



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Risultati dell'attività sperimentale su sistemi distribuiti di micro\_poligenerazione

*Deliverable B*

*G. Angrisani, C. Roselli, M. Sasso  
in collaborazione con A. Rosato, S. Sibilio*



RISULTATI DELL'ATTIVITÀ SPERIMENTALE SU SISTEMI DISTRIBUITI DI  
MICRO\_POLIGENERAZIONE - DELIVERABLE B

G. Angrisani, C. Roselli, M. Sasso (Università degli Studi del Sannio, Dipartimento di  
Ingegneria)

In collaborazione con A. Rosato, S. Sibilio (SUN)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: Studi e Valutazioni sull'Uso Razionale dell'Energia: Strumenti e tecnologie per  
l'efficienza energetica nel settore dei servizi

Responsabile Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



**Unità di Ricerca:**  
**Università degli Studi del Sannio**  
**Dipartimento di Ingegneria**

**Risultati dell'attività sperimentale su  
sistemi distribuiti di micro\_poligenerazione**

*Progetto 3.1: “Strumenti e tecnologie per l'efficienza energetica nel settore dei servizi”: Accordo di Collaborazione tra ENEA e Università degli Studi del Sannio, Dipartimento di Ingegneria, per un'attività di ricerca dal titolo: “Creazione di una Virtual Power Plant per l'analisi sperimentale di sistemi di poligenerazione di piccola taglia”*

*Deliverable B*

Dott. Ing. Giovanni Angrisani  
Dott. Ing. Carlo Roselli  
Prof. Ing. Maurizio Sasso

*in collaborazione con:*  
Dott. Ing. Antonio Rosato, SUN  
Prof. Ing. Sergio Sibilio, SUN

## INDICE

1. Introduzione .....	3
2. Risultati sperimentali .....	5
2.1. Premessa.....	5
2.2. Impianto di poligenerazione “ <i>Unisannio</i> ” .....	6
2.3. Impianto di poligenerazione “ <i>SUN</i> ” .....	20
3. Conclusioni.....	24
4. Bibliografia.....	26

# 1. INTRODUZIONE

La crescente richiesta di energia e l'esigenza di contenere le emissioni di gas climalteranti nell'atmosfera richiede una più estesa applicazione di tecnologie orientate allo sfruttamento di fonti rinnovabili e alla razionalizzazione energetica. L'evoluzione tecnologica e i mutamenti del mercato energetico sia nazionale che internazionale stanno influenzando lo sviluppo e l'introduzione di nuovi sistemi per la "produzione" energetica che permettano di soddisfare a questi requisiti. E' proprio in quest'ottica che si pone lo sviluppo della cogenerazione, ossia della produzione combinata di energia elettrica e/o meccanica e termica da un'unica fonte energetica. Questa tecnologia è stata indicata dalla Comunità Europea come uno dei primi interventi di razionalizzazione energetica e di riduzione delle emissioni di gas da effetto serra. La cogenerazione risulta essere una tecnologia ben consolidata sia nel settore industriale che del terziario, e grazie alla disponibilità sul mercato di dispositivi di piccola taglia crescente è l'interesse verso il settore domestico e del piccolo commerciale (Micro Combined Heat and Power, MCHP, potenza elettrica erogata inferiore a 15 kW).

Un'ulteriore modalità di utilizzo che può essere presa in considerazione riguarda la possibilità di far interagire il sistema di cogenerazione con un sistema di "produzione" del freddo, configurandosi in tal caso come sistema di trigenerazione (CCHP: Combined Cooling, Heating and Power, sistemi ad energia totale, poligenerazione). Possibili utilizzi tipici estivi dei reflui termici del CCHP sono: il riscaldamento ambientale o di processo e per la produzione di acqua calda sanitaria, ACS. La potenza elettrica dedotta dal sistema di poligenerazione viene solitamente fornita ad utenze elettriche direttamente servite dal CCHP ivi comprese ulteriori esigenze di refrigerazione, altrimenti se sia economicamente o tecnicamente è possibile cederla alla rete di distribuzione esterna.

Nel seguito si analizzeranno i risultati dell'analisi sperimentale condotta presso i laboratori dell'Università degli Studi del Sannio e la Seconda Università di Napoli su sistemi di microcogenerazione e microtrigenerazione, caratterizzati da una potenza elettrica inferiore a 15 kW. I tre sistemi di poligenerazione sono:

- $MCCHP \equiv MCHP/HVAC-DW$ , tale sistema è costituito da un'UTA, dotata di ruota essiccante, interagente con un MCHP, la cui potenza termica viene prevalentemente utilizzata per rigenerare il materiale sorbente (gel di silice) della ruota. La potenza elettrica erogata dal cogeneratore, viene utilizzata per far fronte agli autoconsumi della UTA (pompe di circolazione, ventilatori, ...), alle richieste della macchina frigorifera, interagente con la batteria fredda dell'UTA, ed infine per utenze esterne compresa la rete di distribuzione elettrica a cui la macchina è collegata in parallelo per scambi

bidirezionali;

- $MCCHP \equiv MCHP/EHP$ , caratterizzato dalla presenza di una pompa di calore a compressione di vapore ad attivazione elettrica (Electric Heat Pump, *EHP*) interagente con l'*MCHP*;
- $MCCHP \equiv MCHP/ABHP$ , che prevede la presenza di un'*ABHP* alimentata attraverso l'energia termica fornita dall'*MCHP*.

Un ulteriore obiettivo dell'analisi è stato quello di telecontrollare e telegestire le centrali frigo\_termo\_elettriche con un approccio di una Virtual Power Plant, *VPP*, elemento che può contribuire ulteriormente alla diffusione di sistemi di microgenerazione e micropoligenerazione. Come è noto, nei sistemi energetici distribuiti, alimentati sia con fonti fossili che rinnovabili, un sistema di gestione centrale (Energy Management System) in accordo ad un obiettivo, di minimizzazione dei costi di esercizio, di risparmio di energia primaria, di contenimento delle emissioni climalteranti, coordina il funzionamento dei sistemi presenti sulle reti (termica: teleriscaldamento e/o teleraffrescamento ed elettrica) gestendo i flussi energetici bidirezionali. La gestione remota ottimale da parte di un unico operatore di più dispositivi distribuiti sul territorio e non necessariamente interagenti con le medesime reti al fine di conseguire anche nei settori residenziale e del piccolo commerciale gli obiettivi globali di risparmio energetico, economico e di contenimento delle emissioni climalteranti, già raggiunti in applicazioni industriali e del terziario, è prioritariamente giustificata dai seguenti fattori:

- un fornitore di servizi energetici, (*ESCO*: Energy Service Company), può trarre la sua redditività economica dalla fornitura e gestione unitaria di tali sistemi;
- la molteplicità delle combinazioni tecnologicamente possibili, la difficoltà di servire utenze di piccola taglia caratterizzate da carichi energetici aleatori e fluttuanti, l'interazione dei sistemi poligeneranti o cogeneranti con reti esterne di distribuzione elettrica, di teleriscaldamento e di teleraffrescamento, rende complessa da parte dell'utente finale, in particolare nei settori residenziali e del piccolo terziario privo di competenze tecnico\_economiche adeguate, un'ottimizzazione delle strategie di funzionamento del sistema complesso poligeneratore/utenza.

Inoltre, il telecontrollo e la telegestione centralizzata di micro\_generazione o micro\_poligenerazione distribuiti risulterà in un prossimo futuro necessaria per assicurare:

- condizioni di operatività ottimali alle reti di distribuzione locali interconnesse, non necessariamente esclusivamente elettriche, fortemente vulnerabili in caso di diffusione capillare di sistemi di conversione energetica, soprattutto per lo sfruttamento di fonti energetiche aleatorie e discontinue rinnovabili;

- l'effettivo raggiungimento per la collettività dei potenziali obiettivi di risparmio energetico e di riduzione emissioni di gas serra, sui quali si basano gli strumenti di supporto economico che, a causa dell'elevato costo d'acquisto, permettono la diffusione di tali sistemi caratterizzati da un'efficienza di conversione negativamente influenzata sia dall'effetto taglia, che dall'intrinseca complessità tecnologica.

In questa relazione vengono sinteticamente riportati alcuni risultati sperimentali ottenuti con il sistema di monitoraggio e controllo in remoto "*web-based*", "*PoliLab*", implementato per integrare i due impianti sperimentali di poligenerazione ubicati in Campania in un unico laboratorio virtuale macrogeografico.

Per una descrizione più dettagliata sia degli impianti sperimentali, che dei software utilizzati, si rimanda alla relazione "*Sviluppo di un ambiente di monitoraggio, controllo e gestione remota di una rete di micro\_poligeneratori distribuiti - Deliverable A*".

In bibliografia sono riportati ulteriori riferimenti sia di carattere generale, che relativi alle specifiche ricerche teoriche e sperimentali sviluppate dei ricercatori coinvolti nel presente progetto.

## **2. RISULTATI SPERIMENTALI**

### **2.1. Premessa**

Le potenzialità di "*PoliLab*" sono evidentemente molteplici.

In primo luogo è possibile condividere tra un insieme di operatori, in questo caso i ricercatori dell'ENEA, dell'Università del Sannio e dalla Seconda Università di Napoli, i risultati sperimentali delle prove che vengono seguite in uno dei laboratori remoti, per evidenziare le prestazioni di un singolo componente e/o del sistema complessivo.

Di notevole interesse appare inoltre la possibilità di agire localmente e/o da remoto, per verificare se il sistema, o i sistemi in un'ottica unitaria, stiano effettivamente operando in domini applicativi virtuosi in termini di risparmio di energia primaria, di contenimento delle emissioni di gas a effetto serra e quindi di riduzione dei costi di esercizio, ed eventualmente operare in telegestione modifiche operative finalizzate all'ottimizzazione termo\_economica dei complessi sistemi di conversione energetica.

Non ultimo va evidenziata l'opportunità che tale laboratorio virtuale possa contribuire alla formazione di tecnici e studenti interessati alle tematiche energetiche. Nel seguito si fornirà una

sintetica panoramica di questa potenzialità per i due impianti operanti in reali condizioni di esercizio e connessi in rete.

## 2.2. Impianto di poligenerazione “*Unisannio*”

Nei paragrafi successivi verranno riportati alcuni esempi di risultati ottenibili attraverso l'utilizzo del software “*PoliLab*” per l'analisi sia dei singoli componenti che dei complessivi sistemi di poligenerazione dei due laboratori collegati in rete.

Evidentemente a monte di questi risultati i ricercatori coinvolti nella ricerca hanno effettuato molti test sul software “*PoliLab*” finalizzati alla verifica in campo dei seguenti aspetti:

- semplicità di utilizzo da parte di utenti remoti;
- affidabilità;
- corretto funzionamento di tutte le subroutine, comprensive sia di quelle preesistenti nei laboratori e operanti nei software di controllo locale, che di quelle di nuova implementazione appositamente progettate e realizzate per il laboratorio virtuale.

Va inoltre evidenziato che verranno, a titolo esemplificativo, riportati alcuni degli output considerando i due impianti in un'ottica “disgiunta”. Tuttavia appare evidente che è estremamente riduttivo immaginare un'applicazione del genere con riferimento a queste sole finalità.

Più in generale di estremo interesse appare l'analisi del risparmio di energia primaria (REP), della riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalenti e del risparmio sui costi di esercizio ( $\Delta$ CE) legato ai vettori energetici, in un'ottica “congiunta” in cui l'operatore remoto è interessato all'ottimizzazione delle macchine seppure geograficamente distinte, in un'ottica “unitaria”.

Nella trattazione che segue si seguirà l'ordine degli output descritti nella relazione “*Sviluppo di un ambiente di monitoraggio, controllo e gestione remota di una rete di micro\_poligeneratori distribuiti - Deliverable A*” alla quale si rimanda per una trattazione dettagliata del software “*PoliLab*”.

Infine si sottolinea che oltre alla descrizione degli output ottenuti, si è cercato anche di evidenziare il significato che può avere l'analisi del singolo componente/o del sistema complessivo per finalità di ottimizzazione energetica, economica e di impatto ambientale, nonché per garantire il corretto funzionamento dell'impianto.

Il primo dei componenti che verrà analizzato è la ruota deumidificatrice (DW, Desiccant Wheel), Figura 1, (cfr. Figura 25, Deliverable A).

