

## **Cogenerazione a biomassa mediante Turbogeneratori ORC Turboden : tecnologia, efficienza, esperienze pratiche ed economia**

A. Duvia\*, M.Gaia\*\*

(documento presentato al convegno "Energia prodotta dagli scarti del legno: opportunità di cogenerazione nel distretto del mobile" 11 novembre 2004)

\* Turboden S.r.l. Viale Stazione ,23, 25122 Brescia (Italy) ; Tel : +39-030-3772341; fax +39-030-3772346 ; e-mail : info@turboden.com

\*\* Politecnico di Milano , Dipartimento di Energetica, P.za Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italy ; Tel: +39-02-2399 3904 Fax: +39-02- 2399 3940

### ***Riassunto***

I turbogeneratori basati sul Ciclo Rankine a fluido organico (ORC) sono una soluzione molto promettente per la cogenerazione a biomassa, tipicamente con potenza nominale tra 400 e 1500 kW elettrici per unità.

A sei anni dalla messa in marcia del primo impianto industriale di cogenerazione a biomassa basato su un turbogeneratore ORC e una caldaia ad olio diatermico, diversi impianti in Europa operano senza supervisione e con alta affidabilità. I vantaggi di questa tecnologia in termini di alta disponibilità, costi di manutenzione contenuti, funzionamento completamente automatico senza intervento di personale ed alta efficienza elettrica nei sistemi di cogenerazione a biomassa di questa taglia, sono stati confermati nell' uso pratico.

Le valutazioni economiche basate sull'esperienza di queste prime installazioni dimostrano che questi impianti sono adatti alla produzione economicamente competitiva di energia elettrica nei numerosi paesi europei, in cui sono implementati incentivi per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. Applicazioni tipiche sono impianti cogenerativi di teleriscaldamento e la cogenerazione nell'industria del legno, dove questa tecnologia sta vivendo una crescente domanda di installazioni.

## **Introduzione**

Spesso è preferibile produrre elettricità da biomassa per mezzo di generatori con potenza per unità relativamente piccola, in modo da ottenere biomassa da fonti singole o da un numero di fonti dislocate in una superficie limitata, senza un complesso sistema di raccolta della biomassa e senza costi aggiuntivi commerciali, di trasporto e magazzinaggio. Inoltre, la costruzione di grandi impianti a biomassa o di trattamento dei rifiuti richiede approfonditi studi per identificare la collocazione ideale ed ottenere il consenso delle autorità locali.

In generale il limite alla taglia si pone a 1500 kW elettrici, poiché fino a questa potenza è relativamente facile trovare utenti per l'energia termica ottenuta a valle dell'impianto di produzione elettrica. Dal punto di vista ambientale, l'uso del calore scaricato dall'impianto è molto importante, perché permette di sfruttare completamente il potenziale di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> dato dalle risorse di biomassa disponibili.

Anche se l'efficienza della conversione in energia elettrica è un aspetto fondamentale, ci sono altri fattori altrettanto importanti. In particolare l'emissione di sostanze inquinanti deve essere molto bassa, sia per soddisfare le richieste della legge, sia per conquistare alla biomassa l'immagine di fonte di energia rinnovabile e pulita a lungo termine. Inoltre, le esigenze di manodopera e i costi di gestione e manutenzione devono essere molto bassi.

Un impianto con taglia fino a 1500 kW deve essere in grado di operare senza alcuna supervisione, con ispezioni da parte dell'operatore distanziate di diversi giorni. In particolare, la manutenzione non deve implicare dispendio di tempo o incarichi difficili o "sporchi". L'impianto dovrebbe preferibilmente essere rapido nell'accensione ed in grado di operare a diversi livelli di potenza, mantenendo una buona efficienza nell'intero campo di funzionamento.

I sistemi di gassificazione, accoppiati con un motore a combustione interna, sebbene in teoria siano promettenti dal punto di vista della pura efficienza, sono invece critici dal punto di vista della gestione e della manutenzione.

La combustione di biomassa in una caldaia è molto meno impegnativa ed oggi molto meglio risolta. Nella ricerca di un sistema affidabile, di lunga durata, con basse esigenze di gestione e manutenzione (O&M), sono stati sviluppati, costruiti e testati gli impianti di cogenerazione alimentati a biomassa, caratterizzati da una caldaia ad olio diatermico ed da un turbogeneratore ORC.

## ***Criteria progettuali del sistema di cogenerazione ORC***

Normalmente, il controllo di questi sistemi si basa sul principio che la produzione elettrica segue la richiesta termica (per esempio da parte di chi utilizza l'impianto di teleriscaldamento), vale a dire che la biomassa è bruciata solo in base alla richiesta di calore.

Il sistema si basa sui seguenti passaggi principali:

- La biomassa è bruciata in una caldaia costruita seguendo le tecniche ampiamente consolidate in uso anche per le caldaie ad acqua calda. Queste caldaie con i loro elementi accessori (filtri, comandi, smaltimento automatico della cenere, dispositivo di rifornimento della biomassa, ecc.) sono frutto di una lunga evoluzione e si possono considerare sicuri, affidabili, puliti ed efficienti.
- L'olio diatermico utilizzato come fluido termovettore di calore offre numerosi vantaggi, tra cui bassa pressione nella caldaia, elevata inerzia termica e quindi stabilità nei cambiamenti di carico, regolazione e controllo semplici e sicuri. Inoltre, la temperatura utilizzata (circa 300°C) nella parte calda dell'impianto assicura lunga durata all'olio diatermico. L'utilizzo di una caldaia ad olio diatermico consente altresì l'attività senza un operatore patentato, come invece è richiesto per i sistemi a vapore in molte nazioni europee.
- Un turbogeneratore ORC è utilizzato per convertire il calore a disposizione in elettricità. Grazie all'ORC, e quindi grazie all'utilizzo di un fluido di lavoro opportunamente formulato e all'ottimizzazione del progetto della macchina, si ottengono alto rendimento e alta affidabilità. Il calore di condensazione del turbogeneratore è usato per produrre acqua calda a circa 80 – 90°C, un livello di temperatura adeguato al teleriscaldamento e ad altri usi a bassa temperatura (essiccazione del legno e raffreddamento attraverso impianti ad assorbimento, ecc.).

