

# ANALISI DELLE PRESTAZIONI DEI GRUPPI COGENERATIVI ORC PER LO SFRUTTAMENTO DEGLI SCARTI DELL'INDUSTRIA DEL LEGNO

G.Bonetti<sup>†</sup>, P.Pinamonti\*, M.Reini<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Dipartimento di Ingegneria Meccanica - Università di Trieste

\* Dipartimento di Energetica e Macchine - Università di Udine

## SOMMARIO

Nel presente lavoro viene effettuata una valutazione delle prestazioni energetiche ottenibili con impianti cogenerativi basati sulla tecnologia Organic Rankine Cycle (ORC), alimentati a biomassa o a scarti delle lavorazioni dell'industria del legno. In questo contesto i turbo generatori ORC di piccola taglia ben si adattano a essere integrati con caldaie esistenti che possono produrre calore a bassa temperatura tramite olio diatermico che va ad alimentare appunto il Gruppo ORC.

La previsione delle prestazioni è stata effettuata modellizzando l'impianto energetico tramite il soft-ware Aspen-Plus<sup>®</sup> ritenuto particolarmente adatto a questa indagine per la possibilità di modellare, con diversi livelli di dettaglio, i componenti dell'impianto (scambiatori, turbina, etc.) e la disponibilità di librerie relative a numerosi fluidi organici. La simulazione effettuata ha consentito di valutare le prestazioni dei gruppi in diverse condizioni di funzionamento cogenerativo o di semplice produzione elettrica, completando l'analisi con una valutazione exergetica

## 1. INTRODUZIONE

La motivazione del lavoro è data dalla presenza nella Regione Friuli-Venezia Giulia di due distretti industriali specializzati nella lavorazione del legno, caratterizzati da un'ingente produzione di scarti da lavorazione industriale in un'area geograficamente molto limitata.

Questi scarti, con potere calorifico residuo non trascurabile, e non convenientemente recuperabili come sottoprodotti (ad es. per pannelli truciolari) vengono oggi per lo più utilizzati in caldaie a legna per coprire i fabbisogni termici degli stabilimenti industriali stessi. Tale soluzione è inoltre adottata solo in alcune aziende, ottenendo una potenzialità che copre solo parzialmente i fabbisogni termici. La situazione complessiva del distretto è caratterizzata quindi da una notevole presenza di caldaie a combustibili fossili tradizionali.

Lo studio qui presentato focalizza la sua attenzione sul "distretto del mobile" localizzato in alcuni comuni della Provincia di Pordenone, analizzando l'opportunità di trasformare alcune caldaie esistenti in sistemi cogenerativi a biomassa, costituita da scarti della lavorazione del legno, di piccola taglia. Per tali applicazioni si è ipotizzato il ricorso alla tecnologia energetica ORC (Organic Rankine Cycle), particolarmente adatta a lavorare accoppiata a impianti termici di piccola taglia e funzionanti a bassa temperatura.

In questo contesto è stata condotta un'indagine empirica sulle realtà industriali del territorio, con rilievo dei dati energetici (utenza termica, utenza elettrica, fabbisogni di combustibile, etc.) che ha permesso di individuare le dimensioni e le tipologie degli impianti realizzabili, considerando anche eventuali impianti consortili.

Nello studio vengono considerate le prestazioni energetiche ottenibili con tali impianti accoppiabili a caldaie alimentate a biomassa legnosa, illustrando i risultati di una modellizzazione energetica ed exergetica dei gruppi ORC.

La soluzione proposta consiste nell'integrazione delle caldaie a legna eventualmente già esistenti con un circuito di olio diatermico in grado di alimentare l'impianto ORC. In

questo modo si ottiene energia elettrica e calore, utilizzabile anche per applicazioni di teleriscaldamento e si realizza un più completo sfruttamento energetico della biomassa.

Per la modellizzazione del sistema è stato usato il software Aspen-Plus<sup>®</sup> ritenuto particolarmente adatto a questa indagine, con l'intento di indagare le prestazioni energetiche dell'impianto al variare delle condizioni operative e delle specifiche di progetto, in termini sia di parametri del ciclo, sia delle proprietà termodinamiche del fluido di lavoro. Utilizzando le librerie dei fluidi disponibili in Aspen-Plus<sup>®</sup> viene previsto con buona attendibilità il comportamento del fluido nel ciclo. L'impianto simulato è basato su un ciclo Rankine rigenerativo, senza surriscaldamento.

Le principali caratteristiche funzionali dei componenti dell'impianto sono state scelte sulla base dei dati reperiti in letteratura e delle indicazioni fornite da alcuni costruttori. Il modello di simulazione del sistema energetico ha permesso di ricavare con buona approssimazione le prestazioni ottenibili al variare dei parametri liberi di progettazione e di regolazione, configurandosi come uno strumento essenziale nella valutazione dell'effettivo risparmio energetico e della concreta fattibilità tecnico-economica delle soluzioni impiantistiche adottabili nella realtà industriale territoriale analizzata.