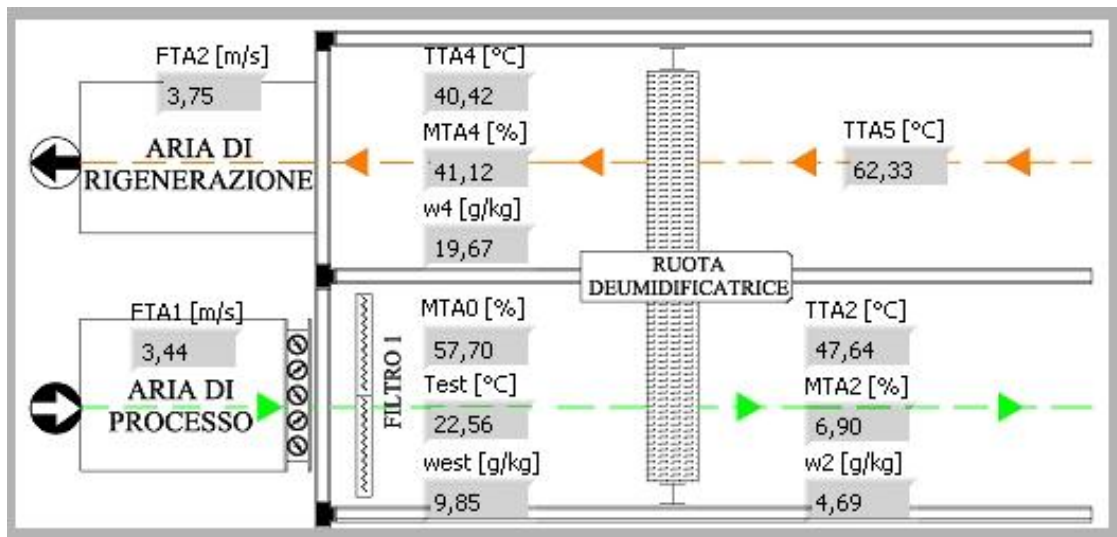


Figura 1. Volume di controllo della ruota deumidificatrice

La DW rappresenta sicuramente l'elemento caratteristico della UTA dell'impianto di poligenerazione dell'Università del Sannio. Il suo funzionamento dipende da un insieme di fattori sinteticamente riconducibili a tre domini:

- condizioni termoigrometriche dell'aria esterna;
- condizioni termoigrometriche dell'aria immessa nell'ambiente confinato, influenzate dai carichi latenti dell'ambiente interno;
- condizioni termoigrometriche dell'aria di rigenerazione, influenzate dalle condizioni operative dei dispositivi di riscaldamento adottati (caldaia, micro\_cogeneratore).

L'operatore locale e remoto per ottimizzare il funzionamento del componente, per esempio in seguito a variate condizioni esterne e/o interne, può agire sia sullo stato dell'aria di rigenerazione, attivando e/o regolando il MCHP e la caldaia, che sulla velocità di rotazione della ruota.

Con riferimento al software "*PoliLab\_Unisannio*" (cfr. § 4.3.3, Deliverable A), in Figura 2 vengono riportati i risultati sperimentali di una prova, della durata di circa 20 minuti, finalizzata a valutare la potenzialità di deumidificazione della ruota e come essa sia influenzata da alcune variabili operative.

In figura viene anche riportato l'andamento temporale dell'efficienza deumidificazione definita come:

$$\eta_{deh} = \frac{w_{est} - w_2}{w_{est}} \quad (1)$$

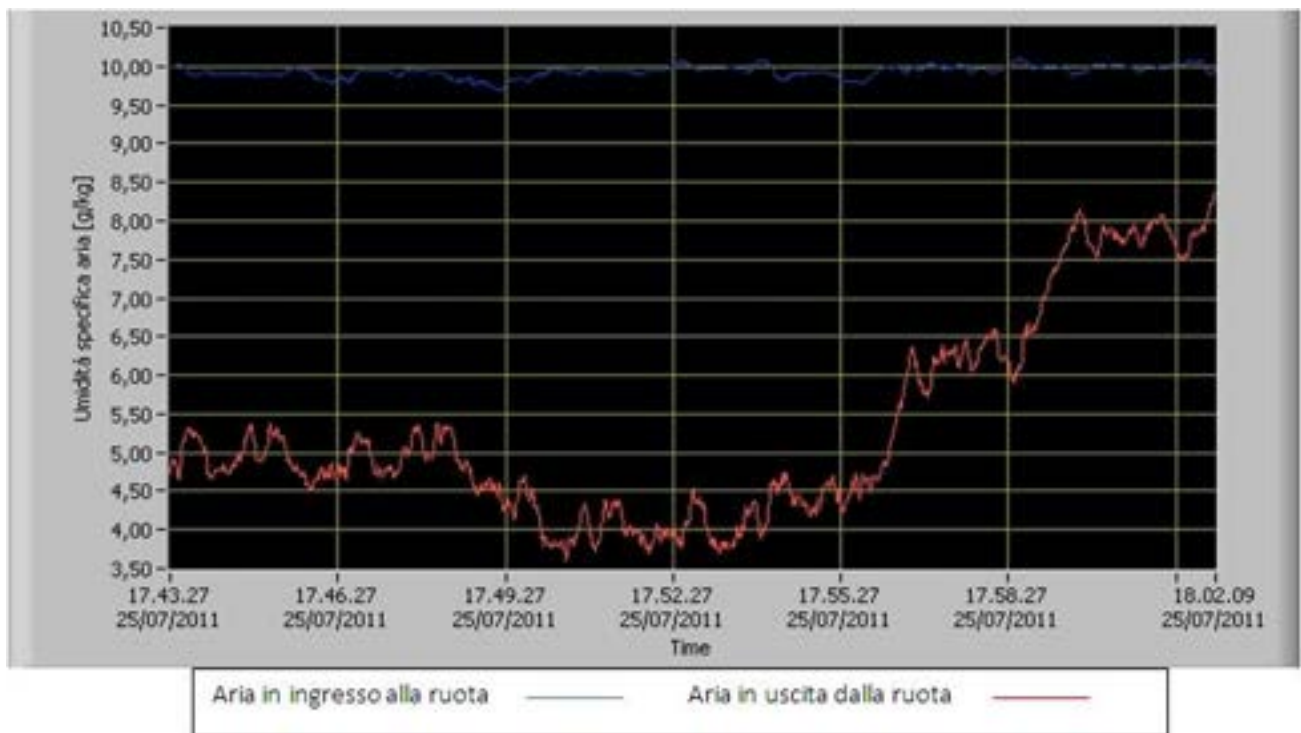
in cui  $w_{est}$  è l'umidità specifica dell'aria esterna, in ingresso alla ruota, e  $w_2$  è l'umidità specifica

dell'aria in uscita dalla ruota stessa. A fronte di un'umidità specifica dell'aria in ingresso alla ruota pressoché costante durante tutta la prova (circa 10 g/kg), si è registrata per i primi circa 6 minuti, un'umidità specifica in uscita dalla ruota di circa 5 g/kg (Figura 2a), in corrispondenza di una temperatura di rigenerazione di circa 60 °C; a tali condizioni operative corrisponde un'efficienza di deumidificazione di circa il 50%.

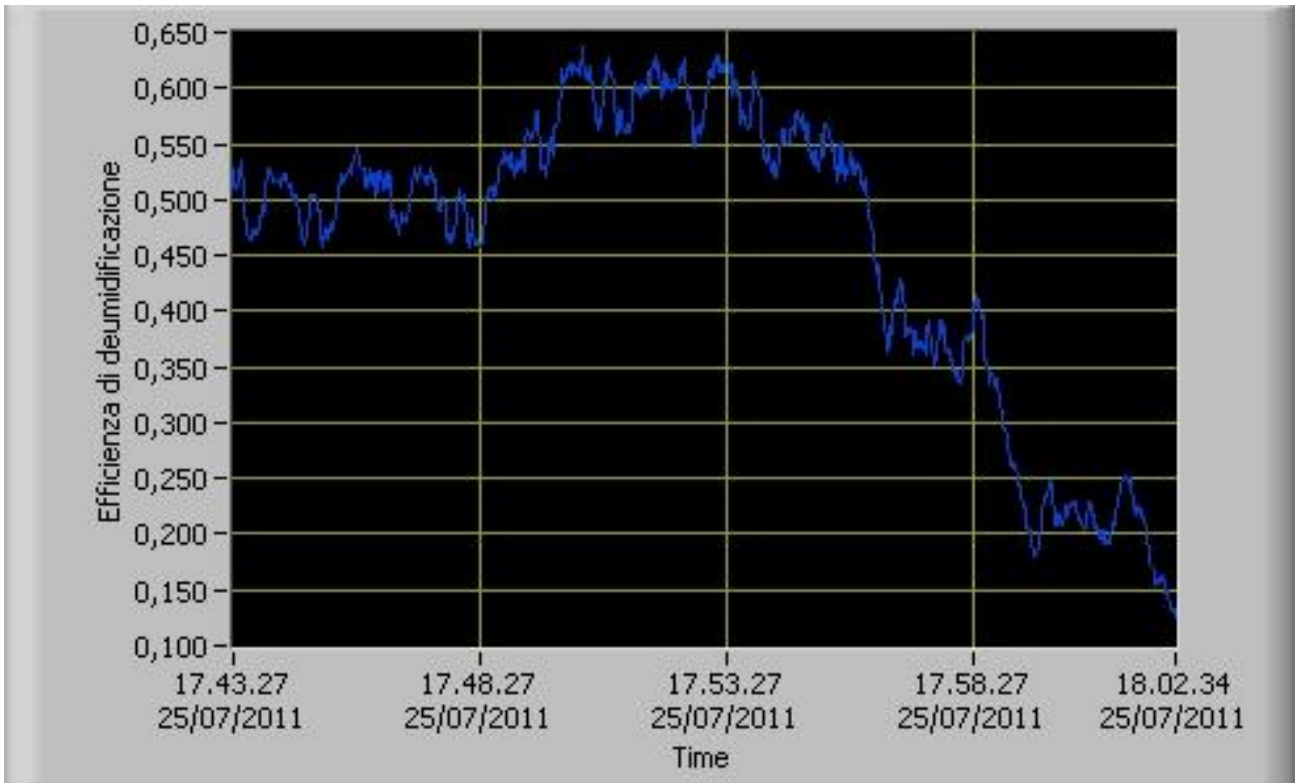
Dalle 17.49 circa, si è proceduto ad un innalzamento della temperatura di rigenerazione (TTA5, cfr. § 2.2, Deliverable A) fino a circa 70 °C. Da ciò ne deriva una riduzione dell'umidità specifica dell'aria in uscita dalla ruota e quindi un incremento di  $\eta_{deh}$ , che raggiunge il 60%.

Infine, a partire dalle ore 17.55 circa, a causa dello spegnimento del ventilatore dell'aria di rigenerazione, si verifica un rapido incremento dell'umidità specifica dell'aria in uscita dalla ruota, e quindi un brusco crollo dell'efficienza di deumidificazione.

Attraverso la funzione di post-elaborazione dati prevista dal software "PoliLab" (cfr. § 4.3.4, Deliverable A) è possibile ad esempio valutare l'andamento dell'efficienza di deumidificazione in funzione dell'umidità specifica dell'aria esterna (Figura 3); si può notare una riduzione di  $\eta_{deh}$  all'aumentare di  $w_{est}$ , da cui consegue la necessità di agire opportunamente (ad esempio aumentando la temperatura di rigenerazione) per far fronte all'aumento del carico latente di ventilazione.

