



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di una procedura semplificata per la valutazione del potenziale di aggregabilità di utenze residenziali

L. de Santoli, F. Mancini, M. Cecconi

SVILUPPO DI UNA PROCEDURA SEMPLIFICATA PER LA VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI AGGREGABILITÀ DI UTENZE RESIDENZIALI

L. de Santoli, F. Mancini, M. Cecconi

C.I.T.E.R.A - Centro di Ricerca Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Ambiente

Sapienza Università di Roma

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.6 Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano

Obiettivo: b. Sistemi e servizi smart per edifici

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo di una procedura semplificata per la valutazione del potenziale di aggregabilità di utenze residenziali".

Responsabile scientifico ENEA: Arch. Sabrina Romano

Responsabile scientifico C.I.T.E.R.A (Sapienza): Prof. Livio de Santoli

Indice

1	SOMMARIO	5
2	INTRODUZIONE	6
3	INQUADRAMENTO GENERALE DEL LAVORO.....	7
4	IL PROCEDIMENTO PER LA STIMA DEI CONSUMI ENERGETICI.....	10
4.1	GENERALITÀ.....	10
4.2	FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE PER RISCALDAMENTO E RAFFRESCAMENTO.....	12
4.2.1	<i>Bilancio energetico invernale</i>	12
4.2.1.1	Bilancio energetico invernale secondo UNI TS 11300.....	12
4.2.1.2	Bilancio energetico invernale con metodo alternativo.....	14
4.2.2	<i>Bilancio energetico estivo</i>	18
4.2.2.1	Bilancio energetico estivo con metodo normativo	18
4.2.2.2	Bilancio energetico estivo con metodo alternativo	21
4.2.3	<i>Scambio termico per trasmissione invernale</i>	21
4.2.3.1	Equazione generale dello scambio termico per trasmissione invernale con metodo normativo.....	21
4.2.3.2	Equazione generale dello scambio termico per trasmissione invernale con metodo alternativo.....	22
4.2.4	<i>Scambio termico per trasmissione estivo</i>	24
4.2.4.1	Equazione generale dello scambio termico per trasmissione estivo con metodo normativo	24
4.2.4.2	Equazione generale dello scambio termico per trasmissione estivo con metodo alternativo	25
4.2.5	<i>Coefficienti di scambio termico per trasmissione</i>	25
4.2.5.1	Coefficiente di scambio termico per trasmissione con l'aria esterna.....	25
4.2.5.2	Coefficiente di scambio termico per trasmissione con il terreno	26
4.2.5.3	Coefficiente di scambio termico per trasmissione con spazi non climatizzati.....	26
4.2.5.4	Extra flusso per radiazione infrarossa verso la volta celeste	27
4.2.6	<i>Scambio termico per ventilazione invernale</i>	28
4.2.6.1	Equazione generale dello scambio termico per ventilazione invernale con metodo normativo.....	28
4.2.6.2	Equazione generale dello scambio termico per ventilazione invernale con metodo alternativo.....	29
4.2.7	<i>Scambio termico per ventilazione estivo</i>	29
4.2.7.1	Equazione generale dello scambio termico per ventilazione estivo con metodo normativo	29
4.2.7.2	Equazione generale dello scambio termico per ventilazione estivo con metodo alternativo	30
4.2.8	<i>Coefficienti di scambio termico per ventilazione</i>	30
4.2.8.1	Coefficiente di scambio termico per ventilazione con l'aria esterna o con spazi non climatizzati	30
4.2.9	<i>Apporti interni</i>	31
4.2.9.1	Apporti interni con calcolo normativo.....	31
4.2.9.2	Apporti interni con calcolo alternativo.....	32
4.2.10	<i>Apporti solari da componenti trasparenti</i>	32
4.2.11	<i>Apporti solari con calcolo normativo</i>	33
4.2.12	<i>Apporti solari con calcolo alternativo</i>	35
4.3	FABBISOGNO DI ENERGIA UTILE PER LA PREPARAZIONE DI ACQUA CALDA SANITARIA	37
4.4	MODELLAZIONE DEGLI IMPIANTI DI RISCALDAMENTO, RAFFRESCAMENTO E PREPARAZIONE ACQUA CALDA SANITARIA – CALCOLO DEI RENDIMENTI.....	38
4.5	IMPIANTI SOLARI TERMICI E FOTOVOLTAICI.....	39
4.6	CUCINA	40
4.7	APPARECCHIATURE ELETTRICHE SOTTOPOSTE A ETICHETTATURA ENERGETICA.....	40
4.8	ILLUMINAZIONE	40
4.9	ALTRE APPARECCHIATURE ELETTRICHE	41
4.10	SISTEMI DI AUTOMAZIONE.....	42
5	COSTI LEGATI AI CONSUMI ENERGETICI	45
6	RIFERIMENTI PER I CONSUMI ENERGETICI NEL SETTORE RESIDENZIALE.....	47
7	KIT DI AUTOMAZIONE	50
8	IL FOGLIO DI CALCOLO	51

8.1	STRUTTURA DEL FOGLIO DI CALCOLO	51
8.2	DATI DI INPUT.....	52
8.2.1	<i>Informazioni generali</i>	52
8.2.2	<i>Informazioni edificio e abitazione</i>	52
8.2.3	<i>Impianti tecnologici (riscaldamento, raffrescamento, preparazione acqua calda sanitaria, autoproduzione di energia elettrica)</i>	54
8.2.4	<i>Elettrodomestici</i>	55
8.3	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	58
8.3.1	<i>Consumi elettrici</i>	58
8.3.2	<i>Consumi di gas</i>	59
8.3.3	<i>Costi, elettrificazione, automazione</i>	60
8.4	VARIAZIONI DELLA DOTAZIONE TECNOLOGICA: RISPARMI POTENZIALI	61
8.4.1	<i>Risparmi energetici ed economici ottenibili con sistemi di automazione – Versione per utente</i>	61
8.4.2	<i>Risparmi energetici ed economici ottenibili con sistemi di automazione – Versione per aggregatore</i>	61
8.4.3	<i>Potenziale di elettrificazione dell'abitazione – Versione per aggregatore</i>	63
9	CASI STUDIO	64
10	CONCLUSIONI.....	67
11	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	68
	APPENDICE: CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ	70
	<i>PROF. LIVIO DE SANTOLI</i>	70
	<i>ING. FRANCESCO MANCINI</i>	70
	<i>ING. MARCO CECCONI</i>	70

1 Sommario

L'obiettivo di questo lavoro è la predisposizione di un modulo di raccolta dati per una generica utenza da inserire in un programma di aggregazione di utenze residenziali.

È definita una procedura di simulazione semplificata, volta ad una previsione dei consumi energetici reali di un'abitazione, con predisposizione di un foglio di calcolo.

Con l'intenzione di rendere la procedura accessibile anche all'utente non esperto si è cercato di limitare al minimo la richiesta di informazioni tecniche, predisponendo, ove strettamente necessario, dei menù a scelta multipla con inserimento opportunamente guidato. Sono state, pertanto, individuate le informazioni necessarie per la caratterizzazione della tipologia di utenza dal punto di vista elettrico e termico e quelle necessarie a valutare il potenziale di aggregazione, rappresentato dall'incidenza assoluta e percentuale dei carichi elettrici accumulabili e differibili.

A partire dai dati forniti, attraverso un foglio di calcolo, viene effettuata una simulazione in regime dinamico semplificato che consente di stimare i consumi annui della singola utenza domestica, sia dal punto di vista elettrico che termico.

Tali valori sono confrontati con i consumi rilevati dalle bollette dei rispettivi fornitori, per un confronto e un feedback con l'utente. Sono presentati grafici utili al confronto tra i dati reali e i dati stimati, in maniera tale da poter procedere a dei cicli di aggiustamento e controllo, in caso di discordanza troppo alta. Inoltre, il confronto consente un giudizio sulla tipologia di utente, riferito sia all'entità dei consumi (alti/medi/bassi) sia alla stabilità degli stessi (variabili/costanti, mensili/stagionali);

Il confronto è effettuato anche con riferimento alla spesa sostenuta per i consumi energetici e presenta un'indicazione su possibili risparmi ottenibili da una semplice variazione del contratto di fornitura.

Il foglio di calcolo consente di valutare il potenziale di aggregazione dell'abitazione, sia in termini di utenze già elettriche sia in termini di utenze termiche che possono essere elettrificate.

Inoltre, al fine di valutare il risparmio energetico ed economico derivanti dall'introduzione di un sistema di controllo delle utenze, in conformità alla norma UNI EN 15232:2017, vengono simulati gli effetti di tre diversi kit di automazione già predisposti e di un ipotetico kit in grado di raggiungere la classe di automazione più alta.

La procedura è stata testata su un numero significativo di casi reali per valutare l'attendibilità della stessa e con l'obiettivo di costruire un database esteso da impiegare per analisi di sensibilità generali sui dati di input forniti dall'utente.

2 Introduzione

Il Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA hanno stipulato in data 21 dicembre 2016 un Accordo di Programma in base al quale è concesso il contributo finanziario per l'esecuzione delle linee di attività del Piano Triennale 2015-2017 della Ricerca e Sviluppo di Interesse Generale per il Sistema Elettrico Nazionale. Il presente allegato tecnico si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2016, per quanto attiene all'Area "Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con altri vettori energetici", tema di ricerca "Smart Cities & Communities"; nello specifico, si riferisce all'obiettivo "b. Sistemi e servizi smart per edifici" del progetto "Sviluppo di un modello integrato di smart district urbano".

I temi sviluppati nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Centro di Ricerca Interdipartimentale Territorio Edilizia Restauro Ambiente - C.I.T.E.R.A. di "Sapienza" Università di Roma riguardano lo sviluppo di una procedura semplificata per la valutazione del potenziale di aggregabilità di utenze residenziali, in vista della loro possibile trasformazione in smart home.