## 2. FATTIBILITA' DI IMPIANTI BASATI SU GRUPPI ORC NEL DISTRETTO INDUSTRIALE DEL MOBILE

Il distretto del Mobile dell'Alto Livenza è concentrato in un'area geografica al confine tra la parte occidentale del Friuli Venezia Giulia e il Veneto, con diversi gruppi industriali che hanno stabilimenti in entrambi i comprensori regionali.

In questo studio, l'attenzione si è concentrata sulle aziende della Regione Friuli Venezia Giulia, site negli undici comuni compresi nella parte pordenonese del distretto. La produzione locale comprende diversi tipi di mobili per la casa, soprattutto soggiorni, camere e cucine, indirizzandosi principalmente a prodotti di fascia media.

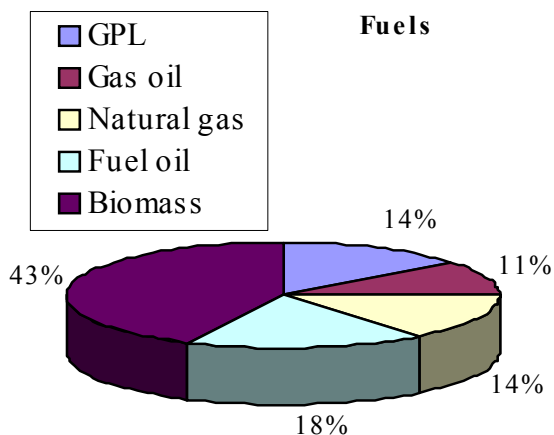


Fig.1 – Tipologie di combustibili utilizzate nelle aziende del distretto.

L'aspetto generale del distretto più interessante per l'introduzione di innovazioni tecnologiche in campo energetico è l'elevata dimensione media aziendale, legata anche alla strutturazione delle aziende in gruppi avviata a partire dagli anni '70. Considerando infatti le dimensioni delle aziende del Distretto riportate in Tab.1, suddivise nelle due classi ISTAT 36 (produzione di mobili per casa-ufficio) e 20 (produzione di componenti in legno), si nota una numerosità di addetti ben superiore alla media nazionale dei distretti mobiliari che è di 8 addetti/azienda, pur mantenendo le caratteristiche di aziende artigiane (circa 15 dipendenti), con una fitta rete di microimprese di subfornitura nel tessuto produttivo del distretto.

Tabella 1 - Caratteristiche delle aziende del Distretto.

	N° aziende distretto	N° addetti /azienda	N° aziende campione
Classe 36	178	19.20	34
Classe 20	45	7.16	5

Per quanto riguarda l'applicazione di sistemi per la cogenerazione basati su biomasse, si sono identificate le caratteristiche energetiche ed i consumi di combustibili e biomasse nelle configurazioni attuali basandosi su un campione di aziende del Distretto. Per la definizione della popolazione, l'interesse si è concentrato sulle 260 imprese configurate come società di capitali, caratterizzate da dimensioni mediamente maggiori e, soprattutto, da una maggiore disponibilità di dati elementari per ogni azienda classificata. In particolare, il numero di addetti è stato utilizzato come variabile di stratificazione per estrarre un campione di 39 aziende, rappresentative in maniera proporzionale dell'intera popolazione considerata [1].

L'indagine, realizzata mediante somministrazione di questionari e compilazione di schede tecniche nel corso di audit energetici svolti in ogni azienda, ha avuto lo scopo principale di stimare:

- Potenzialità delle caldaie esistenti e potenze elettriche impegnate dalle aziende;
- Tipi di caldaia, con particolare riferimento al combustibile e al fluido termovettore, valutando in special modo la diffusione delle caldaie a scarti legnosi;
- Profili annui di carico termico ed elettrico, con attenzione alla destinazione del calore prodotto.

I risultati dell'indagine, per quanto riguarda i combustibili utilizzati nella attuale configurazione impiantistica, sono

illustrati in Fig.1. Si può notare che l'utilizzo di biomasse (tipicamente scarti legnosi derivanti dalle lavorazioni) è largamente diffuso nel distretto e quindi viene confermato l'interesse per uno studio di fattibilità di impianti cogenerativi alimentati con questo combustibile. Va poi rimarcato che, se si focalizza l'attenzione su aziende con un numero di addetti medio alto (ad esempio maggiore di 60), si trovano percentuali di utilizzo di biomasse come combustibile sensibilmente elevate (prossime all'80%), che suggeriscono come tali aziende siano quelle potenzialmente più interessate alla soluzione cogenerativa. I risultati dell'indagine, per quanto riguarda le potenze termiche ed elettriche installate, sono rappresentati nelle figure 2 e 3.

