

RECUPERI TERMICI DA PROCESSI INDUSTRIALI PER PRODUZIONE DI POTENZA ELETTRICA: I SISTEMI ORC TURBODEN

R. Vescovo*

Sommario – Diversi processi industriali in settori altamente energivori sono fonte di calore di scarto a bassa temperatura che, se opportunamente convertito in energia elettrica per mezzo della tecnologia ORC, può tradursi in risorsa tecnica, economica ed ambientale.

HEAT RECOVERY FOR ELECTRIC PRODUCTION IN INDUSTRIAL PROCESSES: THE TURBODEN ORC SOLUTION

Summary – Many industrial processes lead to the production of heat streams that are often “wasted”. ORC technology can be the right solution to convert this heat in electricity, achieving economical and environmental benefits.

Parole chiave – efficienza energetica, recuperi termici, recupero da processo, cicli ORC, Turboden.

Keywords: Industrial Energy Efficiency, Heat Recovery, on site electricity production, ORC cycle, Turboden.

1. INTRODUZIONE

Alcuni processi industriali, specialmente in settori particolarmente energivori, sono caratterizzati da rilevanti quantità di calore di scarto che, inutilizzato, viene disperso nell'ambiente sottoforma di gas caldi.

Mentre la soluzione impiantistica più semplice, economica e redditizia – il recupero per fini termici – risulta essere spesso non perseguibile vista l'assenza di utenze termiche in grado di assorbire con continuità ingenti quantità di calore, la conversione in energia elettrica può oggi rappresentare la via migliore per valorizzare questi cascami di calore.

La positiva attitudine delle aziende industriali in settori energivori a realizzare impianti per il recupero di calore da processo per produzione elettrica si è però spesso scontrata, ed i pochi impianti ad oggi realizzati ne sono testimonianza, con barriere tecnologiche che imponevano la necessità di sorgenti termiche quanto più possibili costanti, a temperature medio-alte (sopra i 500 °C), ed in quantità tali da giustificarne i non trascurabili costi di gestione e manutenzione. Questi limiti tecnologici si traducevano poi in non redditizie fattibilità economiche nonché potenziali “distrazioni” delle risorse umane in attività non confacenti alle mission aziendali.

Oggi, grazie alla tecnologia ORC (Organic Rankine Cycle), le citate barriere tecnologiche sono state superate: il recupero di calore da fumi anche a temperature medio basse (sotto i 300 °C), con sorgenti poco costanti nel tempo e in quantità anche modeste (dell'ordine di alcuni megawatt termici) è un obiettivo tecnicamente ed economicamente raggiungibile.

Contestualmente allo sviluppo di soluzioni tecnologiche che consentono di superare le barriere appena menzionate, anche l'evoluzione del mercato dell'energia degli ultimi anni pone ora le basi economiche per il riutilizzo di questi cascami termici per la produzione di energia elettrica.

In aggiunta, la sempre crescente attenzione per l'ambiente, che alle volte si traduce in un freno per le attività industriali altamente energivore, può ora tramutarsi in un'ulteriore spinta che potrebbe consentire l'efficientamento di processi industriali e la conseguente riduzione di produzione di CO₂.

La realizzazione a livello macro di sistemi per recupero di calore e produzione di energia elettrica potrebbe inoltre rappresentare, in termini di “sistema”, un non trascurabile aiuto al raggiungimento degli ambiziosi obiettivi dell'Unione Europea sanciti dal pacchetto clima-energia 20-20-20. Dare una reale indicazione di tale potenzialità è l'obiettivo del progetto H-REII (Heat Recovery in Energy Intensive Industries), il primo progetto pilota a livello nazionale volto a mappare le potenzialità di recupero di calore in aziende altamente energivore mediante l'utilizzo della tecnologia ORC con taglie di generazione elettrica comprese tra 0,5 MWel e 5 MWel, avviato a Brescia nel corso del 2008 e cofinanziato dall'unione europea nell'ambito del progetto “LIFE+”.

Il presente articolo si propone di analizzare, dal punto di vista tecnico ed economico, l'applicazione di sistemi di recupero di calore da processo per produzione elettrica.

La soluzione impiantistica proposta prevede l'utilizzo, per la conversione del calore recuperato in energia elettrica, di Cicli Rankine a fluido Organico (ORC), caratterizzati da prestazioni nel complesso migliori rispetto ai tradizionali cicli a vapore in presenza di sorgenti termiche a bassa temperatura e/o di bassa potenzialità, oltre alla capacità di operare con input termici altamente variabili e alla bassa richiesta di personale/competenze per la loro gestione (sistemi completamente automatizzati).

Di tale tipologia di interventi di efficienza energetica sono illustrate le principali caratteristiche e problematiche sia dal punto di vista tecnico/energetico, che da quello economico, con l'obiettivo di dare indicazione agli operatori del settore riguardo la loro applicabilità.

2. CICLI ORC

I cicli ORC si basano su un ciclo Rankine chiuso, utilizzando come fluido di lavoro dei fluidi organici. Le unità ORC Turboden, tipicamente utilizzate nella cogenerazione da biomassa e recupero di calore [1], impiegano come fluido di lavoro dei poli-silossani; per applicazioni a bassa temperatura (geotermiche o recupero di calore), si preferisce invece l'utilizzo di fluidi refrigeranti o idrocarburi.

In Figura 1 sono rappresentati il ciclo termodinamico ed i principali componenti costituenti un impianto ORC.

* Riccardo Vescovo; Sales Manager Heat Recovery Department; Turboden Srl – Via Cernaia, 10 – 25124, Brescia – Tel. 030.3552001, e-mail: riccardo.vescovo@turboden.it.