In particolare, è prevista la predisposizione di un foglio di calcolo da impiegare per la raccolta delle informazioni e per la caratterizzazione della tipologia di utenza, il benchmarking, l'analisi tecnico economica della soluzione tecnologica proposta e della sua replicabilità.

Attraverso il medesimo foglio di calcolo sarà sviluppata una simulazione dinamica semplificata che consentirà di stimare i consumi energetici dell'abitazione, in maniera tale da realizzare un confronto interattivo con i dati delle bollette energetiche forniti dall'utente.

Lo strumento dovrà essere utile per fornire dei feedback all'utente sui propri consumi energetici ed orientarlo verso una scelta consapevole della tipologia di kit di strumentazione di domotica da installare nella propria abitazione alla luce dei risultati attesi.

3 Inquadramento generale del lavoro

Il lavoro discende dallo studio e dalla caratterizzazione delle utenze residenziali, effettuata al fine di valutare il potenziale di flessibilità attuabile, in termini di carichi accumulabili e di carichi differibili, considerando tre Casi Studio ritenuti significativi delle residenze italiane, per i quali sono stati stimati i risparmi energetici e i risparmi economici derivanti da interventi di variazione della dotazione impiantistica e di introduzione di sistemi di automazione [1].

Attraverso il modulo, volutamente concepito per un compilatore non esperto, saranno acquisite le informazioni necessarie per valutare il potenziale di aggregazione di una utenza residenziale, rappresentato dall'incidenza assoluta e percentuale dei carichi elettrici accumulabili e differibili, dalla possibile introduzione di sistemi di automazione per la gestione attiva delle utenze.

L'aggregatore può essere un soggetto senza una perimetrazione fisica definita, costituito da tante utenze "flessibili" selezionate sul territorio, alle quali può offrire la sostituzione incentivata delle utenze flessibili (e quindi il servizio di risparmio energetico) o altri servizi di tipo diverso.

La funzione dell'aggregatore, di indubbia utilità per il sistema elettrico, acquisisce un significato solo al raggiungimento di una quota significativa di domanda flessibile sull'intera domanda di energia elettrica.

È pertanto necessaria una sperimentazione preliminare su piccoli gruppi di utenza, per testare non solo l'efficacia della funzione ma anche la risposta degli utenti in termini di partecipazione e di soddisfazione.

Per gli edifici esistenti, la sperimentazione ha lo scopo di verificare i risparmi energetici e i risparmi economici potenzialmente realizzabili grazie ai diversi interventi di variazione della dotazione impiantistica, di introduzione di sistemi di automazione e di flessibilizzazione della domanda di energia elettrica.

Tale sperimentazione riveste particolare importanza, essendo rappresentativa di una larga porzione del patrimonio edilizio esistente, quella più energivora e meno elettrificata, e quindi quella in grado di offrire i più ampi margini di risparmio energetico, di elettrificazione e di flessibilizzazione del carico.

L'aggregazione delle utenze potrà essere effettuata utilizzando degli Energy Box per il coordinamento e l'automazione di tutti gli usi energetici.

Il modulo che si propone ha la funzione primaria di verificare preliminarmente il potenziale di aggregabilità di una generica utenza, caratterizzandola attraverso un approccio rapido, che coinvolga inizialmente solo l'utente residenziale in assenza di una figura tecnica esperta della materia. Le informazioni raccolte, se ritenute interessanti, potranno comunque essere sottoposte ad un'analisi più approfondita con intervento di un tecnico e con sopralluoghi mirati.

A tal proposito conviene ricordare la classificazione effettuata degli usi energetici per il settore residenziale, in funzione della natura del generico carico (Figura 3.1):

- carico accumulabile; il consumo di energia può essere disaccoppiato dal servizio reso in virtù di un accumulo che può essere di tipo diverso (accumulo elettrochimico, inerzia termica, ecc.);
- carico differibile; il consumo di energia può essere spostato nel tempo senza influire sul servizio reso; un carico spostabile può comportare anche un processo non interrompibile (come un ciclo di lavanderia) e richiedere quindi una pianificazione;
- carico interrompibile; il consumo di energia non può essere spostato senza influire sul servizio reso, ma il servizio può essere interrotto anche immediatamente;
- carico di base (non interrompibile); quando l'utenza ha bisogno di potenza istantanea e non può essere interrotta o spostata nel tempo;
- autogenerazione; la produzione di energia elettrica effettuata da parte del consumatore, che, in certi casi può essere utilizzata come alimentazione di back-up.

Autogenerazione	Mix di carico			
	Carichi non accumulabili			Carichi accumulabili
	Carichi non differibili		Carichi differibili	
	Carichi di base	Carichi interrompibili		
Fotovoltaico, micro-CHP, micro-eolico, imp. a biomassa, ecc.	Antifurto, TV, automazione, illuminazione, ecc.	PC, TV, illuminazione, strumenti multifunzione, ecc.	Lavatrici, asciugatrici, lavastoviglie, aspirapolvere, ecc.	Produzione ACS, accumuli elettrochimici, riscaldamento, raffrescamento, veicoli elettrici, ecc.

Figura 3.1 – Mix di carico generico.

Seguendo la classificazione illustrata, per il settore domestico, il modulo di raccolta dati è stato strutturato per acquisire tutte le informazioni necessarie a caratterizzare una generica utenza, con informazioni che anche un utente non esperto può fornire.

In particolare, gli usi energetici che sono stati considerati sono quelli relativi a riscaldamento ambienti, raffrescamento ambienti, preparazione di acqua calda sanitaria, lavaggio biancheria, asciugatura biancheria, lavaggio stoviglie, altri usi differibili (ferro da stiro, aspirapolvere), postazioni audio-video (intrattenimento), postazioni PC, illuminazione, refrigerazione e congelazione, altri usi non differibili.

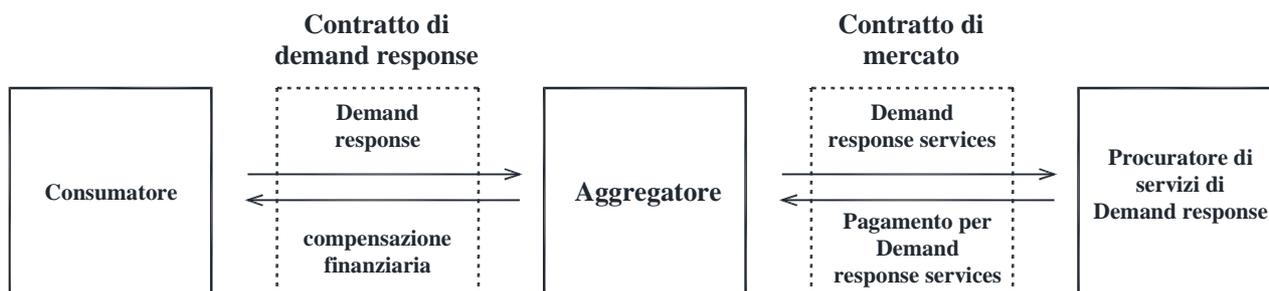


Figura 3.2 - Interazione tra consumatori, intermediari e procuratori di servizi di Demand Response [3].

Oltre alla funzione sopra menzionata, il modulo ha anche la funzione di stimare preliminarmente gli effetti derivanti dall'introduzione di un Energy Box, necessario alla gestione ed al controllo degli usi energetici, in una logica costi-benefici, volta alla stima dei risparmi energetici ed economici sulla bolletta dell'utente finale (Demande Response di tipo implicito) ed alla stima in termini economici dei benefici derivanti dallo "scambio" del carico aggregato all'interno dei mercati di bilanciamento (Demande Response di tipo esplicito)¹.

¹ Il servizio di Demand Response (DR) può essere di tipo esplicito o di tipo implicito [3][1].

Negli schemi di DR di tipo esplicito (incentive-based) il carico aggregato è scambiato nei mercati dell'energia elettrica, unitamente a servizi analoghi sul lato dell'offerta, e riceve gli stessi prezzi. Di solito questo avviene all'interno dei mercati di bilanciamento; i consumatori ricevono pagamenti diretti per cambiare il loro consumo a seguito di una richiesta, che in genere è innescata dall'attivazione di servizi di bilanciamento, di differenze nei prezzi dell'energia elettrica o di un vincolo sulla rete. I consumatori possono guadagnare dalla loro flessibilità nel consumo di energia elettrica singolarmente o contraendo attraverso un aggregatore.

Negli schemi di DR di tipo implicito (prices-based) i consumatori che hanno scelto di essere esposti a prezzi variabili nel tempo dell'energia elettrica o delle tariffe di rete (o entrambi) reagiscono a queste differenze di prezzo a seconda delle proprie possibilità e dei propri vincoli (senza impegno).

I due schemi di DR non sono l'uno il sostituto dell'altro: i consumatori possono partecipare alla DR esplicita attraverso un aggregatore, e, allo stesso tempo, partecipano anche al programma di DR implicita, attraverso tariffe dinamiche. I requisiti e vantaggi di ciascuno sono diversi e si possono sommare, dal momento che i due schemi hanno scopi diversi all'interno dei mercati e sono valutati in modo diverso. Mentre i consumatori in genere ricevono una bolletta più bassa in un sistema di tariffazione dinamica, ricevono un pagamento diretto per la partecipazione a un programma di DR esplicita.

In altri termini, la DR esplicita fornisce uno strumento operativo valido e affidabile per i gestori del sistema di regolare il carico. Diversamente, la DR implicita non è uno strumento operativo, ma piuttosto permette ai consumatori di beneficiare di fluttuazioni di

In via preliminare e in termini puramente teorici, al fine di verificare i potenziali risparmi derivanti dal servizio di DR implicito è stata sviluppata un'analisi statistica sui valori orari del Prezzo Unico Nazionale (PUN), volta a confrontare il generico valore orario con il valore orario minimo, in un intorno di ± 144 ore (± 6 giorni). Il grafico di Figura 3.3 riporta i risultati dell'analisi effettuata, in termini di differenza percentuale tra il generico valore ed il valore minimo, in funzione dell'ampiezza dell'intorno. Dall'analisi del grafico risultano evidenti grandi differenze percentuali, anche con intorni orari stretti. Si fa tuttavia notare come, negli ultimi anni (2015, 2016 e 2017), i risparmi potenziali da una traslazione in anticipo/posticipo del prelievo di energia elettrica siano diventati minori.