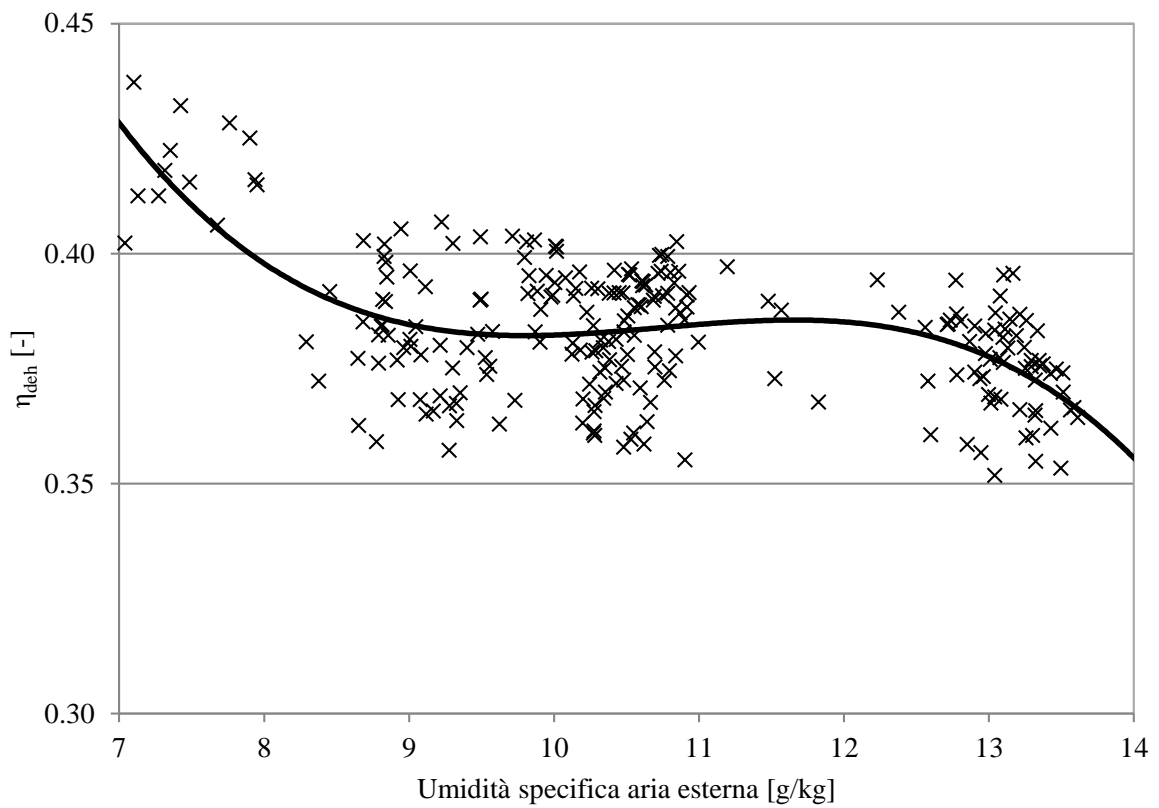


(a)



(b)

**Figura 2.** Risultati sperimentali per la ruota deumidificatrice



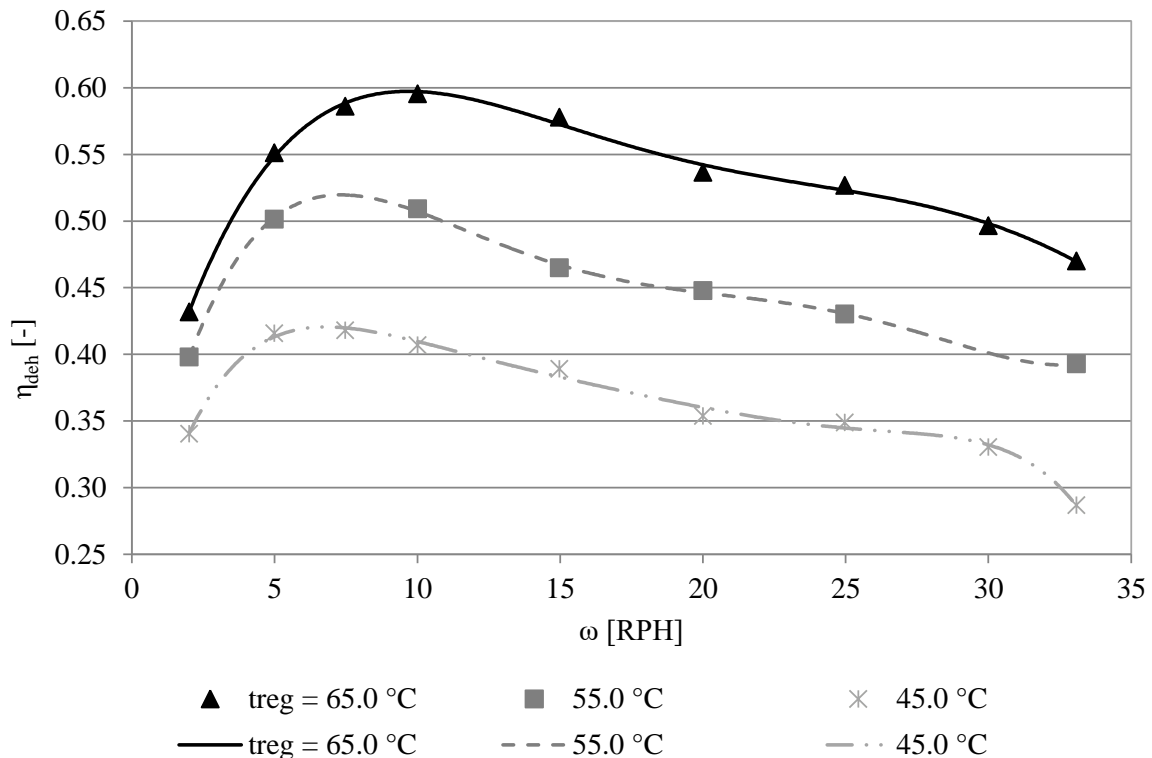
**Figura 3.** Efficienza di deumidificazione in funzione dell'umidità specifica dell'aria esterna

Sempre sfruttando la post-elaborazione è possibile ricavare altre informazioni utili alla caratterizzazione e all'ottimizzazione della DW.

Oltre alla temperatura di rigenerazione, la variabile che viene tipicamente utilizzata per il controllo delle ruote deumidificatrici è la velocità di rotazione, universalmente riconosciuta come un parametro cruciale per questo tipo di dispositivi: infatti, se la ruota gira troppo velocemente, il materiale essiccante in essa contenuto non riesce ad asportare il vapor d'acqua contenuto nell'aria; d'altra parte, se la velocità di rotazione è troppo bassa, si rischia di raggiungere la condizione di equilibrio tra materiale essiccante e aria umida, con la conseguente saturazione del materiale stesso, mentre esso si trova ancora nella sezione di adsorbimento. Di conseguenza, ci sarà una velocità di rotazione ottimale, funzione delle condizioni operative al contorno, che garantisce le migliori prestazioni della ruota deumidificatrice.

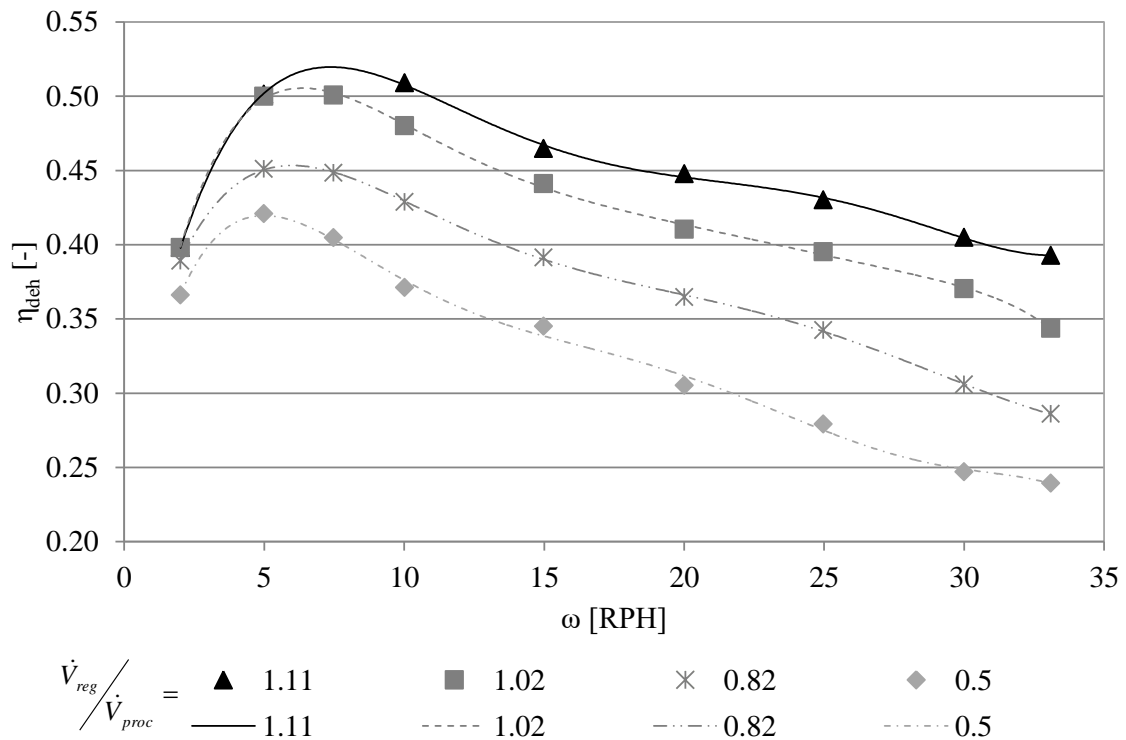
In Figura 4 si riporta l'andamento del  $\eta_{deh}$  in funzione della velocità di rotazione  $\omega$ , in RPH (Revolution Per Hour), per differenti valori della temperatura di rigenerazione ( $t_{reg}$ ).

Si può notare che la velocità di rotazione ottimale,  $\omega_{opt}$ , cresce all'aumentare della  $t_{reg}$ , da circa 6 RPH per  $t_{reg} = 45.0 \text{ }^\circ\text{C}$ , a circa 10 RPH per  $t_{reg} = 65.0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ciò accade perché con temperature di rigenerazione più elevate, è più facile desorbire il vapore d'acqua dal materiale adsorbente, di conseguenza la velocità di rotazione deve essere incrementata per evitare che il materiale adsorbente rimanga nella sezione di rigenerazione per un tempo eccessivo.



**Figura 4.**  $\eta_{deh}$  in funzione della velocità di rotazione per differenti temperature di rigenerazione.

In Figura 5 si riporta l'andamento dell'efficienza di deumidificazione in funzione della velocità di rotazione, per differenti valori del rapporto tra le portate d'aria di rigenerazione e di processo,  $\dot{V}_{reg}/\dot{V}_{proc}$ . In questo caso,  $\omega_{opt}$  cresce all'aumentare di tale rapporto, da circa 5 RPH per  $\dot{V}_{reg}/\dot{V}_{proc} = 0.5$ , a circa 7.5 RPH per  $\dot{V}_{reg}/\dot{V}_{proc} = 1.11$ . L'incremento della portata di rigenerazione determina, infatti, l'aumento della velocità di desorbimento e quindi la necessità, similmente a quanto detto per la Figura 4, di incrementare la velocità di rotazione.

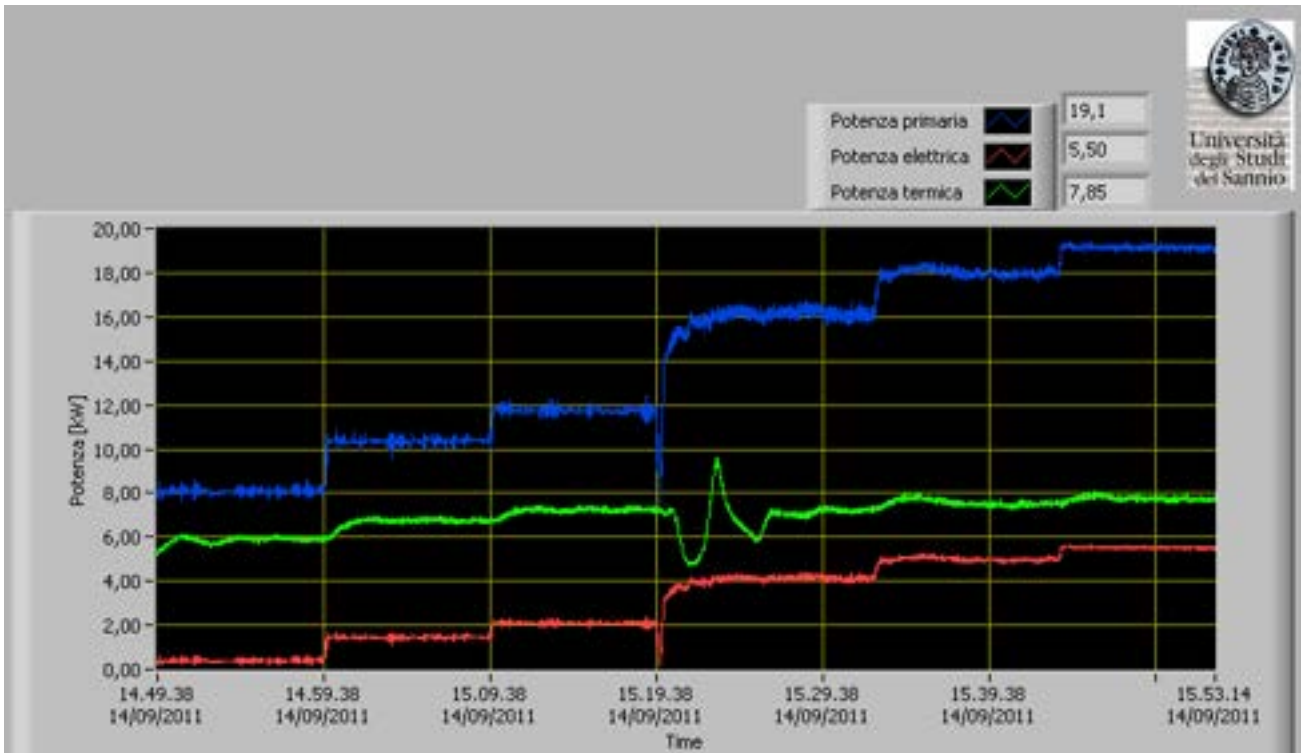


**Figura 5.**  $\eta_{deh}$  in funzione della velocità di rotazione per differenti valori del rapporto  $\dot{V}_{reg}/\dot{V}_{proc}$ .

