impianto

L'obiettivo di questo paragrafo è la descrizione dei problemi sorti nell'impianto oggetto della tesi. Riprendendo il capitolo 3, si farà un resoconto delle azioni svolte dai gestori per la pulizia e manutenzione del reattore e i restanti componenti e si esporranno gli accorgimenti già messi in atto e futuri pensati assieme al produttore. Purtroppo certe soluzioni pensate in questi mesi devono ancora essere messe in atto, quindi non abbiamo la certezza che portino effettivi miglioramenti.

### 4.3.1 Manutenzione dell'impianto

La manutenzione dell'impianto è stato un problema fin dal principio; oltre alla manutenzione ordinaria, Econsulenze ha dovuto sobbarcarsi tutta la manutenzione speciale dell'impianti, cioè quella non prevista nel manuale d'uso dell'impianto. Questa comportava un lavoro spesso inutile in quanto pochi giorni dopo la pulizia il problema si ripresentava nelle stesse identiche modalità. È stata quindi un'operazione stressante e inconcludente, ma chiaramente necessaria per provare a far ripartire di volta in volta l'impianto.

Guardando il manuale di uso e manutenzione dell'impianto, si può constatare come la manutenzione ordinaria riguardi solo la sostituzione delle cartucce ceramiche del filtro, la linea pneumatica con riferimento allo scarico della condensa, il sistema di scarico ceneri con la sostituzione dei big bag. Le cartucce ceramiche dovrebbero durare all'incirca un anno; dal registro d'impianto si vede che nell'arco di sei mesi queste siano state cambiate 4 volte.



Figura 4.10: supporti deformati e presenza candela rotta

Una delle azioni maggiormente svolte durante la gestione dell'impianto è stata l'apertura del filtro ceramico. Il problema, a parte il grado di sporcizia del gas che obbligava a cambiare le candele più frequentemente del dovuto, era l'alta temperatura che si raggiungeva. Questa era dovuta probabilmente a una infiltrazione di ossigeno sul coperchio del filtro. L'alta temperatura portava alla deformazione dei supporti per le candele e alla rottura di queste come si può vedere in figura 4.10. Si è risolto il problema riempiendo tutte le cavità con le candele, in quanto in progettazione si pensava non servissero tutte, e modificando il coperchio per una chiusura più ermetica.



Il gas arriva comunque molto sporco allo scambiatore, il che significa che il filtro non esegue il lavoro che dovrebbe fare o che le candele non hanno delle prestazioni tali per cui il syngas non risulti così contaminato.



Figura 4.11: pulizia catrami filtro secondario

Un altro intervento spesso effettuato è stata la pulizia dai catrami del filtro secondario, ovvero il filtro con lana di roccia. L'operazione si effettuava spesso in concomitanza con la pulizia dello scambiatore. Il TAR infatti passava dalla fase aerosol alla fase catramosa nello scambiatore per la diminuzione di temperatura e quindi si riversava tutto nel filtro secondario. Molto spesso il filtro era talmente sporco da non far più circolare il gas. La pulizia di scambiatore+filtro secondario si esegue con soda caustica per sciogliere il catrame e aiutandosi con martello e scalpello o spazzole apposite.



Figura 4.12: grado di sporramento scambiatore e asta per aumento turbolenza



**Figura 4.13: stato dello scambiatore dopo intervento di pulizia**

La troppa presenza di TAR nel gas ha poi portato alla detonazione del motore all'altezza del collettore di adduzione in ingresso del motore: questo si presentava rotto e coni cavi elettrici divelti. I catrami infatti avevano provocato delle incrostazioni tali da precludere il funzionamento degli organi esterni come valvole e aste e si è arrivati all'incollamento delle fasce elastiche e anche del pistone contro la canna del cilindro. Ciò dimostra la necessità di installare un ulteriore sistema di filtraggio prima del cogeneratore.

#### *4.3.2 Soluzioni adottate e future*

C'è da dire innanzitutto che le soluzioni adottate sono state installate dopo la detonazione del motore. Dopo quel momento l'impianto di gassificazione non ha più funzionato, quindi non abbiamo un riscontro per quanto riguarda la reale efficacia di questi accorgimenti.

La prima tecnologia installata è una batteria di filtraggio per il catrame che arriva al motore; questa è stata posizionata sul condotto che porta il gas al motore, poco prima di quest'ultimo.



**Figura 4.14: nuovo sistema di filtraggio ingresso motore**

La batteria è un separatore lamellare di gocce installato dentro uno scrubber. Si tratta di un box di forma quadrata e removibile. Il gas arriva nella batteria dal basso passa attraverso un sistema di alette che fa condensare le impurità nei lati e le direziona verso il fondo, dove è presente un serbatoio con un rubinetto per svuotare il filtro. La portata del gas in quel punto è di circa 250 Nm<sup>3</sup>/h e la temperatura è di 66°C. La temperatura e la velocità del gas dovrebbero essere tali da permettere che i TAR non condensino.

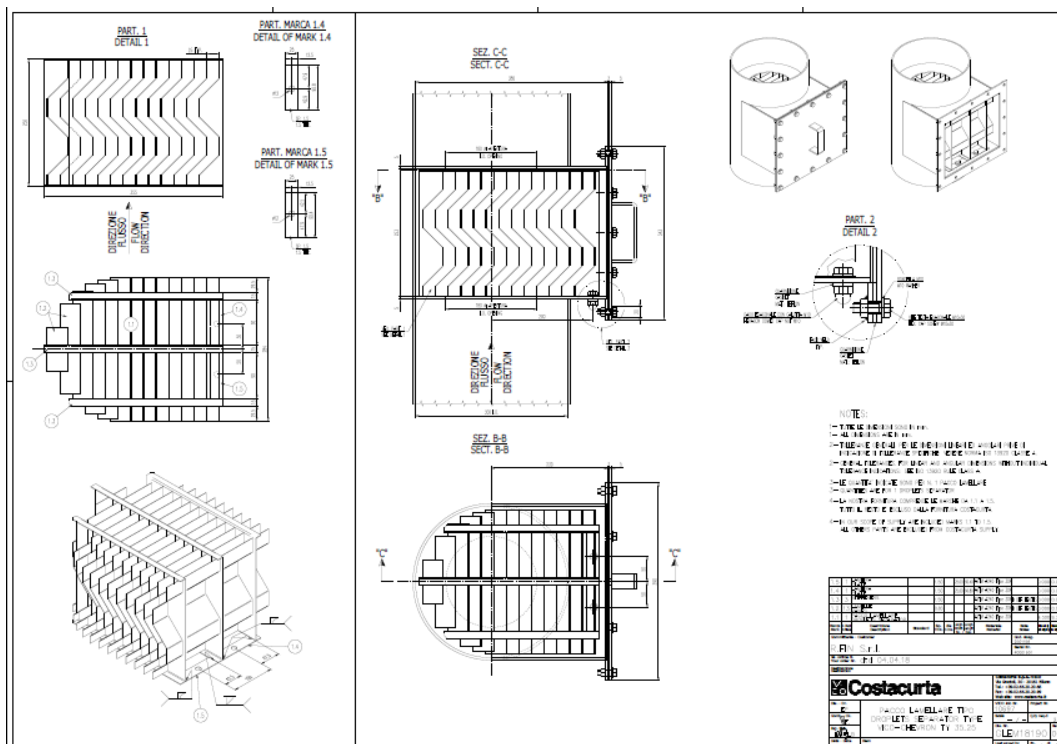


Figura 4.15: particolare dell'interno del filtro

Non avendo ancora testato la soluzione non possiamo avere la certezza del corretto funzionamento. Il problema potrebbe essere la temperatura del gas, alla quale certi tipi di TAR potrebbero già condensare; sarebbe opportuno analizzare il TAR dell'impianto. Inoltre le alette sono molto fitte e ravvicinate e potrebbero intasarsi facilmente se il catrame abbassandosi di temperatura diventasse vischioso.

Nella figura 4.16 è riportato il progetto del filtro che dovrebbe andare a implementare la batteria di filtraggio già installata. Il porta filtro dovrebbe permettere alle goccioline di condensa di raccogliersi in maniera più agevole sul fondo e soprattutto permette di avere un serbatoio più grande. Infatti un altro problema di questa soluzione è l'apertura del rubinetto per

lo scarico delle condense che potrebbe far entrare aria, un grosso problema per il gas, soprattutto vista la vicinanza al motore.