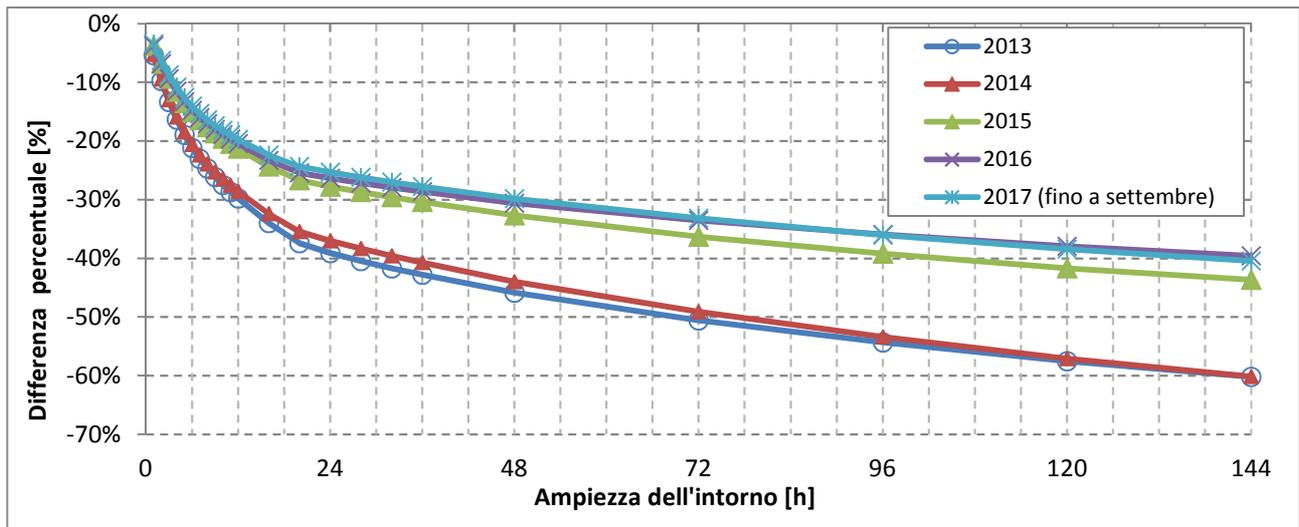


Figura 3.3 – Differenza percentuale tra il generico valore orario del PUN e il valore minimo in funzione dell'ampiezza dell'intorno considerato.

Il grafico di Figura 3.4 riporta l'andamento del corrispettivo unitario del servizio di dispacciamento, utile a valutare il potenziale beneficio del servizio di DR esplicito. In termini assoluti, l'applicazione ad un'utenza residenziale, caratterizzata da un consumo di qualche migliaio di chilowattora, porta ad un beneficio dell'ordine di qualche decina di euro l'anno.

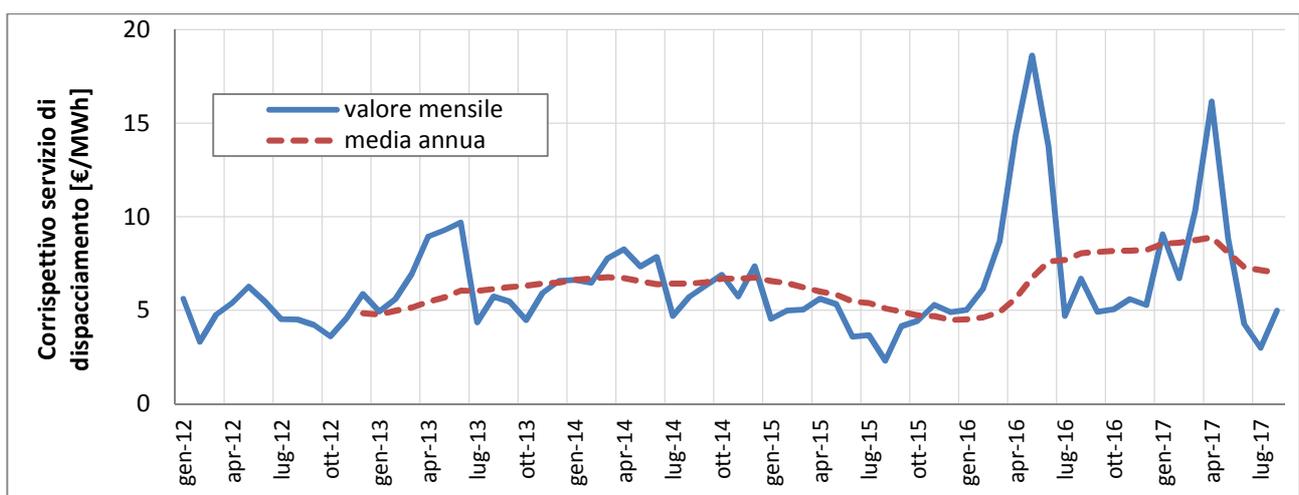


Figura 3.4 – Andamento corrispettivo dispacciamento.

prezzo nei mercati all'ingrosso dell'energia nella misura in cui sono disposti e in grado di farlo. Inoltre, un programma di tariffazione dinamica non consente a un consumatore di partecipare al mercato di bilanciamento, che attualmente rappresenta una grossa fonte di reddito e non offre servizi di dispacciamento utili al Gestore della Rete di Trasmissione e al Distributore. D'altra parte, la DR esplicita non ha la stessa portata di mercato di un programma di tariffazione dinamica. Entrambe le forme risultano pertanto utili e consentono ai consumatori di partecipare a pieno titolo ai mercati e di trarre beneficio dalla loro flessibilità.

4 Il procedimento per la stima dei consumi energetici

4.1 Generalità

Il consumo complessivo di energia di un edificio è dato dalla somma di tutti i consumi di energia connessi all'uso ed all'occupazione dell'edificio stesso e comprende il consumo di energia per la climatizzazione invernale, per la climatizzazione estiva, per la produzione di acqua calda sanitaria, per l'illuminazione artificiale degli ambienti, per il trasporto di persone e cose (impianti ascensori, marciapiedi e scale mobili), per la cottura dei cibi, per altri usi elettrici.

La stima dei consumi energetici degli edifici, in funzione delle finalità che si vogliono raggiungere, può essere effettuata usando metodologie diverse, che si distinguono per utilizzo e complessità.

Tuttavia, se esiste un'ampia letteratura riguardante la stima dei consumi energetici per riscaldamento e per raffrescamento, altrettanto non può dirsi per gli altri usi energetici dell'edificio.

È anche vero che la stima dei consumi energetici per riscaldamento e per raffrescamento è quella che presenta le maggiori complessità, essendo legata al comportamento del sistema edificio-impianti, alle condizioni climatiche della località e della stagione e anche al comportamento dell'utente.

Più semplici le stime dei consumi energetici relativi agli altri usi ed agli elettrodomestici in generale, in conseguenza di apparecchiature per le quali si ha un andamento costante (o quasi) della potenza e quindi l'energia consumata può essere stimata più semplicemente conoscendo le ore di utilizzo dell'apparecchiatura stessa.

Con riferimento alle utenze residenziali, la legislazione vigente (Decreto Ministero dello Sviluppo Economico 26 giugno 2015) prevede per il calcolo della prestazione energetica negli edifici, ivi incluso l'utilizzo delle fonti rinnovabili, l'utilizzo delle norme tecniche nazionali [8] [9] [10] [11] [12], predisposte in conformità allo sviluppo delle norme EN a supporto della direttiva 2010/31/UE [13].

Tali norme riguardano unicamente il riscaldamento, il raffrescamento e la preparazione dell'acqua calda sanitaria; nulla è previsto per il calcolo dei fabbisogni energetici per la cottura dei cibi, per l'illuminazione e per tutti gli altri usi elettrici diversi dall'illuminazione.

L'impiego delle procedure individuate dal Decreto, di indubbia utilità per arrivare ad una valutazione standardizzata dei fabbisogni e ad una classificazione certificata dell'edificio dal punto di vista energetico, risulta spesso inefficace nel prevedere i consumi energetici reali di un edificio, fortemente vincolati al comportamento dell'utente. È per questo motivo che è stata sviluppata una procedura alternativa, mirante ad una stima più fedele dei consumi, utile allo scopo di questo studio che è la valutazione del potenziale di aggregabilità di un'utenza residenziale.

Nei paragrafi che seguono, saranno illustrate le modalità di calcolo dei diversi fabbisogni energetici con particolare attenzione ai fabbisogni di energia utile per riscaldamento e raffrescamento, per i quali verrà illustrato il procedimento previsto dalle Norme vigenti, che utilizza un metodo statico di simulazione, e il procedimento definito "alternativo", che utilizza invece un approccio dinamico semplificato.

Nell'approccio dinamico, il modello energetico dell'edificio è costruito sulla base dei dati forniti dall'utente rappresentati da superfici, esposizioni, trasmittanze, portate di ventilazione, periodi attività, ombreggiamenti, carichi termici interni. Il bilancio termico dell'aria interna, necessario a determinare i fabbisogni energetici dell'edificio, è implementato su base sub-oraria applicando il metodo alle differenze finite, chiamato anche "Heat Balance" (HB) o "Conduction Finite Difference" (CondFD) method. Una prima versione della procedura applicava invece una versione semplificata del metodo Radiant Time Series (RTS) [14][15][16][17][18] che si è dimostrata però meno accurata. Il metodo CondFD è uno dei più efficaci metodi dinamici per determinare il bilancio energetico di una struttura con capacità termica non trascurabile, dove

sono presenti importanti fenomeni di accumulo termico, che attenuano e ritardano i carichi termici effettivi rispetto alle cause che li hanno generati.