Da quanto riportato, è evidente che analisi sia in tempo reale attuabili con il software "PoliLab", che la valutazione delle numerose serie storiche di risultati sperimentali, consentono di individuare l'influenza sulle prestazioni della ruota delle diverse variabili di controllo, e di conseguenza di agire remotamente su di esse al variare delle condizioni operative.

Con riferimento alla possibilità di valutare le prestazioni del sistema di microgenerazione (cfr. Figura 26, Deliverable A), in Figura 6(a) vengono riportati per una prova sperimentale gli andamenti temporali della potenza elettrica, termica e primaria, legata al consumo di combustibile,

del microgeneratore ed in Figura 6(b) gli andamenti dei coefficienti di prestazione energetica usualmente utilizzati per la cogenerazione, quali il rendimento elettrico, il rendimento termico ed il CUC (Coefficiente di Utilizzo del Combustibile).



(a). Andamento temporale della potenza elettrica, termica e primaria del MCHP

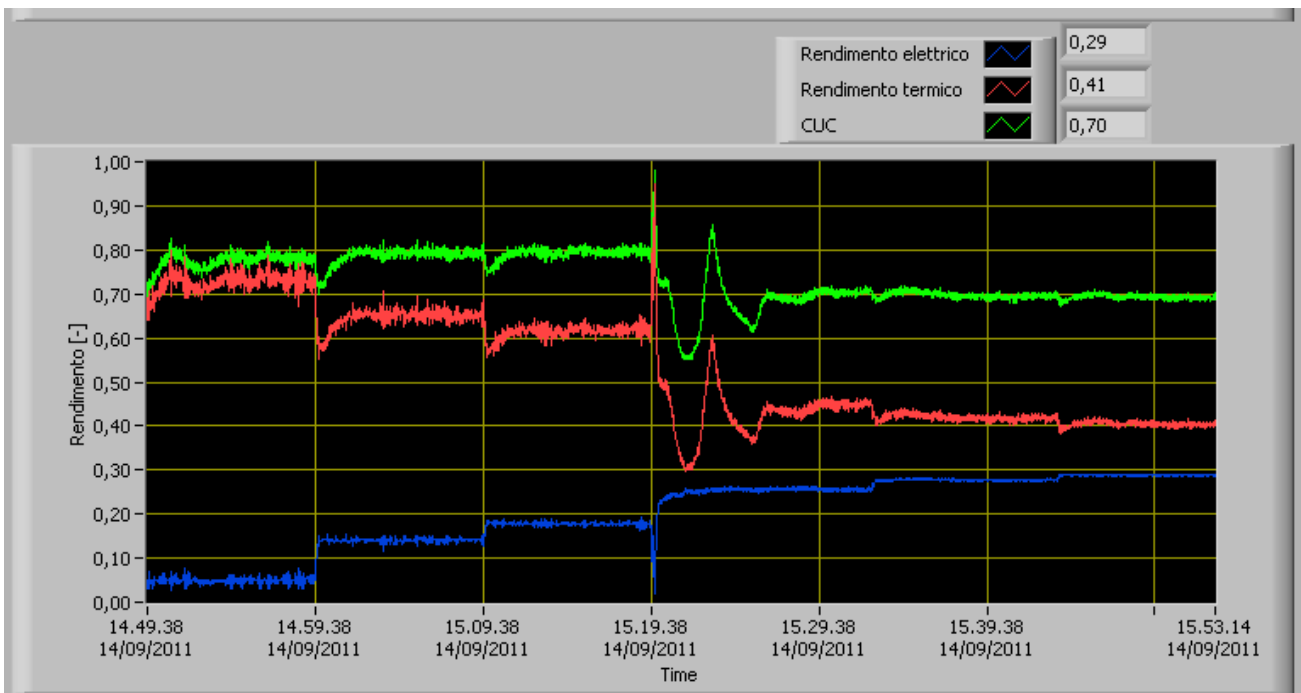


Figura 6 (b). Andamento temporale del rendimento elettrico, termico e del CUC del MCHP

Il CUC è pari al rapporto fra l'energia termica ed elettrica fornita all'utenza e l'energia primaria in

ingresso al MCHP.

La disponibilità remota di queste informazioni è di vitale importanza per la gestione ottimizzata di questo dispositivo complesso di piccola taglia.

Infatti per cogeneratori funzionamento con pilotaggio elettrico e basati su motori alternativi a combustione interna, quale quello analizzato, essendo il rendimento elettrico funzione della potenza elettrica erogata occorre verificare che la macchina funzioni per il maggior numero di ore possibile in condizioni di pieno carico alle quali corrisponde il massimo rendimento elettrico. Infatti dalla Figura 6 si evidenzia che dalle ore 14.49 alle 14.59 la potenza elettrica netta erogata è pari a circa 400 W ed il corrispondente rendimento elettrico è pari a circa 5%, dalle 14.59 alle 15.09 il rendimento elettrico supera il 10% a fronte di un incremento della potenza elettrica a circa 1.8 kW. Con successivi incrementi della potenza elettrica erogata il rendimento elettrico raggiunge il suo valore massimo pari a circa 29% a fronte di una potenza elettrica pari a circa 5.8 kW. Per una potenza elettrica superiore a 4.8 kW l'energia elettrica disponibile viene usata non solo per gli autoconsumi della UTA, ma anche per la rete di distribuzione esterna e/o altri carichi elettrici aggiuntivi dell'utente finale.

La necessità precedentemente esposta di garantire un funzionamento a pieno carico elettrico, soprattutto in utenze di piccola taglia caratterizzati da aleatorietà e forte variabilità dei carichi elettrici, nonché la necessità di collocare utilmente l'energia termica cogenerata spinge molti costruttori di MCHP a preferire il pilotaggio termico a quello elettrico con regolazioni ON-OFF.

Nel test si è simulato un funzionamento estivo, quindi senza carichi aggiuntivi per riscaldamento locale e/o l'alimentazione di reti di teleriscaldamento, e senza carichi "on-site" legati a richieste di acqua calda per usi sanitari. Quindi, poiché il MCHP forniva energia termica per la sola rigenerazione della DW, non sempre le condizioni operative (condizioni termoigrometriche dell'aria esterna e di immissione, temperatura di rigenerazione, ...) hanno consentito l'utilizzo totale dell'energia termica disponibile. Infatti, durante la prova a fronte dell'aumento del rendimento elettrico, il fattore di utilizzo globale dell'energia primaria, CUC, decresce passando da 0.80 a 0.70 a causa dell'aliquota di energia termica degradata nell'ambiente (valore nominale pari a circa 0.85). Sempre con riferimento all'analisi e ottimizzazione del solo MCHP in Figura 8, si riporta il grafico, ottenuto con il software "EcsWin" (cfr. § 4.3.1, Deliverable A), dell'andamento nel tempo della potenza elettrica netta erogata dal MCHP ( $P_{net}$ ). Tale analisi consente di individuare il valore di ulteriori parametri, come la potenza elettrica in stand-by ( $P_{net,standby}$ ), la potenza elettrica massima ( $P_{net,max}$ ) ed il tempo di warm-up ( $t_{warm-up}$ ), che possono essere utili per analisi specifiche quali la calibrazione di modelli di cogeneratore e la valutazione dei transistori del dispositivo.

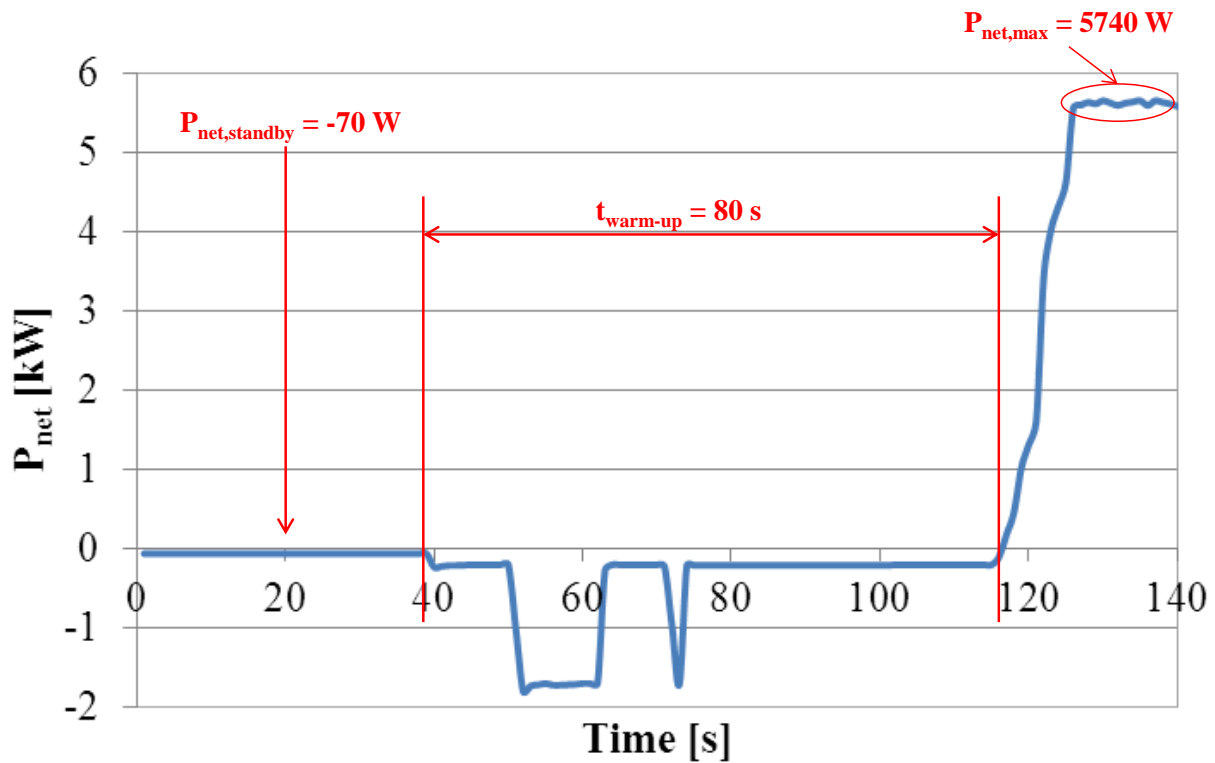
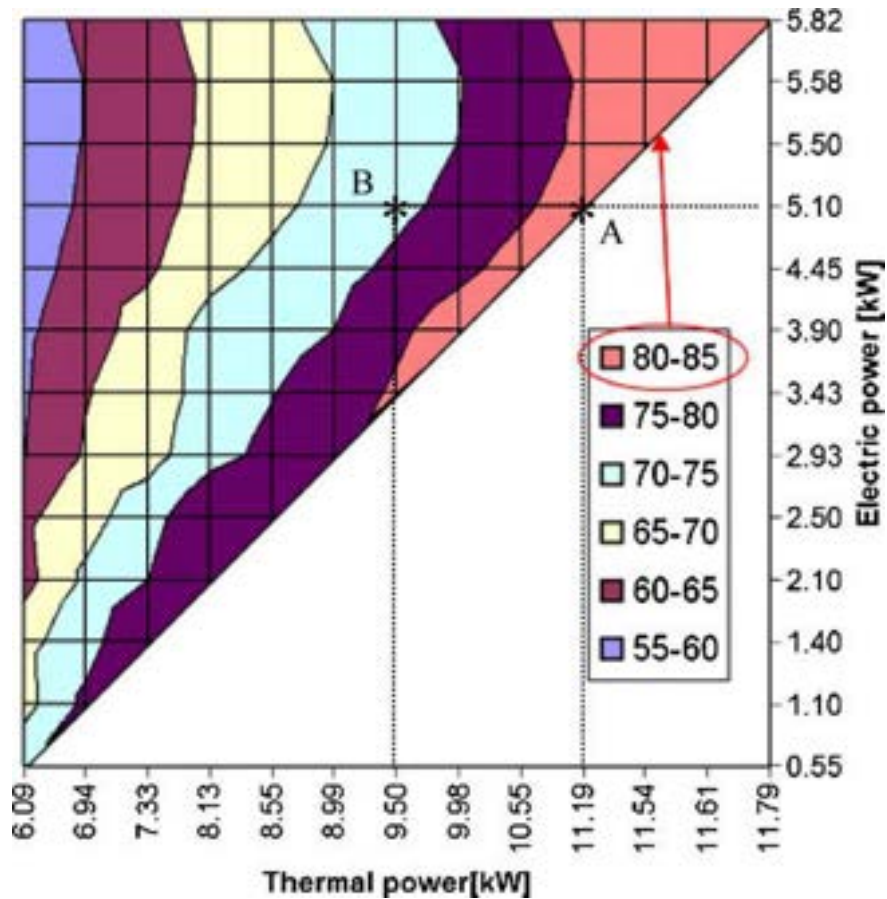