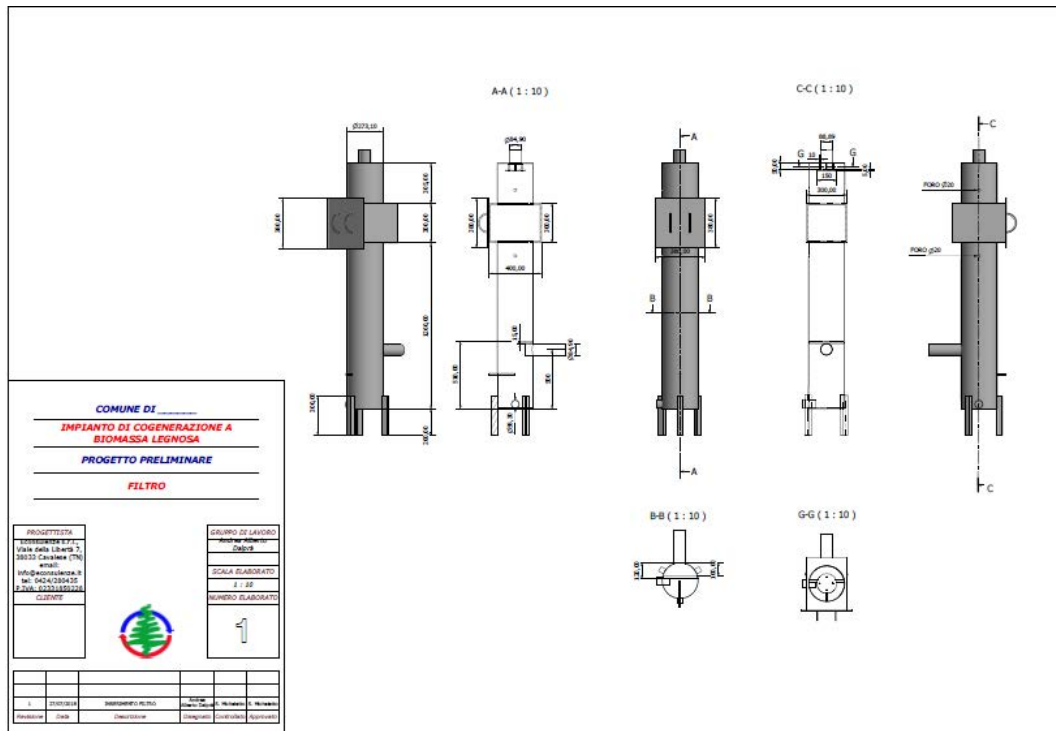


Figura 4.16: progetto preliminare filtro

Un'altra possibilità potrebbe essere, nel futuro, la modifica del reattore. Modificando il reattore down-draft e trasformandolo in un reattore a letto fluido, utilizzando come letto fluido dolomite o olivina, sarebbe possibile eseguire un cracking catalitico direttamente nel reattore e così abbattere una gran parte dei TAR. La soluzione migliore potrebbe essere il letto fluido bollente. Si avrebbero velocità nell'ordine di quelle già presenti ora, bisognerebbe modificare l'alimentazione del cippato e l'uscita del gas. Non si dovrebbe cambiare tutta la struttura del gassificatore e potrebbe essere una soluzione potenzialmente non troppo economicamente svantaggiosa. Oppure si potrebbe trasformare l'impianto in un reattore a letto trascinato: questa tipologia è utilizzata principalmente per gli impianti che utilizzano come combustibile il polverino di carbone. Il combustibile deve essere opportunamente trattato, meglio se fosse polverizzato con le chips di dimensioni inferiori al millimetro, e viene alimentato assieme all'agente ossidante ad alta velocità. I costi operativi sono maggiori degli altri gassificatori e come agente ossidante è preferibile utilizzare ossigeno puro

ma si raggiungono temperature molto elevate, anche superiori a 1200°C, il che comporterebbe un cracking termico di tutti i componenti del TAR nel reattore.

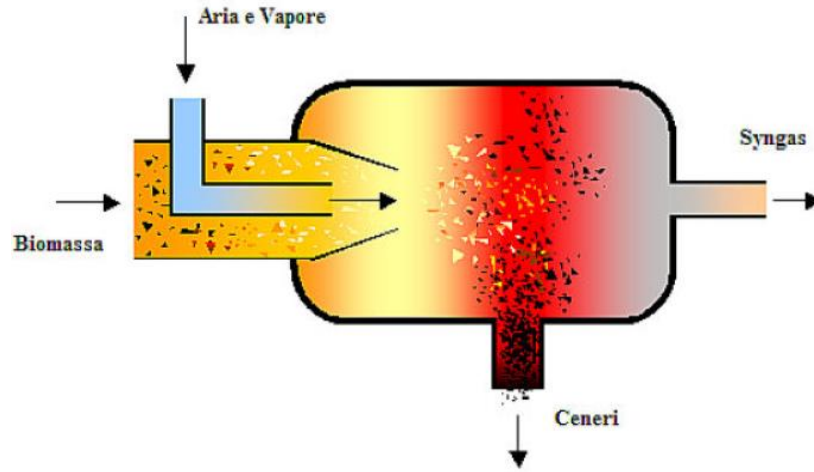


Figura 4.17: gassificatore a letto trascinato



# CAPITOLO 5

## IL BIOCHAR

In questo capitolo si descriverà il processo tramite il quale dalle ceneri in uscita dall'impianto si ottiene il biochar.

È un processo burocratico, per il quale serve una certificazione; grazie a questa un rifiuto come la cenere diventa un ammendante da vendere e utilizzare. Grazie a Econsulenze S.r.l. ho potuto seguire in prima persona queste pratiche per la certificazione del carbone vegetale (leggasi cenere) per due differenti aziende.

Essendo il biochar un prodotto piuttosto nuovo, ho fatto affidamento all'associazione Ichar per reperire tutte le informazioni essenziali per la pratica. L'Ichar è l'associazione italiana senza scopo di lucro che segue i produttori di biochar e che si è battuta per far diventare questo prodotto a norma di legge. L'associazione ha lo scopo generale di promuovere soluzioni, tecnologie, studi avanzati, attività dimostrative e progetti educativi finalizzati alla riduzione delle emissioni di gas climalteranti in atmosfera attraverso l'uso di biochar e comunque di biomasse vegetali e di tutti i loro sottoprodotti. L'istanza per l'inclusione del biochar tra gli ammendanti inclusi in agricoltura è stata presentata nel 2012 e solo nel 2015 è stata accettata con la pubblicazione della normativa-Biochar sulla Gazzetta ufficiale.

È un risultato importante, che però non ha ancora attecchito a sufficienza in quanto, per ora, i produttori certificati di biochar sono 10.

In pratica, tutto quello che esce da un impianto che utilizza come combustibile biomasse vegetali di scarto è utile e non rimane nessun rifiuto da smaltire.

Vediamo subito nello specifico cos'è il biochar e quali sono tutti i suoi vantaggi.

## 5.1 Cos'è il biochar

Come detto nel cappello introduttivo di questo capitolo, il biochar altro non è che il carbone vegetale uscente da un impianto che utilizza come combustibile biomasse vegetali, o più volgarmente la cenere. Questo carbone deve però possedere determinate proprietà definite dall'associazione Ichar e dal Ministero delle politiche agricole e forestali.

La definizione di biochar è stata scelta dall'IBI (International Biochar Initiative) che ha specificato come questo materiale trova applicazione nell'agricoltura e nella protezione dell'ambiente. I sistemi tecnologico-industriali per la produzione di biochar si basano su sistemi di pirolisi o gassificazione della biomassa, quindi in totale assenza o in presenza minima di ossigeno.

L'idea di utilizzare questo carbone vegetale in agricoltura nasce dallo studio di antichi terreni dell'Amazzonia brasiliana, la Terra Preta dos Indios. Sono suoli particolari che hanno stessa mineralogia e tessitura di terreni adiacenti, ma sono incredibilmente fertili e caratterizzati da un alto contenuto carbonioso (con una concentrazione 70 volte più alta dei suoli circostanti) grazie alla presenza di materiale vegetale carbonizzato, probabili resti di fuochi interrati dagli indios.