Tabella 4.1 – Principali differenze tra la procedura prevista dalle norme e la procedura alternativa relativamente agli input richiesti e all'impostazione del bilancio termico.

	Procedura prevista dalle Norme	Procedura alternativa
Temperatura interna di set-point invernale	Fissa h24 al valore imposto dalla norma per tutti i giorni della stagione.	Due possibili livelli di temperatura: uno per le ore di attività e uno per quelle di non attività. Il secondo può anche essere escluso.
Temperatura interna di set-point estivo	Fissa h24 al valore imposto dalla norma per tutti i giorni della stagione.	Un livello di temperatura per le ore di attività e "impianto off" nelle ore di non attività.
Temperatura esterna	Un valore medio per ogni mese di calcolo secondo la norma UNI 10349.	24 valori orari per ogni mese di calcolo.
Scambio per trasmissione attraverso l'involucro	Calcolato mediante la trasmittanza termica stazionaria ed i valori medi mensili di temperatura.	Calcolato dinamicamente per ogni ora dell'anno mediante metodi alle differenze finite che tengono in considerazione l'inerzia termica delle strutture.
Scambio per ventilazione e trattamenti dell'aria	Trattamenti dell'aria trascurati. Ventilazione calcolata come da norma, considerando una portata d'aria esterna fissa h24 per 365 giorni all'anno e la temperatura media mensile da norma UNI 10349.	Ventilazione e trattamenti dell'aria calcolati mediante l'effettiva trasformazione psicrometrica realizzata per ogni ora dell'anno. Un set-point di umidità relativa estivo e uno invernale. Portata d'aria variabile su 4 set-point invernali e 4 estivi relativi alle diverse condizioni di funzionamento dell'edificio. Possibilità di bypass sui recuperatori di calore per sfruttare il free-cooling.
Apporti termici interni dovuti alle persone	Valore fisso h24 per 365 giorni all'anno.	Due livelli impostabili: uno relativo alle ore di attività e uno a quelle di non attività.
Apporti termici interni dovuti alle apparecchiature	Valore fisso h24 per 365 giorni all'anno.	Ved. "Assorbimento elettrico". Sono selezionabili anche eventuali carichi non elettrici (es. fornelli a gas, ecc).
Assorbimenti elettrici	Considerato in modo approfondito solo quello relativo alla climatizzazione. Altri assorbimenti sono valutati in modo generico.	Considerato sia quello relativo alla climatizzazione che quello dovuto ad altre utenze (illuminazione, motori, apparecchi, ecc). 4 livelli di assorbimento impostabili per ogni utenza: 2 relativi alle ore di attività (di giorno e di notte) e 2 relativi a quelle di non attività (di giorno e di notte). I carichi elettrici vengono automaticamente tradotti in opportuni carichi termici. Viene anche calcolata la potenza reattiva per verificare la necessità di rifasamento.
Apporti termici solari	Un valore di irraggiamento medio per ogni mese di calcolo come riportato nella norma UNI 10349.	24 valori orari per ogni mese di calcolo. L'irraggiamento delle pareti trasparenti diventa carico termico istantaneo, quello delle pareti opache viene calcolato dinamicamente mediante il metodo alle differenze finite, che tiene in considerazione l'inerzia termica delle strutture.
Bilancio degli scambi termici invernali	Effettuato su base media mensile con una correzione degli apporti gratuiti in base al "fattore di utilizzazione" dipendente dall'inerzia termica dell'edificio.	Effettuato su base oraria in relazione al carico termico effettivo che tiene in considerazione l'inerzia termica delle strutture.
Bilancio degli scambi termici estivi	Effettuato su base media mensile con una correzione delle dispersioni favorevoli in base al "fattore di utilizzazione" dipendente dall'inerzia termica dell'edificio.	Effettuato su base oraria in relazione al carico termico effettivo che tiene in considerazione l'inerzia termica delle strutture.
Si rileva che la procedura prevista dalle norme contiene numerosi valori standardizzati necessari ad ottenere la ripetibilità delle certificazioni energetiche ma deleteri ai fini della descrizione esatta dell'edificio.		

Matematicamente ciò si traduce in un sistema di equazioni differenziali di complessa soluzione. Maggiori informazioni sul sistema risolutivo alle differenze finite sono riportate al paragrafo 4.2.3.1.

Per caratterizzare il comportamento degli impianti di riscaldamento, di raffrescamento e di preparazione dell'acqua calda sanitaria, l'approccio seguito è quello presentato dalla normativa vigente, non avendo ritenuto di implementare procedure alternative, in ragione della scarsa disponibilità (o della difficile reperibilità) di dati sul funzionamento degli impianti a condizioni diverse dalle condizioni nominali (parzializzazione, temperature operative diverse).

Il comportamento degli impianti solari termici o fotovoltaici è simulato attraverso procedure derivate in gran parte dalla norma tecnica UNI TS 11300-4:2016.

Per le altre apparecchiature elettriche comunemente presenti all'interno di un'abitazione, la stima dei consumi energetici è stata effettuata distinguendo le apparecchiature sottoposte ad etichettatura energetica, l'illuminazione e le altre apparecchiature.

Per le apparecchiature sottoposte ad etichettatura energetica (condizionatori d'aria, apparecchi di refrigerazione, lavatrici, asciugabiancheria, lavastoviglie, televisori) il consumo annuo è stato stimato sulla base della dimensione, della classe energetica e dell'uso giornaliero, seguendo le classi di consumo indicate nei diversi Regolamenti Europei vigenti [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25].

Per l'illuminazione il consumo è stato stimato sulla base del tipo di lampade installate, dell'occupazione prevista per i vari ambienti e di un uso medio giornaliero.

Per le altre apparecchiature il consumo è stato stimato sulla base di una tipologia media e di un uso medio giornaliero.

Per valutare l'efficacia di eventuali sistemi di automazione e controllo presenti all'interno dell'abitazione, si è fatto riferimento alla norma UNI EN15232 [30].

4.2 Fabbisogno di energia utile per riscaldamento e raffrescamento

4.2.1 Bilancio energetico invernale

Si procede a descrivere gli algoritmi di calcolo del bilancio termico invernale con le due metodologie: quella conforme alla normativa vigente e quella alternativa sperimentata dal presente lavoro di ricerca.

4.2.1.1 Bilancio energetico invernale secondo UNI TS 11300

L'impostazione della norma UNI TS 11300-1 prevede la stesura di un bilancio energetico mensile tra i diversi scambi termici che interessano l'edificio: trasmissione, ventilazione, apporti interni e apporti solari. Il bilancio viene differenziato per la stagione invernale e per quella estiva.

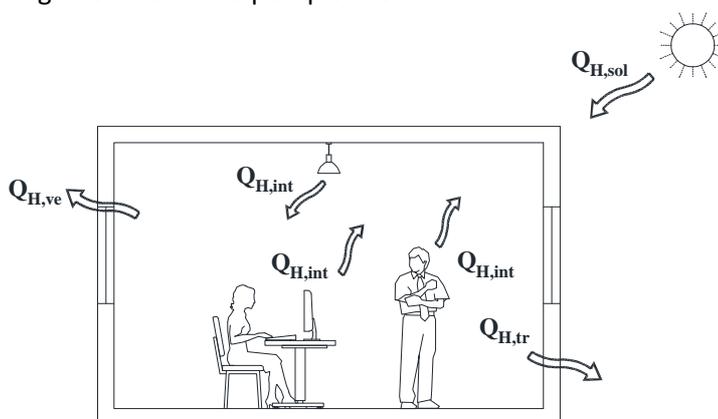


Figura 4.1 – Schematizzazione del bilancio energetico della stagione invernale finalizzato al calcolo del fabbisogno utile di energia per riscaldamento.

Nella stagione invernale assume la forma seguente:

$$Q_{H,cont,nd} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} \cdot Q_{H,gn} = (Q_{H,tr} + Q_{H,ve}) - \eta_{H,gn} \cdot (Q_{int} + Q_{sol}) \quad (4.1)$$

dove:

- $Q_{H,cont,nd}$ è il fabbisogno energetico per riscaldamento continuo;
- $Q_{H,ht}$ è lo scambio termico totale per trasmissione e ventilazione;
- $Q_{H,gn}$ sono gli apporti termici totali (interni e solari);
- $Q_{H,tr}$ è lo scambio termico totale per trasmissione nel caso di riscaldamento;
- $Q_{H,ve}$ è lo scambio termico per ventilazione nel caso di riscaldamento;
- $Q_{H,int}$ sono gli apporti termici interni;
- $Q_{H,sol}$ = sono gli apporti termici solari;
- $\eta_{H,gn}$ è il fattore di utilizzazione degli apporti termici.

Rispetto a quanto previsto dalla Norma UNI TS 11300, è stato introdotto il pedice “cont” per indicare che si tratta di un riscaldamento continuo e per differenziarlo dal riscaldamento discontinuo di cui si parlerà successivamente.

Nel bilancio si considerano integralmente le dispersioni per trasmissione e ventilazione, mentre gli apporti vengono limitati mediante il “fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti” che esprime il loro effettivo utilizzo in funzione della quantità di apporti rispetto alle dispersioni ed in funzione dell’inerzia termica dell’edificio. Più il rapporto apporti/dispersioni è alto, minore è il loro utilizzo, più l’inerzia termica dell’edificio è elevata, maggiore è il loro utilizzo.