Figura 7. Potenza elettrica netta erogata dal MCHP in funzione del tempo

Il software "PoliLab" permette inoltre la post-elaborazione dei risultati sperimentali (cfr. § 4.3.4, Deliverable A). In Figura 9 si riportano le curve iso-CUC in funzione della potenza elettrica e termica erogata dal microgeneratore, che permettono ulteriormente di evidenziare i domini in cui la macchina funziona ad elevata efficienza di conversione energetica. Se, ad esempio, la potenza elettrica erogata dal MCHP è di 5.10 kW (si veda il punto A in Figura 8) la massima potenza termica corrispondente è di circa 11.2 kW: in tal caso, il massimo CUC conseguibile è nel range 80 – 85%. Se la potenza termica recuperata dal cogeneratore è in parte dissipata, il CUC si riduce, fino ad un valore nel range 70 – 75%, quando la potenza termica utilmente sfruttata dall'utenza è di circa 9.50 kW (si veda il punto B in Figura 8).



**Figura 8.** Curve iso-CUC del MCHP in funzione della potenza elettrica e termica

L'analisi riportata nel seguito è finalizzata all'individuazione dei domini operativi per i quali i sistemi di cogenerazione analizzati siano competitivi rispetto ai sistemi di "produzione" separata in termini energetici, economici e di impatto ambientale. A tal fine vengono riportati nel seguito gli indici che possono essere utilizzati per la caratterizzazione di tali sistemi. In accordo all'analisi delle 3-E (Energetic, Economic and Environmental analysis) le prestazioni del Sistema Proposto, ad esempio SP≡MCHP, vengono confrontate con quelle del Sistema Tradizionale, (ST ≡ rete elettrica, caldaia alimentata a gas naturale), basato sulla "produzione" separata, Figura 9; entrambi i sistemi considerati devono soddisfare le richieste elettriche e termiche (riscaldamento e acqua calda sanitaria).

Un primo parametro importante per il confronto tra il sistema proposto ed il sistema tradizionale è il Risparmio di Energia Primaria (REP), definito come:

$$REP = \frac{E_{p,ST} - E_{p,SP}}{E_{p,ST}} \quad (2)$$

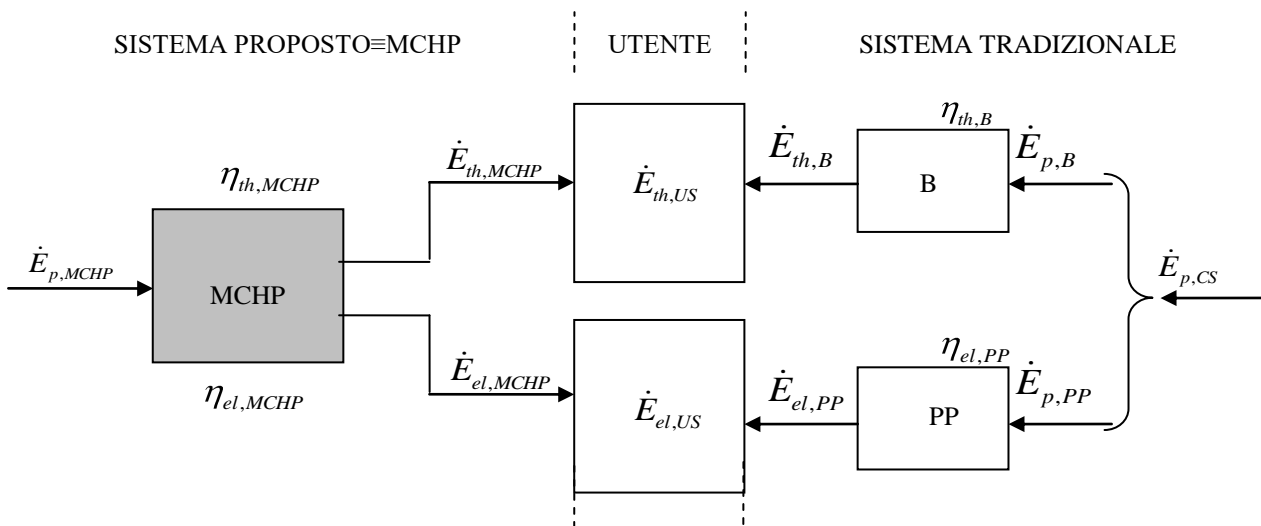
L'analisi di impatto ambientale ha una rilevanza significativa sulla scelta della tecnologia: un

approccio semplificato molto utilizzato in ambito di analisi e pianificazione energetico-ambientale è basato sulla valutazione delle emissioni equivalenti di CO<sub>2</sub>. Il parametro utilizzato per il confronto tra le due tecnologie è l'anidride carbonica equivalente evitata, definita come:

$$\Delta CO_2 = \frac{CO_{2,ST} - CO_{2,SP}}{CO_{2,ST}} \quad (3)$$

I valori di riferimento del sistema tradizionali e i fattori di emissione utilizzati per la valutazione delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente dipendono dalla tecnologia utilizzata per la produzione di energia elettrica e termica. Tipicamente, si può far riferimento, per la caratterizzazione del sistema tradizionale al mix tecnologico di sistemi di conversione energetica utilizzati in area geografica o alla migliore tecnologia disponibile (BAT, Best Available Technology: per la produzione elettrica ciclo combinato alimentato a gas naturale, mentre per la produzione di energia termica caldaia a condensazione).

Questi indici e queste procedure sono state recepite dalle normative e dagli strumenti di supporto nazionali e comunitari per la diffusione della cogenerazione.



**Figura 9.** Confronto fra sistema proposto e sistema tradizionale

Con riferimento al confronto economico vengono usualmente adottati gli strumenti tipici delle analisi di prefattibilità economica di investimenti alternativi, quali: il Simple Pay Back (SPB) ed il Valore Attuale Netto (VAN).

Nel caso analizzato l'attenzione è stata rivolta alla valutazione della differenza fra i costi di esercizio tra il sistema proposto e quelli del sistema tradizionale,  $\Delta CE$ , dovuti prevalentemente al diverso

consumo di combustibili. Evidentemente, sarebbe estremamente semplice contemplare nel SW “PoliLab” anche indici economici più complessi qualora si considerino impianti non sperimentali per il quale il costo di acquisto sia in linea con quelli di mercato.

Ciò premesso, con riferimento alla possibilità di valutare in tempo reale le prestazioni del sistema di microgenerazione rispetto a quello di riferimento, la maschera che consente l’analisi delle 3-E (cfr. Figura 7, Deliverable A).

In particolare si riportano i risultati sperimentali di un case-study in cui il MCHP (SP), funzionante a pieno carico, è stato confrontato con due differenti sistemi tradizionali (ST), le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 1. In particolare il ST relativo al caso 1 è riconducibile al mix tecnologico italiano, mentre il ST del caso 2 coincide con la BAT.

In entrambi i casi si sono inoltre utilizzati i seguenti ulteriori parametri:

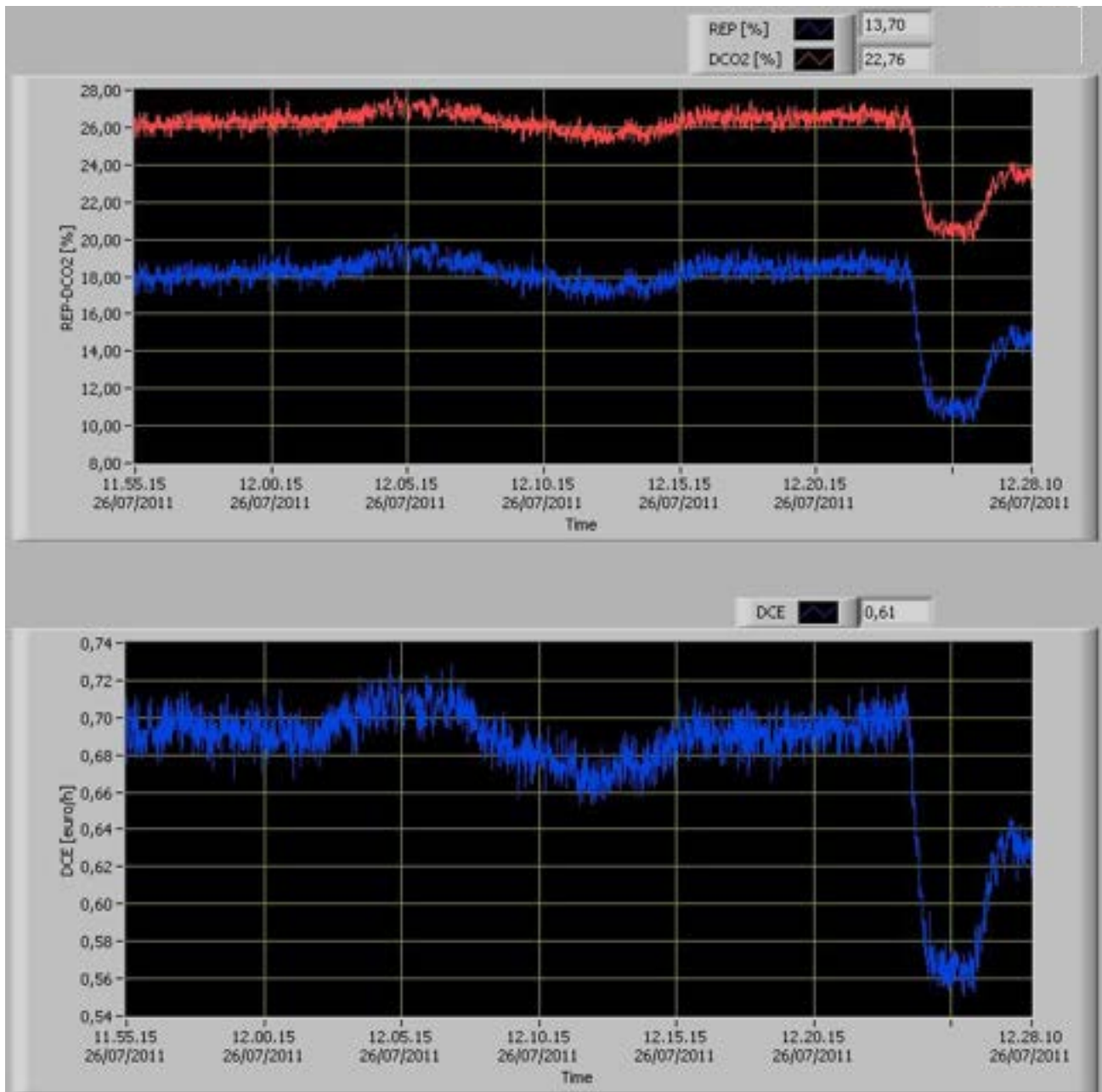
- Fattore emissione gas naturale: 0.200 kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>p</sub>;
- Costo gas naturale MCHP: 0.55 €/Nm<sup>3</sup>;
- Costo gas naturale caldaia: 0.70 €/Nm<sup>3</sup>;
- Costo energia elettrica: 0.18 €/kWh<sub>el</sub>.

