



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Micro-trigenerazione nel settore residenziale con l'utilizzo di
motori a combustione interna: sviluppo di un modello
matematico di un assorbitore a bromuro di litio

M. Badami, A. Portoraro



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Energetica



MICRO-TRIGENERAZIONE NEL SETTORE RESIDENZIALE CON L'UTILIZZO DI MOTORI A
COMBUSTIONE INTERNA: SVILUPPO DI UN MODELLO MATEMATICO DI UN ASSORBITORE A
BROMURO DI LITIO

M. Badami, A. Portoraro (Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica)

Luglio 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'Uso dell'Energia Elettrica

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

INDICE

Allegato – legenda.....	4
Introduzione.....	5
Parte A – Sviluppo funzionalità aggiuntive al modello di cogeneratore con motore a combustione interna.....	6
1. Valorizzazione energia elettrica ceduta al GSE.....	6
2. Implementazione dello scambio sul posto.....	9
3. Valorizzazione costo combustibile impiegato nella caldaia di integrazione e riserva...	10
Parte B – Sviluppo di un modello in Matlab Simulink di assorbitore a bromuro di litio e sua integrazione nel modello di cogenerazione.....	11
1. Definizione delle mappe di funzionamento.....	11
2. Realizzazione del modello Simulink.....	15
2.1. Struttura, input e output.....	15
2.2. Metodologia di calcolo.....	16
3. Risultati simulazioni.....	18
3.1. Simulazione delle mappe sperimentali.....	18
3.2. Simulazione di funzionamento estivo.....	20
4. Integrazione con il modello CHP.....	25
4.1. Assorbitore a bromuro di litio.....	26
4.2. Chiller di integrazione e riserva.....	27
4.3. Accumulo termico (energia frigorifera).....	28
4.4. Valutazioni economiche.....	30
4.5. Modifiche alle strategie di funzionamento.....	33
4.6. Simulazione di funzionamento estivo.....	34
Simulazione 1: inseguimento carico frigorifero.....	34
Simulazione 2: inseguimento carico elettrico.....	39

Indice delle Figure

PARTE A

Figura 1-1 – Blocco di calcolo dell'energia elettrica ceduta al GSE	7
Figura 1-2 – Dettaglio del blocco di calcolo dell'energia elettrica ceduta al GSE.....	7
Figura 1-3 – Modello completo.....	8
Figura 1-4 – Blocco calcoli economici.....	8
Figura 1-5 – Blocco di valorizzazione economica dell'energia elettrica ceduta al GSE	9
Figura 3-1 – Blocco di calcolo del volume di gas bruciato in caldaia	10
Figura 3-2 – Blocco di valorizzazione economica del gas bruciato in caldaia.....	10

PARTE B

Figura 1-1 – Mappe sperimentali dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 10	11
Figura 1-2 – Mappe sperimentali dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 20	12
Figura 1-3 – Mappe sperimentali dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 30	12
Figura 1-4 – Mappe sperimentali adimensionalizzate dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 10	12
Figura 1-5 – Mappe sperimentali adimensionalizzate dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 20	13
Figura 1-6 – Mappe sperimentali adimensionalizzate dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 30	13
Figura 1-7 – Potenza termica adimensionalizzata per tutte le taglie (temperatura torre a parametro)	14
Figura 1-8 – COP medio per ogni taglia di macchina e per ogni temperatura di acqua di torre (curva rossa) ..	14
Figura 2-1 – Modello Simulink dell'assorbitore.....	15
Figura 4-1 – Modello completo dell'impianto di trigenerazione	25
Figura 4-2 – Integrazione fra modello del cogeneratore e assorbitore a bromuro di litio	26
Figura 4-3 – Modello dell'assorbitore a bromuro di litio.....	27
Figura 4-4 – Maschera di inserimento dei dati di taglia dell'assorbitore	27
Figura 4-5 – Calcolo della potenza termica in eccesso dispersa in ambiente.....	27
Figura 4-6 – Modello del chiller di integrazione e riserva	28
Figura 4-7 – Maschera per l'inserimento dei dati di targa del chiller	28
Figura 4-8 – Modello dell'accumulo termico.....	29
Figura 4-9 – Maschera per l'inserimento dei dati caratteristici dell'accumulo	30
Figura 4-10 – Blocco di calcoli economici	30
Figura 4-11 – Blocco di calcolo del mancato acquisto di energia elettrica	31
Figura 4-12 – Blocco di calcolo del costo di acquisto dell'energia elettrica usata nel chiller	31
Figura 4-13 – Blocco di calcolo del costo di acquisto dell'energia elettrica.....	32
Figura 4-14 – Blocco di valorizzazione dell'energia elettrica risparmiata	32
Figura 4-15 – Maschera per l'inserimento del valore del costo di acquisto dell'energia elettrica	32
Figura 4-16 – Blocco di valorizzazione dell'energia elettrica autoconsumata	32
Figura 4-17 – Maschera di configurazione del relay di azionamento del trigeneratore	33
Figura 4-18 – Maschera di configurazione del relay di azionamento del chiller	33

Indice delle Tabelle

PARTE B

Tabella 1-1 – Potenza termica adimensionalizzata per tutte le taglie (temperatura torre a parametro)	13
Tabella 1-2 – Calcolo del COP medio per ogni temperatura.....	14
Tabella 3-1 – Dati climatici in input e output durante la simulazione.....	18

Allegato – legenda

$E_{el,GSE}$	Energia elettrica ceduta in rete al GSE durante l'inseguimento termico
$T_{db,amb}$	Temperatura bulbo secco aria esterna
$T_{wb,amb}$	Temperatura bulbo umido aria esterna
RH	Umidità relativa dell'aria esterna
p_{amb}	Pressione ambiente
$T_{in,hot}$	Temperatura acqua calda in ingresso all'assorbitore
$T_{out,tw}$	Temperatura acqua di raffreddamento in uscita dalla torre (ingresso assorbitore)
$T_{in,tw}$	Temperatura acqua di raffreddamento in ingresso alla torre (uscita assorbitore)
P_{th}	Potenza termica fornita dal cogeneratore e in ingresso all'assorbitore
P_c	Potenza frigorifera prodotta dall'assorbitore
P_{tw}	Potenza termica smaltita dalla torre evaporativa
\dot{m}_{tw}	Portata acqua nella torre evaporativa
$\dot{m}_{air,tw}$	Portata aria nella torre evaporativa
$V_{gn,b}$	Volume di gas naturale bruciato in caldaia

Introduzione

Il presente documento rappresenta il Rapporto Finale delle attività svolte in seno all'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, per un'attività di ricerca dal titolo: "Micro - trigenerazione nel settore residenziale con l'utilizzo di motori a combustione interna: Sviluppo di un modello matematico di un assorbitore a bromuro di litio".

Tale rapporto ha lo scopo di illustrare i risultati conseguiti grazie alle ricerche svolte dal Dipartimento di Energetica, che hanno portato alla realizzazione di un modello matematico per la simulazione di un assorbitore a bromuro di litio di piccola taglia.

Il modello è stato realizzato per mezzo del software Matlab Simulink, e consente di prevedere la produzione di potenza frigorifera erogata dall'assorbitore, a fronte di una determinata temperatura di ingresso dell'acqua calda, delle condizioni ambiente, e della potenza termica nominale in ingresso all'assorbitore (derivante dal cogeneratore accoppiato all'assorbitore). Viene inoltre stimata la portata d'aria della torre evaporativa, sulla base di parametri progettuali tipici impiegati durante il dimensionamento di tali macchine.

Al fine di testare la validità del modello sono state infine simulate le curve di potenza termica e potenza frigorifera sperimentali fornite dal costruttore dei due modelli di assorbitore Yazaki WFC-SC10 e WFC-SC30, ed è stato simulato il funzionamento del modello utilizzando come input un set di dati climatici estivi della città di Roma.

Il modello così realizzato è stato poi integrato al modello di cogeneratore con motore a combustione interna sviluppato, dallo stesso Dipartimento di Energetica, in una precedente collaborazione con Enea. L'integrazione dei due sistemi è volta alla simulazione su Matlab Simulink di un sistema trigenerativo di piccola taglia. Sono inoltre riportati alcuni test per verificare il corretto funzionamento del modello completo.

Unitamente a tale integrazione, sono state infine sviluppate alcune funzionalità aggiuntive al modello di cogeneratore, quali la valorizzazione dell'energia elettrica ceduta al GSE durante il funzionamento in inseguimento termico, e la valorizzazione costo combustibile impiegato nella caldaia di integrazione e riserva.

Parte A – Sviluppo funzionalità aggiuntive al modello di cogeneratore con motore a combustione interna

1. Valorizzazione energia elettrica ceduta al GSE

Nel funzionamento ad inseguimento termico di un cogeneratore, può capitare che l'energia elettrica prodotta non venga istantaneamente completamente autoconsumata (il carico elettrico dell'utenza è inferiore alla potenza generata dal motore). In tal caso, il modello consente di calcolare l'energia elettrica prodotta in eccesso durante il periodo della simulazione, valorizzandola secondo le tariffe del ritiro dedicato del GSE, prezzi minimi garantiti¹.

Il regime di cessione dell'energia elettrica mediante ritiro dedicato è regolato dalla delibera AEEG 280/2007 (e s.m.i.): "Modalità e condizioni tecnico-economiche per il ritiro dell'energia elettrica ai sensi dell'articolo 13, commi 3 e 4, del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387/03, e del comma 41 della legge 23 agosto 2004, n. 239/04". Il ritiro dedicato rappresenta una modalità semplificata a disposizione dei produttori per il collocamento sul mercato dell'energia elettrica immessa in rete, alternativa ai contratti bilaterali o alla vendita diretta in borsa. Il produttore che intenda aderire al regime di ritiro dedicato è tenuto a presentare una apposita istanza e a sottoscrivere una convenzione con il GSE attraverso il sito internet del GSE, sezione "Ritiro dedicato". A tale indirizzo il produttore potrà, inoltre, trovare tutte le informazioni necessarie e il supporto tecnico utile a portare a termine la domanda.

E' prevista la possibilità di richiedere il ritiro dedicato per l'energia elettrica prodotta dagli impianti:

- di potenza apparente nominale inferiore a 10 MVA alimentati **da qualunque fonte**;
- di qualsiasi potenza nel caso di fonti rinnovabili non programmabili quali eolica, solare, geotermica, del moto ondoso, maremotrice, idraulica (limitatamente agli impianti ad acqua fluente);
- di potenza apparente nominale uguale o superiore a 10 MVA, alimentati da fonti rinnovabili programmabili purché nella titolarità di un autoproduttore (così come definito dall'articolo 2, comma 2, del D.Lgs. 79/1999).

Per gli impianti di potenza attiva nominale fino a 1 MW sono stati definiti prezzi minimi garantiti (articolo 7, comma 1, delibera AEEG 280/2007) aggiornati periodicamente dall'AEEG. I prezzi minimi garantiti, richiesti dal produttore alla presentazione dell'istanza, vengono riconosciuti dal GSE limitatamente ai primi 2 milioni di kWh di energia elettrica immessa in rete su base annua. Nel caso in cui al termine di ciascun anno solare la valorizzazione a prezzi minimi garantiti dovesse risultare inferiore a quella ottenibile a prezzi di mercato, il GSE riconoscerà al produttore il relativo conguaglio.

I valori dei prezzi minimi garantiti aggiornati per l'anno 2011 sono i seguenti:

¹ [http://www.gse.it/attivita/Ritiro%20dedicato/Documents/Prezzi%20minimi%20garantiti%202011%20\(24-01-11\).pdf](http://www.gse.it/attivita/Ritiro%20dedicato/Documents/Prezzi%20minimi%20garantiti%202011%20(24-01-11).pdf)

- fino a 500.000 kWh annui 103,4 €/MWh
- da oltre 500.000 kWh fino a 1.000.000 kWh annui 87,2 €/MWh
- da oltre 1.000.000 kWh fino a 2.000.000 kWh annui 76,2 €/MWh

Superati i 2.000.000 di kWh annui, il GSE riconosce al produttore, per ciascuna ora, il prezzo di mercato riferito alla zona in cui è collocato l'impianto. Nell'ambito del presente lavoro, viene trattata la cogenerazione di piccola taglia, ovvero in un range 100 – 300 kW. Il superamento dei 2.000.000 kWh si avrebbe pertanto, considerando la taglia massima di 300 kW, per circa 6.700 ore di funzionamento annue, valore che non viene raggiunto quando si considerano applicazioni civili e residenziali. Si è pertanto implementata unicamente la tariffazione a scaglioni relativa ai prezzi minimi garantiti.

Il modello calcola dapprima l'energia elettrica che viene prodotta e non istantaneamente autoconsumata durante il funzionamento in inseguimento termico (Figura 1-1 e Figura 1-2)

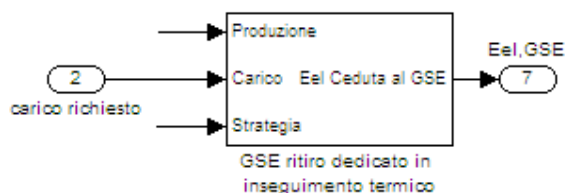


Figura 1-1 – Blocco di calcolo dell'energia elettrica ceduta al GSE

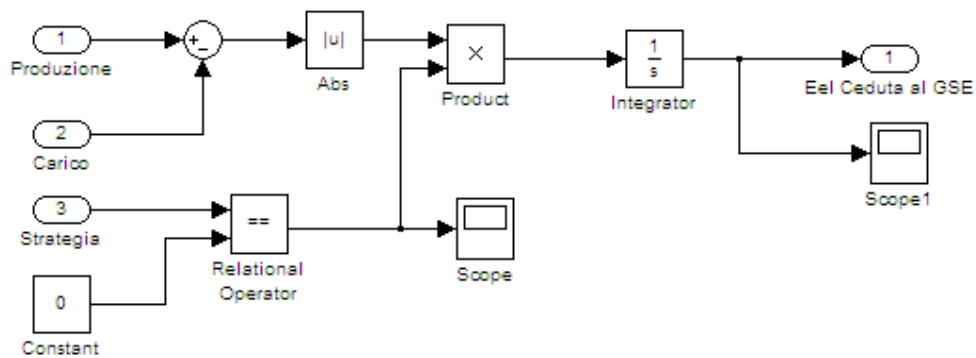


Figura 1-2 – Dettaglio del blocco di calcolo dell'energia elettrica ceduta al GSE

Come si evince dalla Figura 1-3 illustrativa del modello completo, l'energia elettrica ceduta al GSE (indicata con $E_{el,GSE}$) viene inviata al blocco "Calcoli economici" per la relativa valorizzazione (Figura 1-4). All'interno della sezione "Calcoli economici" è stato inserito il blocco che implementa il calcolo degli scaglioni di produzione e la relativa monetizzazione (Figura 1-5).

