



Ricerca di Sistema elettrico

## Upgrade del sistema di supervisione e controllo BEMS per la diagnostica di anomalie a basso livello, controllo ed ottimizzazione della climatizzazione attraverso MPC

Fabio Moretti, Fiorella Lauro, Stefano Panzieri

UPGRADE DEL SISTEMA DI SUPERVISIONE E CONTROLLO BEMS PER LA DIAGNOSTICA DI ANOMALIE A BASSO LIVELLO, CONTROLLO ED OTTIMIZZAZIONE DELLA CLIMATIZZAZIONE ATTRAVERSO MPC

Fabio Moretti, Fiorella Lauro, Stefano Panzieri (Dipartimento di Ingegneria Sezione di Informatica e Automazione, Università degli Studi Roma Tre)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico  
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA  
Piano Annuale di Realizzazione 2014  
Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica  
Progetto: Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi  
Obiettivo: Gestione ottimale reti di edifici  
Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA

*Ilaria Bertini*

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Implementazione di moduli di diagnostica, previsione, controllo ed ottimizzazione"

Responsabile scientifico ENEA : Stefano Pizzuti

*Stefano Pizzuti*

Responsabile scientifico Università Roma Tre : Prof. Stefano Panzieri

## Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 IMPLEMENTAZIONE DI UN MODULO DI DIAGNOSTICA DI BASSO LIVELLO .....	5
2.2 IMPLEMENTAZIONE DI UN MODULO DI PREVISIONI METEO .....	8
2.3 IMPLEMENTAZIONE DI UN MODULO DI CONTROLLO DELLE UTENZE ELETTRICHE DI UNA RETE DI EDIFICI .....	10
2.4 IMPLEMENTAZIONE DI UN MODULO DI OTTIMIZZAZIONE DI UN EDIFICIO.....	11
2.5 STRATEGIE DI CONTROLLO PREDITTIVO DISTRIBUITO PER LA REGOLAZIONE DELLA TEMPERATURA INTERNA DI EDIFICI MULTIZONA.	12
2.6 MODELLI STOCASTICI PER LA DIAGNOSTICA TERMICA.....	17
3 CONCLUSIONI.....	20
4 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	21
FIORELLA LAURO .....	21

## Sommario

Nel contesto delle annualità precedenti dell'accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria, Sezione di Informatica e Automazione dell'Università degli Studi Roma Tre, sono state sviluppate metodologie di ottimizzazione multi-obiettivo, in seguito implementate a livello prototipale e sperimentate preliminarmente. L'attività è quindi proseguita con l'implementazione di un sistema di data fusion per la diagnostica di anomalie sull'impianto termico dell'Edificio F40 del Centro Ricerche ENEA Casaccia e l'implementazione del modulo di supervisione del Building Energy Management System (BEMS) dello stesso edificio.

Nella presente annualità si è quindi proceduto secondo tali direzioni, implementando diversi moduli di diagnostica, predizione, controllo e ottimizzazione di reti di edifici, in particolare: modulo di diagnostica di basso livello, modulo di previsioni meteo, modulo di controllo delle utenze elettriche di una rete di edifici, modulo di controllo predittivo distribuito per la regolazione della temperatura interna di edifici multizona e modelli stocastici per la diagnostica termica.

## 1 Introduzione

Le attività di ricerca e sviluppo condotte nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Sezione di Informatica e Automazione dell'Università degli Studi Roma Tre riguardano l'implementazione di moduli software per la diagnostica, il controllo e l'ottimizzazione di reti di edifici nonché lo studio di modelli innovativi di diagnostica e controllo.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Implementazione di un modulo di diagnostica di basso livello

Il modulo di diagnostica a basso livello ha lo scopo di identificare le anomalie nelle misure a livello del singolo sensore. In questa ottica sono stati definiti tre livelli di soglia indicanti diverse tipologie di malfunzionamento:

- **Soglia operativa.** La soglia operativa indica dei limiti oltre i quali il sensore sta funzionando in maniera non ottimale, ma non pregiudica la fruibilità della misura in sé (es. fattore di potenza diverso da 1 ma non troppo basso).
- **Soglia funzionale.** La soglia funzionale indica dei limiti oltre i quali il sensore non sta funzionando (es. potenza elettrica misurata maggiore di quella installata)
- **Fondo scala.** Il fondo scala indica dei limiti oltre i quali la misura eccede il valore indicato dalla scheda tecnica del sensore.

Tali soglie devono essere impostate a valle di una supervisione di un esperto che identifica a seconda di ciascuna misura dei valori plausibili da associare a ciascuna soglia. L'identificazione delle soglie opportune deve essere effettuata da degli esperti a valle di un accurato audit energetico dell'edificio e dell'analisi dell'installazione della sensoristica.

Per l'identificazione di questo tipo di anomalie è stato sviluppato un software che periodicamente controlla l'ultima misura rilevata e la confronta con le soglie impostate.

La campagna di identificazione è stata avviata a settembre 2014, la Figura 1 mostra il riepilogo del numero medio mensile di anomalie rilevate, suddivise per categoria. Durante il primo mese è stata portata a termine una campagna di tuning dei parametri, per cui sono state rilevate un cospicuo numero di anomalie a livello di fondo scala che sono rientrate a seguito di un'opportuna taratura. Il numero di anomalie si impenna a Gennaio 2015 in quanto sono state rilevate anomalie soprattutto a livello di fattori di potenza delle linee di quadro dell'edificio F40. Tali problematiche sono state in parte risolte a seguito di un intervento dei manutentori a Febbraio.

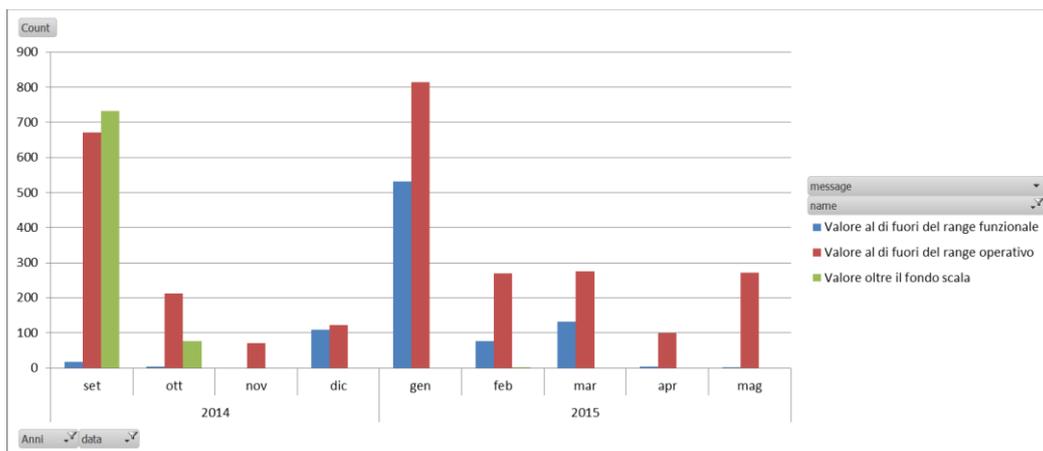


Figura 1. Riepilogo numero medio di anomalie di edificio

La Figura 2 e la Figura 3 mostrano il dettaglio delle anomalie suddivise per misura nel periodo considerato: come possiamo vedere sono tutte concentrate sul rilevamento del fattore di potenza. Il malfunzionamento del sensore è stato rilevato in particolare nella misura del fattore di potenza della fase 3 del piano terra dell’edificio.

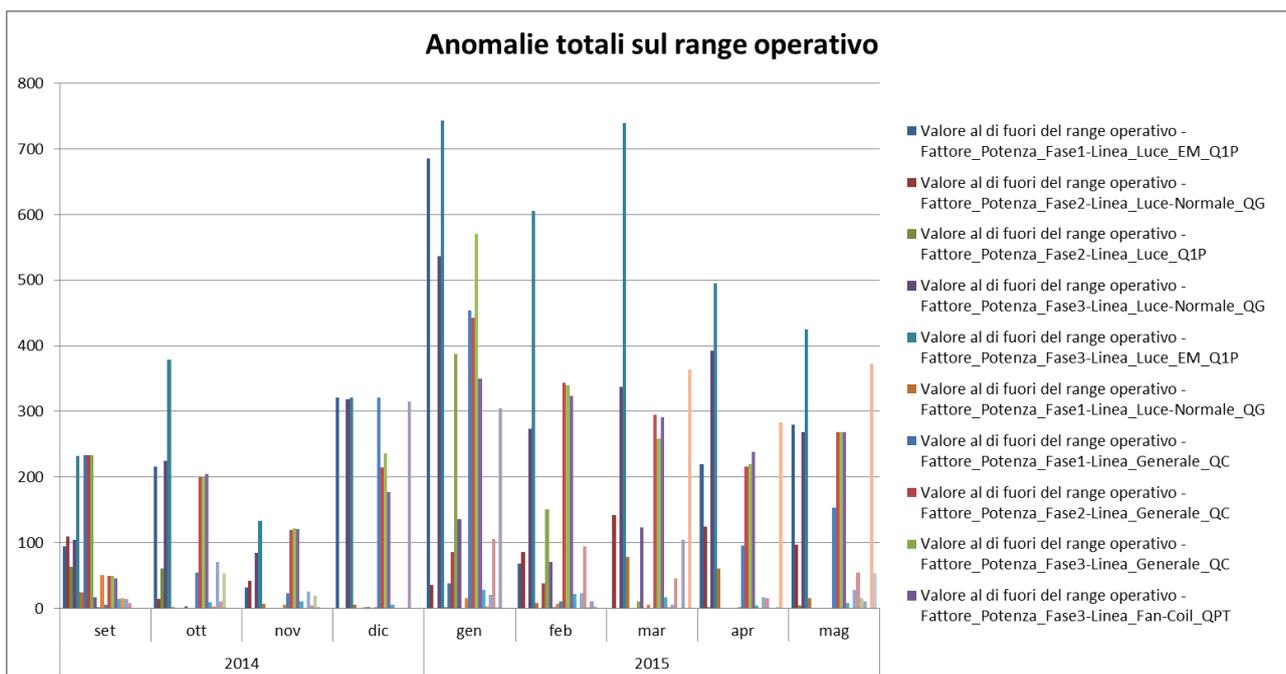
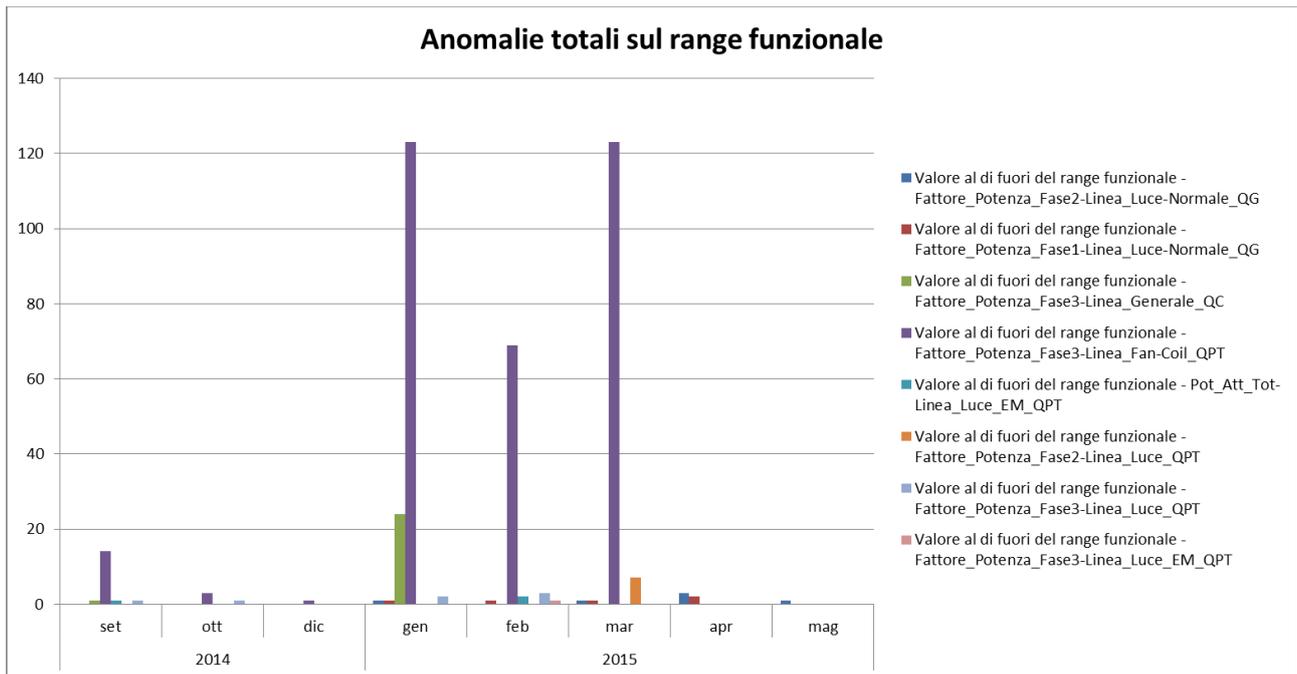
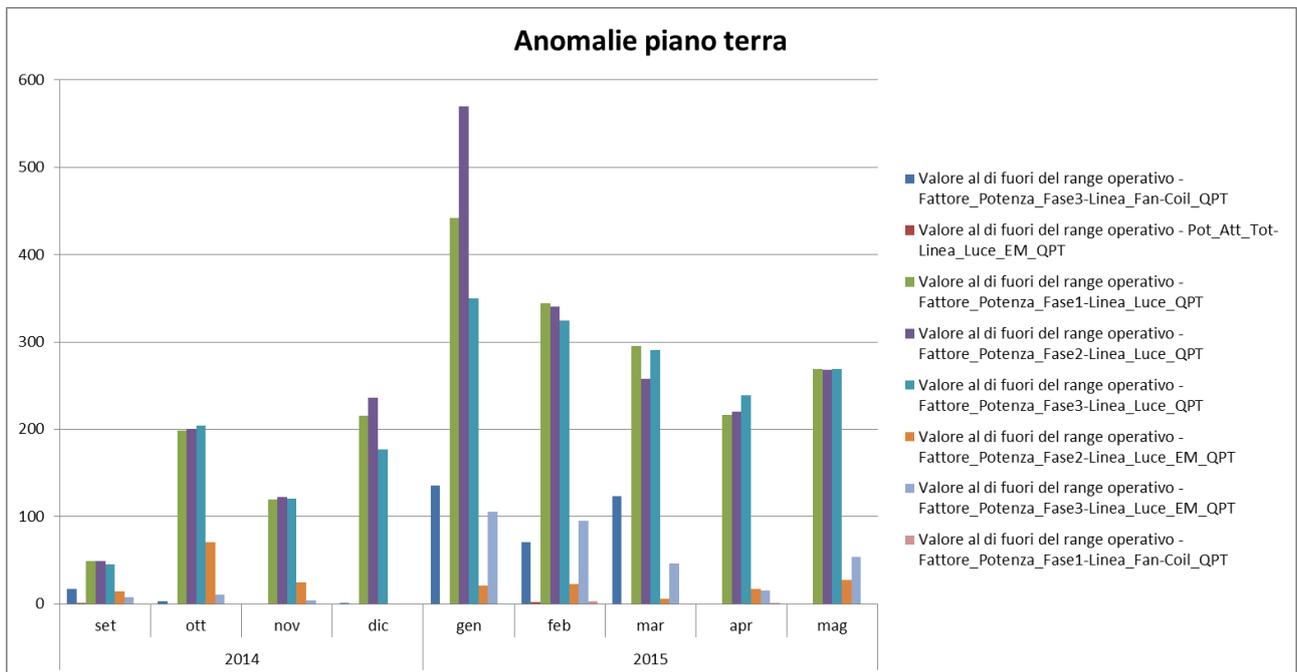


Figura 2. Anomalie totali sul range operativo



**Figura 3. Anomalie totali sul range funzionale**

Successivamente è stato effettuato uno studio delle anomalie suddiviso per piano: le anomalie sono uniformemente distribuite sul piano terra e primo piano, mentre in forma più lieve sul secondo piano.



**Figura 4. Anomalie piano terra F40**

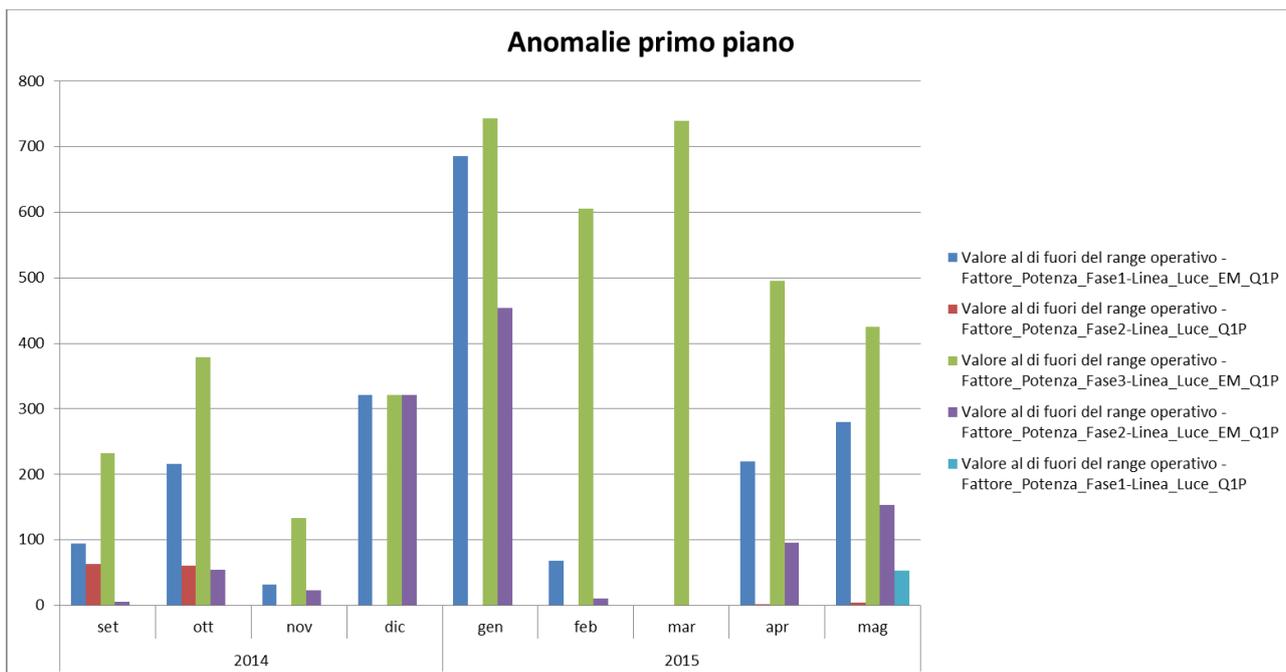


Figura 5. Anomalie primo piano F40

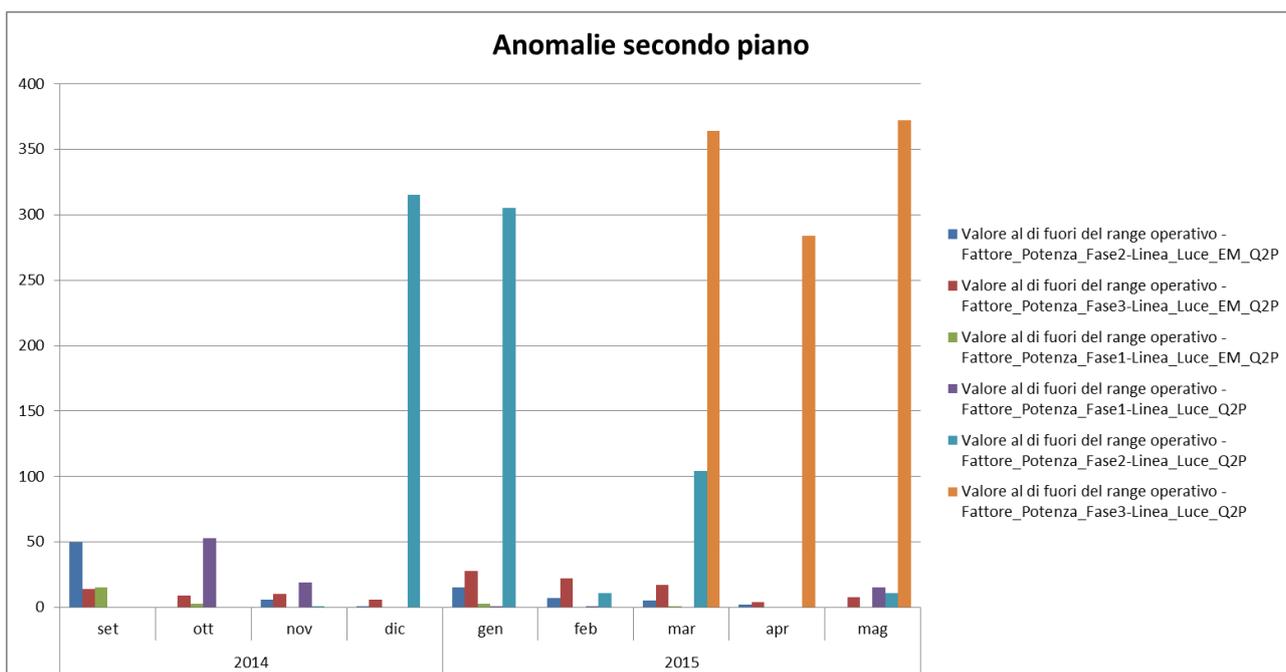


Figura 6. Anomalie secondo piano F40

## 2.2 Implementazione di un modulo di previsioni meteo

Il modulo di previsione dei dati meteorologici ha lo scopo di fornire le previsioni di temperatura ed umidità (successivamente esteso poi con la radiazione solare diretta e diffusa) sfruttando i dati forniti dal Sian ed adattandoli con le misure reali provenienti dalla centralina meteo installata nel C.R. Casaccia. In questo modo le previsioni sono adattate in tempo reale, ottenendo quindi una precisione maggiore. Tale modulo è implementato in Java per quanto riguarda la logica di gestione e con delle Stored Procedures in MySQL per la gestione dei dati e l'aggiornamento real time. La Figura 7 mostra la struttura della tabella dedicata allo

storage dei dati relativi alle previsioni meteo, la Figura 8 mostra la Stored Procedure dedicata all’inserimento dei dati previsionali ed al successivo aggiornamento secondo i dati effettivamente misurati.

Columns

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	BIN	UN	ZF	AI	Default
idmeteo_forecast	INT(10)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
forecast_timestamp	TIMESTAMP	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
last_update	TIMESTAMP	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	CURRENT_TIMESTA...
temperature_forecasted	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
temperature_real	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
temperature_adapted	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
humidity_forecasted	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
humidity_real	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
humidity_adapted	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
direct_radiation_forecasted	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
direct_radiation_real	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
direct_radiation_adapted	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
diffuse_radiation_forecasted	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
diffuse_radiation_real	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
diffuse_radiation_adapted	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
ack	TINYINT(4)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	'0'

Figura 7. Tabella dedicata alle previsioni meteo

```

BEGIN
DECLARE current_temperature FLOAT;
DECLARE delta_temperature FLOAT;
DECLARE current_humidity FLOAT;
DECLARE delta_humidity FLOAT;
DECLARE current_direct_radiation FLOAT;
DECLARE delta_direct_radiation FLOAT;
DECLARE current_diffuse_radiation FLOAT;
DECLARE delta_diffuse_radiation FLOAT;
select
avg('s'.Value) INTO current_temperature
from
`smarttowndb`.`historian` `s`
where
((`s`.`ID` = 2000)
and (hour('s'.Timestamp) = hour_in)
and (cast('s'.Timestamp as date) >= date(timestamp_in)))
group by cast('s'.Timestamp as date), hour('s'.Timestamp);

select
avg('s'.Value) INTO current_humidity
from
`smarttowndb`.`historian` `s`
where
((`s`.`ID` = 2001)
and (hour('s'.Timestamp) = hour_in)
and (cast('s'.Timestamp as date) >= date(timestamp_in)))
group by cast('s'.Timestamp as date), hour('s'.Timestamp);

select (current_temperature - temperature_forecasted) INTO delta_temperature
FROM meteo.meteo_forecast
WHERE date(forecast_timestamp) = date(timestamp_in)
and hour(forecast_timestamp) = hour_in;

select (current_humidity - humidity_forecasted) INTO delta_humidity
FROM meteo.meteo_forecast
WHERE date(forecast_timestamp) = date(timestamp_in)
and hour(forecast_timestamp) = hour_in;

select (current_direct_radiation - direct_radiation_forecasted) INTO delta_direct_radiation
FROM meteo.meteo_forecast
WHERE date(forecast_timestamp) = date(timestamp_in)
and hour(forecast_timestamp) = hour_in;

select (current_diffuse_radiation - diffuse_radiation_forecasted) INTO delta_diffuse_radiation
FROM meteo.meteo_forecast
WHERE date(forecast_timestamp) = date(timestamp_in)
and hour(forecast_timestamp) = hour_in;

UPDATE meteo.meteo_forecast SET temperature_real = current_temperature, humidity_real = current_humidity
, direct_radiation_real = current_direct_radiation, diffuse_radiation_real = current_diffuse_radiation
WHERE date(forecast_timestamp) = date(timestamp_in)
and hour(forecast_timestamp) = hour_in;

UPDATE meteo.meteo_forecast SET
temperature_adapted = temperature_forecasted + delta_temperature,
humidity_adapted = humidity_forecasted + delta_humidity,
direct_radiation_adapted = direct_radiation_forecasted + delta_direct_radiation,
diffuse_radiation_adapted = diffuse_radiation_forecasted + delta_diffuse_radiation
WHERE forecast_timestamp >= timestamp_in;
END

```

Figura 8. Stored Procedure per la correzione adattiva delle previsioni meteo

La Figura 9 e Figura 10 mostrano gli andamenti di temperatura ed umidità prevista, misurata ed adattata.

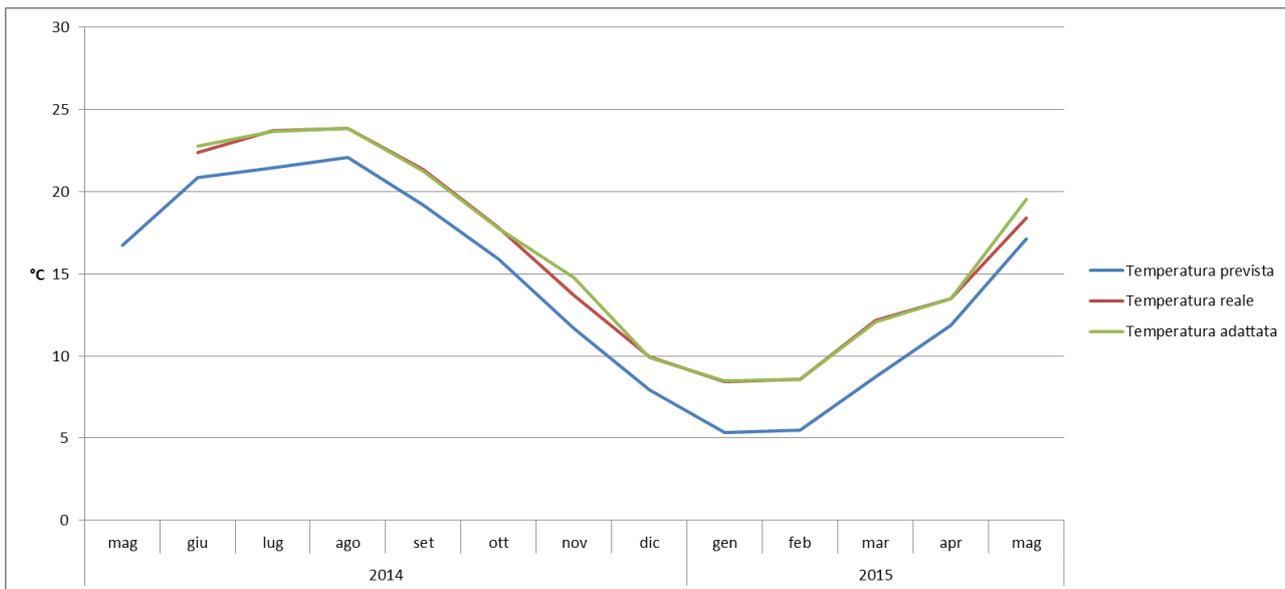


Figura 9. Temperature medie mensili nel C.R. Casaccia

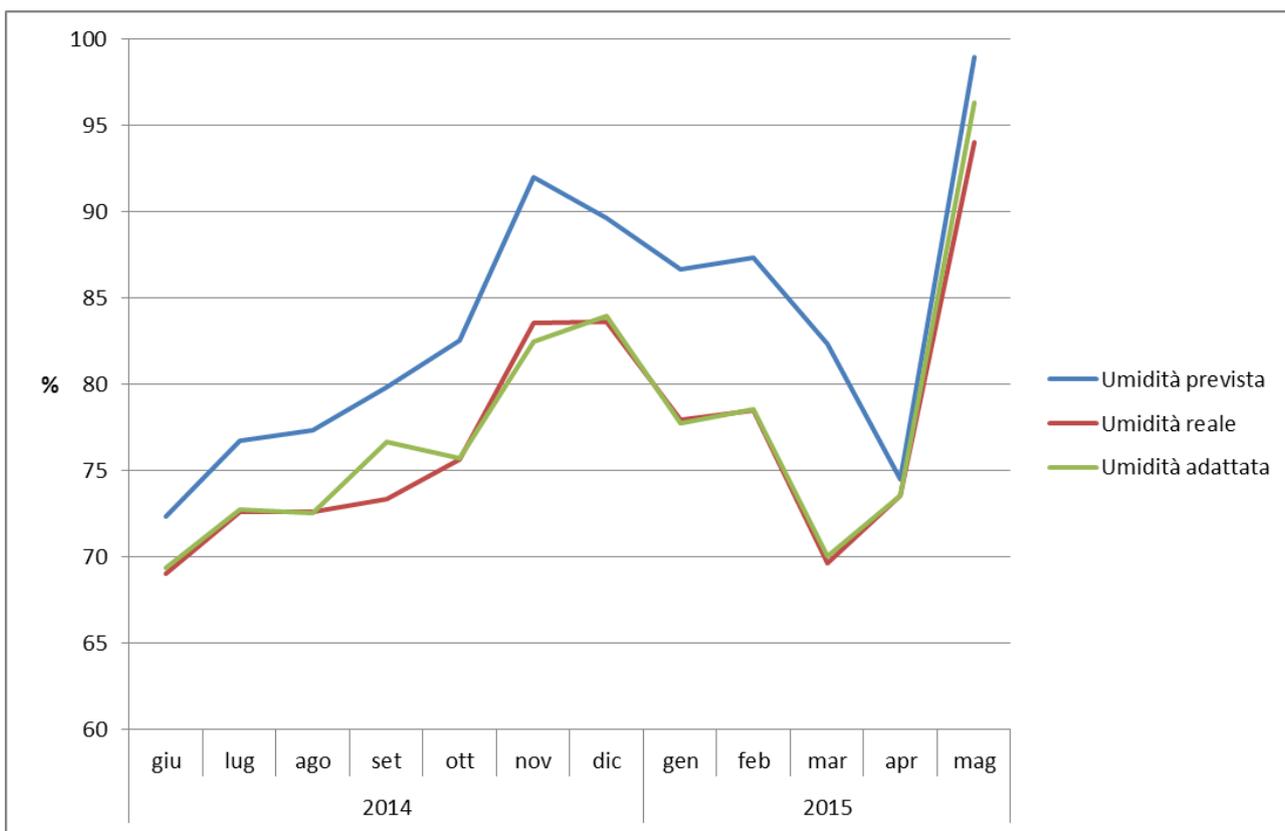


Figura 10. Umidità medie mensili nel C.R. Casaccia

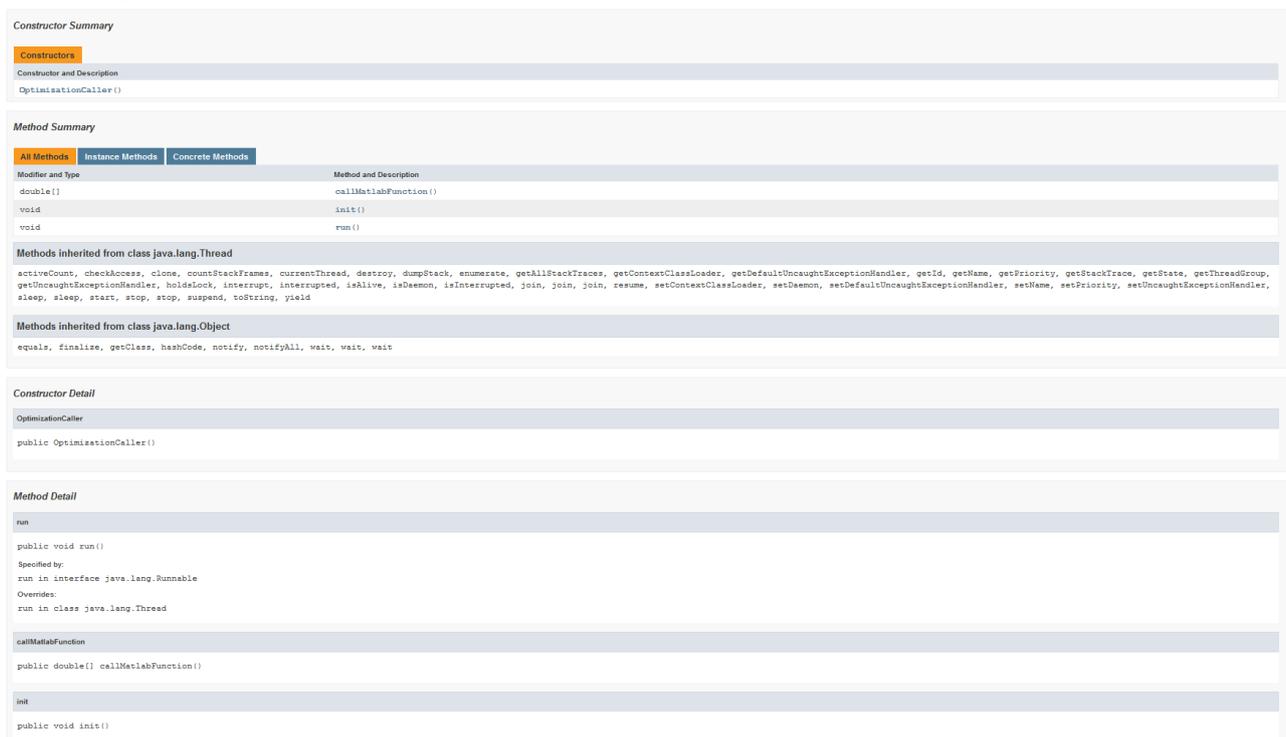
### 2.3 Implementazione di un modulo di controllo delle utenze elettriche di una rete di edifici

Il modulo di controllo delle utenze elettriche prevede la gestione adattiva delle luci negli spazi comuni e dei fancoil delle stanze in funzione dell'effettivo bisogno del servizio da parte dell'utente. Il modulo di controllo

sviluppato nelle annualità precedenti è stato esteso per l'interfacciamento con i BEMS della rete di edifici. E' stato sviluppato uno strato indipendente dalla metodologia di processamento delle attuazioni, tale procedura consente di impostare le attuazioni desiderate direttamente nella tabella SCADA del DB Smarttown, il modulo di interfacciamento avvia poi la procedura di chiamata di tipo REST o SOAP a seconda del BEMS associato all'edificio su cui si vuole inviare un comando di attuazione.

## 2.4 Implementazione di un modulo di ottimizzazione di un edificio

Nell'ottica del controllo ottimizzato di edificio è stato sviluppato un modulo che interfaccia il simulatore, sviluppato in MATLAB, con la logica di controllo ed attuazione della climatizzazione di edificio, sviluppata in Java. Per tale procedura sono state utilizzate delle librerie Java opensource che consentono la chiamata di processo a MATLAB embedded nel codice sorgente Java. La figura Figura 11 mostra la documentazione relativa al modulo di interfacciamento Java-MATLAB. In particolare tale applicativo è un thread che ciclicamente esegue una serie di comandi di funzioni matlab, ne acquisisce l'output e le inserisce nel Database della piattaforma Smart Town. L'output del processamento MATLAB viene successivamente utilizzato dai moduli di attuazione per applicare i controlli ottimizzati. Per ulteriori dettagli sulle metodologie di ottimizzazione sugli edifici consultare il report Rds/2013/122.



The image shows a screenshot of JavaDoc documentation for a class named `OptimizationCaller`. The documentation is organized into several sections:

- Constructor Summary:** Shows a single constructor `OptimizationCaller()`.
- Method Summary:** Lists methods with their modifiers and types:
 

Modifier and Type	Method and Description
<code>double[]</code>	<code>callMatlabFunction()</code>
<code>void</code>	<code>init()</code>
<code>void</code>	<code>run()</code>
- Methods inherited from class java.lang.Thread:** Lists various methods like `activeCount`, `checkAccess`, `clone`, `countStackFrames`, `currentThread`, `destroy`, `dumpStack`, `enumerate`, `getAllStackTraces`, `getContextClassLoader`, `getDefaultUncaughtExceptionHandler`, `getId`, `getName`, `getPriority`, `getStackTrace`, `getState`, `getThreadGroup`, `getUncaughtExceptionHandler`, `holdsLock`, `interrupt`, `interrupted`, `isAlive`, `isDaemon`, `isInterrupted`, `join`, `join`, `join`, `resume`, `setContextClassLoader`, `setDaemon`, `setDefaultUncaughtExceptionHandler`, `setName`, `setPriority`, `setUncaughtExceptionHandler`, `sleep`, `sleep`, `start`, `stop`, `stop`, `suspend`, `toString`, `yield`.
- Methods inherited from class java.lang.Object:** Lists methods like `equals`, `finalize`, `getClass`, `hashCode`, `notify`, `notifyAll`, `wait`, `wait`, `wait`.
- Constructor Detail:** Shows the signature `public OptimizationCaller()`.
- Method Detail:**
  - run:** Shows the signature `public void run()`, notes it is specified by `run` in interface `java.lang.Runnable`, and notes it overrides `run` in class `java.lang.Thread`.
  - callMatlabFunction:** Shows the signature `public double[] callMatlabFunction()`.
  - init:** Shows the signature `public void init()`.

Figura 11. JavaDoc del modulo di interfacciamento

Tale modulo è stato poi esportato sulla grid ENEA CRESCO per poter sfruttare il calcolo parallelo durante il processo di simulazione e rendere il servizio fruibile ai partners progettuali. E' stata installata un'istanza di MATLAB nella grid ENEA CRESCO, raggiungibile tramite una procedura di autenticazione Kerberos nel filesystem condiviso AFS. La Figura 12 riassume il il processo di interfacciamento tra la piattaforma e la grid CRESCO.

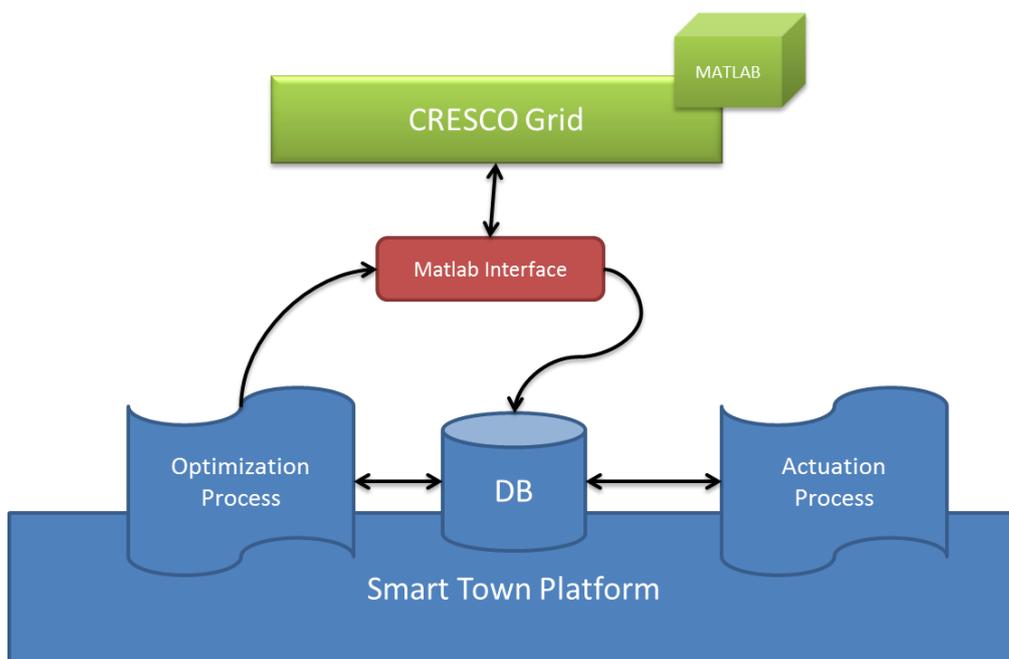


Figura 12. Schema dell' interfacciamento tra la piattaforma Smart Town e la Grid CRESCO

### 2.5 Strategie di controllo predittivo distribuito per la regolazione della temperatura interna di edifici multizona

L'obiettivo di questa attività è stato lo sviluppo di strategie adattive di Model Predictive Control (MPC) per la regolazione della temperatura interna di un edificio per uffici a tre zone, in cui ogni zona corrisponde ad una stanza occupata da un dipendente. L'edificio considerato è stato simulato in ambiente MATLAB Simulink.

Le strategie MPC sviluppate vengono definite adattive poiché il calcolo dell'opportuna azione di controllo (con orizzonte di predizione di 10 minuti) tiene conto del livello di occupazione di ogni zona (in particolare quattro possibili livelli di occupazione compresi tra 0 e 1) al fine di ridurre il consumo energetico. In particolare sono state analizzate due diverse strategie MPC adattive: una con set-point di temperatura di zona dinamici, l'altra con coefficienti di peso dinamici della funzione obiettivo.

La sperimentazione è stata condotta considerando innanzitutto l'accoppiamento termico tra le zone dell'edificio ed implementando quindi un'architettura MPC distribuita. Successivamente è stata analizzata anche un'architettura MPC decentralizzata (che non tiene conto cioè dell'accoppiamento termico tra le zone dell'edificio). I risultati sono stati valutati in termini di energia consumata e livello di comfort definito dalle temperature operative interne.

Il sistema considerato "edificio - fancoil" a tre zone corrisponde al modello linearizzato mostrato in Eq. (1):

$$\begin{cases} x(k+1) = A \cdot x(k) + B_c \cdot u_c(k) + B_d \cdot u_d(k) \\ y(k) = C \cdot x(k) \end{cases} \quad (1)$$

dove  $x$  è il vettore degli stati (le temperature interne delle tre zone), gli ingressi  $u_c$  sono i segnali di controllo dei fancoil delle tre zone (calcolati dal modulo di controllo MPC), gli ingressi  $u_d$  sono i disturbi che agiscono sul sistema (la temperatura esterna), e il vettore  $y$  rappresenta le uscite (ancora le temperature interne

delle tre zone). Tale modello, utilizzato per la simulazione del sistema, è anche usato per la predizione dell'uscita del sistema sull'orizzonte di predizione specificato  $N_p$ .

Nel MPC la sequenza di controllo è calcolata risolvendo un problema di ottimizzazione, in particolare, minimizzando una funzione di costo su un orizzonte di controllo specificato  $N_c$ . Ad ogni step di simulazione, solo il primo elemento della sequenza di controllo è applicato al sistema dal momento che, all'istante successivo, viene effettuata una nuova ottimizzazione basata sulle misure correnti. Una volta definito il modello di predizione, il vettore delle  $N_p$  uscite future viene calcolato come descritto in Eq. (2):

$$Y = F \cdot x(k) + \Phi_c \cdot U_c + \Phi_d \cdot U_d \quad (2)$$

dove  $U_c$  e  $U_d$  sono rispettivamente gli  $N_c$  segnali di controllo futuri e disturbi e le matrici  $F$  e  $\Phi$  sono definite da Eq. (3) e Eq. (4) come segue:

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \dots \\ CA^{N_p} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{bmatrix} \quad (4)$$

Nelle configurazioni MPC decentralizzata e distribuita, il problema di ottimizzazione può essere suddiviso nella somma di contributi locali (tre in questo caso, uno per zona dell'edificio), come descritto in Eq. (5):

$$J = J_1 + J_2 + J_3 \quad (5)$$

Ogni singola funzione di costo ha solitamente due termini, uno che include l'errore e un altro che contiene lo "sforzo" di controllo, come illustrato in Eq. (6):

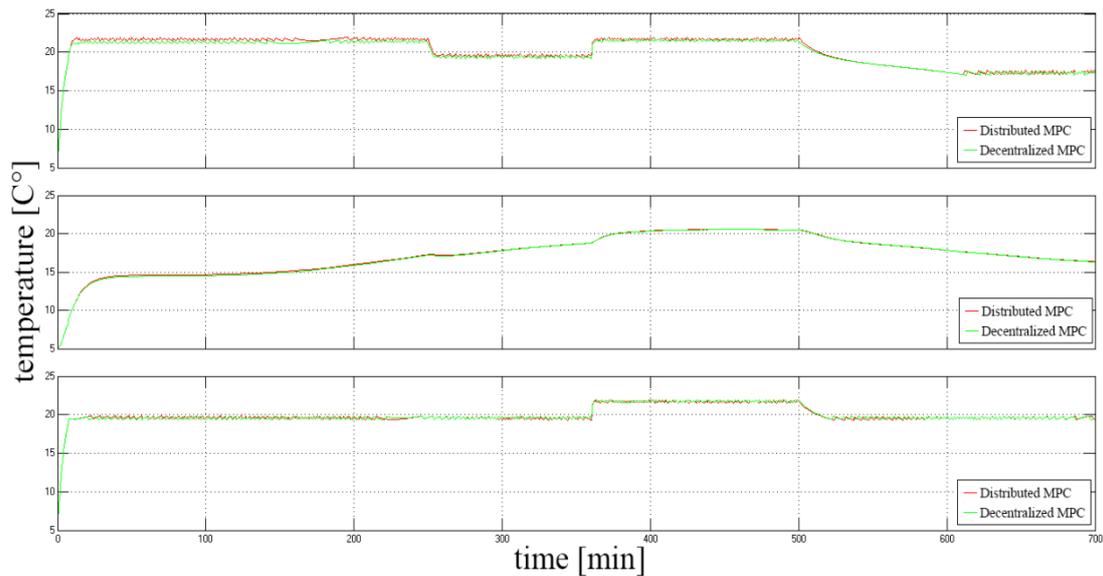
$$J_i = (R_{s,i} - Y_i)^T \Lambda_i (R_{s,i} - Y_i) + U_i^T \Gamma_i U_i \quad (6)$$

dove, per la zona  $i$ -esima,  $R_{s,i}$  è il vettore delle predizioni dei setpoint di temperatura,  $Y_i$  è il vettore delle predizioni delle uscite,  $U_i$  è il vettore dei segnali di comando che ottimizzano la funzione di costo, e  $\Lambda_i$  e  $\Gamma_i$  sono le matrici diagonali  $N_p \times N_p$  e  $N_c \times N_c$  dei coefficienti di peso  $\alpha_i$  e  $\beta_i$  per l'errore e per lo sforzo di controllo rispettivamente.

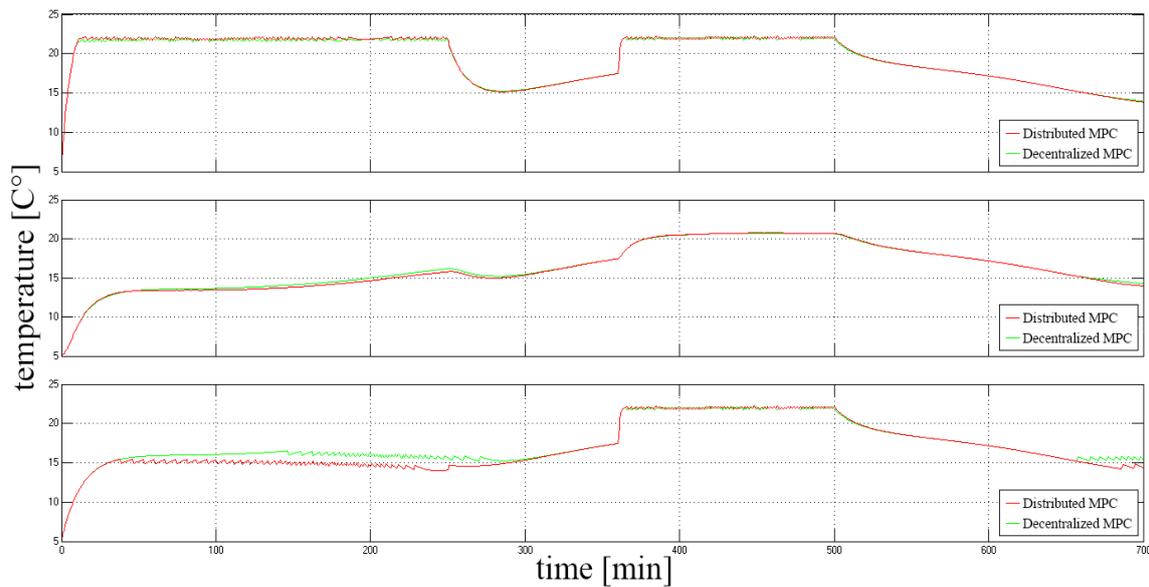
Sempre nell'ambito della sperimentazione è stata considerata un'intera giornata lavorativa con riferimento a quattro diverse fasce temporali, ognuna corrispondente ad un diverso livello di occupazione per ogni zona. Per la valutazione dei risultati sono stati adottati due indici di performance: per il comfort, quando il livello di occupazione è massimo, la distanza media giornaliera delle temperature interne reali da quelle di

setpoint nell'intero edificio,  $MAE_{TOT}$ ; per il consumo, il flusso d'aria totale emesso dai fancoil nell'intero edificio,  $M_{tot}$ .

In Figura 13 e Figura 14 sono illustrate le evoluzioni della temperatura di ogni zona dell'edificio nel corso della giornata di sperimentazione risultanti dall'applicazione della strategia MPC con temperature di set-point dinamiche e con coefficienti di peso dinamici rispettivamente. Quando una zona è completamente occupata, il set-point di temperatura è di 22 °C. Si osserva come la zona centrale, caratterizzata da occupazione nulla nell'intera giornata, raggiunga comunque temperature di circa 20 °C a causa degli scambi termici con la zona 1 e la zona 3.



**Figura 13 - Andamento delle temperature interne di zona ottenute con MPC distribuito e MPC decentralizzato con temperature di set-point dinamiche**



**Figura 14 - Andamento delle temperature interne di zona ottenute con MPC distribuito e MPC decentralizzato con coefficienti di peso dinamici**

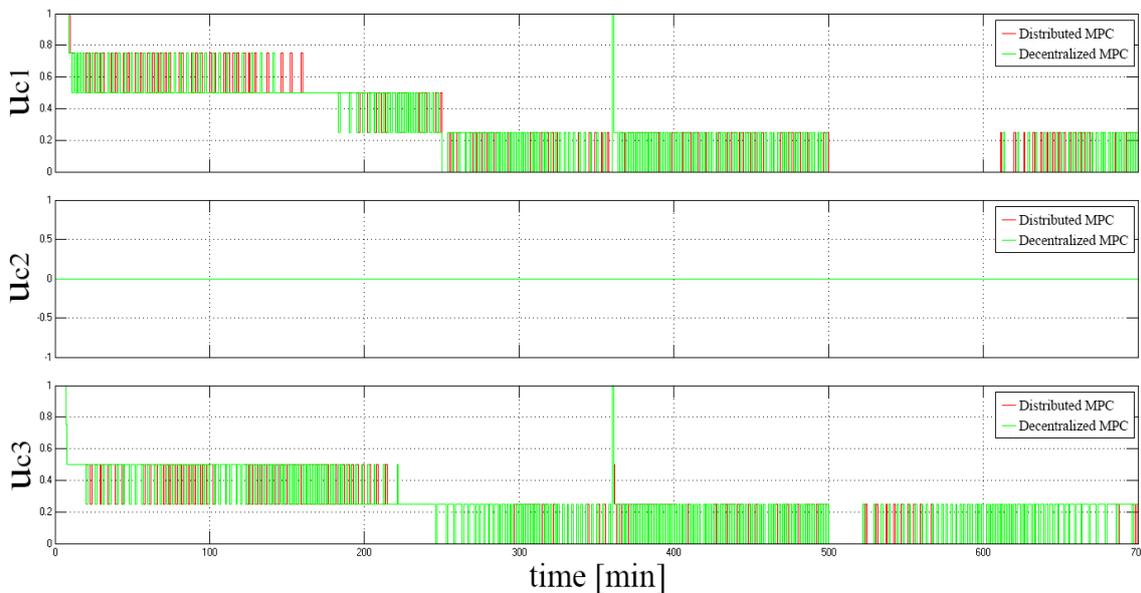
Entrambe le strategie MPC adattive seguono bene i profili dei set-point di temperatura in ogni periodo della giornata, così come avviene per una strategia MPC classica (non adattiva, che non tiene conto cioè del livello di occupazione di ogni zona). Ciò è anche evidente dai risultati di  $MAE_{TOT}$  (Tabella 1): ogni configurazione riporta errori bassi di temperatura ed il controllo MPC distribuito presenta errori più piccoli rispetto a quello decentralizzato.

**Tabella 1- Confronto dei risultati di strategie MPC adattive e non adattive**

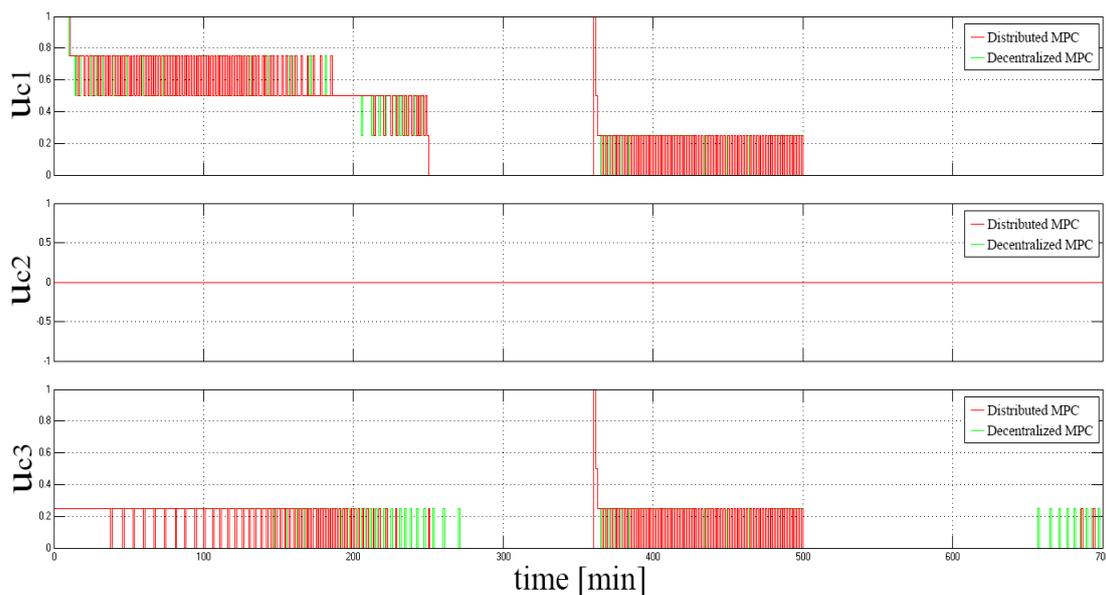
<b>Dynamic Temperature Setpoints</b>	<b>MAE<sub>TOT</sub> [°C]</b>	<b>M<sub>tot</sub> [kg]</b>
Distributed	0.084	3029
Decentralized	0.130	2954
<b>Dynamic Weighting Coefficients</b>	<b>MAE<sub>TOT</sub> [°C]</b>	<b>M<sub>tot</sub> [kg]</b>
Distributed	0.035	2148
Decentralized	0.051	2187
<b>Non-adaptive MPC</b>	<b>MAE<sub>TOT</sub> [°C]</b>	<b>M<sub>tot</sub> [kg]</b>
Distributed	0.073	4223
Decentralized	0.105	4117

Figura 15 e Figura 16 illustrano le evoluzioni delle azioni di controllo in ogni zona dell'edificio nel corso della giornata di sperimentazione risultanti dall'applicazione della strategia MPC con temperature di set-point dinamiche e coefficienti di peso dinamici rispettivamente. Il fan-coil della zona  $i$  fornisce aria calda ad una temperatura e ad una velocità dipendente dal segnale di controllo  $u_{c,i}$  variabile tra 0 e 1. Ai fini di una simulazione più realistica, per i segnali di controllo sono definiti solo 5 possibili valori tra 0 e 1 con uno step di 0.25. In particolare si osserva che il segnale di controllo della seconda zona in entrambi i casi è sempre nullo poiché la zona è inoccupata per tutto il giorno.

Osservando la Tabella 1, è evidente il grande vantaggio dell'utilizzo di una strategia MPC adattiva: i risultati relativi a  $M_{tot}$  dimostrano che lo sforzo di controllo, e quindi il consumo energetico, di una configurazione MPC adattiva è molto più piccolo di quello di una strategia non adattiva. In particolare il MPC distribuito con coefficienti di peso dinamici offre le performance migliori in termini di comfort e consumo, ma d'altra parte richiede una fase preliminare di tuning molto accurata e non immediata dei coefficienti.



**Figura 15 - Andamento dei segnali di controllo di zona di MPC distribuito e MPC decentralizzato con temperature di set-point dinamiche**



**Figura 16 - Andamento dei segnali di controllo di zona di MPC distribuito e MPC decentralizzato con coefficienti di peso dinamici**

In conclusione, la strategia MPC distribuita con coefficienti di peso dinamici della funzione obiettivo si è rivelata essere la migliore in termini di consumo energetico e livelli di comfort. Tuttavia la strategia con temperature di set-point dinamiche è risultata più semplice da applicare.

### 2.6 Modelli stocastici per la diagnostica termica

Il primo obiettivo di questa attività è stato quello di realizzare un'applicazione basata su modelli di Markov nascosti (Hidden Markov Models, HMM) per l'analisi dei consumi termici del Cluster di edifici del Centro ENEA Casaccia in relazione alla situazione climatica esterna. Dalla valutazione di consumo termico e temperatura esterna della stagione estiva 2014 e considerando se stiamo analizzando un turno di lavoro, un giorno festivo o la notte, sono state individuate 3 fasce (basso, medio e alto) per un totale di 9 stati (Figura 17).

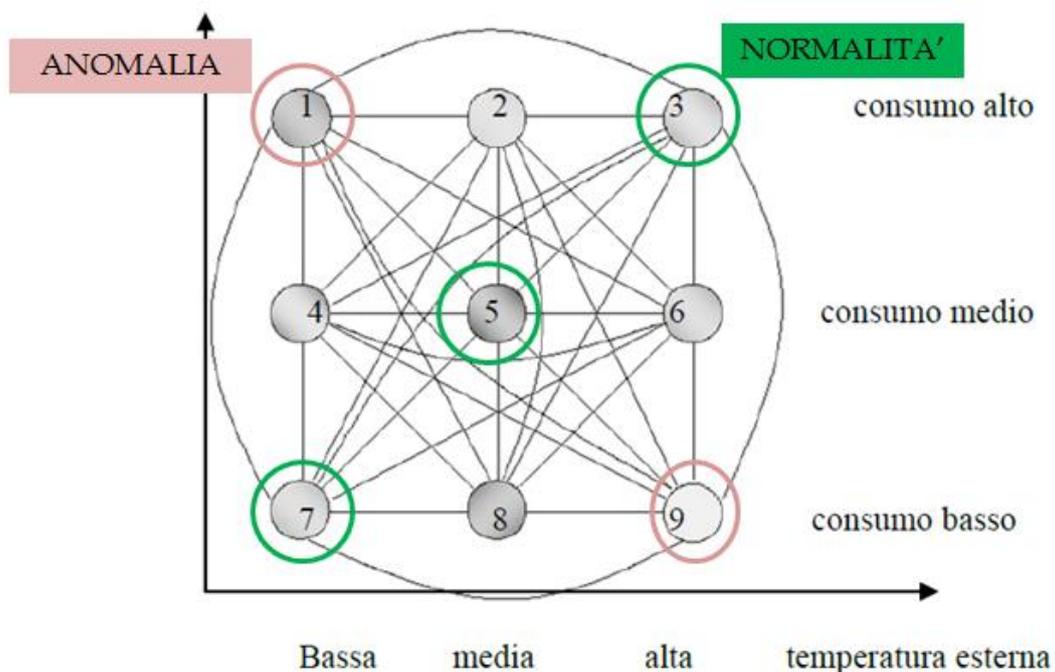


Figura 17 - Stati del modello HMM

Lo scopo è quello di mettere in luce le situazioni anomale identificate dagli stati 1 e 9. Gli stati normali sono il 3, il 5 e il 7, mentre gli altri stati sono intermedi. Per prima cosa l'applicazione compara consumo energetico e temperatura a dei riferimenti, in modo da inquadrarli in una fascia tra basso, medio e alto. Fatta questa operazione viene generato un simbolo elementare che andrà ad alimentare il modello di Markov che sposterà di volta in volta percentuale sui 9 stati in base proprio a consumo e temperatura. Potremo così osservare nel tempo l'evoluzione dei consumi rispetto alla temperatura esterna, ed evidenziare eventuali situazioni anomale. Il modello di Markov calcola lo stato attuale considerando gli ultimi dodici simboli che nel nostro caso, con un timestamp di 15 minuti, corrispondono alle ultime 3 ore di consumi.

Parallelamente a questa analisi, un'altra analisi basata sulla teoria di Dempster-Shafer e sul pignistic level di Smets ci aiuta a identificare le cause di eventuali anomalie o a indicare il corretto funzionamento dell'impianto termico di ciascuna palazzina del Cluster. In input si utilizzano diversi dati, in primis l'output del HMM che dà un'idea sui consumi, poi la portata dell'acqua nel circuito termico, il consumo elettrico dei fancoil e il delta di temperatura (la differenza tra temperatura di mandata e ritorno nel circuito termico). Questi dati sono processati dall'algoritmo basato sulla teoria di Dempster-Shafer, che restituisce degli indici (BET): essi indicano se stiamo lavorando bene oppure ci aiutano a "scommettere" su una specifica causa di anomalia presente nell'impianto termico. Le cause di anomalie dell'impianto termico prese in considerazione sono:

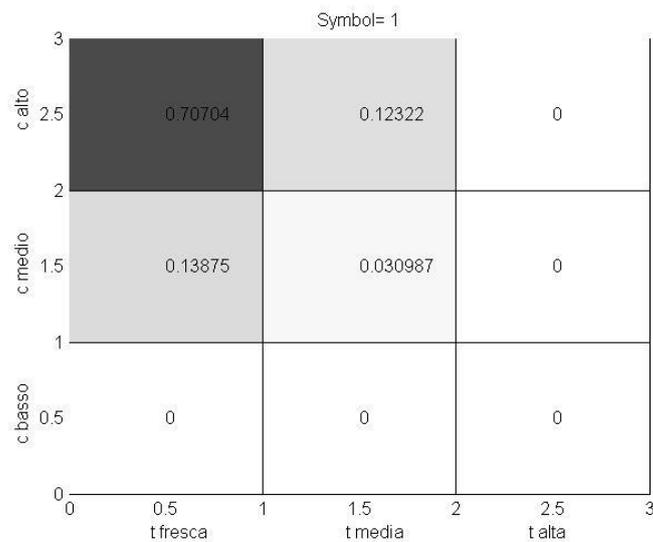
- guasto al sistema di pompaggio;
- malfunzionamento del sistema di controllo che regola l'accensione/spegnimento della centrale termica sulla base della temperatura esterna;
- guasto ai fancoil.

Queste le tre cause di guasto prese in esame dal sistema di diagnosi, oltre al corretto funzionamento. Sono state ipotizzate altre cause di anomalia, che essendo evidenti non necessitano della teoria di Dempster-Shafer e del pignistic level di Smets, ma di semplici controlli preliminari:

- se viene registrato un consumo termico durante la notte o in un giorno festivo, la causa è il timer della centrale termica male impostato;
- se viene registrato un consumo termico medio-alto durante un turno di lavoro ma in assenza di occupazione, la causa è un malfunzionamento al sistema di controllo;
- se viene registrato un consumo termico elevato in una giornata calda, ma allo stesso tempo la differenza tra la temperatura esterna e quella interna è bassa, vuol dire che sono state lasciate aperte le finestre e di conseguenza stiamo spreco energia.

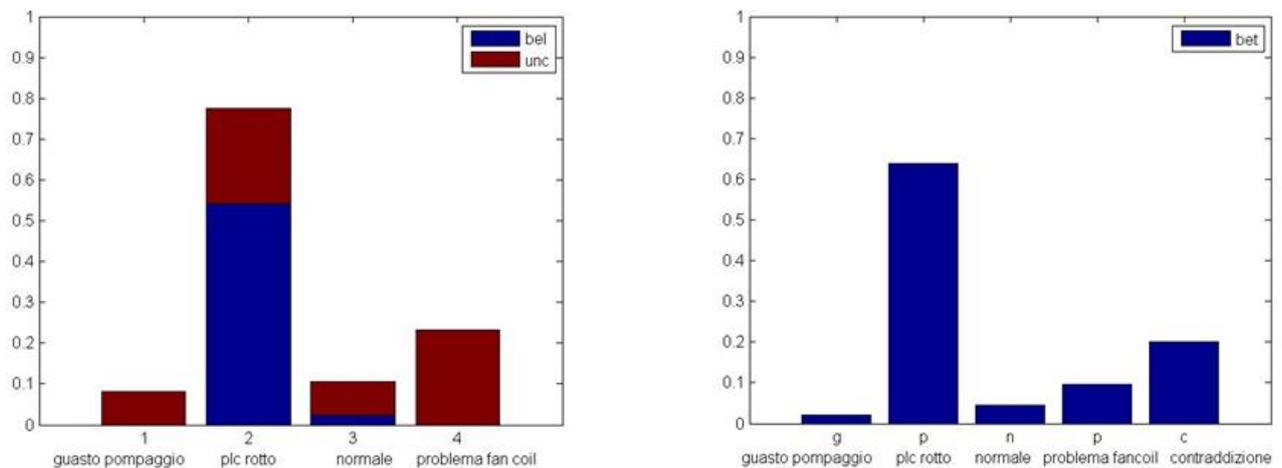
E' stato analizzato il caso in cui il sistema di controllo della centrale termica di edificio abbia problemi. Nella realtà non esiste alcun sistema di controllo PLC che, sulla base del livello di occupazione o della temperatura esterna, agisca sull'accensione/spegnimento della centrale termica degli edifici del Cluster. Le condizioni a cui pertanto ci si riferisce fanno correttamente riferimento a situazioni in cui tale sistema sia fuori uso.

Si consideri ad esempio il caso in cui in una giornata estiva si abbia un consumo termico elevato e che la temperatura esterna sia piuttosto fresca. Il modello di Markov sposta correttamente maggiore percentuale sullo stato 1 (Figura 18).



**Figura 18 - Stato del modello HMM dopo una serie di simboli elementari "1"**

Contemporaneamente si registra un consumo quasi nullo dei fancoil. La situazione ipotizzata è la seguente: la temperatura è fresca, non c'è motivo per accendere l'aria condizionata, e di conseguenza i fancoil sono spenti. Dal momento che viene misurato un consumo termico "ingiustificato", si deduce che il sistema di controllo sta lavorando male. L'analisi diagnostica evidenzia correttamente il verificarsi di questa anomalia attraverso gli indici di "credenza", "plausibilità" e "bet" (Figura 19).



**Figura 19 - Indici rappresentanti "credenza", "plausibilità" e "bet"**

La situazione opposta si verifica quando, innanzitutto, il consumo termico misurato è basso e la temperatura esterna è alta: il modello HMM sposta maggiore percentuale sullo stato 9 (Figura 20). Contemporaneamente si misura un alto consumo dei fancoil, di conseguenza ipotizziamo che le persone all'interno dell'edificio abbiano caldo e accendano tutti i fancoil. Dal momento che il consumo termico rimane basso, l'analisi diagnostica segnala correttamente che il sistema di controllo sta lavorando male (Figura 21).

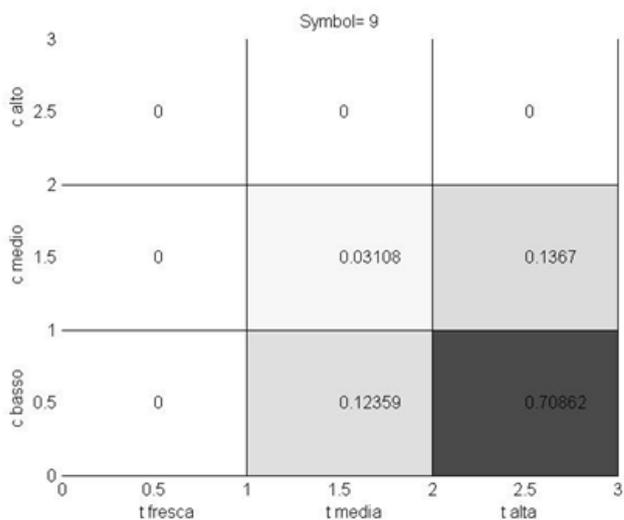


Figura 20 - Stato del modello HMM dopo una serie di simboli elementari "9"

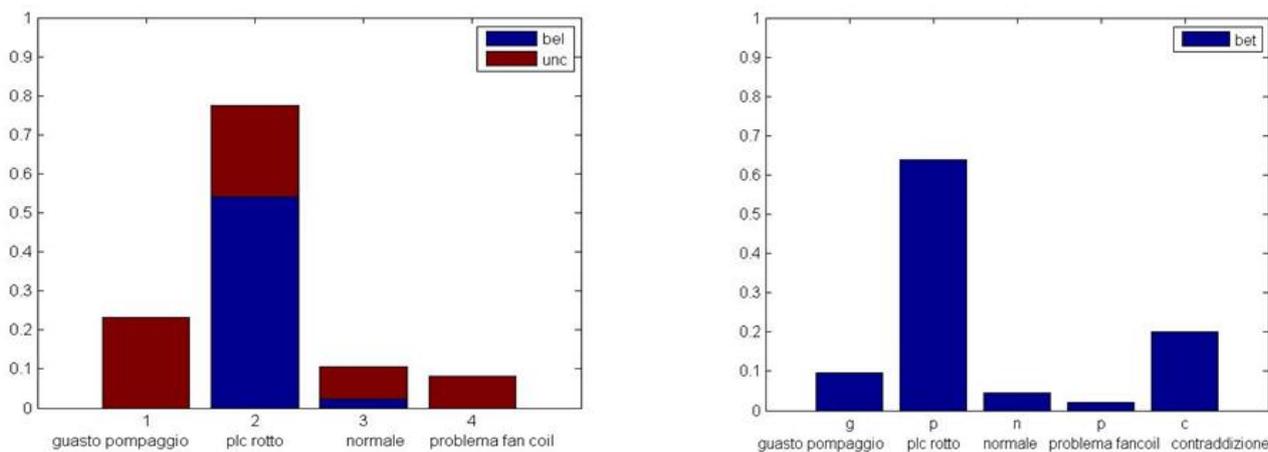


Figura 21 - Indici rappresentanti "credenza", "plausibilità" e "bet"

Naturalmente per diagnosticare il problema al sistema di controllo è necessario che il modello di Markov evidenzi uno dei due stati anomali. Nel caso in cui venisse riscontrata una delle due situazioni sopra descritte ma con una percentuale inferiore al 40% negli stati 1 e 9, verrebbe segnalato il corretto funzionamento.

### 3 Conclusioni

Le attività di ricerca e sviluppo condotte nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Sezione di Informatica e Automazione dell'Università degli Studi Roma Tre hanno riguardato lo studio, la progettazione e infine l'implementazione di moduli software per la diagnostica, il controllo e l'ottimizzazione di reti di edifici nonché lo studio di modelli innovativi di diagnostica e controllo. Partendo dalle annualità precedenti, a conclusione della presente annualità i risultati finali consistono in particolare in un modulo di diagnostica di basso livello, un modulo di previsioni meteo, un modulo di controllo delle utenze elettriche di una rete di edifici, un modulo di controllo

predittivo distribuito per la regolazione della temperatura interna di edifici multizona e infine nell'applicazione di modelli stocastici alla diagnostica termica.

## 4 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

### *Fiorella Lauro*

Ha conseguito la Laurea Specialistica in Ingegneria dell'Automazione presso l'Università della Calabria. E' ricercatore a contratto presso il Dipartimento Energia del Politecnico di Torino e dottoranda presso il Dipartimento di Ingegneria Sezione Informatica e Automazione dell'Università degli Studi Roma Tre. La sua attività di ricerca è svolta presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia di Roma e riguarda la modellazione dei consumi energetici degli edifici attraverso approcci metodologici inversi, l'individuazione di efficaci metodologie diagnostiche e l'ottimizzazione dei consumi tramite tecniche di Intelligenza Artificiale e di controllo predittivo.

### *Fabio Moretti:*

Fabio Moretti è nato a Viterbo il 24/09/1983, ha conseguito il diploma di maturità scientifica nel 2001. Nel 2009 riceve la Laurea Specialistica in Ingegneria Gestionale e dell'Automazione presso l'Università degli Studi "Roma Tre". Ha conseguito il Dottorato di ricerca presso la medesima Università in collaborazione con ENEA. I suoi interessi di ricerca riguardano le tecniche di elaborazione delle immagini, metodologie di data fusion per la diagnostica ed il controllo ottimizzato di edifici.

### *Stefano Panzieri:*

Stefano Panzieri è professore associato presso l'Università degli Studi Roma Tre e svolge la sua attività didattica presso le facoltà di Ingegneria Elettronica, Meccanica ed Informatica dove tiene i corsi di Controllo Digitale, Controllo dei Processi e Controlli Automatici. E' il coordinatore del laboratorio di Automatica e del laboratorio di Robotica Autonoma e Fusione Sensoriale. E' un membro di IEEE e del gruppo di lavoro sulle Infrastrutture Critiche. I suoi interessi di ricerca sono nel campo dei sistemi di Controllo Industriale, Teoria dei Sistemi, Sistemi Complessi e CIP. E' autore di molti articoli sperimentali che riguardano i robot mobili, i robot industriali, il controllo con apprendimento iterativo, logica Fuzzy, stima bayesiana, teoria di Dempster-Shafer.