**Tabella 1. Caratteristiche del sistema di riferimento**

	<b>Caso 1</b>	<b>Caso 2</b>
$\eta_{el,PP} [\%]$	46.0	54.3
$\eta_{th,B} [\%]$	85.0	102
<i>Fattore emissione energia elettrica prelevata dalla rete [kgCO<sub>2</sub>/kWh<sub>el</sub>]</i>	0.531	0.400

In Figura 10 si riportano i risultati sperimentali di una prova, della durata di circa 30 minuti, in cui il MCHP è confrontato con il ST relativo al caso 1. Si può notare che il microgeneratore è in grado di garantire un REP di circa il 18% ed un  $\Delta\text{CO}_2$  di circa il 26%; inoltre esso garantisce anche una certa convenienza economica, ottenendo una riduzione del costo di esercizio di circa 0.70 €/h.

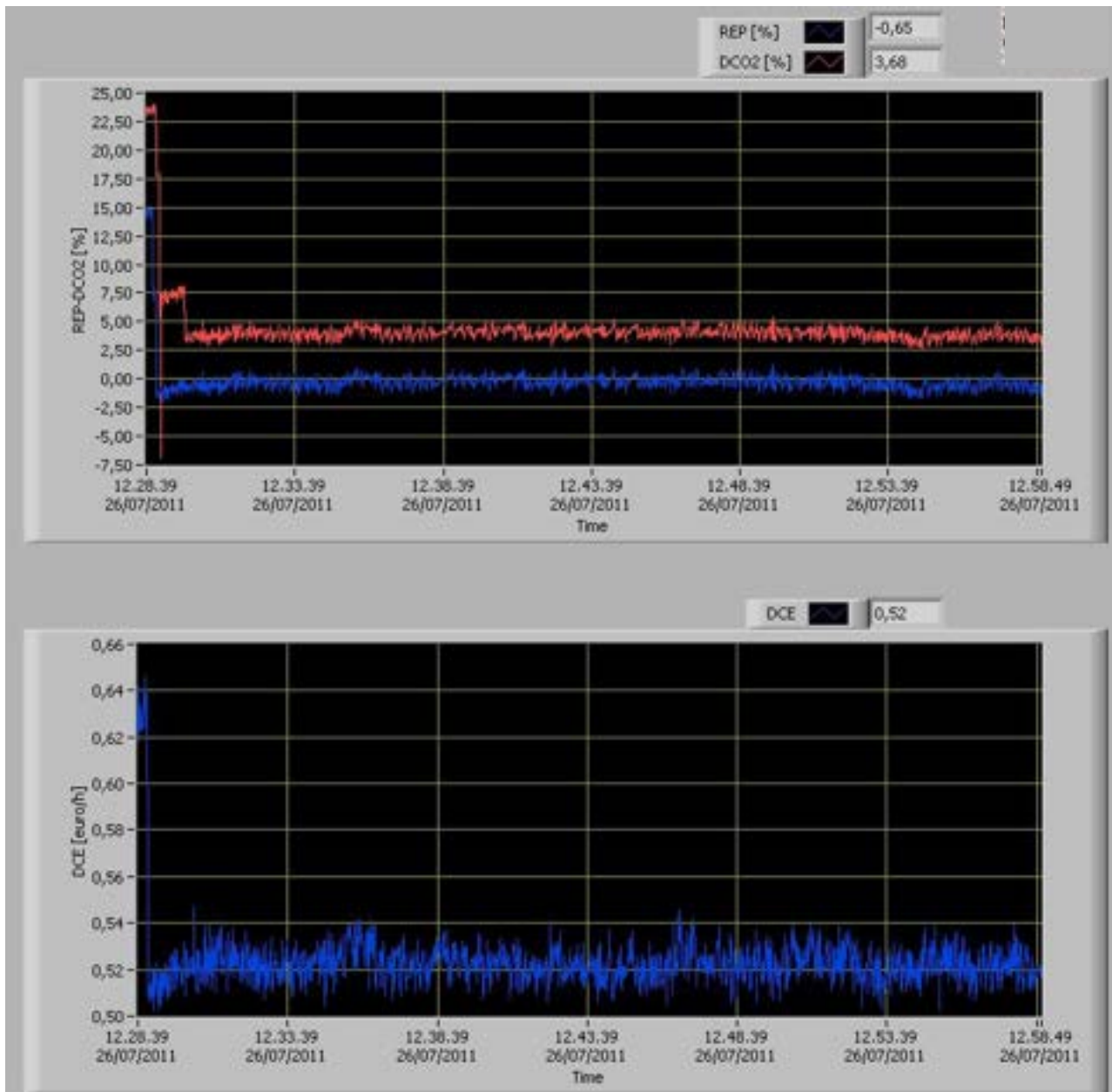
I valori del REP,  $\Delta\text{CO}_2$  e  $\Delta\text{CE}$  tendono a ridursi nella parte finale della prova, a causa della riduzione della potenza elettrica erogata dal microgeneratore, a sua volta causata dalla disattivazione del chiller.



**Figura 10.** Risultati sperimentali analisi 3-E microgeneratore (caso 1)

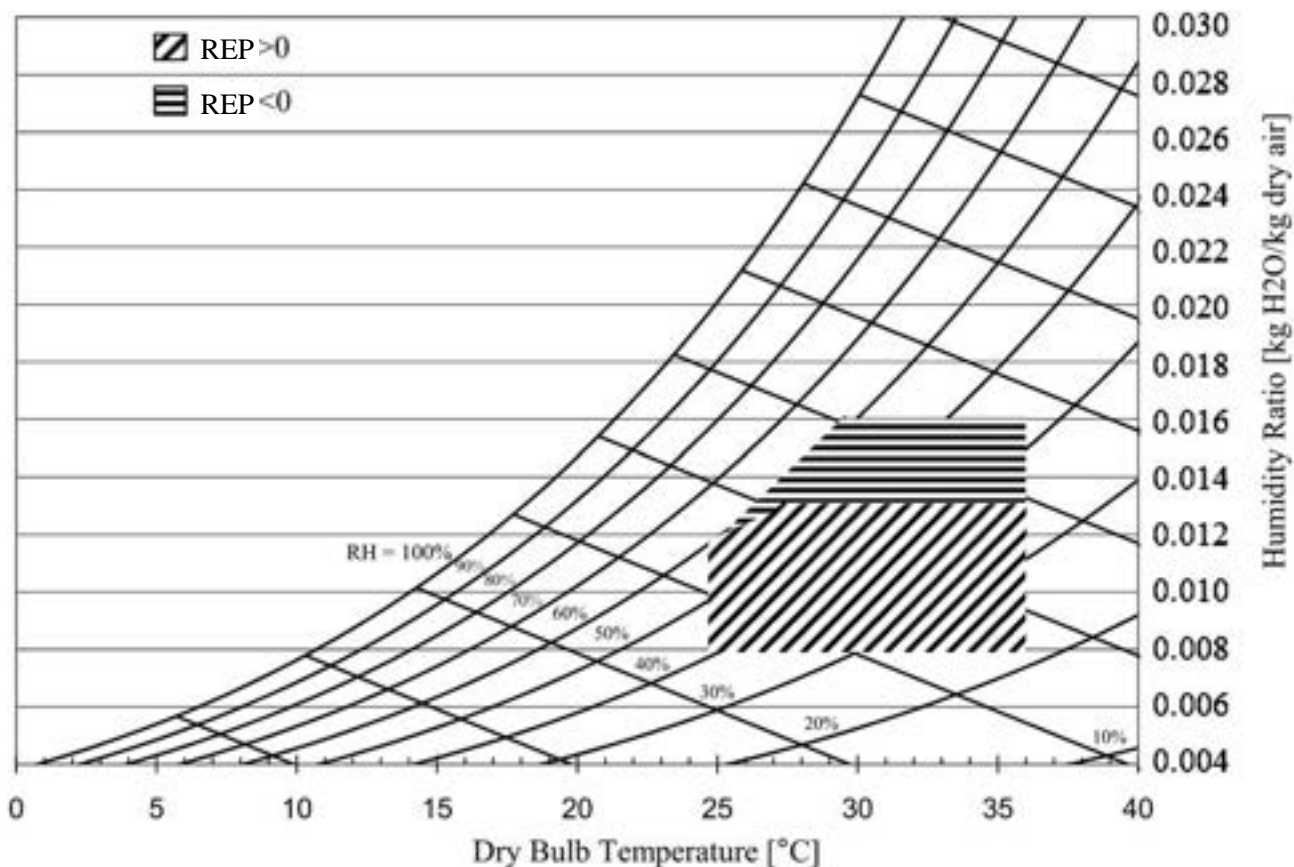
Sensibilmente diversi sono i risultati dell'analisi delle 3-E quando il MCHP è confrontato con la BAT, Figura 11.

In tal caso infatti il cogeneratore non garantisce alcun risparmio di energia primaria ( $REP \approx 0\%$ ) ed una modesta riduzione delle emissioni climalteranti ( $\Delta CO_2 \approx 4\%$ ). Anche la convenienza economica si riduce drasticamente, in quanto la differenza di costo di esercizio si riduce, rispetto al caso precedente ed è pari a circa 0.52 €/h.



**Figura 11.** Risultati sperimentali analisi 3-E microgeneratore (caso 2)

Infine, i dati sperimentali (cfr. § 4.3.4, Deliverable A) permettono di condurre ulteriori analisi che consentono di valutare il sistema complessivo di trigenerazione rispetto al sistema di produzione separata. Ad esempio, in Figura 12, si riporta l'influenza delle condizioni termoisometriche esterne evidenziando sul diagramma psicrometrico le aree in cui l'impianto di condizionamento con ruota essiccante rigenerata dal MCHP, garantisce risparmi di energia primaria.



**Figura 12.** CUC in funzione delle condizioni termoigrometriche esterne

Si può notare che il sistema di trigenerazione richiede meno energia primaria di quello convenzionale ( $REP > 0$ ) quando l'umidità specifica esterna è minore di 11.5 g/kg e la temperatura esterna è nel range 25 – 36°C. Quando  $w_{est}$  è maggiore di 11.5 g/kg, si riduce il range di temperatura in cui il sistema di poligenerazione garantisce un  $REP > 0$ ; in particolare, quando  $w_{est} > 13$  g/kg, il sistema di MCCHP è preferibile solo quando la temperatura esterna è maggiore di 28 °C. Infine, quando l'umidità specifica esterna è maggiore di 13 g/kg, il REP diventa negativo.

Ovviamente anche tutti gli altri componenti e apparecchiature presenti nel sistema di poligenerazione del laboratorio Unisannio possono essere oggetto attraverso il software "PoliLab" di analisi delle prestazioni in tempo reale e/o di analisi più complesse basate sull'elaborazione di serie storiche di dati sperimentali (cfr. Figure 28-31, Deliverable A).

### 2.3. Impianto di poligenerazione "SUN"

Con riferimento al software "PoliLab\_SUN" (cfr. § 4.4, Deliverable A) in Figura 13 vengono riportati i risultati di un test.

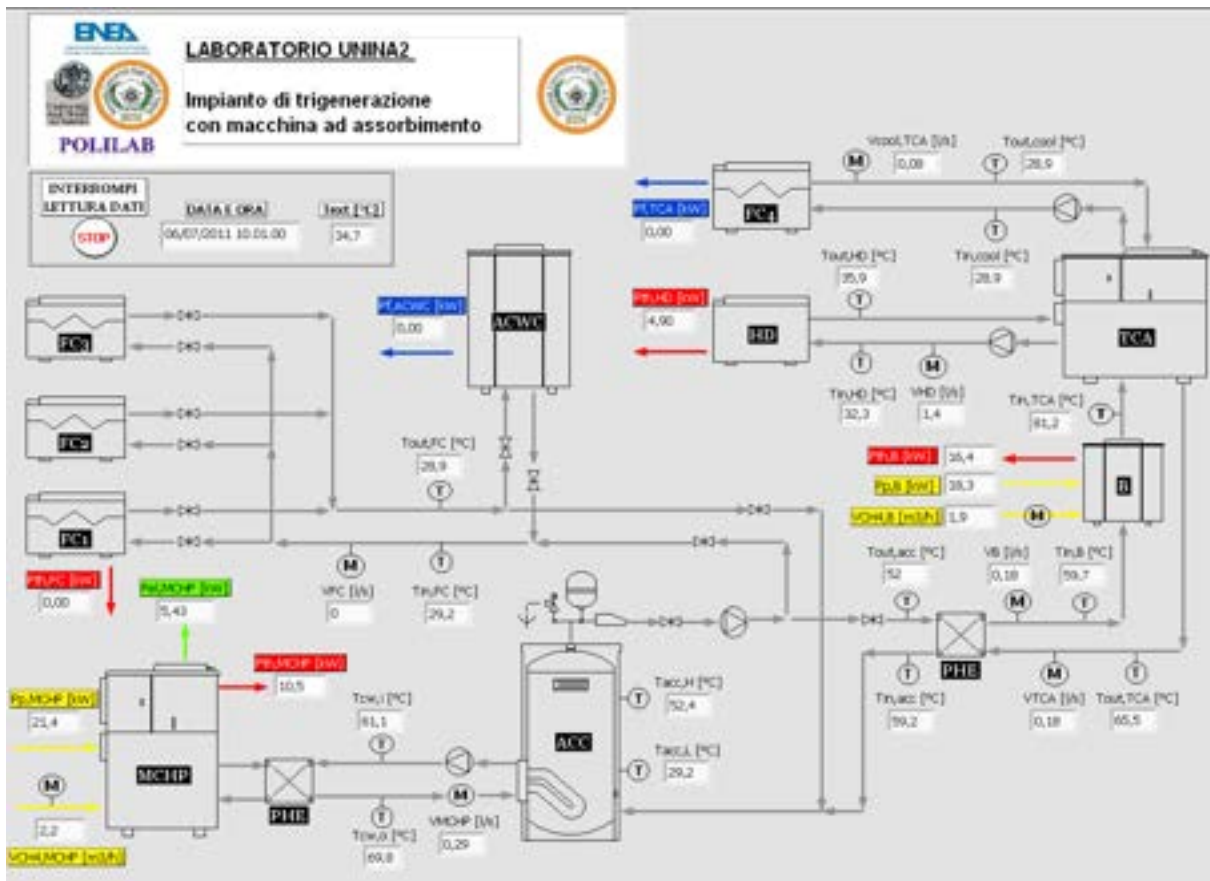


Figura 13. Maschera dell'impianto di poligenerazione della SUN

Il MCHP eroga una potenza elettrica pari a circa 5.4 kW e una potenza termica di 10.5 kW con un CUC prossimo al 74%.

Anche in questo caso si è proceduto alla post-elaborazione relativa ai risultati sperimentali ottenuti. In Figura 14 vengono riportati i risultati di una prova sperimentale da cui si evidenzia la potenza primaria fornita al MCHP ( $P_{p,MCHP}$ ), nonché alla caldaia di integrazione ( $P_{p,B}$ ). Nella stessa figura sono riportati gli output energetici del MCHP, della caldaia ed in particolare la potenza termica fornita dal MCHP ( $P_{th,MCHP}$ ) e dalla caldaia ( $P_{th,B}$ ) che contribuiscono ad alimentare la macchina frigorifera ad alimentazione indiretta ad attivazione termica (assorbitore monostadio, TCA). Dalla stessa figura è possibile ricavare l'effetto frigorifero che la TCA può fornire all'utente finale ( $P_{cool,TCA}$ ). Diagrammi di tal genere permettono di orientare le scelte di funzionamento del dispositivo per la "produzione" del freddo da attivare, o termicamente, quale l'assorbitore, o elettricamente, il chiller, attraverso l'interazione con il cogeneratore o con la rete elettrica collegata in parallelo all'impianto.

Le prestazioni della macchina frigorifera ad assorbimento risultano molto basse ( $COP = 0.3-0.4$ ) ed influenzano significativamente sia le prestazioni energetiche che l'impatto ambientale del sistema di poligenerazione, Figura 15.

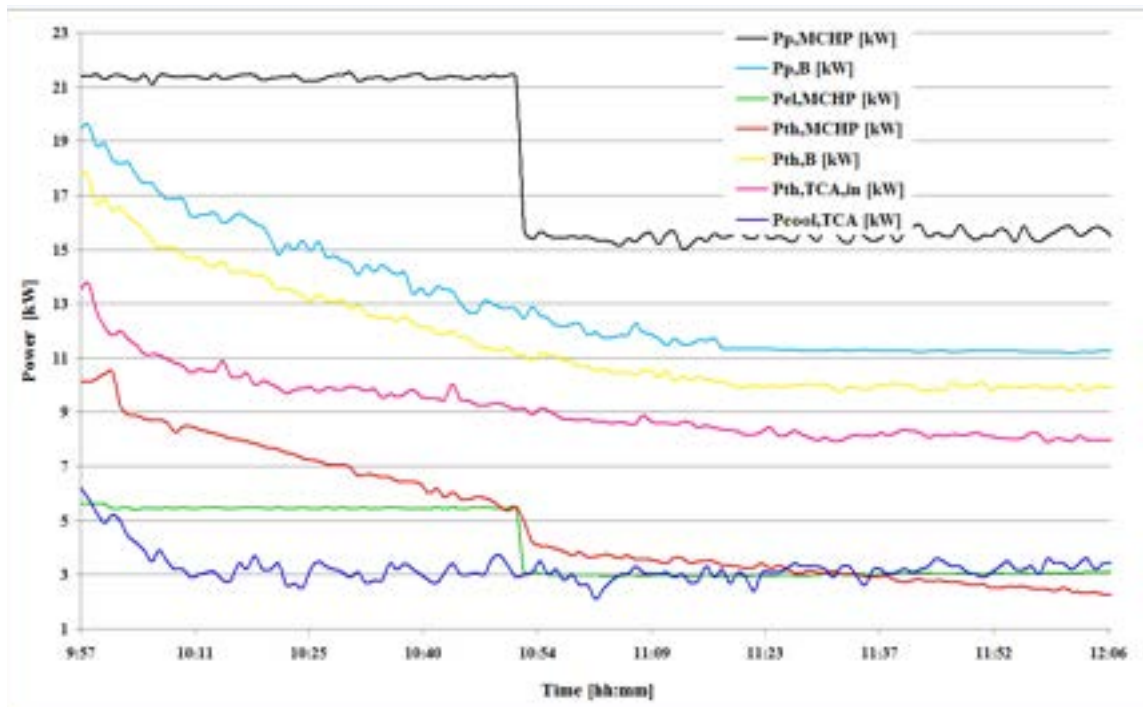


Figura 14. Potenze erogate e primarie dei componenti in funzionamento estivo

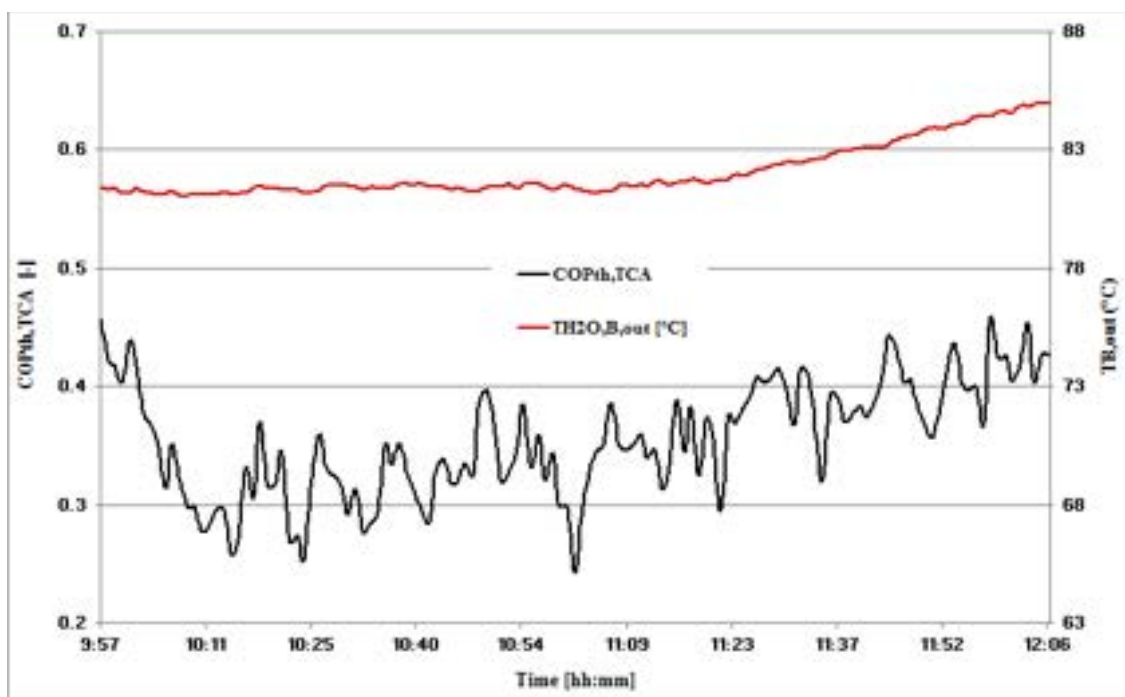


Figura 15. Andamento temporale del COP del TCA

Infatti in Figura 16 vengono riportati i CUC (PER: Primary Energy Ratio) del sistema di poligenerazione (MCCHP) e dei sistema di riferimento con cui va a confrontarsi. Il sistema di poligenerazione presenta delle prestazioni sempre inferiori a quelle del sistema, basato sulla “produzione” separata, sia nel caso del valore medio che caratterizza la nostra nazione (CS) che, a

maggior ragione, rispetto alla BAT.

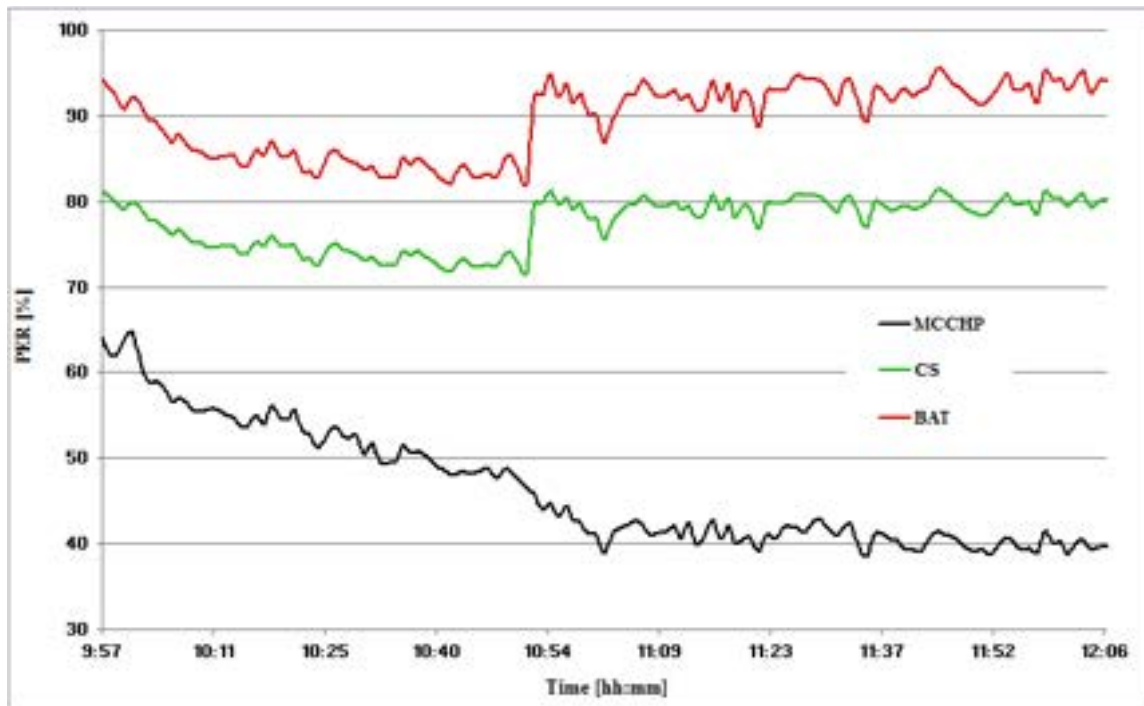


Figura 16. Andamento del CUC del sistema di poligenerazione e del sistema tradizionale

In Figura 17 evidentemente risulta che anche in termini di impatto ambientale il sistema proposto non risulta competitivo rispetto al sistema tradizionale.