Sviluppo di un modello matematico di un assorbitore a bromuro di litio

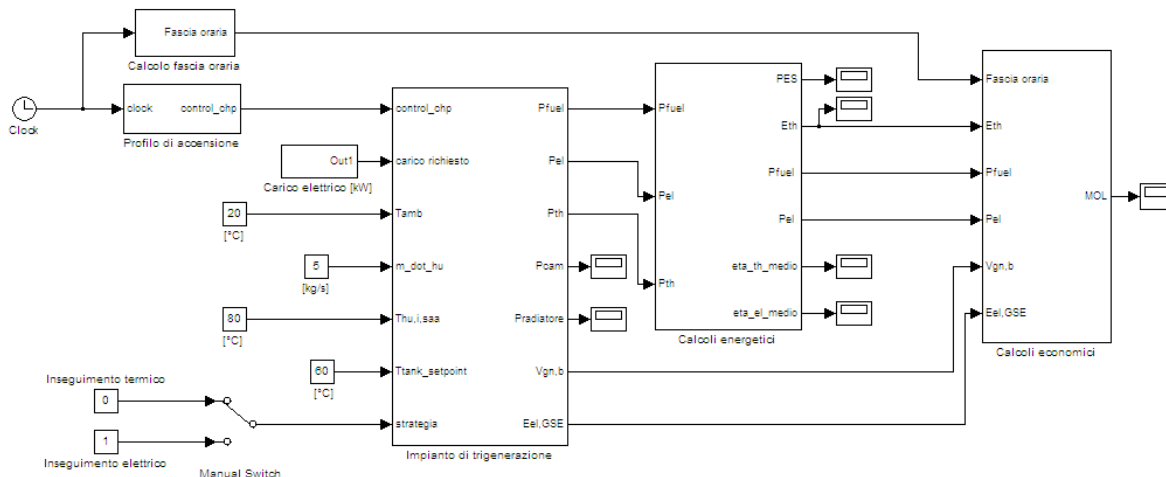


Figura 1-3 – Modello completo

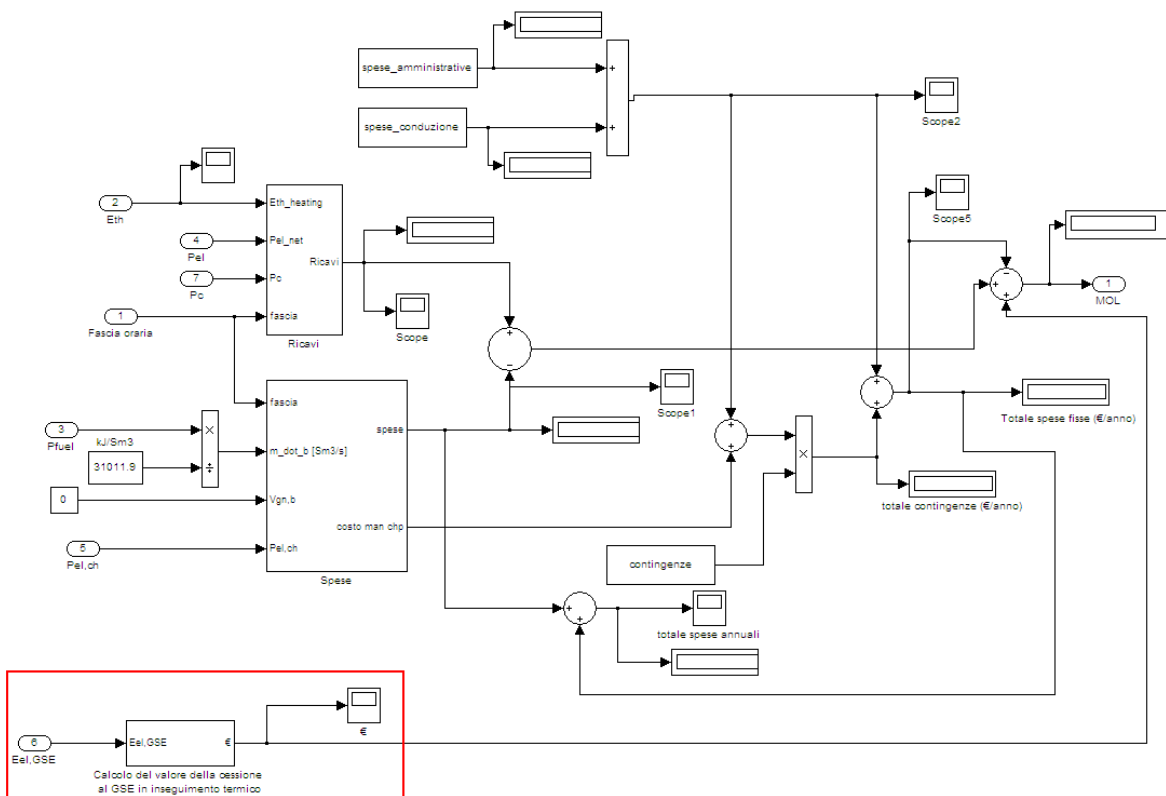


Figura 1-4 – Blocco calcoli economici

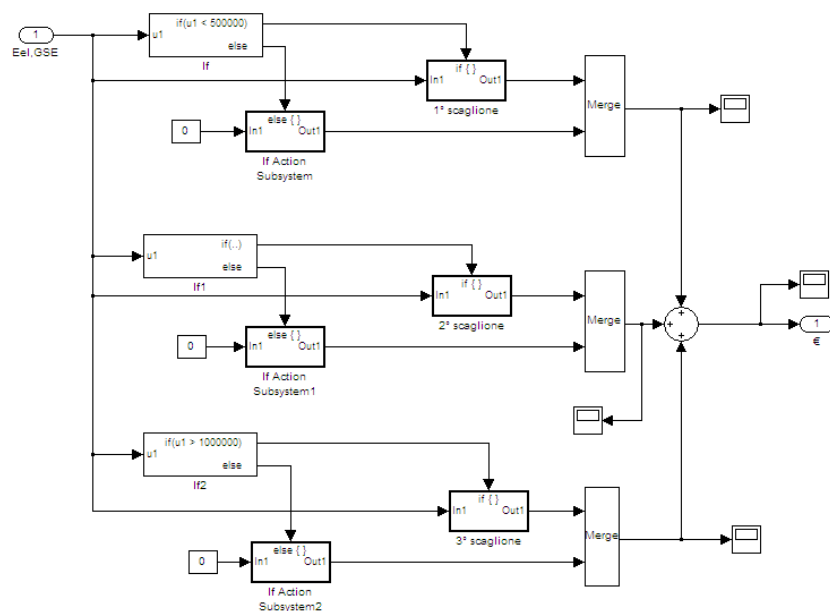


Figura 1-5 – Blocco di valorizzazione economica dell'energia elettrica ceduta al GSE

2. Implementazione dello scambio sul posto

Lo scambio sul posto (Del. AEEG n. 74/08²) è un servizio che viene erogato dal GSE dal giorno 1° Gennaio 2009 su istanza dei soggetti interessati. Tale servizio consente all'utente che abbia la titolarità o la disponibilità di un impianto per la produzione di energia elettrica, la compensazione tra il valore associabile all'energia elettrica prodotta e immessa in rete e il valore associabile all'energia elettrica prelevata e consumata in un periodo differente da quello in cui avviene la produzione. I soggetti che possono richiedere lo scambio sul posto sono coloro nella cui disponibilità o titolarità vi sia uno o più impianti con le seguenti caratteristiche:

- alimentati da fonti rinnovabili di potenza fino a 20 kW;
- alimentati da fonti rinnovabili di potenza fino a 200 kW (se entrati in esercizio dopo il 31 dicembre 2007);
- di cogenerazione ad alto rendimento di potenza fino a 200 kW.

Limitandosi pertanto l'applicazione dello scambio sul posto agli impianti di cogenerazione alla potenza di 200 kW_{el}, e considerando che le applicazioni descritte nell'ambito del presente lavoro arrivano fino a circa 300 kW_{el}, non si è ritenuto di implementare tale potenzialità nel modello, riservandola a sviluppi successivi incentrati sull'analisi e sviluppo di modelli di cogeneratori di taglie inferiori.

² <http://www.autorita.energia.it/it/docs/08/074-08arg.htm>

3. Valorizzazione costo combustibile impiegato nella caldaia di integrazione e riserva

È stato implementato nel modello il calcolo del consumo di gas naturale in ingresso alla caldaia di integrazione e riserva, e la relativa valorizzazione economica. In Figura 3-1 è riportato il blocco “Caldaia” con il calcolo del volume di gas consumato ($V_{gn,b}$). Tale valore entra quindi nel blocco “Calcoli economici”, dove viene calcolato il relativo costo (Figura 1.7).

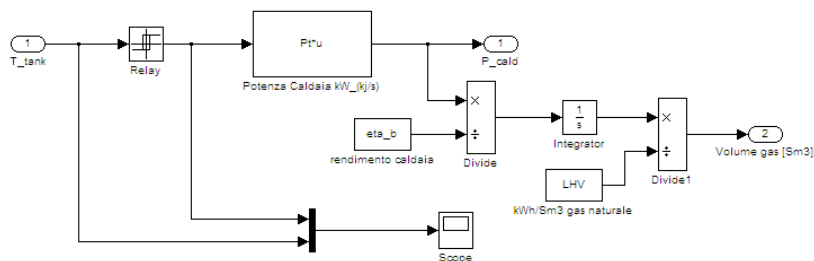


Figura 3-1 – Blocco di calcolo del volume di gas bruciato in caldaia

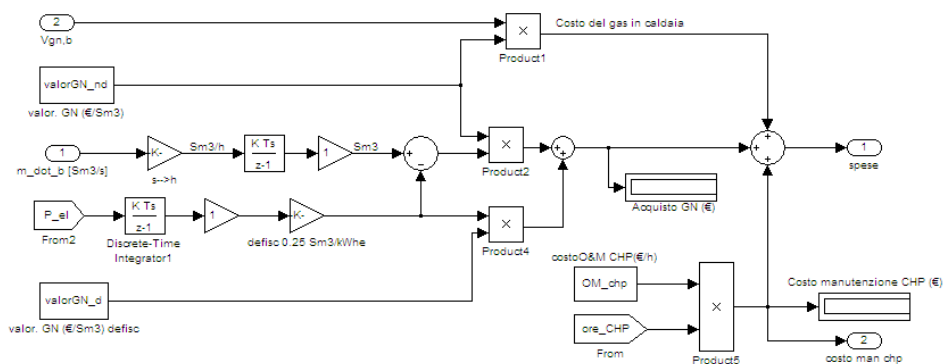


Figura 3-2 – Blocco di valorizzazione economica del gas bruciato in caldaia

Parte B – Sviluppo di un modello in Matlab Simulink di assorbitore a bromuro di litio e sua integrazione nel modello di cogenerazione

1. Definizione delle mappe di funzionamento

La presente sezione intende mostrare i punti principali relativi alla definizione della mappe di funzionamento dell'assorbitore a bromuro di litio.

Il funzionamento della macchina è stato simulato per mezzo delle mappe sperimentali degli assorbitori Yazaki WFC-SC 10, 20 e 30 (Figure 1.1 – 1.3). Ogni mappa riporta il valore della potenza frigorifera prodotta dalla macchina (P_c), e della relativa potenza termica assorbita (P_{th}), in funzione della temperatura dell'acqua calda in ingresso ($T_{in,hot}$ in ascissa). Le mappe sono inoltre parametrizzate in funzione della temperatura di raffreddamento dell'assorbitore (il raffreddamento avviene grazie all'acqua fornita da una torre evaporativa). Sono previste in particolare quattro temperature di acqua di torre (T_{tw}): 27, 29.5, 31 e 32 °C.

Per ogni mappa, il punto nominale di funzionamento indicato dal costruttore è quello in cui:

- $T_{in,hot} = 88.6$ °C
- $T_{tw} = 31$ °C

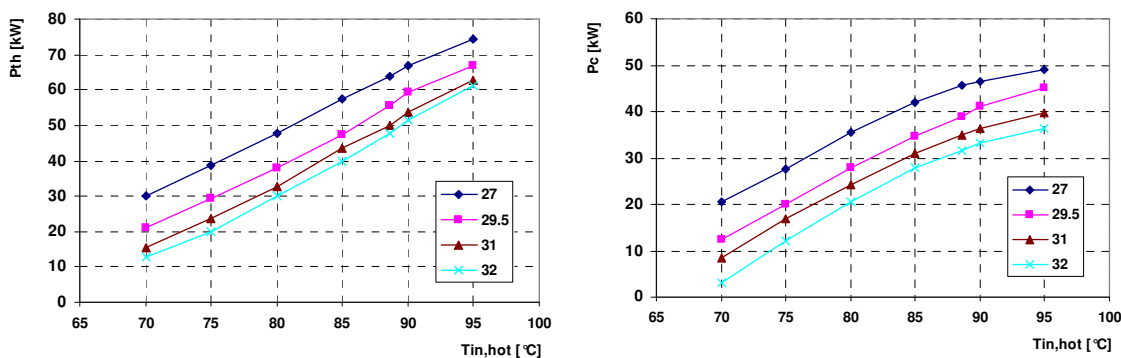


Figura 1-1 – Mappe sperimentali dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 10

Sviluppo di un modello matematico di un assorbitore a bromuro di litio

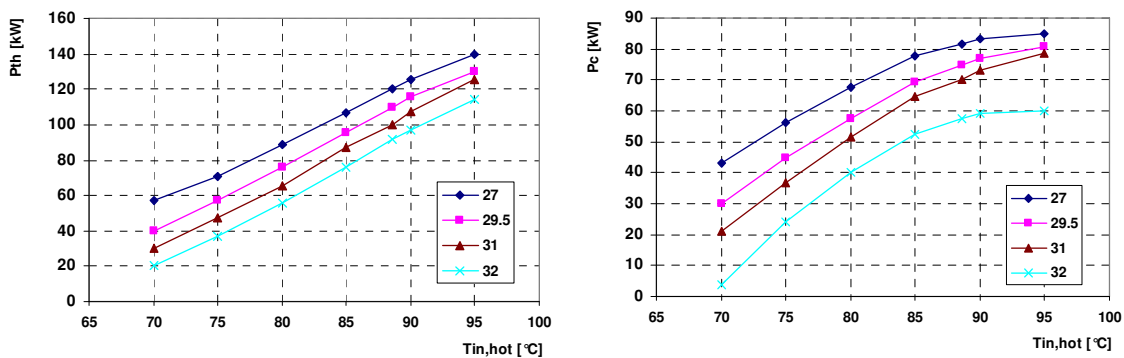


Figura 1-2 – Mappe sperimentali dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 20

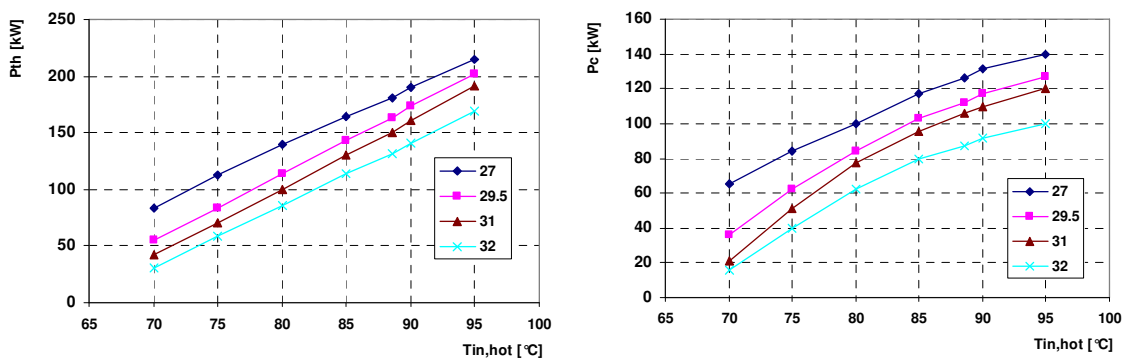


Figura 1-3 – Mappe sperimentali dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 30

Le mappe fornite dal produttore sono state adimensionalizzate in riferimento alle condizioni nominali di funzionamento indicate dal produttore stesso. Le curve adimensionalizzate sono riportate nelle figure seguenti.

