

Applicazione di Cicli ORC a Recuperi Termici da Processi Industriali

Nicola Palestra*, Riccardo Vescovo**

*E.ON Energia SpA, **Turboden Srl

*nicola.palestra@eon.com, **riccardo.vescovo@turboden.it

Riassunto -

Oggetto dell'articolo sono gli impianti a recupero termico (WHRS) basati su cicli ORC. L'applicazione di questa tecnologia a processi industriali consente di produrre energia in modo efficiente anche con fonti termiche variabili e/o a bassa temperatura.

Parole chiave – Efficienza energetica, recuperi termici, WHRS, cicli ORC, E.ON, Turboden

I. INTRODUZIONE

I cicli produttivi di molti settori energivori sono intrinsecamente caratterizzati da notevoli quantità di energia termica di scarto contenuta nei fumi di processo. Malgrado parte dell'energia contenuta nei fumi sia riutilizzata per mezzo di ottimizzazioni di processo, difficoltà legate alla loro composizione (p. es. siderurgici), alla bassa temperatura (p. es. cementieri), o alla ciclicità del processo produttivo riducono la economicità del recupero della mera energia termica. L'evoluzione del mercato dell'energia negli ultimi anni ha contestualmente posto le basi economiche per il riutilizzo di questi cascami termici per la produzione di energia elettrica.

Il presente articolo ha come oggetto lo studio di impianti WHRS (Waste Heat Recovery System) che recuperino il calore dai fumi di processo ai fini della produzione di energia 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 superiori rispetto ai tradizionali cicli a vapore in presenza di sorgenti termiche a bassa temperatura e/o di bassa entità, 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.

E.ON è uno dei più grandi gruppi energetici privati al mondo, fornisce energia a più di 30 milioni di clienti generando 86,7 miliardi di euro di fatturato. In Italia, con una capacità produttiva pari a circa 6,1 GW, E.ON si posiziona tra i leader del mercato italiano dell'energia.

E.ON Energia è la società di vendita del Gruppo E.ON che fornisce energia elettrica e gas naturale in Italia a più di 800.000 clienti residenziali e aziende. E.ON oltre alla fornitura di energia elettrica e gas offre servizi di efficienza energetica in Italia e nei più importanti mercati elettrici europei. Propone ai propri clienti sia nel settore industriale, che nel terziario, attività di auditing, telemetering dei consumi, valutazioni di power quality; è disponibile inoltre a valutare interventi 'ad hoc' in alcuni macro-settori nei quali è possibile operare degli efficientamenti (ad es. motori elettrici, illuminazione, etc).

Turboden è una società italiana che da 30 anni progetta, costruisce, installa e provvede alla manutenzione di turbogeneratori basati sul Ciclo Rankine Organico per la produzione combinata di energia elettrica e calore da fonti rinnovabili (biomassa, solare, geotermia) e recupero di calore di scarto nell'industria. Dal luglio 2009 l'americana Pratt&Whitney Power Systems detiene quota di maggioranza di Turboden Srl. Pratt & Whitney è una società del gruppo UTC (United Technologies Corporation, sigla UTX presso NYSE) leader mondiale nella progettazione e costruzione di motori aeronautici, sistemi di propulsione spaziale e turbine a gas industriali.

E.ON e Turboden collaborano in vari progetti energetici; in particolare E.ON, tramite la consociata Evonik, ha realizzato due impianti cogenerativi con moduli ORC Turboden alimentati a biomassa in Germania. Inoltre E.ON e Turboden sono partner all'interno del progetto LowBin [1], co-finanziato dall'UE, che ha lo scopo di dimostrare la fattibilità tecnico/economica nella produzione di energia elettrica da fonte geotermica a bassissima temperatura. All'inizio di Luglio '09 è stata avviata una unità dimostrativa presso la rete di tele-riscaldamento geotermica di Simbach (Germania): un modulo ORC Turboden da ca. 200 kW che sfrutta il calore disponibile a bassa temperatura in eccesso durante il periodo estivo.

II. 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 [2], impiegano come fluido di lavoro dei poli-silossani; per applicazioni a bassa temperatura (geo-termiche 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.

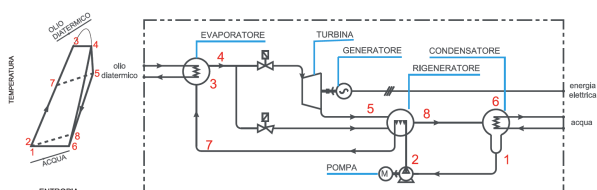


Figura 1: Ciclo termodinamico e componenti principali di un modulo ORC Turboden.