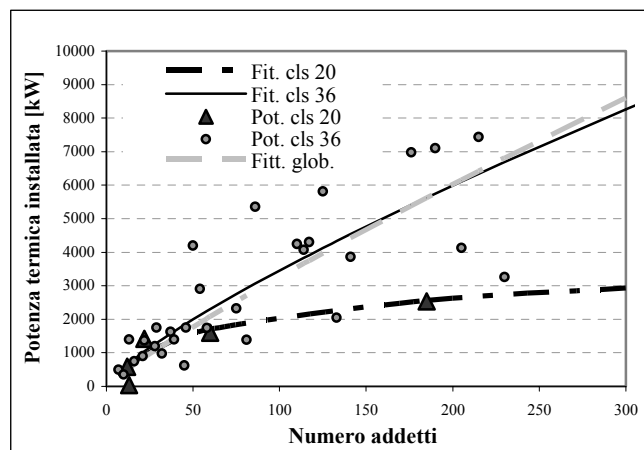


Figura 2. Potenza termica installata in funzione del n° di addetti.

Si è ritenuto di considerare come variabile significativa per i dati energetici il numero degli addetti delle aziende, individuando una dipendenza tra questo parametro numerico e le potenze termiche ed elettriche installate. I risultati così ottenuti possono essere applicati anche alle altre aziende del distretto, non comprese nel campione analizzato.

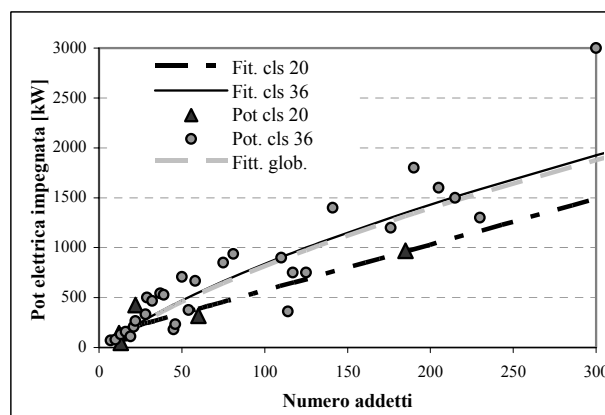


Figura 3. Potenza elettrica impegnata in funzione del n° di addetti.

Come si può notare dagli andamenti delle funzioni rappresentate nelle figure 1 e 2, a parità di addetti le aziende del settore 36 hanno potenzialità termiche e potenze elettriche impegnate tendenzialmente maggiori, risultando quindi meglio compatibili con l'installazione di impianti cogenerativi. A questo riguardo va sottolineato che per le applicazioni considerate il rapporto tra potenza elettrica e potenza termica installata è dell'ordine del 0.20-0.25.

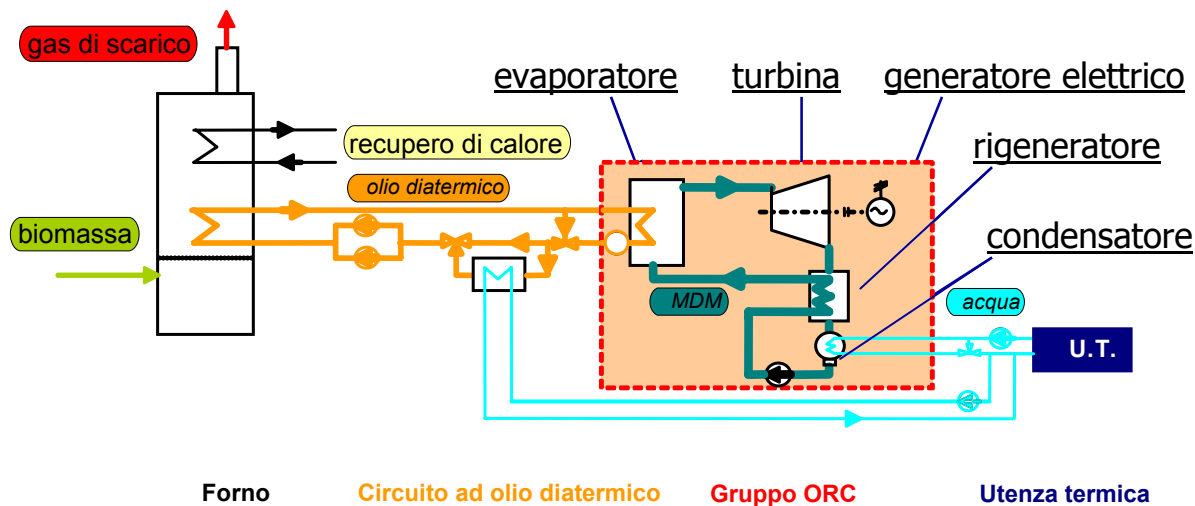


Figura 4: Schema semplificato di un impianto cogenerativo ORC.

In questo contesto si è quindi valutata l'opportunità di applicare alle realtà industriali studiate una tipologia di impianti cogenerativi basati sulla tecnologia ORC.