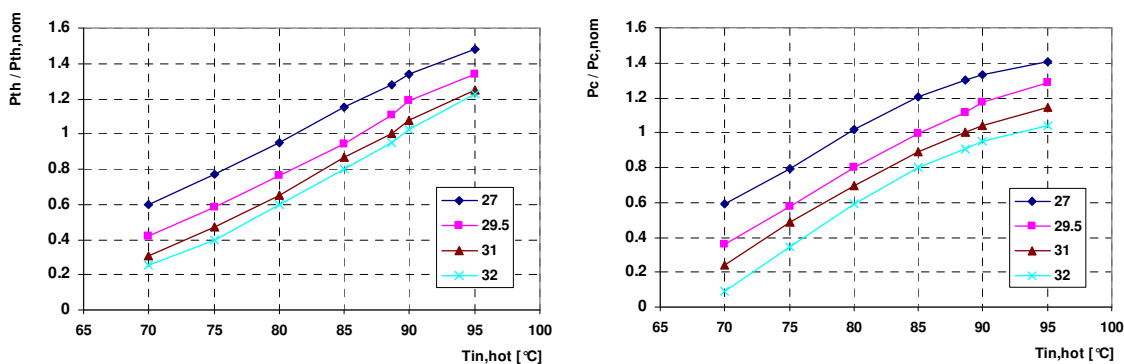


Figura 1-4 – Mappe sperimentali adimensionalizzate dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 10

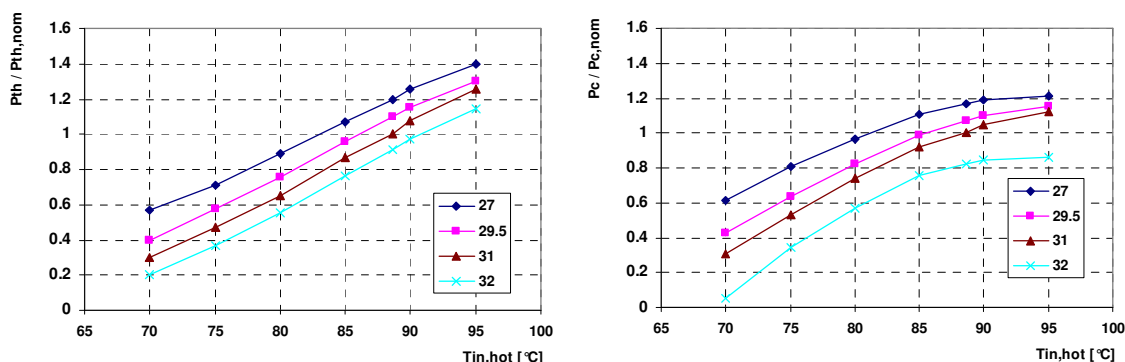


Figura 1-5 – Mappe sperimentali adimensionalizzate dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 20

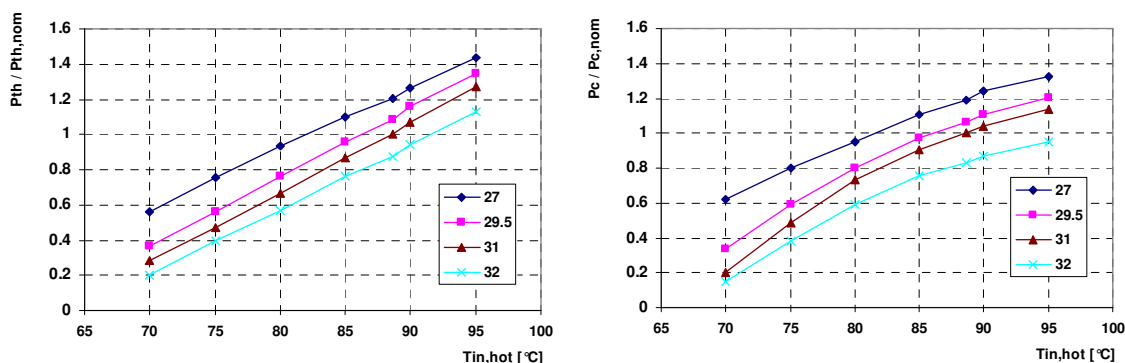


Figura 1-6 – Mappe sperimentali adimensionalizzate dell'assorbitore Yazaki WFC-SC 30

Si è quindi costruita una mappa della potenza termica adimensionalizzata valida per tutte le taglie, parametrizzata in funzione della temperatura dell'acqua di torre, e al variare della temperatura dell'acqua calda in ingresso. I risultati sono riportati in Tabella 1-1, e in forma grafica in Figura 1-7.

Pth / Pth,nom	27				29.5				31				32			
	WFC-10	WFC-20	WFC-30	MEDIA	WFC-10	WFC-20	WFC-30	MEDIA	WFC-10	WFC-20	WFC-30	MEDIA	WFC-10	WFC-20	WFC-30	MEDIA
70	0.600	0.569	0.559	0.576	0.422	0.400	0.364	0.395	0.308	0.299	0.284	0.297	0.252	0.200	0.203	0.218
75	0.772	0.709	0.753	0.745	0.584	0.572	0.557	0.571	0.470	0.470	0.468	0.469	0.400	0.369	0.395	0.398
80	0.952	0.890	0.933	0.925	0.762	0.757	0.759	0.759	0.654	0.651	0.667	0.657	0.600	0.555	0.571	0.575
85	1.152	1.070	1.098	1.107	0.944	0.955	0.956	0.952	0.870	0.870	0.869	0.870	0.800	0.760	0.759	0.773
88.6	1.278	1.200	1.207	1.228	1.110	1.099	1.084	1.098	1.000	1.000	1.000	1.000	0.952	0.913	0.873	0.913
90	1.336	1.253	1.266	1.285	1.188	1.155	1.157	1.167	1.076	1.076	1.070	1.074	1.028	0.969	0.942	0.980
95	1.484	1.400	1.435	1.440	1.338	1.301	1.347	1.329	1.252	1.253	1.275	1.260	1.228	1.141	1.126	1.165

Tabella 1-1 – Potenza termica adimensionalizzata per tutte le taglie (temperatura torre a parametro)

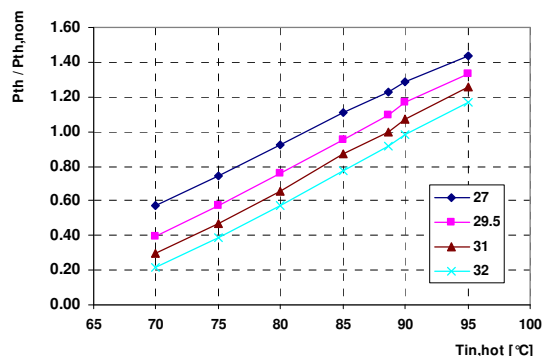


Figura 1-7 – Potenza termica adimensionalizzata per tutte le taglie (temperatura torre a parametro)

Analogamente, dal rapporto fra la potenza frigorifera prodotta e la potenza termica assorbita, per ogni macchina è stato calcolato il COP per ogni temperatura di acqua in ingresso, e per ogni temperatura di acqua di torre. E' stato poi calcolato un COP medio, valido per ogni macchina e per ogni temperatura acqua di torre, in funzione della sola temperatura acqua calda in ingresso all'assorbitore. I risultati sono riportati in Tabella 1-2.

COP	WFC-SC 10				WFC-SC 20				WFC-SC 30				MEDIA
	27	29.5	31	32	27	29.5	31	32	27	29.5	31	32	
75	0.72	0.68	0.72	0.60	0.79	0.78	0.79	0.65	0.75	0.75	0.73	0.68	0.72
80	0.75	0.73	0.74	0.69	0.76	0.76	0.79	0.72	0.72	0.74	0.77	0.73	0.74
85	0.73	0.73	0.71	0.70	0.73	0.72	0.74	0.69	0.71	0.72	0.73	0.70	0.72
88.6	0.71	0.70	0.70	0.66	0.68	0.68	0.70	0.63	0.70	0.69	0.70	0.67	0.68
90	0.70	0.69	0.67	0.64	0.66	0.67	0.68	0.61	0.69	0.67	0.69	0.65	0.67
95	0.66	0.67	0.64	0.59	0.61	0.62	0.63	0.53	0.65	0.63	0.63	0.59	0.62

Tabella 1-2 – Calcolo del COP medio per ogni temperatura

Si è quindi proceduto a costruire una mappa con il COP medio così calcolato (in rosso in Figura 1-8).

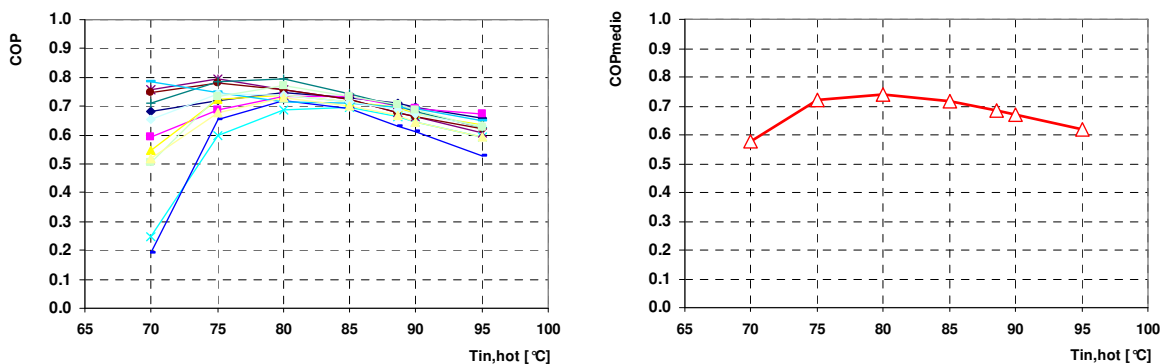


Figura 1-8 – COP medio per ogni taglia di macchina e per ogni temperatura di acqua di torre (curva rossa)

Le mappe così costruite sono state riportate all'interno di apposite look-up table su Simulink.

2. Realizzazione del modello Simulink

Il modello dell'assorbitore comprendente le mappe riportate nella sezione precedente è riportato in Figura 2-1.

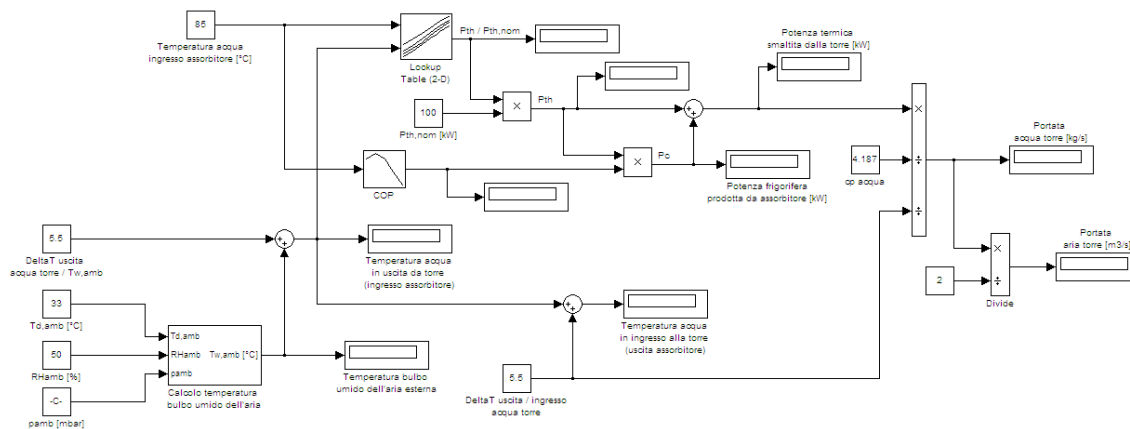


Figura 2-1 – Modello Simulink dell'assorbitore

2.1. Struttura, input e output

Il modello simula la presenza dell'assorbitore a bromuro di litio e di una torre evaporativa il cui scopo è quello di smaltire la potenza termica generata dall'assorbitore stesso. Sono presenti i seguenti input e output.

Input:

- Temperatura a bulbo secco dell'aria esterna ($T_{db,amb}$);
- Umidità relativa dell'aria esterna (RH);
- Pressione ambiente (p_{amb});
- Temperatura acqua calda in ingresso all'assorbitore ($T_{in,hot}$);
- Salto di temperatura ($\Delta T_{out,tw / db,amb}$) fra acqua in uscita dalla torre ($T_{out,tw}$) e temperatura a bulbo umido dell'aria esterna ($T_{wb,amb}$);
- Salto di temperatura ($\Delta T_{in,tw / out,tw}$) fra acqua in ingresso alla torre ($T_{in,tw}$) e acqua in uscita dalla torre ($T_{out,tw}$);
- Potenza termica nominale erogata all'assorbitore (che sarà quella recuperata dal modulo CHP).