Il fattore di utilizzazione degli apporti termici, a sua volta, assume la forma seguente:

$$\eta_{H,gn} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{a_H+1}} & \xrightarrow{se} \gamma_H > 0 \neq 1 \\ \frac{a_H}{a_H + 1} & \xrightarrow{se} \gamma_H = 1 \\ \frac{1}{\gamma_H} & \xrightarrow{se} \gamma_H < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

essendo:

$$\gamma_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}} \quad (4.3)$$

$$a_H = a_{H,0} + \frac{\tau}{\tau_{H,0}} \quad (4.4)$$

$$\tau = \frac{C_m}{H_{ve,adj} + H_{tr,adj}} \quad (4.5)$$

e dove:

$\eta_{H,gn}$ = Fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti nella stagione di riscaldamento.

- γ_H = Rapporto tra apporti gratuiti e dispersioni per trasmissione e ventilazione.
- a_H = Fattore di inerzia termica.
- $a_{H,0}$ = Fattore di inerzia termica di riferimento, fissato dalla norma pari a 1.
- $\tau_{H,0}$ = Costante di tempo di riferimento, fissata dalla norma a 15h.
- τ = Costante di tempo della zona termica, funzione della capacità termica e dei coefficienti globali di scambio termico per trasmissione e ventilazione.

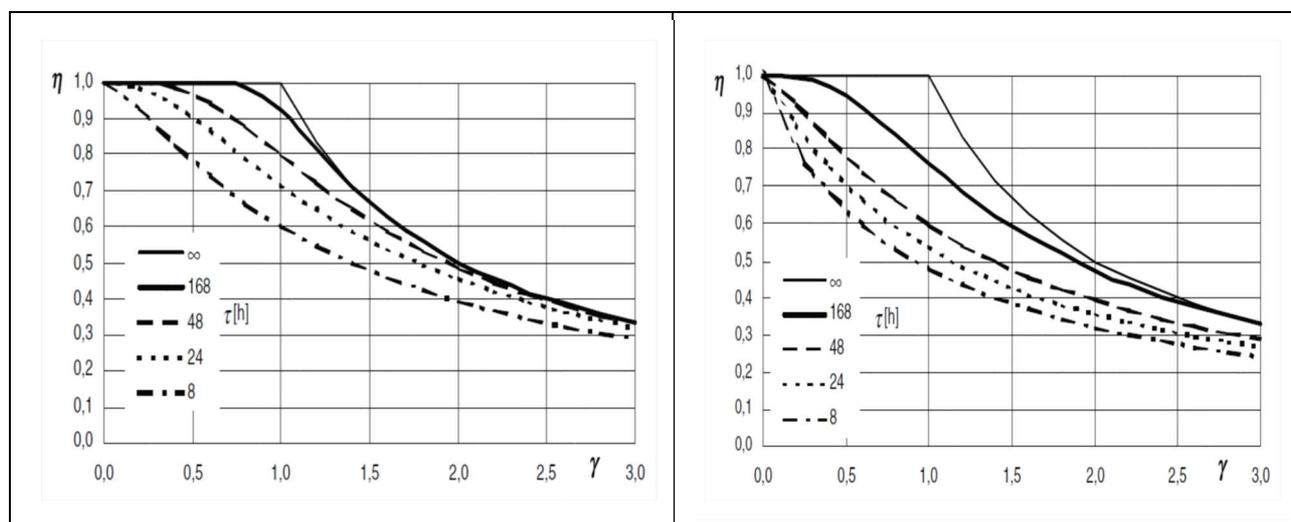


Figura 4.2 - Fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti in funzione della costante di tempo dell'edificio e del rapporto tra apporti gratuiti e dispersioni, per riscaldamento continuo (a sinistra) e per riscaldamento nelle sole ore diurne (a destra).

Viene effettuato un unico bilancio termico mensile, esteso a tutti i giorni della stagione invernale, per 24 ore al giorno, comprendente al suo interno le dispersioni per trasmissione e ventilazione a temperatura media e una parte degli apporti gratuiti.

4.2.1.2 Bilancio energetico invernale con metodo alternativo

L'elaborazione di un metodo alternativo scaturisce principalmente da due limitazioni della norma UNI TS 11300:

- l'impossibilità di valutare in modo adeguato un utilizzo intermittente dell'impianto di riscaldamento;
- l'ipotesi che la temperatura esterna sia sempre costante e pari alla temperatura media nell'arco delle 24 ore.

La prima limitazione, introdotta chiaramente per uniformare i calcoli sulla certificazione energetica, risulta assai pesante al fine di un'accurata valutazione energetica degli edifici reali. L'esercizio degli impianti è, infatti, molto spesso ridotto a poche ore al giorno e, a volte, non interessa tutti i giorni della settimana; ne consegue che i calcoli sviluppati secondo la procedura della Norma possono condurre ad una sovrastima dei fabbisogni energetici rispetto ai fabbisogni reali che, in alcuni casi, può superare il 50%.

La seconda limitazione non genera grandi differenze di calcolo (tra fabbisogni stimati e fabbisogni reali) nel caso di riscaldamento continuo, ma diventa importante nel caso in cui si abbia un utilizzo intermittente. Se, per esempio, l'edificio è utilizzato e riscaldato solo nelle ore diurne, gli scambi termici avvengono ad una differenza di temperatura ridotta rispetto a quella media giornaliera, soprattutto per quanto riguarda lo

scambio termico per ventilazione (assenza di volani termici). Per contro, durante la notte, gli scambi avvengono ad una differenza di temperatura maggiore rispetto alla media ma, non essendo attivo l'impianto di riscaldamento, anche la temperatura interna scende e l'energia persa tende a ridursi progressivamente. Naturalmente ciò comporta un raffreddamento notturno maggiore e quindi la necessità di maggiore energia al mattino per riportare la temperatura interna al set-point impostato. In ogni caso il consumo sarà inferiore rispetto ad un riscaldamento continuo.

Ciò significa che, anche per effetto di questa seconda limitazione, il calcolo secondo Norma tende a sovrastimare il carico termico.

Per ovviare alle due limitazioni descritte, il modello alternativo qui presentato prevede la definizione di due tipi di discontinuità nell'esercizio degli impianti:

1. interruzioni brevi giornaliere - quelle che si verificano all'interno delle giornate in cui la struttura è funzionante e si protraggono solo per poche ore tra un'accensione dell'impianto ed un'altra (per es. le interruzioni notturne);
2. interruzioni lunghe - quelle che si verificano per intere giornate in cui la struttura non è in funzione.

Ne consegue che il calcolo è strutturato su tre diversi periodi:

1. giorni di funzionamento struttura:
 - a. periodi di attività - ore in cui la struttura è pienamente funzionante e l'impianto di riscaldamento è quindi esercito al set-point di comfort; tale periodo è definito nelle formule col pedice "1" ed il set-point è "set1";
 - b. periodi di non attività - ore in cui la struttura non è funzionante e l'impianto di riscaldamento è quindi spento o esercito a set-point ridotto; tale periodo è definito nelle formule col pedice "2,f" ed il set-point è "set2";
2. giorni di non funzionamento struttura:
 - c. tutte le 24 ore dei giorni in cui la struttura non è funzionante e gli impianti sono quindi spenti o eserciti al medesimo set-point ridotto del periodo 1.b; tale periodo è definito nelle formule col pedice "2,nf" ed il set-point è "set2".

Per una migliore comprensione della divisione temporale, fondamentale per comprendere il funzionamento del procedimento, si riportano in fig. Figura 4.3 e Figura 4.4 due esempi.

	LUN	MAR	MER	GIO	VEN	SAB	DOM	FESTIVI
00-01								
01-02								
02-03								
03-04								
05-06								
06-07								
07-08								
08-09								
09-10								
10-11								
11-12								
12-13								
13-14								
14-15								
15-16								
16-17								
17-18								
18-19								
19-20								

20-21								
21-22								
22-23								
23-24								

Figura 4.3 - Esempio di suddivisione dei periodi per un edificio con occupazione settimanale continua.

	LUN	MAR	MER	GIO	VEN	SAB	DOM	FESTIVI
00-01								
01-02								
02-03								
03-04								
05-06								
06-07								
07-08								
08-09								
09-10								
10-11								
11-12								
12-13								
13-14								
14-15								
15-16								
16-17								
17-18								
18-19								
19-20								
20-21								
21-22								
22-23								
23-24								

Figura 4.4 - Esempio di suddivisione dei periodi per un edificio con occupazione settimanale non continua.

Questa suddivisione comporta quindi sia un diverso esercizio degli impianti, sia una diversa valutazione delle temperature di scambio termico.

L'impostazione dinamica prevede la stesura di un bilancio energetico su un intervallo di tempo massimo pari ad un'ora, che la procedura provvede a ridurre automaticamente (logica multirate) in base alla velocità di variazione delle temperature, al fine di densificare i calcoli nei periodi di maggiore variazione e risparmiare tempo nei periodi in cui le temperature restano pressoché costanti. E' possibile scegliere il numero massimo di time-step orari, che determina quindi il periodo minimo del bilancio termico. Il bilancio comprende i diversi scambi termici che interessano l'edificio: trasmissione, ventilazione, apporti interni e apporti solari. Gli scambi sono suddivisi tra "sensibili" e "latenti" in quanto viene effettuato un calcolo puntuale delle trasformazioni psicrometriche.

Sia per la stagione invernale che per quella estiva i bilanci assumono la forma seguente:

$$Q_{bil,sens} = Q_{tr+sol,o} + Q_{ve,sens} + Q_{int,sens} + Q_{sol,t} + Q_{core} + Q_{restart} \tag{4.6}$$

$$Q_{bil,lat} = Q_{ve,lat} + Q_{int,lat} \tag{4.7}$$

dove:

- $Q_{bil,sens}$ è il bilancio termico sensibile della zona termica per l'ora considerata (la convenzione dei segni sui flussi termici è "positiva - entrante");
- $Q_{tr+sol,o}$ è lo scambio termico sensibile per trasmissione, che comprende al suo interno anche l'apporto solare proveniente da componenti opachi e l'extra-flusso per radiazione infrarossa verso la volta celeste;
- $Q_{ve,sens}$ è lo scambio termico sensibile per ventilazione;
- $Q_{int,sens}$ sono gli apporti termici interni sensibili;
- $Q_{sol,t}$ sono gli apporti termici solari provenienti da componenti trasparenti;
- Q_{core} è lo scambio termico sensibile che avviene con le strutture interne dell'edificio (dovuto alla variazione di temperatura interna);
- $Q_{restart}$ è l'apporto termico sensibile virtuale dovuto alla differenza tra la temperatura della zona termica e la temperatura di set-point. È necessario per simulare l'effetto energetico delle fluttuazioni di temperatura interna sopra e sotto il set-point di riscaldamento. Se la temperatura interna si trova al di sopra del set-point (con impianto acceso) è un apporto positivo, se si trova al di sotto (con impianto acceso) è negativo, se l'impianto è spento $Q_{restart}$ è nullo e la temperatura dell'aria interna evolve in modo spontaneo.
- $Q_{bil,lat}$ è il bilancio termico latente della zona termica per l'ora considerata (la convenzione dei segni sui flussi termici è "positiva - entrante");
- $Q_{ve,lat}$ è il calore latente dovuto alla ventilazione (naturale o meccanica);
- $Q_{int,lat}$ è il calore latente dovuto agli apporti interni.

Nel caso in cui la ventilazione meccanica esterna è fornita mediante un'unità di trattamento aria, la componente di carico di ventilazione non compare nelle equazioni (4.6) e (4.7) ma all'interno dei bilanci termici dell'UTA.

Nella stagione invernale, se i bilanci delle equazioni (4.6) e (4.7) risultano positivi, significa che il calore entrante supera quello uscente ed il carico termico risulta nullo. In caso contrario è presente un carico termico da soddisfare attraverso gli impianti.

Il calcolo del carico termico netto non si esaurisce dal calcolo delle equazioni (4.6) e (4.7), tali valori rappresentano esclusivamente i target energetici che il sistema di emissione deve cercare di soddisfare. Pur parlando di carico termico netto, quindi al netto delle inefficienze dei sottosistemi impiantistici, non è possibile prescindere dalla configurazione impiantistica adottata, in quanto il carico dipende dalle trasformazioni psicrometriche svolte che a loro volta dipendono dalla configurazione impiantistica.

La procedura simula ogni sistema di emissione come un sistema ad aria, con opportuni valori delle portate d'aria di ricircolo e di prelievo dall'esterno. I valori variano in base al tipo di emissione, alle temperature del fluido termovettore, alla quota di ricircolo, alla presenza di recuperatori di calore, al tipo di ventilatori presenti, ecc. Per ogni time-step, a seconda del sistema di emissione presente, attraverso la procedura si determina il punto di immissione necessario per soddisfare le richieste termiche determinate dalle equazioni (4.6) e (4.7). Se il sistema non è in grado di controllare l'umidità relativa (es. radiatori, fancoil a due tubi, pavimento radiante, ecc.), il punto di immissione prevedrà la sola compensazione della componente sensibile, in caso contrario considererà anche la correzione dell'umidità, sia in umidificazione che in deumidificazione.

Una volta determinato il punto di immissione, la procedura costruisce la reale trasformazione psicrometrica che viene realizzata dai sistemi impiantistici, in base ai parametri ambientali e ai parametri specifici delle

macchine presenti. Viene poi ricavata l'energia termica e frigorifera necessaria alla trasformazione che costituisce il carico termico netto invernale $Q_{H,nd}$ o estivo $Q_{C,nd}$.

Le trasformazioni psicrometriche realizzate sono simili a quelle riportate in Figura 4.5.

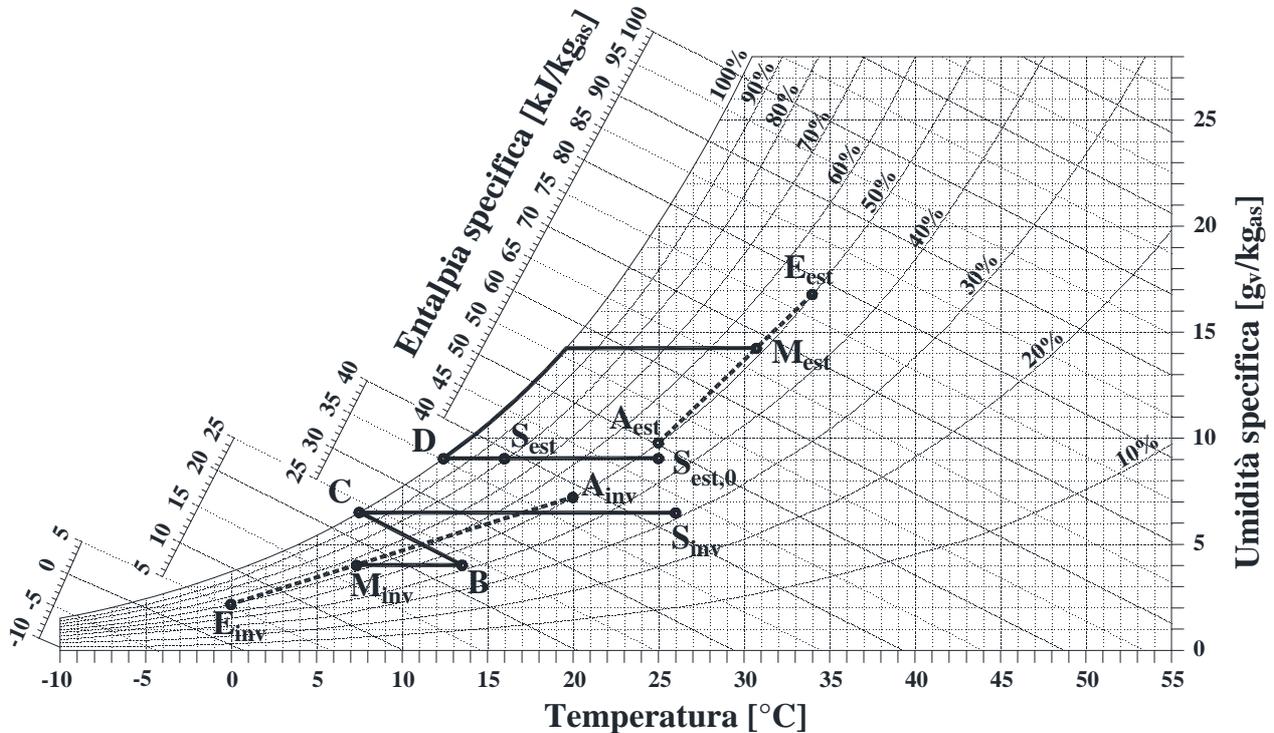


Figura 4.5 - Esempio di trasformazioni psicrometriche invernali ed estive realizzabili.

Gli schemi impiantistici che possono essere modellati vanno dalla semplice unità interna in grado di effettuare solo riscaldamento e/o raffreddamento con deumidificazione (radiatore, espansione diretta, pavimento radiante), fino alle unità di trattamento aria complete, in grado di realizzare ogni forma di trasformazione anche controllo dell'umidità relativa (umidificazione e deumidificazione controllata), post-riscaldamento, recupero di calore, ricircolo, ecc.

L'impostazione appena descritta considera in modo nativo e naturale eventuali variazioni orarie o sub-orarie dei parametri ambientali, così come gli effetti dell'inerzia termica delle strutture e non necessita quindi di un metodo per approssimare tali effetti, come l'utilizzo del fattore di utilizzazione degli apporti termici nell'equazione (4.2).

4.2.2 Bilancio energetico estivo

4.2.2.1 Bilancio energetico estivo con metodo normativo

Nella stagione estiva il bilancio energetico assume la forma riportata in (4.8).

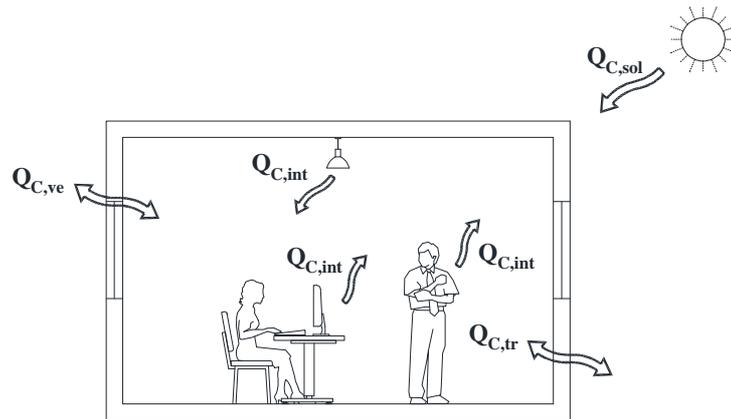


Figura 4.6 – Schematizzazione del bilancio energetico della stagione estiva finalizzato al calcolo del fabbisogno utile di energia per raffreddamento.

$$Q_{C,cont,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} \cdot Q_{C,ht} = (Q_{int} + Q_{sol}) - \eta_{C,ls} \cdot (Q_{C,tr} + Q_{C,ve}) \quad (4.8)$$

dove:

- $Q_{C,cont,nd}$ = Fabbisogno energetico per raffreddamento continuo.
- $Q_{C,gn}$ = Apporti termici totali (interni e solari).
- $Q_{C,ht}$ = Scambio termico totale per trasmissione e ventilazione.
- $Q_{C,tr}$ = Scambio termico totale per trasmissione nel caso di raffreddamento.
- $Q_{C,ve}$ = Scambio termico per ventilazione nel caso di raffreddamento.
- $Q_{C,int}$ = Apporti termici interni.
- $Q_{C,sol}$ = Apporti termici solari.
- $\eta_{C,ls}$ = Fattore di utilizzazione delle dispersioni termiche.

Anche per il bilancio estivo è stato introdotto il pedice “cont” per indicare che si tratta di un riscaldamento continuo e per differenziarlo dal riscaldamento discontinuo di cui si parlerà successivamente.