Nelle zone tropicali la tecnica agricola più utilizzata è quella "taglia e brucia" che impone un continuo nomadismo poiché il terreno perde di fertilità; utilizzando invece la tecnica taglia e carbonifica, interrando i residui vegetali, si forniscono al terreno grosse quantità di sostanza organica stabile che trattengono i nutrienti del terreno.

Il biochar è un prodotto organico eterogeneo composto fino al 90% di C. Oltre che da C e suoi composti, l'ammendante è formato da una piccola percentuale di H<sub>2</sub>O, sostanze volatili, chiaramente ceneri e minerali. Le caratteristiche del biochar sono altamente condizionate dal processo tramite cui si producono le ceneri (dal tipo di pirolisi o se avviene tramite gassificazione della biomassa), quindi dalla temperatura del processo e dalla tipologia della biomassa.

Nei prossimi paragrafi si vogliono descrivere i principali aspetti positivi del biochar: l'apporto di migliorie alle funzioni del suolo e la funzione di stoccaggio del carbonio.



Successivamente si descriverà il procedimento grazie al quale un'azienda può iniziare a vendere le proprie ceneri.



Figura 5.1: diverse colorazioni del suolo a seconda dell'utilizzo o meno di biochar

### 5.1.1 Effetti benefici per il terreno

Le ceneri uscenti da un impianto vengono considerate un rifiuto, quindi come tale andrebbero trattate. Fino all'accettazione dell'istanza per l'inclusione del biochar tra gli ammendanti inclusi in agricoltura, le ceneri erano classificate come "rifiuti speciali non pericolosi" e venivano impiegate per la produzione di conglomerati cementizi o venivano integrate con letame e compost, dato che migliorano sia la fermentazione che la disponibilità degli elementi contenuti nelle ceneri stesse. Ad oggi le ceneri se non vengono certificate come biochar devono essere comunque trattate come "rifiuto speciale non pericolo".

Innanzitutto, prima di parlare dei vantaggi che il biochar può portare con il suo utilizzo, c'è da dire che le prove sperimentali di questo prodotto nei suoli tipici del bacino Mediterraneo sono ancora limitati, le principali sperimentazioni sono state effettuate in ambienti tropicali e subtropicali. Inoltre non è ancora del tutto chiaro la quantità ottimale e massima che può essere utilizzata senza compromettere le naturali funzioni del suolo.

Dal punto di vista agronomico, comunque, le ceneri possono essere considerate un concime poiché apportano al suolo elementi nutritivi come potassio, fosforo, magnesio e calcio riducendo così l'utilizzo di concimi

artificiali, e un correttivo, dato che innalzano il pH del suolo verso valori più basici: studi hanno dimostrato che per quantità di ceneri intorno alle 5 tonnellate/ettaro, si possono avere innalzamenti da 1,4 a 2,0 unità di pH per qualche anno.

Per quanto il biochar riesca a rilasciare nutrienti nel terreno come potassio fosforo e magnesio, bisogna notare dalle sperimentazioni che la quantità di nutrienti apportati (si stima sulla decina di kg per ettaro di nutrienti rilasciati a fronte di 30 t per ettaro di biochar utilizzato) non può giustificare i benefici indotti sulle piante a seguito dell'interramento dell'ammendante; i benefici principali vanno quindi ricercati nel miglioramento delle condizioni generali del suolo.

Nel momento in cui addizioniamo al suolo il biochar, questo influenza la tessitura, la porosità e la consistenza del suolo andando a modificare l'area superficiale apparente, la densità, la dimensione e la distribuzione dei pori; inoltre si va a modificare la colorazione del suolo, che diventa più scuro, e la temperatura dello strato superficiale. Incrementando la superficie netta specifica, si va a influenzare positivamente la correlazione tra il suolo e l'acqua con un livellamento delle differenze tra suoli sabbiosi e argillosi. L'elevata porosità del biochar è un'altra fondamentale proprietà: crea microhabitat ideali per la colonizzazione, crescita e riproduzione di microrganismi fungini. Inoltre l'aggiunta di biochar consente di aumentare la capacità di ritenzione nel suolo di alcuni contaminanti organici antropogenici contribuendo a rendere meno tossica e meno mobile la sostanza e riducendone la disponibilità.

Proviamo a descrivere un caso studio effettuato dall'associazione Ichar dal 2009 al 2014 in un vigneto a Montepulciano. L'esperimento prevede di dividere il vigneto in diverse zone e utilizzare una zona come controllo (C), quindi senza apporto di biochar, una parte con una dose singola di biochar di 22 t/ha (B) e una parte con una dose doppia di biochar (44 t/ha, 22 t il primo anno e 22 il secondo) (BB). La biomassa di partenza del biochar sono potature di fruttiferi e l'ammendante viene prodotto a una temperatura di 500°C tramite pirolisi.

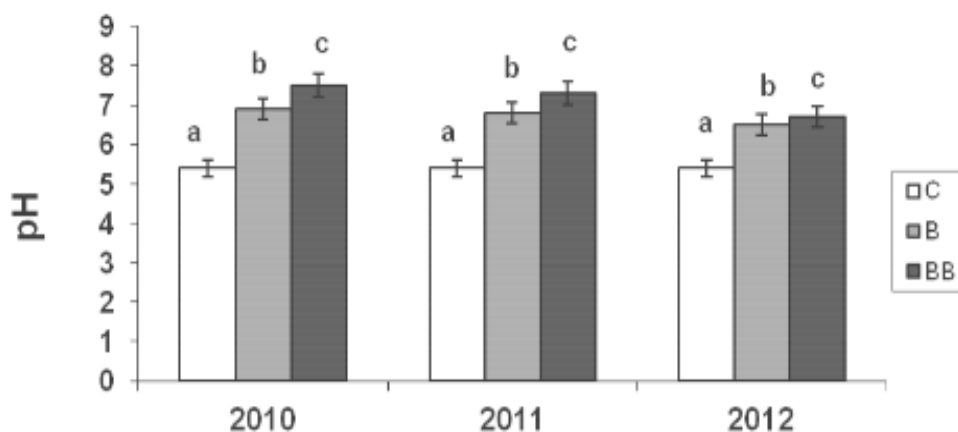


Figura 5.2: incremento del pH del suolo dopo l'utilizzo del biochar

Si può notare come il pH passa da valori di 5,4 nella situazione senza biochar a valori di 6,5 in B e 6,7 in BB dopo il primo anno. Essendo i terreni coltivati più acidi di quelli incolti, si ha un interesse a utilizzare il biochar. L'aggiunta del biochar inoltre provoca un aumento del carbonio, una diminuzione della densità apparente e un aumento della CSC. Per CSC si intende la capacità di scambio cationico, cioè la quantità di cationi scambiabili che un materiale può trattenere per scambio ionico, che rappresenta un meccanismo tramite cui il terreno trattiene e mette a disposizione delle piante elementi nutritivi: più quindi questa proprietà è alta più il terreno è chimicamente fertile. La densità apparente cala poiché si inserisce nel terreno una sostanza organica, più leggera di una sostanza minerale e che favorisce la stabilità degli aggregati; valori elevati di densità apparente influiscono negativamente sulla penetrazione dell'acqua e sulla crescita delle radici.

	C	B	BB
<b>C% org</b>	<b>0.78</b>	<b>1.36</b>	<b>4.18</b>
<b>Bulk Density (g cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>1.45</b>	<b>1.43</b>	<b>1.38</b>
<b>CSC (meq 100 g<sup>-1</sup>)</b>	<b>12.1</b>	<b>17</b>	<b>24</b>

Figura 5.3: incremento di altre proprietà grazie all'utilizzo di biochar

Inoltre il biochar aumenta il contenuto idrico nel suolo, con un incremento del 45% della porzione di terreno BB rispetto a quella C. Anche lo stato

fisiologico delle piante è migliorato, valutando l'incremento nel potenziale idrico fogliare e nella produzione di clorofilla.

Per quanto riguarda la produzione, si è visto un aumento di questa con una differenza superiore negli anni di maggiore siccità idrica. Per supportare la bontà di questi risultati, si è controllata anche la qualità del prodotto : non si sono viste però sostanziali differenze nei parametri qualitativi.