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 (5-6) 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 (diversamente dalle macchine a vapore non è necessaria la presenza del fuochista patentato).

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.

III. APPLICAZIONE AI RECUPERI TERMICI

La disponibilità di calore sfruttabile nei recuperi termici consiste tipicamente in un flusso di gas caldi, meno frequentemente 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). 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 by-passare 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 lavoro 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%.

IV. 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 [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

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 calore 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 MWh 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.

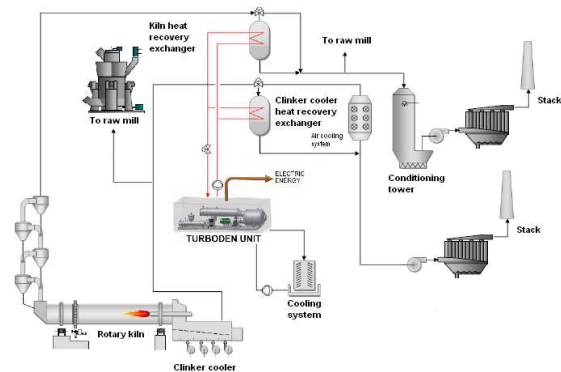


Figura 2: Schema di flusso semplificato di sistema di recupero in cementeria tramite un modulo ORC Turboden.

B. Siderurgia

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

Energia termica può essere ottenuta da:

- Fumi di processo 'puliti': frutto della combustione di gas naturale in forni o trattamenti termici, disponibili a medio/bassa temperatura
- Fumi di acciaieria/fonderia 'sporchi': 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 puliti, a media temperatura (> 400 °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 sporchi, 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 dagli autori 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 cementiero.

C. Vetro

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 (400-600 °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: petrolchimici, 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).

V. 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 3 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 scegliere il fluido di lavoro consente di ottimizzare il ciclo di recupero e massimizzare la potenza elettrica recuperata.

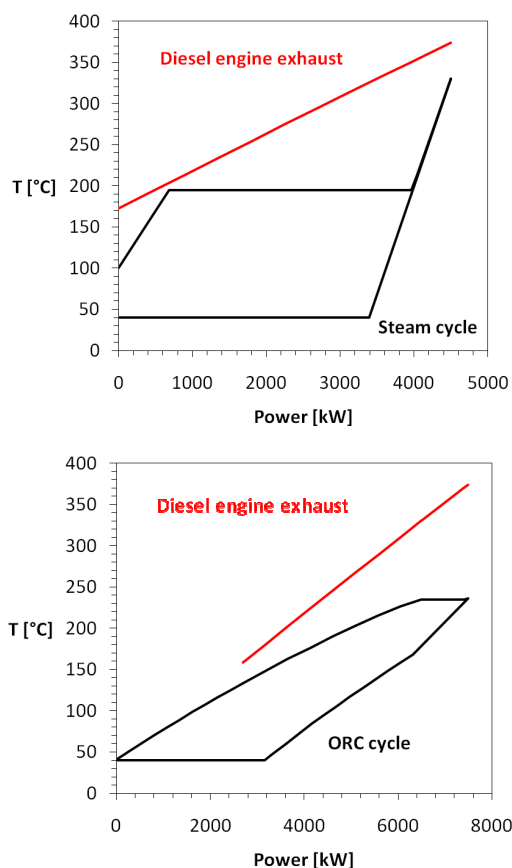


Figura 3: Confronto tra diagrammi T-Q per ciclo ORC (a scambio diretto) e ciclo tradizionale a vapore

In Tabella 1 vengono riassunti i dati salienti dei due cicli di recupero rappresentati in Figura 3: 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.

TABELLA 1

| | 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 |

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 negativa (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 4, 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.

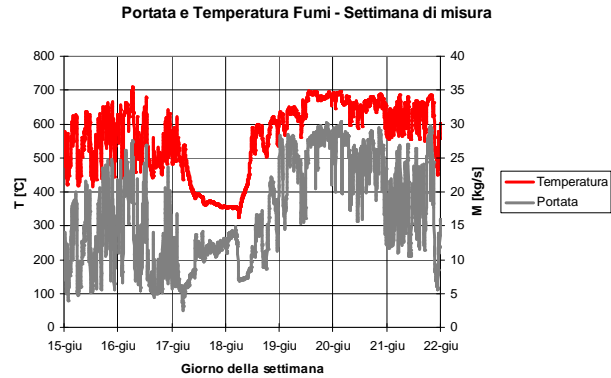


Figura 4: Variazioni di portata e temperatura dei gas esausti in uscita da un processo di laminazione a caldo

VI. ASPETTI ECONOMICI

Un sistema a recupero termico può essere equiparato ad un impianto ad energia rinnovabile poiché, di fatto, non viene consumato alcun combustibile fossile. Un business plan è quindi influenzato in prevalenza dai costi di investimento e dal prezzo dell'energia elettrica per gli anni a seguire, senza alcuna dipendenza dai costi dei combustibili. L'aspetto più critico è dato dalla stima dei costi di investimento, in special modo quando l'intervento di realizzazione dell'impianto avviene su di un sistema industriale già esistente.