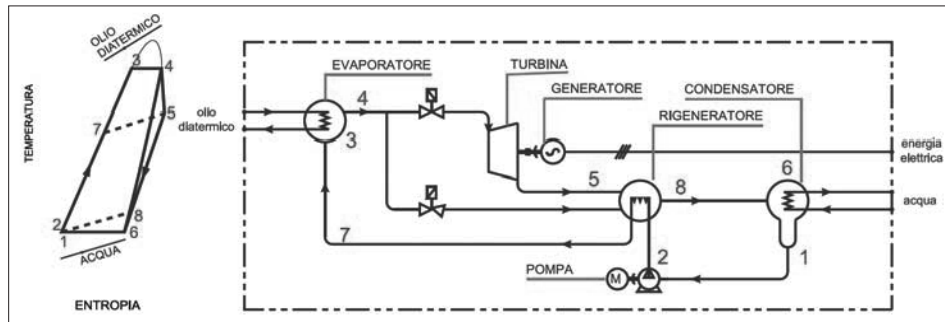


Fig. 1 – Ciclo termodinamico e componenti principali di un modulo ORC Turboden

Il fluido di lavoro è prima pre-riscaldato (7-3) e fatto evaporare (3-4) utilizzando il calore scambiato con la sorgente termica, quindi espanso in una turbina (4-5) direttamente accoppiata al generatore elettrico e infine riportato allo stato liquido in un condensatore (8-1) raffreddato ad acqua o ad aria. Il ciclo termodinamico viene infine chiuso riportando il fluido condensato alla pressione di evaporazione attraverso la pompa di alimento (1-2).

Nel caso di sorgenti termiche ad alta temperatura si aggiunge, a valle della turbina, un rigeneratore (scambiatore di calore) che permette di migliorare ulteriormente le prestazioni del ciclo (5-8, 2-7).

Rispetto alle tecnologie alternative (es. cicli a vapore), i principali vantaggi ottenuti con l'adozione di turbogeneratori di tipo ORC nel range 0,5 – 5 MWe sono:

- Alta efficienza della turbina (> 85%).
- Bassa sollecitazione meccanica della turbina, dovuta alla modesta velocità periferica.
- Basso numero di giri della turbina, tale da consentire il collegamento diretto del generatore elettrico alla turbina senza interposizione di riduttore di giri.
- Mancanza di erosione delle palette della turbina, dovuta all'assenza di formazione di liquido negli ugelli durante l'espansione.
- Alta efficienza del ciclo (specie in presenza di utilizzi cogenerativi).
- Lunga vita di tutti i componenti (superiore a 20 anni).
- Possibilità di funzionamento automatico senza supervisione.

Tali punti di forza possono tradursi in importanti vantaggi di tipo operativo quali:

- Procedure molto semplici di avviamento e fermata.
- Totale automatizzazione della gestione del modulo ORC.
- Ottime prestazioni a carichi parziali (minimo tecnico pari al 10% della potenza nominale, pronta risposta ai transitori).
- Necessità di personale per la gestione e manutenzione modulo molto contenute (mediamente ca. 3/5 ore a settimana).
- Alta affidabilità e disponibilità (> 98 %).
- Funzionamento silenzioso.

3. RECUPERO TERMICO

La disponibilità di calore sfruttabile nei recuperi termici consiste tipicamente in un flusso di gas caldi, meno frequente-

mente sotto forma di liquidi. Lo scambio di calore può avvenire direttamente tra la fonte termica e il fluido di lavoro, o indirettamente. Nel caso di recupero di calore da effluenti gassosi, la fonte termica primaria non è in genere direttamente accoppiata con il fluido di lavoro: il calore recuperato viene infatti solitamente trasferito al ciclo per mezzo di un vettore termico (quali olio diatermico, acqua pressurizzata o vapore; cfr Figura 2). Nel caso di recupero di calore da effluenti liquidi, similmente alle applicazioni geotermiche, si ha lo scambio diretto fra la sorgente di calore primaria ed il fluido di lavoro del ciclo ORC.

Considerata la primaria importanza dei processi produttivi ai quali viene applicato il recupero termico, lo schema d'impianto prevede in genere l'inserimento del recuperatore in 'bypass'. Qualora ci fossero dei guasti che rendessero indisponibile il sistema di recupero, con questo schema è possibile bypassare il recuperatore ed il modulo ORC utilizzando la linea fumi originale per l'evacuazione dei gas caldi al camino. Il ciclo ORC ed il recuperatore sono progettati per rispondere in automatico ad ogni variazione di portata e temperatura della fonte termica e, se necessario, operare lo scollegamento dalla rete elettrica e lo spegnimento in completa sicurezza dell'intero sistema.

I moduli ORC Turboden sono standardizzati per applicazioni a media e alta temperatura (> 250 °C); se la sorgente termica è a bassa temperatura (< 250 °C), in funzione della taglia d'impianto è possibile impiegare dei moduli standard da 280 kWe (ORC "Pure Cycle[®]" prodotto da Pratt&Whitney, società americana socio di maggioranza Turboden) o, per taglie maggiori, ricorrere a soluzioni studiate 'ad hoc' da Turboden. I sistemi standard prodotti da Turboden utilizzano come fluido di lavoro dei poli-silossani e sono disponibili in un range di potenza 0,4 – 3 MWe. Il calore viene trasferito dalla fonte termica al ciclo ORC tramite l'utilizzo di olio diatermico o vapore saturo a bassa pressione; l'efficienza elettrica di questi moduli è influenzata dalla temperatura della sorgente calda e della sorgente fredda, e può variare nel range 19-25%.

L'ORC "Pure Cycle[®]", prodotto dalla consociata americana Pratt&Whitney e distribuito in Europa da Turboden, utilizza sorgenti termiche a bassa temperatura (da ca. 90 a ca. 150 °C) ed ha una potenza elettrica nominale di 280 kWe. I moduli Turboden realizzati 'ad hoc' per i recuperi a bassa temperatura producono tra 0,5 e 5 MWe.