I cicli Rankine a fluido organico (ORC) infatti, pur rappresentando una tecnologia consolidata storicamente applicata con successo nella produzione di energia geotermoelettrica [2], hanno trovato recentemente una significativa diffusione e commercializzazione come turbo-gruppi cogenerativi compatti e di piccola taglia [3, 4 e 5].

Un impianto cogenerativo a fluido organico è organizzato come nello schema di fig.4, accoppiando ad una caldaia a biomasse, eventualmente esistente, un turbo-gruppo ORC utilizzando come fluido vettore tipicamente un olio diatermico. Come nei cicli Rankine tradizionali a vapore acqueo, il fluido operativo viene riscaldato nell'evaporatore e convertito in vapore, che viene fatto espandere attraverso una turbina, producendo energia meccanica che viene convertita in energia elettrica attraverso un generatore. Allo sbocco della turbina il vapore surriscaldato è raffreddato in uno scambiatore rigenerativo e poi inviato al condensatore, che fornisce la potenza termica in uscita per l'impiego cogenerativo. Rispetto ai cicli tradizionali, l'acqua è sostituita da fluidi o miscele di fluidi organici, caratterizzati da curve di saturazione del vapore tipiche dei "fluidi secchi", compatibili, con fonti di calore a temperatura relativamente bassa.

Le principali caratteristiche tecniche di queste unità che li rendono adatti all'introduzione nei distretti mobiliari, sono [5]:

- Alta efficienza del ciclo (specialmente in assetto cogenerativo);
- 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 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.

L'alternativa costituita dai sistemi di gassificazione, accoppiati con un motore a combustione interna, sebbene promettente dal punto di vista della pura efficienza, risulta critica dal punto di vista della gestione e della manutenzione, principalmente a causa dei problemi associati al processo di pulizia del gas di sintesi che si rende necessario.

In questi ultimi anni si è giunti a una progressiva standardizzazione e produzione in serie dei gruppi ORC cogenerativi, che hanno determinato una riduzione dei costi di investimento: sul mercato sono oggi disponibili moduli standardizzati ORC con potenze elettriche nel campo da 500 a 1500 KW, cui corrispondono potenze termiche nel campo da 2300 a 7000 KW [6].

Il limite di taglia massima si pone attualmente attorno ai 1500 kW elettrici poiché attorno a questa potenza è facile trovare utenze per l'energia prodotta e poiché un impianto così piccolo è in grado di operare senza alcuna supervisione, con ridotta manutenzione ed ispezioni da parte dell'operatore distanziate di diversi giorni.

Dall'analisi effettuata sui fabbisogni energetici delle aziende del distretto, si sono individuate 30 aziende della classe 36 caratterizzate da consumi medio-alti di energia e compatibili con le potenzialità dei gruppi ORC commerciali. Inoltre anche aziende di più piccole dimensioni possono essere interessate a questa tecnologia, ricorrendo a soluzioni consortili. Tenuto conto di questi fattori si è deciso di realizzare un modello di simulazione di questa tipologia di impianti per poterne valutare appieno la fattibilità tecnico economica nel distretto industriale del mobile.

### 3. SIMULAZIONE DELLE PRESTAZIONI DI UN IMPIANTO ORC

Come si è visto, i gruppi ORC possono facilmente operare accoppiati a caldaie alimentate a biomasse per mezzo di un circuito chiuso di olio diatermico. In considerazione di questo, la simulazione dell'impianto si è focalizzata sul solo gruppo ORC, fissando il valore tipico di 300° C per la temperatura dell'olio entrante nel gruppo.

La scelta del fluido di lavoro è fondamentale in quanto contribuisce a determinare il processo termodinamico e quindi il rendimento del gruppo. Un vincolo importante è costituito dal fatto che la sorgente termica disponibile è a bassa temperatura, per cui si dovrà adottare un ciclo Rankine a vapore saturo, ossia senza surriscaldamento. Di conseguenza i

cosiddetti “fluidi bagnati” (wet fluids), che hanno - come l’acqua - pendenza negativa della curva di saturazione nel piano  $T-s$ , non sono adatti per l’applicazione considerata perché durante l’espansione si avrebbe presenza di condensato in turbina. Risultano invece adatti i “fluidi secchi” (dry fluids), cioè quelli caratterizzati da pendenza positiva della curva di saturazione nel piano  $T-s$ . Il fluido dovrà inoltre essere caratterizzato da basse tossicità ed aggressività verso i materiali impiegati nel circuito, oltre che da una buona stabilità termochimica nel campo di temperature definito dalle sorgenti termiche e da scarsa infiammabilità.

Tra i fluidi che soddisfano i requisiti indicati risultano particolarmente adatti i polisilossani [7], che vengono già correntemente impiegati nell’industria. Si è considerato come fluido motore del gruppo da simulare l’OctaMetilTrisilossano (MDM) che risulta inoltre presente nella biblioteca del software Aspen-Plus®. Per modellare le proprietà termodinamiche del MDM si è utilizzata l’equazione di stato di Peng-Robinson [8]. Nelle applicazioni pratiche tale fluido può essere disponibile in miscela con piccole percentuali di altri silossani (in questo caso il comportamento della miscela non si scosta molto da quello del componente puro).