Per determinare caratteristiche 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, ivi 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 richiederà ulteriori dettagli 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)
- 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 stabilire la tipologia di materiale necessaria, le superfici di scambio, la geometria e, di conseguenza, il costo.

E' importante infine determinare l'impatto in termini di layout che l'impianto potrebbe avere sul processo produttivo: la modifica delle linee esistenti è in alcuni casi particolarmente onerosa, in particolare qualora ci siano

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 (difficilmente prevedibile in calo negli anni a venire), 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 nel determinare il 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 sensibilmente 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 infine, 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.

VII. ESEMPIO DI BUSINESS PLAN

Un caso di riferimento, in ambito siderurgico, ha come oggetto un'opportunità analizzata da E.ON con supporto di Turboden; tale progetto è riferito ad un impianto di laminazione a caldo per il quale risultano disponibili gas di combustione a temperature relativamente alte.

Malgrado l'alta temperatura potesse rendere appetibile l'utilizzo di un ciclo a vapore, considerata la variabilità di temperatura e portata della fonte termica, la scelta della tecnologia di recupero migliore è ricaduta sui cicli ORC.

A titolo di esempio è rappresentata in Figura 5 la distribuzione statistica di portata e temperatura dei fumi nell'arco di un anno di funzionamento; i dati fanno riferimento all'anno 2007 e sono frutto di una campagna di misura effettuata da E.ON.

Il processo industriale oggetto della valutazione presentava caratteristiche ottimali sotto vari aspetti:

- gas combustivi relativamente 'puliti'
- temperatura media superiore a 500 °C
- funzionamento pari a 8000 h/anno

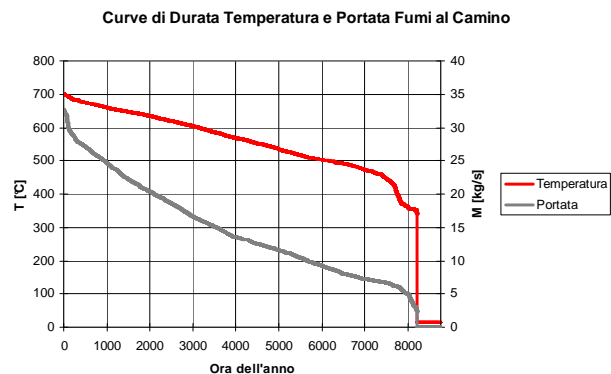


Figura 5: Curva di Durata di portata e temperatura dei fumi

In tabella 2 sono riassunti invece i principali parametri energetici di progetto derivanti dal dimensionamento dell'impianto e dalle simulazioni realizzate da Turboden.

TABELLA 2

| MODELLO ORC | Turboden 18 HR |
|-----------------------------|------------------|
| T. OLIO DIATERMICO (IN/OUT) | 285 °C / 150 °C |
| P. TERMICA WHRS (MAX) | 10 MWt |
| P. ELETTRICA LORDA | 2,05 MWe |
| EFF. ELETTRICA LORDA | 20,5% |
| P. TERMICA FUMI (MAX/MED) | 21,60 / 7,60 MWt |
| E. TERMICA DISPONIBILE | 66 GWht |
| E. TERMICA RECUPERABILE | 54 GWht |
| E. ELETTRICA PRODUCIBILE | 9,4 GWh |
| EFF. MEDIA DEL RECUPERO | 17,4% |

Il dimensionamento dell'impianto è stato effettuato ricercando l'ottimo sia energetico che economico.

Considerando il massimo potenziale di recupero termico di 66 GWht (ipotizzando una temperatura minima al camino dei fumi di 100 °C), circa 54 GWht sono trasformabili in oltre 9 GWh di energia elettrica con un rendimento medio del modulo ORC non lontano dai valori di progetto.