Sia i moduli "Pure Cycle[®]", che i moduli ORC per basse temperature, sono caratterizzati dall'utilizzo di fluidi di lavo-

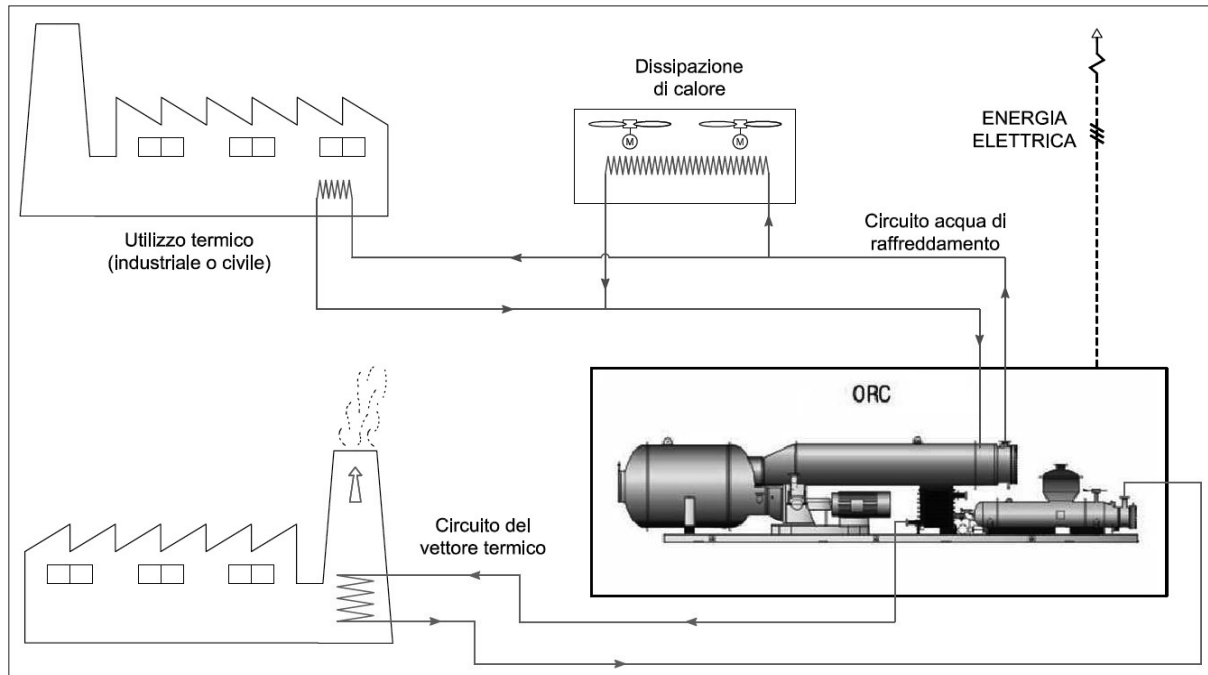


Fig. 2 – Esempio di sistema di recupero calore da processo industriale

ro appartenenti alla famiglia dei refrigeranti. Questi, utilizzati normalmente nell'ambito degli impianti frigoriferi, oltre a vantaggi di natura termo-fluido dinamica, presentano i molteplici vantaggi della non infiammabilità, bassa/nulla tossicità ed impatto ambientale. In questi sistemi lo scambio di calore è in genere diretto tra la sorgente termica ed il fluido di lavoro, mentre l'efficienza elettrica può variare (sempre in funzione della temperatura della sorgente calda e fredda) nel range 6-18%.

4. SETTORI INDUSTRIALI DI INTERESSE

Il recupero termico per la produzione di energia elettrica può avere un impatto importante in molti settori energivori, contribuendo in modo significativo alla riduzione dei consumi ed all'aumento di efficienza dell'intero processo produttivo [2, 3]. Segue una breve descrizione dei processi industriali ove l'applicazione della tecnologia ORC risulta più interessante, con una stima del potenziale impatto che l'impiego di tali sistemi potrebbe avere sul sistema energetico italiano.

A. Cemento [2]

Il processo di produzione del cemento è caratterizzato da una notevole disponibilità di calore di scarto a medio/bassa temperatura che, malgrado tutte le soluzioni impiantistiche utilizzate, non può essere completamente utilizzato.

Le fonti di calore disponibili sono generalmente due:

- Gas di combustione del forno (a valle del preriscaldamento delle materie prime), con temperature nell'ordine dei 250-400 °C
- Aria di raffreddamento del clinker, a temperature più basse (< 300 °C).

Le potenziali difficoltà tecniche legate alla polverosità dei gas sono state risolte da anni: si consideri come il recupero di ca-

lore dal processo di produzione del cemento sia una applicazione diffusissima, sin dagli anni '80, in tutto il Far East (in Giappone, Cina, Indo-Cina e India ci sono oltre 1.000 MWE installati). I processi produttivi di tali paesi sono però caratterizzati, rispetto al caso italiano, da basse efficienze del processo produttivo ossia da una maggiore disponibilità di calore recuperabile e quindi da taglie di impianto maggiori: quindi, oltre ad essere una soluzione più conveniente dal punto di vista economico, la tecnologia più diffusa è quella tradizionale dei cicli a vapore.

In Italia si stima che la produzione di clinker richieda in media circa 1,15 MWht di energia termica e circa 0,15 MWh di energia elettrica per tonnellata di clinker prodotto [ref: BAT Cement]. L'adozione di impianti a recupero basati su ORC consentirebbe di utilizzare la quota di calore scaricata a bassa temperatura (200-300 °C).

Considerata una produzione di cemento di 47 Mt/anno [4] e una produttività di energia da parte degli impianti a recupero che è stimata in 10-20 kWh per tonnellata di clinker prodotta, il potenziale di recupero per il solo panorama nazionale corrisponderebbe a quasi 1 TWh/anno di energia elettrica.

Ipotizzando un ragionevole livello di penetrazione della tecnologia nel medio termine, pari al 30% del parco produttivo italiano, si potrebbe nell'ordine:

- Realizzare una trentina di impianti di recupero calore.
- Produrre 350 GWh/anno di energia elettrica.
- Risparmiare 70.000 tep/anno di energia termica.
- Ridurre le emissioni di CO₂ per una quota corrispondente a 35.000 t/anno.
- Generare un fatturato dovuto alla sola fornitura degli impianti che è stimabile in 150 M€.
- Ridurre i costi di energia elettrica per il settore di oltre 35 M€/anno.

