



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Micro - cogenerazione nel settore residenziale con l'utilizzo di
motori a combustione interna:
Sviluppo di un modello matematico per la simulazione oraria
e analisi di un caso reale

Prof. Ruscica, Prof. Badami, Ing. A. Portoraro



POLITECNICO DI TORINO
Dipartimento di Energetica



Report RdS/2010/x 227

MICRO - COGENERAZIONE NEL SETTORE RESIDENZIALE CON L'UTILIZZO DI MOTORI
A COMBUSTIONE INTERNA: SVILUPPO DI UN MODELLO MATEMATICO PER LA
SIMULAZIONE ORARIA E ANALISI DI UN CASO REALE

Prof. Ruscica, Prof. Badami, Ing. A. Portoraro (Politecnico di Torino – Dipartimento di
Energetica)

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi finali

Tema: Elettrotecnologie innovative per i settori produttivi: applicazione su scala reale

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA

INDICE

Allegato – legenda.....	5
Introduzione.....	6
1. Parte A: Sviluppo di un modello matematico per la simulazione oraria del funzionamento di un motore a combustione interna per applicazioni cogenerative di piccola taglia	7
1.1. Cogeneratore	8
1.1.1. Struttura, input e output.....	8
1.1.2. Parametri di configurazione.....	9
1.1.3. Modalità di controllo	10
1.1.4. Motore e generatore elettrico	10
1.1.4.1 Controllo carico	11
1.1.4.2 Sistema di iniezione	11
1.1.4.3 Mappe motore	11
1.1.4.4 Combustione	13
1.1.4.5 Calcolo della temperatura acqua di refrigerazione in uscita dal motore.....	13
1.1.5. Sistema di recupero termico e sua architettura.....	14
1.1.5.1 Scambiatore acqua / acqua e radiatore.....	15
1.1.5.2 Scambiatore acqua / fumi	16
1.1.5.3 Camino.....	17
1.1.5.4 Bilancio complessivo.....	17
1.2. Carico dell'utenza, profilo di accensione e definizione della potenza erogata e del consumo di combustibile.....	18
1.3. Calcolo fascia oraria	20
1.4. Calcoli energetici.....	20
1.5. Calcoli economici	22
1.5.1 Ricavi	23
1.5.2 Costi variabili	24
1.5.3 Costi fissi	25
1.5.4 Maschera di inserimento dati.....	25
1.6. Esempi di simulazione	27
1.6.1 Ipotesi	27
1.6.2 Risultati	28
2. Parte B: Integrazione del modello con caldaia e accumulo termico	32
2.1. Accumulo termico.....	32
2.2. Caldaia	34
2.3. Integrazione con il modello di cogeneratore	34

2.4.	Modifiche alle strategie di funzionamento.....	36
2.5.	Esempi di simulazione	37
2.5.1.	Inseguimento termico – CASO 1.....	37
2.5.2.	Inseguimento termico – CASO 2.....	39
2.5.3.	Inseguimento elettrico	41

Allegato – legenda

T_{amb}	Temperatura ambiente
T_f	Temperatura fumi in uscita dal motore
$T_{f,c}$	Temperatura fumi al camino
$T_{hm,u,saa}$	Temperatura acqua motore in uscita dallo scambiatore acqua / acqua
$T_{hm,i,saa}$	Temperatura acqua motore in ingresso allo scambiatore acqua / acqua
$T_{hu,i,saa}$	Temperatura acqua utenza in ingresso allo scambiatore acqua / acqua
$T_{hu,i,saf}$	Temperatura acqua utenza in ingresso allo scambiatore acqua / fumi
$T_{hu,u,saf}$	Temperatura acqua utenza in uscita dallo scambiatore acqua / fumi
$\dot{m}_f$	Portata fumi in uscita dal motore
$\dot{m}_{hm}$	Portata acqua raffreddamento motore
$\dot{m}_{hu}$	Portata acqua utenza termica
ε_{saa}	Efficienza scambiatore acqua / acqua
ε_{saf}	Efficienza scambiatore acqua / fumi
$P_{th,hm}$	Potenza termica totale recuperata dall'acqua motore
$P_{th,f}$	Potenza termica totale recuperata dai fumi
$P_{th,hu}$	Potenza termica totale recuperata
P_{cam}	Potenza dispersa al camino
P_m	Potenza meccanica all'albero motore
P_{el}	Potenza elettrica ai morsetti dell'alternatore
P_{fuel}	Potenza termica introdotta con il combustibile
$P_{th,disp}$	Potenza termica dispersa per irraggiamento

Introduzione

Il presente documento rappresenta il Rapporto Finale riguardante l'Accordo di Collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, per un'attività di ricerca dal titolo: "Micro-cogenerazione nel settore residenziale con l'utilizzo di motori a combustione interna: Sviluppo di un modello matematico per la simulazione oraria e analisi di un caso reale".

Tale sintesi ha lo scopo di illustrare i risultati delle ricerche svolte dal Dipartimento di Energetica che hanno portato alla realizzazione di un modello matematico per la simulazione oraria di un cogeneratore di piccola taglia.

Il modello è stato realizzato per mezzo del software Matlab Simulink, e consente di prevedere le performance energetiche ed economiche lungo un intero anno di utilizzo del cogeneratore, quando lo si impieghi per inseguire un carico elettrico o termico definito dall'utente.

In particolare, si è cercato di realizzare un modello di simulazione "user friendly", che fosse cioè utilizzabile con semplicità dalla maggior parte degli utenti tecnici che normalmente si trovano a dover far fronte al calcolo delle performance energetiche ed economiche di un impianto di cogenerazione. La progettualità del software consente infatti di inserire un set minimo di dati, tipicamente dati di targa dei cogeneratori in commercio facilmente reperibili dai costruttori, con i quali è possibile ottenere, con buona approssimazione, una stima dei risparmi energetici e della redditività dell'impianto, su un periodo temporale di utilizzo impostabile dall'utente.

Questo approccio ha permesso di massimizzare il range di validità delle soluzioni offerte dal modello, rendendolo atto a simulare il comportamento di diverse taglie di cogeneratori, nell'intervallo tipico della cosiddetta "piccola taglia", ovvero 50 kW – 1 MW. Sono state infatti inserite nel modello le mappe di funzionamento del motore in modo adimensionalizzato, ovvero riproporzionandole sui valori nominali di consumo di combustibile, e di potenza elettrica erogata, dati anche questi agevolmente recuperabili dai datasheet dei cogeneratori in commercio. In ogni caso, in virtù della flessibilità del modello, è sempre possibile accedere direttamente alle mappe del motore, in modo tale che un utente più esperto, e in possesso dei dati reali del cogeneratore da simulare, possa inserirli all'interno del software per avere una simulazione più aderente alla realtà.

Tali ipotesi hanno consentito di realizzare uno strumento di immediata utilità per l'utente finale, in quanto è possibile ottenere una prima stima di massima dei benefici energetici ed economici che l'installazione di un impianto di cogenerazione può apportare, con l'introduzione di pochi dati tecnici facilmente reperibili.

Nel presente documento vengono inoltre presentati gli sviluppi apportati al modello di simulazione del cogeneratore per integrarlo ad un modello di accumulo termico e uno di caldaia (Parte B), al fine di renderlo adatto a funzionare in presenza di un carico termico, quale quello di un edificio. Inoltre, sono presentati alcuni esempi di applicazione del modello, sia nella versione "solo cogeneratore" (Parte A), che in quella con caldaia e accumulo termico (Parte B).

La presente sezione intende mostrare i punti principali relativi allo sviluppo del modello di simulazione di un impianto di cogenerazione di piccola taglia, in ambiente Matlab Simulink.

Come si evince dall'immagine, il modello è strutturato in diversi blocchi:

- Cogeneratore;
- Selettore del funzionamento inseguimento elettrico / termico;
- Definizione del profilo di accensione;
- Definizione del carico richiesto;
- Calcolo della fascia oraria;
- Calcoli energetici;
- Calcoli economici.

- inseguimento carico elettrico;
- inseguimento carico termico;
- funzionamento a potenza nominale con diagramma di accensione orario giornaliero prestabilito.

7/42

1.1. Cogeneratore

1.1.1. Struttura, input e output

Il blocco cogeneratore è strutturato come mostrato in Figura 1-2.

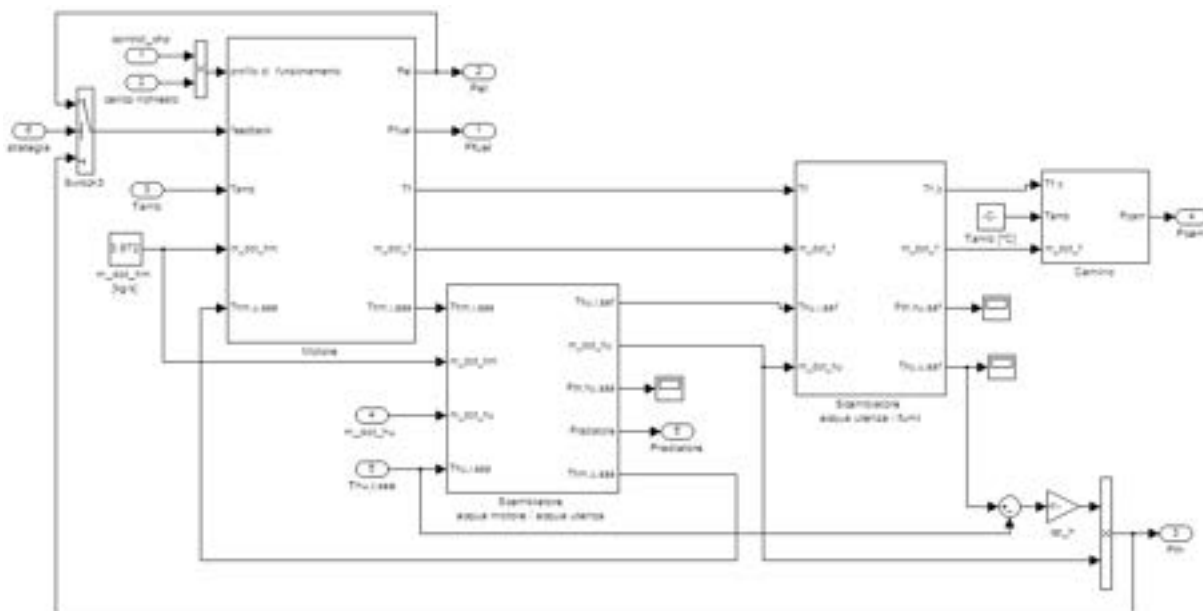


Figura 1-2 – Blocco Cogeneratore

Esso prevede i seguenti input e output:

Input:

- Profilo di accensione;
- Profilo di carico dell'utenza;
- Strategia di funzionamento (inseguimento elettrico / termico);
- Portata acqua utenza termica;
- Temperatura ritorno acqua utenza termica (ingresso scambiatore acqua/acqua);
- Stato di funzionamento (accesso – spento).

Output:

- Potenza termica del combustibile consumato;
- Potenza elettrica erogata;
- Potenza termica recuperata da acqua motore;
- Potenza termica recuperata dai fumi;
- Potenza termica dispersa al radiatore;
- Potenza termica dispersa al camino;
- Temperatura acqua motore in ingresso / uscita scambiatore acqua/acqua;
- Temperatura acqua utenza in uscita dallo scambiatore acqua/acqua;
- Temperatura acqua utenza in uscita dallo scambiatore acqua/fumi;
- Emissioni di CO₂: media oraria (kg/h) e quantità totali (kg);

- Rendimento elettrico – medio orario;
- Rendimento termico – medio orario;
- Ore totali di funzionamento.

1.1.2. Parametri di configurazione

I principali parametri selezionabili dall'utente relativi al dimensionamento del cogeneratore e alle modalità di esercizio sono di seguito elencati:

- Potenza elettrica nominale (massima potenza elettrica erogata);
- Rendimento elettrico nominale;
- Percentuale della potenza elettrica (in inseguimento elettrico) e termica (in inseguimento termico) nominali al di sotto delle quali il cogeneratore si spegne in automatico;
- Perdite di calore verso l'esterno non altrimenti conteggiate (% della potenza termica del combustibile in ingresso);
- Potere calorifico inferiore del gas di alimentazione;
- Temperatura massima dell'acqua di raffreddamento motore;
- Portata acqua di raffreddamento del motore;
- Efficienza di scambio termico degli scambiatori di calore acqua/acqua e fumi/acqua;

I suddetti parametri vengono inseriti in apposite maschere cui si accede dai blocchi Cogeneratore, Scambiatore acqua / acqua e Scambiatore acqua / fumi. A titolo di esempio si riporta in Figura 1-3 la maschera di inserimento dati relativa al Cogeneratore.

Parameters	
Potenza elettrica nominale	105
Rendimento elettrico nominale	0.372
Perdite per irraggiamento (% della potenza termica del combustibile in ingresso)	2
Dosatura stechiometrica gas naturale	17.2
Percentuale della potenza nominale a cui spegnere il motore	30
Temperatura limite acqua motore [°C]	107
Portata acqua raffreddamento motore [kg/s]	3.972
Temperatura massima dei fumi allo scarico [°C]	450
Calore specifico dei fumi [kJ/kgK]	1.2
Calore specifico acqua [kJ/kgK]	4.186

Figura 1-3 – Parametri di configurazione del cogeneratore

1.1.3. Modalità di controllo

Le modalità attraverso le quali avviene il controllo del sistema sono di seguito elencate:

- Impianto acceso a potenza costante funzionante tra il valore massimo e il valore minimo;
- Inseguimento carico elettrico;
- Inseguimento carico termico;
- Controllo sulla temperatura dell'acqua motore di ritorno dallo scambiatore: allo scopo di implementare un esempio di sistema di controllo atto a simulare il reale funzionamento del cogeneratore, è stato aggiunto un semplice sistema di termostattizzazione che si basa sul controllo della temperatura dell'acqua motore di ritorno dallo scambiatore acqua/acqua, e che simula l'attivazione di un radiatore atto alla limitazione di tale temperatura; il valore limite è impostabile come parametro dall'utente.
- Controllo sulla potenza minima erogata: quando la richiesta dell'utenza è inferiore al 30% della potenza nominale del motore, sia in inseguimento elettrico che termico, il cogeneratore si spegne.

1.1.4. Motore e generatore elettrico

La Figura 1-4 mostra il blocco motore e generatore elettrico, deputato alla produzione della potenza elettrica. Tale blocco prevede i seguenti input e output.