L'energia producibile è risultata (come capita spesso nel recupero in ambito industriale) totalmente auto-consumabile, quindi valorizzabile (stime E.ON per il 2010, cliente AT da 300 GWh/anno) in circa 93 €/MWh; ciò tenendo conto sia della componente "energia" che delle altre voci gravanti sulla bolletta quali perdite, trasporto, distribuzione e oneri. I TEE ottenibili dall'investimento sono stati valorizzati al valor medio registrato nel I semestre 2009 (circa 80 €/tep) per una durata complessiva di cinque anni (come da normativa vigente).

L'impatto sui costi di gestione e manutenzione dell'impianto è stato stimato dagli autori in circa 10

€/MWh, mentre l'investimento complessivo è stato quantificato in 3.0 M€, ipotizzato essere coperto per il 30% con equity, per il 70% a debito (20 anni, tasso 4%).

In tabella 3 sono riassunti i principali parametri economici sottostanti il business plan in oggetto.

TABELLA 3

| | |
|--------------------------------|---------------|
| PREZZO ENERGIA | 93 €/MWh |
| PREZZO TEE | 80 €/tep |
| COSTI DI O&M | 10 €/MWh |
| INVESTIMENTO | 3.0 M€ |
| DURATA INVESTIMENTO | 20 anni |
| EBITDA | 840 k€/anno |
| EBIT | 670 k€/anno |
| UTILE NETTO | 400 k€/anno |
| TEMPO DI RITORNO | 4.5 anni |
| IRR (10 anni / 20 anni) | 16.5% / 19.8% |
| NPV (WACC 8%, 20 anni) | 2.5 M€ |

I risultati economici stimati sono in linea con le indicazioni fornite nel capitolo precedente:

- Le caratteristiche della fonte termica (gas 'puliti', alta temperatura) rendono l'investimento relativamente economico (1.500 €/kW)
- Il numero di ore di funzionamento del processo fa sì che la redditività dell'investimento sia molto interessante (PBT < 5 anni, IRR a 20 anni del 19,8%)

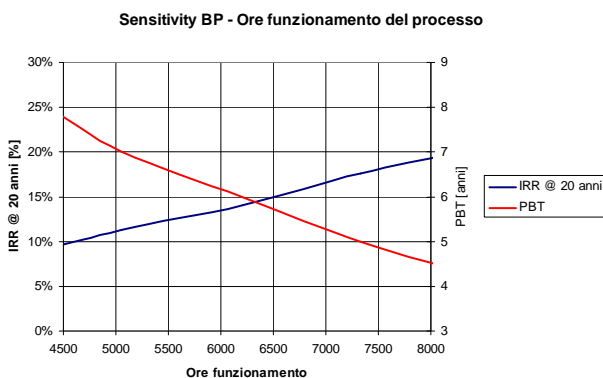


Figura 6: Analisi di sensitività sulle ore di funzionamento

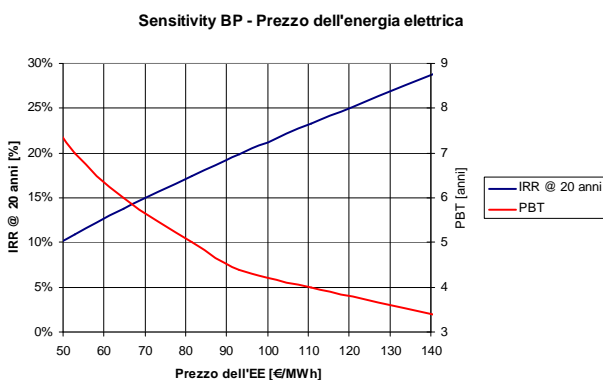


Figura 7: Analisi di sensitività sul prezzo dell'energia

In Figura 6 e Figura 7 è infine rappresentata un'analisi di sensitività effettuata variando il numero di ore di funzionamento del processo ed il prezzo dell'energia.

I limiti individuati entro i quali l'investimento è considerato conveniente (IRR @ 20 anni > 10%) sono:

- un minimo di 4500 ore di funzionamento all'anno
- un prezzo dell'energia maggiore di 50 €/MWh

VIII. CONFRONTO CON ALTRE TECNOLOGIE

La produzione di energia elettrica utilizzando sistemi a recupero può sembrare, a operatori industriali, un investimento oneroso e caratterizzato da tempi di ritorno non in linea con altri possibili interventi sul processo.

In realtà un confronto corretto dovrebbe essere fatto tenendo in considerazione quelle che sono le alternative tecnologiche per la produzione di energia elettrica disponibili ad oggi sul mercato.