In definitiva, l'effetto nutrizionale si è rivelato contenuto e molto variabile a seconda del tipo di produzione di biochar; appaiono comunque promettenti le potenzialità del suo utilizzo in agricoltura.

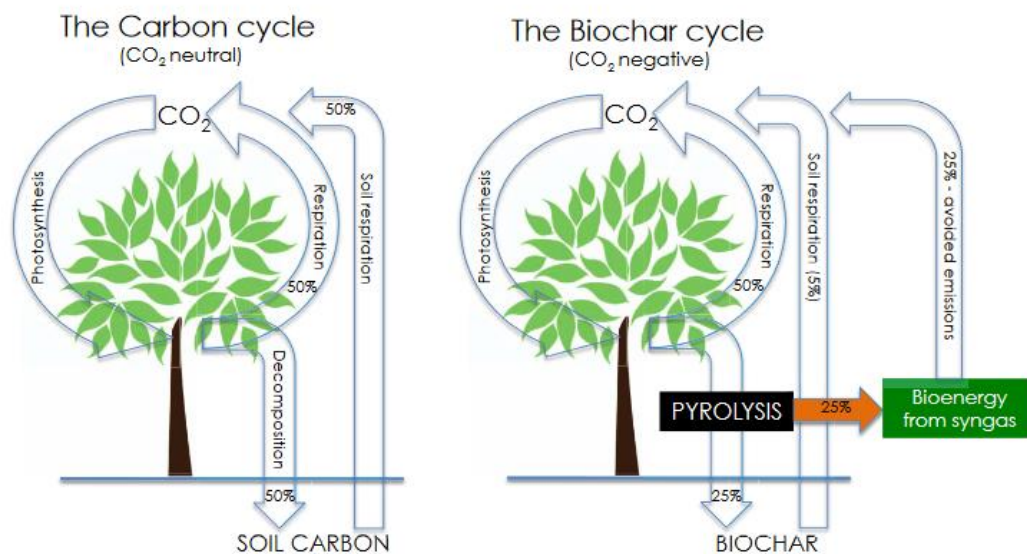
### *5.1.2 Effetti benefici per l'ambiente*

Il nuovo rapporto sul clima diffuso dal gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico delle Nazioni Unite (IPCC) afferma che i prossimi 12 anni saranno decisivi per evitare che l'aumento della temperatura media globale sia superiore a 1,5°C. Questo valore è un limite accettabile, se avessimo un aumento fino a 2°C gli effetti per l'ecosistema terrestre potrebbero essere devastanti. Per fare ciò è necessario aumentare le quote di energia rinnovabile e ridurre le emissioni di gas serra. Non è però più possibile pensare di stabilizzare e basta le concentrazioni di gas serra, bisogna anzi trovare un metodo per il sequestro e l'immobilizzazione di questi, in particolar modo per quanto riguarda l'anidride carbonica.

Le concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub>, metano e protossido di azoto (N<sub>2</sub>O) sono notevolmente aumentate negli anni a causa di fattori antropici, principalmente per l'utilizzo di fonti fossili come combustibile; anche vari tipi di pratiche forestali contribuiscono però all'aumento dell'anidride carbonica in atmosfera: deforestazioni, agricoltura "taglia e brucia", prosciugamento di zone umide. Rispetto agli anni '90, il peso globale delle emissioni dovute all'agricoltura è diminuito, ma rimane comunque un dato rilevante: nel 2010 il 21% delle emissioni di gas serra era dovuto al settore agricolo. Andando ad analizzare quel 21%, si nota come la fetta derivante dalla deforestazione è in netta diminuzione, mentre le emissioni da agricoltura sono destinate a crescere. È necessario quindi ottimizzare l'uso di concimanti non inquinanti per l'ambiente e il suolo e che anzi proteggano il contenuto organico di questo.

Il ciclo globale del carbonio è un insieme di scambi tra CO<sub>2</sub> e altri composti del carbonio tra vari "pozzi": geosfera, idrosfera, biosfera e atmosfera. Il bilancio globale del carbonio è il bilancio degli scambi tra le varie riserve di

carbonio e un esame di questo può dirci se una riserva funziona come fonte o come consumatore di CO<sub>2</sub>. L’anidride nell’aria viene utilizzata dalle piante nel processo fotosintetico per la respirazione cellulare, una parte viene utilizzata nella catena alimentare degli animali, una parte viene degradata dopo la morte delle piante. Completati questi processi, il biossido di carbonio viene liberato in atmosfera; da qui può essere assorbito dagli oceani sotto forma di bicarbonato e venire stoccato in profondità. Sul fondo si accumulano inoltre sedimenti che derivano dalla decomposizione di organismi marini: alcuni di questi giacimenti originano petrolio, carbone o gas naturale che vengono estratti dall’uomo, utilizzati e trasformati nuovamente in CO<sub>2</sub> che ritorna in atmosfera. L’alterazione dei terreni ad opera dell’uomo ha comportato la perdita della biodiversità e ha portato alla diminuzione della capacità degli ecosistemi di rimuovere il carbonio in eccesso dall’atmosfera. Quindi per “curare” il cambiamento climatico bisogna agire sul ciclo del carbonio; è necessario, oltre a ridurre le emissioni, utilizzare in maniera migliore gli stoccaggi.



**Figura 5.4: ciclo del carbonio con e senza utilizzo del biochar**

Il pozzo di carbonio al suolo è incredibilmente espanso: costituisce circa due terzi del carbonio di tutti i sistemi terrestri e corrisponde a più del triplo di quello atmosferico. Si stima che sia capace di contenere 2500 Gt di carbonio, mentre la vegetazione solamente 560 Gt. Ogni anno vengono immobilizzate nel suolo circa 110 Gt e una quantità equivalente viene rilasciata dai processi di decomposizione del suolo. All’aumento della temperatura media globale l’emissione della CO<sub>2</sub> continua però a crescere poiché i processi di

decomposizione diventeranno più rapidi. Per questo il riscaldamento globale è diventato sempre più un processo che non deve essere stabilizzato, ma va combattuto in direzione contraria; ci viene quindi in soccorso il biochar. Questo aggiunto al suolo non ha solo potenziali effetti positivi sulla fertilità del suolo, ma aumenta il contenuto del carbonio organico in modo stabile e duraturo. Questa caratteristica rende l'ammendante in questione uno strumento efficace per la mitigazione dell'aumento delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Le piante, come detto, sottraggono carbonio dall'atmosfera; una volta morta la pianta, parte dell'anidride carbonica torna in atmosfera attraverso la decomposizione della pianta stessa. Se però utilizzassimo i resti di questa pianta nei processi di pirolisi o gassificazione, evitando di lasciarli sul terreno, il carbonio organico non verrebbe disperso nell'atmosfera ma convertito nel biochar, che si degrada in tempi lunghissimi rispetto al semplice residuo vegetale. Il biochar sottrae circa il 50% del carbonio contenuto nei resti della pianta, il rimanente 50% va nel syngas.

Per ogni tonnellata di biochar immessa nel terreno, si sottraggono circa 3 tonnellate di biossido di carbonio dall'atmosfera; questo poiché ogni tonnellata di biochar si genera da una quantità di anidride atmosferica pari a tre volte il suo peso. L'utilizzo su larga scala ridurrebbe del 9% le emissioni di CO<sub>2</sub> dell'Europa.

Quindi l'utilizzo nei terreni del biochar e anzi l'intero processo di gassificazione o pirogassificazione che funzioni con residui vegetali come combustibile, a differenza delle fonti energetiche come solare e eolico che sono carbon neutral e quindi non comportano nuove emissioni in atmosfera di CO<sub>2</sub>, risulta essere carbon negative, cioè non solo il bilancio dell'anidride carbonica emessa dal processo è zero ma è negativo.

## **5.2 Iter tecnico per la certificazione del biochar**

In questo paragrafo si vuole entrare nel dettaglio dell'iter burocratico che un'azienda deve compiere per far sì che le proprie ceneri siano certificate essere biochar.

La prima decisiva cosa da fare è far analizzare le proprie ceneri. Le analisi devono fornire dei risultati precisi che riguardano diversi parametri; nel caso uno o più valori siano fuori dal range ammesso, le ceneri dovranno continuare a essere trattate come rifiuto speciale.