Il modello dell’impianto è stato realizzato con componenti standard della biblioteca di Aspen-Plus®. Per gli obiettivi del lavoro ci si è concentrati sulla valutazione delle prestazioni termodinamiche del ciclo, senza entrare nella definizione dettagliata della geometria dei componenti [9].

Il gruppo si presenta come un monoblocco, che riceve l’olio diatermico dalla caldaia e l’acqua di ritorno dall’utenza termica. La regolazione avviene per mezzo di un controllo di livello nel pozzo caldo del condensatore, la cui costanza è ottenuta adeguando il numero di giri della pompa, ottenendo quindi una pressione di vaporizzazione variabile con le condizioni di funzionamento. La modulazione della potenza termica ed elettrica prodotte avviene in pratica agendo sulla energia in ingresso, cioè sulla portata di olio diatermico.

#### 4. PRESTAZIONE ENERGETICHE OTTENIBILI

Utilizzando il modello descritto, sono state calcolate le prestazioni energetiche del gruppo ORC scegliendo di fissare, oltre alla temperatura di ingresso dell’olio diatermico (300°C), quella di ritorno al condensatore; nel caso cogenerativo (ritorno dall’utenza termica) tale temperatura è stata fissata a 60°C, tipica delle applicazioni di teleriscaldamento, mentre nel caso non cogenerativo (ritorno dal dissipatore ad aria) a 35° C.

In questo modo le variabili libere per la simulazione del modello si riducono a due e le sue prestazioni possono essere descritte semplicemente mediante diagrammi parametrici bidimensionali. Nel seguito sono riportate le condizioni di funzionamento nominali del gruppo e i rendimenti di carattere non termodinamico dei componenti (ipotizzati costanti):

- temperatura di evaporazione di 250°C (corrispondente alla pressione  $p_v=762.81$  kPa);
- temperatura di condensazione di 90°C (corrispondente alla pressione  $p_c=14.25$  kPa);
- potenza elettrica di 1000 kW (corrispondente ad una portata di fluido di 23.2 kg/s).
- rendimento idraulico della pompa: 0.75;
- rendimento meccanico della pompa: 0.95;
- rendimento del motore elettrico della pompa: 0.95;
- rendimento meccanico della turbina: 0.95;
- rendimento dell’alternatore: 0.97.

La potenza nominale è stata scelta quale valore indicativo emerso dall’indagine effettuata, con riferimento agli impianti di taglia maggiore; i risultati ottenuti sono peraltro facilmente estendibili anche agli impianti di taglia minore. Le simulazioni sono state condotte facendo variare  $p_v$  tra 500 e 900 kPa, mentre si sono considerate pressioni  $p_c$  comprese tra 14 e 44 kPa o tra 4 e 34 kPa rispettivamente per le condizioni di funzionamento cogenerative e per quelle non cogenerative.

Le Figg. 7 e 8 riportano gli andamenti del rendimento elettrico  $\eta_{el}$  in funzione della potenza termica entrante, utilizzando come parametro  $p_c$ , rispettivamente nel funzionamento cogenerativo e non cogenerativo.

Nel funzionamento cogenerativo (Fig. 7) i valori del rendimento sono compresi tra il 10% e il 18%; essi aumentano incrementando la potenza termica fornita al gruppo, in quanto in questo modo si ha un aumento della pressione di vaporizzazione, mentre diminuiscono incrementando la pressione di condensazione.

Nel caso non cogenerativo (Fig. 8), la disponibilità di fluido refrigerante a più bassa temperatura consente di raggiungere pressioni di condensazione particolarmente basse (0,04 bar); in questo modo il rendimento elettrico del gruppo aumenta di circa 3 punti %, mentre la potenza prodotta aumenta di oltre 200 Kw (Fig 12).

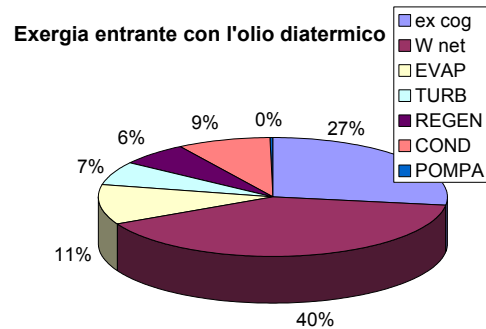


Fig. 5. Ripartizione dell’exergia entrante nel gruppo ORC per  $p_c=14$  kPa e  $p_v=763$  kPa in un caso cogenerativo.