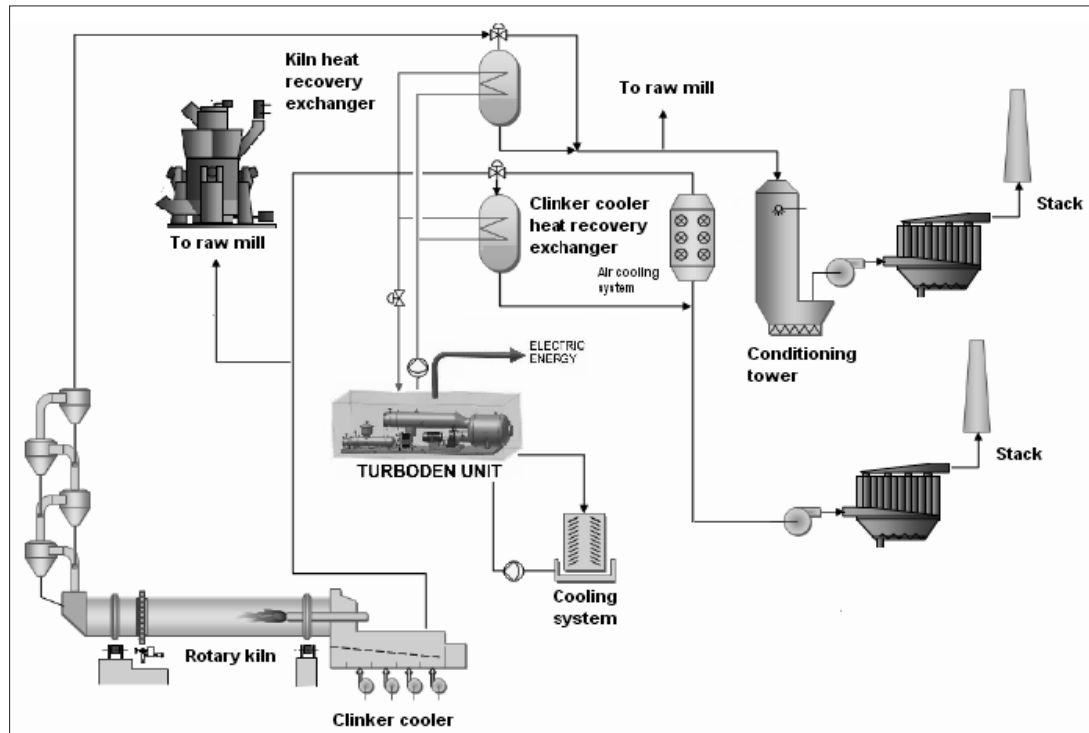


Fig. 3 – Schema di flusso semplificato di sistema di recupero in cementificio tramite un modulo ORC Turboden

B. Siderurgia [2]

La produzione di materiali ferrosi presenta buone possibilità di intervento in termini di recupero termico.

Energia termica può essere ottenuta con uno scambiatore di calore che recupera calore da:

- Fumi di processo con basso tenore di polveri: frutto della combustione di gas naturale in forni o trattamenti termici, disponibili a medio/bassa temperatura.
- Fumi di acciaieria/fonderia con alto tenore di polveri: originati dalla fusione del metallo, disponibili a medio/alta temperatura.

I processi produttivi sono meno standardizzati rispetto all'industria del cemento; soluzioni affidabili di recupero (realizzate 'ad hoc') sono utilizzate nei più svariati processi (laminatoi, trattamenti termici etc). Ciò avviene generalmente per fumi con basso tenore di polveri, a media temperatura ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) e quando non in conflitto con altri potenziali interventi per l'aumento di efficienza del processo (p. es. pre-riscaldamento aria comburente).

Più difficile può essere operare su fumi provenienti da acciaieria o fonderia, dove ad una maggiore potenzialità (ma anche complessità tecnologica richiesta) dovuta all'alta temperatura si contrappongono problemi legati a: contenuto di polveri, notevoli variazioni di temperatura e portata dei fumi e vincoli ambientali sulle emissioni.

La stima dei consumi di energia per singola tonnellata di materiali ferrosi prodotta o lavorata è di 1,25 MWh di energia termica e di 0,25 MWh di energia elettrica [ref: BAT Steel]. La produzione nazionale [5] di materiali ferrosi è stimabile in 36 Mt/anno per quanto riguarda la siderurgia primaria alle quali vanno aggiunte 25 Mt/anno laminate a caldo e 8 Mt/anno laminate a freddo.

L'energia recuperabile è quantificata dall'autore nell'ordine dei 30-50 kWh per tonnellata di materiale prodotta/lavorata. Con una potenzialità di 3 TWh/anno di produzione di energia elettrica, anche ipotizzando un tasso di penetrazione dei recuperi termici molto conservativa, l'impatto a livello nazionale sarebbe paragonabile (se non superiore) a quello nel settore cementifero.

C. Vetro [2]

La produzione di vetro è sicuramente un'altra potenziale candidata all'applicazione dei sistemi a recupero termico. Dal punto di vista tecnico, la disponibilità di gas provenienti dalla fusione del vetro ad alte temperature ($400\text{-}600\text{ }^{\circ}\text{C}$) può garantire alte efficienze elettriche, nell'ordine del 25%.

Si stima che l'energia (termica ed elettrica) mediamente richiesta per la produzione di una tonnellata di vetro (per impianti industriali) sia intorno a 1-1,5 MWh/t [ref: BAT Glass]. Della totale energia fornita, mediamente ca. il 20 % è la frazione che viene persa nei gas di scarico. Da qui si stima che l'energia elettrica recuperabile sia nell'ordine dei 30-45 kWh per tonnellata di vetro prodotto. La produzione nazionale di vetro [6] è stimabile in 1 Mt/anno di vetro piano, 3,8 Mt/anno di vetro cavo e ca. 0,5 Mt/anno di altri prodotti (filati, cristalli, tubi, etc.).

Con una potenzialità di 200 GWh/anno di produzione di energia elettrica, anche il recupero energetico da questo settore industriale potrebbe portare a risultati non trascurabili in ambito nazionale.