Output:

- Temperatura a bulbo umido dell'aria esterna ($T_{wb,amb}$)
- Potenza frigorifera prodotta dall'assorbitore (P_c);
- Portata acqua del circuito di torre (\dot{m}_{tw});
- Portata aria torre evaporativa ($\dot{m}_{air,tw}$)

2.2. Metodologia di calcolo

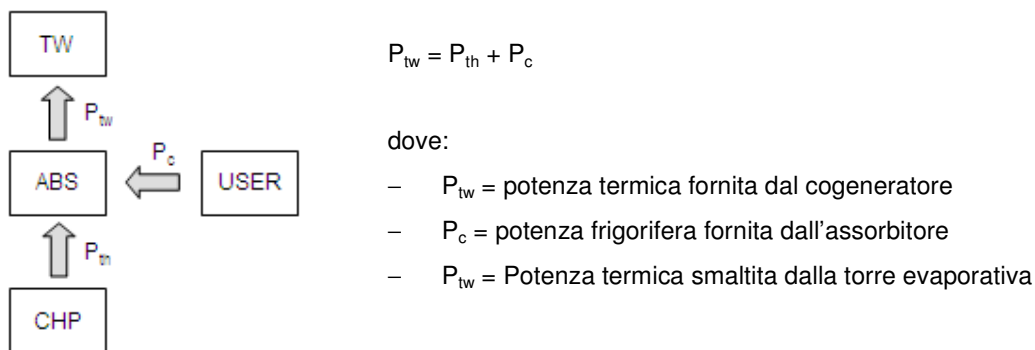
Tramite i primi tre input sopra citati input è possibile calcolare la temperatura a bulbo umido dell'aria, per mezzo della formula di Jeevananda Reddy³:

$$T_{wb,amb} = T_{db,amb} \times \{ 0.45 + 0.006 \times RH \times [(p_{amb} / 1060)^{0.5}] \} \quad (1)$$

Calcolata la temperatura di bulbo umido dell'aria esterna, il modello la somma al termine $\Delta T_{out,tw / db,amb}$ e viene così calcolata la temperatura dell'acqua di raffreddamento dell'assorbitore in uscita dalla torre evaporativa (ovvero in ingresso all'assorbitore stesso).

I due valori di $T_{out,tw}$ e $T_{in,hot}$ vengono quindi usati come parametri di input nelle mappe della potenza termica adimensionalizzata e del COP. Dalla prima mappa viene così calcolata la potenza termica adimensionalizzata, e moltiplicando questa per la potenza termica nominale, si ottiene la potenza effettiva in ingresso all'assorbitore; moltiplicando tale valore per il COP ottenuto dalla mappa si ottiene quindi la potenza frigorifera fornita dall'assorbitore.

Dal bilancio energetico di primo principio applicato all'assorbitore, si ha che:



Il modello, nota la P_c e la P_{th} calcola pertanto la potenza che deve essere smaltita dalla torre evaporativa. Tale potenza può inoltre essere espressa come:

$$P_{tw} = \dot{m}_{tw} c_p (T_{in,tw} - T_{out,tw}) = \dot{m}_{tw} c_p \Delta T_{in,tw / out,tw} \quad (2)$$

dove:

- \dot{m}_{tw} = portata d'acqua del circuito di torre;
- c_p = calore specifico a pressione costante dell'acqua;
- $T_{in,tw}$ = temperatura acqua in ingresso alla torre;
- $T_{out,tw}$ = temperatura acqua in uscita dalla torre.

³ Jeevananda Reddy S.; 1976. Simple formulae for the estimation of wet bulb temperature and precipitable water, Indian J. Met. Hydr. Geophys, v.27, n.2. Delhi, pp. 163-166.

Tramite la relazione (2) viene pertanto calcolata la portata d'acqua del circuito di torre. Inoltre, da questa il modello calcola, per mezzo dell'equazione (3), la portata d'aria caratteristica della torre ($\dot{m}_{air,tw}$), parametro di riferimento nella scelta di tali macchine. Tale equazione (3) è stata assunta dalla documentazione tecnica delle torri evaporative Evapco.

$$\dot{m}_{air,tw} = \frac{\dot{m}_{tw}}{2} \quad (3)$$

3. Risultati simulazioni

3.1. Simulazione delle mappe sperimentali

Al fine di testare la validità del modello sono state simulate le curve di potenza termica e potenza frigorifera sperimentali, per ognuna delle quattro temperature di acqua di torre presenti, per le due macchine Yazaki WFC-SC10 e WFC-SC30. Dette temperature sono state ricreate all'interno del modello ipotizzando le condizioni ambiente riportate in Tabella 3-1.

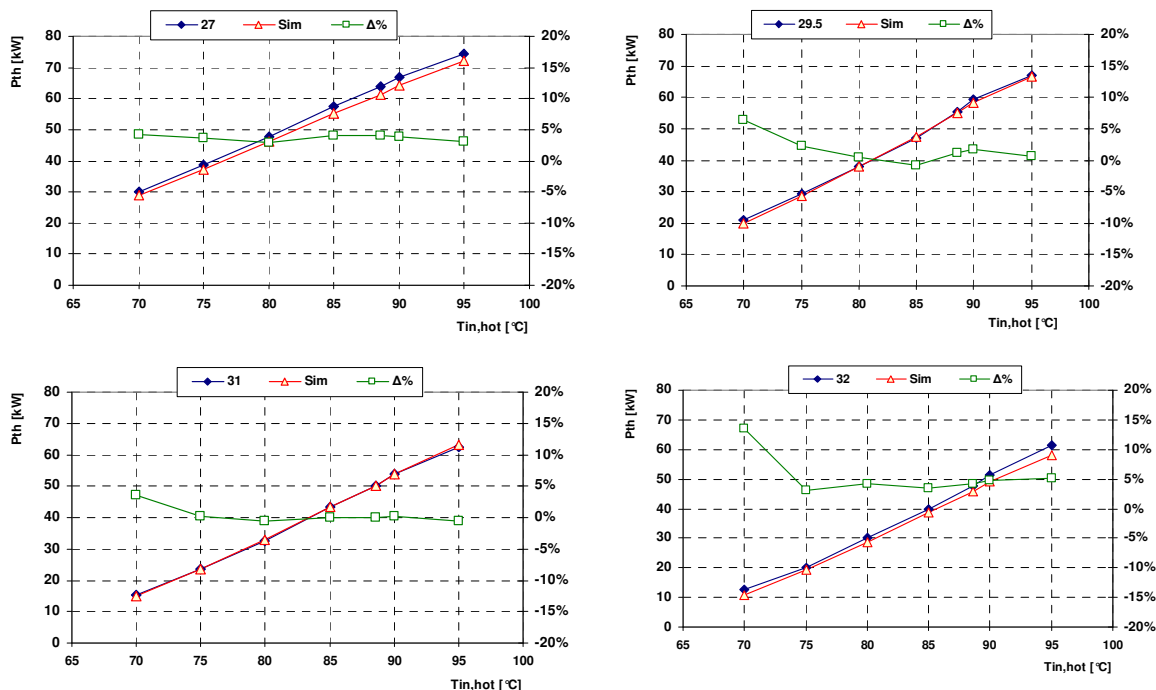
Input	1	2	3	4
$T_{db,amb}$ [°C]	28.95	32.29	33.00	33.00
RH [%]	50%	50%	55%	60%
P_{amb} [mbar]	1013.25	1013.25	1013.25	1013.25
$\Delta T_{out,tw/db,amb}$ [°C]	5.5 ⁴	5.5	5.5	5.5
$\Delta T_{in,tw/out,tw}$ [°C]	5.5 ²	5.5	5.5	5.5
Output	1	2	3	4
$T_{wb,amb}$ [°C]	21.52	24.00	25.50	26.50
$T_{out,tw}$ [°C]	27.02	29.50	31.00	32.00

Tabella 3-1 – Dati climatici in input e output durante la simulazione

I risultati delle simulazioni condotte sono riportati nelle figure che seguono. La curva verde rappresenta l'errore percentuale commesso (secondo asse delle ordinate).

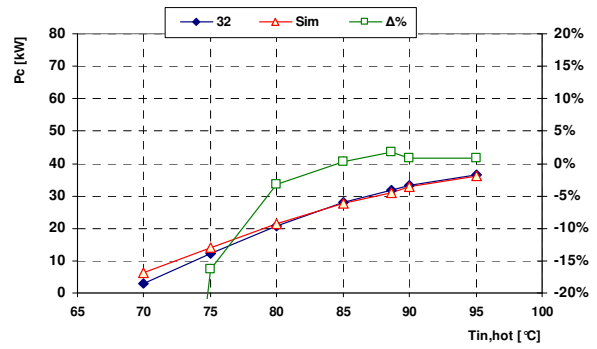
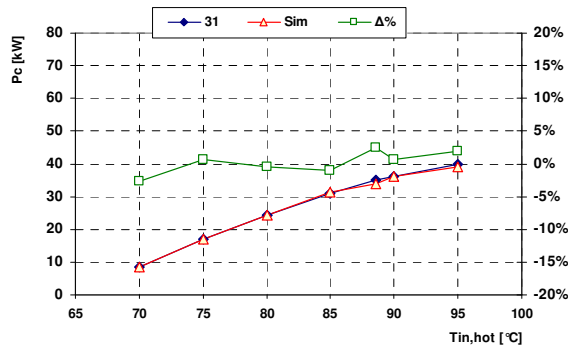
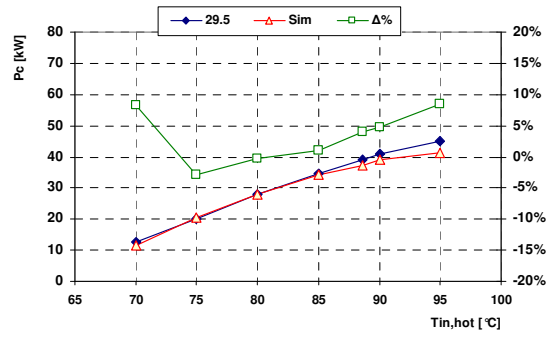
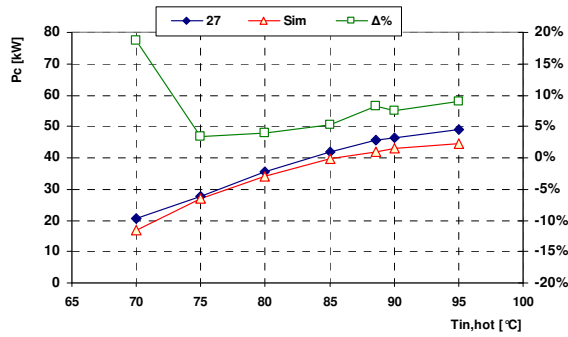
WFC-SC10

Potenza termica



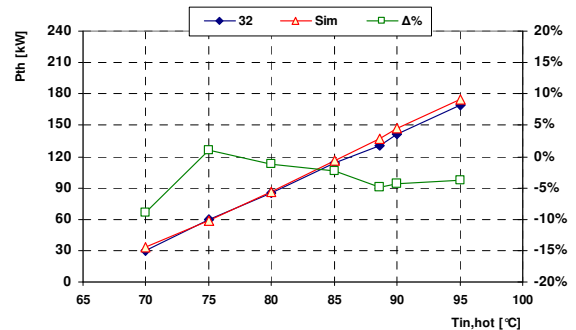
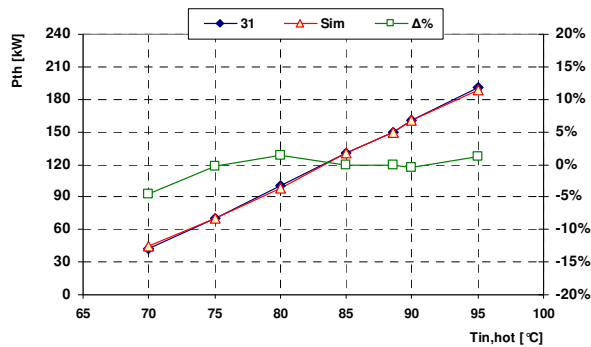
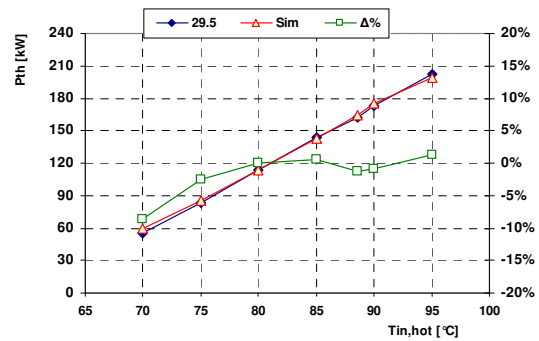
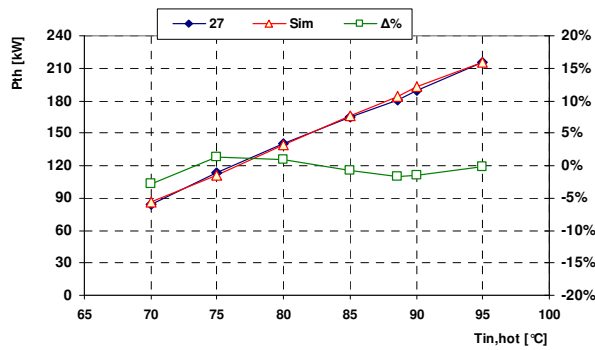
⁴ Valori tipici di progetto rilevati da Manuale del Termotecnico e documentazione tecnica torri evaporative Evapco

Potenza frigorifera

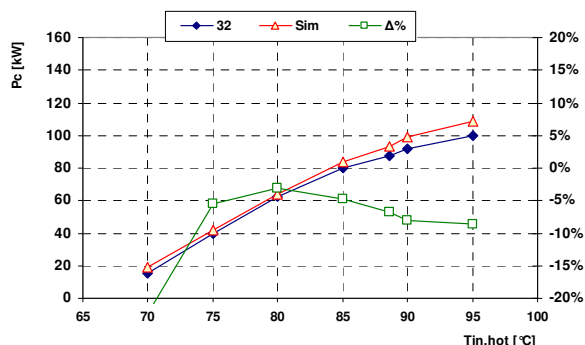
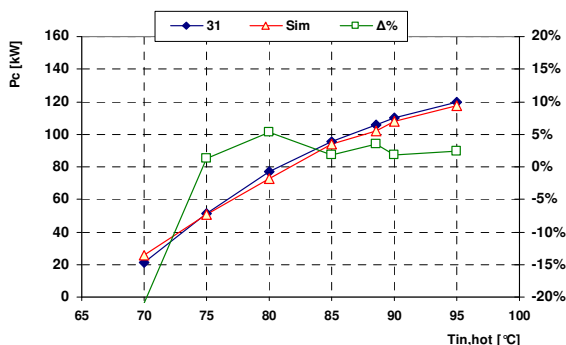
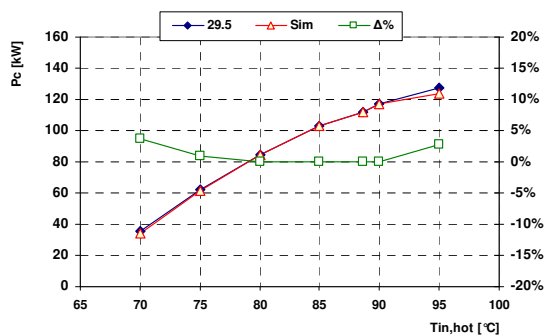
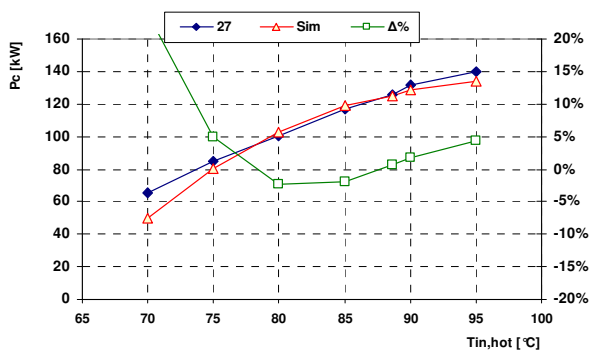


WFC-SC30

Potenza termica



Potenza frigorifera



Come si nota l'aderenza delle curve simulate alle mappe sperimentali delle due macchine è buona.