Con riferimento alla figura 1, un impianto CHP alimentato a biomassa che usa un turbogeneratore ORC si compone dei seguenti elementi:

- Un sistema automatico alimentato a biomassa, in grado di far funzionare la caldaia in base alla biomassa disponibile;

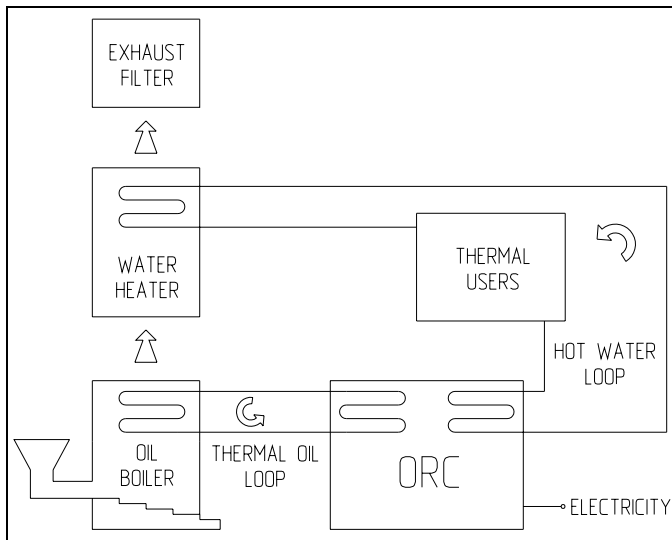


Figura 1 - Schema di un turbogeneratore ORC affiancato ad un sistema di combustione a biomassa

- Una caldaia a biomassa composta da una camera di combustione con griglie fisse o griglia mobile, raffreddata ad aria o ad acqua in base alla biomassa da bruciare. Sopra la camera di combustione è installato uno scambiatore di calore gas combusti / olio diatermico. Normalmente questo scambiatore di calore è composto da un singolo tubo a spirale in cui è assicurata una velocità dell'olio diatermico relativamente alta, in modo da evitare il ristagno dello stesso. E' essenziale infatti evitare surriscaldamenti locali nei tubi dell'olio diatermico, in quanto questo altererebbe le caratteristiche dell'olio, causando una riduzione del suo periodo di vita.

Dato che la temperatura di ingresso dell'olio è relativamente alta (250-300°C), anche la temperatura di scarico è sufficientemente alta da permettere l'installazione di uno scambiatore di calore tra gas caldo ed acqua (economizzatore). Questo scambiatore di calore aumenta l'efficienza globale della caldaia portandola a valori equivalenti a quelli di una caldaia a biomassa ad acqua surriscaldata (ovvero largamente maggiore all' 80%). Nel caso in cui non sia richiesto o non sia conveniente un aumento della potenza termica disponibile all'acqua (causato, per esempio, da una richiesta termica minore da parte della rete di teleriscaldamento) è possibile installare un preriscaldatore per la combustione dell'aria al posto dell'economizzatore. Secondo l'esperienza dei produttori, quest'alternativa può essere adottata con sicurezza nel caso in cui il tasso di umidità contenuto nella biomassa sia relativamente alto, in modo da diminuire il rischio di un eccesso di temperatura nella griglia della caldaia (in questo caso una griglia raffreddata ad acqua sarebbe più sicura).

- Un sistema di circolazione dell'olio diatermico, che provveda al trasferimento di calore tra la caldaia e il turbogeneratore. Normalmente sono installate due pompe (una in stand-by), in modo da assicurare in ogni caso la circolazione di olio attraverso la caldaia. In caso di

malfunzionamento della prima pompa, la seconda si attiva automaticamente. In caso di malfunzionamento della rete elettrica, un sistema UPS (Uninterruptable Power System) fornisce l'energia elettrica alla pompa. Invece di un sistema UPS, può essere installata una pompa a motore (Diesel) (non riportata nello schema semplificato in figura 1).

- Un by-pass per il riscaldamento diretto, atto a trasferire l'energia termica dal circuito di olio diatermico al circuito dell'acqua; questo by-pass è utile durante l'avviamento del turbogeneratore o nel caso in cui il turbogeneratore debba essere tenuto fuori servizio per qualsiasi ragione.
- Il turbogeneratore ORC (Organic Rankine Cycle) che utilizza l'energia termica derivante dall'olio diatermico per vaporizzare il fluido organico all'interno dell'evaporatore; l'energia termica che non può essere trasformata in potenza meccanica dalla turbina, si scarica nell'acqua attraverso il condensatore.

## Il turbogeneratore ORC

Elemento chiave di questo sistema di cogenerazione a biomassa è il turbogeneratore ORC, che permette la generazione di elettricità con buon rendimento e affidabilità a partire da olio diatermico alla temperatura relativamente bassa di 300°C. Questo impianto si basa un ciclo chiuso di Rankine, realizzato adottando come fluido di lavoro un adatto fluido organico.