D. Altri settori industriali

In aggiunta è possibile citare altri settori industriali nei quali il recupero di calore può risultare interessante: petrol-chimici,

Tab. 1 – Confronto caratteristiche tecniche generali tra sistema ORC e sistema a vapore per recupero da gas di scarico di motore Diesel

	ORC	VAPORE
Temperatura uscita gas processo [°C]	160	180
Potenza elettrica netta generata [kW]	1127	1061
Pressione di evaporazione [bar]	10	15
Pressione di condensazione [bar]	0,12	0,07
Salto entalpico [kJ/kg]	105	905
Titolo vapore a fine espansione	1 – surr.	0,92
Numero di stadi turbina	3	5

produzione di materiali non-ferrosi, ceramiche, incenerimento. In generale, la tecnologia ORC consente il recupero di calore da qualunque processo industriale dove la potenza termica di scarto disponibile sia superiore ai 3 / 5 MWt, traducibile in un consumo annuo nell'ordine di 20 MSm³ di gas naturale (o in alternativa 15 Mt di carbone).

5. ASPETTI TERMODINAMICI ED IMPIANTISTICI

I cicli ORC presentano un intrinseco vantaggio, rispetto ai tradizionali sistemi a vapore, di non utilizzare un unico fluido di lavoro, ma il fluido che meglio si accoppia alla temperatura ed alla capacità termica della fonte di calore.

A titolo di esempio, in Figura 4 vengono comparati (in diagrammi T-Q) un ciclo ORC ed un ciclo tradizionale a vapore per il recupero dai gas di scarico di un motore Diesel. Il confronto è stato effettuato a parità di superficie di scambio, temperatura di condensazione e rendimento in turbina. Come si può notare in figura, la possibilità di scegliere il fluido di lavoro consente di ottimizzare il ciclo di recupero e massimizzare la potenza elettrica recuperata.

In particolare, nel caso studiato si può evidenziare come lo specifico ciclo ORC ipotizzato consenta, a differenza del vapore, d'introdurre nel ciclo stesso una maggiore quantità di calore e porti quindi ad ottenere i risultati riassunti in tabella 1. In questa tabella sono riportati i dati salienti dei due cicli di recupero rappresentati in Figura 4: come si nota, le caratteristiche del fluido organico di lavoro consentono l'ottimizzazione del ciclo di recupero e, conseguentemente, di aumentare la potenza elettrica prodotta. È inoltre ragionevole ipotizzare, tenendo conto degli altri parametri di ciclo, che il rendimento della turbina per il caso dell'ORC sia ca. il 10 % superiore rispetto al caso del vapore; ciò porterebbe ad un ulteriore miglioramento nella comparazione della produzione elettrica.

Altro vantaggio legato all'impiego di un fluido di lavoro organico ad alta massa molecolare (per taglie di potenza dell'ordine di 1 MWe) sta nella possibilità di massimizzare il rendimento della turbina a basse velocità di rotazione della stessa (p. es. a 3000 giri): questo comporta il doppio vantaggio di

ridurre lo stress meccanico della turbina (basse velocità) e consentire l'accoppiamento diretto tra turbina e generatore elettrico [7]. Diversamente, utilizzando acqua come fluido di lavoro, il massimo rendimento della turbina si ottiene per velocità maggiori comportando più rilevanti stress meccanici e la necessità di riduttori di giri per l'accoppiamento al generatore elettrico.

Per i recuperi a bassa temperatura è possibile ottimizzare sia lo scambio termico, che l'espansione in turbina, utilizzando fluidi che presentino una temperatura di ebollizione più bassa dell'acqua, quali sono in genere gli idrocarburi o i refrigeranti. Un ulteriore vantaggio dei cicli ORC rispetto ai sistemi tradizionali a vapore sta nel fatto di evitare, in qualsiasi condizione di funzionamento, la condensazione del fluido motore in fase di espansione (condizione di vapore secco): ciò è dovuto alla caratteristica forma della curva di equilibrio liquido-vapore, che, in un diagramma T-S, per i fluidi organici presenta il ramo di destra con pendenza positiva (curva "a pinna"), mentre, per l'acqua, essa risulta ne-

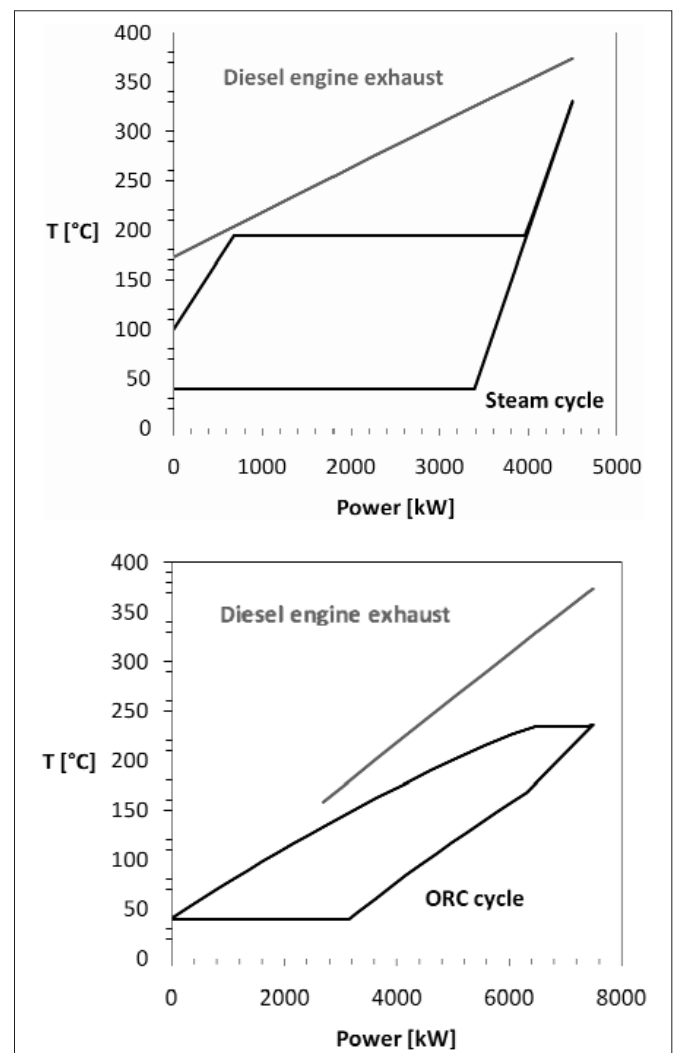


Fig. 4 – Confronto tra diagrammi T-Q per ciclo ORC (a scambio diretto) e ciclo tradizionale a vapore