In tabella 4 sono indicati i principali parametri economici facenti riferimento a diverse tecnologie di produzione dell'energia elettrica applicabili ad oggi in Italia.

TABELLA 4

| | CCGT | WIND | PV | WHRS | CHP |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|
| CAPEX [€/kW] | 500 | 1700 | 4000 | 3000 | 1000 |
| OPEX [€/MWh] | 75 | 10 | 10 | 10 | 95 |
| PREZZO EE [€/MWh] | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 |
| PREZZO ET [€/MWh] | - | - | - | - | 41 |
| TARIFFA INCEN. [€/MWh] | - | 93 | 360 | 15 | - |
| ORE DI PRODUZ. [h/anno] | 4000 | 1500 | 1100 | 6000 | 6000 |
| EBITDA per MW [k€/anno] | 48 | 255 | 481 | 552 | 198 |
| TEMPO DI RIT. [anni] | 10,4 | 6,7 | 8,3 | 5,4 | 5,1 |

Riferendosi a dati 2008 è possibile osservare come per l'investimento in cicli combinati (CCGT), che compone ormai lo standard del parco termoelettrico italiano, i tempi di ritorno siano dell'ordine dei 10 anni.

Grazie all'incentivo dei certificati verdi per l'eolico (WIND) e del conto energia per il solare fotovoltaico (PV), risulta essere molto conveniente investire in energie rinnovabili. Va però tenuto conto del fatto che, queste tecnologie di generazione, senza un supporto finanziario non sono ad oggi in grado di confrontarsi con la produzione di energia da fonte fossile.

Al contrario, interventi riguardanti i recuperi termici (WHRS), pur con tutti i limiti dovuti alla necessità di sfruttare i cascami termici di processi industriali, sono un'opportunità molto interessante anche dal punto di vista economico. I tempi di ritorno medi sono nell'ordine dei 4-6

anni con incentivi (TEE) che incidono in modo trascurabile sulla convenienza dell'investimento.

A titolo di confronto si esamina il caso della cogenerazione (CHP), utilizzabile quando il processo industriale non è caratterizzato da energia termica di scarto ma da una forte necessità di calore a bassa temperatura, dove il ritorno sull'investimento è del medesimo ordine di grandezza dei recuperi termici.

La principale differenza tra i due tipi di investimento è data dal fatto che la realizzazione di un impianto a recupero necessita di un investimento iniziale molto oneroso, ma non presenta nessun rischio futuro legato all'andamento dei costi dei combustibili. Al contrario la cogenerazione, pur essendo intrinsecamente più conveniente, è soggetta a questo tipo di rischi di mercato.

IX. CONCLUSIONI

La comunità internazionale, con l'adozione del protocollo di Kyoto, e l'UE nello specifico con il pacchetto legislativo "20-20-20", stanno cercando di intervenire contro i cambiamenti climatici. L'Italia si è impegnata, con la sottoscrizione del protocollo di Kyoto, ad una riduzione, entro il 2012, del 6.5% delle proprie emissioni di CO₂ rispetto al 1990. L'impatto del programma "20-20-20" comporta invece, con riferimento al 2005 e da conseguirsi entro il 2020, un taglio del 13% delle emissioni di CO₂ e un aumento del 17% della produzione di energia da fonti rinnovabili.

Tra le diverse vie perseguibili, la strada dell'efficienza energetica appare non solo eticamente doverosa, ma anche economicamente remunerativa sia per i beneficiari degli interventi, che per gli operatori del settore. Inoltre, questi risultati possono essere ottenuti senza gravare necessariamente sul sistema elettrico tramite forme di incentivazione che si traducono poi nell'aumento del costo dell'energia.

Quanto illustrato per i recuperi termici in ambito industriale vuole dimostrare quali opportunità rimangano ad oggi non esplorate: gli investimenti dei soggetti industriali non dovrebbero pertanto mirare al solo sviluppo dei processi produttivi, ma anche al miglioramento dell'efficienza energetica dei processi stessi. I servizi forniti da società ESCO, come E.ON Energia, quali auditing, consulenza nella pianificazione e implementazione degli interventi e richiesta TEE, possono essere un aiuto concreto nel dare la giusta risposta agli sprechi energetici.

Come dimostrano gli oltre 100 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.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano Riccardo Vescovo, responsabile commerciale di Turboden per l'applicazione recupero calore e Nicola Palestra, responsabile di E.ON Energia per lo sviluppo progetti di generazione distribuita.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AAVV: "EU-Project LOW-BIN", <http://www.lowbin.eu>
- [2] 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
- [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