Il Ministero delle politiche agricole, alimentari, forestali e del turismo, che è il ministero che si occupa dei concimanti, mette a disposizione un elenco di laboratori certificati. Inoltre, sempre nel sito di questo Ministero, si trova un registro informatico, il SIAN (Sistema Informativo Agricolo Nazionale), dove un produttore di biochar andrà a registrare il proprio prodotto e se stesso come fabbricante. Nel registro SIAN sono catalogate diverse tipologia di concimanti, sia per uso convenzionale sia per l'agricoltura biologica: è uno strumento importante anche per i potenziali clienti che sono così in grado di risalire al concimante che preferiscono e trovare il produttore più vicino alla propria posizione.

Ricerca per: All. 2.2.16 - Biochar da pirolisi o da gassificazione  
Totale Fertilizzanti: 10

Codice	Nome commerciale	Denominazione Fabbricante
0017204/16	BIOCHAR	KINA S.R.L.
0019014/17	BioDea One	ROMANA MACERI CENTRO ITALIA S.R.L.
0019074/17	FILTERCARB BIOCHAR	CARBONITALIA SRL
0019276/17	BIOTON	LATERIZI REATO SRL
0019841/17	RE-CHAR	RECORD IMMOBILIARE S.R.L. UNIPERSONALE
0020546/17	BIOCHAR DA PIROLISI ECOLOCA	ECOLOCA S.R.L.
0021499/18	BIOCHAR G.L.M.	G.L.M. S.R.L.
0021502/18	Greenchar	EVERGREEN RESOURCES S.R.L.
0021663/18	Carbon Gold GroChar®	CARBON GOLD LTD
0022999/18	Sky to Soil Biochar	COGEN S.R.L.

**Figura 5.5: produttori di biochar certificati dal Ministero delle politiche agricole**

La situazione attuale italiana per quanto riguarda il biochar è ancora in piena fase di sviluppo: dall'immagine sopra si può vedere come per ora siano solamente 10 i produttori certificati. Buona parte della colpa è anche della burocrazia italiana: fino a qualche mese fa il Ministero si ritrovava solo annualmente per prendere visione e valutare le varie candidature dei produttori di biochar o altri fertilizzanti.

Per conoscere i parametri che caratterizzano il biochar bisogna fare riferimento alle modifiche dell'allegato 2 del Decreto Legislativo 29 Aprile 2010, n. 75; modifiche che sono state apportate nel 2015.

N.	Denominazione del tipo	Modo di preparazione e componenti essenziali	Titolo minimo in elementi e/o sostanze utili. Criteri concernenti la valutazione. Altri requisiti richiesti	Altre indicazioni concernenti la denominazione del tipo	Elementi oppure sostanze utili il cui titolo deve essere dichiarato. Caratteristiche diverse da dichiarare. Altri requisiti richiesti	Note
16.	Biochar da pirolisi o da gassificazione	Processo di carbonizzazione di prodotti e residui di origine vegetale provenienti dall'agricoltura e dalla silvicoltura, oltre che da sanse di oliva, vinacce, cruscamì, noccioli e gusci di frutta, cascami non trattati della lavorazione del legno, in quanto sottoprodotti delle attività connesse. Il processo di carbonizzazione è la perdita di idrogeno, ossigeno e azoto da parte della materia organica a seguito di applicazione di calore in assenza, o ridotta presenza, dell'agente ossidante, tipicamente l'ossigeno. A tale decomposizione termochimica è dato il nome di pirolisi o piroscissione. La gassificazione prevede un ulteriore processo ossido-riduttivo a carico del carbone prodotto da pirolisi	C tot di origine biologica <sup>(6)</sup> % s.s. $\geq 20$ e $\leq 30$ (CI <sup>(7)</sup> 3) $> 30$ e $\leq 60$ (CI <sup>(7)</sup> 2) $> 60$ (CI <sup>(7)</sup> 1) Salinità mS/m $\leq 1000$ <sup>(8)</sup> pH <sub>(H2O)</sub> 4-12 Umidità % $\geq 20$ per prodotti polverulenti <sup>(9)</sup> Ceneri % s.s. $> 40$ e $\leq 60$ (CI <sup>(7)</sup> 3) $\geq 10$ e $\leq 40$ (CI <sup>(7)</sup> 2) $> 10$ (CI <sup>(7)</sup> 1) H/C (molare) <sup>(7)</sup> $\leq 0,7$	---	Granulometria (passante mm 0,5-2-5) Azoto tot Potassio tot Fosforo tot Calcio tot Magnesio tot Sodio tot % C da carbonato Test fitotossicità e accrescimento (test lombrichi e o saggio germinazione/accrescimento) Max ritenzione idrica	<sup>(6)</sup> sottratto il C da carbonati <sup>(7)</sup> Classe di qualità <sup>(8)</sup> Per utilizzo quale ammendante di substrati per ortovivavismo $\leq 100$ <sup>(9)</sup> Indice di stabilità del carbonio <sup>(7)</sup> dato comunque da dichiarare

Figura 5.6: modifica allegato 2 D.L. 29/04/2010, n.75

Nel decreto viene descritta la denominazione del tipo di ammendante, il metodo di preparazione del biochar e le materie prime da cui può essere ricavato, il titolo minimo o massimo di certi elementi e altri criteri per la valutazione del prodotto, altri elementi da dichiarare (come le sostanze nutrienti per il suolo).

Inoltre essendo relativamente nuova questa modifica al decreto legge, molte informazioni sono, a detta dell'Ichar, incomplete: è necessario far analizzare anche gli inquinanti presenti nelle ceneri dell'impianto per avere la certezza che non sia troppo elevata la presenza di metalli pesanti nell'ammendante.



### Contaminanti

Piombo tot mg/kg s.s.	≤140
Cadmio tot mg/kg s.s.	≤1,5
Nichel tot mg/kg s.s.	≤100
Zinco tot mg/kg s.s.	≤500
Rame tot mg/kg s.s.	≤230
Mercurio tot mg/kg s.s.	≤1,5
Cromo esavalente mg/kg s.s.	≤0,5
IPA mg/kg s.s.	<6
PCB mg/kg s.s.	<0,5
Diossine ng/kg s.s.	<9

**Figura 5.7: presenza limite di contaminanti nel biochar**

Una volta che si possiedono le analisi definitive delle ceneri del proprio impianto si può già constatare se abbia senso o meno procedere con l'iter.

Le immagini nelle prossime pagine rappresentano le analisi delle ceneri fatte analizzare per l'impianto di produzione di energia termica e elettrica descritto nel capitolo 3. Come si può notare la parte degli elementi contaminanti non ha niente da segnalare, il pH è nei limiti in quanto il massimo che possiamo avere è 12, il carbonio totale di origine biologica è il 67,6% della sostanza secca, che significa che il biochar avrà da quel punto di vista la classe di qualità 1, valore spendibile dal punto di vista commerciale nel momento in cui si prova a vendere l'ammendante. Il test di fitotossicità dà come risultato che le ceneri esaminate sono idonee a diventare biochar: questo significa che il campione non ha effetti negativi sulle piante.

L'unico valore fuori dall'intervallo consentito è l'umidità, in quanto dovrebbe avere un valore >20% e nelle analisi sottostanti si ha un valore <1%; non è un grosso problema, si vuole un'umidità con un valore minimo per non avere un prodotto troppo polveroso: basta quindi installare un piccolo nebulizzatore sopra il sacco dove saranno raccolte le ceneri per avere valori di umidità accettabili.