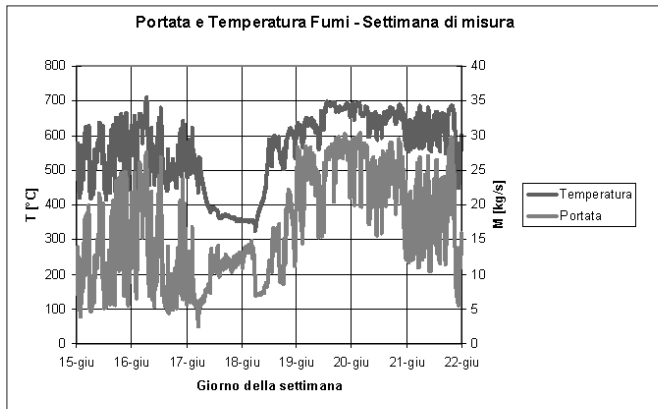


Fig. 5 – Variazioni di portata e temperatura dei gas esausti in uscita da un processo di laminazione a caldo

gativa (curva “a campana”). Per ovviare al rischio di condensazione in fase di espansione (che porta all’erosione di palette e cassa turbina, oltre ad altri fenomeni di corrosione), nei cicli tradizionali a vapore si ricorre al surriscaldamento: nella gestione della macchina di potenza è importante che la qualità del vapore (pressione e temperatura) risponda a fissati parametri, con la conseguente difficoltà gestionale nel caso di sorgenti termiche variabili in temperatura e portata.

In Figura 5, a titolo di esempio, vengono riportati i risultati di una campagna di misura di una settimana dei parametri temperatura e portata di gas caldi in uscita da un processo siderurgico.

Come è possibile notare, le variazioni operative nel processo produttivo si traducono in forti oscillazioni nelle caratteristiche nella sorgente di calore di scarto. Per rispondere a questo tipo di variazioni è necessario che il sistema di recupero calore sia flessibile, si adatti automaticamente ed in breve tempo ai diversi carichi di lavoro ed abbia buoni rendimenti anche a carico parziale: il ciclo ORC, a differenza di un sistema tradizionale a vapore, nel quale l’accurata gestione della qualità del vapore immesso in turbina è critica, consente di raggiungere pienamente questi obiettivi.

6. ASPETTI ECONOMICI

Un sistema di recupero di calore è simile ad un impianto ad energia rinnovabile nel fatto di non implicare un diretto consumo di combustibili di origine fossile (l’installazione del sistema di recupero di calore non richiede ulteriore consumo di combustibile fossile).

La fattibilità economica è quindi influenzata in prevalenza dai costi di investimento e dalla valorizzazione dell’energia elettrica, senza alcuna dipendenza diretta dai costi dei combustibili. Nella redazione di uno studio di fattibilità l’aspetto più critico risulta quindi essere la stima dei costi di investimento, che diviene ancor più variabile quando l’intervento di realizzazione dell’impianto avviene su di un sistema industriale già esistente.

Tab. 2 – Esempi di business plan per alcuni sistemi di recupero calore in cementifici, vetrerie e siderurgie. [3]

Settore industriale	Cementifici	Vetriere (vetro piano)	Siderurgia (forni riscaldamento)	U. d. M.
Sorgente di calore	Gas del forno e clinker cooler	Gas esausti dal forno	Gas esausti dal forno di riscaldamento laminatoio	
Capacità produttiva impianto	2.500	500	6.000	tpd
Costo Energia elettrica 1	0,09	0,095	0,06	€/kWh
Energia termica recuperata dai fumi 2	12,0	5,0	13,0	MW
Potenza termica a sistema ORC	11,0	4,7	13,0	MW
Potenza termica per fini termici	1,0	0,3	0	MW
Potenza elettrica netta ORC	1,6	1,0	2,4	MW
Energia netta prodotta ORC4	12.800	8.000	19.200	MWh/y
CAPEX				
Costo ORC	1,8	1,3	2,4	m€
BOP 3	2,6	1,1	1,5	m€
Costo totale (+ 10 % project management)	4,8	2,6	4,3	m€
Flussi di cassa annuali 4				
OPEX	-€ 40.000	-€ 40.000	-€ 40.000	€/y
Ricavi – Energia Elettrica	€ 1.152.000	€ 760.000	€ 1.152.000	€/y
Ricavi – Energia termica 5	€ 240.000	€ 72.000	€ 0	€/y
Flusso di cassa netto	€ 1.352.000	€ 792.000	€ 1.112.000	€/y
Risultati 6				
PBT	4,0	3,7	4,4	
IRR (10 anni)	25%	27%	23%	
NPV (10 anni)	€ 5.333.000	€ 3.310.000	€ 4.092.000	
Emissioni CO ₂ evitate	7 9.664	5.520	12.096	t/y

Note: 1 – Valore che include eventuali incentivazioni presenti.
 2 – Ipotizzando di raffreddare i gas fino a ca. 160 °C.
 3 – Inclusi scambiatori di recupero di calore e stima opere civili – stime realizzate con fornitori referenziati.
 4 – Ipotizzando 8.000 ore di funzionamento / anno.
 5 – Assumendo valorizzazione energia termica di 0.03 €/kWh.
 6 – Ipotizzando un tasso di sconto del 5 %.
 7 – Ipotizzando 0.63 kg di CO₂ per kWh elettrico e 0.2 kg di CO₂ per kWh termico.

Per determinare caratteristiche tecniche e costi del modulo ORC, è necessario avere dati precisi basati su audit energetici approfonditi, supportati da opportune campagne di misura. Oltre alla tipologia di fluido sul quale si vuole applicare il recupero, ne devono essere note in dettaglio la portata e la temperatura, incluse le variazioni che possano subire in funzione dell’assetto produttivo. Importante è anche la definizione del più conveniente sistema di raffreddamento (ad acqua o ad aria), tenendo conto dei vincoli del caso.