Input:

- Profilo di funzionamento (prodotto del profilo di accensione per il carico utenza);
- Feedback del segnale di controllo;
- Temperatura ambiente;
- Portata acqua di refrigerazione del motore;
- Temperatura acqua di refrigerazione (uscita scambiatore acqua/acqua);

Output:

- Potenza termica del combustibile consumato;
- Potenza elettrica erogata ai morsetti del generatore elettrico;
- Temperatura dei fumi allo scarico;
- Portata aria comburente, portata del combustibile e portata fumi;
- Emissioni di CO₂ (media oraria e kg totali)

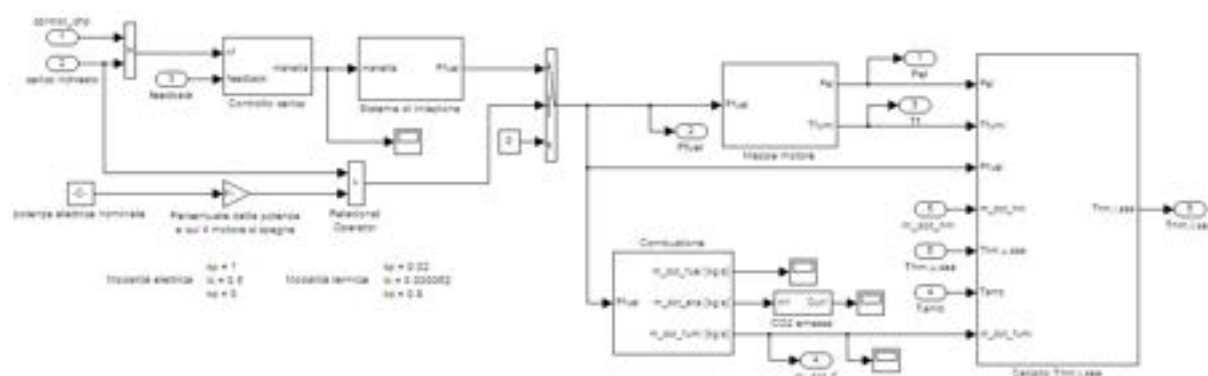


Figura 1-4 – Blocco motore e generatore elettrico

Nei successivi paragrafi verranno descritti i sottosistemi che lo caratterizzano.

1.1.4.1 Controllo carico

Il blocco del modello deputato al controllo del carico è mostrato in Figura 1-5. È stato implementato un controllore PID (proporzionale – integrativo – derivativo). È necessario sottolineare che poiché il controllo opera sulla stessa variabile, ovvero la potenza richiesta, che può però essere sia elettrica che termica, e poiché sulla parte termica sono stati implementati dei ritardi di risposta, assenti invece sulla parte elettrica, si rende indispensabile variare le costanti di configurazione del PID (K_p , K_i , K_d) a seconda che si voglia operare in modalità inseguimento elettrico, o inseguimento termico. Si noti inoltre che l'aver introdotto un ritardo nella parte termica, tende a instabilizzare la risposta del sistema.

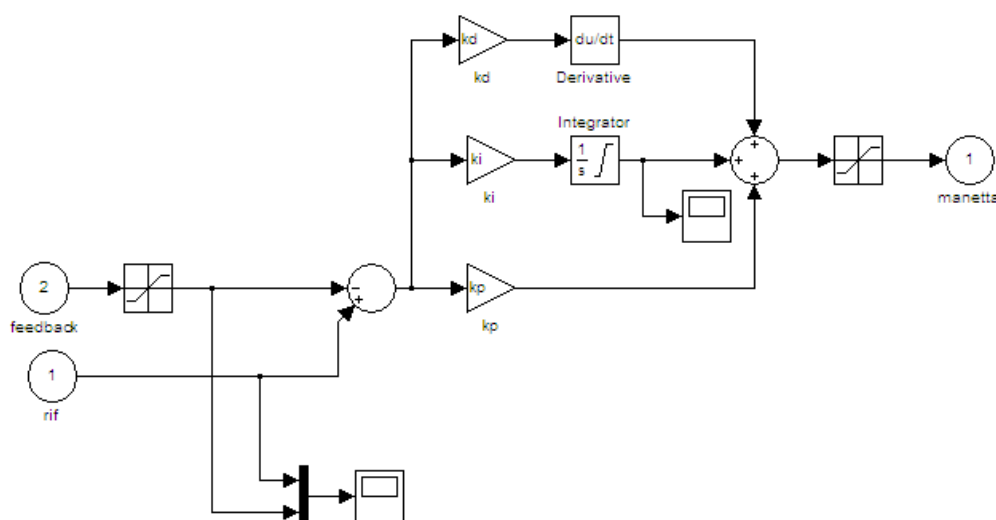


Figura 1-5 – Controllo PID del carico

1.1.4.2 Sistema di iniezione

Il blocco di sistema di iniezione, mostrato in Figura 1-6, calcola la potenza termica di combustibile necessaria affinché il cogeneratore sia in grado di seguire il carico desiderato.

In ingresso a tale blocco vi sono il rendimento elettrico e la potenza elettrica nominale, mediante i quali viene calcolata la potenza termica di combustibile, anche essa in condizioni nominali. Il blocco calcola la potenza del combustibile che il motore deve assorbire al fine di poter inseguire il carico dell'utenza.

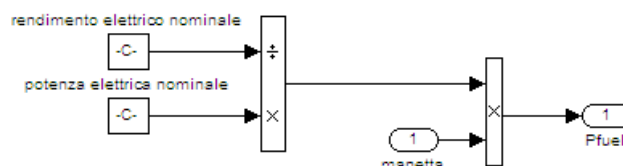


Figura 1-6 – Blocco Sistema di iniezione

1.1.4.3 Mappe motore

Il modello richiede le mappe sperimentali del motore che si intende simulare. In particolare, sono necessarie:

- mappa della potenza elettrica erogata in funzione della potenza termica del combustibile;

- mappa della temperatura fumi allo scarico in funzione della potenza termica del combustibile.

Usualmente, i produttori forniscono le mappe del rendimento elettrico in funzione della potenza elettrica. Tale mappa è facilmente riconvertibile nel formato richiesto dividendo la potenza elettrica fornita per il relativo rendimento elettrico; si calcola in tal modo la potenza termica del combustibile, che può essere inserita nell'apposita look-up table, in funzione della potenza elettrica. Il medesimo approccio vale anche per la curva relativa alla temperatura dei fumi allo scarico.

Entrambe le mappe sono state adimensionalizzate (Figura 1-7), in modo da rendere il modello adatto a descrivere il funzionamento di diversi cogeneratori di piccola taglia. La mappa della potenza elettrica è adimensionalizzata rispetto alla potenza elettrica e potenza termica del combustibile nominali, mentre la mappa della temperatura dei fumi è adimensionalizzata rispetto alla temperatura massima dei fumi allo scarico (parametro inseribile dall'utente), e alla potenza termica del combustibile nominale.

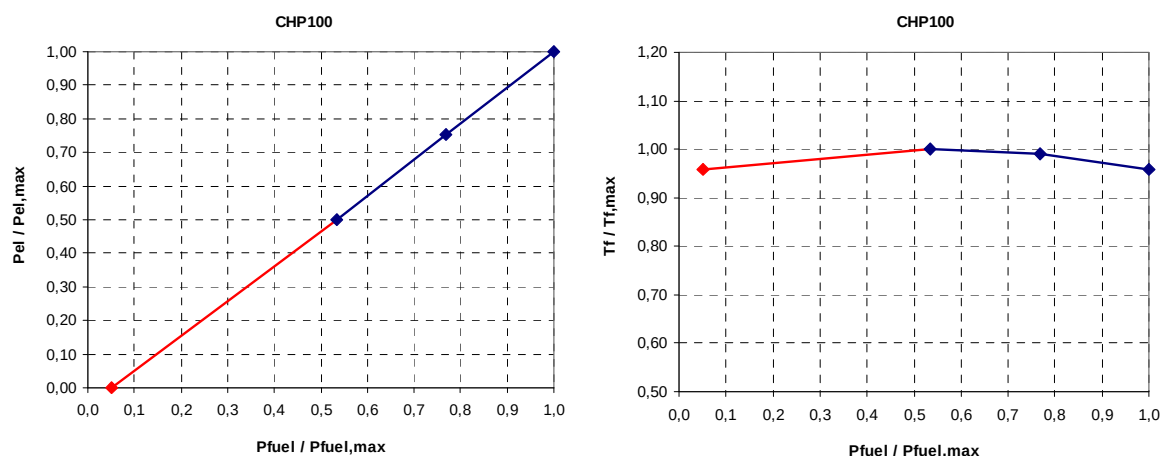


Figura 1-7 – Mappe adimensionalizzate del motore

Entrambi tali mappe vengono inserite nel blocco riportato in Figura 1-8. Come si evince, Viene inoltre considerata la possibilità di avere il cogeneratore in modalità STANDBY. Quando questo capita, la potenza elettrica erogata viene impostata al valore zero, mentre la temperatura fumi è impostata al valore di 450°C, ottenuto dalle mappe sperimentali del cogeneratore con motore a combustione interna in dotazione al Politecnico di Torino.

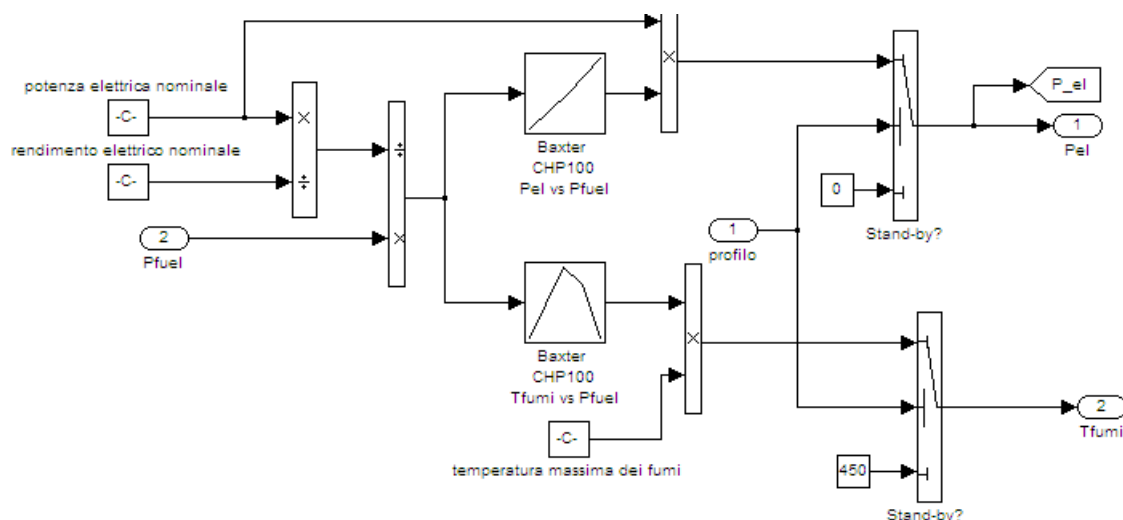


Figura 1-8 – Blocco Mappe motore

1.1.4.4 Combustione

Nota la potenza di combustibile, il blocco Combustione (riportato in Figura 1-9) permette il calcolo della portata di combustibile in ingresso al cogeneratore, e, ipotizzando la combustione stechiometrica, vengono calcolate le portate d'aria comburente, e dei fumi.

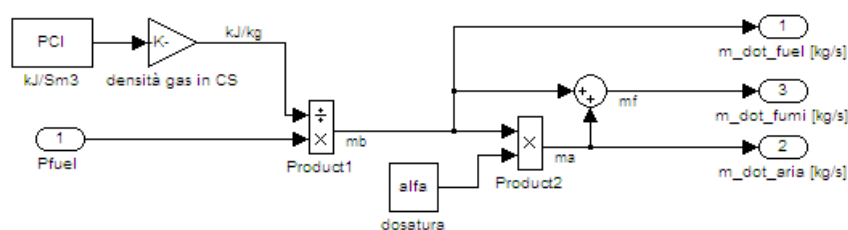


Figura 1-9 – Blocco Combustione

1.1.4.5 Calcolo della temperatura acqua di refrigerazione in uscita dal motore

Dal bilancio energetico sul blocco Motore, riportato in Figura 1-10, viene calcolata la temperatura dell'acqua di refrigerazione all'uscita del motore, cioè all'ingresso dello scambiatore acqua / acqua ($T_{hm,i,saa}$). Il procedimento adottato è il seguente:

- nota la potenza elettrica erogata e il rendimento dell'alternatore si calcola la potenza meccanica all'albero motore;
- noti portata e temperatura dei fumi, e temperatura ambiente, si calcola la potenza termica nei fumi;
- nota la potenza termica introdotta con il combustibile, si calcola la potenza termica dispersa;
- dal bilancio energetico sul sottosistema motore si calcola la potenza termica all'acqua motore;
- nota la portata d'acqua di refrigerazione del motore, e la sua temperatura di ritorno al motore, se ne calcola la temperatura in uscita dal motore stesso.

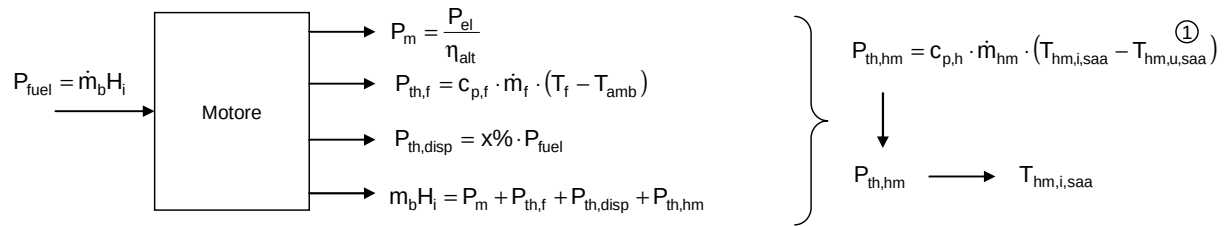


Figura 1-10 – Bilancio energetico del motore

Le sopraelencate equazioni sono state implementate all'interno del programma Simulink come illustrato in Figura 1-11.