Il ciclo termodinamico e il relativo schema dei componenti sono riportati in fig. 2 (valori indicativi).

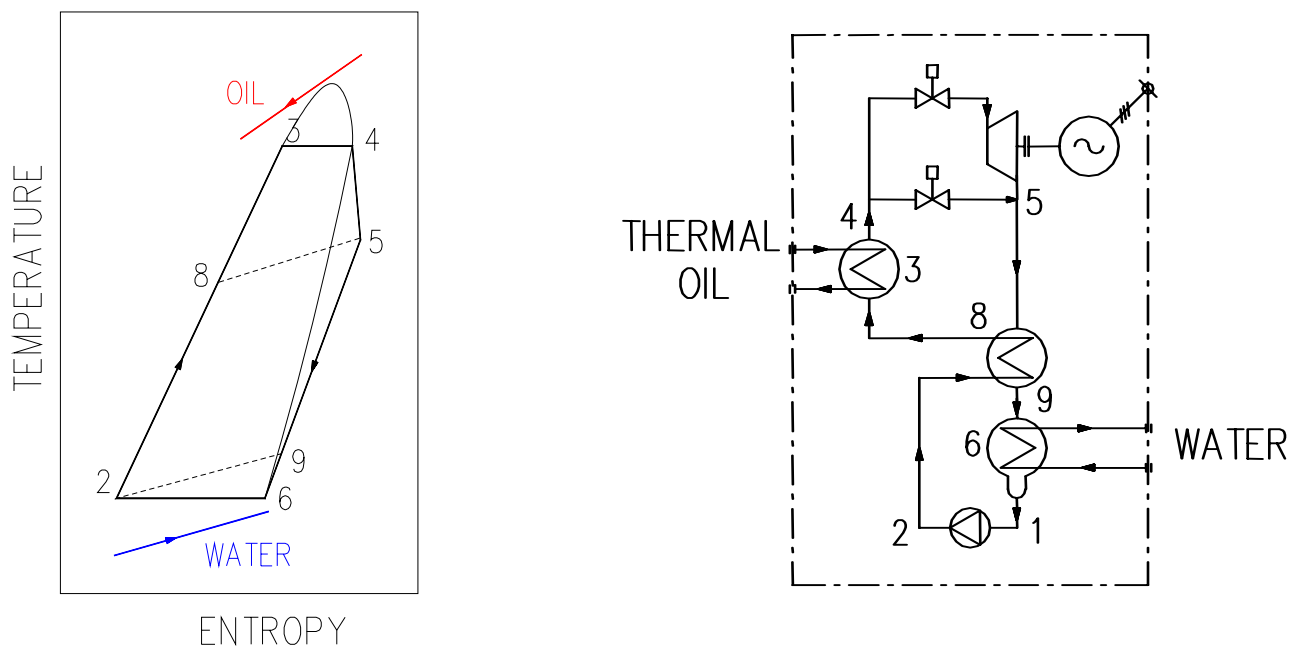


Figura 2: Ciclo termodinamico e componenti di un impianto ORC

Il turbogeneratore sfrutta l'olio diatermico caldo per preriscaldare e vaporizzare un opportuno fluido di lavoro nell'**evaporatore** (8→3→4).

Il vapore del fluido organico muove la **turbina** (4→5), che è accoppiata direttamente al generatore elettrico attraverso un giunto elastico.

Il vapore scaricato scorre attraverso il **rigeneratore** (5→9), dove riscalda il fluido organico (2→8).

Il vapore è poi condensato nel **condensatore** (raffreddato dal passaggio dell'acqua) (9→6→1).

Il fluido organico è poi pompato (1→2) al rigeneratore e di seguito all'evaporatore, completando così la sequenza di operazioni nel circuito chiuso.

Una società italiana ( Turboden S.r.l. di Brescia ) ha sviluppato una gamma standard di turbogeneratori (riportata nella tavola 1) usando come fluido di lavoro un olio silconico, con le seguenti caratteristiche favorevoli [3]:

- Proprietà termodinamiche favorevoli, che permettono un ciclo ad alta efficienza (immissione di calore ad alta temperatura grazie alla rigenerazione, espansione in assenza di liquido, salto entalpico favorevole in turbina)
- Rispetto dell'ambiente e attenzione per la tossicità, con un fattore di danneggiamento della fascia di ozono nullo (ODP=0).

In confronto alle tecnologie alternative, i vantaggi principali ottenuti con questa soluzione sono i seguenti:

- Alta efficienza del ciclo (specialmente se usato in impianti di cogenerazione);
- Elevatissima efficienza della turbina (fino all'85%);
- Bassa sollecitazione meccanica della turbina, dovuta alla modesta velocità periferica;
- Bassa velocità di rotazione della turbina, tale da consentire il collegamento diretto del generatore elettrico alla turbina senza interposizione di riduttore di giri;
- Mancanza di erosione delle palette nella turbina, dovuta all'assenza di umidità negli ugelli;
- Lunga vita della macchina, dovuta alle caratteristiche del fluido di lavoro che, diversamente dal vapore, non erode e non corrode le tubazioni ,le sedi delle valvole e le palette della turbina;
- Mancanza di sistemi per il trattamento dell'acqua.