Committente  
**R.FIN SRL**  
**Via Gaspare Gozzi, 24**  
**35131 PADOVA (PD)**

Bassano del Grappa, 29/06/2018

## RAPPORTO DI PROVA N° 125877

pagine n. 1 di 4  
 N. Commessa 100518

### CAMPIONE

Descrizione **Genere da gassificatore**  
 Produttore **R.FIN SRL**  
**Via Gaspare Gozzi, 24 - 35131 PADOVA (PD)**  
 Identificazione **Campione n. 125877**  
 Data di accettazione **10/05/2018**  
 Data esecuzione prove **dal 15/05/2018 al 29/06/2018**

### CAMPIONAMENTO

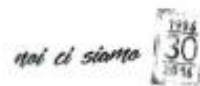
Eseguito da **Ecoricerche srl - Dott. Stefani Luigi il 11/05/2018**  
 Procedura di campionamento **POV-010 rev. 6 (Campionamento non incluso nell'accreditamento Accredia)**

### PROVE EFFETTUATE E RELATIVI RISULTATI

Prova	U.M.	Misura	Limiti	
			Slgs. n. 75/2010/ML2 s.a.s.r.l.s.	Metodo
Densità apparente	g/cm <sup>3</sup>	0,2556	Accreditato Ecoriche	S.I.S.S. 2.4 1985 <i>Non accreditato ACCREDIA</i>
Umidità	%	< 1	≥20	UNI 10780:1998 App.C
Residue a 105°C	%	100		CNR IRSA 2 064 Vol 2 1984 <i>Non accreditato ACCREDIA</i>
pH	-	11,2	4-12	DM 17/06/2002 GU n°220 19/09/2002 All Met 7
Salinità	mg/100 g	108	1000	UNI 10780:1998 App. D
Ceneri	% ss	20,6	Vedi nota	CNR IRSA 2 064 Vol 2 1984 <i>Non accreditato ACCREDIA</i>
Fosforo totale	mg/kg ss	2618	-	EPA 3051A 2007 + EPA 6010D 2014
Potassio	mg/kg ss	18035	-	EPA 3051A 2007 + EPA 6010D 2014
Calcio	mg/kg ss	71228	-	EPA 3051A 2007 + EPA 6010D 2014

Il presente rapporto di prova non può essere riprodotto parzialmente o nella sua interezza senza l'approvazione scritta del laboratorio e i risultati si riferiscono esclusivamente al campione sottoposto a prova.  
 Conservazione del campione al termine delle prove: al termine delle prove il campione è stato eliminato.  
 Mod. 000102 rev. 1 del 12/02/2017

**ecoricerche s.r.l.**



Laboratorio Accreditato UNI CEI EN ISO/IEC 17025:2005

Indagini ambientali: acqua, aria, rumore, rifiuti, amianto, igiene industriale, analisi chimiche industriali

Via Col di Grado, 15/a - 36061 Bassano del Grappa (VI) - Tel. 0424.500722 - Fax 0424.500708 - e-mail: [ecoric@ecoricerche.com](mailto:ecoric@ecoricerche.com) - [www.ecoricerche.com](http://www.ecoricerche.com)

Cap. Soc. € 103.200,00 I.v. - R.I. di VI 4974 - R.E.A di VI 188.596 - C.F. e P.I. 00881270243

**RAPPORTO DI PROVA N° 125877**

pagina n. 2 di 4

Prova	U.M.	Misura	Limiti		Metodo
			5 Lgs. n. 75/2010 All.2 c.c. n. 17.7. Amministrative Biochim		
Magnesio	mg/kg ss	4396	-		EPA 3051A 2007 + EPA 6010D 2014
Sodio	mg/kg ss	399	-		EPA 3051A 2007 + EPA 6010D 2014
Piombo	mg/kg ss	< 1	140		EPA 3051A 2007 + EPA 6010D 2014
Cadmio	mg/kg ss	< 0,1	1,5		EPA 3051A 2007 + EPA 6010D 2014
Mercurio	mg/kg ss	< 0,1	1,5		UNI CEN/TS 16175-2:2013 Prova non accreditata ACCREDIA
Rame	mg/kg ss	18	230		EPA 3051A 2007 + EPA 6010D 2014
Zinco	mg/kg ss	190	500		EPA 3051A 2007 + EPA 6010D 2014
Nichel	mg/kg ss	< 1	100		EPA 3051A 2007 + EPA 6010D 2014
Cromo VI	mg/kg ss	< 0,4	0,5		UNI 10780:1998 App. B Prova non accreditata ACCREDIA
<b>Idrocarburi policiclici aromatici</b>					
Naftalene	mg/kg ss	< 0,02			EPA 3546 2007 + EPA 8270E 2017
Acenafilene	mg/kg ss	< 0,02			
Acenaftene	mg/kg ss	< 0,02			
Fluorene	mg/kg ss	< 0,02			
Fenantrene	mg/kg ss	< 0,02			
Antracene	mg/kg ss	< 0,02			
Fluorantene	mg/kg ss	< 0,02			
Pirene	mg/kg ss	< 0,02			
Benzo(a)antracene	mg/kg ss	< 0,02			
Crisene	mg/kg ss	< 0,02			
Benzo (b) fluorantene	mg/kg ss	< 0,02			
Benzo (k) fluorantene	mg/kg ss	< 0,02			
Benzo (a) pirene	mg/kg ss	< 0,02			
Indeno (1,2,3- c, d) pirene	mg/kg ss	< 0,02			
Dibenzo (a, h) antracene	mg/kg ss	< 0,02			
Benzo (g, h, i) perilene	mg/kg ss	< 0,02			
Sommatoria IPA	mg/kg ss	< 0,2	6		
<b>Granulometria (mediante setacci)</b>					
Metodo interno Prova non accreditata ACCREDIA					
Frazione > 5 mm	%	7,8			
Frazione 5-2 mm	%	18,9			
Frazione 2-1 mm	%	9,5			
Frazione 1-0,5 mm	%	12,5			
Frazione <0,5 mm	%	51,3			
Azoto totale*	% ss	0,5			DM n°7276 31/05/2016 SUPP.13
Carbonio*	% ss	69,1			DM n°7276 31/05/2016 SUPP.13
Idrogeno*	% ss	1,2			DM n°7276 31/05/2016 SUPP.13
Frazione molare H/C (da calcolo)*	% ss	0,21	0,7		DM n°7276 31/05/2016 SUPP.13

## RAPPORTO DI PROVA N° 125877

pagine n. 3 di 4

Prova	U.M.	Misura	Limiti	
			Segn. n. 75/2010 All.2 s.s.unif. Ambiente Biochar	Metodo
Carbonio totale di origine biologica (da calcolo)*	% ss	67,6	Vedi nota	DM n°7276 31/05/2016 SUPP.13
Carbonio da carbonati*	% ss	1,46	-	DM n°7276 31/05/2016 SUPP.13
Massima ritenzione idrica*	%	244	-	UNI 11184:2016 pcto 10.2
Test di fitotossicità*	-	Vedi allegato	idoneo	UNI EN 16086-1:2012
<b>Policlorobifenili (PCB) congeneri*:</b>	mg/kg ss	0,0271	0,5	EPA 1668C 2010
28	mg/kg ss	0,00098		
52	mg/kg ss	0,00066		
77	mg/kg ss	0,00003		
81	mg/kg ss	< 0,00001		
95	mg/kg ss	0,00213		
99	mg/kg ss	0,00017		
101	mg/kg ss	0,00248		
105	mg/kg ss	0,00017		
110	mg/kg ss	0,00235		
114	mg/kg ss	< 0,00001		
118	mg/kg ss	0,00108		
123	mg/kg ss	0,00004		
126	mg/kg ss	< 0,00001		
128	mg/kg ss	0,00104		
138	mg/kg ss	0,0035		
146	mg/kg ss	0,00035		
149	mg/kg ss	0,00351		
151	mg/kg ss	0,0009		
153	mg/kg ss	0,0039		
156	mg/kg ss	0,00039		
157	mg/kg ss	0,000039		
167	mg/kg ss	0,00017		
169	mg/kg ss	< 0,00001		
170	mg/kg ss	0,0008		
177	mg/kg ss	0,00043		
180	mg/kg ss	0,0013		
183	mg/kg ss	0,00017		
187	mg/kg ss	0,00046		
189	mg/kg ss	0,000036		
<b>Diossine*</b>				EPA 1613B 1994 Prov. accreditata ACCREDIA
2,3,7,8-TetraCDD	ng/kg ss	< 0,1		
1,2,3,7,8-PentaCDD	ng/kg ss	< 0,5		
1,2,3,4,7,8-EsaCDD	ng/kg ss	< 0,5		
1,2,3,6,7,8-EsaCDD	ng/kg ss	< 0,5		
1,2,3,7,8,9-EsaCDD	ng/kg ss	< 0,5		
1,2,3,4,6,7,8-EptaCDD	ng/kg ss	< 0,5		
OctaCDD	ng/kg ss	< 1		

ecoricerche s.r.l.