Un dimensionamento ed una stima di costo riguardanti il recuperatore di calore richiede poi dettagli specifici sulla natura della sorgente di calore (effluente gassoso o liquido) quali:

- la sua composizione chimica;
- l’eventuale contenuto di inquinanti (polveri e composti chimici aggressivi);

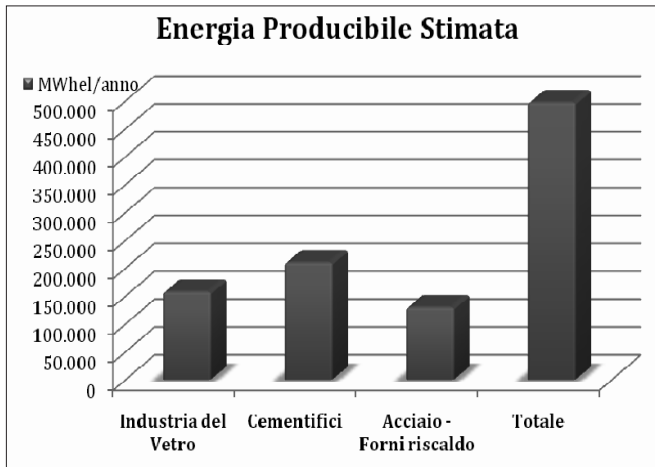


Fig. 6 – Stima energia producibile in Italia nei 3 settori investigati

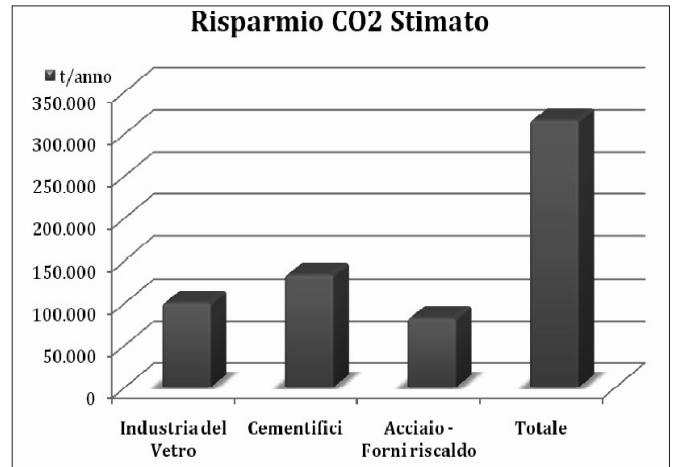


Fig. 7 – Stima CO₂ risparmiabile in Italia nei 3 settori investigati

- la necessità di mantenerlo in determinati intervalli di temperature (ad esempio per la filtrazione o per evitare il manifestarsi di fenomeni incrostanti / corrosivi).

In funzione di queste caratteristiche è possibile definire la tipologia, superfici e geometria di scambio, e, di conseguenza, il costo.

Altro fattore importante è l'impatto in termini di layout che l'impianto di recupero può avere sul processo produttivo: la modifica delle linee esistenti è in alcuni casi particolarmente onerosa, specialmente nel caso sussistano problematiche legate alla disponibilità di spazi e/o all'accessibilità agli impianti.

I costi di impianto che ne rendono conveniente la realizzazione non dovrebbero superare idealmente i 3.000 €/kW. Prezzo dell'energia elettrica, ore di funzionamento dell'impianto (superiori almeno alle 5.000 h/anno) e le aspettative sui tempi di ritorno dell'investimento (nell'ordine dei 5-7 anni) sono i fattori determinanti per la scelta definitiva.

In aggiunta al risparmio di energia elettrica, la realizzazione di un impianto di auto-produzione determina (a prescindere della tecnologia) altri benefici che possono dare, seppur indirettamente, un ulteriore ritorno economico. Un esempio concreto è dato dalla riduzione dei picchi di potenza prelevata dalla rete elettrica: questo parametro ha un suo peso nella determinazione del prezzo dell'energia acquistata sul mercato (componente trasporto).

Si consideri poi come, a livello nazionale, qualunque intervento di efficienza energetica sia incentivato tramite il meccanismo dei TEE (titoli di efficienza energetica, noti anche come Certificati Bianchi). L'impatto dei TEE non è quasi mai determinante nella scelta dell'investimento, ma può contribuire nell'aumentare il margine operativo del progetto di un 5%-10% circa, riducendone conseguentemente i tempi di pay-back.

I ritorni in termini di immagine e la possibilità di indicare nel bilancio ambientale sia l'energia risparmiata che le mancate emissioni di CO₂, dovrebbero infine avere una certa rilevanza per tutti quei soggetti industriali per i quali la responsabilità sociale di impresa è tenuta in considerazione.

A livello di sistema, si vuole sottolineare come la generazione distribuita, qual è quella derivante da recuperi termici (che

porta ad un autoconsumo elettrico piuttosto che ad una immissione di energia in rete), genera vantaggi:

- Economici, per la diminuzione della dipendenza da fonti fossili e la conseguente riduzione dei costi di produzione del parco termoelettrico.
- Di rete, sulle perdite e l'impegno di potenza delle linee.
- Ambientali, dovuti alla totale assenza di emissioni di sostanze inquinanti.

7. PROGETTO HREII

Gli obiettivi ambiziosi dell'Unione Europea sanciti dal pacchetto clima-energia 20-20-20 (riduzione del 20% delle emissioni di gas serra, aumento dell'efficienza energetica del 20% e raggiungimento della quota del 20% di fonti di energia alternative) hanno ormai attivato una serie di azioni nei paesi membri volte all'ottenimento dei risultati auspicati. Tra le azioni di efficienza energetica un ruolo rilevante può sicuramente essere ricoperto dalle industrie altamente energivore, nelle quali è possibile, a fronte di interventi numericamente limitati e ben definiti, ottenere risultati di rilievo.

Il Piano d'Azione Italiano per l'Efficienza Energetica, redatto nel 2007 dal Ministero dello Sviluppo Economico, menziona, tra le azioni possibili, i recuperi di effluenti in aziende altamente energivore senza quantificarne i potenziali risparmi ottenibili, a causa della difficoltà di standardizzazione delle applicazioni e della tecnologia da utilizzare. Il settore del recupero effluenti da processo è infatti caratterizzato da una molteplicità di possibili applicazioni con differenti soluzioni impiantistiche e tecniche, finalizzate al recupero per usi termici, alla valorizzazione elettrica o ad entrambe.