3.2. Simulazione di funzionamento estivo

Al fine di testare il modello in condizioni di funzionamento il più possibile prossime alla realtà, sono stati recuperati i dati climatici di due città italiane, Torino e Roma. I dati climatici sono stati scaricati dal sito internet, e riportavano valori di temperatura al bulbo secco e di rugiada dell'aria, per i mesi da Maggio 2010 a Settembre 2010 (per Torino si è ritenuto sufficiente il trimestre Giugno – Agosto 2010). Sono stati considerati valori orari, dalle 10.00 alle 19.00, per un giorno ogni tre del mese in corso.

Note tali due temperature, è possibile calcolare l'umidità relativa dell'aria tramite le correlazioni seguenti (valide nell'ipotesi di pressione atmosferica standard):

Pressione di vapore di saturazione [HPa]:

$$E_s = 6.11 \cdot 10.0^{(7.5 \cdot T_c / (237.7 + T_c))} \tag{4}$$

Pressione di vapore reale [HPa]:

$$E = 6.11 \cdot 10.0^{(7.5 \cdot T_{dc} / (237.7 + T_{dc}))} \tag{5}$$

Dove:

T_c = temperatura bulbo secco dell'aria in gradi Celsius

T_{dc} = temperatura del punto di rugiada dell'aria in gradi Celsius

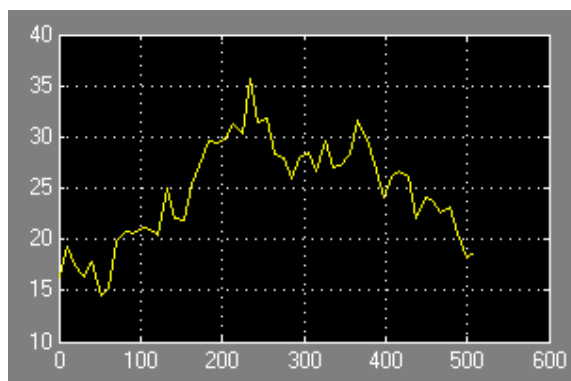
L'umidità relativa è facilmente calcolabile dal rapporto percentuale fra la (5) e la (4):

$$\text{Umidità relativa (RH)} = (E/E_s) \cdot 100 \quad (6)$$

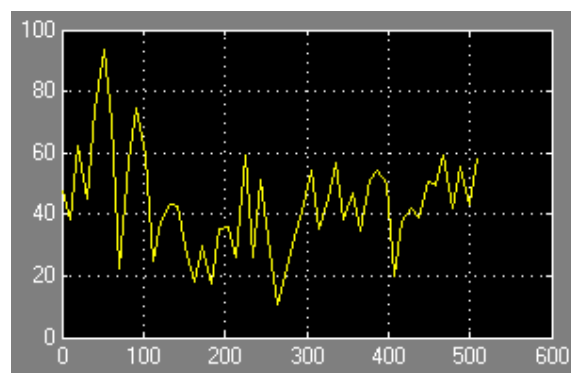
Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni.

Dati in Input:

1. Temperatura acqua calda: 85 °C (ipotizzando che essa venga termostattizzata)
2. Profilo di temperatura bulbo secco aria esterna città di Roma (°C):



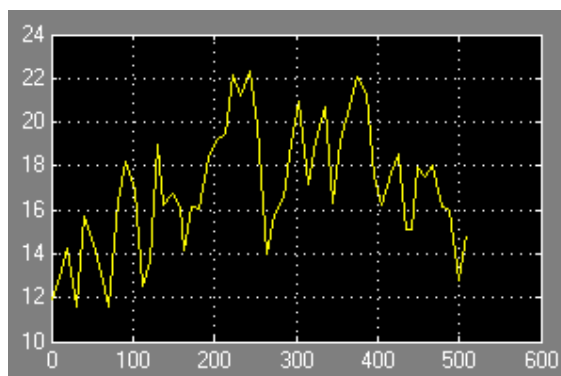
3. Profilo di umidità relativa aria esterna città di Roma (%):



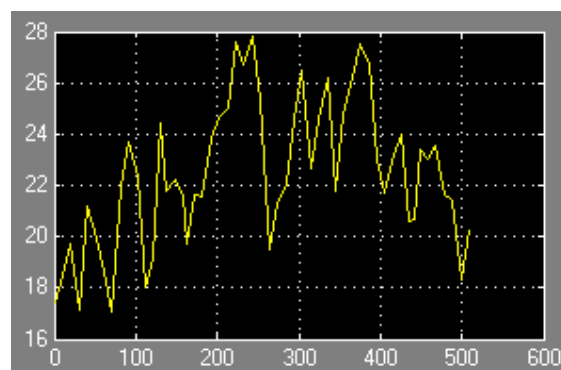
4. ΔT uscita acqua torre / temp. bulbo umido aria esterna: 5.5 °C

Dati calcolati

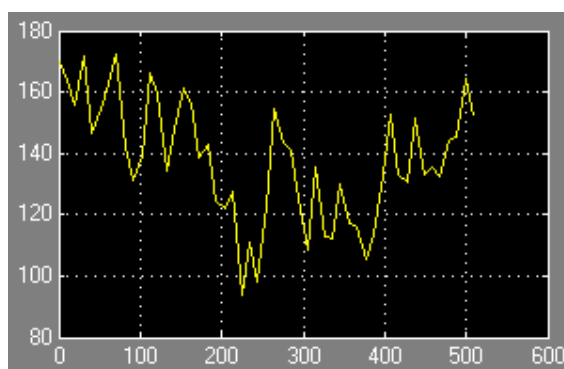
1. Profilo di temperatura bulbo umido aria esterna (°C):



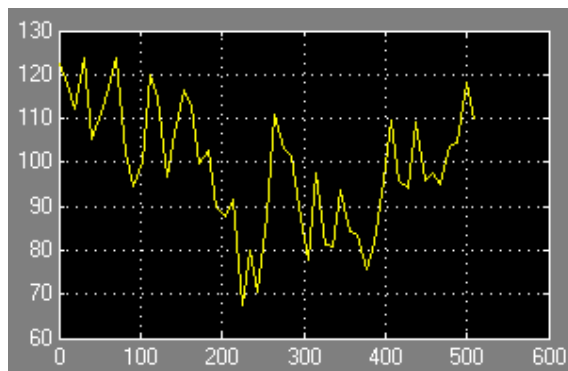
2. Profilo di temperatura acqua di torre in ingresso all'assorbitore (°C):



3. Profilo di potenza termica recuperabile (kW): *Nb. 100 kW valore nominale*

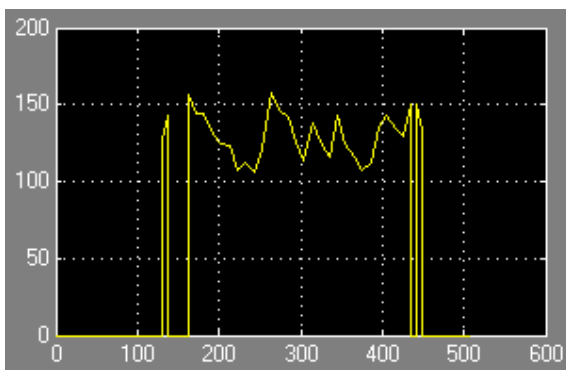


4. Profilo di potenza frigorifera prodotta (kW):



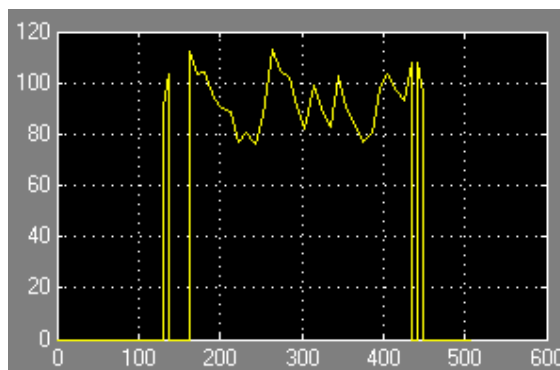
Come si nota, nei mesi considerati (maggio-settembre) si sono evidenziate temperature al bulbo secco dell'aria esterna al di sotto dei 25°C. Poiché nel periodo estivo si considera come temperatura di progetto interna all'edificio proprio 25°C, in tale evenienza potrebbe risultare essere efficace spegnere la trigenerazione effettuando il free cooling. Per tale ragione, si è operata una modifica al modello tramite l'introduzione del seguente controllo: quando la temperatura al bulbo secco dell'aria è inferiore a 24°C (o valore comunque impostabile dall'utente), si considera nulla la potenza termica inviata all'assorbitore, e conseguentemente la potenza frigorifera generata (trigenerazione spenta).

Di seguito i risultati della simulazione con tale ipotesi:



Profilo di potenza termica recuperabile (kW):

Nb. 100 kW valore nominale



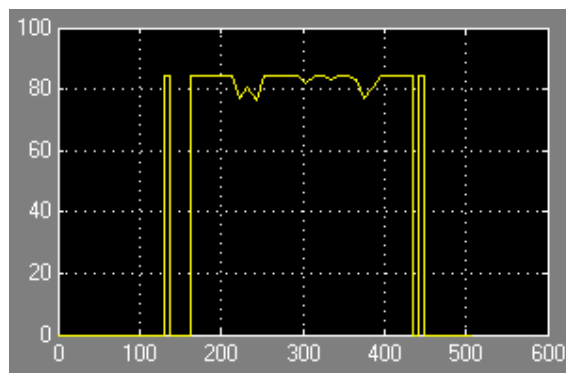
Profilo di potenza frigorifera prodotta (kW)

Inoltre, si potrebbe valutare di limitare la temperatura dell'acqua di torre ad un valore minimo, in corrispondenza del quale si raggiunga la massima potenza frigorifera erogabile dall'assorbitore. Ponendo un limite inferiore a 26°C, ad esempio, si ottengono le curve di potenza termica e frigorifera seguenti:



Profilo di potenza termica recuperabile (kW):

Nb. 100 kW valore nominale



Profilo di potenza frigorifera prodotta (kW)

4. Integrazione con il modello CHP

Il modello di assorbitore a bromuro di litio è stato inserito all'interno del modello di cogeneratore già sviluppato all'interno della precedente annualità di ricerca di sistema, in modo da ottenere un impianto di trigenerazione. Un'immagine del modello complessivo così ottenuto è riportata in Figura 4-1.

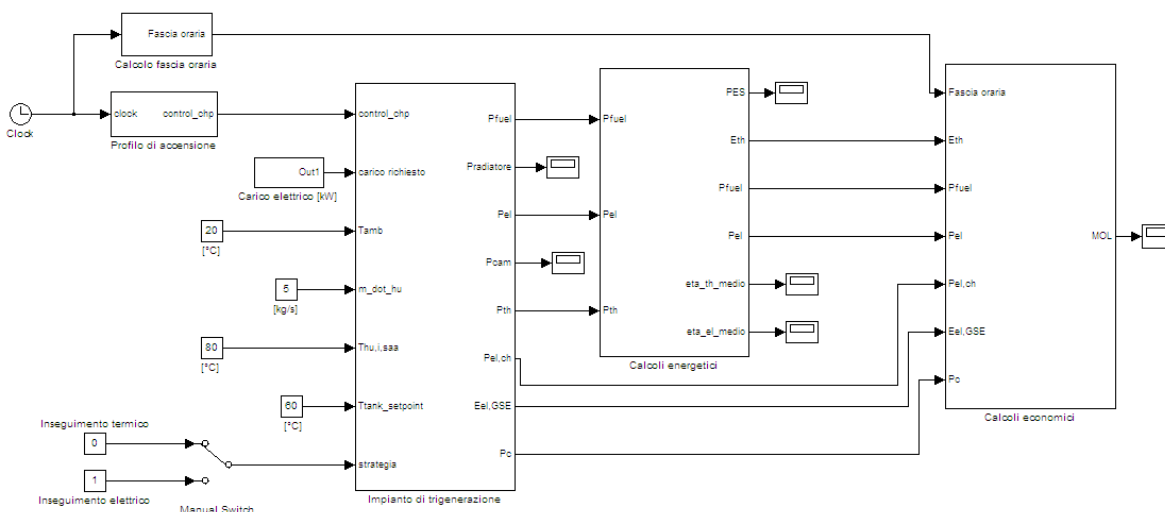


Figura 4-1 – Modello completo dell'impianto di trigenerazione

Rispetto al modello in assetto cogenerativo, sono state implementate le seguenti modifiche:

- È stato inserito il modello di assorbitore a bromuro di litio, comprensivo di torre evaporativa, come descritto al paragrafo 2.2;
- La caldaia è stata sostituita da un chiler a compressione di backup e integrazione, atto a sopperire ad eventuali deficit di potenza frigorifera da parte dell'assorbitore;
- È stato inserito un accumulo di energia frigorifera sotto forma di acqua fredda a 7°C, alimentato dall'assorbitore e dal chiler; l'accumulo "simula" inoltre la presenza di un carico frigorifero;
- È stato inserito l'inseguimento frigorifero, che viene realizzato mediante il mantenimento del set-point desiderato all'interno dell'accumulo;
- Sono stati implementate le valutazioni economiche relative a:
 - Ricavo dato dal mancato costo di acquisto dell'energia elettrica, per effetto della produzione di energia frigorifera con calore di scarto recuperato dal motore a combustione interna;
 - Costo dato dall'impiego del chiler a compressione, alimentato ad energia elettrica.