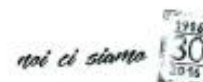


Figura 5.8: rapporto di prova-analisi effettuate su un campione di ceneri per la certificazione a biochar

Avendo ora tutti i dati necessari si procede con l'inserimento di questi nel registro informatico. Come detto prima, il registro è ancora in evoluzione, i parametri da inserire sono ancora pochi e diversi dalle direttive date dal decreto legislativo.

Anagrafe	Mesoelementi	Microelementi	Materie prime	Titoli	Documenti Allegati
<b>Fertilizzante</b>					
Progressivo, Data inserimento: 2 - 08/10/2018					
Usi in agricoltura: Convenzionale					
<b>Tipologia concime:</b> All. 2.2.16 - Biochar da pirolisi o da gassificazione					
<b>Nome commerciale:</b> Fertilchar					
<b>Tabella dei Titoli</b>					
Elementi	Valori				
	Unità/Testo	Decimali			
% C da carbonato	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Azoto totale - N tot %	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Calcio totale - Ca tot %	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Fosforo totale - P2O5 tot%	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Fraz. granulometrica < 0,5 mm - % m/m s.s	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Fraz. granulometrica < 2,0 mm - % m/m s.s	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Fraz. granulometrica < 5,0 mm - % m/m s.s	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Granulometria	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Magnesio totale - Mg tot %	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Max ritenzione idrica	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Potassio totale - K tot %	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Sodio totale - Na tot %	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Test accrescimento	<input type="text"/>	<input type="text"/>			
Test fitotossicità	<input type="text"/>	<input type="text"/>			

**Figura 5.9: titoli da inserire per completare la certificazione del biochar**

Innanzitutto è necessario decidere un nome commerciale per il proprio biochar. Successivamente, gli elementi da inserire sono: le materie prime utilizzate come combustibile dell'impianto, la granulometria delle ceneri, l'idoneità o meno del test di fitotossicità e la presenza in % di sostanze nutrienti. Se si avesse quindi uno dei valori contaminanti troppo alto, sarebbe comunque possibile procedere con la registrazione del biochar nel registro. È ovvio che, nel momento in cui un produttore si immette nel mercato, il potenziale venditore dovrebbe fornire le analisi delle proprie ceneri e il potenziale cliente dovrebbe richiederle. Proprio per sopperire a questa problematica, si devono allegare dei documenti per portare a termine la registrazione del proprio ammendante: buona norma sarebbe redigerne uno che descrive sommariamente il metodo di produzione e in cui è presente un fac-simile dell'etichetta che sarà apposta nel sacco di biochar destinato alla vendita.

A questo punto bisogna solamente attendere la verifica del ministero che registrerà il prodotto nel registro e registrerà l'azienda come produttrice di biochar. Inoltre l'azienda potrà scegliere se registrarsi anche come confezionatore e venditore. A questo punto bisogna cercare di immettersi nel mercato della compravendita di biochar. Le ceneri escono dall'impianto di produzione confezionate in big bags che possono contenere fino a circa 500 kg di biochar: è possibile apporre a questi sacchi l'etichetta e venderli direttamente. Data la grande quantità, queste confezioni vanno vendute a chi possiede grandi terreni e non sono quantità indicate per orti casalinghi. Grandi aziende agricole, grossi produttori vinicoli, serre sono i clienti più indicati per questo tipo di prodotto.

Per quanto riguarda il prezzo, essendo il biochar un prodotto ancora nuovo e in evoluzione, le informazioni sono poche; facciamo riferimento allo studio del dottor Francesco Primo Vaccari, agronomo che lavora per l'Ichar, che analizza diversi studi condotti recentemente. La conclusione dello studio porta alla creazione di una formula per definire il valore del biochar; questo è dato dalla somma di tre componenti: valore di produzione, che tiene conto dell'incremento della produzione, della dose di biochar applicata e del tempo che ci mette il biochar ad avere effetto nel terreno; valore dei crediti di carbonio, dove un credito di C equivale a una tonnellata di CO<sub>2</sub> non dispersa e sono da intendere come una vera e propria moneta; valore del servizio ecosistemico, che dà un valore ai benefici multipli forniti dagli ecosistemi al genere umano. Il pagamento dei servizi ecosistemici o PES indica una transazione volontaria in cui uno specifico servizio è venduto ad almeno un soggetto da almeno un fornitore se e solo se il venditore ne garantisce la fornitura. Rispetto al prezzo scritto nell'immagine sottostante riguardante il valore dei crediti di C, in questo momento il valore della tonnellata di CO<sub>2</sub> è aumentato e si aggira sui 17 €/t, facendo aumentare la convenienza nel vendere il biochar.

I vari studi danno risultati molto aleatori, anche per la difficoltà nel dare un valore monetario al pagamento dei servizi ecosistemici; possiamo far ricadere il valore commerciale del biochar in un intervallo tra 200 e 500 €/t, facendo dipendere molto il reale valore dal marketing aziendale.

Immettersi nel mercato del biochar, nello stato attuale delle cose, può non essere fin da subito conveniente: non tutti i potenziali clienti sono a conoscenza di questo nuovo prodotto e la gente è restia a lasciare la strada battuta per intraprendere un nuovo sentiero; ma è un mercato in espansione e il gran lavoro fatto dall'associazione Ichar non deve essere sprecato.

Bisogna quindi avere pazienza e spiegare alla gente i benefici di questo nuovo ammendante, non solo per il suolo ma soprattutto ai fini ambientali.

### Valore Biochar ICHAR (03/2015)

$$V_B = V_P + V_C + V_{ES}$$

$V_P =$  valore produzione =  $[(Dy * Vy)/r] * t$

$Dy$  = incremento di produzione (t/ha) = 10% (Jeffrey et al., 2011)

$Vy$  = valore della produzione (€/t)

$r$  = dose di biochar applicata (t/ha) = 15 t/ha (???)

$t$  = tempo di effetto biochar = 2 anni (???)

$V_C =$  valore dei crediti di C (€/t)

Emissions (<http://www.bloomberg.com/energy/>) = 7.02 €/tCO<sub>2</sub>

$V_{ES} =$  valore del servizio ecosistemico (€/ha)

D.L. 2093/2014 "Disposizioni in materia ambientale per promuovere misure di green economy e per il contenimento dell'uso eccessivo di risorse naturali" (Orlando/Zanonato) sul pagamento dei servizi ecosistemici e ambientali (PSEA)



### Valore Biochar ICHAR (03/2015)

$$V_B = V_P + V_C + V_{ES}$$

$V_P = [(Dy * Vy)/r] * t = [(0.1 * 4.5 * 300) / 15] * 2 = 18$  €/t biochar

$V_C = 17.7$  €/t biochar

$V_{ES} = ???$

$V_B = 35.7$  €/t biochar +  $V_{ES}$

Hp: frumento in Italia (duro + tenero)  
Produzione = 4.5 t/ha  
Valore produzione = 300 (€/t)

Biochar C cont 70%  
CO<sub>2</sub>/C = 44/12 = 3.66



Figura 5.10: formula che definisce il valore commerciale del biochar





# CONCLUSIONI

Scrivendo le conclusioni di questa tesi è necessario fare due diverse considerazioni. La prima riguarda lo stato dell'arte della gassificazione del cippato, il suo sfruttamento e i benefici diretti e indiretti che derivano da questa tecnologia; l'altra interessa i problemi relativi agli impianti a gassificazione, soprattutto per la pulizia del syngas, e le possibili soluzioni.

La gassificazione della biomassa si dimostra una tecnologia ormai consolidata e affidabile per impianti di piccola taglia. Il combustibile utilizzato è di estrema importanza e ha come parametri principali la dimensione e il grado di umidità. Sfruttare per la cogenerazione questi tipi di impianto, e nel breve periodo anche per la trigenerazione, è un aspetto fondamentale per il risparmio energetico e per la valorizzazione dell'energia della materia prima. I vantaggi ambientali che derivano dall'utilizzo della biomassa sono noti. Inoltre, da quanto si è dedotto dall'analisi del biochar, possiamo dire che i benefici della gassificazione della biomassa non si limitano all'utilizzo di materiale di scarto come combustibile e al fatto di avere una tecnologia carbon neutral. Infatti, utilizzando la biomassa lignocellulosica come combustibile e sfruttando le ceneri di questi impianti, otteniamo che gli scarti dell'impianto sono ridotti al minimo e si ha inoltre un guadagno economico dalla vendita del biochar alle aziende agricole e un vantaggio ambientale e per il terreno nell'utilizzo nel suolo di questo. Ciò fa risultare la gassificazione della biomassa, a differenza delle altre tecnologie che sfruttano energie rinnovabili, una tecnologia carbon negative.