Nel corso del 2008 viene avviato a Brescia il primo progetto pilota a livello nazionale (H-REII Heat Recovery in Energy Intensive Industries), volto a mappare le potenzialità di recupero di effluenti in aziende altamente energivore (cementifici, industrie del vetro, siderurgie, alluminio e non ferrosi, trattamenti termici, industria chimica, raffinerie oil&gas, agroindu-

stria, tessile, cartario) mediante l'utilizzo della tecnologia ORC (Organic Rankine Cycle) con taglie comprese di generazione elettrica tra 0,5 MWel e 5 MWel.

I partner di progetto AIB Associazione Industriale Bresciana, CSMT Centro Servizi Multisetoriale e Tecnologico, FIRE, Provincia di Brescia, Università degli Studi di Brescia – dip. Ing. Meccanica e Turboden, grazie alla disponibilità di circa 110 audit energetici effettuati in Italia ed Europa, ed una analisi delle quote assegnate dai Piani Nazionali di assegnazione (ETS) hanno stimato, in via preliminare, il potenziale di recupero energetico in 3 settori dei 10 investigabili.

La stima, ritenuta di carattere prudenziale, relativa a cementifici, industrie del vetro, siderurgie (limitatamente ai forni di riscaldamento) rileva un potenziale italiano di almeno 500 GWh annui di energia elettrica risparmiabili (circa 93.000 tep/annui), pari al 7% del risparmio energetico complessivo stimato per il settore industriale italiano atteso al 2010 e oltre 316.000 ton di CO₂ / annue evitate.

Lo studio evidenzia, nei 3 settori già investigati, le potenzialità di recupero, le attuali tecnologie utilizzate (BAT – Best Available Technologies) a livello mondiale e una stima degli investimenti necessari. Le considerazioni generali emerse sono:

- Le applicazioni di recupero di effluenti con tecnologia ORC sono tecnicamente realizzabili.
- Le potenzialità di diffusione di questi sistemi di generazione distribuita di piccola taglia sono molto elevate e replicabili in Europa e nel mondo.
- L'Italia (con Turboden) è attualmente leader europeo nella tecnologia ORC con enorme potenzialità di consolidamento dell'attuale filiera.
- I pay-back time sono spesso ritenuti dall'investitore troppo lunghi (6-8 anni in media in assenza di incentivazioni sono ben oltre le aspettative dei 4-5 attesi).
- Gli attuali incentivi (Titoli di Efficienza Energetica) per queste applicazioni non sono standardizzati e non contribuiscono efficacemente ad attivare gli investimenti a causa del loro scarso valore economico.

8. CONCLUSIONI

I sistemi di recupero calore da processo industriale per mezzo di sistemi ORC sono una soluzione tecnicamente fattibile ed economicamente remunerativa sia per i beneficiari degli interventi, che per gli operatori del settore. Dal punto di vista ambientale, questa tipologia di interventi potrebbe rappresentare una soluzione valida per raggiungere gli obiettivi nazionali e comunitari sanciti dal pacchetto clima-energia 20-20-20.

Quanto illustrato per i recuperi termici in ambito industriale vuole mettere in evidenza quali e quante opportunità rimangono oggi ancora inesplorate. I soggetti industriali, che sono per vocazione concentrati nello sviluppare e migliorare i propri processi produttivi, possono ora anche mirare all'implementazione di sistemi che migliorano l'efficienza energetica dei processi stessi. Anche se dal punto di vista meramente economico-finanziario questi sistemi di recupero calore risultano essere – per l'investitore privato – meno redditizi di altri le-

gati direttamente all'aumento della produttività / capacità del processo industriale, una visione più ampia che tiene conto dei vantaggi ambientali, unitamente all'aiuto finanziario che possono fornire società specializzate tipo ESCO, costituirebbe una giusta risposta alle necessità di ridurre gli sprechi energetici e le emissioni di CO₂.

Come dimostrano gli oltre 120 impianti ORC Turboden ad oggi in funzione, la tecnologia ORC – grazie alla sua capacità di recuperare calore a basse temperature anche per relativamente piccole taglie d'impianto, unitamente alla buona efficienza elettrica ed all'alta flessibilità, oltre alle minime necessità per la sua gestione e manutenzione – può costituire la soluzione tecnologica ideale per un'efficace e remunerativa implementazione di sistemi di recupero di calore da processi industriali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] **R. Bini, E. Manciana:** “Organic Rankine Cycle Turbogenerators for combined heat and power production from biomass”, Proceedings of the 3rd Munich Discussion meeting 1996, ZAE Bayern Munich, Germany, 1996.
- [2] **R. Vescovo, N. Palestra:** “Applicazione di Cicli ORC a Recupero Termico da Processi Industriali” Conferenza AEIT, Catania, 27-29 Settembre 2009.
- [3] **R. Vescovo:** “Turboden ORC Power Plants for Industry Heat Recovery: Generation from Waste Heat Streams, Cogeneration & On-site Power Production Magazine, Marzo 2009.
- [4] **AITEC:** “Relazione annuale 2008”.
- [5] **ISTAT:** “La Produzione dell'Industria Siderurgica, anno 2006-2007”.
- [6] **Assovetro:** “Dati di produzione 2008”, <http://www.assovetro.it>.
- [7] **G. Angelino, M. Gaia e E. Macchi:** “A review of Italian activity in the field of Organic Rankine Cycles”, Proceedings of international VDI-Seminar, Zurich, 1984.
- [8] **M. Baresi:** “Report preliminare sulle potenzialità di recupero di effluenti per valorizzazione elettrica mediante sistemi ORC a livello Nazionale” Progetto LIFE08 ENVIT 000422 Sviluppo di politiche e azioni innovative per la riduzione delle emissioni di CO₂ mediante la valorizzazione degli effluenti di processo in Industrie Altamente Energivore ACRONIMO H-REII, www.hreii.eu.

CURRICULUM

Riccardo Vescovo – Master MBA presso CIMBA / University of Kansas, laurea in Chimica Industriale presso Cà Foscari – Venezia. Dal 2005 impiegato in Turboden, dove si occupa a livello commerciale dell'applicazione di moduli ORC per il recupero di calore di processo ed in piccoli cicli combinati.