La potenza termica recuperata dal motore a combustione interna (somma del contributo dell'acqua di raffreddamento, più il recupero dai fumi di scarico), e la temperatura di uscita dell'acqua dallo scambiatore acqua/fumi ($T_{hu,u,sat}$), vengono impiegate come dati in ingresso all'assorbitore, come descritto al paragrafo 2.1.

Sviluppo di un modello matematico di un assorbitore a bromuro di litio

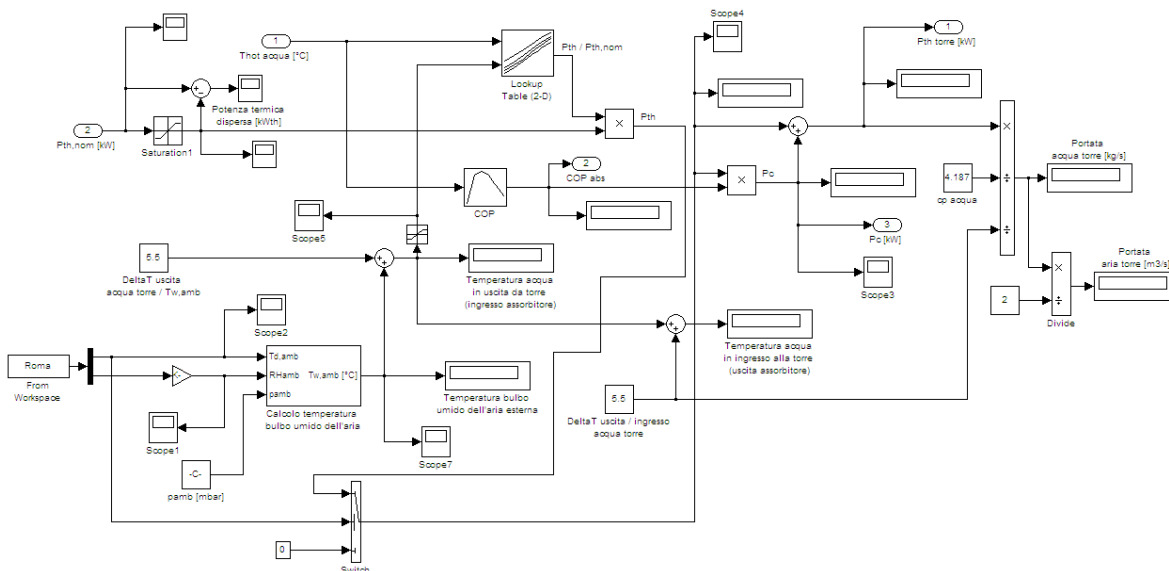


Figura 4-3 – Modello dell'assorbitore a bromuro di litio

Parameters

Potenza frigorifera nominale [kW/c]

COP nominale

Figura 4-4 – Maschera di inserimento dei dati di taglia dell'assorbitore

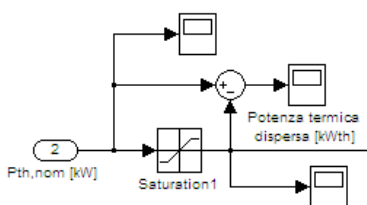


Figura 4-5 – Calcolo della potenza termica in eccesso dispersa in ambiente

4.2. Chiller di integrazione e riserva

Il modello matematico del chiller implementa la strategia di controllo dello stesso, con logica di tipo termostato. Un relè manda un segnale di off al chiller quando la temperatura dell'accumulo termico è inferiore alla temperatura di riferimento, T_{ref} impostabile dall'utente; il relè va in "on" solo quando la temperatura dell'accumulo termico sale al di sopra della soglia di temperatura massima, T_{max} , fissata anch'essa dall'utente. Il modello Simulink del chiller è illustrato in Figura 4-6. grazie a questo modulo, il modello è in grado di sopperire agli eventuali deficit di potenza frigorifera cui l'assorbitore dovesse andare incontro, nel mantenimento della temperatura di set point dell'accumulo frigorifero.

Anche in questo caso è stata predisposta una maschera per l'inserimento dei dati di targa del chiller (Figura 4-7).

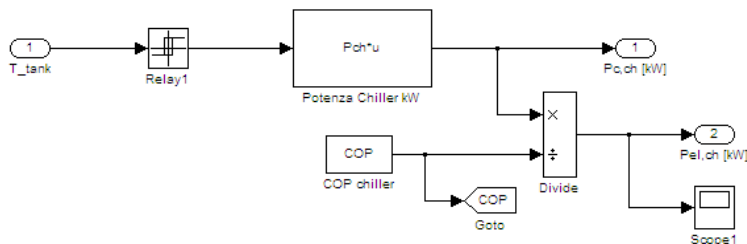


Figura 4-6 – Modello del chiller di integrazione e riserva

Figura 4-7 – Maschera per l'inserimento dei dati di targa del chiller

4.3. Accumulo termico (energia frigorifera)

Il modello matematico dell'accumulo termico è il componente di interfaccia tra il modello dell'edificio e quello del trigeneratore e del chiller. L'accumulo termico consente di valutare l'inerzia nel funzionamento dei sistemi di raffreddamento dell'edificio, in funzione del volume scelto e della coibentazione dello stesso. La dinamica dell'accumulo termico è governata dalla seguente equazione differenziale:

$$CAP * \frac{dT_t}{dt} = Q_{load} - Q_{aux} - U * S * (T_a - T_t) \tag{7}$$

Dove:

- CAP: capacità termica dell'acqua all'interno dell'accumulo data dal prodotto della massa per il calore specifico dell'acqua; la massa d'acqua è a sua volta calcolata come prodotto del volume dell'accumulo per la densità dell'acqua (1000 kg/m³);
- Q_{aux}: somma della potenza frigorifera fornita dall'assorbitore e di quella del chiller;
- Q_{load}: carico frigorifero richiesto dall'edificio
- U: trasmittanza termica dell'involucro dell'accumulo;
- T_t: temperatura dell'acqua all'interno dell'accumulo;
- T_a: temperatura ambiente.

Al fine di semplificare l'inserimento dei parametri necessari alla simulazione dell'accumulo termico, è stato introdotto un fattore di forma per esprimere la superficie disperdente dell'accumulo in funzione del volume

d'acqua contenuto. Il fattore di forma (FF) utilizzato per l'accumulo termico è quello tipico per impianti termici residenziali:

$$FF = S/V=0,3; \quad S = FF*V; \tag{8}$$

E' possibile riscrivere l'equazione differenziale (9) come:

$$\frac{dT_t}{d\tau} + \frac{U * FF * V}{CAP} T_t = \frac{Q_{load} - Q_{aux} + U * FF * V * T_a}{CAP} \tag{9}$$

Ovvero:

$$\dot{T}_t + K * T_t = H \tag{10}$$

Dove :

$$K = \frac{U * FF * V}{CAP}$$

$$H = \frac{Q_{load} - Q_{aux} + U * FF * V * T_a}{CAP}$$

Si riporta in Figura 4-8 lo schema implementato in ambiente Simulink per modellare il comportamento dinamico dell'accumulo. Si notano le due functions deputate al calcolo dei coefficienti K e H, e l'integratore che risolve l'equazione differenziale. È inoltre esplicitato il calcolo delle perdite di energia frigorifera per trasmissione attraverso la superficie dell'accumulo.

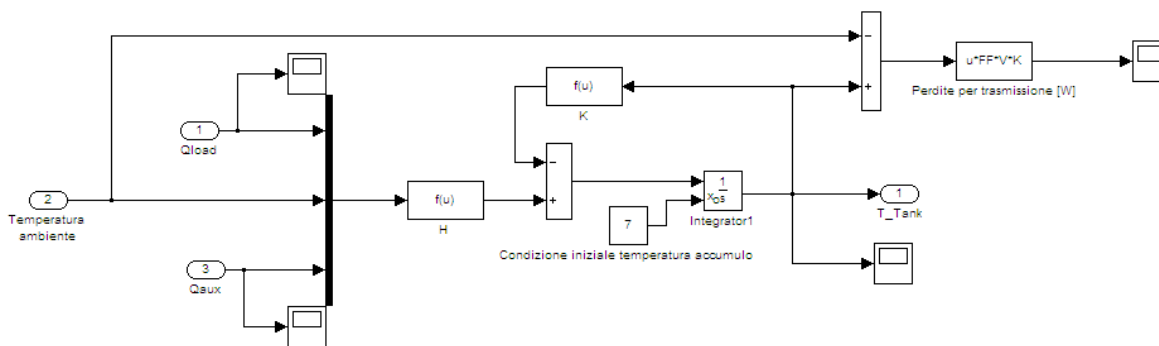


Figura 4-8 – Modello dell'accumulo termico

I parametri fisici e geometrici caratteristici dell'accumulo vengono inseriti dall'utente in un'apposita maschera, riportata in Figura 4-9.

Parameters	
Volume accumulo [m3]	<input type="text" value="0.2"/>
Trasmittanza termica involucro accumulo [W/m2K]	<input type="text" value="1"/>
Fattore di forma accumulo	<input type="text" value="0.3"/>
Calore specifico acqua [kJ/kgK]	<input type="text" value="4.186"/>

Figura 4-9 – Maschera per l’inserimento dei dati caratteristici dell’accumulo

4.4. Valutazioni economiche

All’interno del modello sono stati implementati i calcoli relativi alla valutazione di:

- ricavo dato dal mancato costo di acquisto dell’energia elettrica, per effetto della produzione di energia frigorifera con calore di scarto;
- costo dato dall’impiego del chiller a compressione.

In Figura 4-10 e Figura 4-11 si riporta il blocco Ricavi, in cui si evince il calcolo del mancato acquisto di energia elettrica dovuto all’impiego dell’assorbitore.

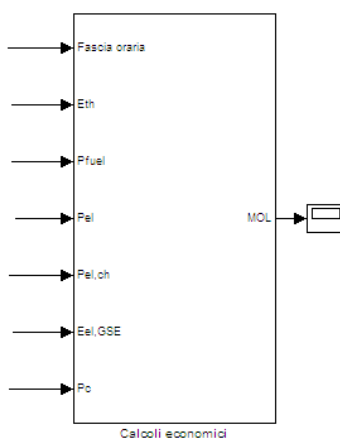


Figura 4-10 – Blocco di calcoli economici

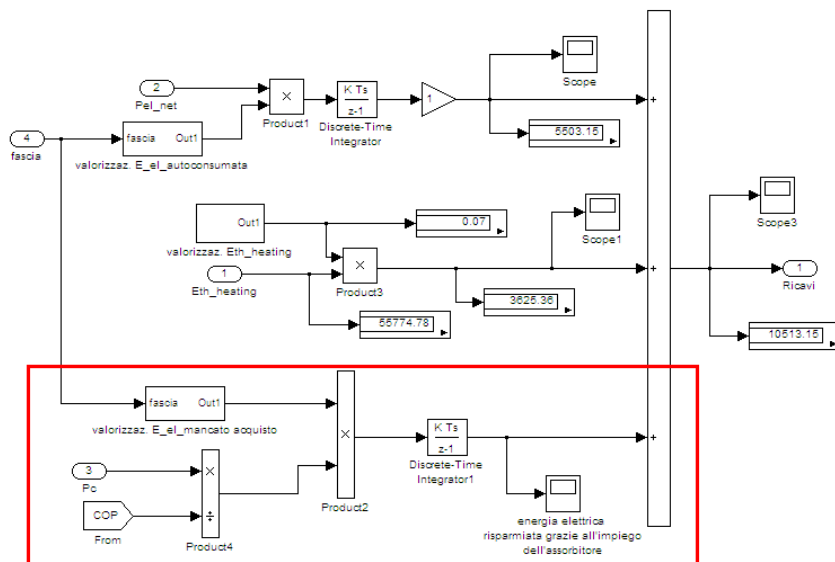


Figura 4-11 – Blocco di calcolo del mancato acquisto di energia elettrica

In Figura 4-12 si riporta invece il blocco Spese in cui è stato inserito il calcolo del costo dell'energia elettrica impiegata nel chiller di integrazione e riserva.

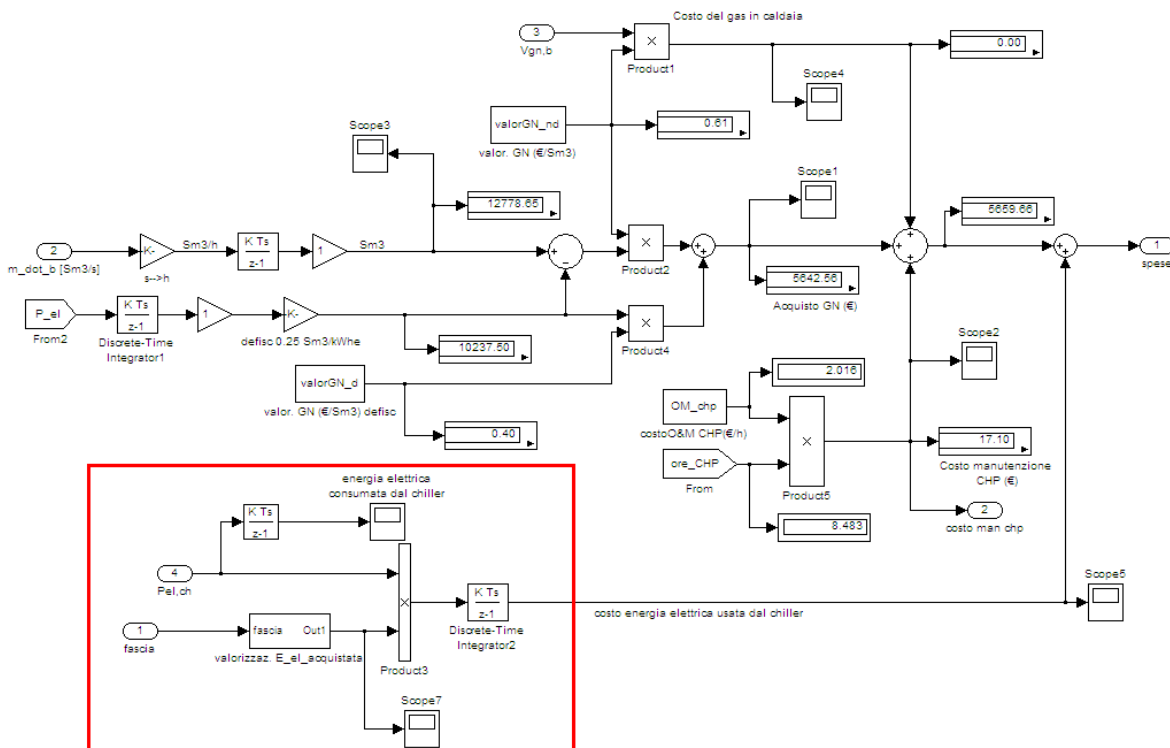


Figura 4-12 – Blocco di calcolo del costo di acquisto dell'energia elettrica usata nel chiller

In entrambi i casi, la valorizzazione dell'energia elettrica tiene conto della fascia oraria in cui essa viene impiegata. Tale calcolo viene svolto nel blocco riportato in Figura 4-13.