Ci sono anche altri vantaggi, quali la semplicità nelle procedure di avviamento e fermata, il funzionamento non rumoroso, la minima richiesta di manutenzione, le buone prestazioni anche a carico parziale.

	<b>T500-CHP</b>	<b>T600-CHP</b>	<b>T800-CHP</b>	<b>T1100-CHP</b>	<b>T1500-CHP</b>
Sorgente di calore	Olio diatermico in circuito chiuso	Olio diatermico in circuito chiuso	Olio diatermico in circuito chiuso	Olio diatermico in circuito chiuso	Olio diatermico in circuito chiuso
Temperatura nominale dell' olio diatermico (ingresso/uscita)	300 / 250 °C	300 / 250 °C	300 / 250 °C	300 / 250 °C	300 / 250 °C
Potenza termica ceduta dall' olio	2900 kW	3500 kW	4500 kW	6200 kW	8700 kW
Temperatura acqua calda (ingresso/uscita)	60 / 80 °C	60 / 80 °C	60 / 80 °C	60 / 80 °C	60 / 90 °C
Potenza termica al circuito di raffreddamento dell'acqua (circa)	2320 kW	2800 kW	3580 kW	4930 kW	6975 kW
Potenza elettrica attiva netta	500 kW	600 kW	800 kW	1100 kW	1500 kW
Dimensioni totali (LxWxH)	13 x 2.5 x 3 m (1)	13 x 2.5 x 3 m (1)	12.5 x 2.5 x 3 m (2)	12.5 x 6 x 5.8 m (3)	13 x 7 x 4.5 m (4)

Tavola 1: Taglie standard dei turbogeneratori ORC per cogenerazione da biomassa, proposti da Turboden Srl, Brescia (Italia)

(1) Completamente assemblato su singolo skid

(2) Completamente assemblato su singolo skid + pompa separata (profondità 4 metri)

(3) Skid preassemblati + componenti da collegare sul sito

(4) Skid preassemblati + componenti da collegare sul sito + pompa separata (profondità 4 metri)

## Efficienza

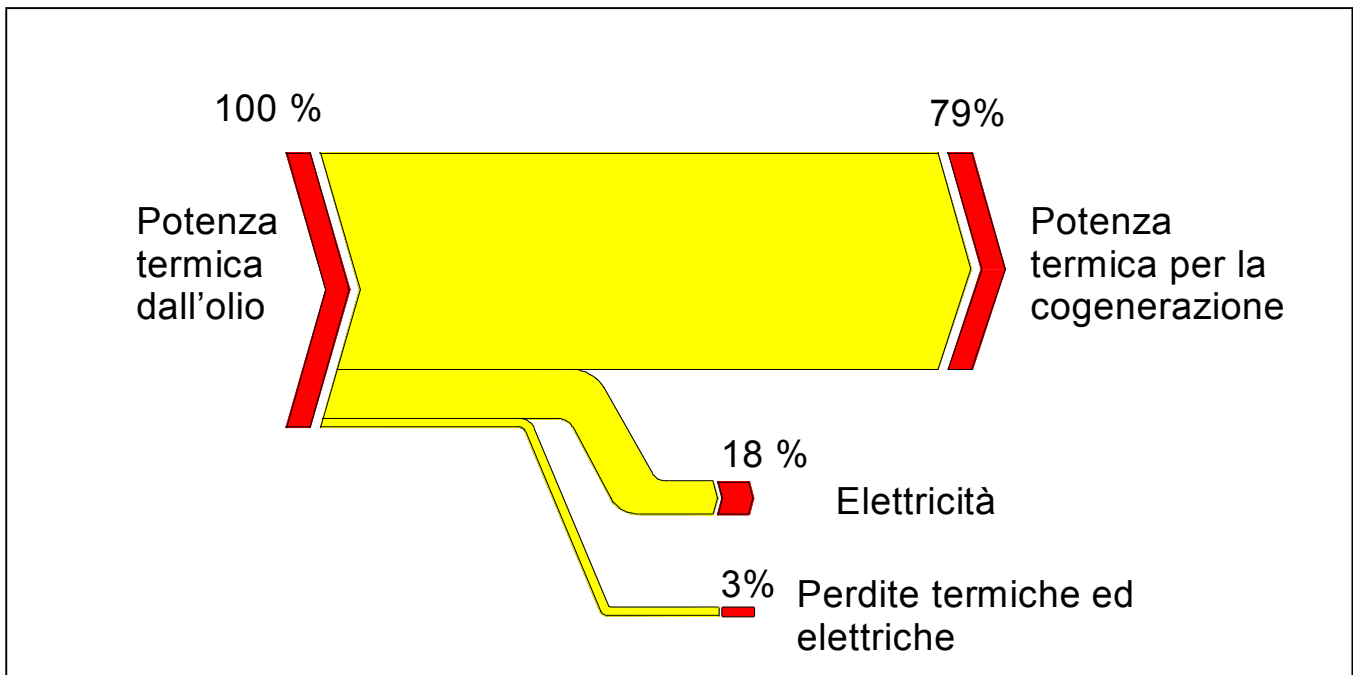


Figura 3: Bilancio energetico di un impianto ORC per cogenerazione a biomassa (temperatura dell'olio diatermico 300-250°C, temperatura dell'acqua di cogenerazione 60-80°C).