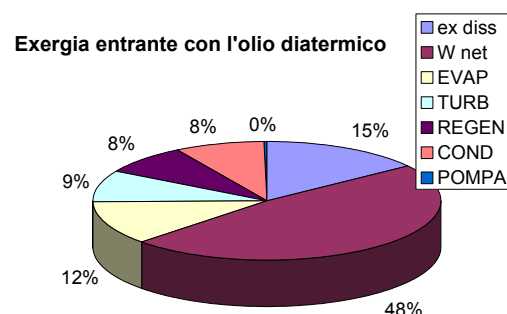


Fig. 6. Ripartizione dell’exergia entrante nel gruppo ORC per  $p_c=4$  kPa e  $p_v=763$  kPa in un caso non cogenerativo.

La situazione appare completamente diversa osservando i valori dei rendimenti exergetici riportati nelle Figg. 9 e 10. Infatti, nel caso di funzionamento cogenerativo, il rendimento exergetico risulta compreso tra il 55% e il 70%, con un valore del 67% in condizioni nominali. Nel caso non cogenerativo, a causa della dissipazione del calore a bassa temperatura prodotto dal condensatore, il rendimento exergetico risulta sempre inferiore al 50%, con un valore del 40% in condizioni nominali ( $p_c=14$  kPa).

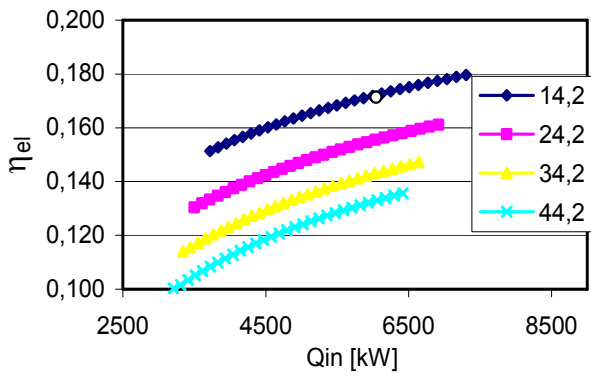


Fig 7. Rendimento elettrico in funzionamento cogenerativo (parametro  $p_c$  [kPa]).

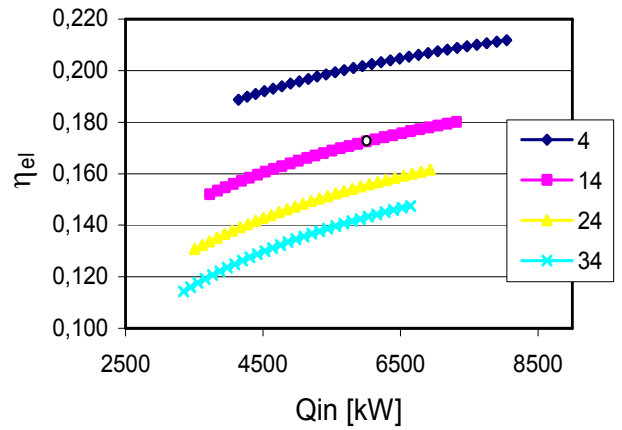


Fig 8. Rendimento elettrico in funzionamento non cogenerativo (parametro  $p_c$  [kPa]).

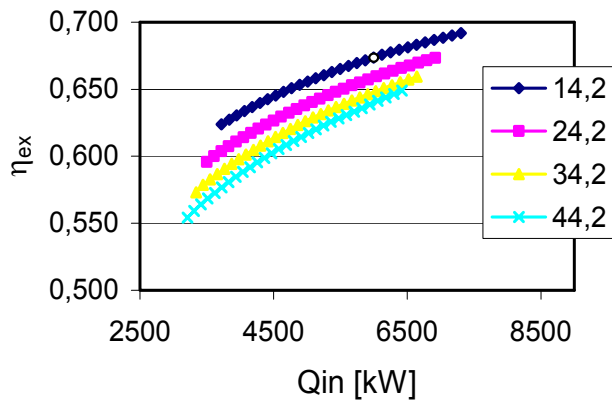


Fig 9. Rendimento exergetico in funzionamento cogenerativo (parametro  $p_c$  [kPa]).

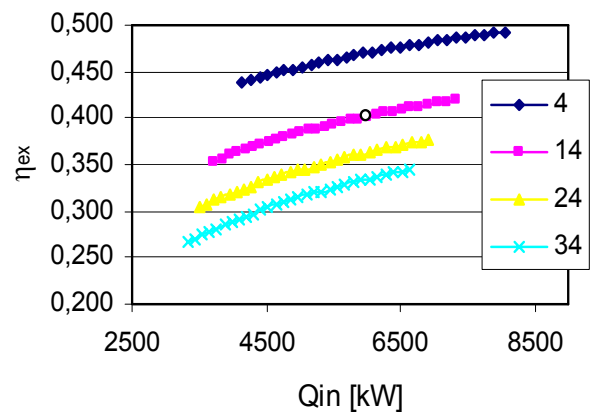


Fig 10. Rendimento exergetico in funzionamento non cogenerativo (parametro  $p_c$  [kPa]).