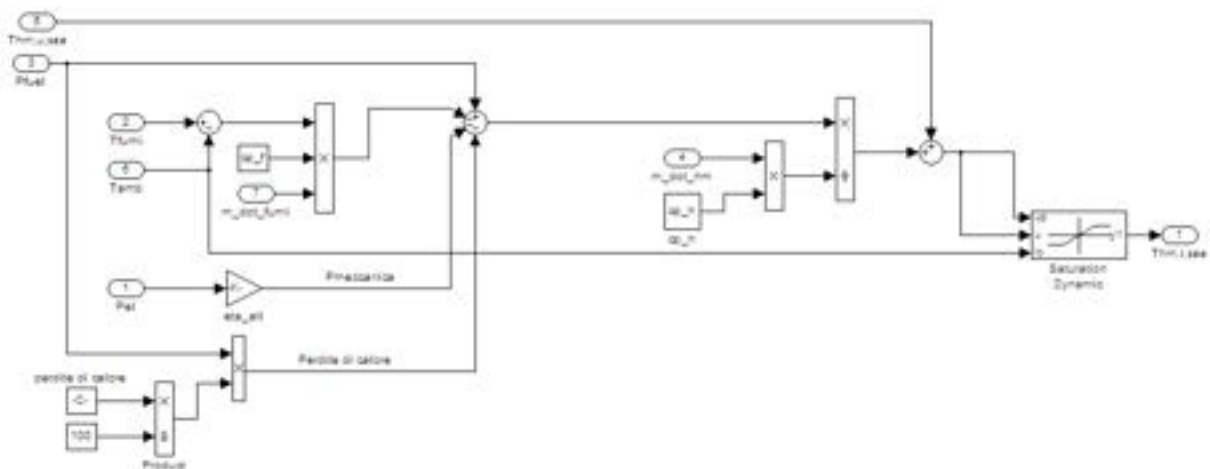


Figura 1-11 – Blocco di calcolo della temperatura acqua di refrigerazione in uscita dal motore

1.1.5. Sistema di recupero termico e sua architettura

Il cogeneratore è stato modellato con tre blocchi funzionali distinti:

- Motore a combustione interna stechiometrico;
- Scambiatore acqua motore / acqua utenza;
- Scambiatore fumi motore / acqua utenza.

Lo “scambiatore caldo”, relativo ai fumi, è posto a valle di quello acqua / acqua. Lo schema funzionale dell'architettura del sistema di recupero termico è riportato in Figura 1-12.

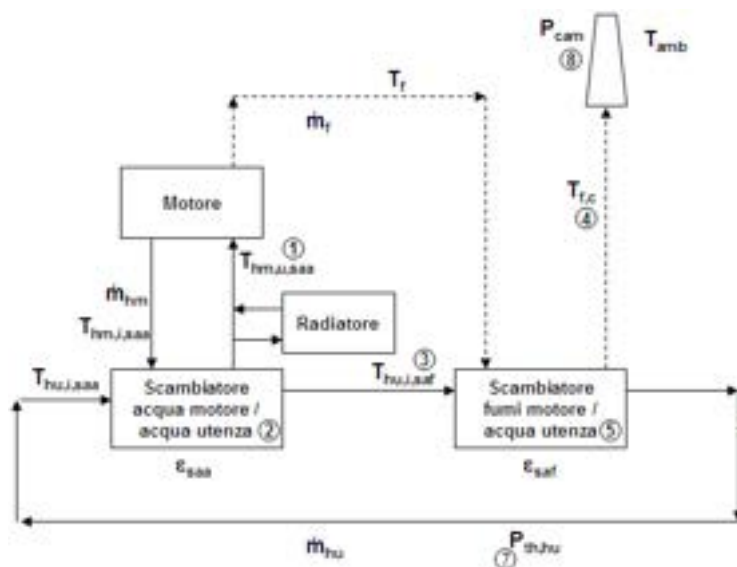


Figura 1-12 – Schema funzionale dell'architettura del sistema di recupero termico

I blocchi funzionali del Cogeneratore sono stati modellizzati in Simulink come evidenziato dalla Figura 1-13.

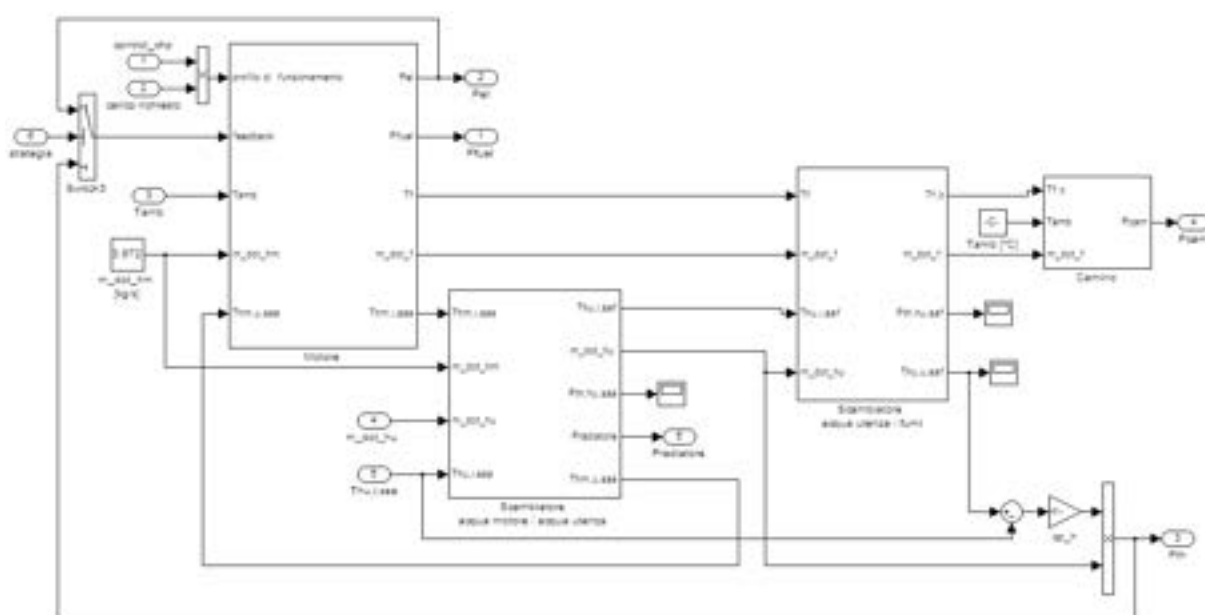


Figura 1-13 – Blocco Cogeneratore

1.1.5.1 Scambiatore acqua / acqua e radiatore

I blocchi relativi allo scambiatore acqua / acqua e al radiatore sono illustrati in Figura 1-14.

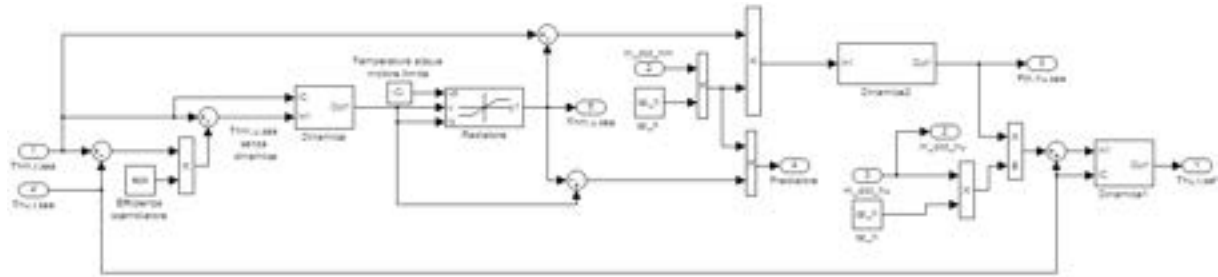


Figura 1-14 – Blocchi Scambiatore acqua / acqua e Radiatore

Dal bilancio allo scambiatore si calcolano:

- 1) $\epsilon_{saa} = \frac{T_{hm,i,saa} - T_{hm,u,saa}}{T_{hm,i,saa} - T_{hu,i,saa}}$ da cui si ricava $T_{hm,u,saa}$
- 2) $P_{th,hm} = \dot{m}_{hm} \cdot c_{p,h} \cdot (T_{hm,i,saa} - T_{hm,u,saa})$ da cui si ricava $P_{th,hm}$
- 3) $P_{th,hm} = P_{th,hu,saa} = \dot{m}_{hu} \cdot c_{p,h} \cdot (T_{hu,i,saf} - T_{hu,i,saa})$ da cui si ricava $T_{hu,i,saf}$

È possibile inserire nella maschera di configurazione dello scambiatore i dati ad esso relativi, quali in particolare l'efficienza e la costante di tempo τ (Figura 1-15).

Efficienza scambiatore
0.72
Costante di tempo [m]
2

Figura 1-15 – Maschera di input dei dati caratteristici dello scambiatore

1.1.5.2 Scambiatore acqua / fumi

Il blocco relativo allo scambiatore acqua / fumi è illustrato in Figura 1-16.

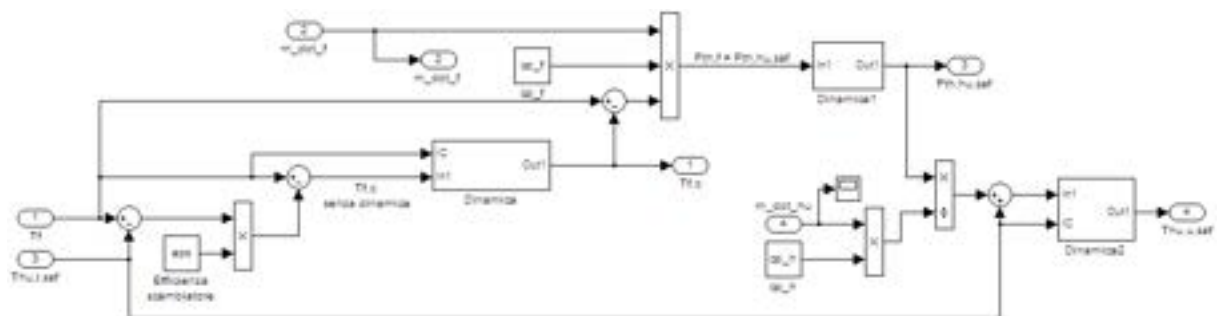


Figura 1-16 – Blocco scambiatore acqua / fumi

Dal bilancio allo scambiatore si calcolano:

- 4) $\epsilon_{saf} = \frac{T_f - T_{f,c}}{T_f - T_{hu,i,saf}}$ da cui si ricava $T_{f,c}$
- 5) $P_{th,f} = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_f - T_{f,c})$ da cui si ricava $P_{th,f}$

$$6) P_{th,f} = P_{th,hu,saf} = \dot{m}_{hu} \cdot c_{p,h} \cdot (T_{hu,u,saf} - T_{hu,i,saf}) \quad \text{da cui si ricava } T_{hu,u,saf}$$

In entrambi gli scambiatori è stato previsto un ritardo nello scambio termico dovuto all'inerzia termica dei materiali, che risponde ad una legge tipo:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T^* - T}{\tau} \quad \text{da cui} \quad T = \frac{T^*}{\tau} \cdot \int \frac{1}{\tau} dt$$

Dove:

T^* = temperatura che si avrebbe senza inerzia termica;

τ = costante di tempo dello scambiatore

È possibile inserire nella maschera di configurazione dello scambiatore i dati ad esso relativi, quali in particolare l'efficienza e la costante di tempo τ (Figura 1-17).

Figura 1-17 –Maschera di input dei dati caratteristici dello scambiatore

1.1.5.3 Camino

Dal bilancio allo scambiatore acqua / fumi viene calcolata la $T_{f,c}$ (Eq. 4). Nota pertanto la temperatura ambiente, e la portata fumi, viene calcolata la potenza dispersa al camino tramite le relazioni implementate come illustrato in Figura 1-18.

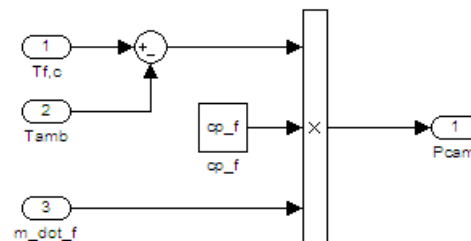


Figura 1-18 – Blocco Camino

1.1.5.4 Bilancio complessivo

Dal bilancio energetico complessivo effettuato sul sistema di recupero termico si calcolano:

$$7) P_{th,hu} = \dot{m}_{hu} \cdot c_{p,h} \cdot (T_{hu,u,saf} - T_{hu,i,saa}) \quad \text{Potenza termica totale recuperata all'acqua utenza}$$

$$8) P_{camino} = \dot{m}_f \cdot c_{p,f} \cdot (T_{f,c} - T_{amb}) \quad \text{Potenza termica dispersa al camino}$$

1.2. Carico dell'utenza, profilo di accensione e definizione della potenza erogata e del consumo di combustibile

Il modello consente di definire, tramite una mappa ricavabile da file Excel, il carico (elettrico o termico) dell'utenza (Figura 1-19).

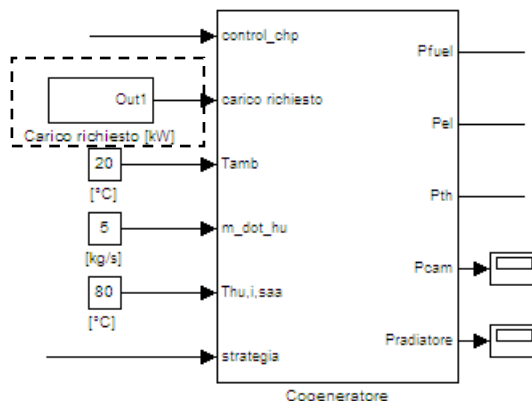


Figura 1-19 – Blocco cogeneratore con in input il profilo di carico dell'utenza

E' inserita inoltre una mappa, anch'essa ricavabile da file Excel, nella quale viene indicato, per ogni ora dell'anno, se il cogeneratore è ON (Stato 1), OFF (Stato 0). Il tempo di simulazione (minuti) viene convertito in ore in modo da poter leggere, nella mappa, lo stato di funzionamento del cogeneratore (Figura 1-20). In tale blocco vengono anche calcolate le ore totali di funzionamento del cogeneratore, impiegate per la valorizzazione del costo di manutenzione dello stesso.

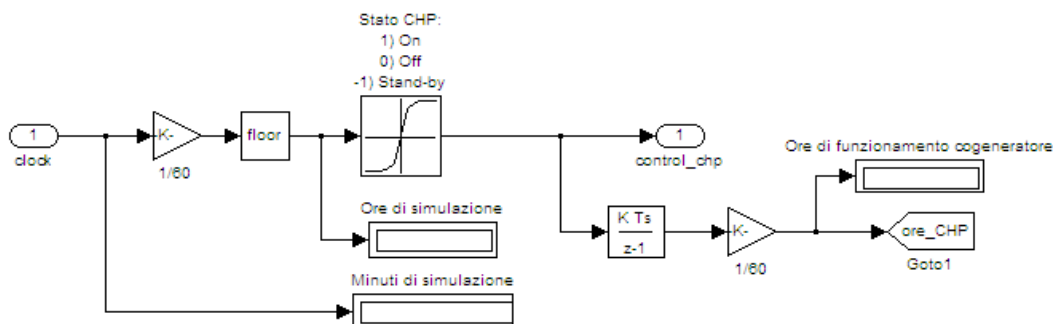
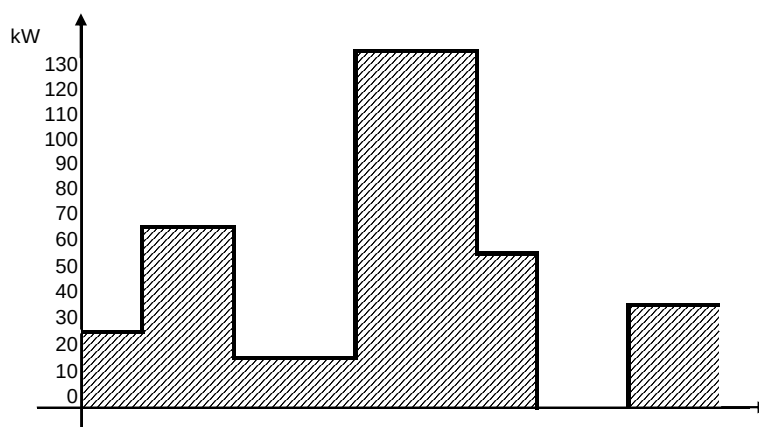


Figura 1-20 – Blocco di lettura dello stato di funzionamento del cogeneratore

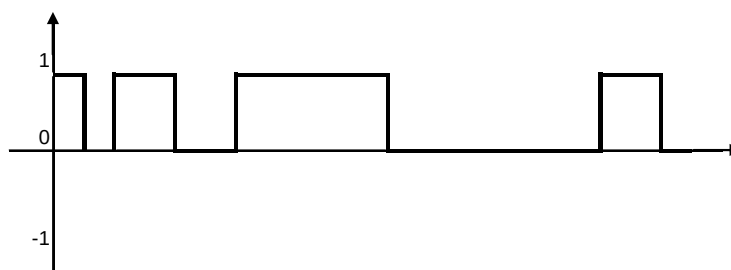
In Figura 1-21 è mostrato un esempio di come viene calcolata la potenza erogata dal cogeneratore, noti il carico dell'utenza e il profilo di accensione del cogeneratore. Si ha che:

- Quando il cogeneratore è su ON (Stato 1), esso è in grado di erogare la potenza elettrica (o termica) richiesta dall'utenza, con limite superiore pari alla potenza elettrica nominale (e alla relativa potenza termica) della macchina. La potenza del combustibile viene calcolata tramite la mappa del motore, in modo tale da ottenere il carico desiderato;
- Quando il cogeneratore è su OFF (Stato 0), la potenza elettrica (o termica) e la potenza termica del combustibile sono pari a zero;

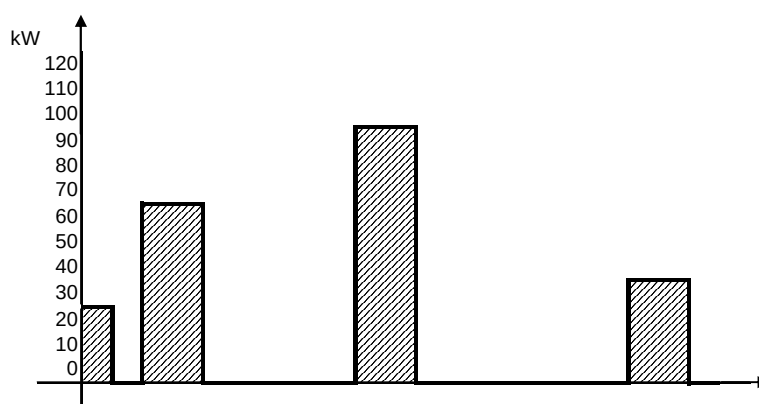
Carico elettrico dell'utenza



Profilo di funzionamento del cogeneratore



Potenza elettrica erogata ($P_{el,nom}=100$ kW)



Consumo di combustibile

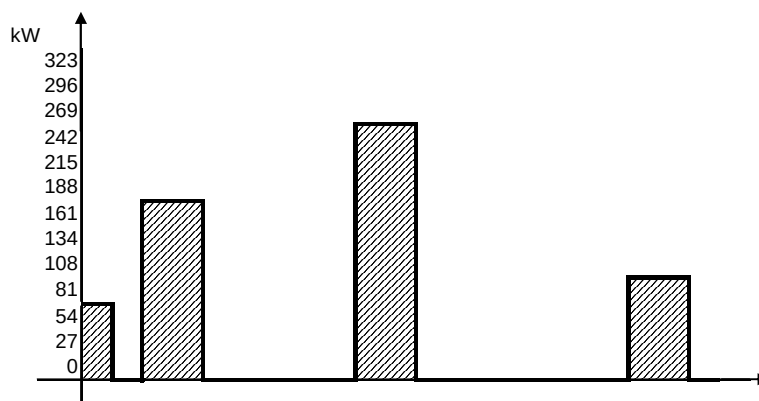


Figura 1-21 – Diagrammi di esempio di carico dell'utenza, profilo di accensione e definizione della potenza erogata e del consumo di combustibile

1.3. Calcolo fascia oraria

La struttura del mercato elettrico italiano è organizzata in fasce orarie: essa prevede cioè che l'energia elettrica abbia un costo maggiore quando maggiore è la sua richiesta, ovvero in fascia F1 (nei giorni feriali dalle 8.00 alle 18.59). Esiste poi una fascia intermedia, denominata F2, nei giorni feriali dalle 7.00 alle 7.59 e dalle 19.00 alle 22.59, e il sabato dalle 7.00 alle 22.59. Le rimanenti ore della settimana, e i giorni festivi, ricadono nella fascia più economica, la F3 (si veda la Figura 1-22).

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Mon - Fri	F3							F2	F1										F2				F3	
Sat	F3							F2																F3
Sun / Hol	F3																							

Figura 1-22 – Fasce orarie come da Delibera 181/06 AEEG

Tali indicazioni provengono dalla Delibera n. 181/06 pubblicata sul sito www.autorita.energia.it in data 04 agosto 2006, GU n. 211 del 11 settembre 2006, *Aggiornamento delle fasce orarie con decorrenza 1 gennaio 2007*.

All'interno del modello è stata pertanto inserita una mappa, ricavabile da file Excel, dalla quale viene letta per ogni ora dell'anno, la fascia elettrica corrispondente (Figura 1-23). Il tempo della simulazione (minuti) viene convertito in ore, e tramite una look-up table viene associata ad ogni ora dell'anno, la relativa fascia oraria. In tal modo è possibile individuare con precisione tutti i giorni festivi dell'anno considerato.

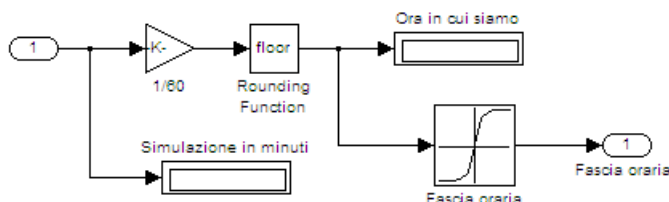


Figura 1-23 – Blocco di lettura della fascia oraria

L'indicazione della fascia oraria è impiegata nei calcoli economici per la valorizzazione dell'energia elettrica prodotta dal cogeneratore.

1.4. Calcoli energetici

Il blocco di calcolo deputato all'analisi energetica dell'impianto è illustrato in Figura 1-24. Gli input/output del blocco sono i seguenti:

Input:

- Potenza termica del combustibile in ingresso [kW];
- Potenza termica recuperata dal cogeneratore [kW];
- Potenza elettrica generata [kW];

Output:

- Energia elettrica totale recuperata nel periodo considerato [kWh];
- Energia termica totale recuperata nel periodo considerato [kWh];
- Rendimento elettrico del cogeneratore;
- Rendimento termico del cogeneratore;
- Primary Energy Savings (PES).

L'indice PES è stato introdotto dalla direttiva dell'Unione Europea 2004/8/CE. Esso indica il risparmio di energia primaria conseguente l'adozione di un impianto di cogenerazione, rispetto ad un impianto tradizionale per la produzione separata delle stesse quantità di energia elettrica e termica. In condizioni nominali di funzionamento, esso può equivalentemente essere espresso in funzione delle efficienze elettriche e termiche dell'impianto.

$$PES = 1 - \frac{E_{fuel}}{\frac{E_{el}}{\eta_{el,s}} + \frac{E_{th}}{\eta_{th,s}}} = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{el}}{\eta_{el,s}} + \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,s}}}$$

I termini $\eta_{th,s}$ e $\eta_{el,s}$ rappresentano i rendimenti termico ed elettrico di riferimento per la produzione separata, e non in assetto cogenerativo. I valori da assumere per tali rendimenti sono indicati nella Decisione della Commissione Europea 2007/74/CE del 21 Dicembre 2006.

Il calcolo del PES è particolarmente utile poiché, a decorrere dal 1 Gennaio 2011, tale indicatore permetterà di identificare gli impianti di *cogenerazione ad alto rendimento* (CAR). Si definisce infatti cogenerazione ad alto rendimento:

- la produzione combinata di energia elettrica e calore che fornisce un risparmio di energia primaria, pari almeno al 10%, rispetto ai valori di riferimento per la produzione separata di elettricità e di calore; ovvero si deve avere $PES > 10\%$;
- la produzione combinata di energia elettrica e calore mediante unità di piccola cogenerazione e di micro-cogenerazione (cioè di potenza rispettivamente inferiore a 1 MW e inferiore a 50 kW) che forniscono un risparmio di energia primaria (ovvero basta che si abbia $PES > 0$)

Si ricorda che un impianto di cogenerazione, se ad alto rendimento, gode dei seguenti benefici:

- agevolazioni fiscali sull'accisa del gas metano utilizzato per la cogenerazione (Decreto Legislativo n. 504/95 aggiornato dal Decreto Legislativo 2 febbraio 2007, n. 26);
- esonero dall'obbligo di acquisto dei certificati verdi previsto per i produttori e gli importatori di energia elettrica con produzioni e importazioni annue da fonti non rinnovabili eccedenti i 100 GWh (art. 11, commi 1, 2 e 3 del Decreto Legislativo 16 marzo 1999, n. 79);
- la precedenza, nell'ambito del dispacciamento, dell'energia elettrica prodotta da cogenerazione rispetto a quella prodotta da fonti convenzionali (art. 11, comma 4, del Decreto Legislativo 16 marzo 1999, n. 79);
- la possibilità di ottenere, nel caso in cui l'impianto sia realizzato da società di servizi energetici, da distributori di energia elettrica e gas o da soggetti che abbiano provveduto

alla nomina del responsabile per la conservazione e l'uso razionale dell'energia, i titoli di efficienza energetica (certificati bianchi) di cui ai Decreti 20 luglio 2004 del Ministero delle Attività Produttive, di concerto con il Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio;

- la possibilità di accedere al servizio di scambio sul posto dell'energia elettrica prodotta da impianti di cogenerazione ad alto rendimento con potenza nominale fino a 200 kW (Deliberazione dell'Autorità del 3 giugno 2008 – ARG/elt 74/08);
- la possibilità di applicare condizioni tecnico-economiche per la connessione semplificate, come definite dall'Autorità con la Deliberazione n. ARG/elt 99/08;
- procedure amministrative semplificate per l'autorizzazione alla costruzione e alla gestione degli impianti di cogenerazione, con particolare riferimento alle unità di piccola e di micro-cogenerazione (legge 23/07/2009, n. 99).

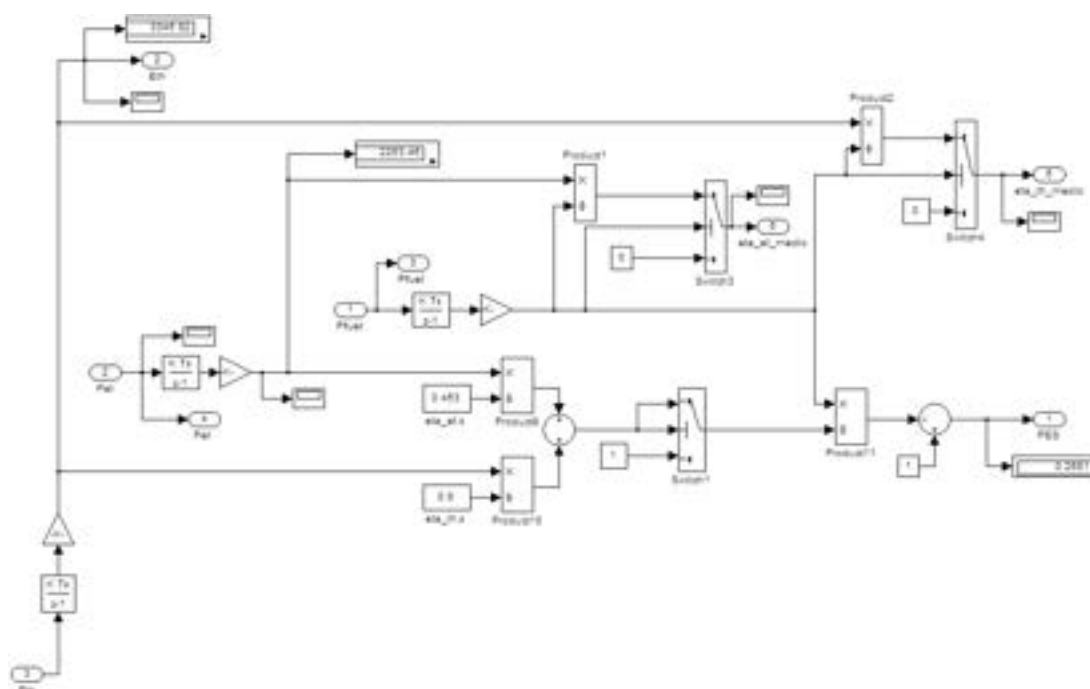


Figura 1-24 – Blocco Calcoli Energetici

1.5. Calcoli economici

L'analisi economica dell'esercizio del cogeneratore è stata implementata per mezzo del metodo dei flussi di cassa annuali. Tali flussi sono calcolati conoscendo i ricavi, e i costi. Il blocco deputato alla valutazione della redditività economica dell'esercizio dell'impianto si compone pertanto di tre sottosistemi:

- Calcolo dei ricavi [€];
- Calcolo delle spese, suddiviso in:
 - Calcolo dei costi variabili [€];
 - Calcolo dei costi fissi [€].

Input:

- Potenza termica del combustibile in ingresso al cogeneratore [kW];
- Potenza termica complessiva recuperata dal cogeneratore [kW];
- Potenza elettrica prodotta [kW].

- Margine Operativo Lordo d'esercizio (MOL) realizzato dall'impianto, nel periodo di tempo selezionato nella simulazione.

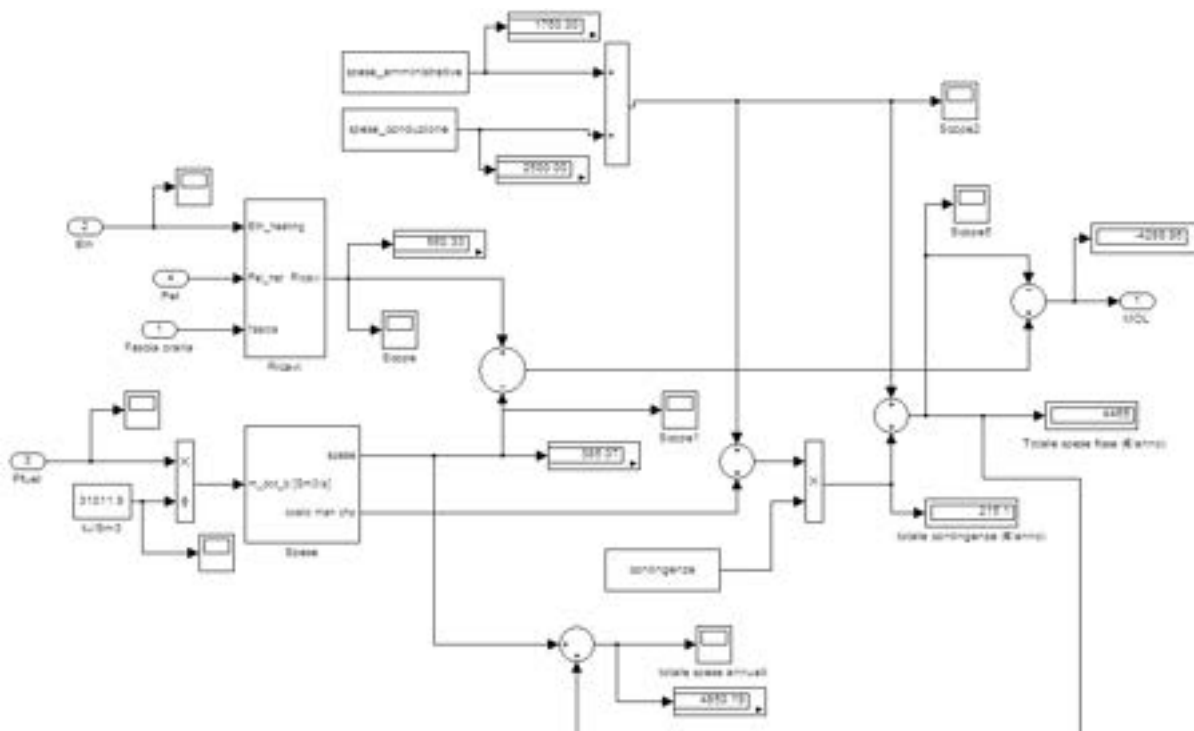


Figura 1-25 – Blocco Calcoli Economici

Il blocco Ricavi è illustrato in Figura 1-26. I ricavi sono costituiti da due voci: la valorizzazione dell'energia elettrica autoconsumata, e la valorizzazione dell'energia termica prodotta e destinata al riscaldamento ambienti. Nel seguito si descriveranno tali componenti.

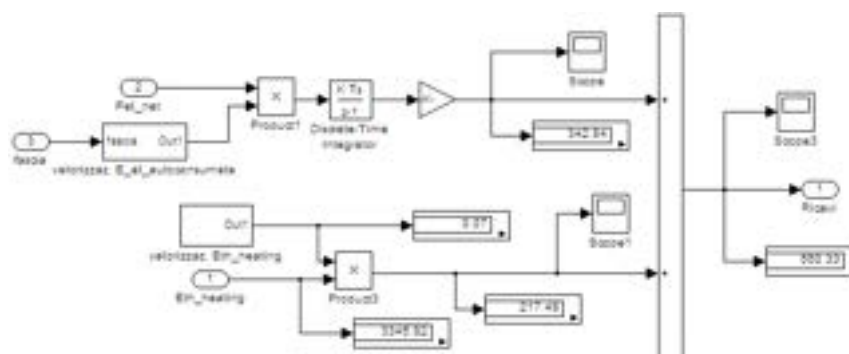


Figura 1-26 – Blocco Ricavi

La valorizzazione dell'energia elettrica autoconsumata è effettuata all'interno del blocco riportato in Figura 1-27, in cui viene effettuata la lettura della fascia oraria in cui il cogeneratore opera. Sulla base di tale lettura, grazie ad un ciclo if/else if, viene assegnata all'energia elettrica prodotta e autoconsumata il relativo valore di mercato (inserito, fascia per fascia, dall'utente).

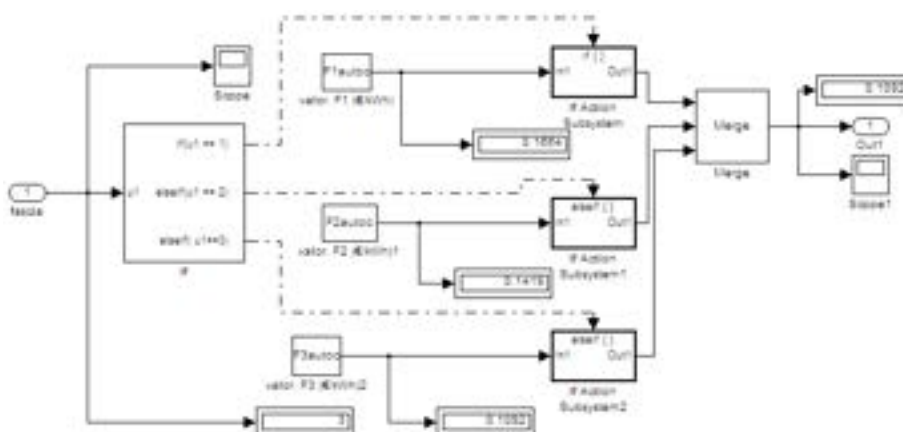


Figura 1-27 – Blocco di valorizzazione energia elettrica autoconsumata

La valorizzazione dell'energia termica impiegata per il riscaldamento ambienti è invece effettuata nel blocco illustrato in Figura 1-28.

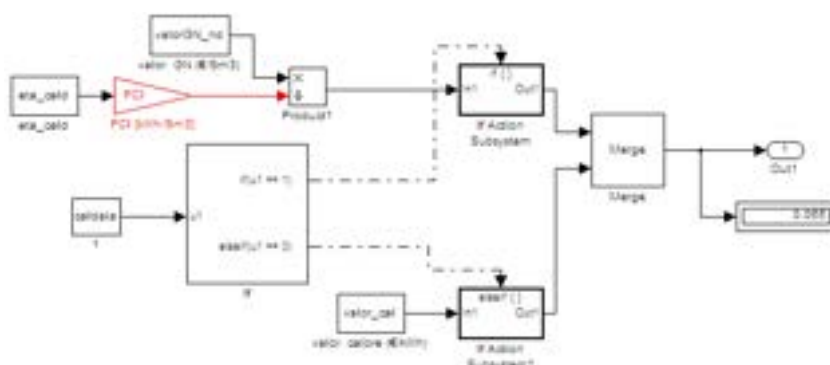


Figura 1-28 – Blocco di valorizzazione energia termica recuperata per riscaldamento ambienti

Il blocco consente di selezionare se la valorizzazione dell'energia termica deve essere effettuata considerando il costo del calore approvvigionato tramite servizio di teleriscaldamento, oppure come il mancato costo di gas naturale che si sarebbe sostenuto tramite una caldaia, per produrre la medesima quantità di energia termica. In tale secondo caso, è necessario indicare il rendimento termico della caldaia considerata nel confronto (valore inserito dall'utente nell'apposita maschera di configurazione).

1.5.2 Costi variabili

I costi variabili sono rappresentati dal costo orario per la manutenzione del cogeneratore, e il costo del combustibile. Il calcolo del costo del gas di alimentazione viene eseguito partendo dalla portata di combustibile in ingresso al cogeneratore, la quale viene integrata per calcolare i m³ totali

consumati. Da questi, vengono sottratti i m^3 su cui si applica la defiscalizzazione ($0.25 \text{ Sm}^3/\text{kWh}_{\text{el}}$), e viene pertanto calcolato il costo totale di acquisto del combustibile applicando la quota senza accise al volume defiscalizzato, e la quota comprensiva di accise alla rimanente parte. Viene inoltre svolto il calcolo del costo di manutenzione del cogeneratore, moltiplicando il costo orario della manutenzione per le ore totali di funzionamento annuo. Il blocco è illustrato in Figura 1-29.

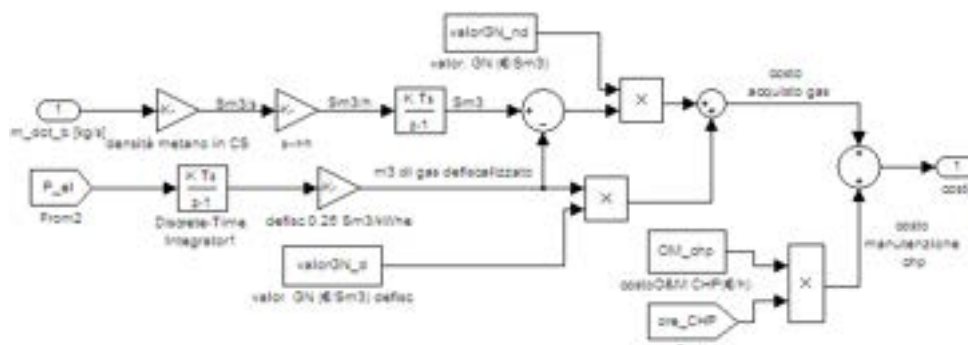


Figura 1-29 – Blocco di calcolo dei costi variabili

1.5.3 Costi fissi

Il calcolo dei costi fissi annuali prevede la somma di tre contributi:

- Costi di gestione e conduzione dell'impianto;
- Costi amministrativi;
- Imprevisti e contingenze (assunti pari al 5% del totale costi, escludendo i costi per l'acquisto del combustibile).

Il blocco che realizza tale calcolo è illustrato in Figura 1-30.

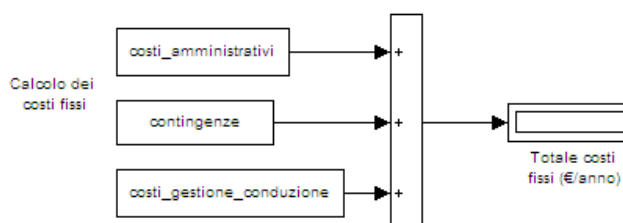


Figura 1-30 – Blocco di calcolo dei costi fissi

1.5.4 Maschera di inserimento dati

Al fine di ottimizzare la fase di inserimento dei valori alla base del calcolo economico, è stata predisposta una maschera dati, riportata in Figura 1-31.

Parameters	
Valorizzazione GN non defiscalizzato [€/Sm3]	0.609
Valorizzazione GN defiscalizzato [€/Sm3]	0.40
Valorizzazione Eel autoconsumata in fascia F1 [€/kWh]	0.16635
Valorizzazione Eel autoconsumata in fascia F2 [€/kWh]	0.14192
Valorizzazione Eel autoconsumata in fascia F3 [€/kWh]	0.10922
Valorizzazione calore [€/kWh]	0.065
Spese manutenzione cogeneratore [€/ora di funz.]	2.016
Spese di gestione e conduzione [€/anno]	2500
Spese generali e amministrative [€/anno]	1750
Percentuale contingenze	0.05
Rendimento caldaia tradizionale	0.85
Utenza con caldaia tradizionale [1] o con teleriscaldamento [0]	0

Figura 1-31 – Maschera di inserimento dati relativi ai calcoli economici

1.6. Esempi di simulazione

1.6.1 Ipotesi

E' stata condotta una simulazione di prova con le seguenti ipotesi:

- Step di integrazione: minuto;
- Tempo della simulazione: 525600 minuti (un anno);
- Cogeneratore considerato: Baxter Energy CHP100 (i cui dati erano disponibili da un precedente incarico consulenziale per ENEA);
- Mappe motore fornite dal produttore: come da Figura 1-32.

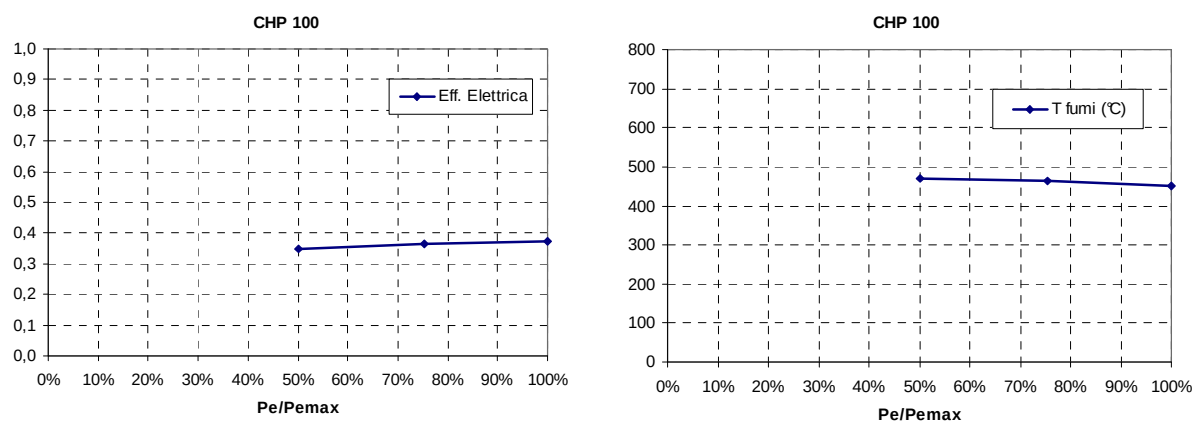


Figura 1-32 – Mappe sperimentali del motore fornite dal produttore e inserite nel modello

- Rielaborazione delle mappe motore così come inserite nel modello: come da Figura 1-33 (NB: le mappe sono poi state adimensionalizzate, vedi Figura 1-7).

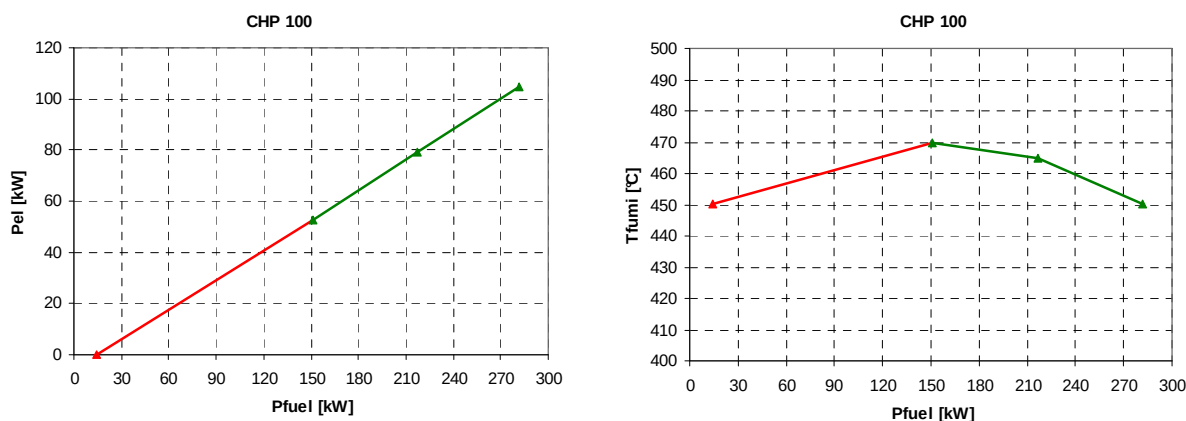
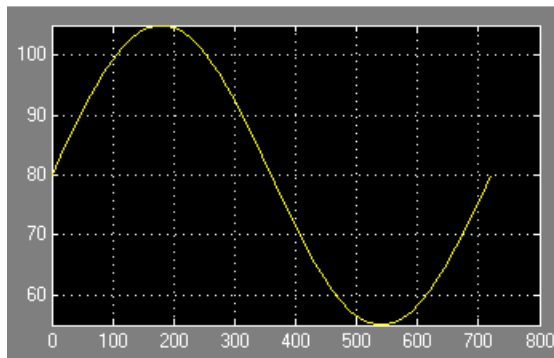


Figura 1-33 – Rielaborazione delle mappe sperimentali del motore per l'inserimento nel modello

- Potenza elettrica nominale del cogeneratore: 105 kW
- Rendimento elettrico nominale del cogeneratore: 37.2%
- PCI del gas naturale: 9.59 kWh/Nm3
- Strategia di funzionamento: inseguimento elettrico;
- Temperatura ambiente: 20°C;

- Temperatura massima dell'acqua di raffreddamento del motore: 107°C;
- Portata acqua di raffreddamento del motore: 3.97 kg/s (fonte datasheet NEF N60 ENTG);
- Portata acqua dell'utenza: 5 kg/s;
- Temperatura acqua utenza ingresso scambiatore acqua / acqua: 80°C (datasheet NEF N60 ENT);
- Efficienza dello scambiatore acqua / acqua: 0.72;
- Efficienza dello scambiatore acqua / fumi: 0.72;
- Costante di tempo τ dei due scambiatori: 2 minuti
- Profilo di accensione cogeneratore: sempre spento in fascia F3 (4048 ore di funzionamento anno);
- Profilo di carico elettrico utenza: come da Figura 1-34.

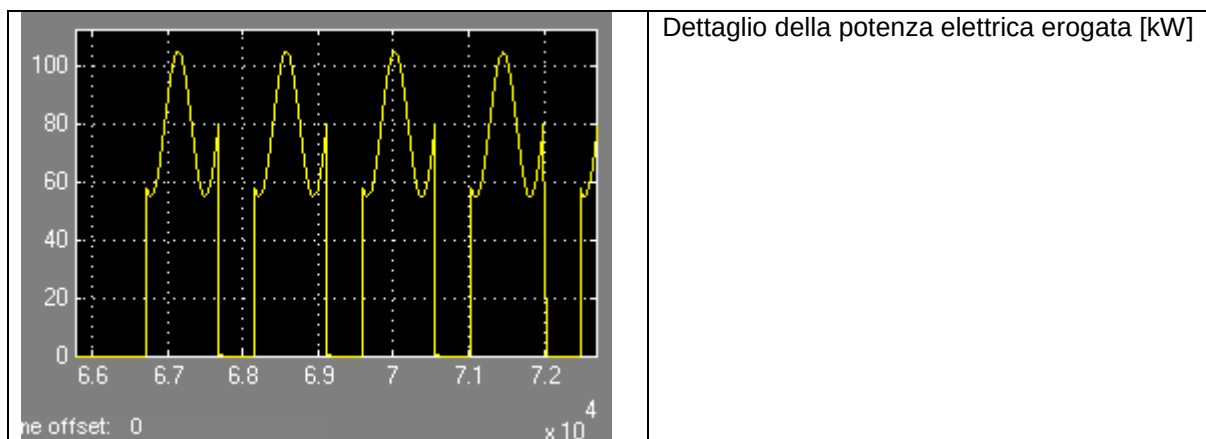


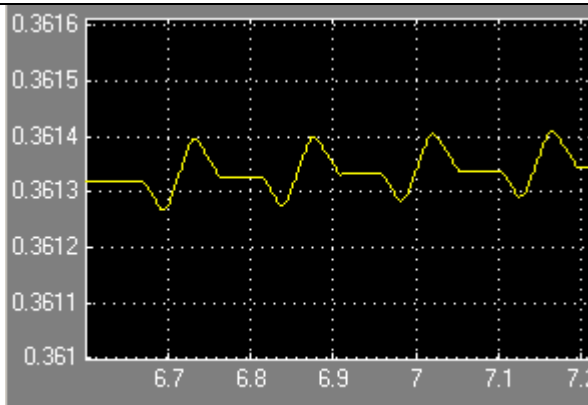
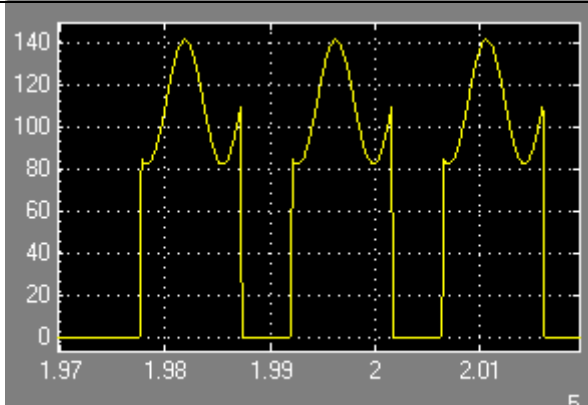
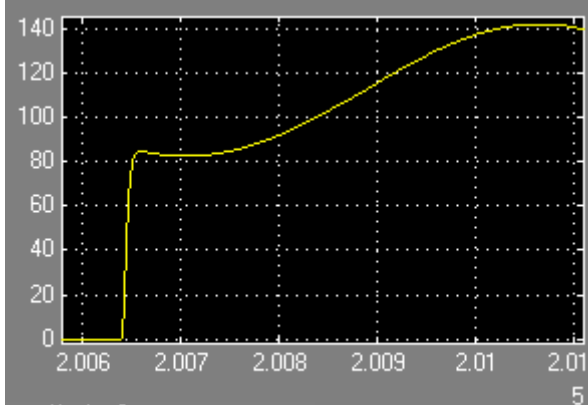
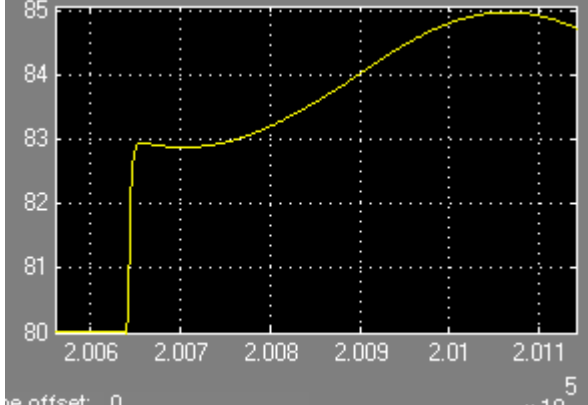
Sinusoidale:

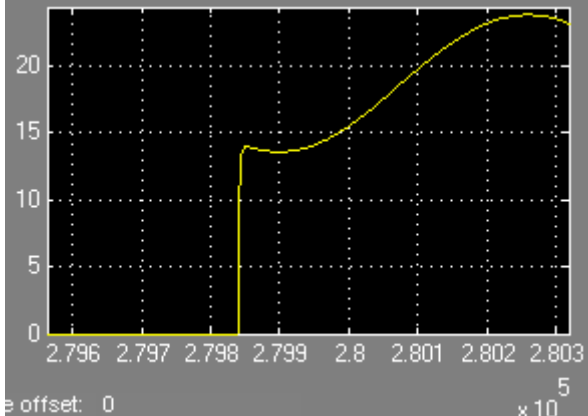
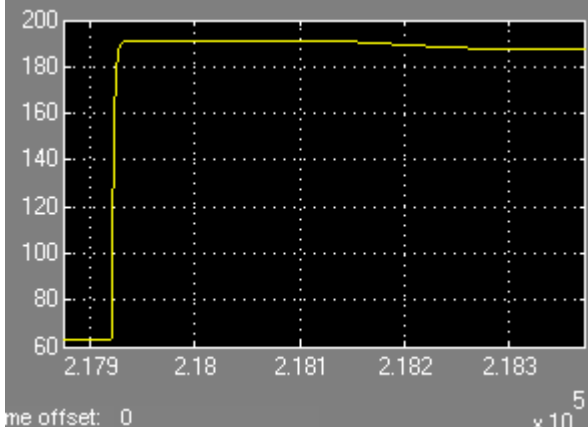
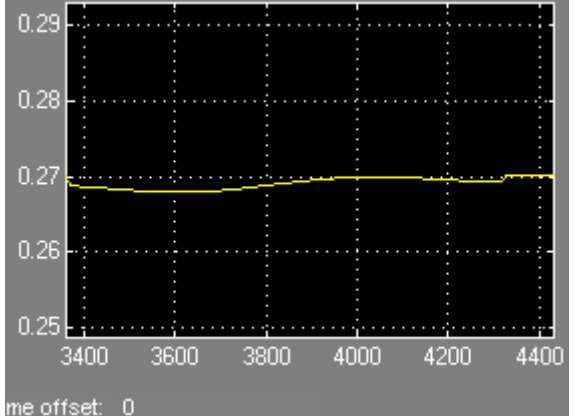
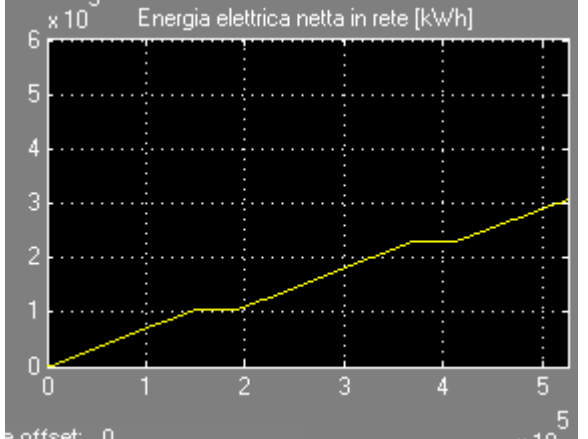
- valore medio pari a 80 kW
- ampiezza pari a 25 kW
- periodo pari a 720 minuti (12 ore)

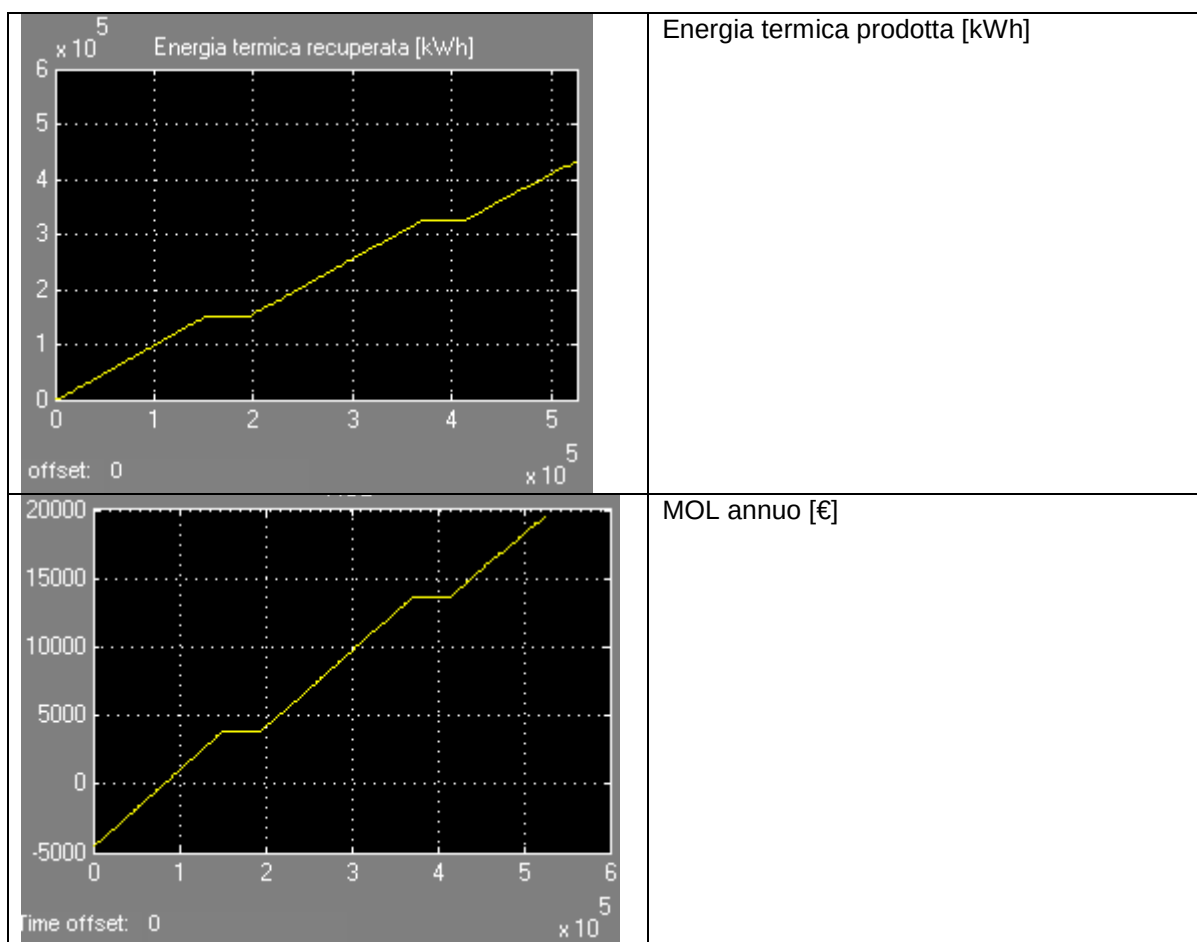
Figura 1-34 – Profilo di carico elettrico dell'utenza considerato per la simulazione

1.6.2 Risultati



 Time offset: 0 x 10⁴	Rendimento elettrico medio
 Time offset: 0 x 10⁵	Dettaglio della potenza termica erogata [kW]
 Time offset: 0 x 10⁵	Dettaglio dell'inertza con cui il cogeneratore si porta da potenza termica erogata nulla, al carico richiesto [kW]
 Time offset: 0 x 10⁵	Temperatura acqua utenza in uscita dallo scambiatore acqua / acqua [°C]

 Time offset: 0 x 10⁵	Potenza termica al camino [kW]
 Time offset: 0 x 10⁵	Temperatura fumi al camino [°C]
 Time offset: 0	PES
 Time offset: 0 x 10⁵	Energia elettrica prodotta [kWh]



2. Parte B: Integrazione del modello con caldaia e accumulo termico

La presente sezione intende mostrare le modifiche apportate al modello di simulazione descritto nella Parte A, per renderlo integrato ad un accumulo termico e ad una caldaia. Tale integrazione è mirata a simulare la presenza di un edificio, il cui carico termico è soddisfatto dal recupero termico del cogeneratore (ed eventualmente dalla caldaia), tramite l'interposizione di un accumulo fra la parte di produzione e quella di assorbimento di potenza termica.

2.1. Accumulo termico

Il modello matematico dell'accumulo termico è il componente di interfaccia tra il modello dell'edificio e quello del cogeneratore e della caldaia. L'accumulo termico consente di valutare l'inerzia nel funzionamento dei sistemi di riscaldamento e condizionamento degli edifici, in funzione del volume scelto e della coibentazione dello stesso.

La dinamica dell'accumulo termico è governata dalla seguente equazione differenziale:

$$9) \text{CAP} * \frac{dT_t}{d\tau} = Q_{aux} - Q_{load} - U * S * (T_t - T_a)$$

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} : potenza termica fornita dal cogeneratore;
- Q_{load} : carico termico 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:

$$10) \text{FF} = S/V=0,3; \quad S = \text{FF} * V;$$

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

$$11) \frac{dT_t}{d\tau} + \frac{U * \text{FF} * V}{\text{CAP}} T_t = \frac{Q_{aux} - Q_{load} + U * \text{FF} * V * T_a}{\text{CAP}}$$

Ovvero:

$$12) \dot{T}_t + K * T_t = H$$

Dove :

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

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

Si riporta in Figura 2-1 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 calore per trasmissione attraverso la superficie dell'accumulo.

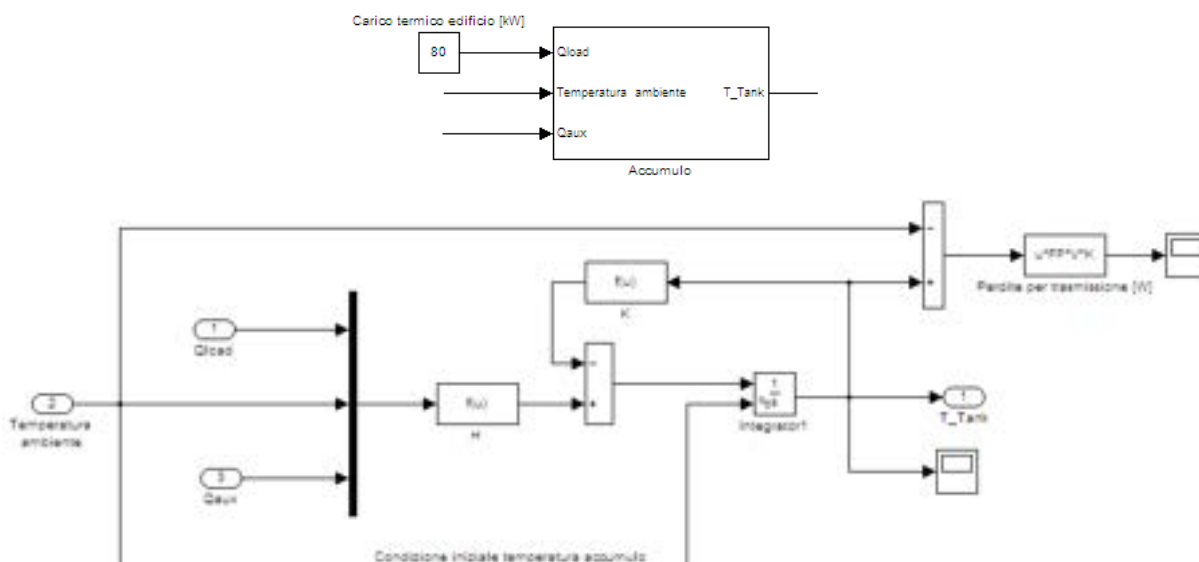


Figura 2-1 – Modello dell'accumulo termico

I parametri fisici e geometrici caratteristici dell'accumulo vengono inseriti dall'utente in un'apposita maschera, riportata in Figura 2-2.

Parameters	
Volume accumulo [m3]	3
Trasmittanza termica involucro accumulo [W/m2K]	1
Fattore di forma accumulo	0.3
Calore specifico acqua [kJ/kgK]	4.186

Figura 2-2 – Maschera per l'inserimento dei dati caratteristici dell'accumulo

2.2. Caldaia

Il modello matematico della caldaia implementa la strategia di controllo della stessa, con logica di tipo termostato. Un relè manda un segnale di off alla caldaia quando la temperatura dell'accumulo termico è superiore alla temperatura di riferimento, T_{ref} impostabile dall'utente; il relè va in "on" solo quando la temperatura dell'accumulo termico scende sotto la soglia di temperatura minima, T_{min} , fissata anch'essa dall'utente. Il modello Simulink della caldaia è illustrato in Figura 2-3.

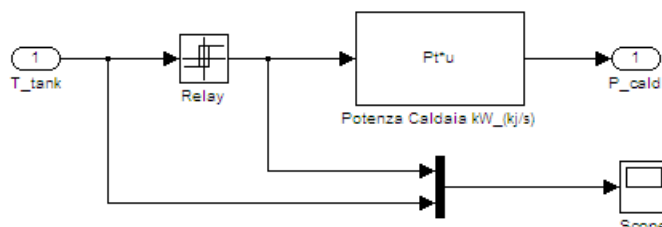


Figura 2-3 – Modello Simulink della caldaia

Anche in questo caso è stata predisposta una maschera per l'inserimento dei dati di targa della caldaia.



Figura 2-4 – Maschera per l'inserimento della potenza nominale della caldaia

2.3. Integrazione con il modello di cogeneratore

Il modello di simulazione nel suo complesso si presenta come riportato in Figura 2-5.

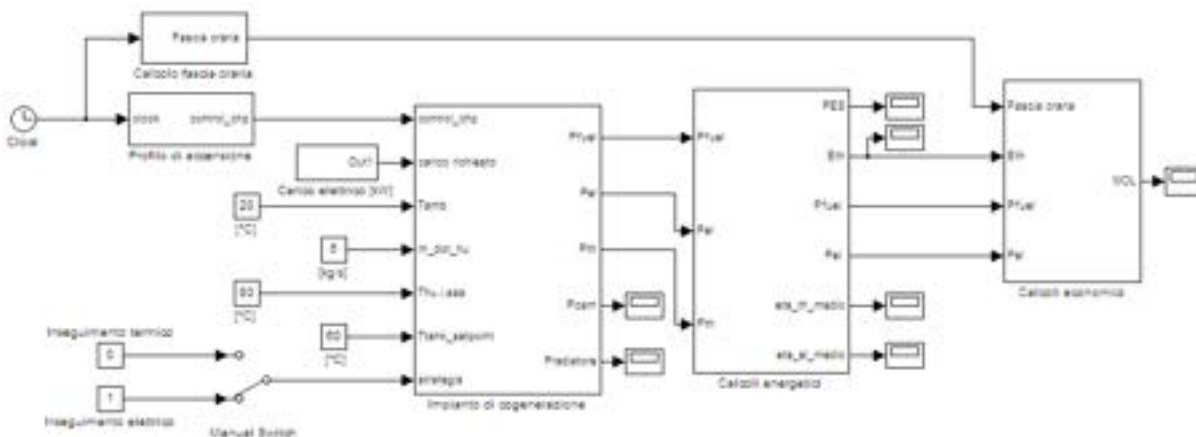


Figura 2-5 – Modello di simulazione completo

La struttura è la medesima rispetto a quanto già presentato nella Parte A, ma è stato però definito un blocco denominato "Impianto di cogenerazione", che comprende al suo interno:

- il motore a combustione interna completo di scambiatori acqua/acqua e acqua/fumi per il recupero della potenza termica;
- l'accumulo termico e la caldaia.

Un'immagine di tale blocco è riportata in Figura 2-6.

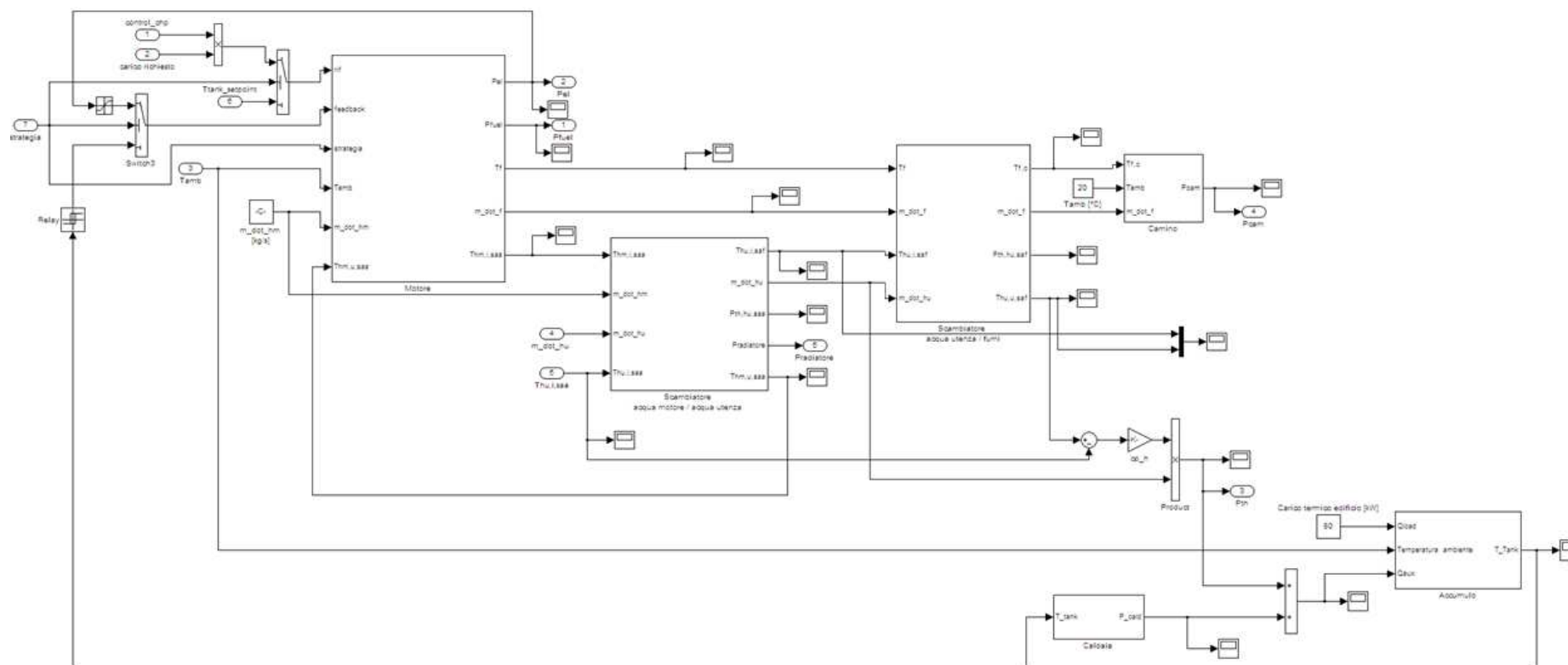


Figura 2-6 – Modello del blocco “Impianto di cogenerazione”

2.4. Modifiche alle strategie di funzionamento

Le due strategie di funzionamento previste e implementate nella Parte A sono state così modificate:

- Inseguimento elettrico: il cogeneratore regola la potenza elettrica prodotta in modo tale da seguire un profilo assegnato dall'utente dall'esterno; la produzione termica, e la temperatura nell'accumulo, variano di conseguenza; la caldaia interviene quando quest'ultima scende al di sotto del livello T_{min} definito dall'utente;
- Inseguimento termico: il cogeneratore regola la potenza elettrica prodotta in modo tale che la potenza termica sia tale da garantire la temperatura T_{ref} di set point all'interno dell'accumulo. La regolazione operata dal cogeneratore è di tipo "fine", esso cioè mantiene la temperatura dell'accumulo in un intervallo compreso fra la T_{ref} e una temperatura T_{on} inferiore alla T_{ref} , selezionabile dall'utente, e maggiore della T_{min} . si hanno pertanto i seguenti intervalli di funzionamento:
 - $T_{accumulo} = T_{ref}$: il cogeneratore e la caldaia sono spenti;
 - $T_{on} < T_{accumulo} < T_{ref}$: il cogeneratore è acceso, la caldaia è spenta;
 - $T_{min} < T_{accumulo} < T_{on}$: il cogeneratore è acceso, la caldaia è spenta;
 - $T_{accumulo} < T_{min}$: il cogeneratore è acceso, la caldaia è accesa.

In entrambi gli scambiatori di calore del modello (acqua/acqua e acqua/fumi) sono stati rimossi i ritardi nello scambio termico dovuto all'inerzia termica dei materiali, inerzia implementata nel modello del solo cogeneratore, come descritto al paragrafo 1.1.5.2.

Inoltre, qualora durante il suo funzionamento il cogeneratore si trovi ad erogare una potenza elettrica inferiore al valore di soglia minima stabilito dall'utente (es: 30% della potenza elettrica nominale), il motore si spegne automaticamente, per riaccendersi quando la potenza richiesta supera nuovamente il valore soglia prefissato.

2.5. Esempi di simulazione

2.5.1. Inseguimento termico – CASO 1

Dati in ingresso:

Dati tecnici del cogeneratore: come Parte A;

T_{ref} accumulo: 60°C

T_{on} cogeneratore: 55°C

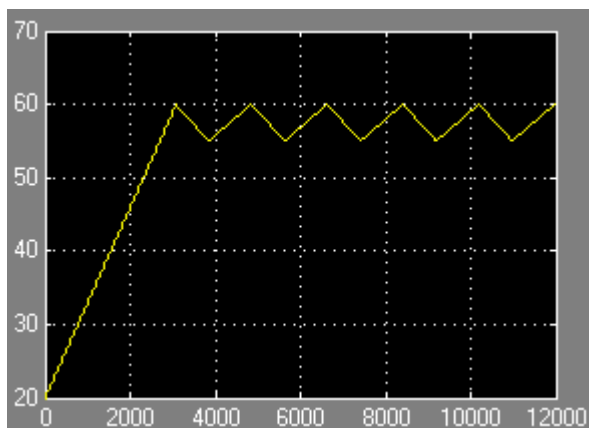
T_{min} accumulo: 50°C

Potenza termica della caldaia: 100 kW

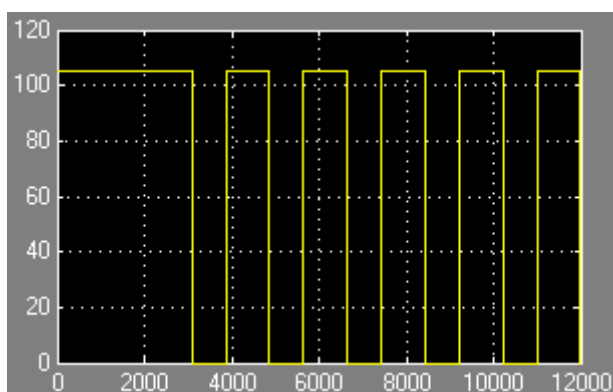
Carico termico edificio: 80 kW

Risultati della simulazione:

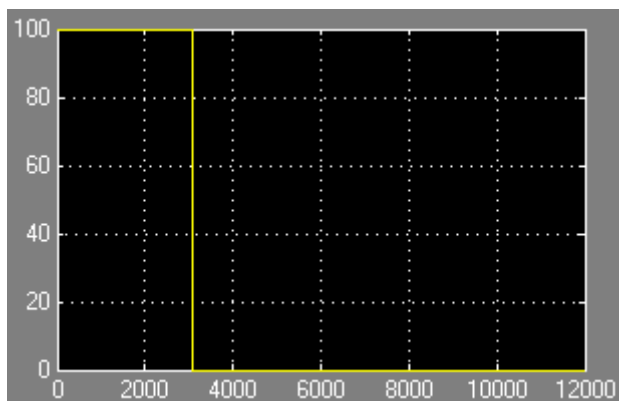
Temperatura accumulo [°C]: si nota la modulazione “fine” operata dal cogeneratore, fra la T_{ref} (60°C) e la T_{on} (55°C).



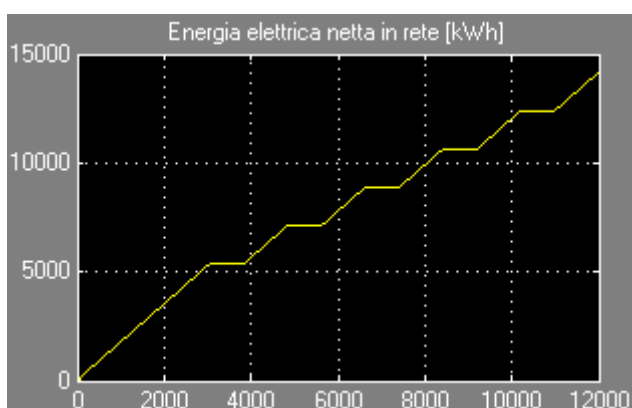
Potenza elettrica erogata dal cogeneratore [kW]: il motore si spegne quando la temperatura nell'accumulo raggiunge la T_{ref} , e si riaccende quando essa raggiunge la T_{on}



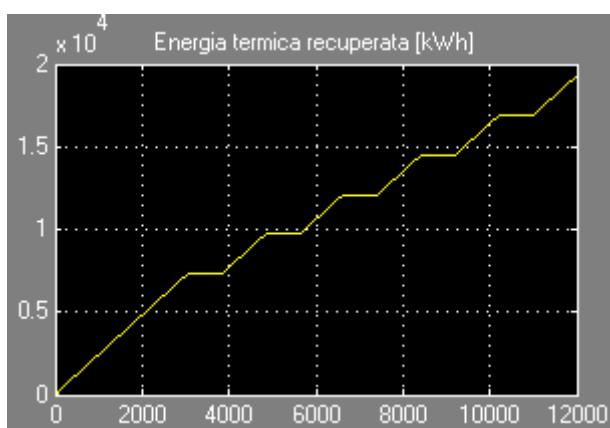
Potenza erogata dalla caldaia [kW]: essa è pari al valore nominale fin quando la temperatura nell'accumulo è al di sotto della T_{ref} , e si spegne per poi riaccendersi quando essa scende al di sotto della T_{min} (ovvero mai, poiché è sufficiente la potenza termica recuperata dal motore per mantenere l'accumulo nel range $T_{on} - T_{ref}$).



Energia elettrica recuperata [kWh]



Energia termica recuperata [kWh]



2.5.2. Inseguimento termico – CASO 2

Dati in ingresso:

Dati tecnici del cogeneratore: come Parte A;

T_{ref} accumulo: 60°C

T_{on} cogeneratore: 55°C

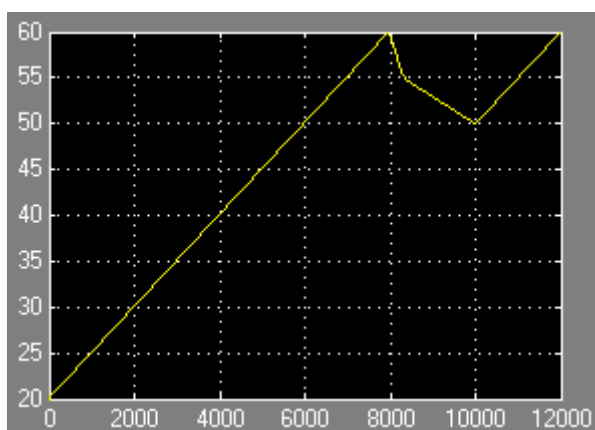
T_{min} accumulo: 50°C

Potenza termica della caldaia: 100 kW

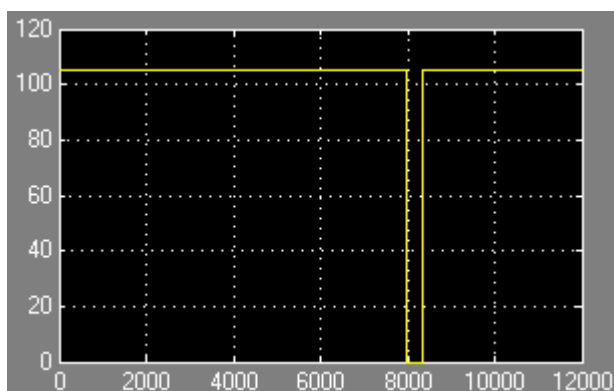
Carico termico edificio: 180 kW

Risultati della simulazione:

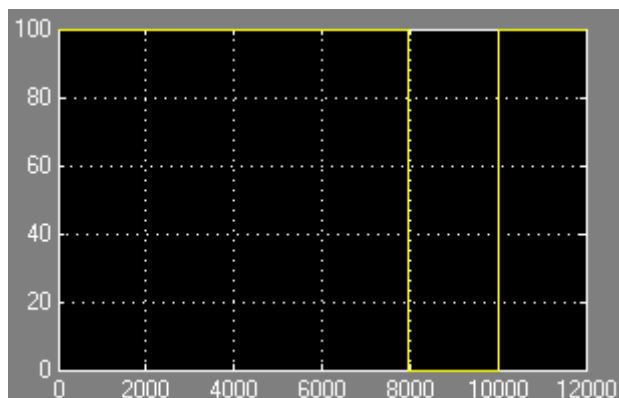
Temperatura accumulo [°C]: si nota come la temperatura si porti alla T_{ref} grazie alla potenza fornita simultaneamente dal cogeneratore e dalla caldaia. Raggiunta la T_{ref} la caldaia si spegne, e la temperatura diminuisce fino alla T_{on} , dopo di che si riaccende il cogeneratore, che però non ha sufficiente potenza per farla aumentare. La temperatura pertanto diminuisce (con pendenza minore poiché il cogeneratore è comunque acceso), fino ad arrivare alla T_{min} , quando si riaccende la caldaia.



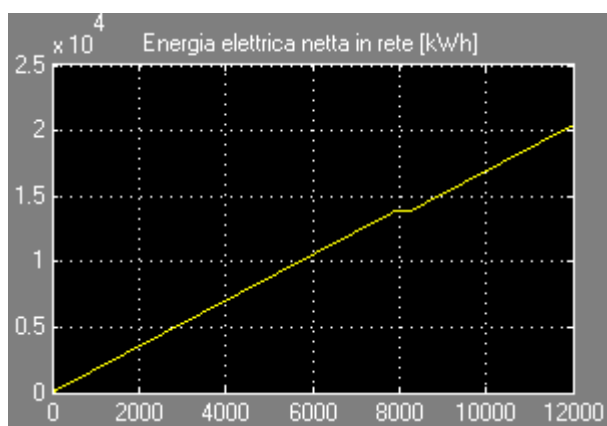
Potenza elettrica erogata dal cogeneratore [kW]: il motore si spegne quando la temperatura nell'accumulo raggiunge la T_{ref} (60°C), e si riaccende quando essa inizia a scendere e al di sotto della T_{on} (55°C).



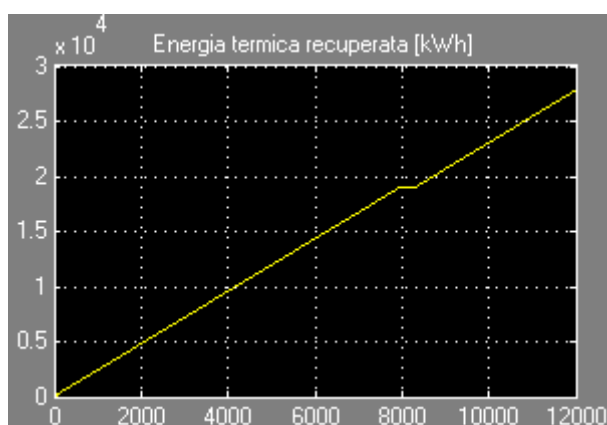
Potenza erogata dalla caldaia: essa è pari al valore nominale fin quando la temperatura nell'accumulo è al di sotto della T_{ref} , e si spegne per poi riaccendersi quando essa scende al di sotto della T_{min} .



Energia elettrica recuperata [kWh]



Energia termica recuperata [kWh]



2.5.3. Inseguimento elettrico

Dati in ingresso:

Dati tecnici del cogeneratore: come Parte A;

Percentuale della potenza elettrica nominale a cui interviene lo spegnimento del motore: 30%

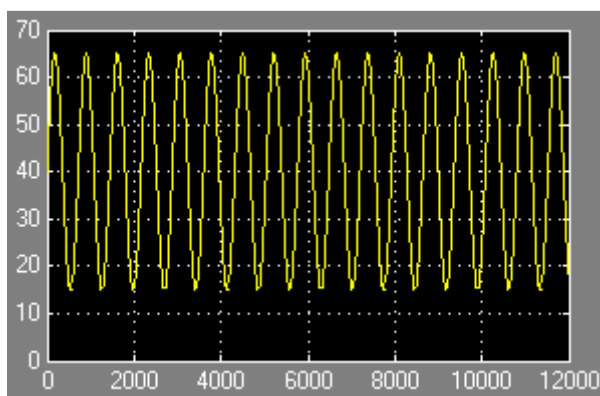
$T_{\min}$ accumulo: 50°C

T_{ref} accumulo: 60°C

Potenza termica della caldaia: 100 kW

Carico termico edificio: 80 kW

Profilo di carico elettrico da seguire [kW]:

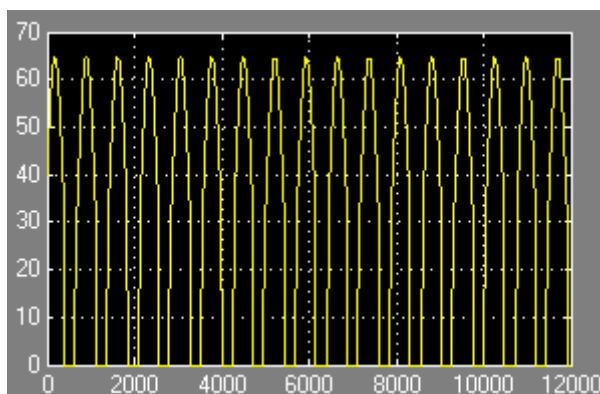


Sinusoidale:

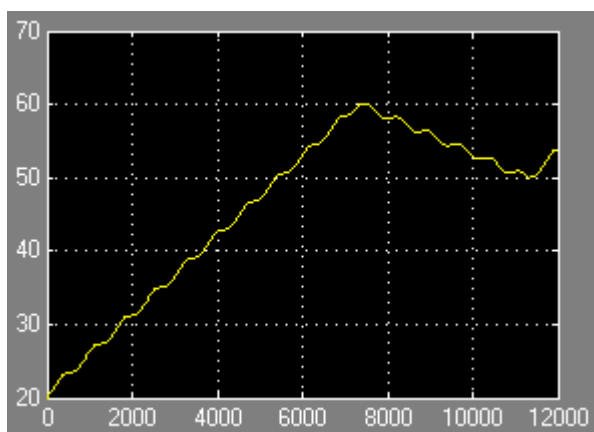
- valore medio pari a 40 kW
- ampiezza pari a 25 kW
- periodo pari a 720 minuti (12 ore)

Risultati della simulazione:

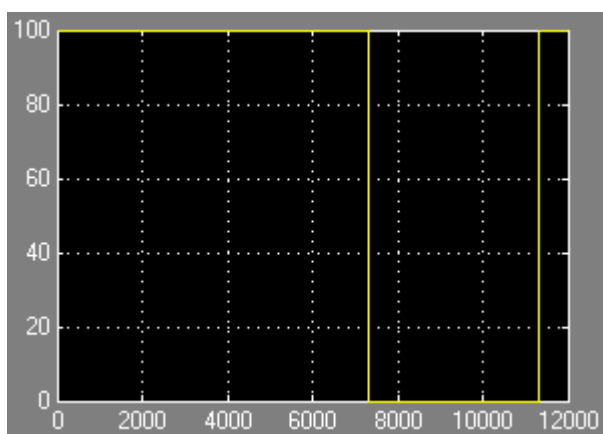
Potenza elettrica erogata [kW]: si nota lo spegnimento del cogeneratore quando la potenza elettrica prodotta è inferiore al valore soglia specificato dall'utente (30% del carico nominale).



Temperatura nell'accumulo [°C]: si nota l'effetto dell'attivazione della caldaia con strategia on-off rispettivamente a 50 e 60°C



Potenza erogata dalla caldaia [°C]: la caldaia è accesa fino a che la temperatura nell'accumulo non raggiunge il valore T_{ref} (60°C), dopo di che si spegne, per riaccendersi quando la temperatura arriva alla T_{min} (50°C)



Energia elettrica prodotta [kWh]