I turbogeneratori ORC per la cogenerazione a biomassa, descritti nel precedente paragrafo, che utilizzano l'olio silconico come fluido di lavoro, hanno dimostrato un'efficienza elettrica netta del 18% circa, quando operano con temperature nominali dell'acqua di raffreddamento (cfr. Tavola 1). Circa il 79-80% vengono ceduti all'acqua di raffreddamento come calore cogenerato, mentre le perdite elettriche e termiche stimate ammontano a solo il 2-3%. Questo significa che l'efficienza termica globale (efficienza di 1° principio) degli impianti ORC è tra il 97 e il 98%. Un diagramma di flusso energetico nell'ORC è riportato nella figura N° 3.

L'ORC può funzionare senza problemi a carico parziale fino al 10% del carico nominale ed ha un'eccellente efficienza a carico parziale con rendimento pressoché costante per carichi fino al 50% del carico nominale.

Il rendimento complessivo del sistema dipende dall'efficienza della caldaia ad olio diatermico e dalla presenza dell'economizzatore. Rendimenti della caldaia ad olio diatermico (energia disponibile all'olio/ potere calorifico inferiore) tra il 80 e l'83% sono possibili con le moderne caldaie ad olio diatermico portando ad un'efficienza elettrica globale che può raggiungere il 15%. Quando l'economizzatore è installato, l'efficienza termica generale può raggiungere il 90%. Il calore di condensazione del vapore presente nei gas di scarico può essere recuperato in uno

scambiatore supplementare detto condensatore, permettendo così di raggiungere un'efficienza termica superiore al 100% del potere calorifico inferiore.

## ***Esperienze pratiche di funzionamento***

Descriveremo in seguito più in dettaglio le possibili soluzioni impiantistiche e le possibili applicazioni sull' esempio degli impianti di cogenerazione a biomassa con tecnologia ORC attualmente in funzione o in costruzione .

### **Impianti in funzione:**

- **Biere (Svizzera) 300 kW<sub>el</sub> (1998) – teleriscaldamento**

È stato il primo impianto di cogenerazione a biomassa con caldaia ad olio diatermico ed ORC di scala industriale. Installato presso la caserma di Biere in Svizzera fornisce il calore ad una piccola rete di riscaldamento che riscalda tutti gli edifici di questa caserma. In questo impianto sono già presenti tutte le caratteristiche principali descritte in questo articolo. Una particolarità interessante è data dai serbatoi d' accumulo di acqua calda utilizzati per rendere più costante il carico termico . Questa soluzione può essere in molti casi interessante per aumentare l' utilizzo in cogenerazione su teleriscaldamenti con carico variabile [1]

- **Admont (Austria) 400 kW<sub>el</sub> (1999) – essiccazione / teleriscaldamento**

Installato presso la ditta STIA di Admont è stato il primo impianto di cogenerazione a biomassa con caldaia ad olio diatermico ed ORC installato in un' azienda dell' industria del legno . In questo impianto la caldaia fornisce olio diatermico sia all' ORC che alle presse calde [2] . L' acqua calda prodotta viene utilizzata per l' essiccazione del legno all' interno della ditta e per un piccolo teleriscaldamento nel vicino paesino. Questa soluzione permette un funzionamento a pieno carico per gran parte dell' anno. Questo impianto ha raggiunto quasi 40.000 ore di funzionamento con un affidabilità del turbogeneratore nell' ordine del 98%.

- **Crissier (Svizzera) 500 kW<sub>el</sub> (2002) – teleriscaldamento**

Questo impianto è caratterizzato dal fatto che viene bruciata in caldaia legna di scarto con contenuto di colla e vernice. Per questo motivo visto il costo nullo del combustibile l' impianto viene fatto funzionare sempre a pieno carico indipendentemente dalla richiesta di calore del teleriscaldamento collegato. Il calore in eccesso viene smaltito con degli areoraffreddatori a secco.

- **Lienz (Austria) 1000 kW<sub>el</sub> (2002) – teleriscaldamento**

Installato presso la centrale di teleriscaldamento di Lienz è il primo impianto di cogenerazione a biomassa con caldaia ad olio diatermico ed ORC da 1 MW<sub>el</sub>. Questo impianto è il primo impianto in cui è installata una caldaia con uno scambiatore fumi – olio diatermico supplementare a tubi di fumo a valle del primoscambiatore a serpentino chiamato economizzatore adatto insieme al preriscaldamento dell'aria di combustione a massimizzare il rendimento della caldaia permettendo un rendimento di caldaia del 82 % e un rendimento elettrico totale che si avvicina al 15% [4]. Questa soluzione è poi stata adottata su gran parte degli impianti seguenti. Data la rapida estensione della rete di teleriscaldamento e l'ottima esperienza di funzionamento dell'ORC la società di teleriscaldamento ha recentemente ordinato un secondo turbogeneratore da 1500 kW<sub>el</sub> da installare nella stessa centrale.

- **Bregenz (Austria) 1000 kW<sub>el</sub> (2002) – Macchina ad assorbimento**

La particolarità di questo impianto oltre all'utilizzo di legna di scarto proveniente dalle demolizioni è l'utilizzo di gran parte del calore generato in una macchina ad assorbimento per la produzione di acqua fredda. L'acqua fredda viene utilizzata per il raffreddamento degli stampi per la produzione di bottiglie di PET in una vicina fabbrica.

- **Tirano (Italia) 1100 kW<sub>el</sub> (2003) – teleriscaldamento**

È il primo impianto di cogenerazione con tecnologia ORC in Italia. In questo impianto il funzionamento avviene in gran parte in cogenerazione controllato dal termico [5]. Contrariamente agli altri impianti alimentati a legna vergine, sono però installati anche degli areoraffreddatori per permettere il funzionamento a pieno carico in regime parzialmente dissipativo nelle ore di maggior valorizzazione dell'energia elettrica.

- **Dobbiaco (Italia) 1500 kW<sub>el</sub> (2003) – teleriscaldamento**

È il primo impianto di cogenerazione con tecnologia ORC da 1,5 MW<sub>el</sub>. Questo impianto è anche dotato di un serbatoio di accumulo di dimensioni notevoli che permette di avere un funzionamento più uniforme e una maggiore produzione di energia elettrica. L'ottimo funzionamento di questo impianto ha generato un grande interesse per impianti di questa taglia in particolare nelle applicazioni nell'industria del legno.

- **Neckarsulm (Germania) 1100 kW<sub>el</sub> (2004) – teleriscaldamento**

- **Sauerlach (Germania) 500 kW<sub>el</sub> (2004) – teleriscaldamento**

- **Ploessberg (Germania) 1100 kW<sub>el</sub> (2004) – pellettizzazione**

L'impianto è installato presso la società Ziegler Erden a Ploessberg (Germania). La particolarità di questo impianto è l'uso del calore prodotto in un essiccatore a nastro per l'essiccazione di segatura che viene successivamente utilizzata per la produzione di pellets. Questa soluzione è di grande interesse perché permette un funzionamento pressoché costante a pieno carico e ha generato grande interesse tra i produttori di pellets europei che in passato spesso rinunciavano alle possibilità di cogenerazione per mancanza di tecnologie mature e adeguate in questa taglia di impianto.

- **Thal Assing (Austria) 1100 kW<sub>el</sub> (2004) – essiccazione**

La particolarità di questo impianto è l'uso esclusivo del calore prodotto in camere di essiccazione per l'essiccazione della legna. Questa soluzione è di grande interesse perché permette un funzionamento pressoché costante a pieno carico. L'esperienza positiva di questo impianto ha permesso una rapida crescita delle installazioni di impianti ORC in grandi segherie con necessità di calore per essiccazione.

- **Laengenfeld (Austria ) 1100 kW<sub>el</sub> (2004) - teleriscaldamento**

- **Lofer (Austria) 600 kW<sub>el</sub> (2004) – teleriscaldamento**

- **Abtenau (Austria ) 1100 kW<sub>el</sub> (2004) – pellettizzazione**

#### **Impianti in costruzione:**

Sono in costruzione altri 15 impianti di cogenerazione a biomassa con avviamento previsto nel 2005 o nei primi mesi del 2006 . Gli impianti in costruzione possono essere divisi per taglie e per utilizzo del calore nella maniera seguente:

Taglie: 2 impianti da 500 kW<sub>el</sub> ; 3 impianti da 600 kW<sub>el</sub> ; 1 impianto da 800 kW<sub>el</sub> ;1 impianto da 1100 kW<sub>el</sub> ; 8 impianti da 1500 kW<sub>el</sub>.

#### Utilizzo del calore :

9 impianti con teleriscaldamento; 6 impianti con essiccazione / pellettizzazione

Descriviamo qui di seguito il progetto di Leoben particolare per la sua potenza elettrica installata totale di 4,5 MW<sub>el</sub>. Per impianti di questa dimensione si la soluzione tradizionale a vapore risulta ancora competitiva principalmente per i superiori rendimenti elettrici ottenibili.

○ **Leoben (Austria ) 3 x 1500 kW<sub>e</sub> essiccazione / pellettizzazione**

Si tratta di un grosso progetto di contracting presso la segheria Mayer Melnhof di Leoben in Austria. La soluzione adottata di 3 impianti ORC con 3 caldaie ad olio diatermico in parallelo è sicuramente inusuale ma nonostante il più basso rendimento rispetto a una soluzione a vapore della stessa taglia è stata scelta dal contractor per la sua grande affidabilità e per i bassi costi di gestione e manutenzione , che hanno permesso di vincere la gara contro soluzioni che prevedevano una turbina a vapore. Il calore prodotto alimenta principalmente le camere di essiccazione della segheria e in parte un impianto di pellettizzazione vicino alla segheria. Le caldaie a biomassa ad acqua calda esistenti rimarranno come riserva e per le punte di richiesta.

### **Valutazioni economiche**

Le esperienze degli impianti riportate al paragrafo precedente mostrano come le principali applicazioni della tecnologia si abbiano nei teleriscaldamenti in area montana e nell' industria del legno. Riportiamo qui di seguito una valutazione economica semplificata di una tipica applicazione in una segheria che usa l' impianto in cogenerazione pura per fornire energia termica a degli essiccatoi (temperature 70/95°C ; andata/ritorno). Il rendimento dell' impianto ORC è stato ipotizzato essere di ca. 16% per tenere conto delle temperature di utilizzo dell' acqua calda superiori a quelle nominali (60/80°C; andata/ritorno) in corrispondenza delle quali il rendimento è di circa 18 %.

Nell' esempio viene valutata la redditività dell'intero impianto di cogenerazione a Biomassa comparato con l'ipotesi di utilizzare metano per fornire l' energia termica necessaria per l'essiccazione del materiale finito prodotto. Il costo di investimento ipotizzato (per un totale di 3.750.000 Euro) è una valutazione di massima del costo dei componenti tecnici necessari valutato sulla base di progetti simili comprensivo di 500.000 Euro come ipotesi per le opere civili. Non sono compresi in questo costo solo i costi di ingegneria e eventuali costi per il terreno su cui costruire l' impianto.

#### Le ipotesi che hanno una maggiore influenza sulla redditività sono le seguenti :

- Ore annue di funzionamento :

Questo parametro è fondamentale per una redditività sufficiente e può essere ottenuto solo se sono disponibili utenze costanti durante tutto l' anno . In genere per una redditività buona è necessario che questo valore non sia inferiore alle 4000 ore/anno . Se è presente un uso termico sufficiente gli impianti di cogenerazione sono in grado di raggiungere anche valori superiori alle 8000 ore/anno .

- Valore energia termica fornita agli essiccatoi:  
E' stato ipotizzato un valore conservativo del calore utilizzato di 2,4 €cent/kWh di equivalente a un costo del metano di ca. 23 €cent/Nm<sup>3</sup> (hp.: Potere calorifico: 10,55 kWh/Nm<sup>3</sup>; rendimento di caldaia : 90%) .
- Costi/mancati ricavi per la Biomassa utilizzata :  
Questo valore varia fortemente a seconda degli utilizzi alternativi disponibili per il materiale e della distanza di trasporto verso l'eventuale acquirente. Il valore riportato è un valore conservativo considerando biomassa vergine disponibile in impianti in Nord Italia .

### Calcolo costi Biomassa (in termini di ricavi evitati per mancata vendita a terzi):

	Euro/ton	Pci[kCal/kg]	Pci[kWh/kg]	ton/anno disponibili	ton/anno bruciate	MWh/anno bruciati	Costo/anno
Corteccia	15	1.800	2,09	10.000	10.000	20.930	150.000
chips/segatura	35	2.200	2,56	20.000	9.995	25.570	349.841
Totale annuo				30.000	19.995	46.500	499.841

### Ipotesi impiantistiche :

	Esempio T1100-CHP con essiccazione	
Pth Caldaia a olio	6200	kWth
Rendimento caldaia ad olio diatermico	80%	
Pth in olio ORC	6200	kWth
Pel ORC	990	kWel
Pth out ORC	5050	kWth
ore funz annue ORC	6000	ore/anno
Autoconsumi caldaia + circuito olio	125	kWel
Autoconsumi segheria	600	kWel
Ore giorno segheria	24	ore/giorno
Giorni anno segheria	250	giorni /anno
Pth essicatori	5050	kWth
ore funz annuo essicatori	6000	ore/anno
Consumo elettrico specifico areoraffreddatori	0,0052	Kwh <sub>el</sub> /kWh <sub>th</sub> diss.

### Dati energetici calcolati :

Pth combustione	7750	kWth
Eth annua tot a olio diatermico	37200	MWh/anno
Eth annua tot richiesta da legna	46500	MWh/anno
Energia Elettrica prodotta ORC	5940	MWh/anno
Energia Elettrica autoconsumata caldaia	750	MWh/anno
Energia Elettrica autoconsumata segheria	3600	MWh/anno
Energia Elettrica venduta	1590	MWh/anno
Consumo annuale Biomassa	19995	t/anno
Energia termica scaricata ORC	30300	MWth/anno
Energia termica usata dagli essiccatoi	30300	MWh/anno
Energia termica Dissipata	0	MWh/anno

Consumo elettrico areorafreddatori	0	MWh/anno
Perc Eth utilizzata	100%	
EE valorizzata a Certificati Verdi	5940	MWh/anno

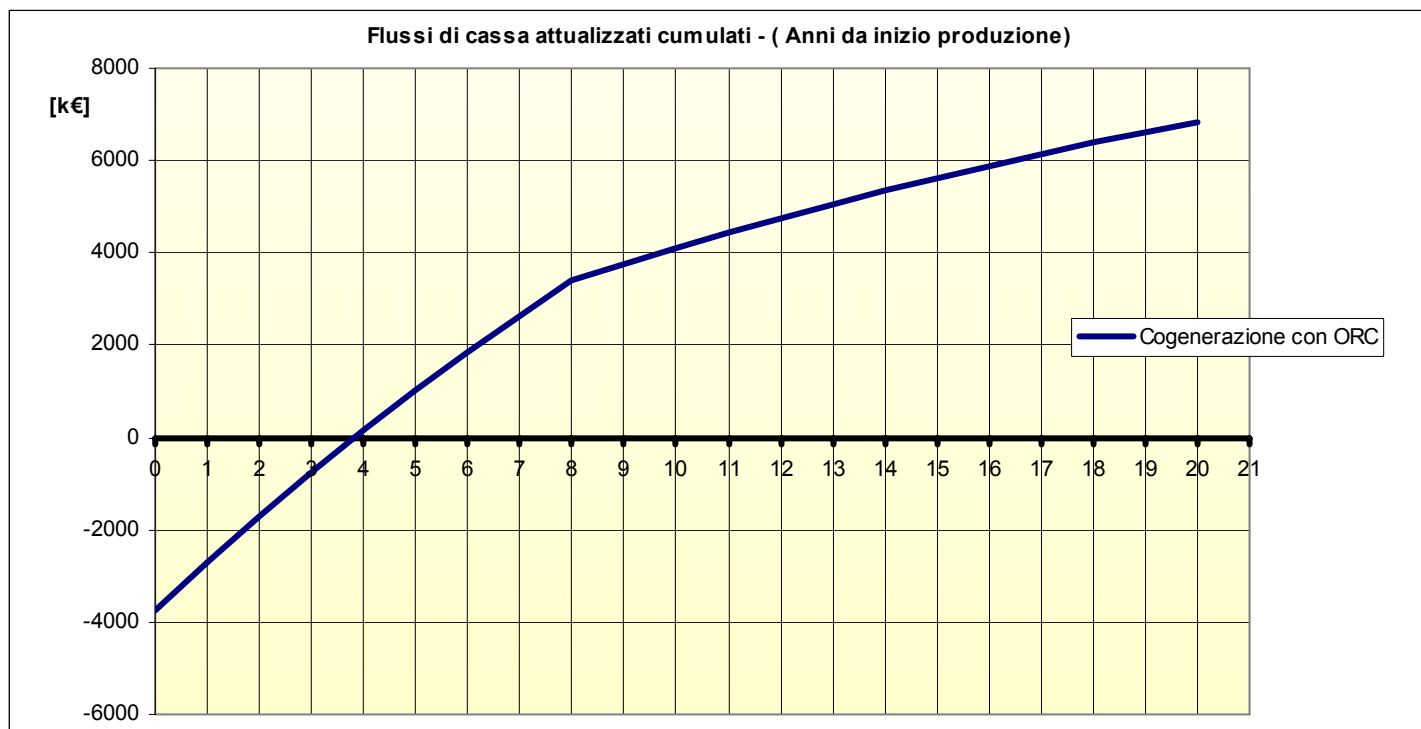
### Ipotesi economiche :

Valorizzazione EE Venduta	0,055	Euro/kWh
Valorizzazione EE autoconsumata	0,085	Euro/kWh
Valorizzazione CV	0,09	Euro/kWh
Valorizzazione Energia termica a essicatoi	0,024	Euro /kWh
Costi Manutenzione + personale	50	kEuro/anno
Investimento Totale	3750	kEuro

### Flussi di cassa :

Costi acquisto/mancati ricavi Biomassa	499.841	Euro/anno
Ricavi EE venduta	87.450	Euro/anno
Mancato costo EE autoconsumata segheria	306.000	Euro/anno
Mancato costo Eth a utenze Essicatoi	727.200	Euro/anno
Ricavi Certificati verdi	534.600	Euro/anno
Totale cash flow annuo primi 8 anni	1105.409	Euro/anno
Totale cash flow annuo al nono anno	570.809	Euro/anno

Nella figura seguente si riporta l' andamento del Valore attualizzato netto dell' investimento durante il periodo di vita dell' impianto di 20 anni.



### Indicatori economici:

Valore attualizzato Netto	6819	kEuro
Tempo di Ritorno attualizzato	3.8	Anni
Tasso interno di redditività	27.3%	

(\*) il tasso di attualizzazione assunto è stato del 5%

L' esempio riportato mostra che anche grazie all'introduzione del meccanismo dei certificati verdi pur assumendo ipotesi conservative assunte un' impianto di cogenerazione nell'industria del legno ha un'ottima redditività anche in assenza di contributi statali purchè si abbia un uso termico che permetta un uso in cogenerazione dell' impianto per almeno 4000 ore/anno. Interessante è anche la capacità di un impianto cogenerativo a biomassa di questo tipo di generare flussi di cassa ampiamente positivi anche nel periodo in cui non gode più dei certificati verdi (a partire dal nono anno di funzionamento). Lo stesso discorso non vale per impianti di produzione di sola energia elettrica da biomassa che dopo i primi otto anni presenterebbero invece flussi di cassa negativi.

### Conclusioni

Il sistema di cogenerazione basato sulla caldaia ad olio diatermico e sul turbogeneratore ORC ha dimostrato di essere una soluzione affidabile, efficiente ed economicamente interessante per i sistemi decentrati CHP nella gamma di potenza tra i 500 kW e i 1.5 MW<sub>el</sub> per impianto, fatta salva la possibilità di installare più impianti nello stesso sito. I requisiti di base per un sistema decentrato di cogenerazione come delineato nell' introduzione possono essere soddisfatti in modo consistente con la soluzione descritta.

Il potenziale per le future applicazioni in questo ambito è enorme, queste tecnologie possono quindi offrire un sensibile contributo verso il raggiungimento delle richieste fissate dal protocollo di Kyoto, attraverso l'utilizzo ottimale del potenziale della biomassa disponibile negli impianti decentrati di cogenerazione controllati dal termico (considerando sia la costruzione di nuovi impianti di cogenerazione che il miglioramento di quelli già esistenti).

### Bibliografia :

- [1] Gaia M., Scheidegger K., Bini R., Bertuzzi P., Small scale biomass powered CHP plants featuring thermal oil boiler and Organic Rankine Cycle turbogenerators, 1<sup>st</sup> World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry, Sevilla (Spain), 5-9 June 2000
- [2] Obernberger I., Hammerschmid A., Bini A., Biomasse- Kraft – Wärme – Kopplungen auf basis des ORC – Prozesses – EU THERMIE Projekt Admont (A), VDI-BERICHTER NR. 1588, 2001
- [3] Bini R., Manciana E., Organic Rankine Cycle turbogenerators for combined heat and power production from biomass, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Munich Discussion meeting 1996, ZAE Bayern (ed) Munich, Germany, 1996
- [4] Obernberger I., Thonhofer P., Reisenhofer E., Description and evaluation of the new 1000 kW<sub>el</sub> Organic Rankine Cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria, Euroheat & Power, Volume 10/2002
- [5] Bini R., Duvia A., Schwarz A., Gaia M., Bertuzzi P., Righini W., Operational results of the first Biomass CHP plant based on an Organic Rankine Cycle turbogenerator and overview of a number of plants in operation since 1998