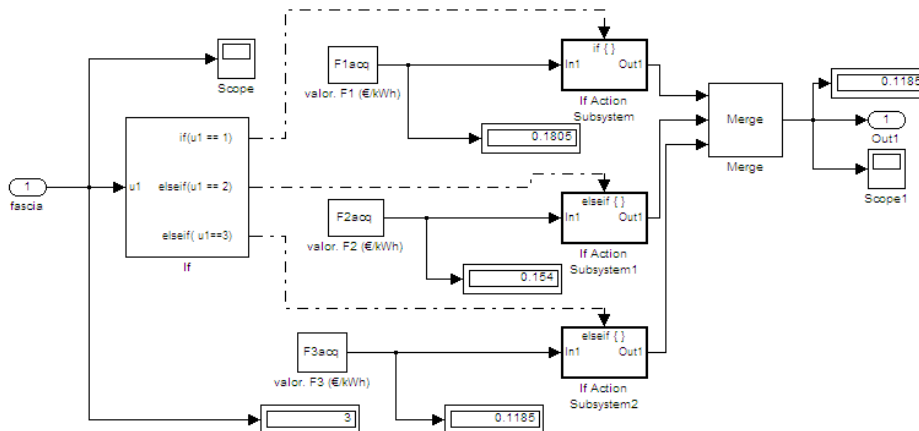


Figura 4-13 – Blocco di calcolo del costo di acquisto dell'energia elettrica

È stata inoltre predisposta una maschera per l'inserimento dei valori di costo di acquisto dell'energia elettrica, nelle tre fasce orarie AEEG (si veda Figura 4-15).

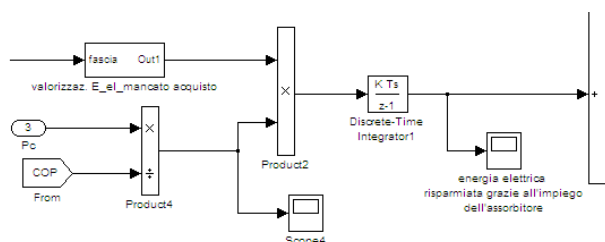


Figura 4-14 – Blocco di valorizzazione dell'energia elettrica risparmiata

Valorizzazione Eel acquistata in fascia F1 [€/kWh]	0.18049
Valorizzazione Eel acquistata in fascia F2 [€/kWh]	0.15398
Valorizzazione Eel acquistata in fascia F3 [€/kWh]	0.11850

Figura 4-15 – Maschera per l'inserimento del valore del costo di acquisto dell'energia elettrica

Per quanto concerne l'autoconsumo di energia elettrica, questo viene valorizzato al valore di mercato, al netto delle imposte, che devono essere comunque corrisposte agli enti. Si riporta in

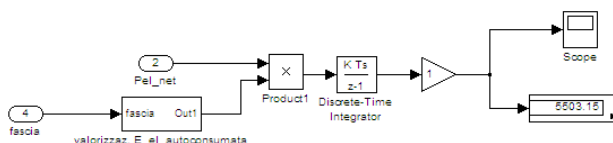


Figura 4-16 – Blocco di valorizzazione dell'energia elettrica autoconsumata

4.5. Modifiche alle strategie di funzionamento

Le strategie di funzionamento possibili in assetto trigenerativo sono di seguito descritte:

- Inseguimento elettrico: il cogeneratore regola la potenza elettrica prodotta in modo tale da seguire un profilo assegnato dall'utente dall'esterno; la produzione termica, la produzione frigorifera, e la temperatura nell'accumulo, variano di conseguenza; il chiller interviene quando quest'ultima sale al di sopra del livello T_{max} definito dall'utente;
- Inseguimento frigorifero: il cogeneratore regola la potenza elettrica prodotta in modo tale che la potenza termica sia tale da generare, all'interno dell'assorbitore, una potenza frigorifera in grado di garantire la temperatura T_{ref} di set point all'interno dell'accumulo. La regolazione operata dal trigeneratore è di tipo "fine", esso cioè mantiene la temperatura dell'accumulo in un intervallo compreso fra la T_{ref} e una temperatura T_{on} superiore alla T_{ref} , selezionabile dall'utente, e minore della T_{max} . si hanno pertanto i seguenti intervalli di funzionamento:

- $T_{accumulo} = T_{ref}$: il cogeneratore e il chiller sono spenti;
- $T_{ref} < T_{accumulo} < T_{on}$: il cogeneratore è spento, il chiller è spento;
- $T_{on} < T_{accumulo} < T_{min}$: il cogeneratore è acceso, il chiller è spento;
- $T_{accumulo} < T_{min}$: il cogeneratore è acceso, il chiller è acceso.

Le temperature sopra indicate vengono inserite nei due blocchetti "Relay" di azionamento del trigeneratore (Figura 4-17), e del chiller (Figura 4-18):

Figura 4-17 – Maschera di configurazione del relay di azionamento del trigeneratore

Figura 4-18 – Maschera di configurazione del relay di azionamento del chiller

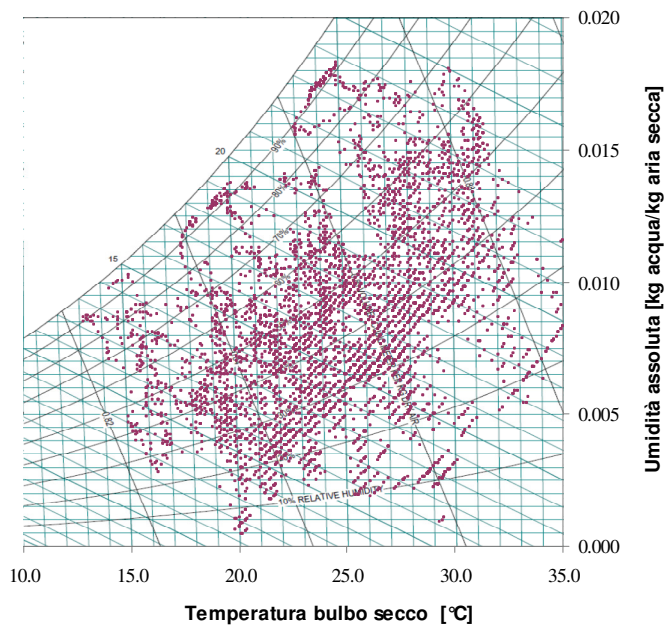
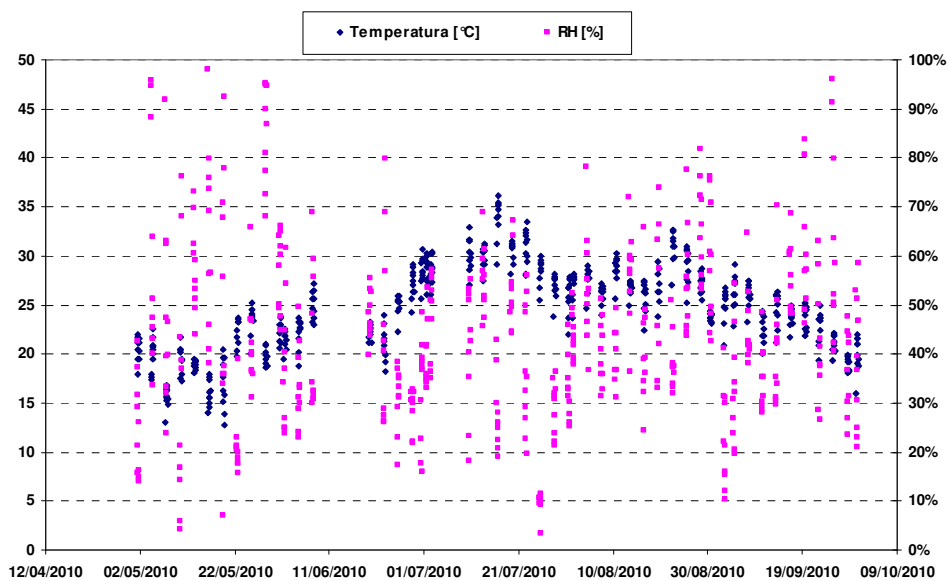
4.6. Simulazione di funzionamento estivo

Si riportano nel seguito i risultati della simulazione condotta in assetto trigenerativo.

Simulazione 1: inseguimento carico frigorifero

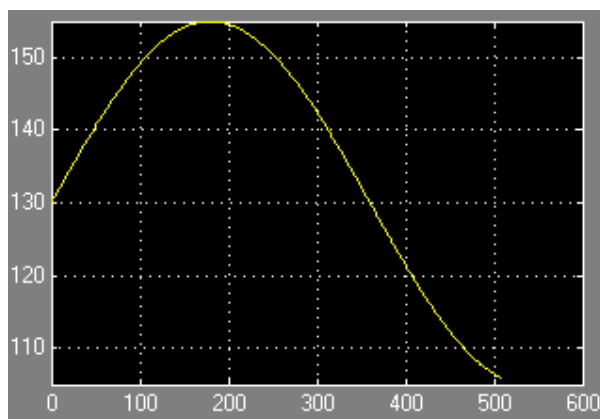
Dati in Input:

1. Dati climatici: città di Roma, un dato ogni tre giorni dal 1° Maggio 2010 al 30/09/2010, ogni ora nell'intervallo orario 10:00 – 19:00 (totale 509 punti);

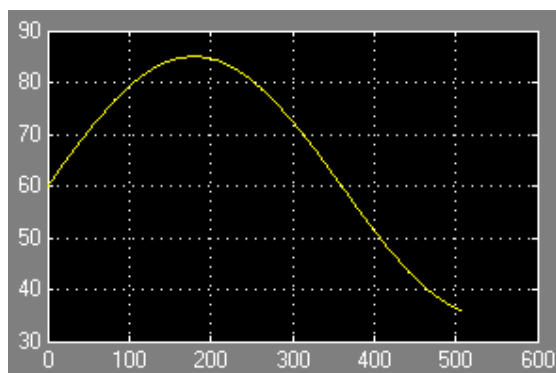


2. Durata della simulazione: 509 step

3. Step di integrazione: 1 ora
4. Inseguimento carico frigorifero con il seguente profilo [kW_c]



5. Carico elettrico edificio [kW_e]



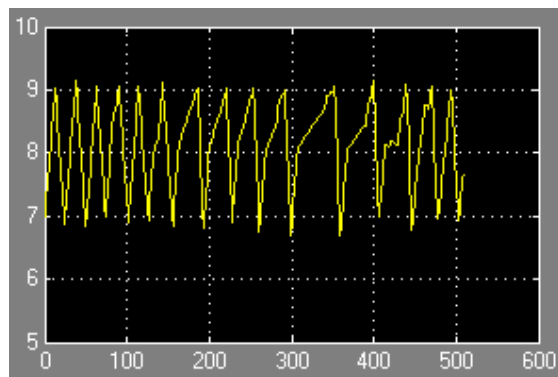
6. Temperature di gestione dell'accumulo:

- $T_{ref} = 7 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $T_{on} = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$
- $T_{max} = 9 \text{ } ^\circ\text{C}$

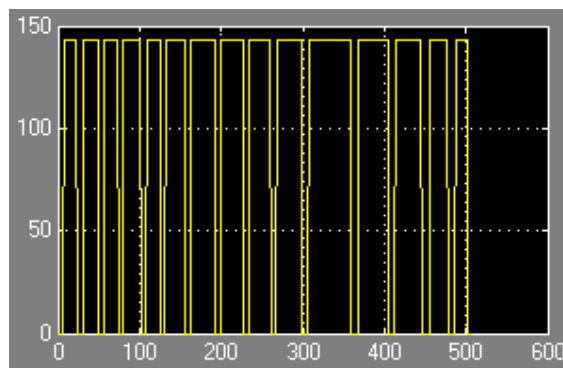
7. ΔT uscita acqua torre / temp. bulbo umido aria esterna: $5.5 \text{ } ^\circ\text{C}$

Dati calcolati

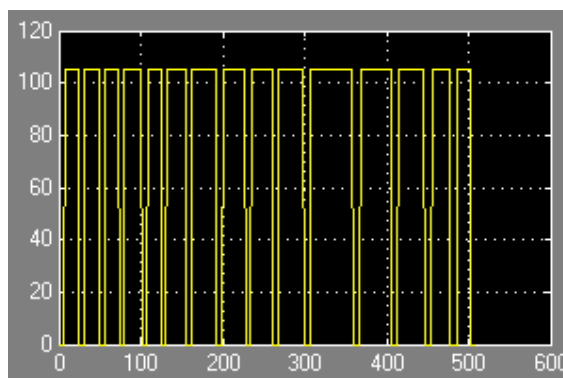
1. Temperatura dell'accumulo [$^\circ\text{C}$]:



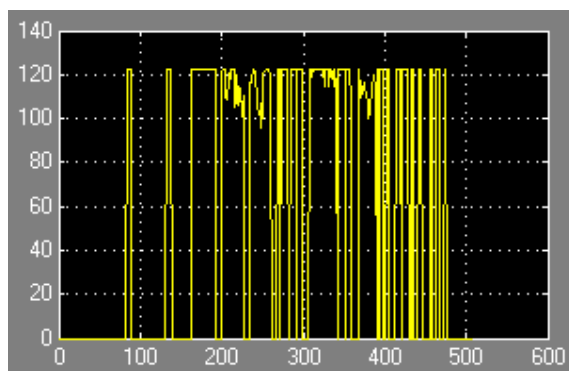
2. Potenza termica recuperata dal cogeneratore [kW_{th}]:



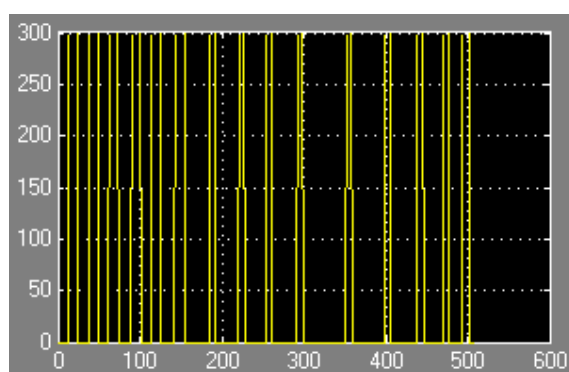
3. Potenza elettrica erogata dal cogeneratore [kW_e]:



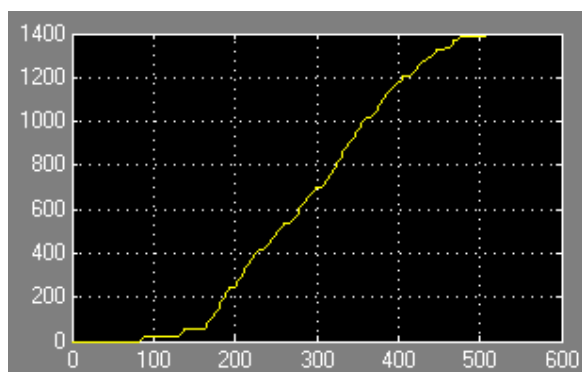
4. Potenza frigorifera erogata dall'assorbitore [kW_c]:



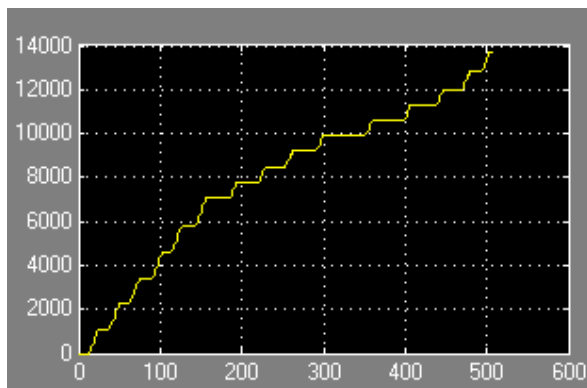
5. Potenza frigorifera erogata dal chiller [kW_c]:



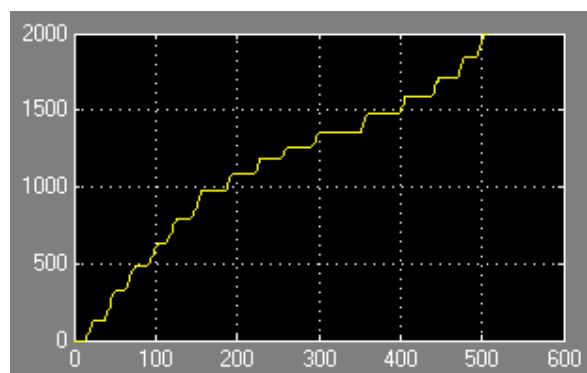
6. Ricavo da mancato acquisto di energia elettrica per effetto dell'utilizzo dell'assorbitore [€]:



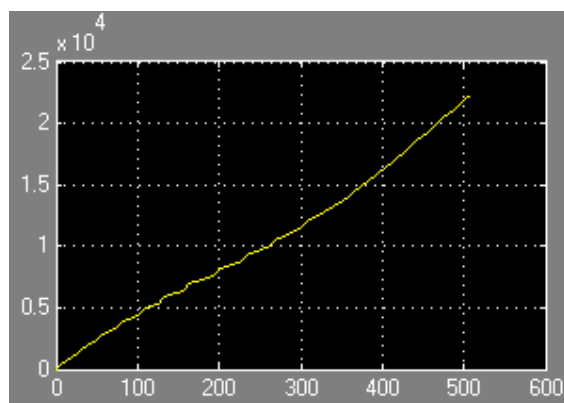
7. Energia elettrica impiegata nel chiller [kWh]:



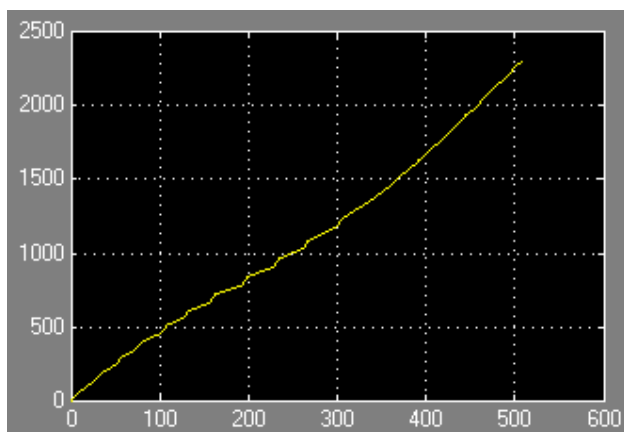
8. Costo di acquisto dell'energia elettrica impiegata nel chiller [€]:



9. Energia elettrica ceduta in rete al GSE (inseguimento termico) [kWh]:



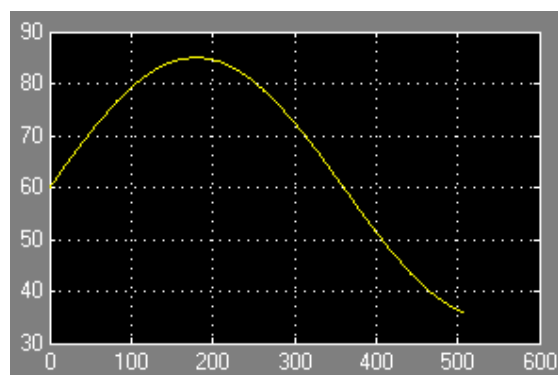
10. Calcolo del valore della cessione di energia elettrica al GSE [€]:



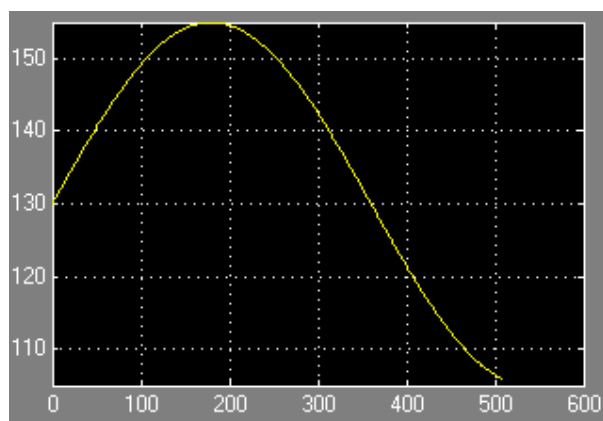
Simulazione 2: inseguimento carico elettrico

Dati in Input:

1. I medesimi della simulazione 1;
2. Durata della simulazione: 509 step
3. Step di integrazione: 1 ora
4. Inseguimento carico elettrico con il seguente profilo [kW_e]



5. Carico frigorifero edificio [kW_c]



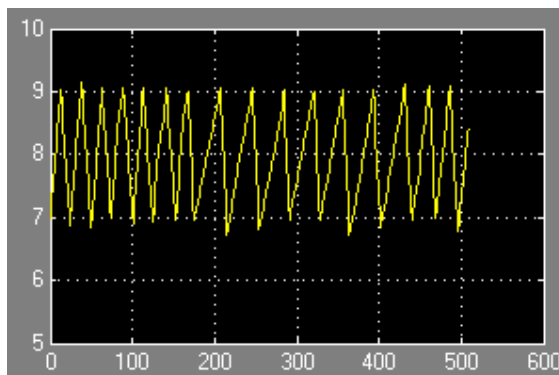
6. Temperature di gestione dell'accumulo:

- $T_{ref} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{on} = 8 \text{ }^\circ\text{C}$
- $T_{max} = 9 \text{ }^\circ\text{C}$

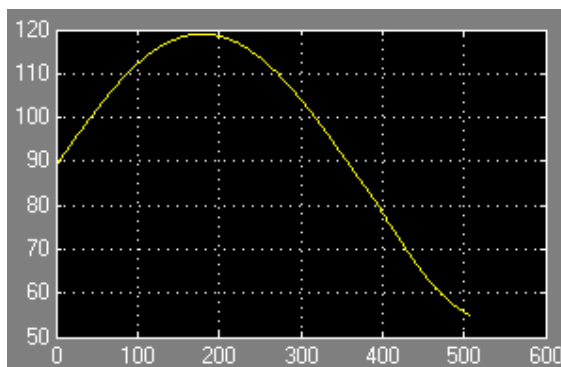
7. ΔT uscita acqua torre / temp. bulbo umido aria esterna: $5.5 \text{ }^\circ\text{C}$

Dati calcolati

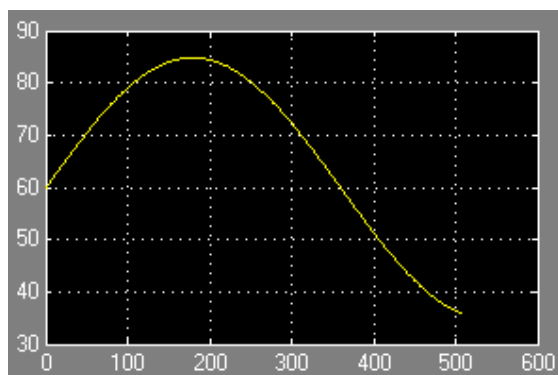
11. Temperatura dell'accumulo [$^\circ\text{C}$]:



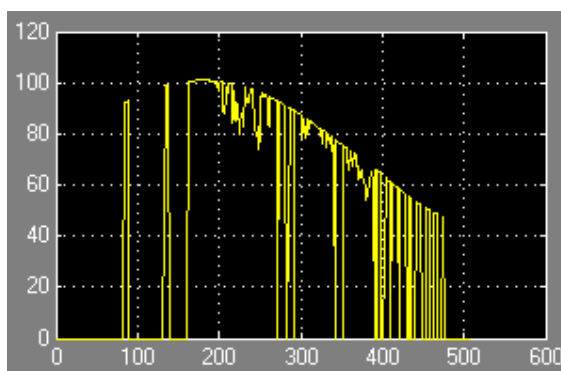
12. Potenza termica recuperata dal cogeneratore [kW_{th}]:



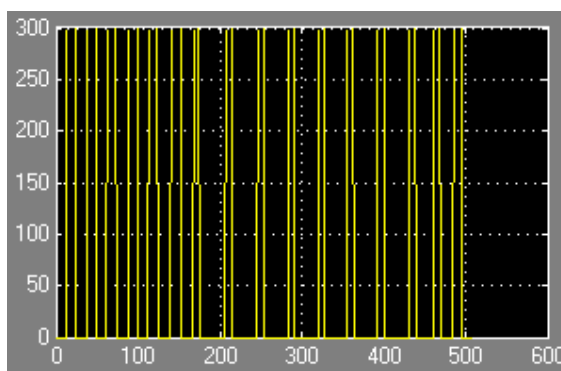
13. Potenza elettrica erogata dal cogeneratore [kW_e]:



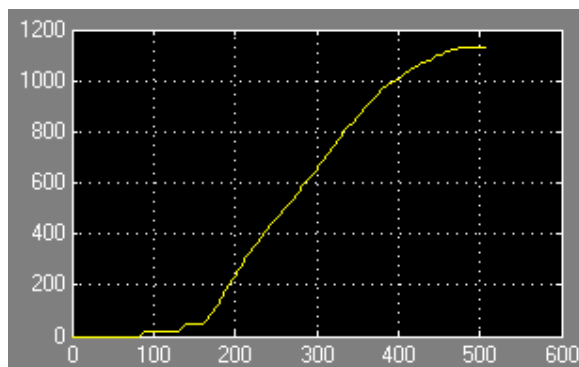
14. Potenza frigorifera erogata dall'assorbitore [kW_c]:



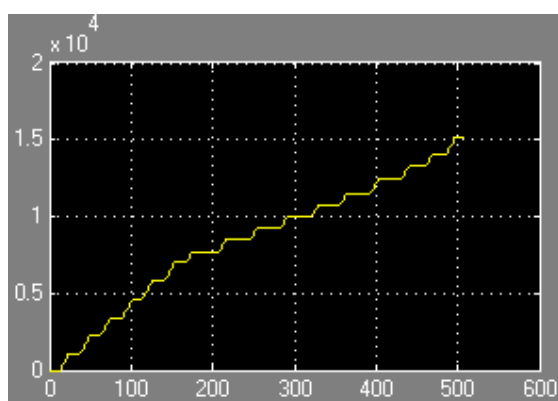
15. Potenza frigorifera erogata dal chiller [kW_c]:



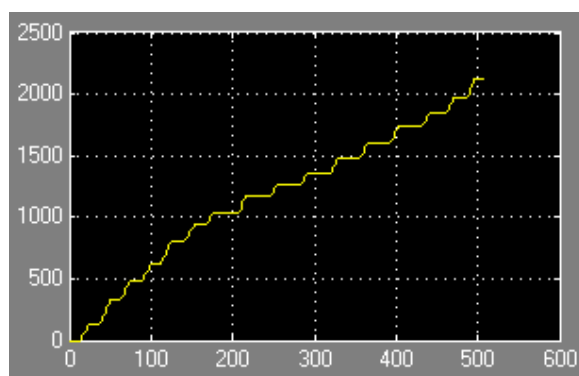
16. Ricavo da mancato acquisto di energia elettrica per effetto dell'utilizzo dell'assorbitore [€]:



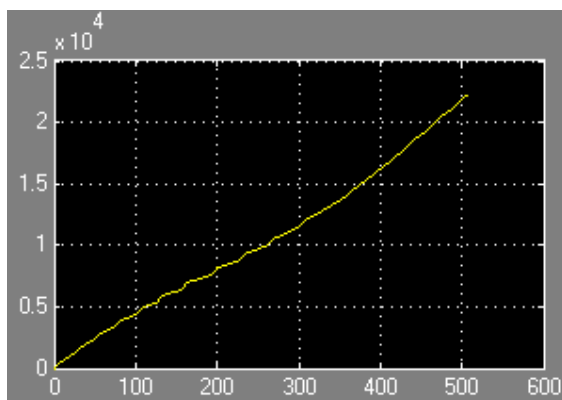
17. Energia elettrica impiegata nel chiller [kWh]:



18. Costo di acquisto dell'energia elettrica impiegata nel chiller [€]:



19. Energia elettrica ceduta in rete al GSE (inseguimento termico) [kWh]:



20. Calcolo del valore della cessione di energia elettrica al GSE [€]:

