



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi dei profili di carico di utenze
elettrotermiche ed implementazione di
nuove soluzioni gestionali che favoriscano
la fornitura di nuovi servizi ancillari nelle
reti termiche di teleriscaldamento e
teleraffreddamento

M. Manganelli, L. Martirano, M.C. Falvo

ANALISI DEI PROFILI DI CARICO DI UTENZE ELETTROTERMICHE ED IMPLEMENTAZIONE DI NUOVE SOLUZIONI
GESTIONALI CHE FAVORISCANO LA FORNITURA DI NUOVI SERVIZI ANCILLARI NELLE RETI TERMICHE DI
TELERISCALDAMENTO E TELERAFFREDDAMENTO

M. Manganelli, L. Martirano, M.C. Falvo (Sapienza Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria
Astronautica, Elettrica ed Energetica - Sezione Ingegneria Elettrica)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: C.1. Risparmio di energia elettrica nei settori civili, industria e servizi

Obiettivo A: Reti di poligenerazione

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi dei profili di carico di
utenze elettrotermiche ed implementazione di nuove soluzioni gestionali che favoriscano la fornitura di nuovi servizi ancillari nelle reti
termiche di teleriscaldamento e teleraffreddamento"

Responsabile scientifico ENEA: Biagio Di Pietra



Responsabile scientifico DIAEE: Luigi Martirano

Si ringraziano l'ing. M. Bellinzoni e l'ing. G. Garofano, l'Ufficio Engineering e il personale del Rome Cavalieri Waldorf Astoria Hotels &
Resorts; P. Ferrara, R. Ferrara, G. Ferrara e il personale di Arpa s.a.s.; per la cortese disponibilità offerta e la collaborazione dimostrata
nelle attività di monitoraggio sperimentale.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 STATO DELL'ARTE	6
3 CAMPAGNA DI MISURE SPERIMENTALI	11
3.1 CARATTERIZZAZIONE DEGLI UTILIZZATORI ELETTROTERMICI.....	11
3.1.1 Lavastoviglie residenziale	12
3.1.2 Lavatrice residenziale.....	13
3.1.3 Lavastoviglie industriale	14
3.1.4 Lavatrice industriale.....	14
3.2 VALIDAZIONE SPERIMENTALE DEI PROFILI DI CARICO MEDIANTE MISURAZIONI IN CAMPO	15
3.2.1 Utenze residenziali	16
3.2.2 Esercizi ristorativi commerciali.....	22
3.2.3 Struttura alberghiera	22
3.2.4 Esercizio ristorativo aziendale.....	28
3.3 VALUTAZIONE ECONOMICA	30
3.4 STUDIO IMPIANTISTICO E PROPOSTA DI LAYOUT D'IMPIANTO	33
4 MODELLI DI SIMULAZIONE IN AMBIENTE MATLAB	34
4.1 ALGORITMO DI AGGREGAZIONE IN AMBITO RESIDENZIALE	35
4.2 ALGORITMO DI AGGREGAZIONE IN AMBITO RISTORATIVO COMMERCIALE	40
4.3 ALGORITMO DI AGGREGAZIONE IN AMBITO ALBERGHIERO	43
4.4 IMPATTO DEI SERVIZI.....	47
4.5 MODELLI MATLAB-SIMULINK	48
5 OTTIMIZZAZIONE	56
6 CONCLUSIONI.....	60
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	61
A CODICE MATLAB	62
ALGORITMI DI AGGREGAZIONE DEGLI UTILIZZATORI.....	62
Algoritmo di aggregazione in ambito residenziale	62
Algoritmo di aggregazione in ambito ristorativo commerciale	63
Algoritmo di aggregazione in ambito alberghiero.....	64
ALGORITMO DI CONTROLLO CARICHI.....	65
B ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	67
C PRINCIPALI SOGGETTI ESTERNI COINVOLTI	67

Sommario

Il presente report presenta i risultati delle attività svolte nell'ambito del progetto di ricerca "Risparmio di energia elettrica nei settori civili, industria e servizi" in collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) della Sapienza Università di Roma. Tali attività hanno come oggetto la "Analisi dei profili di carico di utenze elettrotermiche ed implementazione di nuove soluzioni gestionali che favoriscano la fornitura di nuovi servizi ancillari nelle reti termiche di teleriscaldamento e teleraffreddamento". Il progetto si inserisce nell'ambito dell'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico. Il presente lavoro si inserisce nel quadro del Piano Annuale di Realizzazione 2013, per quanto attiene all'Area "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica", Progetto C.1. "Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi" obiettivo A, "Reti di poligenerazione distribuita".

Obiettivi del presente lavoro sono stati l'analisi dei profili di carico termico dei dispositivi utilizzatori elettrotermici all'interno delle utenze, lo sviluppo di modelli di calcolo dei profili di carico aggregato a livello di edificio e l'implementazione tali modelli in una piattaforma di simulazione di reti energetiche sviluppata da ENEA.

Il contributo del DIAEE nell'ambito di questo contratto si è sviluppato in due fasi:

- A. Analisi dei profili di carico elettrici e termici delle utenze elettrotermiche
- B. Ottimizzazione dei profili e integrazione nella piattaforma software sviluppata da ENEA per la simulazione delle reti di teleriscaldamento

Lo studio condotto ha riguardato varie tipologie di utenze sia residenziali che non residenziali. Nel presente report si presentano i risultati prodotti. Il lavoro ha permesso di ottenere:

- il valore numerico del consumo di energia destinato al riscaldamento dell'acqua nei dispositivi di lavaggio e l'andamento istantaneo della richiesta di calore, scomputati dagli assorbimenti energetici totali dell'utenza;
- modelli di calcolo del consumo per riscaldamento acqua di lavaggio per aggregati di utenze di varie tipologie;
- una valutazione delle possibilità di risparmio energetico ed economico che può essere ottenuto grazie all'implementazione di nuove soluzioni;
- la programmazione di un pacchetto software di simulazione, che, integrato nella piattaforma software ENEA per la simulazione di reti di teleriscaldamento, dà origine a una piattaforma di nuova generazione; piattaforma che contribuisce ad aprire la strada allo sviluppo di soluzioni gestionali innovative per la fornitura di nuovi servizi nelle reti di teleriscaldamento e all'evoluzione delle reti energetiche.

Il calcolo della frazione energetica per riscaldamento acqua e dell'andamento istantaneo è stato eseguito disaccoppiando il carico elettrico registrato sperimentalmente in *baseload* (forza motrice) e carico di picco (riscaldamento) confrontandolo con rilevazioni di temperatura e monitoraggio dei programmi dei dispositivi.

Sono state prese in considerazione diverse tipologie di utenza, residenziale e non residenziale (alberghiera, ristorativa commerciale e aziendale) così da ottenere uno strumento flessibile in grado di simulare edifici dotati di utenze diverse. Inoltre l'analisi dei carichi dei dispositivi è stata condotta non solo dal punto di vista energetico (come quantità di calore assorbita dal dispositivo nel corso dell'utilizzo), ma anche dal punto di vista di potenza (come andamento istantaneo dell'assorbimento durante l'utilizzo). Ciò ha permesso di ottenere modelli di simulazione dotati di accuratezza migliore che tenessero conto della variabilità dei carichi nel tempo, degli effetti di punte di carico etc.

1 Introduzione

Il presente report presenta i risultati delle attività svolte nell'ambito del progetto di ricerca "Risparmio di energia elettrica nei settori civili, industria e servizi" in collaborazione tra ENEA e Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) della Sapienza Università di Roma. Tali attività hanno come oggetto la "Analisi dei profili di carico di utenze elettrotermiche ed implementazione di nuove soluzioni gestionali che favoriscano la fornitura di nuovi servizi ancillari nelle reti termiche di teleriscaldamento e teleraffreddamento". Il progetto si inserisce nell'ambito dell'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico. Si evidenzia che il DIAEE ha forti competenze di ricerca, servizio e didattica riguardo le reti elettriche ed energetiche. In particolare le unità di "Distribuzione e utilizzazione dell'energia elettrica" e di "Domotica e uso razionale dell'energia" svolgono attività di ricerca sugli edifici a energia quasi zero, sulle reti energetiche evolute e integrate e sui sistemi di demand side management per la gestione ottimale dei carichi.

Tale lavoro si inserisce nel quadro del Piano Annuale di Realizzazione 2013, per quanto attiene all'Area "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica", Progetto C.1. "Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi"; nello specifico, si riferisce all'obiettivo B, "Reti di poligenerazione distribuita".

Il focus delle attività del presente lavoro è stato lo studio dell'evoluzione delle reti termiche di teleriscaldamento e teleraffreddamento (TLR), allo scopo di ampliare il pacchetto di servizi energetici, forniti dalle reti TLR, introducendo nuovi servizi ancillari. Ciò con l'obiettivo finale di sviluppare nuove tecnologie che favoriscano la razionalizzazione e il risparmio energetico nei settori civile (residenziale e servizi) e industria.

In particolare, gli obiettivi del presente lavoro hanno riguardato l'analisi dei profili di carico di utenze elettrotermiche e l'implementazione di nuove soluzioni gestionali che favoriscano la fornitura di nuovi servizi ancillari nelle reti TLR.

Si definiscono servizi ancillari di una rete energetica quei servizi che possono essere erogati dalla rete, opportunamente aggiornata, in modo accessorio al servizio principale per cui la rete è progettata.

Negli edifici civili (residenziali e commerciali) sono diffusi dispositivi utilizzatori elettrotermici di uso comune (i.e. elettrodomestici) che richiedono nel loro funzionamento energia elettrica e calore per il riscaldamento dell'acqua. Di norma il riscaldamento dell'acqua prevede diverse modalità. Nei dispositivi di tipo domestico (uso residenziale) l'acqua è prelevata da rete idrica (a temperatura di rete) e riscaldata dal dispositivo stesso per via elettrica. Nei dispositivi di tipo industriale (uso non residenziale) sono possibili tre alternative:

- i) L'acqua è prelevata fredda e riscaldata elettricamente come nel caso residenziale;
- ii) viene prelevata acqua calda preparata da caldaia centralizzata (con eventuale ulteriore riscaldamento elettrico nel dispositivo);
- iii) viene prelevata acqua calda che è eventualmente riscaldata ulteriormente tramite vapore preparato da generatore di vapore centralizzato.

L'alimentazione tramite acqua calda, soluzione standard per i dispositivi industriali, si sta diffondendo anche in ambito domestico attraverso nuovi dispositivi predisposti o soluzioni per il *retrofit* di dispositivi già installati.

Una prospettiva di sviluppo di risparmio energetico ed economico importante sarebbe quella di alimentare i dispositivi in questione tramite acqua calda distribuita da una rete di teleriscaldamento, che, per sua caratteristica, serve un insieme di edifici a livello di distretto. In quei distretti in cui la rete di

teleriscaldamento è già esistente, l'implementazione di questa nuova soluzione si prevede sostenibile ed efficace. In questo caso la realizzazione sarebbe possibile attraverso l'adattamento delle sottocentrali d'utenza.

Nel caso del presente lavoro, i servizi ancillari di una rete di teleriscaldamento consistono nella fornitura di calore (tramite acqua calda da rete TLR) ai dispositivi utilizzatori elettrotermici.

Col presente lavoro si vuole valutare l'entità delle potenzialità dei servizi ancillari e sviluppare uno strumento di simulazione di una rete TLR che implementi tali servizi. Tale strumento allo scopo di valutare l'opportunità dell'implementazione dei servizi ancillari all'interno delle reti TLR, di sviluppare soluzioni innovative di gestione delle reti e di verificare se i servizi ancillari possano dare origine a una razionalizzazione e a un risparmio nell'uso dell'energia.

Il lavoro è stato condotto in stretta sinergia con le attività ENEA, in particolare integrandosi con la piattaforma software di simulazione delle reti TLR (descritta nel report RdS/PAR2013/054), al fine di integrare i risultati e i modelli di simulazione dei servizi ancillari in una piattaforma organica, con l'obiettivo finale di integrare i servizi ancillari all'interno dei servizi offerti da TLR.

2 Stato dell'arte

Attualmente, la produzione di acqua calda negli utilizzatori elettrotermici avviene in modalità elettrica in nei dispositivi di tipo residenziale mentre è o elettrica o tramite generatore di calore d'utenza (caldaia) nei dispositivi di tipo industriale i.e. a uso professionale.

Gli utilizzatori elettrotermici di tipo residenziale (i.e. lavatrici e lavastoviglie di tipo domestico) solitamente sono predisposti per l'allacciamento a un solo punto acqua. L'acqua di lavaggio viene prelevata dalla rete idrica (alla temperatura di rete) e viene riscaldata elettricamente tramite resistori.

Si stanno espandendo sul mercato lavatrici commercialmente note come "a doppio ingresso"¹ in grado di prelevare acqua fredda (i.e. da rete idrica) e acqua calda (e.g. da caldaia). Il dispositivo esegue un prelievo di acqua calda e, dipendentemente dalla temperatura richiesta dal programma di lavaggio, raffredda l'acqua tramite un'iniezione di acqua fredda oppure la riscalda ulteriormente tramite la resistenza elettrica. (Alcuni modelli, sprovvisti di resistenza elettrica, non sono in grado di eseguire il post-riscaldamento elettrico ma sono vincolati dalla temperatura massima a cui è disponibile l'acqua calda.) Di recente introduzione sul mercato sono anche apparati di miscelazione acqua, installabili sul dispositivo *after-market*, per il preriscaldamento dell'acqua di alimentazione. Circa le lavastoviglie di tipo domestico, esse sono usualmente a ingresso unico (l'alimentazione tramite acqua calda viene talvolta eseguita autonomamente da parte dell'utente mediante customizzazione del dispositivo). In uno scenario di diffusione di dispositivi a duplice alimentazione idrica, se l'utenza è servita da rete TLR, risulta interessante valutare la possibilità di alimentare i dispositivi tramite TLR.

Per quanto riguarda gli utilizzatori elettrotermici di tipo industriale (i.e. lavabiancheria, lavapiatti, lavabicchieri, lavapentole) esistono sul mercato alcune varianti.

- Il dispositivo è alimentato da acqua fredda² che viene riscaldata elettricamente; questa soluzione è usuale per lavatrici di piccola taglia (e.g. 5 kg di bucato³), o di tipo self-service⁴, e lavastoviglie;

¹ I principali costruttori che producono modelli "a doppio ingresso" domestici sono Bosch, Candy, Gorenje, Hoover, Hotpoint-Ariston, LG, Miele, Neff, Rex-Electrolux, Sangiorgio, Smeg, Speedqueen, Teka, Vast & Fast, Whirlpool.

² Nei dispositivi industriali l'allacciamento acqua fredda è sovente duplicato in un allacciamento acqua fredda dura (i.e. alla durezza di rete) e in un allacciamento acqua fredda addolcita.

- Il dispositivo è alimentato sia da acqua fredda che da acqua calda (è comunque previsto un riscaldamento elettrico per la regolazione fine e il mantenimento della temperatura dell'acqua); questa soluzione è usuale per lavatrici di taglia media (e.g. 20 kg di bucato) e lavastoviglie;
- Il dispositivo è alimentato da acqua fredda e calda ed è allacciato inoltre a una rete di vapore per il riscaldamento a vapore (è sempre presente il riscaldamento elettrico); questa soluzione è adottata per lavatrici di grande taglia (e.g. 50 kg di bucato) e in utenze di dimensioni importanti (dotate di rete vapore).

In ambito non residenziale l'alimentazione degli utilizzatori elettrotermici mediante acqua calda – preparata tramite caldaie – è quindi una soluzione consolidata. Anche in questo caso, in uno scenario di implementazione di una rete TLR a servizio dell'utenza, può risultare interessante valutare l'opportunità di sfruttare il calore da TLR per il riscaldamento dell'acqua di alimentazione dei dispositivi.

Un vantaggio accessorio dell'alimentazione mediante acqua calda è un minor deposito di calcare (grazie alla minor cristallizzazione dei sali minerali in soluzione dovuta al riscaldamento elettrico); ciò si traduce in una maggiore durata di vita del dispositivo e in un minore fabbisogno di prodotti anticalcare.

Attualmente, la frazione di energia associata al riscaldamento dell'acqua negli utilizzatori elettrotermici è quindi solitamente conteggiata all'interno dei consumi di energia elettrica o di combustibile e non sono disponibili in letteratura analisi specifiche.

Gli studi attualmente disponibili in letteratura hanno riguardato principalmente il settore residenziale e si sono focalizzati sul calcolo del profilo di carico elettrico di aggregati (a livello di edificio o di distretto). Ciò mediante rilevamenti sperimentali o aggregazioni statistiche del carico elettrico associato al complesso di dispositivi presenti nelle unità abitative (i.e. elettrodomestici e apparati multimediali). Pertanto, come detto, la quota di energia destinata alla produzione di acqua calda ai fini degli utilizzatori elettrotermici risulta usualmente ricompresa nel carico elettrico residenziale.

Ad esempio, gli studi condotti all'interno del progetto MICENE (Di Andrea e Danese 2004) presentano i carichi elettrici, per fasce orarie, dei più diffusi dispositivi di uso domestico mediati su un campione di unità abitative. In Figura 1 e Figura 2 si riportano i dati inerenti i dispositivi lavastoviglie (LS) e lavatrice (LV).

³ La massa nominale di bucato (in chilogrammi) che la lavatrice è in grado di trattare in un singolo programma di lavaggio è uno dei principali parametri qualificanti il dispositivo in ambito professionale.

⁴ In quanto pensati per locali privi di preparazione acqua calda.

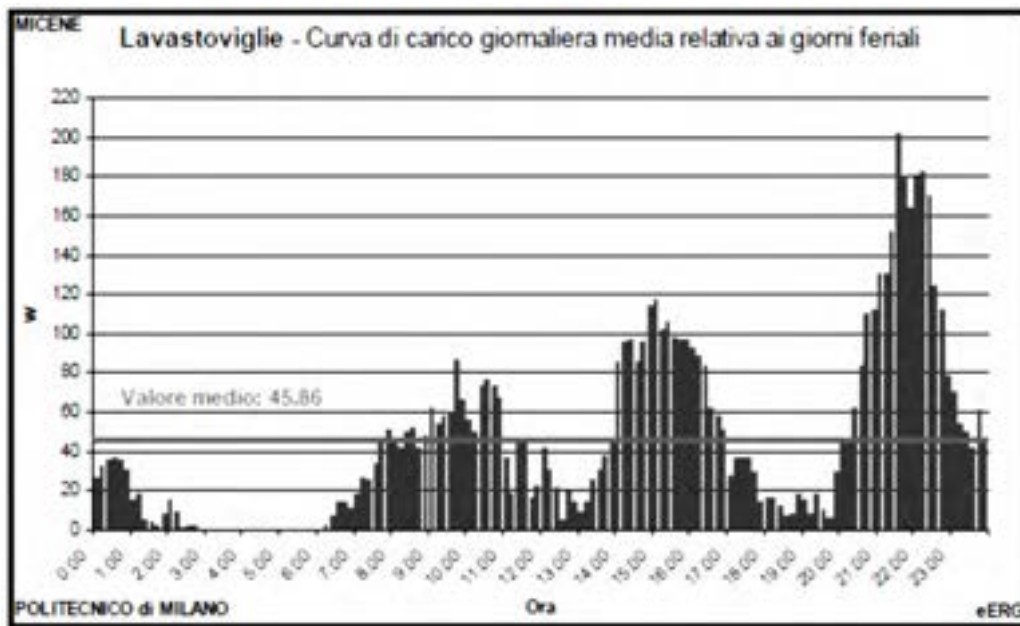


Figura 1. Profilo di carico giornaliero medio per lavastoviglie (LS) residenziale (Di Andrea e Danese 2004)

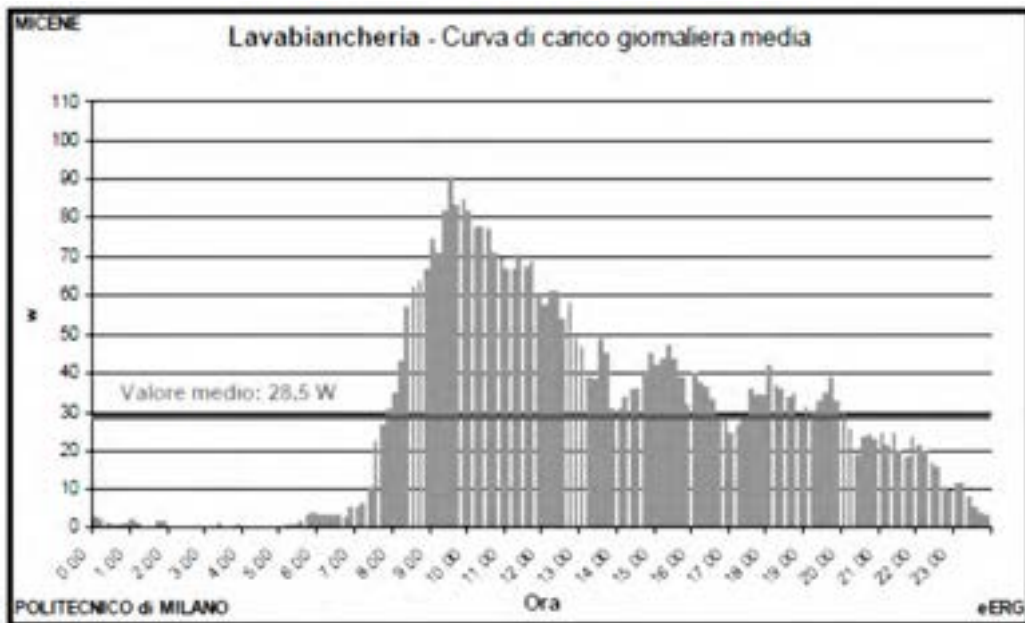


Figura 2. Profilo di carico giornaliero medio per lavatrice (LV) residenziale (Di Andrea e Danese 2004)

Gli studi di Iatauro e Gargano (2003) (Figura 3) mostrano risultati in accordo con gli studi MICENE.

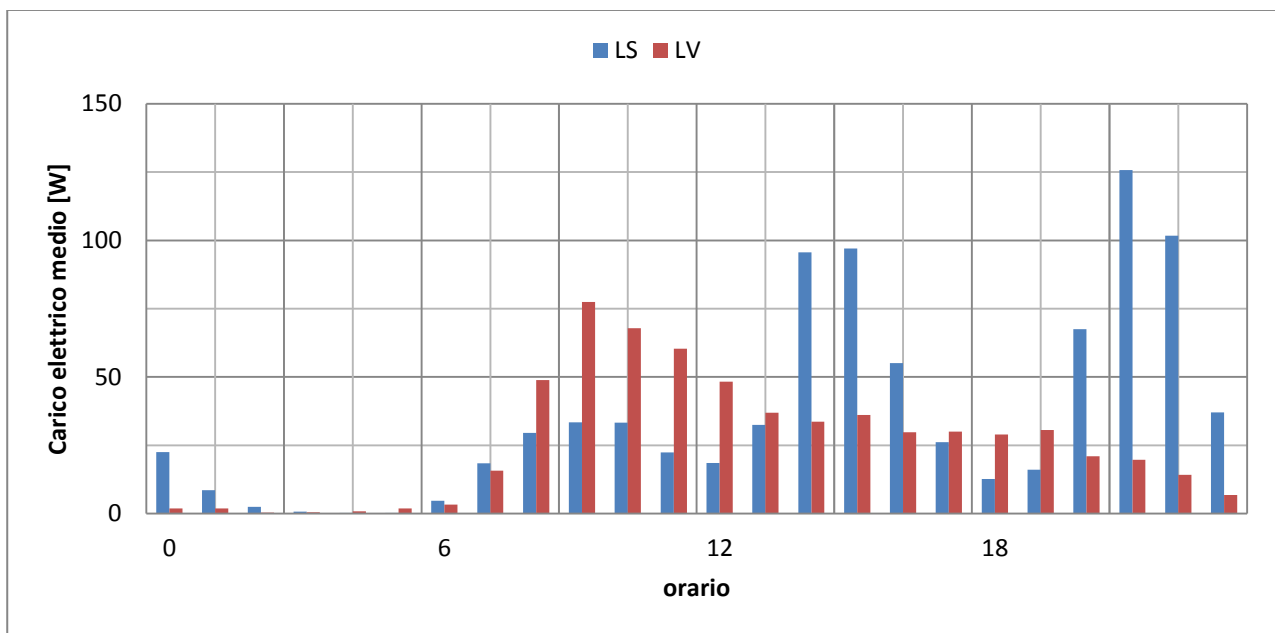


Figura 3. Profili di carico giornaliero di dispositivi residenziali (Iatauro e Gargano 2003)

Gli studi di Martirano-Fornari (2012) presentano invece profili di carico elettrico tipici di dispositivi di uso domestico, per una singola unità abitativa, a seconda delle caratteristiche salienti dell'abitazione (e.g. se abitata da una coppia o da una famiglia o se la stagione è invernale o estiva). I risultati mostrano che gli utilizzatori elettrotermici hanno un profilo poco sensibile al tipo di nucleo che abita l'unità e alla stagione. In Figura 4 si riporta un caso esemplificativo del profilo di carico elettrico associato a LV (lavatrice) e LS (lavastoviglie) per una unità abitata da una famiglia durante la stagione invernale. In considerazione della aleatorietà del ciclo effettivo, i profili considerati nello studio rappresentano la maschera massima di impegno di potenza ("slot energetico impegnato") pari alla potenza massima impegnata per la durata massima. Nell'articolo Martirano & al. (2013) "A case study of a commercial/residential microgrid integrating cogeneration and electrical local users," Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on , vol., no., pp.363,368, 5-8 May 2013, si considerano gli "slot energetici impegnati" ai fini della valutazione dei profili aggregati di carico e della implementazione di un algoritmo di ottimizzazione della gestione dei carichi differibili quali i lavaggi domestici.

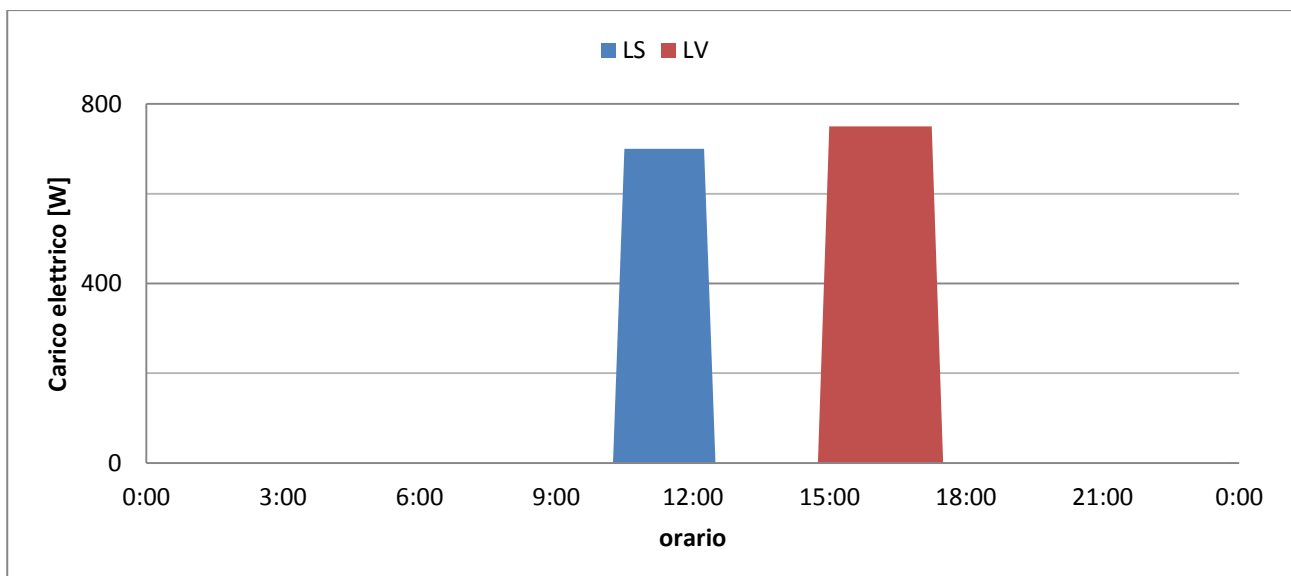


Figura 4. Profilo di carico giornaliero per lavastoviglie (LS) e lavatrice (LV) (Fornari 2012)

Alcuni lavori si sono poi focalizzati su metodologie di generazione del profilo di carico elettrico complessivo per un aggregato di utenze residenziali (comprensivo quindi di tutti gli usi finali in ambito domestico), v. Capasso & al. (1993, 1994), Wright & Firth (2006), Widén & al. (2009) Widén & Wäckelgård (2010), Richardson & al (2010), Gottwalt & al (2011), Baietta (2011), Martirano & al. (2013), Zùniga & al. (2014).

Per quanto concerne gli ambiti non residenziali, la valutazione dei consumi energetici è usualmente trattata all'interno delle attività di *energy management* della struttura (e.g. ufficio tecnico) e i dati disponibili in letteratura sono molto scarsi.

Relativamente ai dati dichiarati dai costruttori sui consumi di energia dei dispositivi in commercio, in ambito residenziale la prassi è di indicare il consumo di energia elettrica (chilowattora elettrici) e di acqua (litri) associati a un programma di riferimento (solitamente il programma economico) o a un anno di utilizzo (in quest'ultimo caso viene considerato un numero standard di lavaggi nell'anno). Le prestazioni si possono ritenere pressoché allineate tra i prodotti dei diversi costruttori. I valori usuali si riportano in Tabella 1.

Tabella 1. Valori di riferimento dei consumi per lavastoviglie (LS) e lavatrici (LV) residenziali

	LS	LV
Durata programma [min]	110 – 160	200
Consumo energia a ciclo [kWh]	1.0 – 1.6	0.7 – 1.1
Consumo acqua a ciclo [L]	12 – 16	50 – 70

Come detto, in assenza di analisi specifiche non è immediatamente ricavabile dai dati la frazione energetica destinata alla produzione dell'acqua calda per il lavaggio.

In ambito non residenziale, d'altra parte, per quanto riguarda le lavabiancheria i principali dati di targa sono la taglia del dispositivo⁵, la potenza nominale complessiva, la potenza del motore e dei resistori di riscaldamento (ove presenti), il consumo d'acqua, la portata di vapore per riscaldamento (se previsto) più le specifiche di connessione elettrica e idrica. Si nota che le potenze assorbite e i consumi di energia e acqua variano sensibilmente con la la taglia del dispositivo. I dispositivi in commercio sono disponibili in taglie molto varie per incontrare le esigenze dell'utenza (e.g. per quanto concerne le lavatrici le taglie disponibili variano da 5 a 50 chilogrammi di bucato). Valori di riferimento per i dispositivi più diffusi commercialmente sono riportati in Tabella 2 e Tabella 3.

Tabella 2. Valori di riferimento dei consumi per lavastoviglie (LS) industriali

	LS
Durata programma [min]	2
Potenza riscaldamento [kW]	3 – 5

Tabella 3. Valori di riferimento dei consumi per lavatrici (LV) industriali

	LV
Durata programma [min]	45 – 90
Consumo energia a ciclo [kWh]	3 – 16
Volume acqua a ciclo [L]	100 – 700
Potenza elettrica riscaldamento [kW]	6 – 24

⁵ Rappresentata dalla massima quantità di carico che il dispositivo è in grado di elaborare in un ciclo di funzionamento o nell'unità di tempo, usualmente massa di bucato in chilogrammi per lavabiancheria, numero di cestelli a ciclo per lavastoviglie c.d. a cappotta (funzionamento batch), numero di cestelli all'ora per lavastoviglie a nastro (funzionamento continuo).

Anche in questo caso, come anticipato, non è possibile estrapolare la frazione energetica per riscaldamento acqua in assenza di analisi specifiche.

Ai fini della valutazione dell'opportunità di alimentare i dispositivi utilizzatori elettrotermici via rete TLR, e quindi dell'opportunità di fornire nuovi servizi ancillari, emerge quindi la necessità di condurre analisi specifiche per integrare e aggiornare i dati disponibili in letteratura.

All'interno del contesto delineato, l'attività svolta nel presente lavoro si ritiene innovativa rispetto ai dati disponibili in quanto presenta analisi specifiche, validate tramite test sperimentali sui dispositivi, sui consumi termici di singoli dispositivi. In più sono stati testati dispositivi di tipo industriale oltre che domestico. Le voci di consumo sono state scomposte secondo gli usi necessari al funzionamento del dispositivo (i.e. riscaldamento acqua o forza motrice) e sono inoltre sviluppati modelli di aggregazione ad hoc in base al tipo di utenza (residenziale, alberghiera etc.) basati su rilievi sperimentali presso utenze esistenti.

3 Campagna di misure sperimentali

L'attività di ricerca è stata organizzata in varie fasi. La prima fase ha avuto l'obiettivo di ricavare il profilo di carico termico dai consumi elettricidi dispositivi utilizzatori elettrotermici all'interno delle utenze residenziali e non residenziali (lavabiancheria e lavatrici). Questa prima fase ha previsto i seguenti punti:

- Caratterizzazione degli utilizzatori elettrotermici
- Validazione sperimentale dei profili di carico mediante misurazioni in campo
- Valutazione economica
- Studio impiantistico

La seconda fase ha avuto l'obiettivo di sviluppare dei modelli di calcolo dei profili di carico termico degli utilizzatori aggregati a livello di edificio e implementare tali modelli in una piattaforma software ENEA di simulazione reti TLR. Questa seconda fase ha previsto i seguenti punti:

- Sviluppo di modelli di aggregazione a livello di edificio e di condominio
- Implementazione dei modelli in ambiente MATLAB
- Analisi di strategie di ottimizzazione
- Programmazione di un pacchetto in ambiente MATLAB-Simulink integrato nella piattaforma software ENEA di simulazione reti TLR

3.1 Caratterizzazione degli utilizzatori elettrotermici

In primo luogo, è stato condotto uno studio finalizzato all'identificazione e alla caratterizzazione delle tipologie di utenze dotate di utilizzatori elettrotermici e sono stati individuati i dispositivi in dotazione a ogni tipologia di utenza

È stata svolta un'ampia indagine bibliografica volta alla messa a punto di una caratterizzazione energetica dei dispositivi utilizzatori elettrotermici. In particolare l'indagine è stata finalizzata all'individuazione di:

- singoli profili di assorbimento di potenza elettrica attiva e di calore (rispettivamente a uso forza motrice e preparazione acqua calda)
- quantitativi di energia elettrica e di calore
- fasi dei programmi di lavaggio
- profili gionali di utilizzazione e orari di picco

Sono stati analizzati:

- dati presenti nella letteratura tecnica fornita dai costruttori⁶
- risultati di studi disponibili nella letteratura scientifica⁷.

Sulla base dei dati presenti nella letteratura tecnica fornita dai costruttori e dei risultati di studi disponibili nella letteratura scientifica, è stato possibile individuare le caratteristiche delle varie fasi di lavoro dei dispositivi che sono state poi confrontate e validate con il monitoraggio sperimentale.

Per gli utilizzatori elettrotermici residenziali, a riscaldamento elettrico, il carico elettrico totale si compone di due voci:

- FM (trascinamento cestello, pompaggio acqua)
- Riscaldamento acqua

Il profilo di carico dei dispositivi dipende dal programma di lavaggio selezionato. I parametri numerici del programma dipendono dal produttore e spesso non sono note in quanto non dichiarate. Per i dispositivi residenziali è stato possibile raggruppare i programmi di lavaggio in due categorie:

- Programma normale
- Programma rapido

3.1.1 Lavastoviglie residenziale

In una LS residenziale il programma si compone di una fase di lavaggio con acqua calda e in una fase di risciacquo sempre con acqua calda, quindi sono necessari due momenti di riscaldamento dell'acqua.

In Tabella 4 e

Tabella 5 si riportano come esempio i dati dichiarati dai costruttori per due LS residenziali (elaborazione da dati Bosch e Indesit) che sono state successivamente oggetto di monitoraggio (v. più avanti).

Tabella 4. Parametri caratterizzanti i vari programmi di lavaggio di LS residenziale (Indesit)

Numero programma	1	2	3
Nome programma	Intensivo	Normale	Eco
Durata t [min]	135-150	110-120	175
Volume acqua V [L]	15-16	15-16	12
Energia W [kWh]	1.40-1.60	1.10-1.30	1.03

Nel primo dispositivo i dati di riferimento del consumo di energia elettrica e di acqua sono associati al programma di riferimento a livello europeo (programma "eco") e sono:

- Consumo di energia elettrica a programma: 1.03 kWh/programma (299 kWh/a per 280 cicli/a)
- Consumo d'acqua a programma: 12 L/programma (3360 L/a per 280 cicli/a)

⁶ Aristarco, Bosch, Comenda, Grandimpianti, Hemerson, Imesa, Indesit, Itwash, Krupps, Miele

⁷ Di Andrea e Danese (2004), Iatauro e Gargano (2003), Fornari (2012).

Tabella 5. Parametri caratterizzanti i vari programmi di lavaggio di LS residenziale (Bosch)

Numero programma	1	2	3	4	5
Nome programma	Intensivo	Auto	Eco	Rapido	Prelavaggio
Durata t [min]	125-135	95-160	195	29	15
Volume acqua V [L]	12-15	12-15	11.8	10	4
Energia W [kWh]	1.45-1.5	1-1.6	1.03	0.8	0.05
Temperatura T [°C]	70	45-65	50	45	0 (da rete)

Nel secondo dispositivo i dati di riferimento del consumo di energia elettrica e di acqua sono associati al programma di riferimento a livello europeo (programma “eco”) e sono:

- Consumo di energia elettrica a programma: 1.03 kWh/programma (227 kWh/a per 220 cicli/a)
- Consumo d’acqua a programma: 11.80 L/programma (2596 L/a per 220 cicli/a)

I valori del consumo di energia elettrica e di acqua si sono dimostrati pressoché costanti per i vari dispositivi e le prestazioni si dimostrano omogenee tra i prodotti di mercato. In base ai dati raccolti si possono assumere i dati di riferimento riportati in Tabella 6 che si possono ritenere validi per tutte le LS.

Tabella 6. Valori di riferimento dei consumi per LS residenziale

Durata programma [min]	110 – 160
Consumo energia a programma [kWh]	1.0 – 1.6
Consumo acqua a programma [L]	12 – 16

3.1.2 Lavatrice residenziale

In una LV residenziale il programma prevede una sola fase di riscaldamento dell’acqua.

Si riportano come esempio i dati dichiarati dai costruttori per due LV residenziali (elaborazione da dati Bosch e ITwash) che sono state successivamente oggetto di monitoraggio (v. più avanti).

Per un dispositivo Itwash i più importanti dati dichiarati (associati al programma di riferimento a livello europeo “intensivo – molto sporco”) sono:

1. Potenza di targa: 2200 W
2. Consumo di energia elettrica medio a programma: 1.06 kWh/programma (233 kWh/a per 220 cicli/a)
3. Consumo d’acqua medio a programma: 57 L/programma (12496 L/a per 220 cicli/a)
4. Temperatura T = 40-60°C

In questo caso i parametri caratterizzanti i vari programmi di lavaggio non sono stati forniti.

Per un dispositivo Bosch i dati dichiarati (associati al programma di riferimento a livello europeo “intensivo – molto sporco”) sono:

1. Potenza di targa: 2300 W
2. Consumo di energia elettrica medio: 0.75 kWh/programma (165 kWh/a per 220 cicli/a a 40-60°C)
 - 2.1. A 40°C: 0.63 kWh/programma
 - 2.2. A 60°C: 0.75 kWh/programma

3. Consumo di acqua medio a programma: 49 L/programma (10686 L/a per 220 cicli/a a 40-60°C)
4. Temperatura T = 40-60°C
5. Durata: media 200 min
 - 5.1. A 40°C: 185 min
 - 5.2. A 60°C: 215 min

In Tabella 7 si riportano i parametri caratterizzanti i vari programmi di lavaggio.

Tabella 7. Parametri caratterizzanti i vari programmi di lavaggio di LV residenziale (Bosch)

Numero programma	1	2	3	4
Nome programma	Colorati	Easy care	Delicati	Lana
Volume acqua V [L]	68	54	35	47
Energia W [kWh]	0.91	0.55	0.24	0.22
Temperatura T [°C]	40	40	30	30

In base ai dati raccolti si possono assumere i dati di riferimento in Tabella 8.

Tabella 8. Valori di riferimento dei consumi per LV residenziale

Durata programma [min]	200
Consumo energia a programma [kWh]	0.7 – 1.1
Consumo acqua a programma [L]	50 – 70

3.1.3 Lavastoviglie industriale

In Tabella 9 si riportano come esempio i dati dichiarati dai costruttori per due diversi tipi di LS industriale affini e simili ai dispositivi oggetto di monitoraggio (elaborazione da dati Aristarco).

Tabella 9. Parametri caratterizzanti LS industriale (Aristarco)

	A	B
Potenza nominale [W]	3600	5300
Resistore boiler [W]	3000	4500
Resistore vasca [W]	2000	4500
Pompa [W]	600	800
Corrente nominale [A]	16	10
Volume acqua a programma [L]	2.5	2.5
Durata programma [min]	2	2

In base ai dati raccolti si possono assumere i dati di riferimento riportati in Tabella 10. In questo caso il consumo di energia non viene dichiarato.

Tabella 10. Valori di riferimento dei consumi per LS industriale

Durata programma [min]	2
Consumo energia a programma [kWh]	N.D.
Consumo acqua a programma [L]	2.5

3.1.4 Lavatrice industriale

In Tabella 11 si riportano come esempio i dati dichiarati dai costruttori per LV industriali (elaborazione da dati Grandimpianti e Imesa)

Tabella 11. Dati caratterizzanti LV industriali (Grandimpianti e Imesa)

	A	B	C
Consumo di energia elettrica a programma [kWh]	3	5	16
Potenza elettrica resistori [W]	3 x 2000	3 x 3000	6 x 4000
Volume acqua a programma [L]	120	300	700

La potenza di riscaldamento e il consumo di energia elettrica sono variabili secondo le varie taglie dei dispositivi ma possono essere messe in correlazione alla taglia del dispositivo tramite il volume d'acqua trattato a programma. In Figura 5 si riporta l'andamento del consumo di energia a programma e della potenza elettrica nominale di riscaldamento estrapolati al variare del volume d'acqua caricato, in base ai dati raccolti.

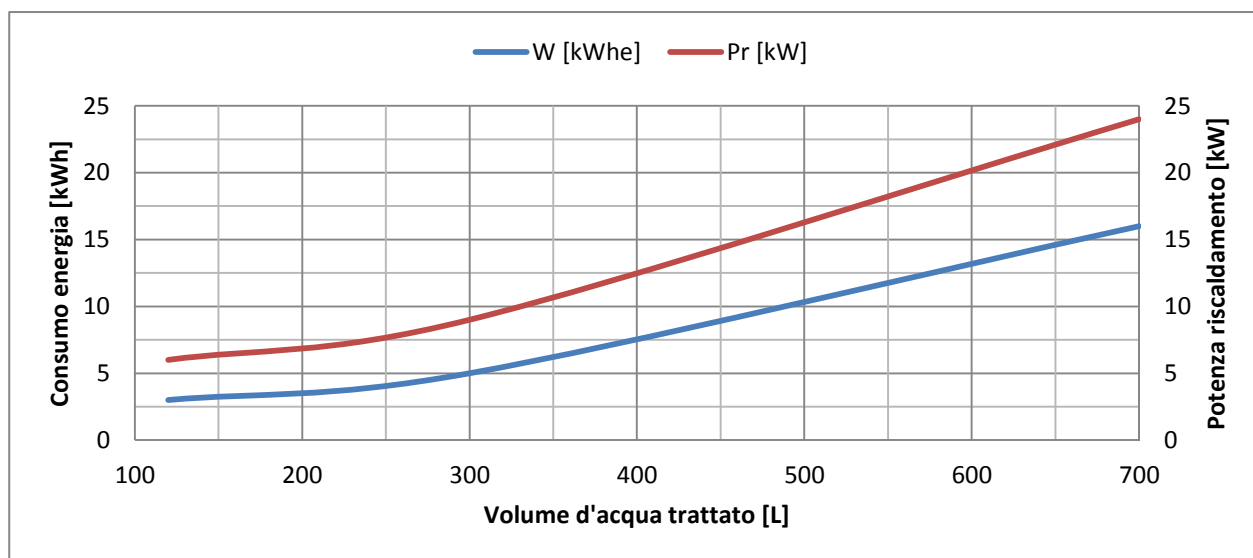


Figura 5. Correlazione tra il consumo d'acqua di LV industriali (rappresentativo della taglia, in ascissa) e il consumo di energia (ordinata, sinistra) e la potenza del riscaldamento elettrico (ordinata, destra).

3.2 Validazione sperimentale dei profili di carico mediante misurazioni in campo

Come detto, i dati presenti in letteratura non sono sufficienti all'individuazione dei profili di carico elettrico dei dispositivi e al disaccoppiamento nei profili di carico elettrico a uso forza motrice e di carico termico. Pertanto, allo scopo è stata svolta un'ampia campagna di misura dei consumi istantanei dei dispositivi e dei parametri di funzionamento.

L'attività di monitoraggio è stata svolta presso differenti utenze, rappresentative delle tipologie di utenze prese in considerazione nel presente lavoro, allo scopo di costruire una base dati appropriata alla caratterizzazione delle varie utenze possibili nella realtà.

In ambito residenziale il monitoraggio è stato eseguito presso unità abitative aderenti allo studio. In ambito non residenziale il monitoraggio è stato eseguito presso le seguenti strutture:

- ✓ esercizi di ristorazione commerciale (per gentile concessione Arpa s.a.s di Ferrara Pietro)
- ✓ struttura alberghiera (servizio lavanderia e servizio mensa dipendenti) (per gentile concessione Ufficio Engineering Rome Cavalieri Waldorf Astoria)

- ✓ esercizio di ristorazione aziendale (per gentile concessione mensa dipendenti C. R. ENEA Casaccia)

3.2.1 Utenze residenziali

In ambito residenziale, i dispositivi oggetto di monitoraggio sono stati lavastoviglie e lavatrici di tipo domestico. Il monitoraggio è stato eseguito rilevando il carico elettrico istantaneo e registrando il profilo attraverso logger di corrente monofase inserito tramite pinze amperometriche sui conduttori di alimentazione (fase e neutro) registrando 1 campione al secondo. Inoltre è stato misurato il valore efficace nel tempo della tensione di alimentazione del dispositivo (a vuoto e a carico) attraverso power quality analyzer. In più è stata fatta una rilevazione diretta in tempo reale delle fasi del lavaggio. I programmi di lavaggio oggetto di monitoraggio corrispondono ai programmi di uso più frequente presso le utenze aderenti al monitoraggio.

Una volta acquisito il profilo di carico elettrico, è stato da questo estrapolato il profilo di carico termico a uso produzione acqua calda. L'estrapolazione è stata effettuata associando:

- al valore di base del profilo di carico elettrico, l'uso FM;
- al valore di picco, l'uso riscaldamento

L'estrapolazione è stata validata confrontandola con le informazioni sulle fasi componenti i programmi di lavaggio, note dalla caratterizzazione degli utilizzatori e dalla rilevazione diretta in tempo reale.

Gli strumenti usati sono:

- Chauvin Arnoux L102 Simple Logger II
- Chauvin Arnoux CA 8335 Qualistar Plus power and energy quality analyzer



Figura 6. Logger di corrente utilizzato nelle misurazioni in ambito residenziale



Figura 7. Power and energy quality analyser utilizzato nelle misurazioni in ambito residenziale

Tabella 12. Caratteristiche del power and energy quality analyser

Measuring		Measurement scope		Display resolution	Maximum error in the field of reference
		Minimum	Maximum		
Frequency		40 Hz	69 Hz	0.01 Hz	±(1 p)
Phase voltage TRMS		10 V	1,000 V [†]	0.1 V V < 1000 V	±(0.5 % + 2 p)
				1 V V ≥ 1000 V	±(0.5 % + 1 p)
Composite voltage TRMS		10 V	2,000 V [†]	0.1 V V < 1000 V	±(0.5 % + 2 p)
				1 V V ≥ 1000 V	±(0.5 % + 1 p)
DC voltage		10 V	1000 V	0.1 V V < 1000 V	±(1 % + 5 p)
				1 V V ≥ 1000 V	±(1 % + 1 p)
Current TRMS	Excluding AmpFLEX™ & MiniFLEX	I _{lim} + 1000 [A]	1.2 × I _{lim} [A]	0.1 A I < 1000 A	±(0.5 % + 2 p)
				1 A I ≥ 1000 A	±(0.5 % + 1 p)
	AmpFLEX™ & MiniFLEX	10 A	6500 A	0.1 A I < 1000 A	±(0.5 % + 1 A)
				1 A I ≥ 1000 A	
Direct current		1 A	1200 A ^{†††}	0.1 A I < 1000 A 1 A I ≥ 1000 A	±(1 % + 1 A)
Peak current	Excluding AmpFLEX™ & MiniFLEX AmpFLEX™ & MiniFLEX	I _{lim} + 1000 [A]	1.7 × I _{lim} [A] [†]	0.1 A I < 1000 A	±(1 % + 1 A)
				1 A I ≥ 1000 A	
Half-period TRMS current ^{††}	Excluding AmpFLEX™ & MiniFLEX	I _{lim} + 100 [A]	1.2 × I _{lim} [A]	0.1 A I < 1000 A 1 A I ≥ 1000 A	±(1 % + 1 A)
				0.1 A I < 1000 A 1 A I ≥ 1000 A	±(1.5 % + 4 A)
	AmpFLEX™ & MiniFLEX	100 A	6500 A	0.1 V V < 1000 V 1 V V ≥ 1000 V	±(1 % + 1 V)
				0.1 V U < 1000 V 1 V U ≥ 1000 V	

Tabella 13. Caratteristiche del logger di corrente

Canali	2
Portata tensione sull'ingresso (intervallo di misura)	0-1 Vac
Risoluzione	0.1 mV
Precisione 50/60 Hz	0 - 10mV: non specificato 10 - 50mV: $\pm(0.5\%$ del valore + 1mV) 50 - 1000mV: $\pm(0.5\%$ del valore + 0.5mV)
Impedenza in ingresso	800 kilohm
Velocità di campionamento	64 campioni/cycle
Velocità di memorizzazione	8/s - 1/giorno
Intervallo di memorizzazione	125 ms - 1 giorno

Tabella 14. Caratteristiche delle pinze amperometriche MN60 del logger di corrente

Campo di misura	0.1-24 A; 0.5-240 A
Segnale in uscita	100 mV/Aac, 10 mV/Aac
Sfasamento	Minore di 2.5°

Si riportano i risultati della campagna di misure sperimentali svolta sui dispositivi di tipo residenziale e industriale. Si riporta in Figura 8 un caso esemplificativo di profilo di carico elettrico rilevato sperimentalmente per un dispositivo di tipo residenziale (LS, programma normale).

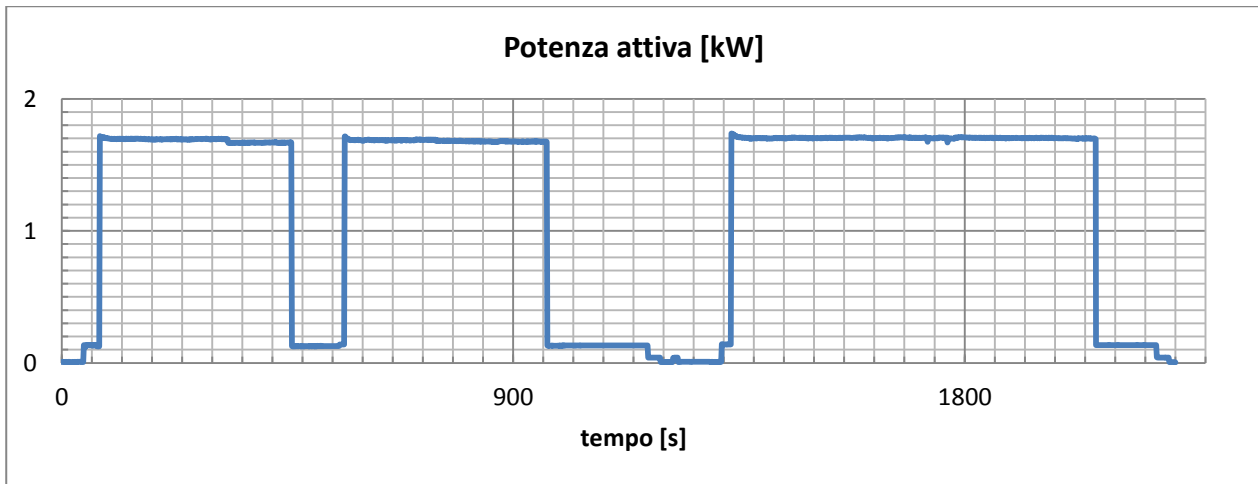


Figura 8. Esempio di carico elettrico di dispositivo residenziale rilevato sperimentalmente (LS, programma normale)

In ambito residenziale, l'estrapolazione del profilo di carico termico dal profilo di carico elettrico ha dato i risultati mostrati in Figura 9. Come detto, i risultati ottenuti sono stati sintetizzati in due categorie di programmi (normale e rapido) per ciascun tipo di dispositivo. In Figura 10 si riportano i dati di durata, potenza elettrica assorbita ed energia elettrica consumata.

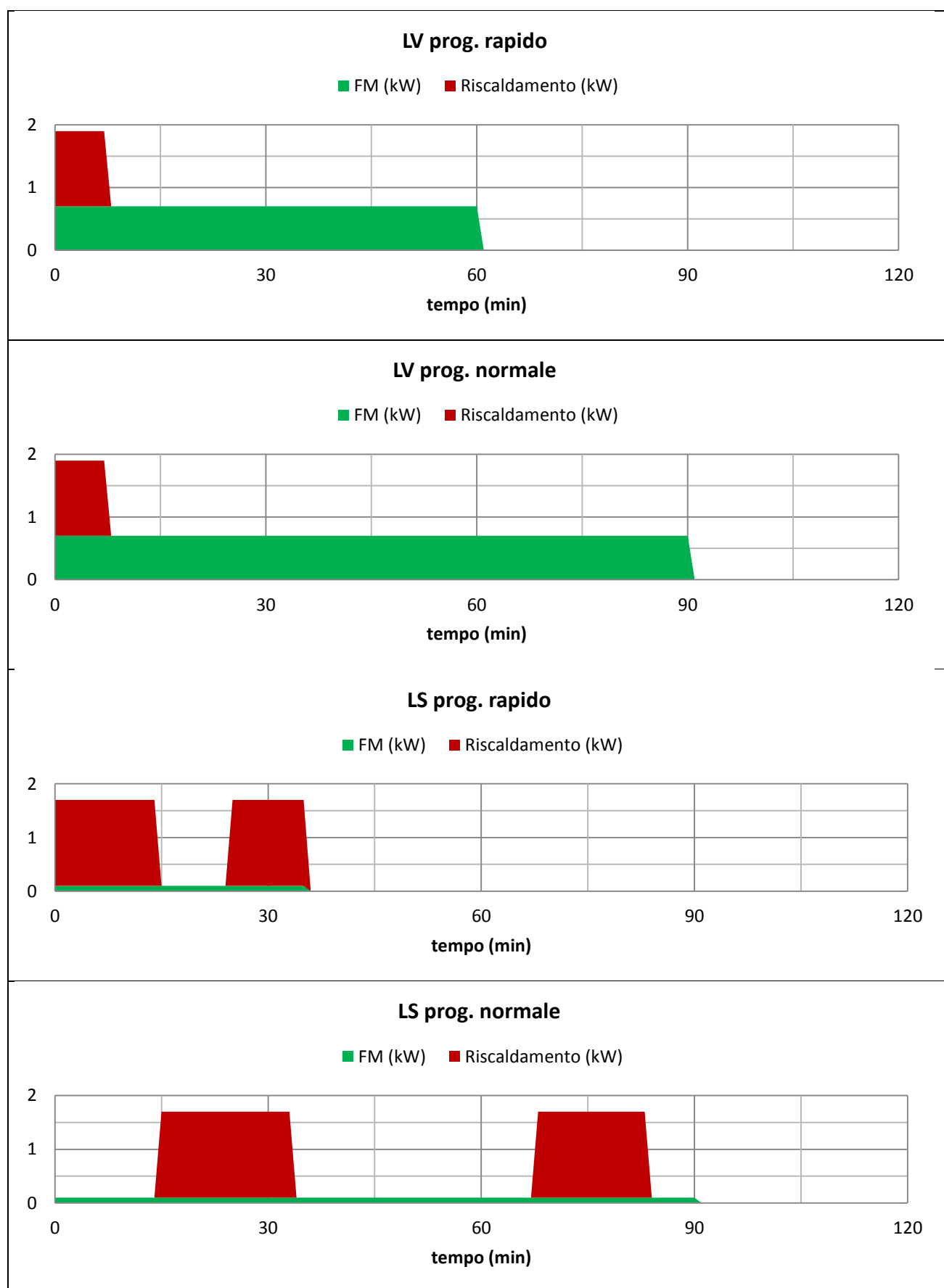


Figura 9. Profili di carico elettrico rilevati per singolo programma di lavaggio di elettrodomestici residenziali: estrapolazione della frazione di carico per produzione di acqua calda residenziale

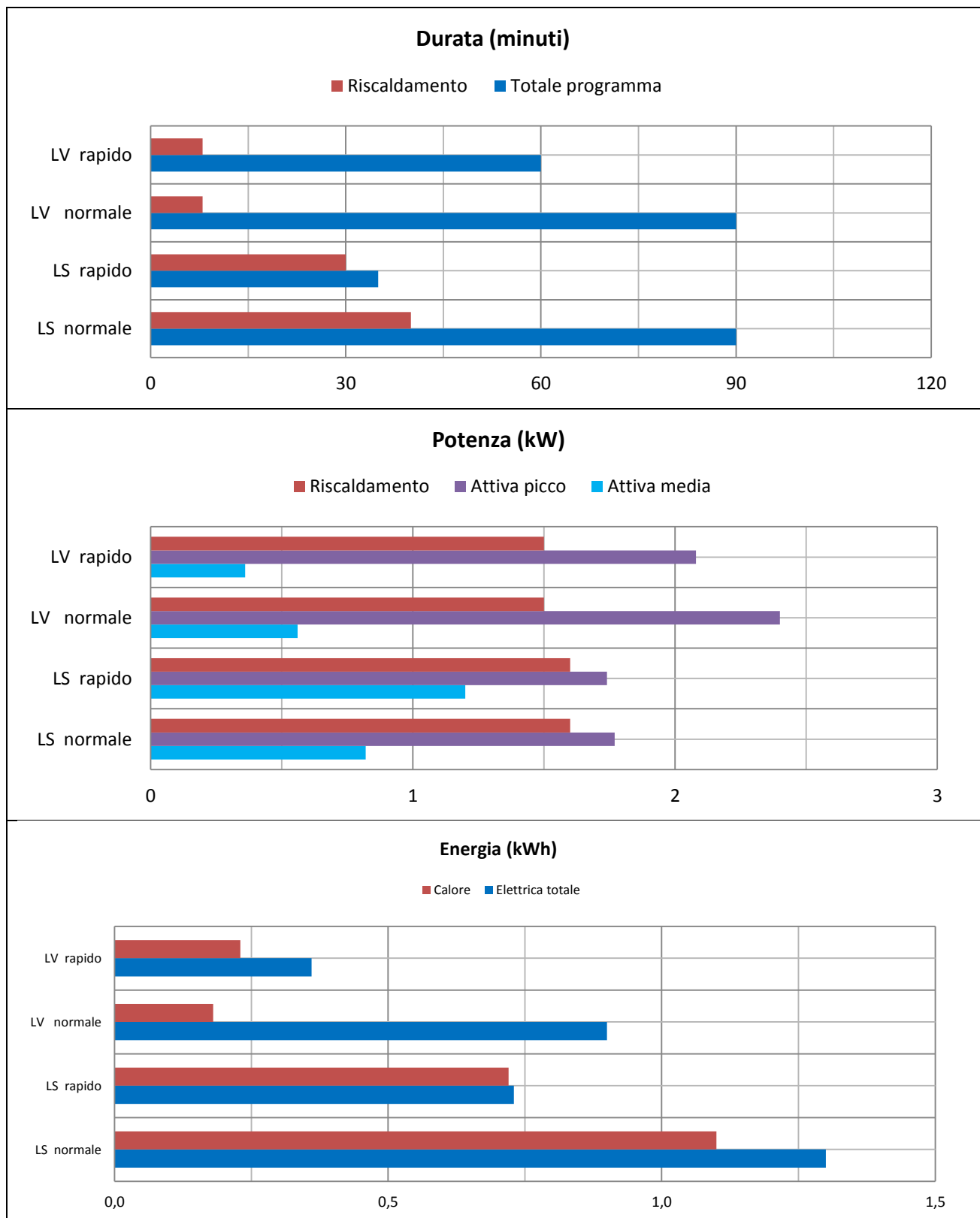


Figura 10. Caratterizzazione energetica degli elettrodomestici monitorati in ambito residenziale (per dispositivo e tipo di programma)

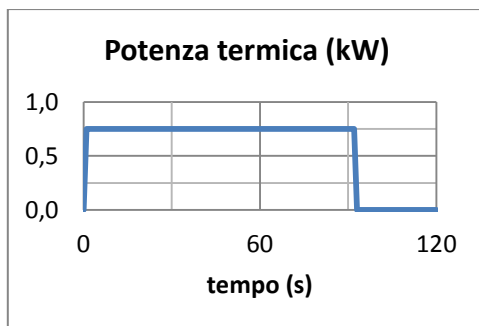
3.2.2 Esercizi ristorativi commerciali

Nell'ambito della ristorazione commerciale, i dispositivi oggetto di monitoraggio sono stati lavastoviglie di tipo industriale monofase. Il monitoraggio è stato eseguito rilevando il carico elettrico istantaneo e registrando il profilo attraverso logger di corrente monofase inserito tramite pinze amperometriche sui conduttori di alimentazione, registrando 1 campione al secondo. Inoltre è stato misurato il valore efficace nel tempo della tensione di alimentazione del dispositivo (a vuoto e a carico) attraverso power quality analyzer. In più è stata condotta un'indagine, mediante interviste con il personale esperto, finalizzata a costruire dei profili di utilizzazione dell'esercizio commerciale e dei singoli dispositivi.

Gli strumenti usati sono:

- Chauvin Arnoux L102 Simple Logger II
- Chauvin Arnoux CA 8334b

Nel caso di LS industriali di piccola taglia funzionanti a cestello (del tipo usato presso ristoranti e bar) la potenza elettrica a uso FM è modesta, in quanto utilizzata solo per il pompaggio dell'acqua e non per il trascinarsi di cestelli o nastri. D'altra parte l'acqua viene portata ad alta temperatura in quanto è necessaria l'igienizzazione delle stoviglie. Quindi si può ritenere valida l'approssimazione – a favore di sicurezza – che l'intero carico elettrico sia a uso termico. Le LS industriali funzionano usualmente a programma unico. Il programma è di breve durata e ad alta temperatura al fine di igienizzare le stoviglie e renderle rapidamente disponibili all'uso. Si riporta il profilo di carico termico e i dati di sintesi rilevati sperimentalmente per i dispositivi monitorati (Figura 11. Profilo di carico e dati di sintesi sperimentali per lavastoviglie professionale in ambito ristorativo commerciale).



Durata programma (s)	90
Potenza media (kW)	0.76
Potenza picco (kW)	0.77
Energia (Wh)	20
Numero medio di dispositivi	2
Frequenza media d'uso (min⁻¹)	0.2

Figura 11. Profilo di carico e dati di sintesi sperimentali per lavastoviglie professionale in ambito ristorativo commerciale

3.2.3 Struttura alberghiera

Nell'ambito alberghiero il monitoraggio ha riguardato sia il servizio lavanderia che il servizio mensa dipendenti.

Presso il servizio lavanderia, i dispositivi oggetto di monitoraggio sono stati una lavatrice industriale di grande taglia (55 kg di bucato) alimentata ad acqua calda e riscaldata a vapore ed una lavatrice di piccola taglia (6.5 kg di bucato) alimentata ad acqua calda e riscaldata elettricamente.

Il monitoraggio della lavatrice a vapore è stato eseguito come segue.

1. È stato registrato il profilo di carico elettrico tramite logger di corrente trifase inserito tramite pinze amperometriche sulle tre fasi di alimentazione e sul neutro per verifica, registrando 1 campione al secondo.

2. È stato registrato il profilo termico di tre temperature di interesse del dispositivo tramite logger di temperatura inserito via sonde incollate sui punti di misura, registrando 1 campione ogni 10 secondi. Le temperature di interesse sono:
 - 2.1. Temperatura acqua fredda (misurata presso il punto di allaccio del tubo di adduzione)
 - 2.2. Temperatura acqua calda (presso il punto di allaccio del tubo di adduzione)
 - 2.3. Temperatura vapore (presso il punto di allaccio del tubo di adduzione)

Inoltre sono state rilevate direttamente le fasi di lavaggio e i dati caratteristici tramite lettura del display del dispositivo. I dati rilevati sono stati:

- Denominazione della fase di programma in corso
- Durata della fase
- Temperatura finale dell'acqua
- Altezza del livello d'acqua caricato

Questi dati sono stati integrati con i dati riportati sulla documentazione tecnica del dispositivo.

Il monitoraggio è stato svolto continuativamente dalle ore 10 alle ore 17 allo scopo di intercettare gli orari di maggiore utilizzo del dispositivo e avere il maggior numero di informazioni possibile sul dispositivo.

Il monitoraggio della lavatrice elettrica è stato eseguito come segue.

1. È stato registrato il profilo di carico elettrico tramite logger di corrente trifase inserito tramite pinze amperometriche sui conduttori di alimentazione.
2. È stato registrato il profilo termico di tre temperature di interesse del dispositivo tramite logger di temperatura inserito via sonde incollate sui punti di misura. Le temperature di interesse sono:
 - 2.1. Temperatura acqua fredda (misurata presso il punto di allaccio del tubo di adduzione)
 - 2.2. Temperatura acqua calda (presso il punto di allaccio del tubo di adduzione)
 - 2.3. Temperatura cestello (sulla parete dell'oblò)

La tensione di alimentazione è stata rilevata via voltmetro installato in quadro.

Anche in questo caso il monitoraggio è stato svolto continuativamente dalle ore 10 alle ore 17 allo scopo di intercettare gli orari di maggiore utilizzo del dispositivo e avere il maggior numero di informazioni possibile sul dispositivo.

Anche per questo dispositivo sono state rilevate le fasi di lavaggio e i dati caratteristici da display e dalla documentazione tecnica del dispositivo.

Gli strumenti usati sono stati:

- DENT Elitepro SP power logger equipaggiato con 4 pinze amperometriche
- Ahlborn Almemo 2590A equipaggiato con 3 sonde PT100



Figura 12. Logger di potenza elettrica utilizzato nelle misurazioni in ambito alberghiero



Figura 13. Logger di temperatura utilizzato nelle misurazioni in ambito alberghiero

Tabella 15. Caratteristiche del logger di potenza elettrica

Service Types	Single Phase-Two Wire, Single Phase-Three Wire, Three Phase-Four Wire (WYE), Three Phase-Three Wire (DELTA)
Voltage Channels	80-600VAC (80-800VDC), Line-to-Line : 1-600 (1-800 VDC) with External Power
Current Channels	Uses voltage output CTs (0-333 mVAC) for maximum safety
Maximum Current Channel Input Voltage	0-666 mVAC or 0-1.0VDC
Measurement Type	True RMS using high-speed digital signal processing (DSP)
Line Frequency	DC/50/60/400Hz
Waveform Sampling	12 kHz
Channel Sampling Rate (internal sampling)	200 samples/cycle at 60Hz 240 samples/cycle at 50Hz 30 samples/cycle at 400Hz
Data Interval	The default integration period is fifteen minutes. The choices are 1, 3, 15, 30 seconds; 1, 2, 5, 10, 15, 20 and 30 minutes; 1 and 12 hours; 1 day.
Measurements	Volts, Amps, Amp-Hrs (Ah), kW, kWh, kVAR, kVARh, kVA, kVAh, Displacement Power Factor (dPF). All parameters for each phase and for system total.
Accuracy	Better than 1% (<0.5% typical) for V, A, kW, kVAR, kVA, PF
Resolution	0.01 Amp, 0.1 Volt, 0.1 Watt, 0.1 VAR, 0.1 VA, 0.01 Power Factor
Pulse Output	Open collector 75 mA maximum current, 5 Hz maximum frequency

Tabella 16. Caratteristiche del logger di temperatura

Precision class	A
Measuring rate	2.5
Measuring operations per second (mops)	10
System accuracy at 2.5 mops	0.03% of measured value ± 3 digits
Temperature drift	0.003%/K (30 ppm)

Confrontando i profili di carico elettrico e di temperatura rilevati sperimentalmente con le fasi di lavaggio rilevate a display e descritte nella documentazione tecnica, sono stati costruiti i profili di carico termico dei dispositivi a seconda del tipo di programma di lavaggio selezionato, come segue.

Il volume d'acqua caricato in una singola fase di lavaggio è stato calcolato nota l'altezza del livello d'acqua caricato e le dimensioni del cestello note da data sheet.

La quantità di calore necessaria al riscaldamento dell'acqua, per ognuna delle fasi con acqua calda (prelavaggio AT, lavaggio AT, lavaggio BT), è stata calcolata come:

$$Q = c\rho V(\theta_{afin} - \theta_{af}) \quad (1)$$

In cui c è il calore specifico dell'acqua (4186 J/kgK), ρ la densità (996 kg/m³), V il volume caricato (calcolato precedentemente), θ_{afim} la temperatura finale dell'acqua secondo la particolare fase (misurata nel dispositivo e rilevata da display), θ_{af} la temperatura di partenza dell'acqua fredda (misurata tramite strumenti). Il calore specifico e la densità sono stati assunti a una temperatura intermedia tra la temperatura di partenza e le temperature di arrivo di ciascuna fase.

La potenza termica istantanea, associata alla singola fase di programma, è stata calcolata come rapporto tra la quantità di calore necessaria al riscaldamento dell'acqua, calcolata secondo la (1), e la durata del caricamento acqua all'interno della fase:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{T_{pomp}} \quad (2)$$

In cui T_{pomp} è la durata del caricamento acqua, posto pari a 120 s in accordo con i data sheet. Il valore ottenuto rappresenta quindi la potenza termica istantanea, prelevata per il riscaldamento dell'acqua durante l'operazione di caricamento dell'acqua stessa, mediata sulla durata del caricamento.

Il monitoraggio del servizio mensa è stato corredato da un'indagine mediante interviste con il personale esperto e analisi della documentazione tecnica, vertente sulle seguenti informazioni:

- Numero e tipologia di dispositivi
- Orari di funzionamento del servizio
- Modalità e frequenza di utilizzo dei dispositivi
- Programmi di funzionamento dei dispositivi
- Eventuali particolarità o criticità

Presso il servizio mensa dipendenti, oggetto di monitoraggio è stata la lavapiatti a nastro riscaldata elettricamente. È stato registrato il profilo di carico elettrico tramite logger di corrente trifase inserito tramite pinze amperometriche sulle tre fasi di alimentazione e sul neutro per verifica. Il monitoraggio è stato eseguito continuativamente dalle ore 12 alle ore 14 in corrispondenza dell'orario di utilizzo del dispositivo durante il servizio del pranzo. Anche nel caso del servizio mensa sono state condotte delle interviste presso il personale esperto, vertenti sulle seguenti informazioni:

- Orari di funzionamento del servizio
- Portata di carico gestita dal dispositivo
- Eventuali particolarità o criticità

I risultati della campagna di monitoraggio hanno mostrato che il complesso dei programmi utilizzati nel servizio lavanderia è molto vario e personalizzato dall'utenza secondo le proprie esigenze; in linea di massima l'insieme di programmi può però essere schematizzato in programmi ad alta temperatura (AT) e a bassa temperatura (BT). Con riferimento alle fasi in cui è presente il riscaldamento dell'acqua, i programmi ad alta temperatura (AT) si compongono di:

- Fase di prelavaggio con acqua calda (50°C);
- Fase di lavaggio con acqua calda (60°C);
- Fasi di risciacquo con acqua fredda e centrifugazione.

I programmi a bassa temperatura (BT), invece, si compongono di

- Fase di lavaggio con acqua calda (35°C);
- Fasi di risciacquo con acqua fredda e centrifugazione.

Si riporta un esempio di profilo di temperature (Figura 14) e di carico elettrico (Figura 15), rilevati sperimentalmente per LV a vapore nell'arco del periodo di monitoraggio, comprendente i) un programma AT e un programma BT.

Il calcolo del calore, secondo la (1), e quindi della potenza termica istantanea, secondo la (2), è riportato in Tabella 17. Il profilo di carico termico relativo ai due tipi di programma è riportato in Figura 16. La potenza termica effettiva è stata graficata nell'arco di 120 minuti, massima durata di un programma di lavaggio

completo, al fine di mostrare come il picco di potenza termica si posiziona all'interno del programma di lavaggio.

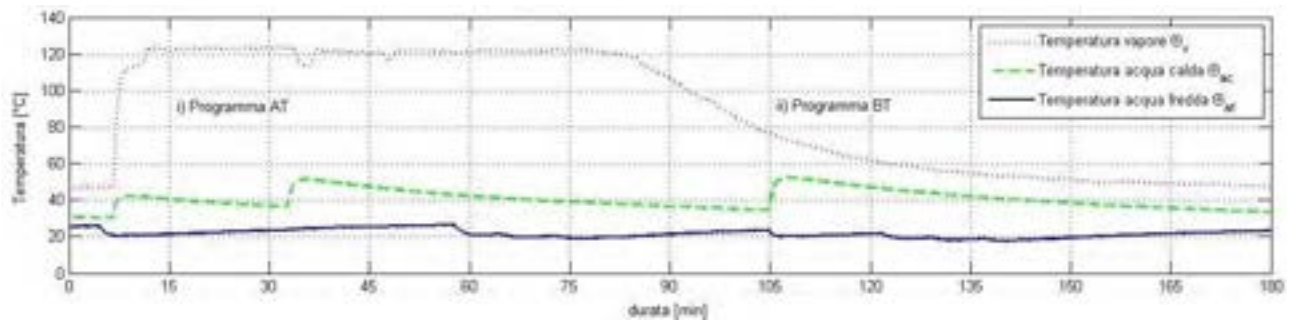


Figura 14. Profilo di temperature di LV industriale a vapore rilevato sperimentalmente per un programma alta temperatura (AT) e un programma bassa temperatura (BT)

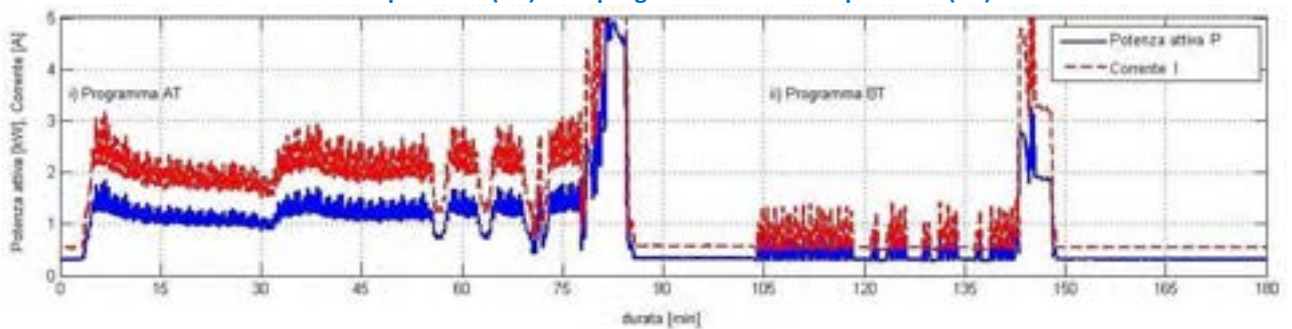


Figura 15. Profilo di carico elettrico di LV industriale a vapore rilevato sperimentalmente per un programma alta temperatura (AT) e un programma bassa temperatura (BT)

Tabella 17. Calcolo della potenza termica per LV industriale per programmi AT e BT

	Prelavaggio (AT)	Lavaggio (AT)	Lavaggio (BT)
Temperatura acqua [°C]	50	60	35
Calore [MJ]	32.3	43.2	16.2
Durata fase [s]	1 800	1 800	900
Durata pompaggio [s]	120	120	120
Potenza termica istantanea [kWt]	270	360	135

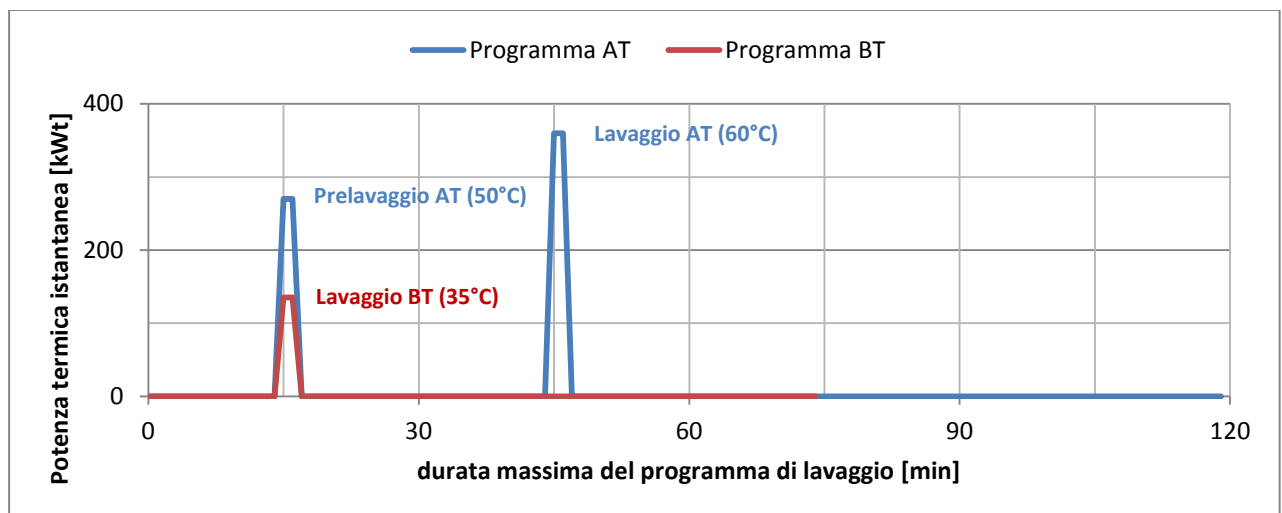


Figura 16. Profilo di carico termico di LV industriale estrapolato per programmi AT e BT (in evidenza le fasi di lavaggio dei programmi alle quali è associata la potenza termica)

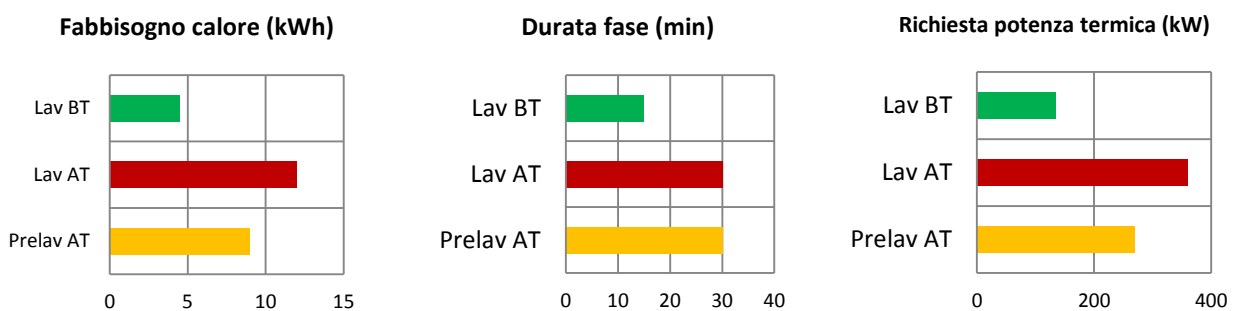


Figura 17. Dati di sintesi del servizio di lavanderia alberghiero

3.2.4 Esercizio ristorativo aziendale

Nell'ambito ristorativo aziendale, il monitoraggio è stato condotto in collaborazione con il servizio mensa del C. R. ENEA Casaccia. È stata eseguita una campagna di rilevazione sperimentale del profilo di carico termico della centrale termica asservita alla produzione acqua calda ad uso della cucina. Sono stati rilevati:

- Numero e potenza nominale dei generatori di calore
- Volume di combustibile (a orari prestabili)

La campagna si è protratta dal lunedì al venerdì per caratterizzare l'intera settimana lavorativa. In base ai dati rilevati è stato costruito il profilo di carico termico come segue. La portata di combustibile media nell'intervallo di tempo (in metri cubi all'ora) è stata calcolata come:

$$G_{fuel} = \frac{V'_{fuel} - V''_{fuel}}{h' - h''}$$

In cui V_{fuel} è il volume di combustibile misurato in due orari I e II, h è l'orario delle due misurazioni I e II.

La potenza termica nell'intervallo di tempo è stata calcolata come:

$$\dot{Q} = G_{fuel} \cdot \eta_{comb} \cdot H_{fuel}$$

In cui G_{fuel} è la portata media di combustibile, η_{comb} è il rendimento di combustione, H_{fuel} è il potere calorifico inferiore del combustibile (gas naturale). Sono stati assunti i seguenti valori:

- $\eta_{comb} = 90\%$
- $H_{fuel} = 9.60 \text{ kWh/m}^3$

inoltre, a supporto della campagna sperimentale, è stata condotta una serie di indagini in collaborazione con il personale esperto, vertente su:

- Orari di funzionamento del servizio
- Tipologie e numero di dispositivi presenti
- Numero di coperti e di pasti serviti giornalmente
- Eventuali particolarità e criticità

In base al profilo giornaliero e all'indagine svolta è stato possibile ricostruire il profilo settimanale e da questo il profilo annuale.

Come detto, è stato rilevato sperimentalmente il profilo di carico termico giornaliero mediato su una settimana lavorativa. Come rilevato da interviste in collaborazione con il personale esperto, il profilo di carico è riferito a un numero medio di 600 pasti al giorno lavorativo. Il servizio è attivo durante i giorni feriali mentre non è attivo nei giorni festivi.

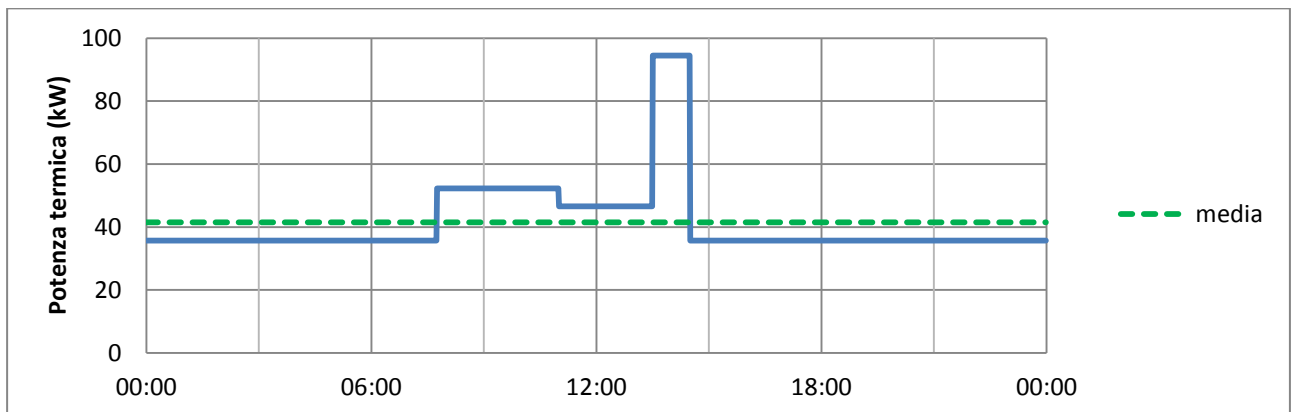


Figura 18. Monitoraggio termico mensa: profilo orario del carico termico per la produzione di acqua calda tramite boiler

I risultati ottenuti mediante la campagna di validazione sperimentale hanno permesso di caratterizzare l'assorbimento di calore da parte dei dispositivi non solo dal punto di vista energetico (come quantità di calore assorbita in totale) ma anche dal punto di vista di potenza, i.e. come andamento istantaneo dell'assorbimento di calore nel corso dell'esecuzione del programma di lavaggio. Quest'ultimo risultato si è dimostrato fondamentale per il successivo sviluppo di algoritmi di aggregazione e per l'implementazione di questi in modelli Simulink, come verrà illustrato più in dettaglio nel capitolo successivo. Per poter generare un profilo di carico aggregato di un insieme di utilizzatori con una buona accuratezza, infatti, non è sufficiente conoscere la quantità di calore assorbita da ogni dispositivo mediamente nell'arco del funzionamento; è necessario conoscere anche l'andamento di tale assorbimento nel corso del funzionamento in modo da tener conto della variabilità del carico, di eventuali punte di carico etc., come sarà illustrato più in dettaglio nel capitolo successivo.

3.3 Valutazione economica

È stata inoltre eseguita una valutazione dei costi economici associati alla produzione di acqua calda per utilizzatori elettrotermici. La valutazione è stata fatta per ogni tipologia di dispositivo e relativamente a ogni programma di funzionamento. Ciò in modo da avere dei valori relativi che potessero essere facilmente scalati per poter valutare successivamente ogni tipo di utenza.

Sono stati considerati i costi associati alle seguenti fonti energetiche:

1. Energia elettrica
2. Generatore di calore
3. Rete TLR

Attualmente, i dispositivi più evoluti offrono un insieme di programmi di lavaggio diversificati, in quanto i produttori prevedono modalità di lavaggio messe a punto per vari tipi di carico, anche in uno scenario di ridurre i consumi di energia e di acqua. Pertanto, ai fini della valutazione economica sono stati presi in considerazione dei programmi di riferimento tipizzati, come schematizzato di seguito, in modo da avere un insieme di programmi che ben rappresentasse le varie possibili modalità di funzionamento di ogni dispositivo, in base alle informazioni ottenute dalle fasi precedenti di caratterizzazione e di validazione sperimentale.

1. LS domestica
 - 1.1. Programma normale
 - 1.2. Programma rapido
2. LV domestica
 - 2.1. Programma normale
 - 2.2. Programma rapido
3. LS industriale da bar
 - 3.1. Programma unico
4. LV industriale
 - 4.1. Programma alta temperatura (AT)
 - 4.2. Programma bassa temperatura (BT)

È stata eseguita una valutazione economica anche della produzione di acqua calda ad uso della cucina della mensa. In questo caso, come detto, era già disponibile un profilo di carico termico aggregato rilevato sperimentalmente; pertanto, allo scopo di avere un valore economico relativo (che potesse cioè essere facilmente scalato per poter valutare strutture di dimensioni diverse), è stata considerata la quantità di calore giornaliera normalizzata per pasto servito (considerando un numero giornaliero di pasti di riferimento valutato in base all'indagine in collaborazione con il personale esperto).

Il costo del riscaldamento elettrico è stato valutato come:

$$C_E = W_{risc} \cdot c_{kWh_e}$$

In cui W_{risc} è la quota di energia elettrica destinata al riscaldamento acqua (calcolata integrando il profilo di carico elettrico a uso termico estrapolato) e c_{kWh_e} è il costo unitario dell'energia elettrica.

Il costo del riscaldamento da caldaia è stato valutato come:

$$C_C = Q_{risc} \cdot c_{kWh_c}$$

In cui Q_{risc} è il calore destinato al riscaldamento acqua (si può porre $W_{risc} \approx Q_{risc}$) e c_{kWhc} è il costo unitario del calore prodotto da caldaia. Questo è stato valutato come:

$$c_{kWhc} = \frac{c_{fuel}}{H_{fuel}\eta_c}$$

In cui c_{fuel} è il costo unitario del combustibile (gas naturale), H_{fuel} è il potere calorifico inferiore del combustibile e η_c è l'efficienza del sistema caldaia e distribuzione calore.

Il costo del riscaldamento mediante TLR è stato valutato come

$$C_T = Q_{risc} \cdot c_{kWht}$$

In cui Q_{risc} è il calore destinato al riscaldamento acqua e c_{kWht} è il costo unitario del calore prodotto da TLR.

Il potere calorifico inferiore del gas è stato assunto pari a 9.60 kWh/m³. Il rendimento del sistema caldaia e distribuzione calore è stato assunto pari a 80% in ambito residenziale e pari a 90% in ambito non residenziale, tenendo conto delle differenti tipologie di generazione e distribuzione di calore.

Il costo unitario dell'energia elettrica è stato posto pari a 0.22 €/kWh per utenze residenziali e pari a 0.24 €/kWh per utenze non residenziali. Il costo unitario del gas è stato posto pari a 0.91 €/m³ secondo una media dell'ultimo anno dei prezzi del gas agli utenti finali riportati dall'Autorità per l'energia elettrica, il gas e il sistema idrico. Il costo unitario del calore da TLR è stato posto pari a 0.11 €/kWht secondo una media dei prezzi riportati dai principali esercenti di reti TLR italiani.

Si riportano i risultati della valutazione del costo economico del riscaldamento acqua nei programmi di funzionamento dei dispositivi secondo la fonte di alimentazione. In Figura 19 si riportano i costi economici dei programmi per dispositivi residenziali. In Figura 20 si riportano i costi economici dei programmi per dispositivi industriali in ambito alberghiero. In Figura 21 si riportano i costi economici per dispositivi in ambito ristorativo commerciale. In Figura 22 si riportano i costi economici del carico giornaliero a pasto in ambito ristorativo aziendale. Si nota che il costo del riscaldamento per via termica è inferiore a quello del riscaldamento per via elettrica (circa la metà) e che il TLR è risultato la fonte più economica in tutti i casi eccetto l'ambito ristorativo aziendale in cui ha lo stesso costo dell'alimentazione tramite centrale termica.

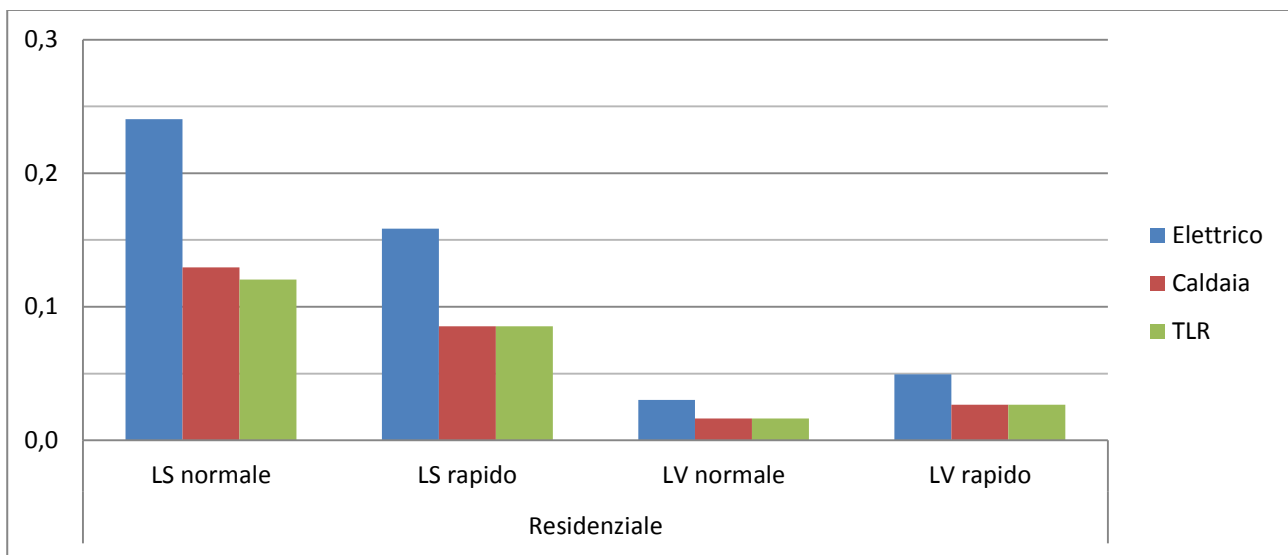


Figura 19. Costi economici riscaldamento acqua utilizzatori elettrotermici residenziali (€)

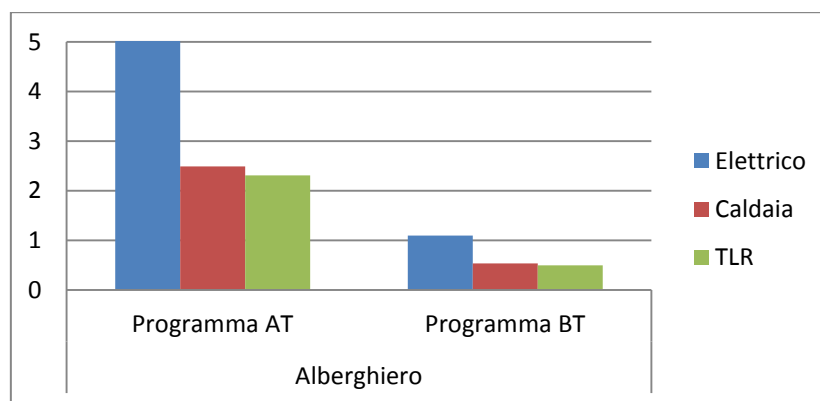


Figura 20. Costi economici riscaldamento acqua utilizzatori elettrotermici industriali in ambito alberghiero (LS industriale, programma unico; €)

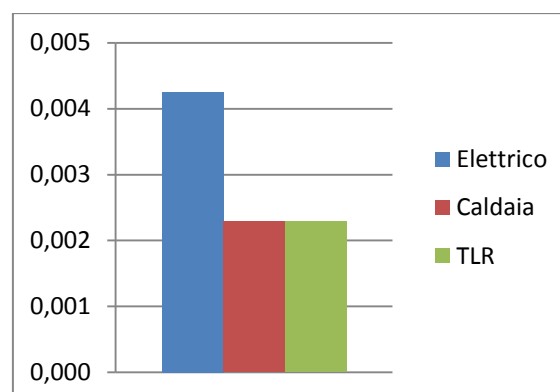


Figura 21. Costi economici riscaldamento acqua utilizzatori elettrotermici industriali in ambito ristorativo commerciale (giornaliero a pasto servito; €)

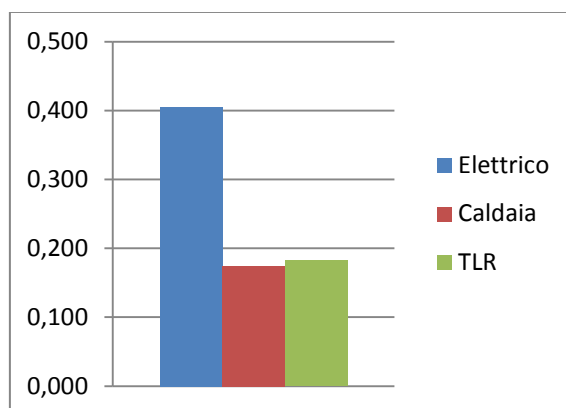


Figura 22. Costi economici riscaldamento acqua utilizzatori elettrotermici industriali in ambito ristorativo aziendale (€)

3.4 Studio impiantistico e proposta di layout d'impianto

È stato condotto uno studio dei layout impiantistici di connessione delle utenze alle reti TLR finalizzato a individuare possibili layout impiantistici innovativi per l'implementazione dei servizi ancillari.

In primo luogo, è stata svolta una analisi delle configurazioni delle reti e delle sottocentrali d'utenza esistenti o disponibili a livello commerciale. In particolare, è stata analizzata la presenza di sistemi di accumulo termico localizzati presso l'utenza (i.e. boiler) che operino una disconnessione tra le porzioni d'impianto. È stata presa in considerazione la documentazione tecnica dei produttori di sottocentrali TLR (v. e.g. Coster, DHS Amarc, Ravasio, STEA, TransTherm, Warma) e la letteratura scientifica inerente le linee guida per sottocentrali TLR (Wollerstrand 1997, Euroheat & Power 2008).

In secondo luogo, sono stati analizzati dei possibili layout impiantistici allo scopo di proporre un nuovo layout finalizzato all'allacciamento degli utilizzatori elettrotermici alla rete TLR.

L'analisi delle configurazioni delle reti TLR e delle sottocentrali TLR esistenti o disponibili commercialmente ha mostrato che le configurazioni di sottocentrale attualmente adottate corrispondono alle tipologie commerciali seguenti:

- Sottocentrali plurifamigliari in sostituzione delle caldaie per nuove centrali termiche
- Sottocentrali plurifamigliari in sostituzione delle caldaie per nuove centrali termiche per la produzione di ACS diretta
- Sottocentrali plurifamigliari in sostituzione delle caldaie per nuove centrali termiche per la produzione di ACS indiretta
- Sottocentrali plurifamigliari con satelliti di utenza
- Sottostazioni monofamigliari con e senza produzione di ACS

In caso di sottocentrale con produzione di ACS, questa può essere affidata a uno scambiatore dedicato. Solitamente è presente un bollitore di accumulo per gestire gli spunti ("acqua calda sanitaria indiretta"). Le sottocentrali vengono commercializzate in tipo compatto che include il bollitore o alternativamente prive di bollitore. Le tipologie di connessione sono:

- a. scambiatori per riscaldamento (1 – 2 unità a seconda della potenza termica) più scambiatore dedicato alla produzione ACS, senza sistema di accumulo (diretta).
- b. scambiatore per riscaldamento e produzione ACS (verso bollitore) più sistema di accumulo (bollitore) per produzione ACS (indiretta).

È interessante notare che il sistema di accumulo (bollitore) viene talvolta adottato come nodo per la connessione di un impianto solare termico localizzato presso l'utenza.

Alla luce dello studio eseguito, è stata individuata come soluzione impiantistica conveniente per l'implementazione dei servizi ancillari, una configurazione basata sul circuito ACS con sistema di accumulo termico, come schematizzato in Figura 24.

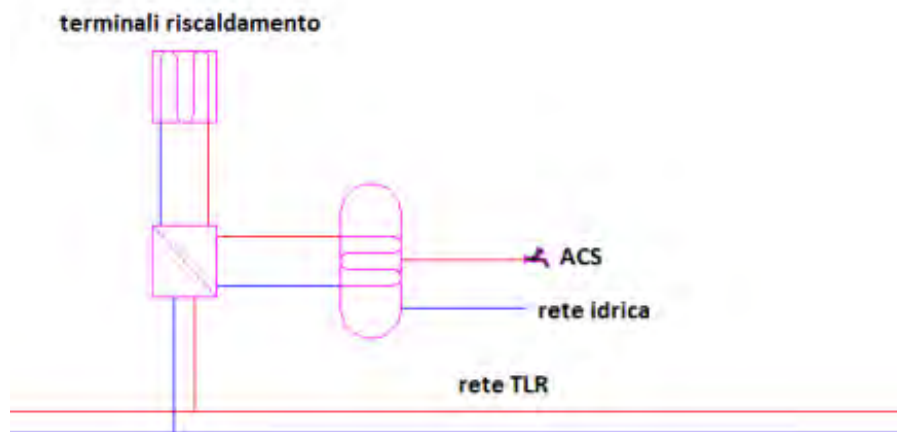


Figura 23. Schema di configurazione sottocentrale TLR commerciale predisposta ACS con accumulo

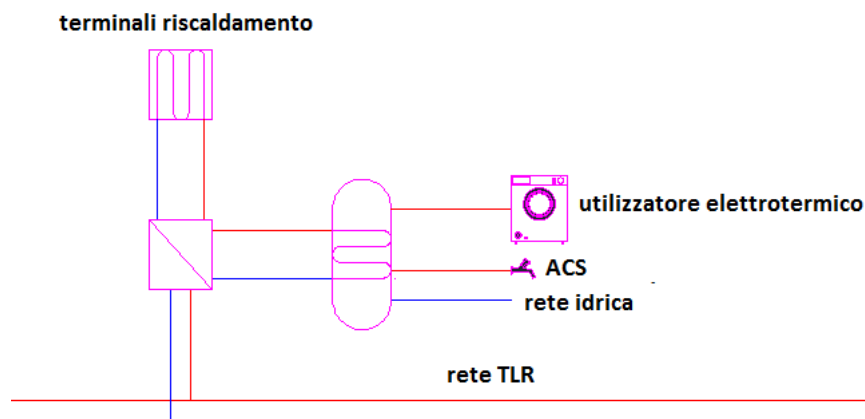


Figura 24. Schema della configurazione di sottocentrale proposta

Nello sviluppo dei modelli di simulazione dei servizi ancillari, come verrà illustrato nel capitolo seguente, si è posto che i carichi termici dei dispositivi siano corrispondenti a quelli ottenuti nel corso della caratterizzazione e della validazione sperimentale, ossia che i dispositivi alimentati tramite servizi ancillari presentino i medesimi carichi che hanno in caso di alimentazione tradizionale.

4 Modelli di simulazione in ambiente MATLAB

La seconda fase della attività di ricerca ha riguardato lo sviluppo, in ambiente MATLAB, di algoritmi di simulazione dei profili termici degli utilizzatori elettrotermici delle utenze, aggregati a livello di edificio, facendo uso di tecniche basate su metodi Montecarlo.

Sono stati sviluppati più algoritmi ad hoc, ciascuno ottimizzato per simulare più fedelmente una particolare utenza, secondo le tipologie di utenza considerate nel presente studio.

4.1 Algoritmo di aggregazione in ambito residenziale

Finalizzata allo sviluppo di un algoritmo di aggregazione in ambito residenziale, è stata svolta una caratterizzazione delle strutture edilizie residenziali esistenti in ambito nazionale. Dai rapporti ANACI (2006, 2004) risulta la composizione del parco edilizio residenziale nazionale riportata in Tabella 18 e Tabella 19.

Tabella 18. Distribuzione del numero di unità abitative per edifici residenziali nel 2004 (ANACI)

Numero di unità abitative per edificio	Numero di edifici
1	7 578 575
2	1 732 655
3-4	717 833
5-8	513 335
9-16	261 838
17-30	110 706
>31	35 536
rurali	4 575
TOTALE	11 407 978

Tabella 19. Distribuzione del numero di unità abitative per edifici residenziali nel 2006 (ANACI)

Numero di unità abitative per edificio	Numero di edifici
1	6 902 088
2	2 280 428
3-4	1 031 757
5-8	517 100
9-15	275 263
>16	207 333
TOTALE	11 213 969

Il numero medio di unità abitative per edificio risulta circa pari a 2, numero che però diviene 7 – 8 considerando solo gli edifici con 3 o più unità abitative ed escludendo gli edifici rurali (meno interessati dal teleriscaldamento). Dalla Building Typology Brochure redatta all'interno del progetto TABULA TEBE del Politecnico di Torino (Corrado & al. 2011), su dati ENEA e ISTAT, risulta inoltre una superficie media di circa 100 m² per ogni unità abitativa (Tabella 20).

Tabella 20. Caratteristiche delle unità abitative (Corrado 2011)

Numero di edifici residenziali	11 226 595
Numero di unità abitative	27 291 993
Superficie media per unità abitativa [m ²]	96

L'algoritmo di aggregazione residenziale è basato sulla generazione di un profilo totale attraverso la sovrapposizione dei profili di carico termico dei singoli dispositivi di ogni unità abitativa. Inizialmente vengono caricati i profili di carico singoli dei dispositivi, costituiti da vettori il cui i -esimo elemento corrisponde al carico del dispositivo all'istante i . I profili considerati sono:

- LS, programma normale
- LS, programma rapido
- LV

I profili sono centrati su orari di massima probabilità di uso del dispositivo, quindi i valori sono zero eccetto che in tali orari in cui sono pari al valore della potenza termica richiesta al momento. In primo luogo viene fatto un numero di iterazione pari al numero di LS. A ogni iterazione, i profili di carico termico singoli dei dispositivi LS vengono sovrapposti uno ad uno, ciascuno traslato di un intervallo temporale (in anticipo o in ritardo) generato casualmente secondo una distribuzione normale. I profili individuali vengono quindi aggregati secondo una distribuzione gaussiana, con valor medio pari all'orario di massima probabilità e deviazione standard σ tale che 3σ sia pari al massimo scostamento temporale ammesso rispetto orari di massima probabilità. Il numero di dispositivi è calcolato in base al numero di unità abitative ipotizzando 1 LS e 1 LV per ogni unità. Il numero di unità abitative è un dato che deve essere fornito in ingresso all'algoritmo. Gli orari di massima probabilità sono stati posti pari a:

- LS: ore 22;
- LV: ore 10;

Gli orari sono stati assunti in modo da accordarsi con gli orari di punta di carico risultanti dagli studi consultati (Di Andrea e Danese 2004, Iatauro e Gargano 2003, Fornari 2012) (rispettivamente Tabella 21, Tabella 22, Tabella 23). Come massimo scostamento temporale è stato considerato un tempo di 4 ore. Lo step temporale considerato è di 1 minuto nell'arco di 1 giornata, quindi i profili dei singoli dispositivi e il profilo aggregato risultante sono vettori di 1440 elementi.

Il profilo aggregato finale quindi avrà una forma simile alla sovrapposizione di due gaussiane, tanto più quanto sarà elevato il numero di unità abitative.

Tabella 21. Orari di unte di carico principali (tra parentesi eventuali punte di carico secondarie) di dispositivi residenziali (Di Andrea e Danese 2004)

Dispositivo	Orario feriale	Orario festivo	Orario (tutto l'anno)
LV	9	12	10
LS	22 (15)	15 (22)	22 (15)

Tabella 22. Orari di punte di carico principali (tra parentesi eventuali punte di carico secondarie) di dispositivi residenziali (Iatauro e Gargano 2003)

Dispositivo	Orario
LV	10
LS	22 (15)

Tabella 23. Orari di punte di carico dei dispositivi residenziali (Fornari 2012)

Dispositivo	Unità abitata da famiglia	Unità abitata da coppia
LV	11.30	20.00
LS	16.15	22.00

Sono state inoltre implementate delle caratteristiche aggiuntive, basate su metodi Montecarlo, per tener conto delle componenti aleatorie :

- Per tener conto del fatto che in un insieme di utenze non tutti i dispositivi potrebbero essere attivati o che alcuni dispositivi potrebbero essere utilizzati più volte nel corso della giornata, il numero di dispositivi di ogni tipo (LS o LV) da considerare è calcolato in base al numero di utenze impostato più o meno uno scostamento casuale del 10%, arrotondato all'unità.
- Per tener conto della possibile variazione del profilo di carico del singolo dispositivo (al variare delle condizioni ambientali, delle diverse caratteristiche tecniche del particolare esemplare di dispositivo e dell'esercizio), a ogni iterazione, il profilo del singolo dispositivo viene amplificato o deamplificato (tra il 90% e il 110% del profilo tipo ricavato precedentemente).
- Per tener conto della differenza importante tra il programma normale e il programma rapido della LS, a ogni iterazione viene eseguita una scelta casuale tra i due programmi al fine di selezionare il profilo da sovrapporre nel corso di tale iterazione. La scelta viene eseguita all'interno dell'algoritmo generando un numero casuale distribuito uniformemente tra 0 e 1, confrontandolo con una soglia di 0.5 e selezionando uno dei due profili secondo che il numero casuale sia inferiore o superiore alla soglia (ciò corrisponde a una probabilità del 50% che sia scelto un programma o l'altro). La LV non risente di questa problematica.

In Figura 25 si riporta il flowchart che illustra il principio di funzionamento dell'algoritmo sviluppato.

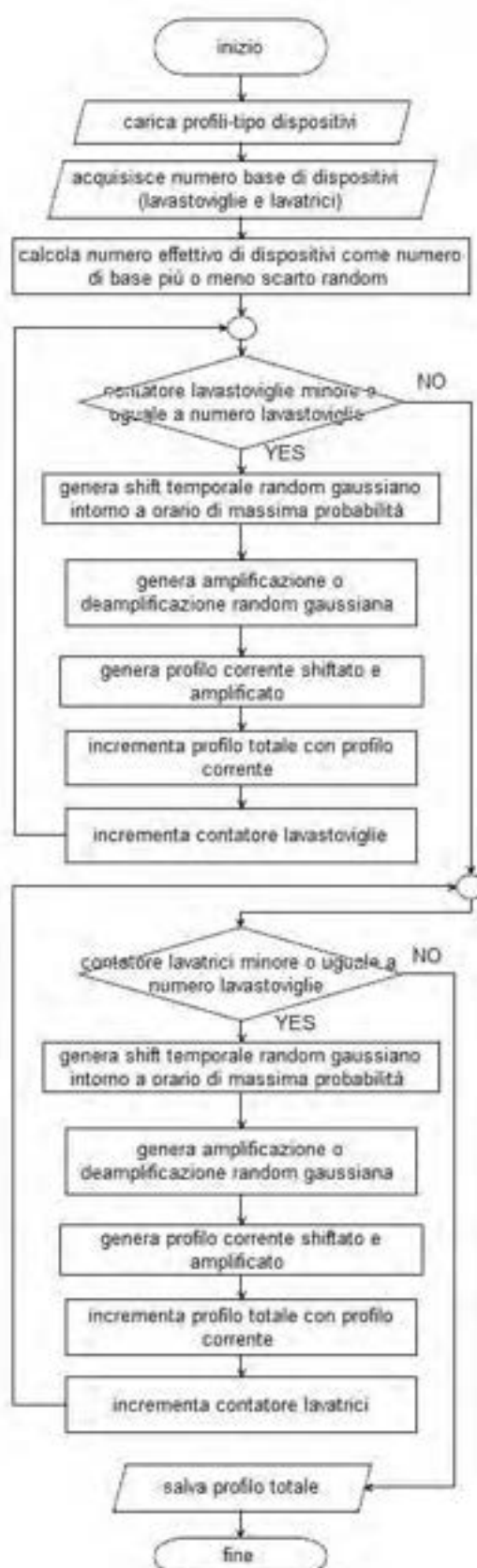


Figura 25. Flowchart dell'algoritmo di aggregazione in ambito residenziale

Si riporta di seguito un estratto del listato del codice in cui si esegue la sovrapposizione dei profili singoli (in questo caso esemplificativo per il dispositivo LS) (per il listato del codice v. appendice).

```

for i=1:n_LS;
    shiftLS=round(0+240/3.*randn(1)); %genera shift temporale random gaussiano
    amp=0.9+(1.1-0.9).*rand; %genera amplificazione random +/- 10% uniforme
    %amp=1+0.1*(1/3)*randn %genera ampicciazione random +/- 10% gaussiana
    if rand(1)>=0.5
        proftot=proftot+circshift(amp*profLSr,shiftLS); %incrementa profilo
        totale con profilo singolo corrente shiftato e amplificato gradualmente
    else
        proftot=proftot+circshift(amp*profLSn,shiftLS);
    end
end
end

```

L'algoritmo è stato applicato a una utenza residenziale di riferimento, in accordo con i risultati della caratterizzazione del parco edilizio precedentemente illustrati. L'utenza consiste in un complesso di 16 unità abitative, con superficie di 100 m² ciascuna, distribuite su 4 piani. Ogni unità abitativa è dotata di 1 LV e di 1 LS. Il profilo di carico termico dei dispositivi è stato impostato secondo i risultati della caratterizzazione, corretti tramite la validazione sperimentale, come illustrato nel capitolo precedente. Essendo il modello basato su caratteristiche aleatorie, ad ogni esecuzione del codice il profilo generato è diverso, pur presentando una forma e delle caratteristiche costanti proprie dell'utenza.

In Figura 26 si riporta il profilo aggregato ottenuto mediante l'algoritmo. Si nota che il profilo presenta un picco principale tra le ore 20 e le ore 24 e un picco secondario tra le ore 9 e le ore 12. Il picco principale è di circa 12 kWt (circa 750 Wt per unità abitativa) e il picco secondario è di circa 4 kWt (circa 250 Wt per unità abitativa).

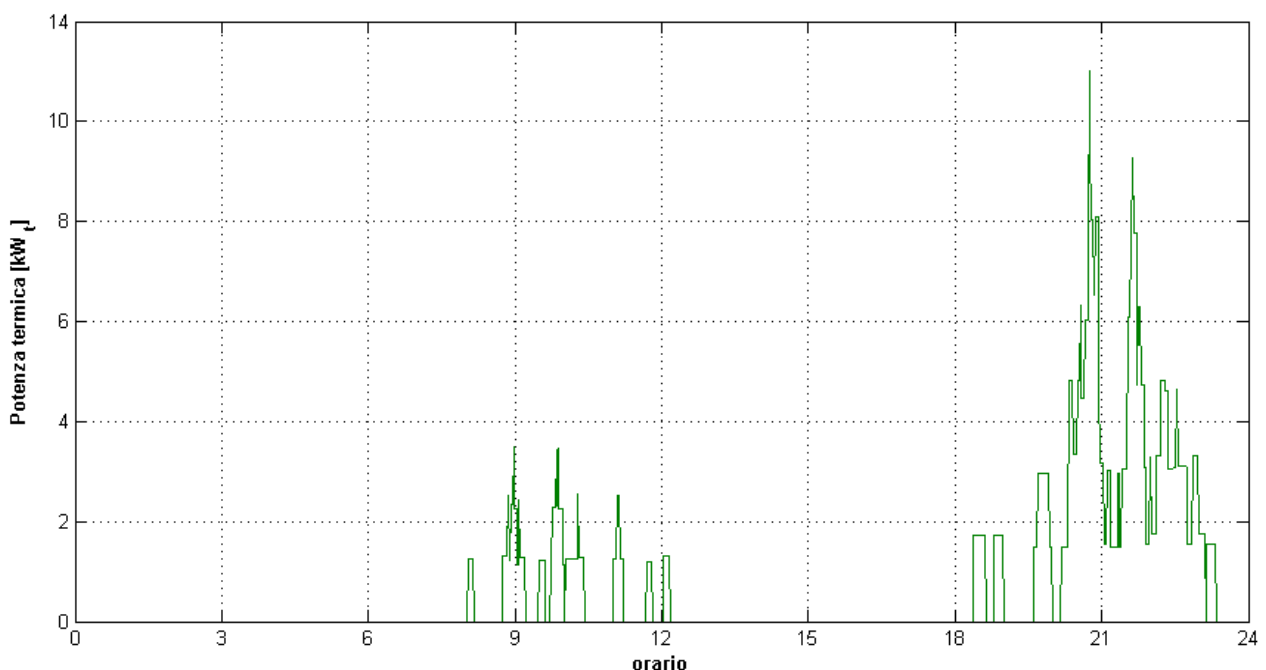


Figura 26. Profilo di carico termico giornaliero degli utilizzatori elettrotermici aggregato per una utenza esemplificativa (edificio residenziale da 16 unità abitative dotate di LV e LS)

Si nota inoltre che il profilo aggregato, così come risultante, presenta delle criticità legate alla contemporaneità con il profilo di carico termico per riscaldamento, in quanto ha il picco principale nelle ore serali in cui è per l'appunto contemporaneamente presente il carico termico per riscaldamento. Inoltre il

profilo degli utilizzatori elettrotermici non si integra in modo ottimale con la produzione di calore da fonti rinnovabili (i.e. campo solare termico), in quanto questa è massima nelle ore centrali della giornata mentre è naturalmente nulla nelle ore serali. In assenza di opportuni provvedimenti, l'implementazione tal quale dei servizi ancillari comporterebbe un aggravio dei costi, dovuto alla necessità di aumentare il volume del sistema di accumulo termico per far fronte alla richiesta di calore ingente nelle ore serali e scarsa nelle ore di maggior produzione. Emerge quindi la necessità di studiare provvedimenti di ottimizzazione del profilo di carico degli utilizzatori elettrotermici.

4.2 *Algoritmo di aggregazione in ambito ristorativo commerciale*

L'algoritmo di aggregazione in ambito ristorativo commerciale è stato sviluppato in modo da simulare la dinamica di esercizio reale dell'utenza, caratterizzata da una richiesta di lavaggi più aleatoria e distribuita uniformemente all'interno dell'orario lavorativo – a differenza del caso residenziale in cui erano disponibili degli orari di massima probabilità –.

A ogni passo temporale di simulazione, se l'orario è compreso all'interno gli orari di esercizio dell'utenza, l'algoritmo genera un numero casuale, distribuito uniformemente tra 0 e 1, e lo confronta con una soglia per generare o meno una richiesta di lavaggio. La soglia rappresenta la probabilità di richiesta e al limite coincide con la frequenza di lavaggi. (E.g. una soglia pari a 0.2 rappresenta 1 richiesta di lavaggio ogni 5 minuti). A questo punto l'algoritmo verifica la disponibilità dei dispositivi: se il primo dispositivo è libero, esso viene impostato come occupato per un tempo pari alla durata del programma, e il profilo di carico complessivo viene incrementato del profilo di carico del singolo dispositivo, per un tempo pari alla durata del programma; in caso contrario si ripete la verifica per il successivo dispositivo. Se nessun dispositivo è libero la richiesta non viene evasa.

Come step temporale è stato considerato 1 minuto nell'arco di 1 giornata, quindi il profilo risultante è un vettore di 1440 elementi.

Come ulteriore perfezionamento del modello si può tenere in considerazione anche un modello di accumulo di carichi che non vengono evasi istantaneamente. Tuttavia per il momento questa caratteristica è stata trascurata in quanto, alla luce dell'indagine svolta presso l'utenza sulla dinamica di esercizio, la frequenza delle richieste di lavaggio è risultata sufficientemente bassa da non ingenerare fenomeni di accumulo di carichi (i.e. era sempre disponibile almeno un dispositivo).

Da interviste con il personale esperto, si è valutato un valore medio che ben caratterizza la frequenza di lavaggi per ogni dispositivo pari a 1 cestello ogni 5 minuti (corrispondente a una frequenza di 0.2 richieste al minuto), cui corrisponde quindi una soglia pari a 0.2 (probabilità del 20% di una richiesta all'interno del minuto).

In Figura 27 si riporta il flowchart che illustra il principio di funzionamento dell'algoritmo sviluppato.

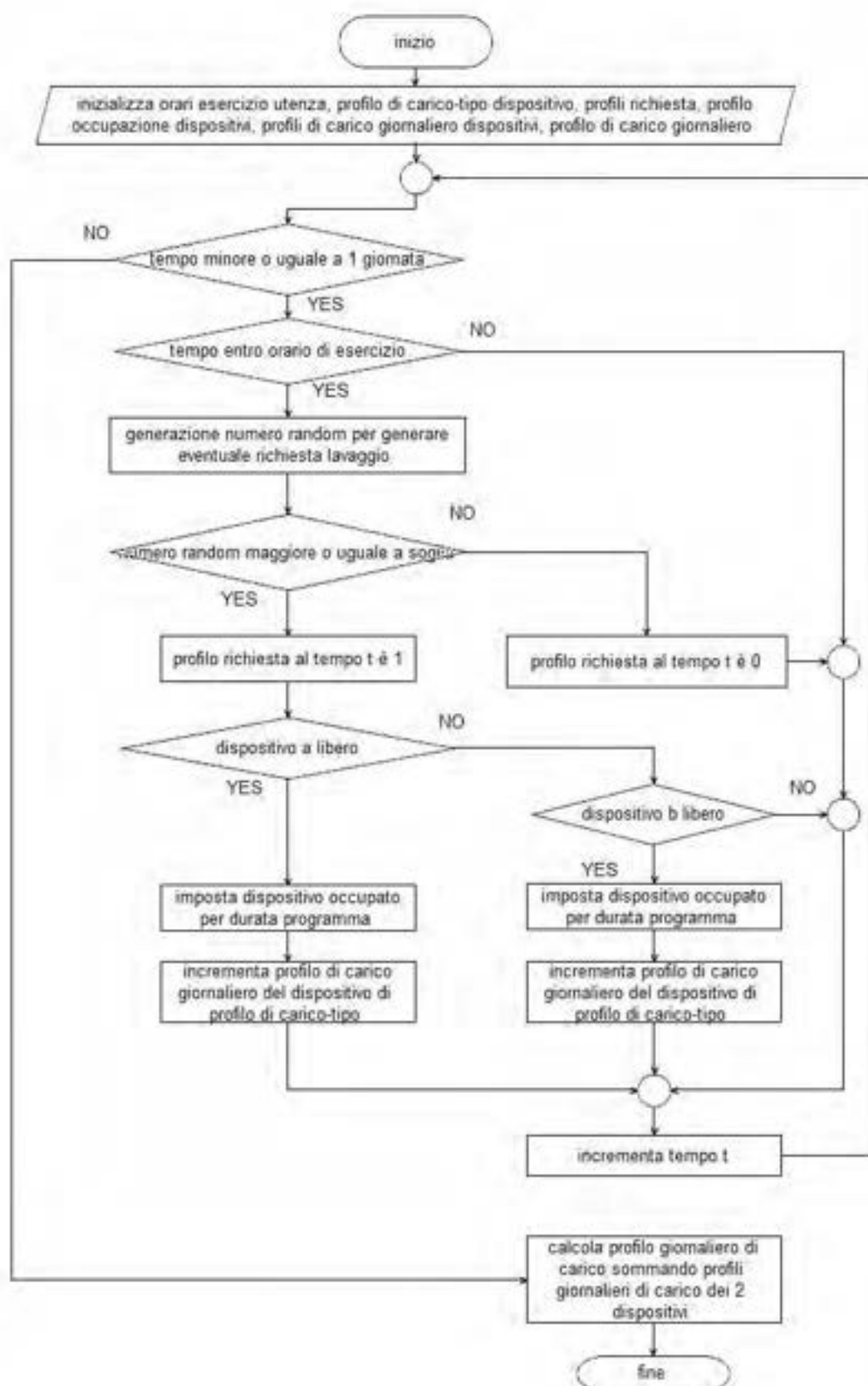


Figura 27. Flowchart dell'algoritmo di aggregazione in ambito ristorativo commerciale

Si riporta di seguito un estratto del listato del codice in cui viene eseguita una verifica per il primo dispositivo a , essendo libero viene impostato come occupato per la durata del programma e il profilo di carico dell'utenza è incrementato del carico del dispositivo (per il listato del codice v. appendice).

```

if busy_a(t)==0
    for a=t:t+3
        busy_a(a)=1; %impegna per 4 min
        prof_a(a)=profLP(1+a-t); %accendi a carico per 4 min
    end

```

L'algoritmo è stato applicato a un esercizio ristorativo commerciale di riferimento. L'esercizio corrisponde a un locale di 200 m², in accordo con le tipologie di locali riscontrate nell'indagine. L'esercizio è dotato di 2 LS secondo la dotazione degli esercizi rilevata tramite indagine.

In Figura 28 si riporta il profilo aggregato ottenuto mediante l'algoritmo. Si nota che il profilo presenta tre stati (zero, 1 dispositivo attivo, 2 dispositivi attivi) distribuiti in modo aleatorio all'interno dell'orario lavorativo.

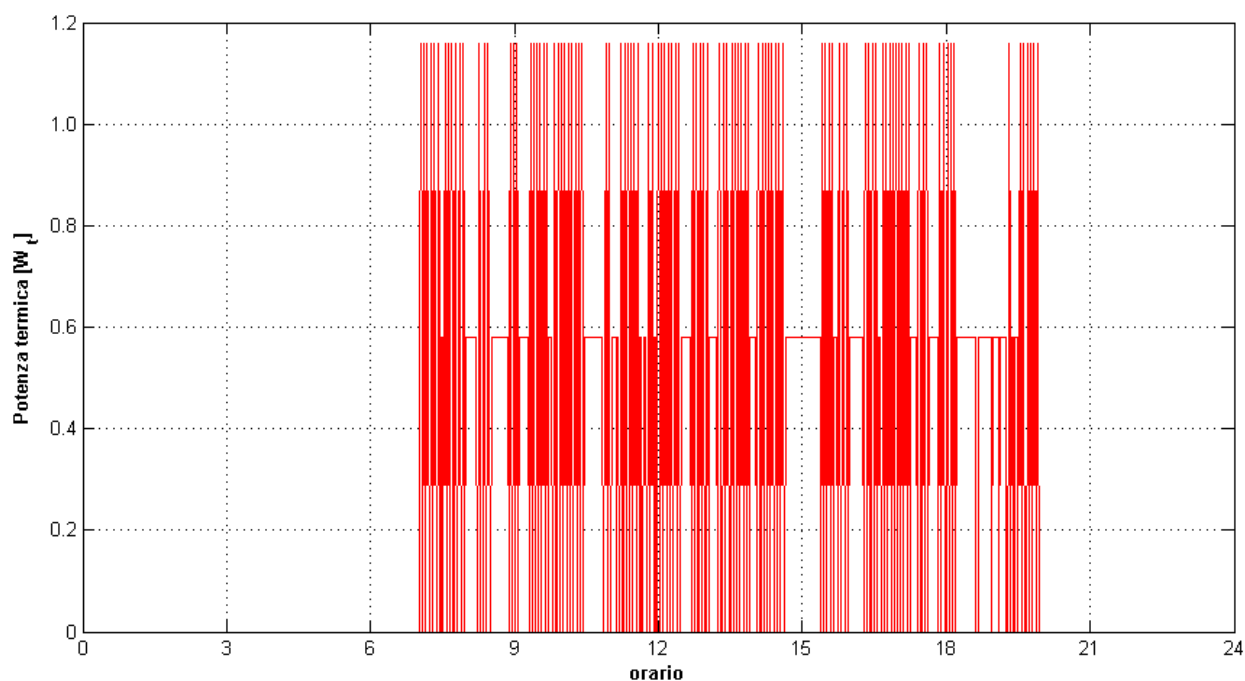


Figura 28. Profilo di carico termico giornaliero degli utilizzatori elettrotermici aggregato per una utenza esemplificativa (esercizio ristorativo commerciale da 200 m²)

In Figura 29 si riporta un estratto del profilo aggregato ottenuto mediante l'algoritmo.

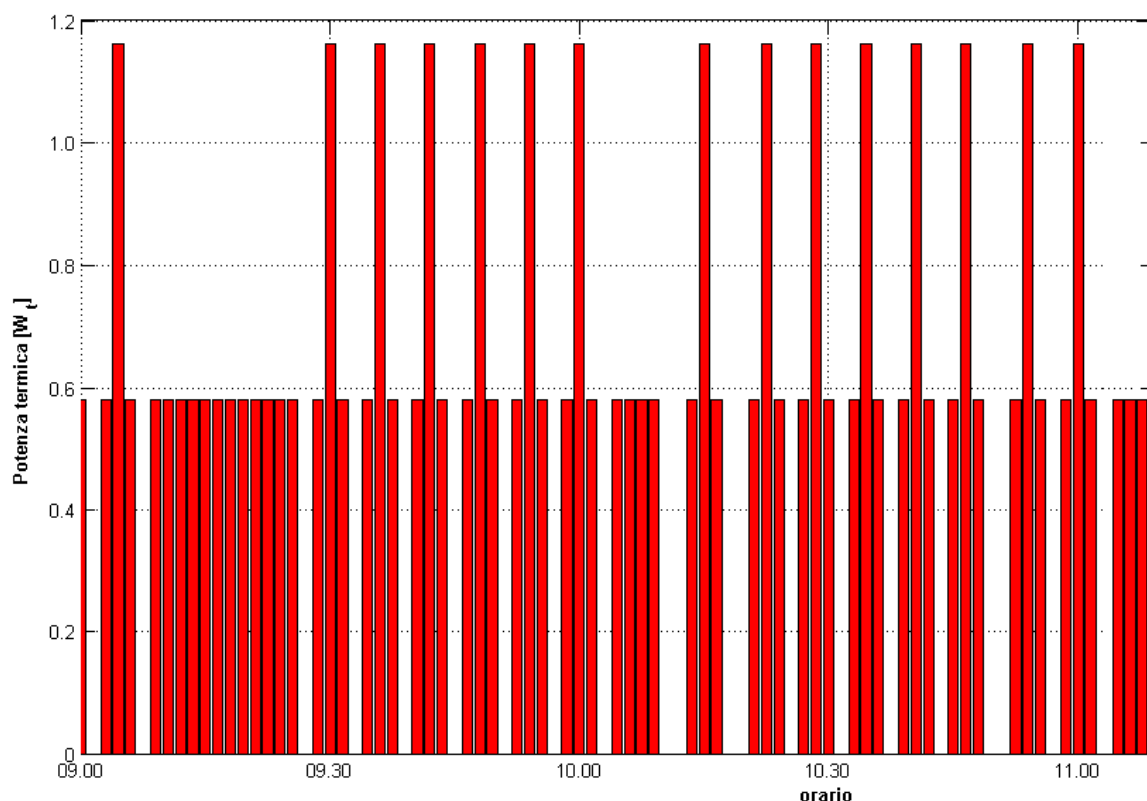


Figura 29. Estratto del profilo di carico termico giornaliero degli utilizzatori elettrotermici aggregato per una utenza esemplificativa (esercizio ristorativo commerciale da 200 m²)

4.3 Algoritmo di aggregazione in ambito alberghiero

Da interviste in collaborazione con il personale esperto sono stati rilevati i seguenti dati:

- Orari di apertura e chiusura del servizio lavanderia
- Caratteristica di utilizzo dei dispositivi (i.e. i dispositivi sono usati ininterrottamente durante l'orario di servizio secondo la loro disponibilità)
- Numero medio di utilizzazioni al giorno di un singolo dispositivo
- Principali programmi di lavaggio utilizzati e indicazione della frequenza di utilizzo
- Livello di carico occorrente più frequentemente (e.g. basso, medio o alto)

Dall'esame della documentazione tecnica dei dispositivi, da interviste al personale e da rilevazione in tempo reale mediante display sono stati rilevati i seguenti dati sulla composizione in fasi del programma

- Fasi componenti il programma (denominazione e tipologia, e.g. lavaggio, risciacquo, centrifuga)
- Durata impostata ogni fase
- Temperatura di lavaggio impostata per ogni fase

Alla luce di tali dati è emerso quanto segue:

- I programmi possono essere raggruppati in due categorie, programmi ad alta temperatura (AT) e programmi a bassa temperatura (BT). All'interno di ciascuna delle due categorie, i programmi presentano il medesimo consumo di energia e di acqua. È quindi lecito assumere queste due categorie come programmi tipo.
- Di solito si alternano programmi AT e programmi BT.

- In testa e in coda a ogni lavaggio è presente un intervallo di tempo necessario allo scaricamento del dispositivo e al nuovo caricamento. È stato quantificato un tempo medio di durata di tale operazione.

Quindi è stato possibile ipotizzare un macro-programma di utilizzo di ogni dispositivo:

1. Caricamento (femo dispositivo)
2. Programma AT
3. Scaricamento (fermo)
4. Caricamento (fermo)
5. Programma BT
6. Scaricamento (fermo)

Il profilo giornaliero del dispositivo è stato quindi ricavato dall'iterazione del macro-ciclo nell'arco dell'orario di servizio. È stato quindi costruito un profilo individuale di un dispositivo di grande taglia costruendo un vettore di elementi pari a zero nei momenti di fermo del dispositivo e pari alla potenza termica richiesta nei momenti di funzionamento, secondo il profilo di potenza termica calcolato precedentemente per ogni fase di programma, concatenando le fasi come elecano poc'anzi. Si riporta in Figura 30 il profilo di carico termico giornaliero del singolo dispositivo così costruito. Nel seguito nell'algoritmo di aggregazione si farà riferimento a tale profilo giornaliero per la generazione del profilo di carico termico totale dell'utenza.

Il carico termico calcolato per un dispositivo di grande taglia può essere esteso a un dispositivo di taglia media o piccola scalando il carico secondo la taglia cioè la massa di bucato trattata. Questa è come detto il parametro di taglia del dispositivo e ad essa è proporzionale la massa d'acqua caricata. A parità di temperature estreme, come risulta dall'analisi delle fasi dei programmi, risulta proporzionale anche la quantità di calore e infine anche il carico termico. Fatto 100% il carico termico di un dispositivo da 55 kg di bucato:

- Per i dispositivi da 22 kg il carico deve essere scalato al 40%
- Per i dispositivi da 6.5 kg il carico deve essere scalato al 12%

Il profilo individuale per dispositivi di taglia media e piccola viene quindi calcolato scalando il profilo costruito per dispositivi di grande taglia.

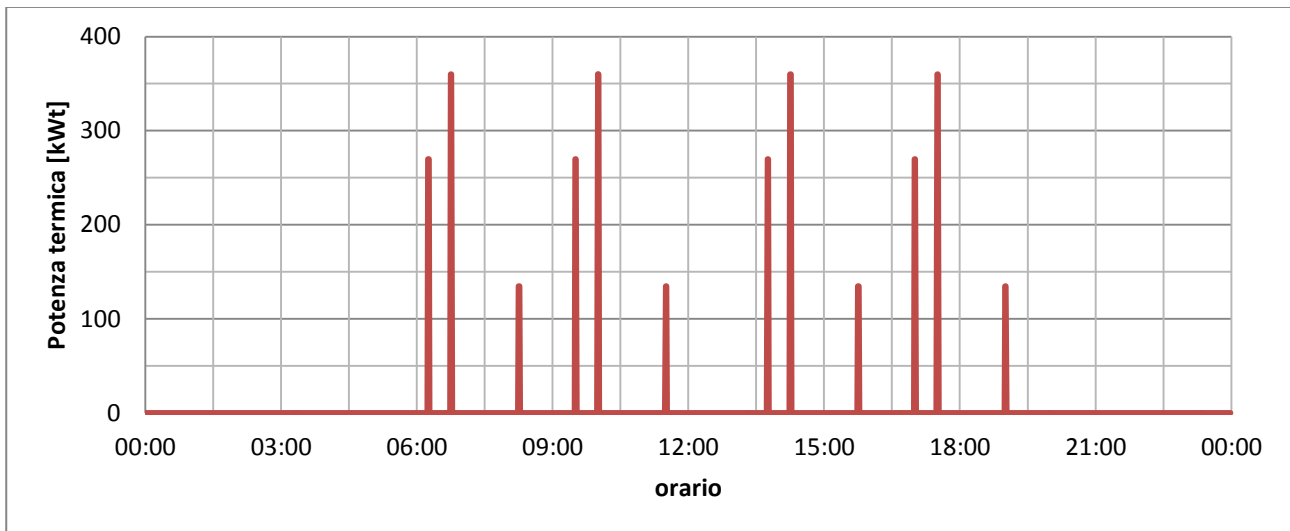


Figura 30. Profilo di carico termico giornaliero di una singola LV di grande taglia (55 kg)

Il profilo aggregato del complesso di dispositivi può essere ricavato tramite la sovrapposizione dei profili dei singoli dispositivi, sfasati temporalmente di uno intervallo temporale casuale, che tiene conto della dinamica dell'utilizzazione, la quale risente della naturale indipendenza tra i vari dispositivi. Il profilo aggregato viene quindi costruito dall'algoritmo in tre fasi, per ogni taglia di dispositivi. In ogni fase viene fatto un numero di iterazioni pari al numero di dispositivi di quella taglia. In ogni iterazione il profilo aggregato viene incrementato del profilo del singolo dispositivo, come detto sfasato temporalmente. Lo sfasamento temporale è calcolato in modo casuale secondo una distribuzione normale con media nulla e deviazione standard di 15 minuti. Si riporta in Figura 31 il flowchart che illustra l'algoritmo.

Si riporta un estratto del listato del codice in cui il profilo di carico dell'utenza è incrementato del profilo di carico dovuto a un set di LV di grande taglia (55 kg) (per il listato del codice v. appendice).

```
%55 kg
for i=1:n_LV55
    shiftLV=round(0+15.*randn(1));
    proftotAlberghiero=proftotAlberghiero+circshift(profLV, shiftLV);
end
```

Come esempio è stato generato il profilo di carico termico giornaliero del servizio lavanderia di una struttura alberghiera di riferimento. La struttura corrisponde a un albergo di alta categoria dotato di 370 stanze, con servizio lavanderia dotato di 5 LV comprendenti dispositivi di taglia piccola, media e grande.

In Figura 32 si riporta il profilo ottenuto. Si nota che il profilo presenta una serie di picchi distribuiti equamente entro l'orario di servizio.

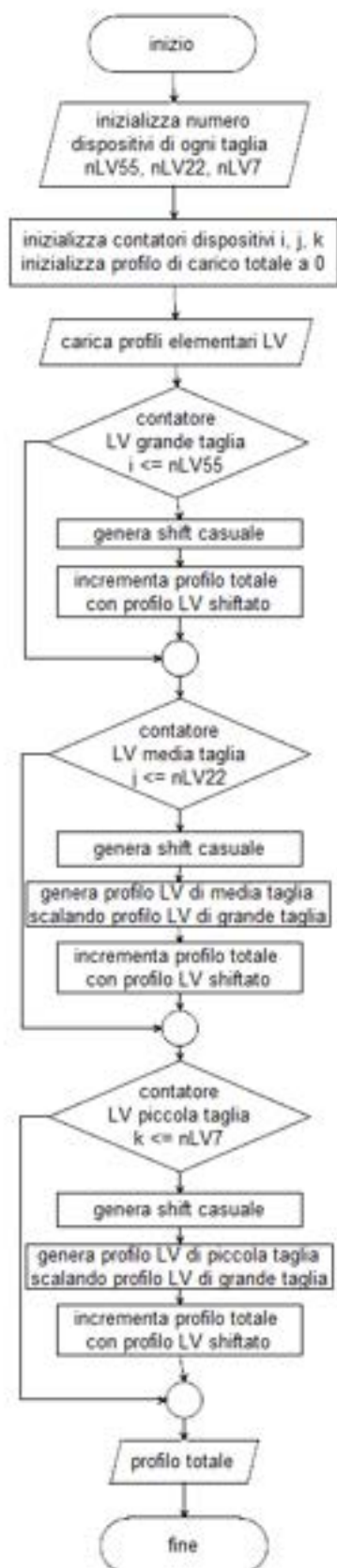


Figura 31. Flowchart dell'algoritmo di aggregazione in ambito alberghiero

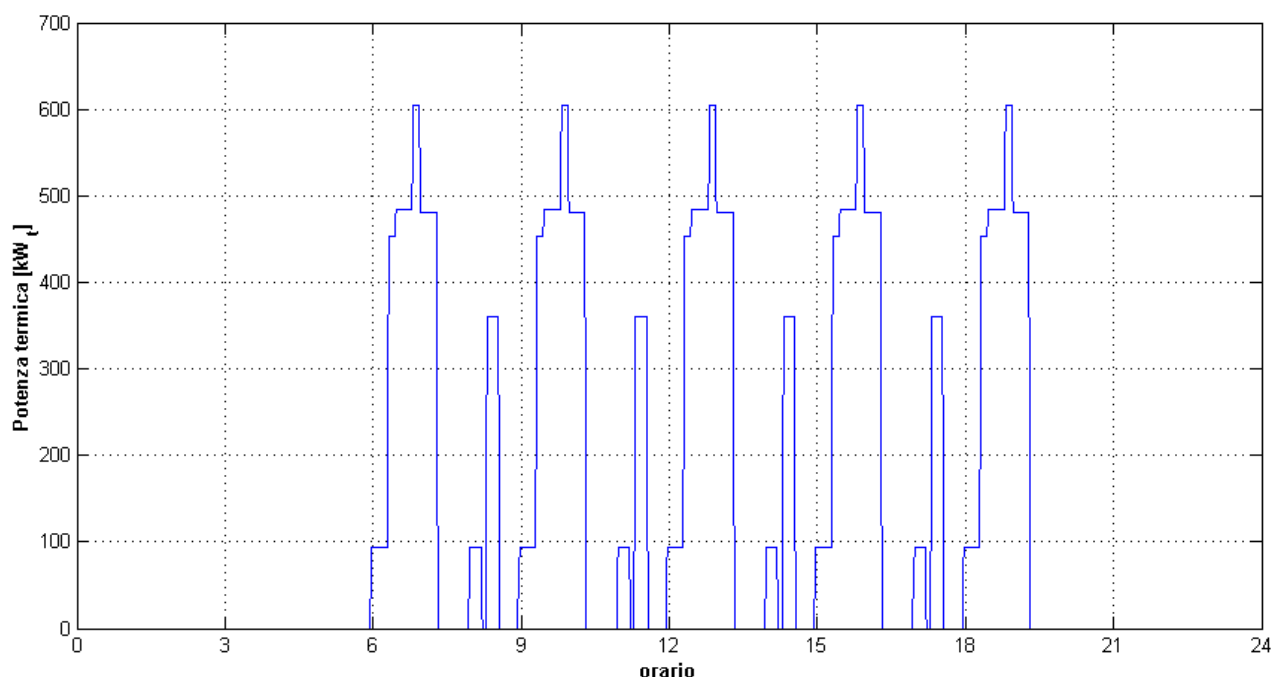


Figura 32. Profilo di carico termico giornaliero degli utilizzatori elettrotermici aggregato per una utenza esemplificativa (servizio lavanderia di struttura alberghiera di lusso da 370 stanze)

4.4 Impatto dei servizi ancillari

Come detto, i dispositivi elettrotermici che ammettono l'alimentazione con acqua calda sono una soluzione standard per dispositivi di tipo industriale e si stanno diffondendo anche tra i dispositivi di tipo domestico. Tale tecnologia consentirebbe l'alimentazione dei dispositivi direttamente da rete TLR.

L'integrazione del pacchetto simulazione servizi ancillari all'interno della piattaforma software di simulazione delle reti TLR ha permesso di confrontare il profilo di carico termico dei servizi ancillari con il profilo di carico termico del servizio principale di riscaldamento, al fine di integrare il presente lavoro all'interno delle attività ENEA per lo sviluppo di reti TLR ad alta efficienza (come descritto nei report RdS/2013/052 e RdS/2013/055).

Ai fini della simulazione dei servizi ancillari si è posto, come detto, che i carichi termici dei dispositivi siano corrispondenti a quelli ottenuti nel corso della caratterizzazione e della validazione sperimentale. In Figura 33 si riportano come esempio i profili giornalieri per una giornata invernale (1 gennaio) per una utenza residenziale di 16 unità abitative situata nell'area della città di Roma. Si nota che il picco secondario (intorno alle ore 10) si posiziona in un orario in cui il carico per riscaldamento non è massimo ed è in diminuzione, mentre il picco principale (intorno alle ore 20) si posiziona in un orario in cui il carico per riscaldamento è alto e in aumento. Si può ipotizzare quindi una strategia di ottimizzazione volta a rimodulare il profilo di carico per riempire gli orari di basso carico riscaldamento (*valley filling*) anche nell'ottica di incentivare lo sfruttamento di fonti rinnovabili termiche (e.g. solare termico a bassa temperatura) la cui produzione, come noto, è maggiore nelle ore centrali della giornata.

Quantitativamente, nelle giornate invernali che risultano più gravose (ossia nei primi giorni di gennaio) il profilo di carico servizi ancillari presenta un valore di picco che è circa il 10% – 15% rispetto al picco di carico del riscaldamento (considerando un carico servizi ancillari mediato nell'arco di un'ora⁸). Dal punto di

⁸ il valore può arrivare al 40% circa se si considera il massimo istantaneo che però può permanere solo per pochi minuti

vista energetico, il riscaldamento comporta una richiesta di calore giornaliera pari a circa 70 MWh/d. Gli utilizzatori elettrotermici comportano una richiesta di calore giornaliera di circa 6 MWh/d costante nell'arco dell'anno. In proporzione, l'incidenza è circa 8% (8.4% rispetto al riscaldamento ossia 7.8% rispetto al totale).

Per valutare l'impatto dei servizi ancillari sulla rete TLR è necessario tener conto del fatto che le sottocentrali TLR sono spesso tarate su una potenza contrattuale pari alla potenza nominale per riscaldamento; in tal caso una richiesta di potenza superiore al valore nominale potrebbe portare la sottocentrale a operare sulla valvola limitatrice per contenere la potenza erogata entro il valore nominale, riducendo la potenza erogata per il servizio di riscaldamento. Per evitare il superamento della potenza contrattuale emerge la necessità di adottare provvedimenti di ottimizzazione, come accennato poc'anzi, come sarà illustrato nel capitolo successivo.

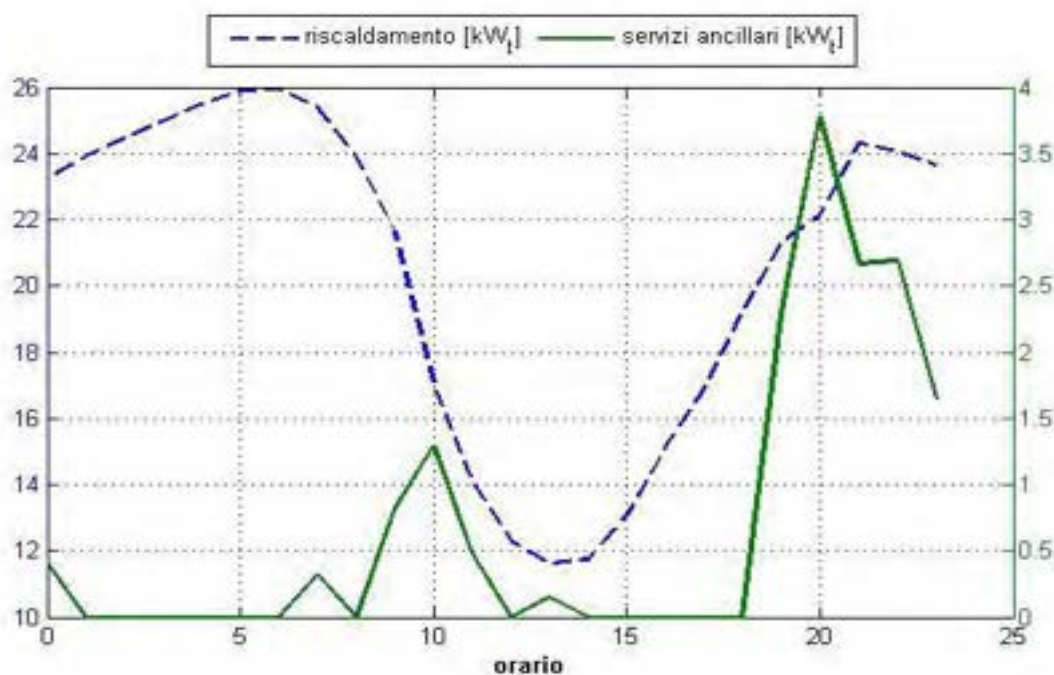


Figura 33. Confronto tra profilo di carico termico riscaldamento e servizi ancillari (edificio residenziale 16 unità abitative, giornata invernale)

4.5 Modelli MATLAB-Simulink

Gli algoritmi sviluppati nel presente lavoro sono stati implementati in modelli di simulazione programmati in ambiente MATLAB-Simulink ed è stato prodotto un pacchetto che simula i servizi ancillari nell'arco dell'anno (Figura 34). Il pacchetto è stato implementato all'interno della piattaforma software ENEA di simulazione delle reti TLR (Figura 35 e Figura 36), sviluppata nell'ambito dell'attività descritta nel report RdS/PAR2013/054.

Gli algoritmi di aggregazione sono stati implementati in dei blocchi *enabled subsystems* all'interno del pacchetto Simulink, ciascun blocco corrispondente a una tipologia di utenza. In questo modo è possibile simulare i servizi ancillari di un edificio che comprende diversi tipi di utenza (residenziale o non residenziale) abilitando in una simulazione i relativi *subsystems*. Il pacchetto genera quindi, all'interno della simulazione, un profilo di carico termico aggregato per l'intero edificio.

Lo sviluppo degli algoritmi di aggregazione e l'implementazione dei modelli nel pacchetto di simulazione MATLAB-Simulink ha permesso la generazione di profili di carico termico aggregati per le tipologie di utenze considerate nel lavoro.

Il carico termico generato è implementato nella piattaforma Simulink esistente, per la simulazione della rete TLR, come un prelievo di potenza termica dal sistema di accumulo termico ACS dell'edificio, sistema di accumulo che è alimentato da rete TLR.

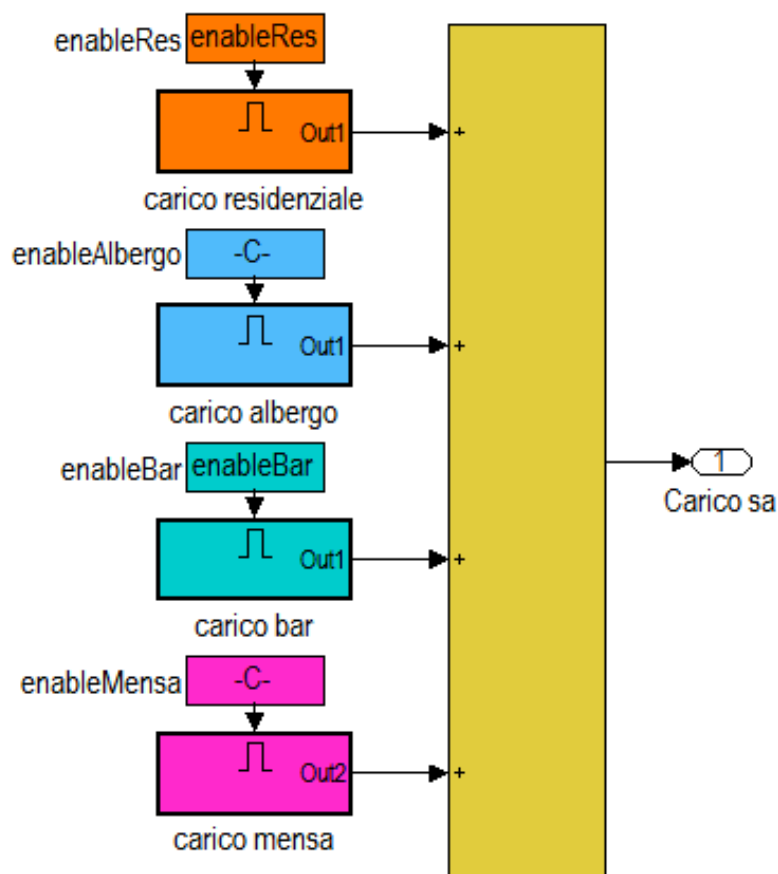


Figura 34. Pacchetto in ambiente Simulink di simulazione del profilo di carico aggregato dei servizi ancillari a livello di edificio

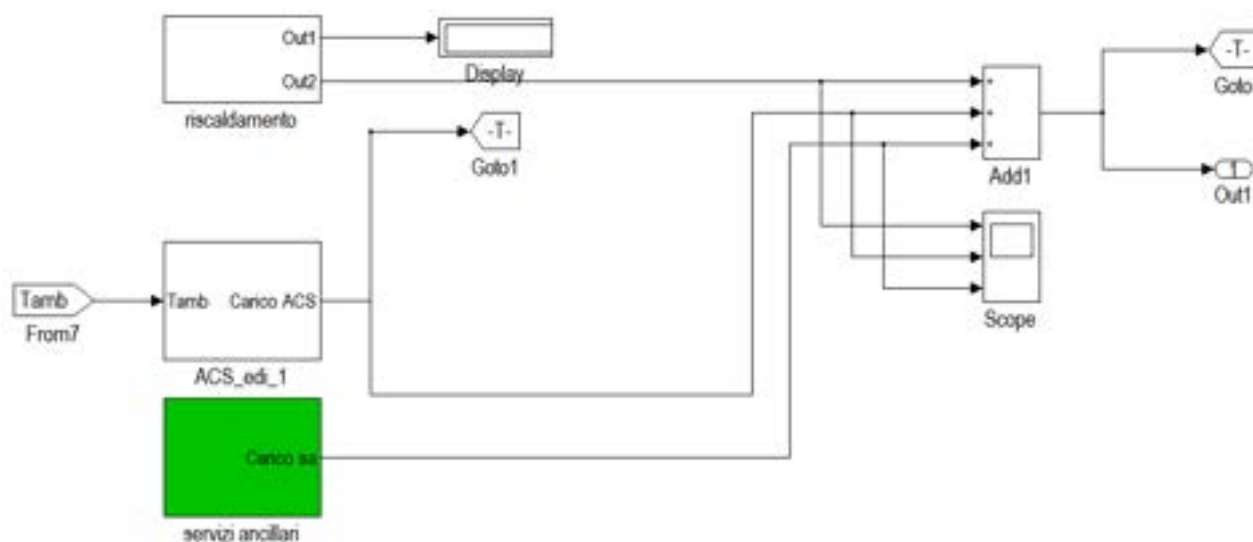


Figura 35. Modello Simulink di simulazione dei carichi termici dell'edificio (comprendente il subsystem di generazione del carico servizi ancillari, evidenziato)

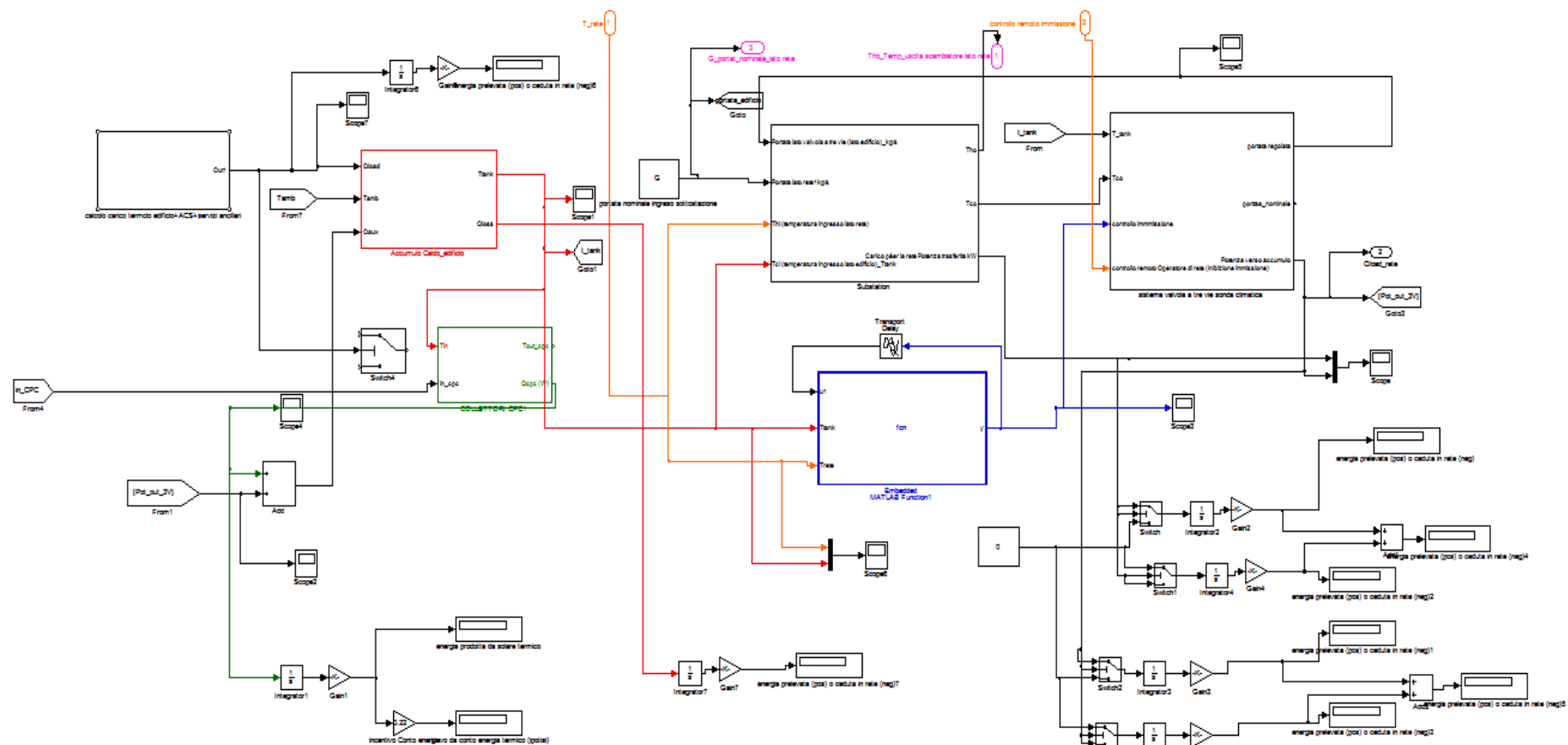


Figura 36. Modello Simulink di simulazione del comportamento termico dell'edificio allacciato alla rete TLR (riferimento alla piattaforma software ENEA descritta nel report RdS/PA2013/054)

Si illustra il funzionamento del modello di generazione del carico termico dei servizi ancillari in per utenze di tipo residenziale, alberghiero e ristorativo commerciale. Prima del lancio della simulazione in ambiente Simulink, viene generato un profilo aggregato per ogni tipo di utenza, lanciando il codice MATLAB che implementa gli algoritmi precedentemente illustrati. Il profilo risultante per ogni utenza viene quindi caricato nel pacchetto Simulink nel relativo *enabled subsystem* entro un blocco *lookup table dynamic*. Quindi il modello Simulink, una volta lanciato, entrando nel blocco con l'istante di simulazione, calcola il valore del carico per ogni utenza istante per istante. L'implementazione del subsystem relativo all'esercizio ristorativo aziendale sarà illustrato più avanti.

Si riportano i modelli dei *subsystem* relativi alle utenze residenziale, alberghiera e ristorativa commerciale, rispettivamente in Figura 37, Figura 39 e Figura 41. Si riportano i profili di carico generati dai subsystem, per casi esemplificativi di edificio residenziale, struttura alberghiera ed esercizio ristorativo commerciale, generati da un lancio della simulazione per 1 giornata con passo di simulazione di 1 secondo, rispettivamente in Figura 38, Figura 40 e Figura 42. I profili dei vari tipi di utenza risultati dai subsystem, pur conservando la forma, sono diversi ad ogni lancio della simulazione in quanto come detto generati casualmente.

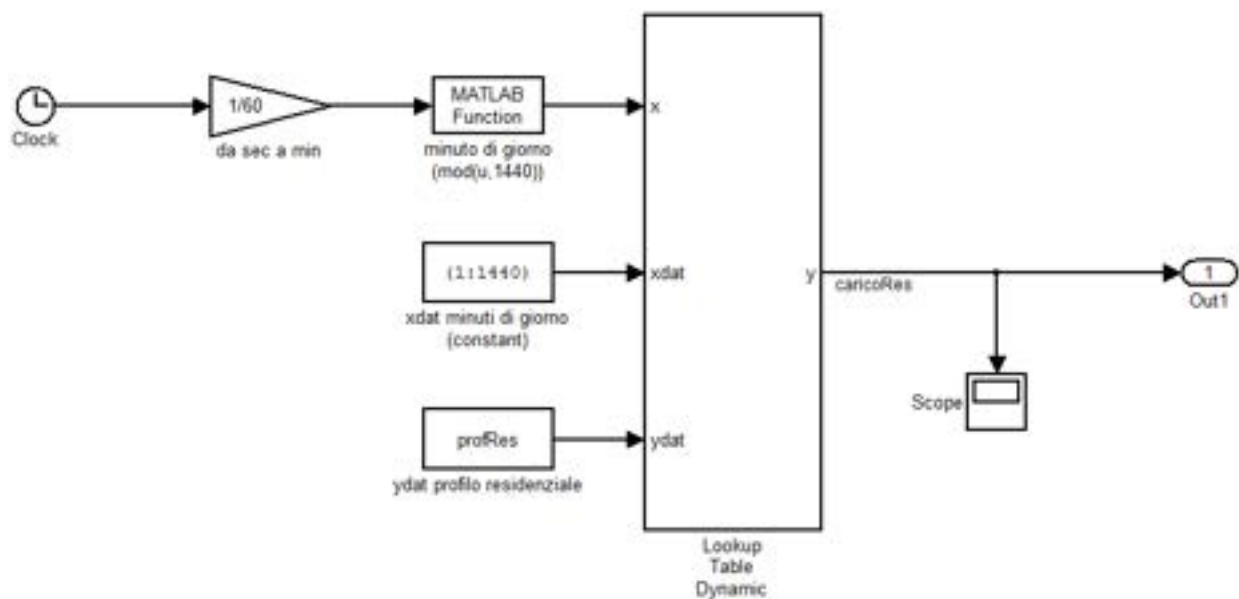


Figura 37. Modello del subsystem di simulazione del carico termico dei servizi ancillari in ambito residenziale

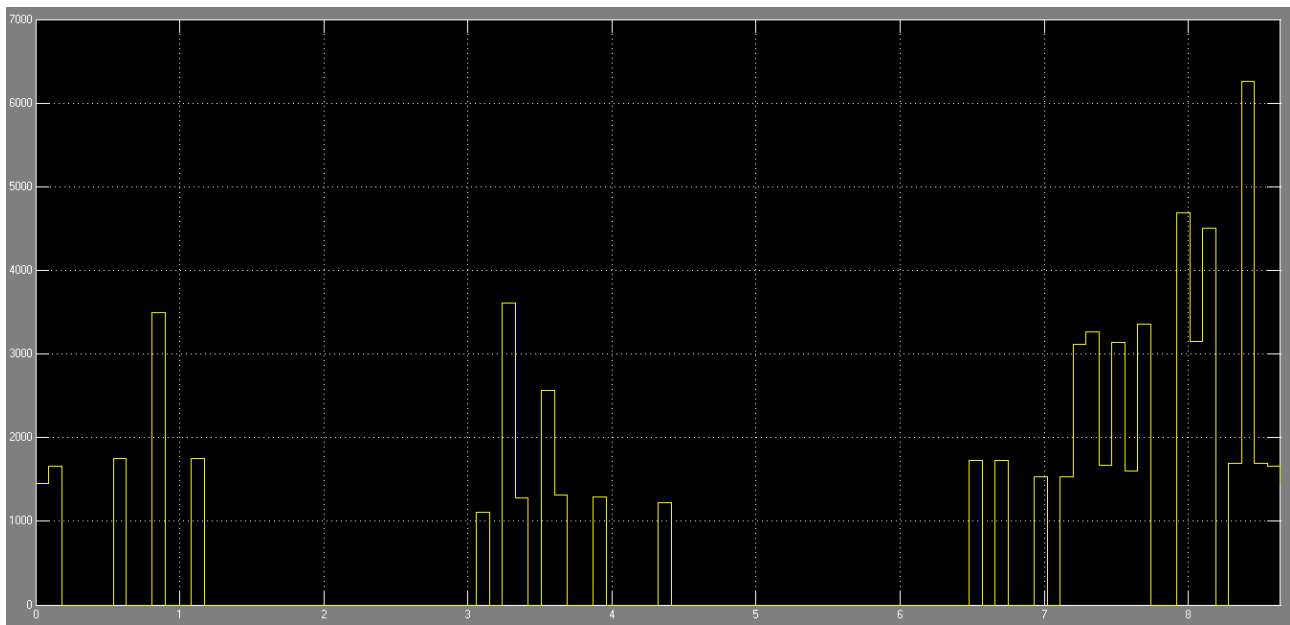


Figura 38. Visualizzazione del profilo di carico dei servizi ancillari [watt] in edificio residenziale generato nel subsystem (caso: edificio residenziale da 16 unità abitative, simulazione di 1 giorno pari a 86400 s)

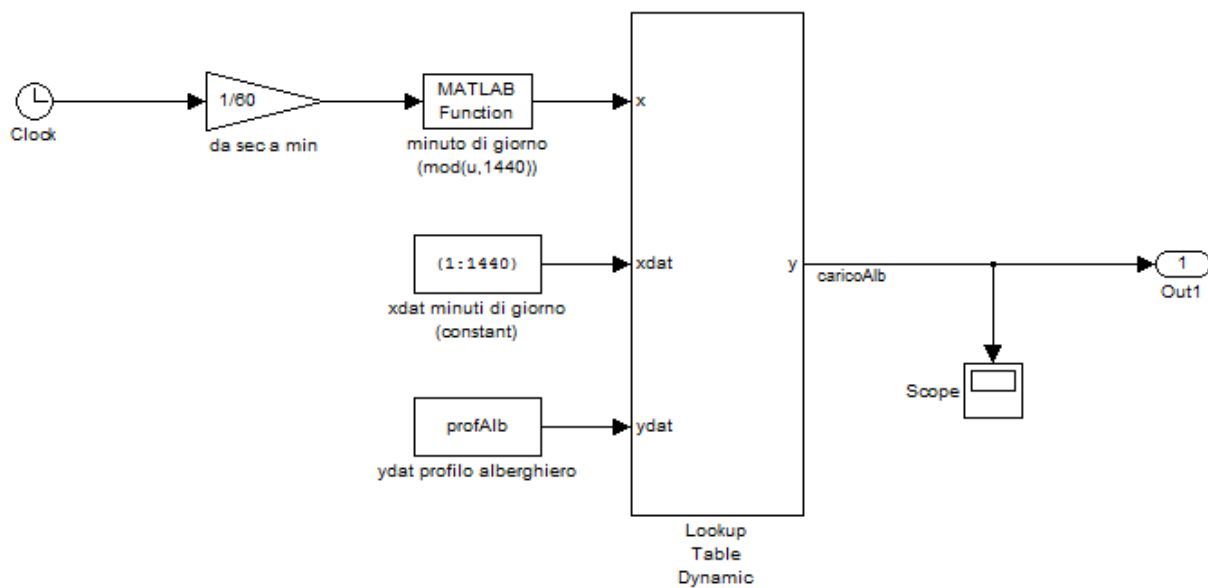


Figura 39. Modello del subsystem di simulazione del carico termico dei servizi ancillari in ambito alberghiero

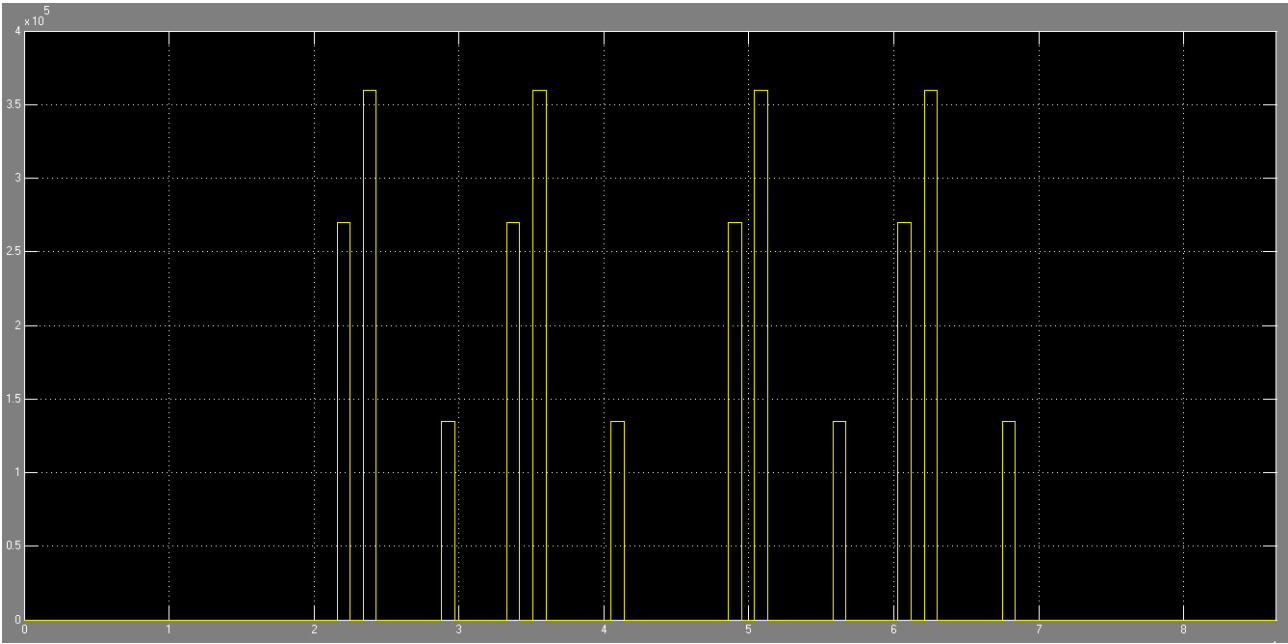


Figura 40. Visualizzazione del profilo di carico termico di servizi ancillari [watt] in edificio alberghiero generato nel subsystem (caso: albergo da 370 stanze, simulazione di 1 giorno pari a 86400 s)

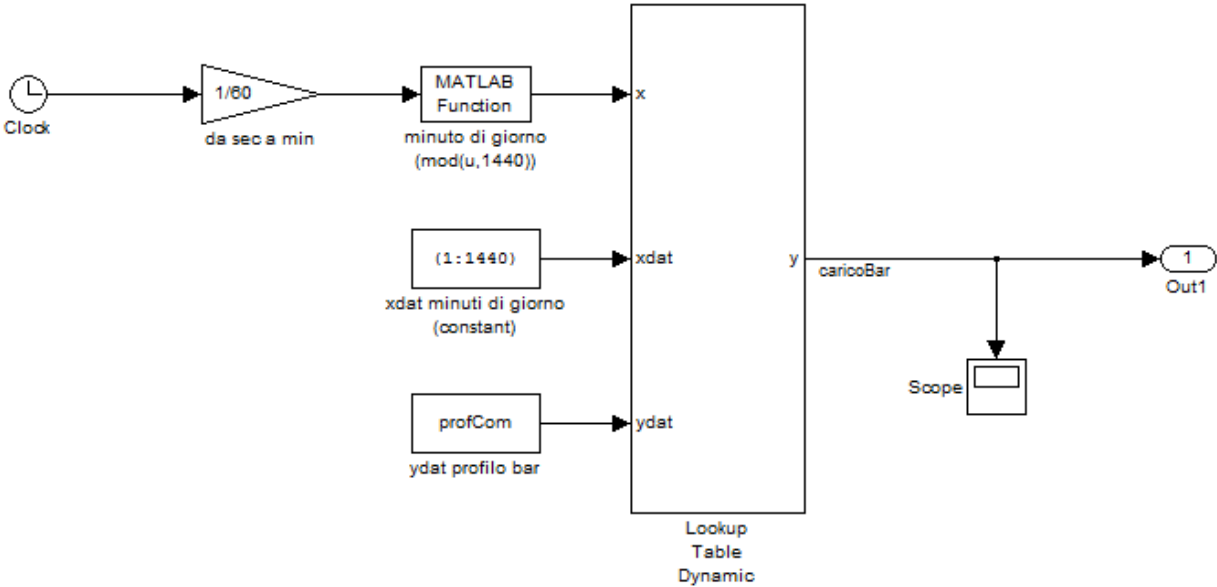


Figura 41. Modello del subsystem di simulazione del carico termico dei servizi ancillari in ambito ristorativo commerciale

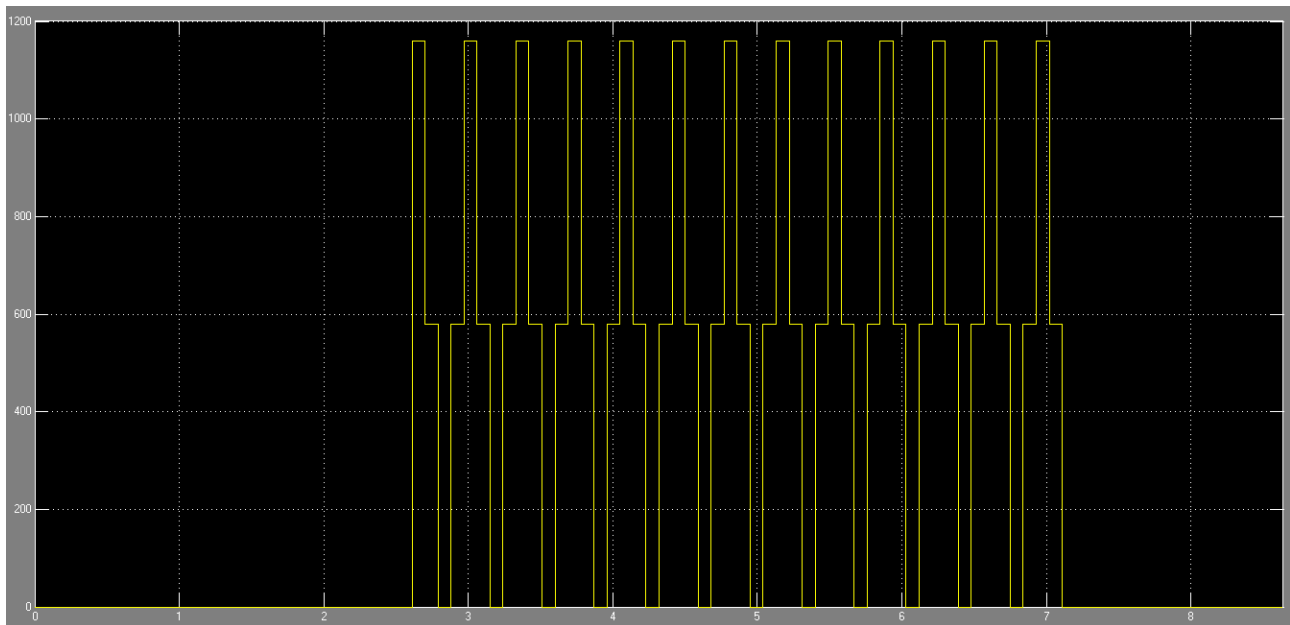


Figura 42. Visualizzazione del profilo di carico dei servizi ancillari [watt] di esercizio ristorativo commerciale generato nel subsystem (caso: esercizio di 200 m², simulazione di 1 giorno pari a 86400 s)

In ambito ristorativo aziendale, essendo stato ottenuto un profilo aggregato tramite rilievi sperimentali, tale profilo è stato scalato con il numero di pasti serviti, per avere un profilo normalizzato di riferimento, e implementato in un blocco lookup table. Entrando con il tempo di simulazione viene calcolato l'orario della giornata e il tipo di giorno (feriale o festivo). Entrando nel blocco lookup table con l'orario della giornata viene calcolato il carico in ogni istante. Un blocco switch seleziona il carico calcolato o un valore nullo se il giorno è rispettivamente feriale o festivo.

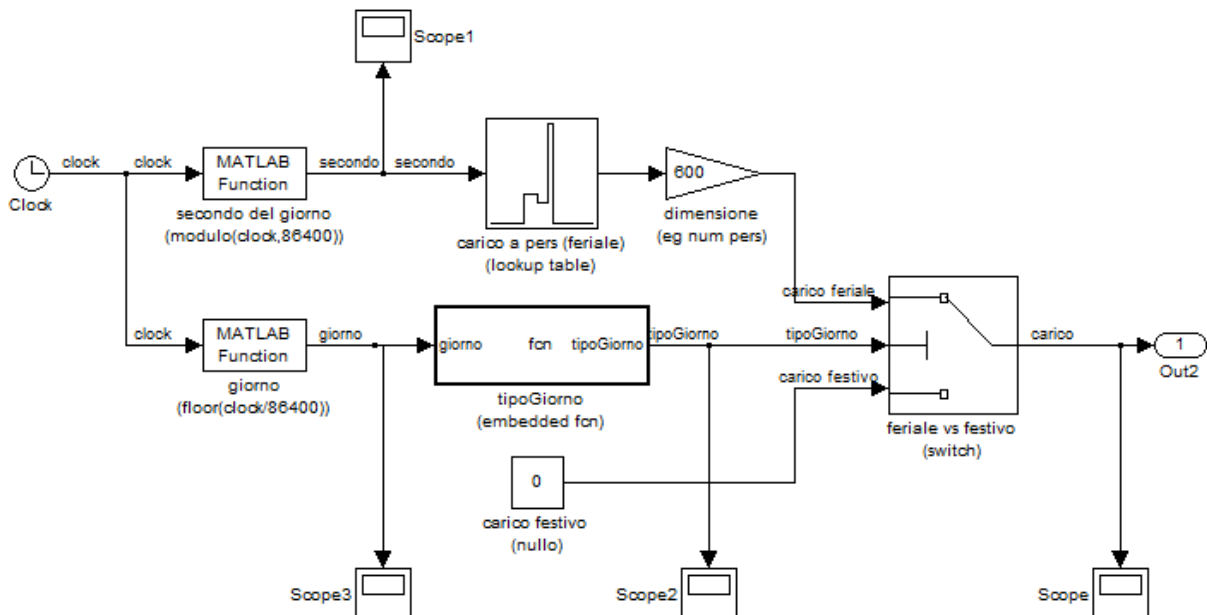


Figura 43. Modello del subsystem di simulazione del carico termico dei servizi ancillari in ambito ristorativo aziendale

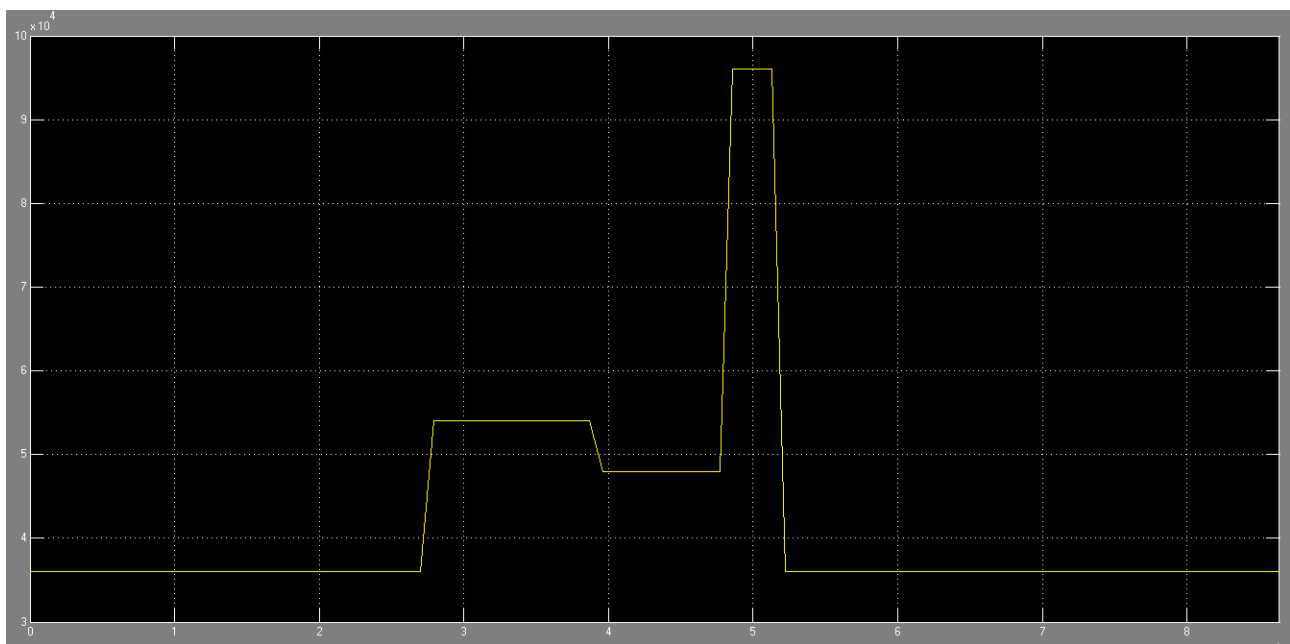


Figura 44. Profilo di carico termico dei servizi ancillari di edificio ristorativo aziendale [watt] generato nel subsystem (caso: esercizio da 600 pasti al giorno, simulazione di 1 giorno pari a 86400 s)

5 Ottimizzazione

Sono state valutate varie strategie di ottimizzazione del profilo di carico termico aggregato dei dispositivi. Le strategie di ottimizzazione sono state studiate con riferimento all'ambito residenziale in quanto, come sarà illustrato nel seguito, questo ambito è stato ritenuto adatto per l'applicazione, mentre per gli ambiti non residenziali le soluzioni gestionali sono imposte dalle esigenze dell'utenza.

In particolare, nel presente studio è stata analizzata la strategia di rimodulazione del profilo di utilizzazione dei dispositivi finalizzata ai seguenti obiettivi:

- Riduzione dell'impatto dei servizi ancillari sulla rete TLR, volta ad evitare il superamento della potenza nominale di sottocentrale;
- *Matching* del profilo di carico termico dei servizi ancillari con il profilo produzione di calore da solare termico, con l'obiettivo di sfruttare il più possibile la fonte rinnovabile termica nell'orario di maggior produzione, limitando inoltre il volume dei sistemi di accumulo termico.

Sono state inoltre valutate varie possibili tecniche di implementazione della strategia studiata. In primo luogo, è stato analizzato un profilo ottimizzato di carico termico aggregato, generato attraverso una nuova aggregazione dei dispositivi, ottenuta per mezzo di una nuova distribuzione statistica intorno all'orario di massima produzione da solare termico. Per generare il profilo ottimizzato, è stato reimplementato l'algoritmo di aggregazione carichi in ambito residenziale precedentemente sviluppato. Come orario di massima probabilità, in luogo degli orari precedentemente impostati, sono state imposte le ore 12 per imporre la corrispondenza con l'orario di massima produzione di calore da solare termico.

Successivamente, è stato studiato un algoritmo di controllo carichi in tempo reale finalizzato a rimodellare il profilo di carico aggregato in un profilo ottimizzato.

Nell'algoritmo studiato, viene inizialmente generato un profilo di carico aggregato, attraverso l'algoritmo di aggregazione già visto. Nello stesso tempo viene generato un profilo aggregato di richieste di attivazione delle LV (che consiste in un vettore il cui k -esimo elemento è un numero intero pari al numero di dispositivi che fanno richiesta nel momento k , eventualmente zero) e un analogo profilo di richieste per le LV.

Successivamente, l'algoritmo scansiona istante per istante il profilo di richiesta di LS e se c'è almeno una richiesta (elemento k maggiore di zero) attiva il sotto-algoritmo di controllo. Il sotto-algoritmo compie un numero di iterazioni a pari al valore dell'elemento k del profilo di richiesta, cioè esegue il controllo per ogni dispositivo che fa richiesta. A ogni iterazione viene attivato un contatore k_1 , che costituisce il tempo di attesa del dispositivo, che parte dall'istante corrente k , e attivato un sotto-ciclo. All'interno del sotto-ciclo, se il contatore k_1 è entro il tempo di attesa massimo ammissibile e contemporaneamente il profilo di carico complessivo al tempo k è al di sopra della soglia, allora il dispositivo oggetto di controllo viene messo in stand-by per un ulteriore momento incrementando il contatore k_1 di 1. Se invece il profilo complessivo è al di sotto del valore della soglia o è stato raggiunto il tempo massimo ammissibile di attesa, il dispositivo viene abilitato forzatamente. Il controllo viene eseguito per ognuna delle a LV che fanno richiesta al momento k . Dopodiché viene eseguito il controllo per le LS ripetendo il sottoalgoritmo per ognuna delle b LS che fanno richiesta al momento k . L'implementazione è stata fatta nell'arco di una giornata con un passo temporale di 1 minuto quindi con profili corrispondenti a vettori di 1440 elementi. Il vettore soglia costituisce un profilo obiettivo e viene acquisito dall'algoritmo in partenza. Nel presente lavoro sono stati esaminati due casi notevoli:

- Soglia costante (*flat*);
- Soglia corrispondente a una forma d'onda obiettivo, i.e. curva di produzione di un impianto solare termico a bassa temperatura.

In Figura 45 e Figura 46 si riporta il flowchart che illustra il funzionamento dell'algoritmo di controllo in tempo reale degli utilizzatori.

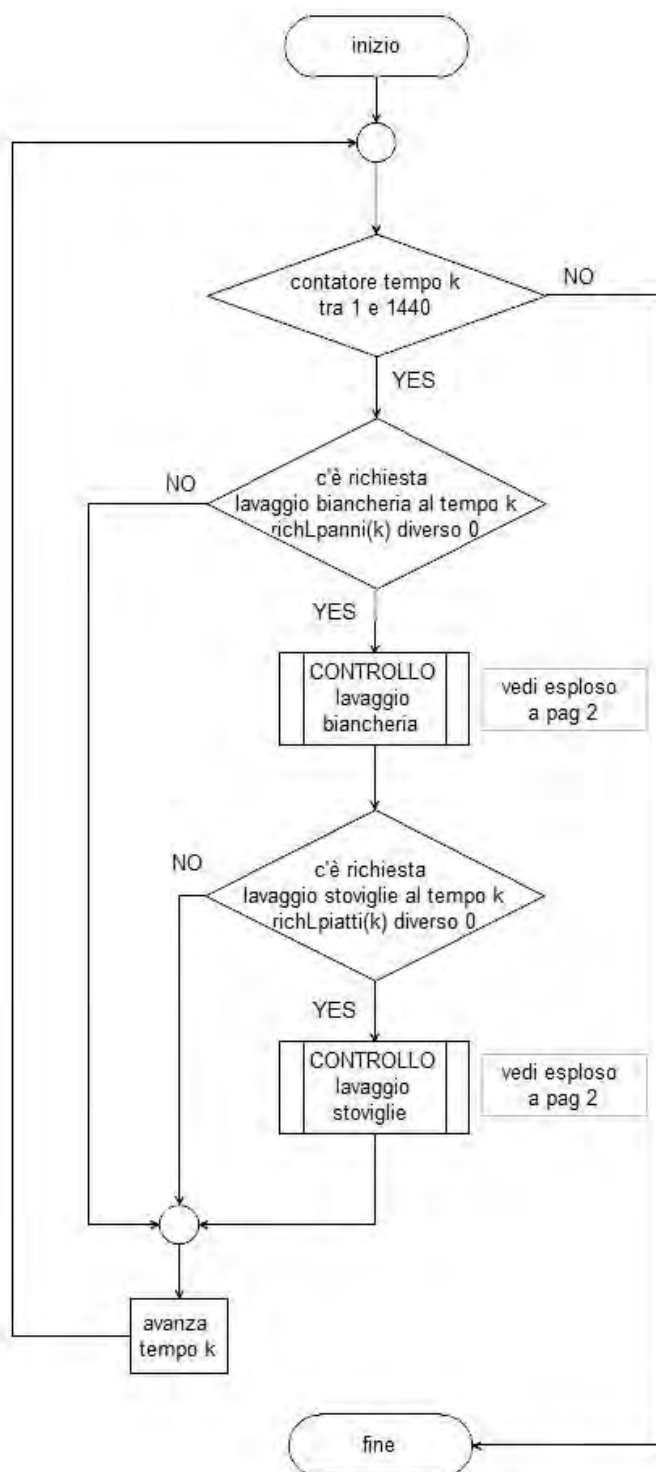


Figura 45. Flowchart dell'algoritmo di controllo dei carichi in ambito residenziale

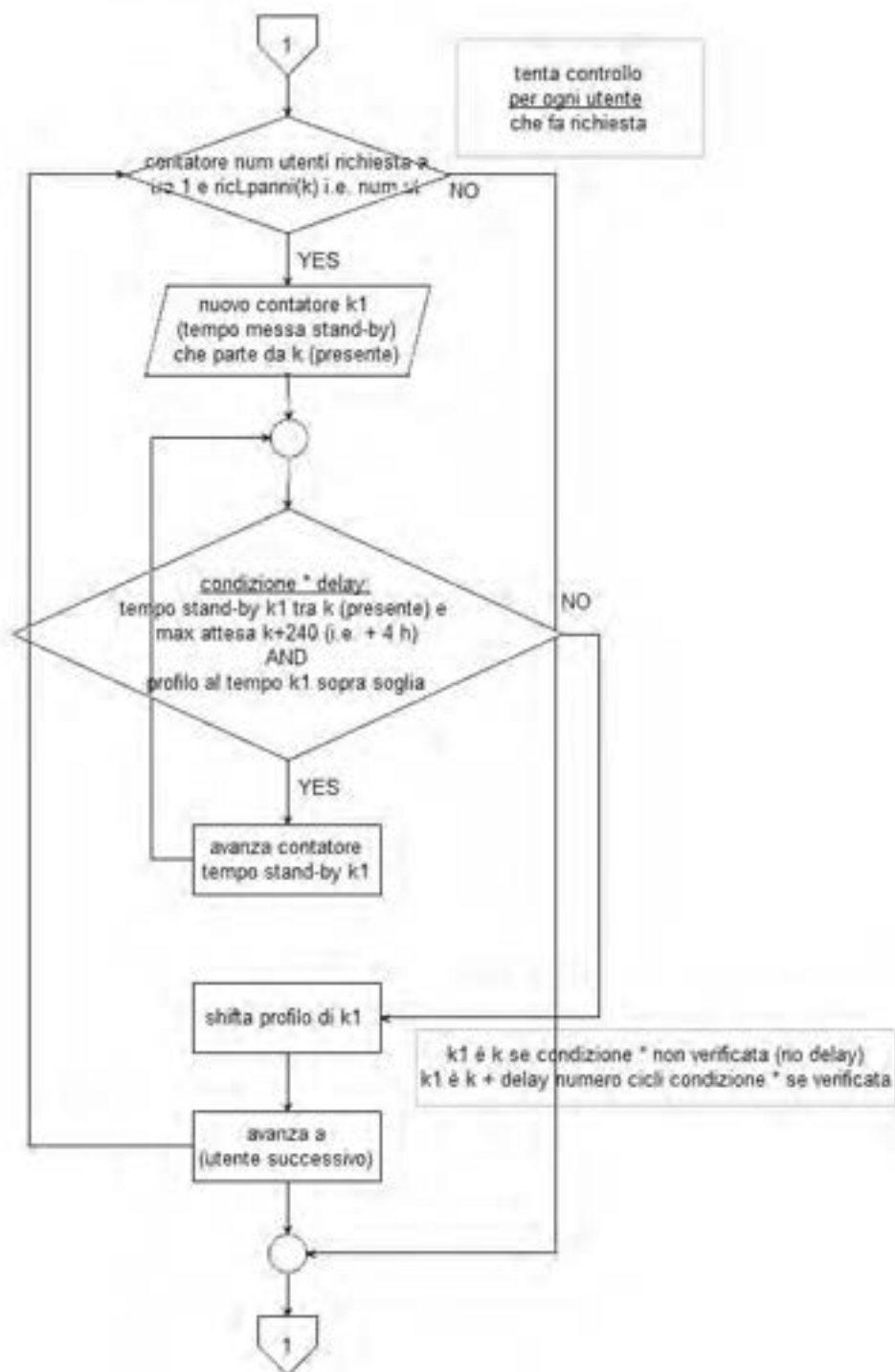


Figura 46. Flowchart dell'algoritmo di controllo dei carichi in ambito residenziale (2, esploso)

In Figura 47 si riporta il confronto dei profili di carico termico dei servizi ancillari in caso non ottimizzato (rosso) e ottimizzato (blu), attraverso la rimodulazione del profilo di carico mediante la definizione di nuovi orari di picco. Si riporta inoltre per confronto una curva di produzione da solare termico (verde); la curva è scalata per comodità di lettura e corrisponde al 25% della massima produzione, corrispondente alla massima taglia d'impianto installabile sull'edificio (essendo la superficie disponibile di 400 m²). I profili di carico mostrati sono riferiti all'edificio residenziale di riferimento considerato per l'aggregazione in ambito

residenziale, ossia un complesso di 16 unità abitative, con superficie di 100 m² ciascuna, distribuite su 4 piani, sito in Roma; ogni unità abitativa è dotata di 1 LV e di 1 LS. Dall'esame del nuovo profilo di carico dei servizi ancillari risultante, si nota che la definizione di nuovi orari di picco ottimizzati permette la generazione di un profilo di carico concentrato nelle ore centrali della giornata. Tale profilo ottimizzato presenta come vantaggi:

- Compatibilità con l'andamento della produzione da solare termico;
- Compatibilità con il profilo di carico per riscaldamento, in quanto concentrato in un momento in cui il fabbisogno per riscaldamento è minore, quindi con minore impatto sulla rete TLR, inoltre rimanendo all'interno della potenza contrattuale della sottocentrale TLR.

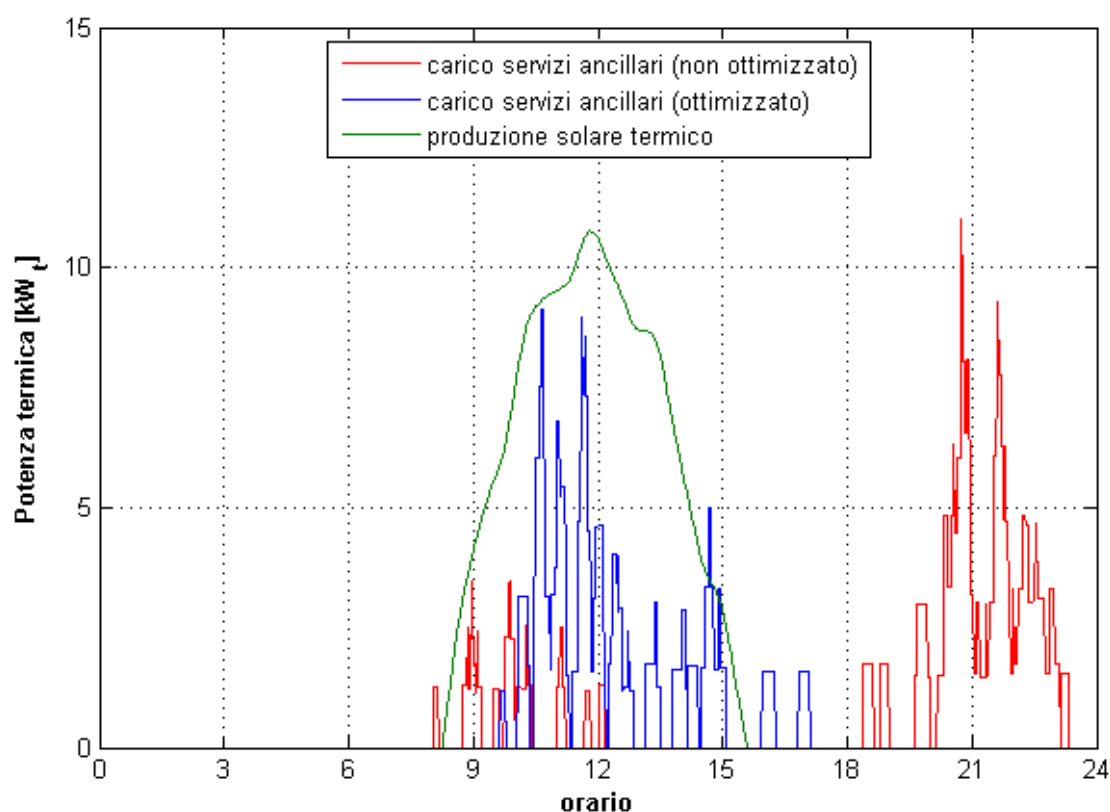


Figura 47. Confronto dei profili di carico termico servizi ancillari in caso ottimizzato (blu) e non ottimizzato (rosso) (edificio residenziale da 16 unità abitative). Per confronto si riporta una curva di produzione da solare termico (verde).

I vantaggi emersi dalla strategia studiata consistono nello sfruttare maggiormente il calore prodotto da fonte rinnovabile, per di più in orari della giornata in cui la richiesta di calore per riscaldamento è minore e quindi il calore sarebbe sottoutilizzato. Inoltre i servizi ancillari costituiscono un carico costante nel corso dell'anno, quindi rappresentano una possibilità di erogazione di servizi anche nei mesi estivi in cui non è presente il carico per riscaldamento degli ambienti (mesi in cui la potenzialità di produzione di calore da fonte solare è maggiore).

6 Conclusioni

Lo studio condotto ha permesso di ottenere sperimentalmente il valore numerico del consumo di energia destinato al riscaldamento dell'acqua nei dispositivi di lavaggio, scorporato dai consumi energetici totali

dell'utenza. Inoltre, lo studio ha prodotto dei modelli di calcolo del consumo per riscaldamento acqua di lavaggio per aggregati di utenze. In questo modo è possibile valutare l'incidenza di tale voce di consumo (riscaldamento acqua di lavaggio) rispetto ai consumi energetici totali. Una volta scorporato questo parametro, è possibile, attraverso l'adozione di nuove tecniche di produzione e distribuzione di acqua calda (quali il TLR), valutare le possibilità di risparmio energetico ed economico.

Lo studio ha riguardato utenze sia residenziali che non residenziali. Come si è visto, entrambe le tipologie di utenze possono costituire una voce importante nel bilancio energetico. In ambito residenziale, infatti, i dispositivi, pur avendo consumi limitati, come numerosità incidono nel bilancio energetico. In ambito non residenziale, invece, pur essendo le utenze di bassa numerosità, presentano consumi importanti. In entrambi i casi è quindi necessario intervenire con strategie per rendere più sostenibile il loro consumo. L'implementazione di nuovi servizi ancillari delle reti TLR, nell'ottica di una evoluzione energetica ed economica delle reti stesse, costituisce una strategia conveniente.

Come ulteriore risultato, lo studio ha portato alla programmazione di un pacchetto software di simulazione dei servizi ancillari, che, integrato in una piattaforma software per la simulazione di reti TLR a servizio di edifici, dà origine a una piattaforma di nuova generazione.

Tale piattaforma contribuisce ad aprire la strada allo sviluppo di soluzioni gestionali innovative per la fornitura di nuovi servizi ancillari nelle reti termiche di TLR e alla valutazione del risparmio energetico ed economico conseguibile.

L'implementazione dei servizi ancillari consente quindi un risparmio di energia elettrica e di combustibile per l'utente e un conseguente risparmio economico. Contestualmente apre la possibilità per il gestore della rete TLR di fornire nuovi servizi al fine di ottimizzare l'uso della rete TLR anche in periodi di basso carico, dal momento che i servizi di lavaggio funzionano durante tutto il corso dell'anno. Inoltre, tale evoluzione offre la possibilità di integrare più facilmente fonti rinnovabili termiche (e.g. solare termico a bassa temperatura) verso lo sviluppo di una filiera energetica più armonizzata.

Riferimenti bibliografici

- Baietta (2011) "Basi per un modello simulativo del consumo di energia elettrica in ambito residenziale", Tesi di laurea, Università degli Studi di Padova, Padova;
- Capasso & al. (1993) "Probabilistic processing of survey collected data in a residential load area for hourly demand profile estimation", IEEE/NTUA Athens Powertech Conference 1993;
- Capasso & al. (1994) "A Bottom-Up approach to residential load modeling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, n.2;
- Cataloghi commerciali Coster, DHS Amarc, Ravasio, STEA, TransTherm, Warma;
- Corrado & al. (2011) "Building Typology Brochure - Italy", Politecnico di Torino, Torino;
- Data sheets Aristarco, Bosch, Comenda, Grandimpianti, Hemerson, Imesa, Indesit, Itwash, Krupps, Miele;
- Di Andrea e Danese (2004) "MICENE MISure dei Consumi di ENergia Elettrica in 110 abitazioni Italiane", eERG end-use Efficiency Research Group, Dipartimento di Energetica, Politecnico di Milano, Milano;
- Fornari (2012) "Analisi e gestione dei carichi elettrici per edifici di tipo residenziale", Tesi di laurea, Sapienza Università di Roma, Roma;
- Gottwalt & al. (2011) "Demand side management – A simulation of household behavior under variable prices", Energy Policy 39 (2011) 8163-8174;

- Iatauro e Gargano (2003) “Modelli di domanda oraria di usi elettrici nel residenziale”, ENEA, Roma;
- Martirano & al. (2013) "A case study of a commercial/residential microgrid integrating cogeneration and electrical local users," Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on , vol., no., pp.363,368, 5-8 May 2013;
- Richardson & al. (2010) “Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model”, Energy and Buildings 42 (2010) 1878–1887;
- Widén & al. (2009) “A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand”, Energy and Buildings 41 (2009) 1001–1012;
- Widén & Wäckelgård (2010), “A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand”, Applied Energy 87 (2010) 1880–1892;
- Wright & Firth (2006) “The nature of domestic electricity-loads and effects of time averaging on statistics and on-site generation calculations”, Applied Energy 84 (2007) 389–403;
- Zúñiga & al. (2014) “Using fuzzy logic to model the behavior of residential electrical utility customers”, Applied Energy 115 (2014) 384–393.

A Codice MATLAB

Si riporta il codice MATLAB redatto per la generazione dei profili di carico termico aggregati degli utilizzatori elettrotermici e per il controllo degli utilizzatori in tempo reale.

Algoritmi di aggregazione degli utilizzatori

Algoritmo di aggregazione in ambito residenziale

```
%% Inizializza numero dispositivi

n_Lsb=n_apt;
n_LVb=n_apt;

end

%% inizializza profilo singolo

profLSn=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','C3:C1442');
profLSr=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','D3:D1442');
profLV=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','E3:E1442');
profBL=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','F3:F1442');

%% Inizializza profilo totale

proftot=zeros(1440,1);

%% Cicla aggregando profili singoli casualmente

n_LS=n_Lsb+round((n_apt/10)*randn(1));
n_LV=n_LVb+round((n_apt/10)*randn(1));

%Lavastoviglie

for i=1:n_LS;
    shiftLS=round(0+240/3.*randn(1)); %genera shift temporale random gaussiano
    amp=0.9+(1.1-0.9).*rand; %genera amplificazione random +/- 10% uniforme
    %amp=1+0.1*(1/3)*randn %genera ampliciazione random +/- 10% gaussiana
```

```

        if rand(1)>=0.5
            proftot=proftot+circshift(amp*profLSr,shiftLS); %incrementa profilo
totale con profilo singolo corrente shiftato e amplificato gradualmente
        else
            proftot=proftot+circshift(amp*profLSn,shiftLS);
        end
    end
end

%Lavatrici

for j=1:n_LV;
    shiftLV=round(0+240/3.*randn(1)); %genera shift temporale random gaussiano,
3sigma = 240 min = 4h
    amp=0.9+(1.1-0.9).*rand; %genera amplificazione random +/- 10% uniforme
    %amp=1+0.1*(1/3)*randn %genera ampliciazione random +/- 10% gaussiana
    proftot=proftot+circshift(amp*profLV,shiftLV);
end

```

Algoritmo di aggregazione in ambito ristorativo commerciale

```

%inizializz

soglia=0.2; %1 richiesta ogni 5 min %soglia = freq richieste
t_ap=7*60;
t_ch=20*60;
profLP=[0 580 580 0];
busy_a=zeros(1440,1);
busy_b=zeros(1440,1);
ric=zeros(1440,1);
prof_a=zeros(1440,1);
prof_b=zeros(1440,1);
profCom=zeros(1440,1);

%cicla orario
for t=1:1440;

    %verifica che entro orario apertura
    if t>t_ap && t<(t_ch-3)

        %testa lancio random per generare eventuale lavaggio
        %per ora è sì=1 lavaggio o no=0 lavaggi secondo 1 soglia
        if rand>=soglia
            ric(t)=1;

            %testa disponibilità dispositivi (a e in subordine b) e se verificata
accende carico
            if busy_a(t)==0
                for a=t:t+3
                    busy_a(a)=1; %impegna per 4 min
                    prof_a(a)=profLP(1+a-t); %accendi a carico per 4 min
                end
            else
                if busy_b(t)==0
                    for b=t:t+3
                        busy_b(b)=1; %idem
                        prof_b(b)=profLP(1+b-t); %idem
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    else
        ; %
    end
end
else
    ric(t)=0;
end
else
    busy_a(t)=0;
    busy_b(t)=0;
    prof_a(t)=0;
    prof_b(t)=0;
end
end

end

profCom=prof_a+prof_b;

```

Algoritmo di aggregazione in ambito alberghiero

```

%% Inizializza contatori

i=0;
j=0;
k=0;

%% Inizializza numero dispositivi

n_LV55=2
n_LV22=1
n_LV7=2
%da migliorare eventualmente

%% Inizializza profilo totale

proftotAlberghiero=zeros(1440,1);

%% Carica profili elementari

profLV=xlsread('profiliAlberghiero.xlsx','profiliAlberghieroNEW','c2:c1441');
profLS=xlsread('profiliAlberghiero.xlsx','profiliAlberghieroNEW','d2:d1441');

%% Lavatrici

%Cicla aggregando profili singoli casualmente

%55 kg
for i=1:n_LV55
    shiftLV=round(0+15.*randn(1));
    proftotAlberghiero=proftotAlberghiero+circshift(profLV,shiftLV);
end

%22 kg
for j=1:n_LV22
    shiftLV=round(0+15.*randn(1));
    proftotAlberghiero=proftotAlberghiero+circshift(0.4*profLV,shiftLV);
end

%6.5 kg

```

```
for k=i:n_LV7
    shiftLV=round(0+15.*randn(1));
    proftotAlberghiero=proftotAlberghiero+circshift(0.12*profLV,shiftLV);
end
```

Algoritmo di controllo carichi

```
%% Inizializzazioni

num_fam=16;
num_cop=0;

% stagione=1->Estate; stagione=0->Inverno
stagione=0;

Hmax=2; %portato da 2 a 4
profNC_fam=zeros(1440,1);
profC_fam=zeros(1440,1);
profNC_cop=zeros(1440,1);
profC_cop=zeros(1440,1);

ricLpanni_fam=zeros(1440,1);
ricLpiatti_fam=zeros(1440,1);
ricLpanni_cop=zeros(1440,1);
ricLpiatti_cop=zeros(1440,1);

ciclo_piatti=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','cicli','c3:c1442');
ciclo_panni=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','cicli','e3:e1442');

%% Acquisizione profili

if stagione==0
    % Famiglia Inverno
    panni_fam=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','e3:e1442');
    piatti_fam=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','d3:d1442');
    % Coppia Inverno
    panni_cop=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','e3:e1442');
    piatti_cop=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','d3:d1442');
else
    % Famiglia Estate
    panni_fam=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','e3:e1442');
    piatti_fam=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','d3:d1442');
    % Coppia Estate
    panni_cop=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','e3:e1442');
    piatti_cop=xlsread('profiliResidenziale.xlsx','dati','d3:d1442');
end

%% Genera profilo richieste

for i=1:num_fam
    shift=round(0+(Hmax*60/3).*randn(1));
    panni=panni_fam;
    piatti=piatti_fam;
    appC=panni+piatti;
    profC_fam=profC_fam+circshift(appC,shift);
    % Richiesta lavatrice famiglie 10:00 +/- 2h
    ricLpanni_fam(601+shift)=ricLpanni_fam(601+shift)+1;
    % Richiesta lavastoviglie famiglia 22:00 +/- 2h
    ricLpiatti_fam(1320+shift)=ricLpiatti_fam(1320+shift)+1;
end
```

```

for i=1:num_cop
    shift=round(0+(Hmax*60/3).*randn(1));
    panni=panni_cop;
    piatti=piatti_cop;
    appC=panni+piatti;
    profC_cop=profC_cop+circshift(appC,shift);
    % Richiesta lavatrice coppie 10:00 +- 2h
    ricLpanni_cop(601+shift)=ricLpanni_cop(601+shift)+1;
    % Richiesta lavastoviglie coppie 22:00 +- 2h
    ricLpiatti_cop(1320+shift)=ricLpiatti_cop(1320+shift)+1;
end

ricLpanni=ricLpanni_fam+ricLpanni_cop;
ricLpiatti=ricLpiatti_fam+ricLpiatti_cop;
profiloC=profC_fam+profC_cop;
soglia=50*1000;
Soglia=soglia.*ones(1440,1);
%Soglia=xlsread('Dati.xlsx','produzione','E2:E1441');
profilo=profNC_fam+profNC_cop;
profC2=zeros(1440,1);
newric=zeros(1440,1);
attesa=zeros(200,1);
richiesta=zeros(200,1);
x=1;

%% Controllo

for k=1:1440
    if ricLpanni(k)~=0
        for a=1:ricLpanni(k)
            k1=k;
            while k1<k+240 && profilo(k1)>Soglia(k1)
                k1=k1+1;
            end
            profilo=profilo+circshift(ciclo_panni,k1-1);
            profC2=profC2+circshift(ciclo_panni,k1-1);
            newric(k1)=newric(k1)+1;
            attesa(x)=k1-k;
            richiesta(x)=k;
            x=x+1;
        end
    end
    if ricLpiatti(k)~=0
        for b=1:ricLpiatti(k)
            k1=k;
            while k1<k+240 && profilo(k1)>Soglia(k1)
                k1=k1+1;
            end
            profilo=profilo+circshift(ciclo_piatti,k1-1);
            profC2=profC2+circshift(ciclo_piatti,k1-1);
            newric(k1)=newric(k1)+1;
            attesa(x)=k1-k;
            richiesta(x)=k;
            x=x+1;
        end
    end
end
profiloC1=profC_fam+profC_cop;
ric=ricLpanni+ricLpiatti;

```

B Abbreviazioni ed acronimi

- ACS: acqua calda sanitaria
- AT: alta temperatura
- BT: bassa temperatura
- FER: fonti di energia rinnovabili
- FM: forza motrice
- Lav: fase di lavaggio
- LV: lavatrice
- LS: lavastoviglie
- Prelav: fase di prelavaggio
- TLR: teleriscaldamento

C Principali soggetti esterni coinvolti

Waldorf Astoria Rome Cavalieri Hotels & Resorts, Ufficio Engineering
Arpa s.a.s. di Ferrara Pietro & C.
Mensa C.R. ENEA Casaccia

Nel caso di Partner esterni ad ENEA, in appendice al rapporto inserire un breve **curriculum scientifico del gruppo di lavoro** impegnato nell'attività.

Curriculum del Gruppo Universitario in Sistemi Elettrici per l'Energia (GUSEE) del Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica (DIAEE) dell'Università Sapienza di Roma

Il Gruppo è costituito da 3 professori ordinari: Alfonso Capasso, Regina Lamedica, Giuseppe Parise, 3 professori associati: Fabio Gatta, Umberto Grasselli, Massimo Pompili e 3 ricercatori: Maria Carmen Falvo, Stefano Lauria, Luigi Martirano. Attualmente lavorano nel gruppo anche 6 dottorandi di ricerca ed un assegnista di ricerca.

Negli ultimi anni l'unità di ricerca si è occupata in generale delle tematiche relative a:

1) Trasmissione dell'energia elettrica

Metodi e tecnologie innovative per lo sfruttamento ottimale della capacità di trasporto delle reti - Elettrodotti misti linea aerea-cavo di AT e AAT, Affidabilità, sicurezza e vulnerabilità del sistema elettrico - Fulminazione diretta delle linee di trasmissione AAT - individuazione automatica delle manovre correttive per la risoluzione di contingenze severe, Analisi dei sistemi elettrici: pianificazione delle reti di trasmissione in contesto di mercato.

2) Distribuzione dell'energia elettrica

Coordinamento degli isolamenti delle linee in cavo e diagnostica dei guasti nei componenti elettrici, Valutazione del rischio cui sono esposti i sistemi elettrici ed elettronici per effetto delle scariche atmosferiche, Coordinamento degli isolamenti delle linee di distribuzione e delle linee di trazione elettrica sollecitate da tensioni impulsive non convenzionali, Affidabilità e qualità del servizio nei sistemi di distribuzione: localizzazione di eventi originanti fenomeni transitori di tensione sulle reti MT e BT, Procedura di verifiche funzionali di segnalazioni luminose ai fini della sicurezza operativa

3) Utilizzazione dell'energia elettrica

Studi di compatibilità elettromagnetica nei sistemi ferroviari Alta Velocità/Alta Capacità, Sistemi di mobilità sostenibile per il trasporto urbano: trasporto elettrico di massa su ferro e su gomma, Analisi della domanda di utenze residenziali, civili e terziarie, Sistemi elettrici aerospaziali - sistemi elettrici aeronautici, Sicurezza gestione e manutenzione degli impianti elettrici, Studio dell'impianto di protezione dalle scariche atmosferiche per complessi di edifici, Building automation e fonti rinnovabili, L'incidenza della domotica e della building automation nella prestazione energetica degli edifici, Edifici ad energia quasi zero, Microgrid e smartgrid, Zolfo corrosivo negli oli isolanti, recenti guasti e possibili contromisure, Standardisation of Transformer Oils, PD Characteristics of Transformer Oil.

Sulle tematiche citate sono state prodotte numerose pubblicazioni in ambito nazionale ed internazionale consultabili sui più importanti motori di ricerca scientifica quali IEEE Explore, Scopus, ISI, ecc. I componenti dell'Unità partecipano a numerosi progetti di ricerca nazionali ed internazionali.

Nel dipartimento ha sede un Chapter dell'IEEE Industry Application Society.

L'unità aderisce al Consorzio interuniversitario nazionale per energia e sistemi elettrici Ensiel.

Curriculum breve del responsabile scientifico dell'accordo.

Luigi Martirano è ricercatore universitario in sistemi elettrici per l'energia, raggruppamento ING-IND/33, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi Sapienza, Dipartimento di Ingegneria Astronautica, Elettrica ed Energetica. Ha conseguito la Laurea e il Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrica, presso la Sapienza, rispettivamente il 1998 e il 2003. E' docente di Domotica ed uso Razionale dell'Energia (9CFU), del corso internazionale Power Systems Basics (6CFU) e del modulo impianti elettrici e sicurezza (3 CFU) e sistemi di automazione e controllo (2CFU) per il master in lighting design. I settori dell'attività di ricerca svolta riguardano: impianti elettrici MT/BT, microgrid e smartgrid, domotica ed uso razionale dell'energia elettrica, impianti elettrici speciali e building automation, sistemi di controllo intelligenti per l'illuminazione, sicurezza elettrica. E' autore di numerose pubblicazioni (oltre 80) apparse su riviste internazionali e nazionali, su atti di congressi internazionali e nazionali. E' membro del consiglio scientifico del Master in Lighting Design. E' componente del gruppo fisso di docenti per i corsi di formazione sulla sicurezza nei cantieri (DL81/08 ex 494) della Facoltà di Ingegneria della Sapienza. E' componente esperto del CT 205 "Sistemi BUS per Edifici" e del CT 315 "Efficienza energetica" del Comitato Elettrotecnico Italiano CEI. E' membro della Federazione Elettrotecnica Italiana (AEI), Consigliere della Sezione di Roma. E' senior member dell'Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE e della Industry Application Society IAS.