D'altro canto, come si è potuto constatare dall'impianto oggetto di questa tesi, l'affidabilità di questi impianti viene meno se si aumenta la taglia degli stessi. Le problematiche sono diverse, dalle infiltrazioni alla non perfetta progettazione di qualche componente, passando per le troppo alte temperature, con principale complicanza la pulizia del syngas prodotto e la correlata presenza di TAR e materiali catramosi nei componenti dell'impianto. Una soluzione unica non esiste per la risoluzione di questi problemi, molto dipende dalla tipologia del gassificatore che si utilizza, dal tipo di TAR che si forma e di conseguenza dal tipo di biomassa e dal suo grado di umidità. Le soluzioni più immediate e più efficaci possono essere

L'utilizzo del cracking catalitico nel caso si adoperi un gassificatore a letto fluido o di un cracking termico nel caso in cui ci si possa spingere molto in alto con le temperature. Altrimenti si può pensare di costruire un secondo reattore a valle del primo per realizzare i vari tipi di cracking nel reattore secondario. Inoltre esistono in letteratura sempre più studi incentrati sul problema dei TAR, con nuove tecnologie che prima o poi saranno commercializzate. A valle di tutte queste soluzioni c'è, però, la necessità di un'accurata progettazione, sempre più meticolosa nel caso si voglia un impianto di taglie elevate. Dalla progettazione derivano delle precise condizioni operative che rendono più facile la gestione dell'impianto e la pulizia del syngas.

Investire in un impianto a gassificazione di cippato risulta quindi sotto diversi aspetti un'ottima cosa, sia per il grado raggiunto di affidabilità sia per i risvolti positivi per l'ambiente. Risvolti positivi che coincidono anche con il riutilizzo delle ceneri di questi impianti, operazione importante da non sottovalutare e da non trascurare. È necessario però affidarsi a tecnologie già testate per avere una percentuale maggiore di investire su un impianto che non abbia grosse problematiche.

# BIBLIOGRAFIA

- Paniz A., Francescato V., Antonini E., *Valorizzazione energetica delle biomasse legnose*, ENAMA (ente nazionale per la meccanizzazione agricola), 2010
- Andrighetto N., Favero M., Pettenella D., *Nuove stime sulle biomasse legnose: un quadro informativo ricco ma disomogeneo*, Università degli studi di Padova, Dipartimento TESAF, 2015
- Rubini L., Sangiorgio S., *Le energie rinnovabili. Le nuove tecniche di produzione elettrica e termica. Eolico e idroelettrico-solare fotovoltaico e termodinamico-solare termico, geotermia, biomasse-nuovo conto energia, certificati verdi*, 2012, HOELPI
- Dahlquist E., *Technologies for Converting Biomass to Useful Energy*, 2013, Taylor and Francis Group
- GSE, *Fonti rinnovabili in Italia e Europa*, 2018
- Appunti del corso di energie rinnovabili, a.a. 2015/16
- Gelletti R., Jodice R., Mauro G., Migliardi D., Picco D., Pin M., Tomasinsig E., Tommasoni L., Chinese D., Monaco B., Nardin G., Simeoni P., *Energia dalle biomasse*, AREA Science Park, 2006
- Matera D. A., Cornacchia G., Russo A., Martino M., *Processo di gassificazione a biomasse basato su di un innovativo reattore "down-draft" per la micro e generazione distribuita*, studio eseguito da ENEA per il Congresso Nazionale AIGE, 2009
- Biagini E., *Cogenerazione di piccola taglia mediante impianti di gassificazione*, Dipartimento di ingegneria civile e industriale-UNIFI e Centro di ricerca interuniversitario biomasse da energia-CRIBE, 2015
- Assemblea nazionale FIPER, *Potenzialità, prospettive e rischi della gassificazione della biomassa*
- Barisano D., Canneto G. per ENEA, *Bioenergie al 2020: la ricerca ENEA*, 2013
- Dell'Antonia D., *Gassificazione e pirolisi delle biomasse*, Corso di laurea magistrale in Scienze e tecnologie agrarie, a.a. 2012/13
- Tenaglia E., *Indagine tecnico economica sullo stato della gassificazione da biomasse vegetali per impianti a media e bassa potenza in Italia*; Milano, 2010
- Bridgwater A. V., *The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation*, Energy Research Group, Aston University, 1995
- Sadaka S., *Gasification, Producer Gas and Syngas*, University of Arkansas
- Manuale di uso e manutenzione dell'impianto*, Impianto di gassificazione del cippato di legno per la produzione di 99 kW di energia elettrica e 220 kW di energia termica
- De Caprariis B., De Filippis P., Scarsella M., Verdone N., *Realizzazione e sperimentazione di un dispositivo di abbattimento del tar*, ENEA e Ministero dello sviluppo economico, 2012

De Filippis P., Scarsella M., De Caprariis B., Belotti G., *Tecniche di campionamento e rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas da gassificazione del carbone*, ENEA e Ministero dello sviluppo economico, 2010

Beltramba O. D., Gallucci K., Foscolo P. U., *Studio sperimentale delle proprietà catalitiche dell'olivina in un gassificatore a letto fluidizzato: influenza del trattamento termico*, ENEA e Ministero dello sviluppo economico, 2012

De Caprariis B., De Filippis P., Scarsella M., Verdone N., *Sviluppo di dispositivi per la rimozione di tar e particolato contenuti nel syngas proveniente da impianti di gassificazione*, ENEA e Ministero dello sviluppo economico, 2011

De Caprariis B., De Filippis P., Petruccio A., Scarsella M., Verdone N., *Purificazione del syngas mediante processi catalitici*, ENEA, 2013

De Stefanis P., *Tecnologie alternative di trattamento termico dei rifiuti*, ENEA, 2010

*Modifica degli allegati 2, 6 e 7 del Decreto legislativo 29 Aprile 2010, n.75*, 2015

Mastrolonardo G., Nati C., *Utilizzo agronomico delle ceneri da biomassa*, CNR-IVALSA, 2014

Brewer C.E., Schmidt-Rohr K., Satrio J.A., Brown R.C., *Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems*. Environ Prog Sustain Energy, 2009

Bedussi F., *Valutazione delle potenzialità del biochar come componente dei substrati di coltivazione*, Tesi di dottorato, Università degli studi di Milano, a.a. 2014/15

Primo Vaccari F., *Certificazione del biochar: il percorso di ICHAR*, CNR-IBIMET Firenze, 2014

Pozzi A., *La produzione di biochar: dalla Terra Preta de Indio a oggi*, ICHAR, 2014

Sorrenti G., Ventura M., Tonon G., Toselli M., *Biochar, strategia per la gestione sostenibile degli ecosistemi frutticoli?*, Università di Bologna e di Università Libera di Bolzano, 2013

Sorrenti G., *Il potere fertilizzante del biochar*, Università di Bologna, 2016

*IBI Biochar certification program manual*, IBI, 2015

Lopamudra D., Ptasinski K., Janssen F., *A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes*, University of technology, 2007

Zavalloni C., Tonon G., Valagussa M., *Stato dell'arte della certificazione del biochar in Europa e in Italia*, ICHAR, 2013

Primo Vaccari F., *Processi produttivi e caratteristiche del biochar*, ICHAR, 2016

Primo Vaccari F., *Il mercato del biochar*, ICHAR, 2016

Jirka S., Tomlinson T., *State of the biochar industry 2014*, IBI, 2015

Pozzi A., *Produzione di biochar da gassificazione e suo impiego in agricoltura in qualità di ammendante*, EIMA, 2010

## **Siti web**

<https://www.istat.it/>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Pagina\\_principale](https://it.wikipedia.org/wiki/Pagina_principale)

<http://www.enea.it/it>

<https://www.gse.it/>

<http://www.ichar.org/>