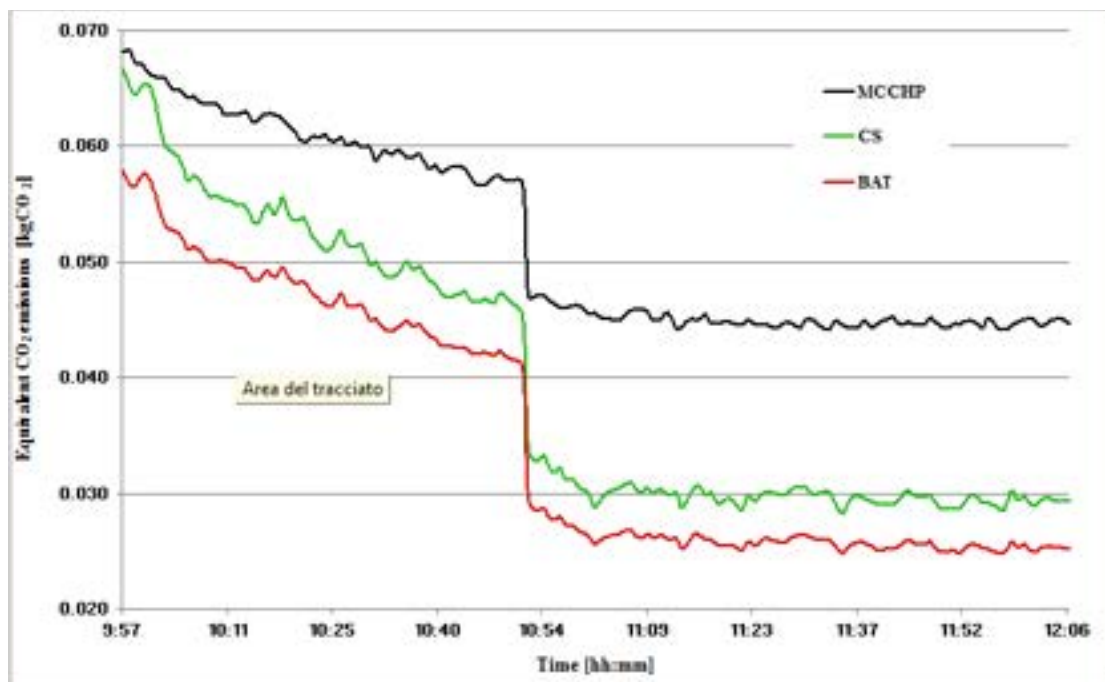


Figura 17. Andamento delle emissioni di CO<sub>2</sub> equivalente del sistema di poligenerazione e del sistema tradizionale

### 3. CONCLUSIONI

Come si è visto dagli gli esempi di risultati sperimentali riportati nel presente *deliverable*, per raggiungere obiettivi di risparmio di energia primaria e di contenimento di emissioni climalteranti, rispetto alla tradizionale “produzione” separata, devono essere presi in esame sistemi energetici complessi, di piccola taglia e ad elevata efficienza di conversione, in grado di soddisfare “in situ” richieste frigo-termo-elettriche differenziate.

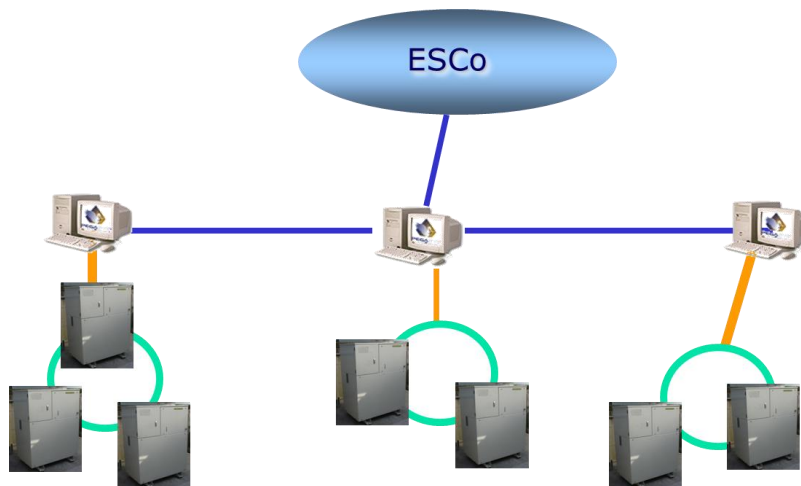
Purtroppo sussistono numerosi elementi che possono limitare la potenziale diffusione di tali sistemi di poligenerazione distribuita, in primo luogo il maggior costo rispetto ai tradizionali sistemi di conversione energetica.

In alcuni casi, come per la Pubblica Amministrazione o i singoli utenti privati, interventi interessanti sono difficili da implementare sia per una limitata risorsa finanziaria, che per la mancanza di un’approfondita conoscenza ed esperienza in campo energetico, che potrebbe portare ad una valutazione sbagliata degli interventi e quindi ad un aumento dei rischi ad essi collegati.

Inoltre, l’incremento dell’efficienza energetica e la riduzione dei costi richiede l’ottimizzazione gestionale di tali sistemi complessi di poligenerazione distribuiti, interfacciati bidirezionalmente con la rete elettrica e con reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento e, possibilmente, ibridizzati mediante l’integrazione di dispositivi di sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili.

Il funzionamento ottimale di sistemi di poligenerazione distribuiti sul territorio deve seguire logiche tipiche delle Virtual Power Plant, cioè di cluster di impianti collettivamente gestiti da un unico ente di controllo centrale, in una logica di fornitura di servizi energetici da parte di una ESCO, che trae la sua redditività dalla fornitura e gestione unitaria di micro-poligeneratori ibridi (Figura 18).

Riguardo alla remunerazione di una ESCO, occorre precisare che essa, oltre a percepire il canone dell’utente, può accedere anche ad un meccanismo di incentivazione, come quello dei Titoli di Efficienza Energetica (TEE), che è sostanzialmente precluso al singolo utente finale; infatti i TEE, che certificano i risparmi conseguibili da ciascun intervento di risparmio energetico mediante apposite schede tecniche predisposte dall’AEEG (come, ad esempio, la scheda tecnica 21-bis relativa a piccoli sistemi di cogenerazione per la climatizzazione invernale ed estiva degli ambienti e la produzione di acqua calda sanitaria), hanno una taglia minima difficilmente raggiungibile da singole utenze residenziali o del piccolo terziario. Ciò non accade invece per le ESCO, che possono gestire numerosi impianti ad elevata efficienza energetica, cumulandone i relativi risparmi energetici ed ottenendo i corrispondenti TEE.



**Figura 18.** Schema di controllo centralizzato di una VPP basata su impianti di micro\_cogenerazione o micro\_poligenerazione

In tale ottica, è di fondamentale importanza progettare, realizzare e provare anche per applicazioni di piccola taglia adeguati sistemi di monitoraggio da remoto che, in ogni istante, permettano di visualizzare le prestazioni e lo stato dei componenti dei diversi sistemi gestiti, di agire sulle variabili di controllo disponibili per adeguarne le prestazioni alla variabilità delle condizioni operative, nonché di confrontare il sistema proposto con quello di riferimento, evidenziando i benefici.

Il software “*PoliLab*” consente di creare un “laboratorio virtuale” per la condivisione telematica dei risultati e l’attuazione di prove finalizzate all’analisi sperimentale di una VPP attivabile e gestibile in remoto e basata sui dispositivi di poligenerazione di piccola taglia già operativi, che contengono tecnologie diverse per applicazioni distribuite in utenze residenziali e del piccolo terziario.

Tale software, oltre a consentire l’analisi disgiunta dei singoli impianti che ne fanno parte, sia mediante il monitoraggio in tempo reale, che attraverso la post elaborazione dei dati sperimentali, consente anche un’analisi congiunta degli impianti stessi.

Nello specifico questo strumento si presta a:

- condividere informazioni tra ricercatori diversi attraverso una comune connessione Internet;
- svolgere prove di laboratorio per tecnici e studenti interessati a tematiche energetiche;
- analizzare e controllare impianti distribuiti sul territorio in un’ottica di gestione “centralizzata”, ad esempio da parte di ESCO, finalizzata ad incrementare la redditività economica, i risparmi energetici ed il contenimento di CO<sub>2</sub> equivalente;
- provare in reali condizioni di esercizio algoritmi di ottimizzazione termo-economica in funzione di variabili “esterne”, quali quelle climatiche e/o legate ai costi dei vettori energetici, ed “interne”, quali quelle relative ai parametri operativi delle macchine,

anch'essi modificabili in linea.

In relazione alle criticità emerse in fase di implementazione e prova di tale sistema, va evidenziato che in tale applicazione si analizzano installazioni preesistenti già strumentate in maniera pervasiva. Né d'altra parte si può ipotizzare di poter influire in maniera determinante sui già alti costi d'impianto con costosi sistemi di acquisizione/elaborazione dati. Pertanto occorrerà incentivare:

- l'utilizzo di software e/o standard di basso costo, elevata affidabilità come fatto nell'ambito di tale progetto;
- lo sviluppo di standard di rappresentazione e comunicazione dei dati, auspicabilmente residenti negli elementi di diagnostica dei singoli sistemi.

#### **4. BIBLIOGRAFIA**

- Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council of the 11 February 2004 on the promotion of cogeneration based on the useful heat demand in the internal energy market and amending Directive 92/42/EEC, Official Journal of the European Union (2004);
- M. Dentice d'Accadia, M. Sasso, S. Sibilio, L. Vanoli, (2003), Micro combined heat & power (MCHP) in residential and light commercial applications, *Applied Thermal Engineering*, vol 23, pp. 1247-1259;
- M. Dentice d'Accadia, M. Sasso, S.Sibilio, R.Vanoli, (1999), Applicazioni di Energetica, Liguori Editore;
- C. Roselli, M. Sasso, S. Sibilio, (2010), Domestic Polygeneration Practices for Energy Saving in Building, Proc. of Central Europe Towards Sustainable Building 2010 (CESB10), Praga, Repubblica Ceca, 30 Giugno - 2 Luglio;
- G. Chicco, P. Mancarella, (2009), Distributed multi-generation: A comprehensive view, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, pp. 535–551;
- P. Lombardi, P. Powalko, K. Rudion, (2009), Optimal operation of a Virtual Power Plant, Proc. of Power & Energy Society General Meeting 2009, 26-30 July 2009, Calgary, Canada;
- C. Schulz, G. Röder, M. Kurrat, (2005), Virtual Power Plants with combined heat and power micro-units, Proc. of International Conference on Future Power Systems, 15-18 Nov. 2005, Amsterdam;

- Y. Shi, T. Chresten, P. Bjarne, (2011), Is micro-CHP price controllable under price signal controlled Virtual Power Plants?, Proc. of Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES, 17-19 January, Anaheim, CA, USA;
- G. Angrisani, F. Minichiello, C. Roselli, M. Sasso, G.P. Vanoli, (2009), Experimental analysis of small scale polygeneration system based on a natural gas-fired micro-CHP and Hybrid HVAC system equipped with a desiccant wheel, Proc. of 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ISSN 2175-5426, pp. 635-644, Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, August 31 – September 3;
- C. Roselli, P. Tzscheutschler, M. Sasso, S. Sibilio, (2010), Experimental analysis of small scale cogenerators based on natural gas fired reciprocating internal combustion engine, Proc. of 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA2010), ISBN 978-0-7918-3877-8, Istanbul, Turchia, 12-14 Luglio;
- C. Roselli, M. Sasso, S. Sibilio, P. Tzscheutschler, (2011), Experimental analysis of microcogenerators based on different prime movers, Energy and Buildings, Vol. 43, pp. 796–804;
- Commission Decision of 21 December 2006 establishing harmonised efficiency reference values for separate production of electricity and heat in application of Directive 2004/8/EC of the European Parliament and of the Council, document number C(2006) 6817, Official Journal of the European Union, 2007;
- R. Possidente, M. Sasso, C. Roselli, S. Sibilio, (2009), Small scale decentralized polygeneration systems, Proc. of 22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ISSN 2175-5426, pp. 605-614, Foz do Iguaçu, Paraná, Brazil, August 31 – September 3.