Si considerano integralmente gli apporti interni e solari, mentre gli scambi per trasmissione e ventilazione vengono moltiplicati per il “fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti” che esprime il loro effettivo utilizzo in funzione del loro segno (in estate tali scambi possono innalzare o abbassare il carico termico), della quantità di apporti rispetto alle dispersioni ed in funzione dell’inerzia termica dell’edificio. Se gli scambi per trasmissione e ventilazione accrescono i carichi termici estivi essi vengono considerati integralmente. In caso contrario più il rapporto apporti/dispersioni è alto, maggiore è il loro utilizzo, più l’inerzia termica dell’edificio è elevata, maggiore è il loro utilizzo.

Il fattore di utilizzazione degli apporti, a sua volta, assume la forma seguente:

$$\eta_{C,ls} = \begin{cases} \frac{1 - \gamma_C^{-a_C}}{1 - \gamma_C^{-(a_C+1)}} & \xrightarrow{se} \gamma_C > 0 \quad \gamma_C \neq 1 \\ \frac{a_C}{a_C + 1} & \xrightarrow{se} \gamma_C = 1 \\ 1 & \xrightarrow{se} \gamma_C < 0 \end{cases} \quad (4.9)$$

essendo:

$$\gamma_C = \frac{Q_{C,gn}}{Q_{C,ls}} = - \frac{Q_{C,gn}}{Q_{C,ht}} \quad (4.10)$$

$$a_C = a_{C,0} + \frac{\tau}{\tau_{C,0}} - k \frac{A_w}{A_f} \quad (4.11)$$

$$\tau = \frac{C_m}{H_{ve,adj} + H_{tr,adj}} \quad (4.12)$$

e dove:

- $\eta_{C,ls}$ = Fattore di utilizzazione delle dispersioni per trasmissione e ventilazione nella stagione di raffrescamento.
- γ_C = Rapporto tra apporti gratuiti e scambi per trasmissione e ventilazione.
- a_C = Fattore di inerzia termica².
- $a_{C,0}$ = Fattore di inerzia termica di riferimento, fissato dalla norma pari a 8,1.
- $\tau_{C,0}$ = Costante di tempo di riferimento, fissata dalla norma a 17h.
- k = Costante di riferimento, fissata dalla norma a 13.
- A_w = Superficie finestrata della zona termica.
- A_f = Superficie utile in pianta della zona termica.
- τ = Costante di tempo della zona termica, funzione della capacità termica e dei coefficienti globali di scambio termico per trasmissione e ventilazione durante il periodo di riferimento.

Viene effettuato un unico bilancio termico mensile, esteso a tutti i giorni della stagione estiva, per 24 ore al giorno, comprendente al suo interno gli apporti gratuiti e, per quanto riguarda gli scambi per trasmissione e ventilazione, se questi costituiscono degli apporti di calore vengono considerati integralmente, altrimenti se costituiscono delle dispersioni vengono considerati in parte.

² La formula (4.20) è ripresa dalla ISO 13790 12.2.1.2 e non dalla UNI TS 11300-1 15.1.2. Al denominatore devono essere poste le perdite, oppure gli apporti cambiati di segno.

4.2.2.2 Bilancio energetico estivo con metodo alternativo

L'elaborazione di un metodo alternativo scaturisce dalle medesime limitazioni di cui al paragrafo 4.2.1.2. L'esercizio degli impianti, in particolare quelli di climatizzazione estiva, è infatti molto spesso ridotto a poche ore al giorno, il che conduce sicuramente ad un risparmio rispetto all'esercizio continuo a cui si riferisce la norma.

Inoltre, il fatto che la norma consideri la temperatura esterna sempre costante durante la giornata, conduce ad un forte errore sui risultati, al contrario di quanto non avvenga per la stagione invernale. Infatti nel clima temperato-caldo in cui si trova il nostro Paese l'andamento estivo delle temperature nelle 24 ore è oscillante intorno alla temperatura di set-point interna. Ciò significa che nelle ore diurne gli scambi per trasmissione e ventilazione costituiscono un apporto termico, mentre nelle ore notturne essi rappresentano una dispersione termica. Gli effetti reali di trasmissione e ventilazione sono quindi: un incremento del carico diurno ed un decremento di quello notturno che può essere sfruttato per esempio attraverso sistemi di *free-cooling*. Appare chiaro quindi che il calcolo della Norma, che considera una media giornaliera della temperatura esterna, conduca ad errori importanti. Infatti, capita quasi sempre che la temperatura media esterna sia quasi identica a quella di set-point, conducendo quindi ad uno scambio termico per trasmissione e ventilazione quasi irrilevante.

Per ovviare a tali limitazioni, il modello alternativo qui presentato prevede l'introduzione di discontinuità durante i periodi di raffrescamento. Per i dettagli sui periodi consultare la trattazione invernale al paragrafo 4.2.1.2, concettualmente identica a quella estiva.

Il metodo di calcolo alternativo permette quindi di valutare efficacemente svariati effetti trascurati dalla normativa, come l'inerzia termica effettiva, l'apporto solare discontinuo, gli apporti interni variabili nel tempo, l'energia legata ai trattamenti di deumidificazione, l'effetto benefico di una ventilazione differenziata per il giorno e per la notte, sfruttando il *free-cooling*.

4.2.3 Scambio termico per trasmissione invernale

Lo scambio termico per trasmissione si compone dello scambio termico verso l'aria esterna, verso il terreno e verso spazi non climatizzati. Fanno parte dello scambio per trasmissione anche l'extra-flusso dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste e l'apporto termico solare entrante per trasmissione dai componenti opachi.

4.2.3.1 Equazione generale dello scambio termico per trasmissione invernale con metodo normativo

La norma UNI TS 11300-1 al paragrafo 5.2 definisce la seguente equazione generale per lo scambio termico per trasmissione:

$$Q_{H,tr,cont} = H_{tr,adj} (\theta_{H,int,set} - \theta_e) t + \left\{ \sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \right\} t \quad (4.13)$$

dove:

- $Q_{H,tr,cont}$ = Flusso di calore scambiato per trasmissione tra l'ambiente riscaldato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento continuo dell'impianto di riscaldamento.
- $H_{tr,adj}$ = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.
- $\theta_{H,int,set}$ = Temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata.
- θ_e = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno (da norma UNI 10349).
-

$F_{r,k}$ = Fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste.

- $\Phi_{r,mm,k}$ = Extra-flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste del componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo.
- t = Durata in ore del mese considerato, 24 ore al giorno, 7 giorni su 7.

La modalità di calcolo proposta conferma le considerazioni fatte nel paragrafo 4.2.1.2: il calcolo si basa su una temperatura media mensile dell'aria esterna e su un funzionamento continuo dell'impianto di riscaldamento.

Il calcolo dei diversi coefficienti verrà illustrato nei paragrafi riguardanti i parametri di trasmissione.

4.2.3.2 Equazione generale dello scambio termico per trasmissione invernale con metodo alternativo

L'approccio alternativo, come sottolineato ampiamente al paragrafo 4.2.1.2, fornisce una metodologia di calcolo che abbatta i vincoli di "riscaldamento continuo" e di "temperatura esterna costante".

Il metodo si fonda direttamente sulla risoluzione numerica dell'equazione generale dello scambio termico tramite schemi alle differenze finite.

L'equazione di Fourier si presenta come un'equazione differenziale del secondo ordine:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.14)$$

dove:

- $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$ = Derivata parziale seconda della temperatura rispetto allo spazio.
- $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ = Derivata parziale prima della temperatura rispetto al tempo
- $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ = Diffusività termica [m²/s] = rapporto tra la conducibilità λ del materiale [W/mK] e il prodotto tra la densità ρ [kg/m³] ed il calore specifico c_p [J/kgK].

La risoluzione analitica dell'equazione è complessa e mal si adatta ad una procedura informatica. Per questo motivo il problema dello scambio termico dinamico attraverso una parete viene normalmente risolto con metodi numerici. Il metodo alle differenze finite, talvolta chiamato "Heat Balance" (HB) o "Conduction Finite Difference" (CondFD) method è il più aderente alla realtà tra i possibili metodi risolutivi esistenti. Non presenta le problematiche dei metodi a funzione di trasferimento "Conduction Transfer Function Method" (CTF o TFM) e tantomeno al metodo di quelli a risposta impulsiva "Radiant Time Series" (RTS) legate ai componenti con grande massa per i quali tali metodi presentano inaccurately e instabilità. Il CondFM è anche il più flessibile e si adatta a simulare anche materiali speciali come quelli a cambiamento di fase (PCM), sebbene non siano ancora presenti nell'attuale versione della procedura.

Per la risoluzione è stato scelto uno schema alle differenze finite in avanti di tipo esplicito, schematizzabile come in figura 4.6.

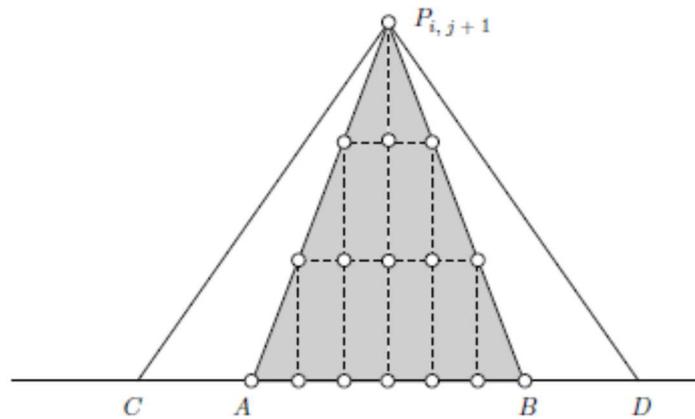


Figura 4.7 – Schema esplicito alle differenze finite utilizzato per la risoluzione dello scambio termico dinamico delle pareti. Sull'asse delle ascisse sono presenti gli spessori e sulle ordinate i tempi.