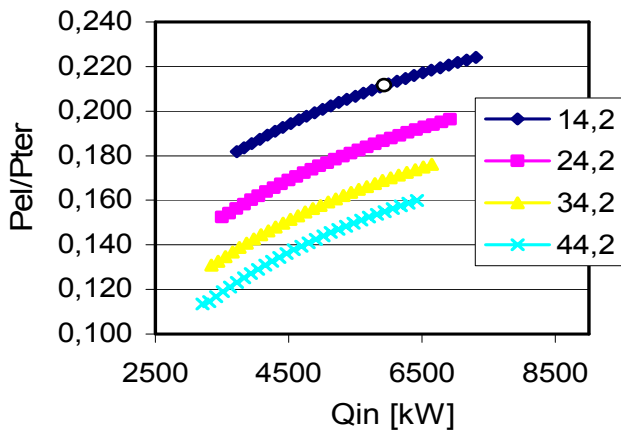


Fig 11. Rapporto potenze elettrica e termica in funzionamento cogenerativo (parametro  $p_c$  [kPa]).

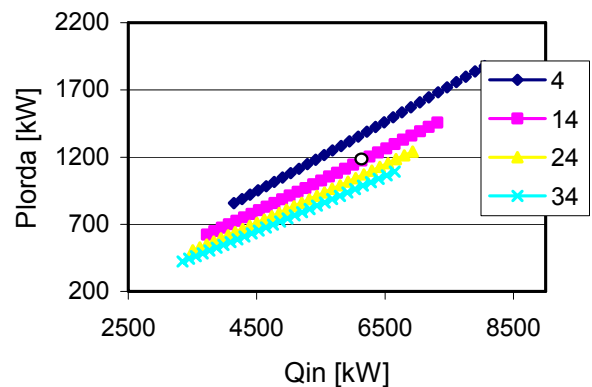


Fig 12. Potenza lorda prodotta in funzionamento non cogenerativo (parametro  $p_c$  [kPa]).

Le Figg. 5 e 6 mostrano la ripartizione dell'exergia entrante nel gruppo con l'olio diatermico tra perdite ed exergia utile, rispettivamente in un caso cogenerativo ed in uno non cogenerativo. E' interessante notare come circa il 20% delle perdite siano localizzate nell'evaporatore e nel condensatore, a causa della differenza di temperatura tra i fluidi vettori ed il fluido motore del ciclo durante i cambiamenti di fase.

Sebbene nel rigeneratore non avvengano cambiamenti di fase, l'esigenza di contenere le sue dimensioni entro limiti

accettabili impedisce di ottenere minime differenze di temperatura tra il vapore surriscaldato ed il liquido condensato; di conseguenza anche questo componente è sede di una perdita exergetica non trascurabile, attorno al 6-8%.

La Fig. 11 riporta invece i valori calcolati per il rapporto tra potenza elettrica e potenza termica prodotte dal gruppo in funzionamento cogenerativo, ancora in funzione della potenza entrante con l'olio diatermico e di  $p_c$ . Essi sono compresi tra 0.12 e 0.23, ed è interessante osservare che, se si interpreta la

pressione di condensazione come un parametro di regolazione del gruppo, è possibile variare il valore del rapporto elettricità-calore, in condizioni di potenza termica entrante nel gruppo costante, di una quantità pari a circa 6 punti % (ad esempio, dal 16% al 22%). Tale regolazione implica in pratica la variazione della sola potenza elettrica prodotta. Infatti la potenza trasferibile all'utenza termica con il flusso d'acqua che attraversa il condensatore dipende quasi totalmente dalla potenza termica entrante nel gruppo con il circuito dell'olio.

La Tabella 2 riporta le diverse coppie di valori portata-temperatura di mandata, cui corrispondono diversi valori di pressione di condensazione, quindi di rendimento elettrico, per una potenza termica entrante con l'olio diatermico di circa 6000 kW termici. In tutti i casi riportati la potenza termica fornita dal condensatore (per l'utenza o per la dissipazione) rientra nell'intervallo 4900 kW  $\pm$  4%. Ne derivano le seguenti possibilità di scelta in termini di regolazione e gestione del gruppo:

- soddisfacimento di particolari vincoli sulla portata o sulla temperatura imposti dall'utenza termica;
- mantenimento delle condizioni di funzionamento che garantiscono la massima produzione elettrica;
- modulazione entro limiti relativamente ampi della produzione elettrica con consumo costante di biomassa (in assenza di vincoli imposti dall'utenza termica).

Tabella 2: Temperature e portate di acqua all'uscita dal condensatore per una potenza termica entrante di 6000 kW, in funzionamento cogenerativo (60°C) e non cogenerativo(35°C).

	$p_C$ [kPa]	4	14	24	34
$T_{\text{ritorno}}$ 35°C	$T_{\text{mandata}}$	52°C	69°C	79°C	86°C
	$m$ [kg/s]	66	34	27	24
$T_{\text{ritorno}}$ 60°C	$T_{\text{mandata}}$	-	80°C	89°C	95°C
	$m$ [kg/s]	-	58	42	34

## 5. CONCLUSIONI

La tecnologia considerata si è rivelata appropriata per l'applicazione della cogenerazione nel Distretto industriale del mobile, sia sotto il profilo delle taglie disponibili, sia sotto quello del rapporto tra potenza elettrica e potenza termica producibili. Essa associa diversi vantaggi operativi (quali la lunga vita della macchina, il collegamento diretto del generatore elettrico alla turbina, la semplicità nelle procedure di avviamento e fermata, il funzionamento non rumoroso, la minima richiesta di manutenzione) ad un buon rendimento elettrico, anche a carico parziale. Infatti quest'ultimo risulta allineato con quello delle concorrenti tecnologie di conversione "biomass to energy" che, per le taglie in esame, difficilmente supera il 20% [10].

Il modello sviluppato si è rivelato adeguato per una valutazione preliminare dei flussi energetici che si presenterebbero nelle eventuali concrete applicazioni presso aziende del distretto, valutazione essenziale per decidere della effettiva fattibilità economica delle applicazioni stesse.

L'analisi exergetica ha confermato l'elevata efficienza dei gruppi ORC nel funzionamento cogenerativo. Passando a quello non cogenerativo, la dissipazione del calore a bassa temperatura disponibile al condensatore viene compensata solo in parte dall'aumento della produzione elettrica; in tali condizioni risulta più difficile conseguire un rapido ritorno dell'investimento, qualora si tenga anche conto dell'esigenza

di raffreddare una importante portata di acqua. Considerazioni analoghe possono estendersi anche ad altre tecnologie di conversione "biomass to energy", che possono risultare exergeticamente ed economicamente valide solo qualora venga ampiamente utilizzato il calore prodotto a bassa temperatura.

I risultati dell'analisi exergetica mostrano inoltre come una quota importante delle perdite debba imputarsi alle irreversibilità esterne al ciclo (nel condensatore e nell'evaporatore), oltre che a quelle interne al ciclo, nel rigeneratore. Questo suggerisce due possibili linee di sviluppo per i gruppi ORC: una ottimizzazione del progetto del rigeneratore, che consenta di ottenere più ampie superfici di scambio, conservando ridotte perdite di carico ed un ingombro accettabile; l'adozione di miscele di polisilossani quale fluido motore del ciclo, per ottenere fasi di evaporazione e condensazione "scorrevoli", ovvero a temperatura variabile, con una conseguente riduzione delle perdite exergetiche esterne al ciclo nel condensatore e nell'evaporatore.

## BIBLIOGRAFIA

1. D. Chinese, A. Meneghetti, G. Nardin, P. Simeoni, "Application of biomass fed ORC power systems in the furniture manufacturing industrial district of Pordenone – Part I: Determinants of renewable energy exploitation", *Proc. of the 3rd Int. Symposium "Energy and the Environment"*, Megalia Foundation, Sorrento 2004.
2. Desideri U., Bidini G., "Study of possible optimisation criteria for geothermal power plants", *Energy Conv. and Management*, 38 (15-17), pp.1681-1691, 1997.
3. Hung T.C., Shai T.Y., Wang S.K., "A review of Organic Rankine Cycles (ORCs) for the recovery of low grade waste heat", *Energy*, 22(7), pp. 661-667, 1997.
4. Obernberger, I. "Biomass CHP based on the ORC process- EU-Thermie Project Admont", *Tagungsband zur VDI-Tagung "Thermische Nutzung von fester Biomasse"*, Salzburg, Mai 2001, VDI Bericht 1588, pp. 283-302.
5. Duvia A., Gaia M., "ORC plants for power production from biomass from 0,4 MWe to 1,5 MWe: Technology, efficiency, practical experiences and economy", *proceedings of the 7th Holzenergie- Symposium*, Zurich, October 2002 Obernberger, 1998.
6. <http://www.turboden.it>.
7. G. Angelino, C. Invernizzi, "Cyclic Methyl-siloxanes as Working Fluids for Space Power Cycles", *Trans. ASME, Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 115, pp. 130-137, August 1993.
8. R. C. Reid, J. M. Prausnitz, B. E. Poling: *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill, 1988.
9. D. Micheli, P. Pinamonti, M. Reini, R. Taccani – "Application of biomass fed ORC power systems in the furniture manufacturing industrial district of Pordenone: Part II: development of thermodynamic cycle simulation model", *Proc. of the 3rd Int. Symposium "Energy and the Environment"*, Megalia Foundation, Sorrento 2004..
10. G. Braccio, D. Matera, "La tecnologia della gassificazione delle biomasse lignocellulosiche", *Il sole a trecentosessanta gradi*, n°9 – ottobre 2004.