La discretizzazione spaziale della parete è stata effettuata in modo semplificato, suddividendola in tre parti non uguali. Due zone superficiali di spessore molto ridotto (circa il 3% ciascuno della capacità della parete), la cui capacità termica è stata accorpata rispettivamente a quella dello spazio interno ed esterno, ed una zona interna che contiene in resto della capacità termica. Le zone superficiali sono state introdotte per modellare correttamente l'effetto inerziale degli strati superficiali delle pareti, che partecipano attivamente alla stabilizzazione della temperatura degli ambienti interni. Ogni parete ha una temperatura interna associata alla capacità termica interna. Tale discretizzazione è rappresentabile anche graficamente sotto forma di circuito elettrico equivalente mediante la figura 4.7.

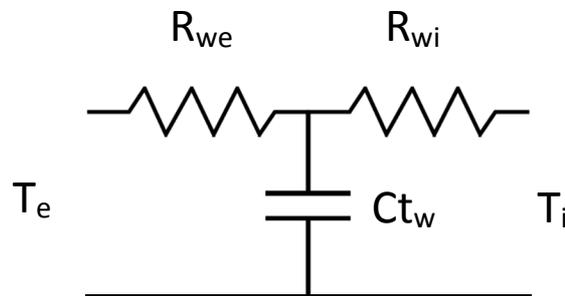


Figura 4.8 – Schema elettrico equivalente alla modellazione termica della parete. R_{we} e R_{wi} rappresentano rispettivamente le resistenze termiche $[W/m^2K]$ della porzione interna ed esterna della parete. C_{tw} rappresenta la capacità termica della parte interna della parete $[J/kgK]$. T_e e T_i rappresentano rispettivamente le temperature dell'ambiente esterno ed interno $[^{\circ}C]$.

Tutto ciò considerato, l'equazione 4.14 può essere riscritta alle differenze finite, come riportato in 4.15. Per semplicità di trattazione si è ipotizzato che gli spessori e le resistenze termiche delle due porzioni interne ed esterne siano uguali. In generali tali valori non sono uguali e sono necessarie alcune modifiche alle equazioni.

$$\frac{\theta_{x+\Delta x,t} - 2\theta_{x,t} + \theta_{x-\Delta x,t}}{\Delta x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\theta_{x,t+\Delta t} - \theta_{x,t}}{\Delta t} \quad (4.15)$$

dove:

- Il pedice 'x' si riferisce allo spessore x-esimo rispetto alla superficie della parete.
- Il pedice ' Δx ' si riferisce alla distanza tra due diversi punti di discretizzazione, in questo caso è pari alla metà dello spessore della parete, escluse le porzioni superficiali.
- Il pedice 't' si riferisce all'istante di tempo in cui avviene il calcolo.

- Il pedice ' Δt ' si riferisce all'intervallo di calcolo (time-step).

La 4.15 può essere risolta agevolmente per trovare l'incognita cercata:

$$\theta_{x,t+\Delta t} = \theta_{x,t} + \frac{\Delta t}{Ct_s} \left(\frac{\theta_{x+\Delta x,t} - 2\theta_{x,t} + \theta_{x-\Delta x,t}}{R} \right) \quad (4.16)$$

dove:

- Ct_s è la capacità termica superficiale della parete, $Ct_s = \rho c_p \Delta x$ in [J/m²K].
- R è la resistenza termica di una porzione di parete, $R = \frac{\Delta x}{\lambda}$ in [m²K/W].

Dalla 4.16 si può desumere che la temperatura centrale della parete all'istante successivo è pari alla temperatura all'istante precedente a cui viene sommato un incremento di temperatura che dipende dai flussi termici che vengono scambiati con l'interno e con l'esterno (attraverso le resistenze termiche) e dalla capacità termica della parete che ne determina il grado di inerzia.

Particolare attenzione è fatta per evitare che il time-step sia sempre sufficientemente inferiore alla costante di tempo termica della parete $\tau = R \cdot Ct_s$ [s] per evitare instabilità del metodo di calcolo e temperature irrealistiche.

Per quanto riguarda lo scambio termico verso il terreno, si è adottata una metodologia del tutto simile a quanto appena illustrato, con alcune piccole modifiche. La prima consiste nel fatto che la temperatura del terreno, in virtù della sua stabilità, viene considerata costante per ciascun mese di calcolo. La seconda consiste nel fatto di eliminare la resistenza termica superficiale esterna a contatto col terreno. La terza prevede di includere una quota della massa del terreno all'interno della capacità termica della parete, per prendere in considerazione il fatto che la parte più superficiale del terreno partecipa attivamente agli scambi termici con l'edificio.

4.2.4 Scambio termico per trasmissione estivo

Lo scambio termico estivo segue logiche del tutto analoghe a quello invernale.

4.2.4.1 Equazione generale dello scambio termico per trasmissione estivo con metodo normativo

La norma UNI TS 11300-1 definisce la seguente equazione generale per lo scambio termico per trasmissione:

$$Q_{C,tr,cont} = H_{tr,adj} (\theta_{int,set,C} - \theta_e) t + \left\{ \sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \right\} t \quad (4.17)$$

dove:

- $Q_{C,tr,cont}$ = Flusso di calore scambiato per trasmissione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento continuo dell'impianto di riscaldamento.
- $H_{tr,adj}$ = Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto delle effettive differenze di temperatura interno-esterno delle varie superfici che delimitano lo spazio.

- $\theta_{C,int, set}$ = Temperatura interna di regolazione per il raffrescamento della zona considerata.
- θ_e = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno (da norma UNI 10349).
- $F_{r,k}$ = Fattore di forma tra il componente edilizio k-esimo e la volta celeste.
- $\Phi_{r,mn,k}$ = Extra-flusso termico dovuto alla radiazione infrarossa verso la volta celeste del componente edilizio k-esimo, mediato sul tempo.
- t = Durata in ore del mese considerato, 24 ore al giorno, 7 giorni su 7.

La modalità di calcolo proposta conferma le considerazioni fatte nel paragrafo 4.2.1.1: il calcolo si basa su una temperatura media mensile dell'aria esterna e su un funzionamento continuo dell'impianto di raffrescamento.

Il calcolo dei diversi coefficienti verrà illustrato nei paragrafi riguardanti i parametri di trasmissione.

4.2.4.2 Equazione generale dello scambio termico per trasmissione estivo con metodo alternativo

L'approccio alternativo, come sottolineato ampiamente al paragrafo 4.2.1.2, fornisce una metodologia di calcolo che abbatta i vincoli di "raffrescamento continuo" e di "temperatura esterna costante".

La procedura di calcolo non differisce da quanto già esposto al punto 4.2.3.2.

4.2.5 Coefficienti di scambio termico per trasmissione

Gli scambi per trasmissione, descritti nei paragrafi 4.2.3 e 4.2.4, si basano sulla conoscenza dei coefficienti di scambio termico per trasmissione dei vari componenti dell'edificio. Essi definiscono la tendenza dell'involucro edilizio a permettere il passaggio di calore in presenza di una differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno.

La procedura proposta fornisce in questo caso un calcolo conforme alla norma UNI TS 11300-1.

4.2.5.1 Coefficiente di scambio termico per trasmissione con l'aria esterna

Si riporta la formula generale descritta dalla norma ISO 13790, riadattata considerando i ponti termici come incremento percentuale del flusso termico:

$$H_D = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \psi_k + \sum_j \chi_j \cong \sum_i A_i U_i (1 + PT) \quad (4.18)$$

dove:

- H_D = Coefficiente di scambio termico per trasmissione verso gli ambienti esterni della zona considerata.
- A_i = Area del componente edilizio 'i' confinante con l'esterno [m²].
- U_i = Trasmittanza termica del componente edilizio 'i' confinante con l'esterno.
- l_k = Lunghezza del ponte termico lineare [m].
- ψ_k = Trasmittanza termica lineica del ponte termico 'k'.
- χ_j = Trasmittanza termica puntuale del ponte termico 'j'.
- PT = Fattore percentuale approssimato di incremento degli scambi termici dovuti alla presenza di ponti termici.

Il calcolo (4.18) deve essere esteso a tutte le superfici, trasparenti ed opache, confinanti con l'esterno e quindi sottoposte alla stessa differenza di temperatura $\Delta\theta$.

4.2.5.2 Coefficiente di scambio termico per trasmissione con il terreno

Si riporta la formula generale descritta dalla norma UNI TS 11300, riadattata considerando i ponti termici come incremento percentuale del flusso termico:

$$H_{g,adj} = b_{tr,g} A U_i (1 + PT) \tag{4.19}$$

dove:

- $H_{g,adj}$ = Coefficiente di scambio termico per trasmissione verso il terreno della zona considerata.
- $b_{tr,g}$ = Fattore di correzione dello scambio termico dovuto al $\Delta\theta$ ridotto presente nello scambio termico col terreno.
- A_i = Area del componente edilizio 'i' confinante con il terreno.
- U_i = Trasmittanza termica del componente edilizio 'i' confinante con il terreno.
- PT = Fattore percentuale approssimato di incremento degli scambi termici dovuti alla presenza di ponti termici.

Tabella 4.2 – Fattore di correzione dello scambio termico col terreno($b_{tr,g}$).

Ambiente confinante	$b_{tr,g}$
Pavimento controterra	0,45
Parete controterra	0,45
Pavimento su vespaio aerato	0,80

Il calcolo (4.19) deve essere esteso a tutte le superfici confinanti con il terreno.

Va sottolineato che il calcolo mediante i coefficienti $b_{tr,g}$ consigliati dalla norma conduce a errori sostanziali soprattutto nel periodo estivo, quando la temperatura del terreno è tipicamente inferiore a quella esterna.

Per questo motivo, nel calcolo dinamico inserito nella procedura di calcolo, non vengono utilizzati i coefficienti $b_{tr,g}$ ma viene utilizzata direttamente la temperatura media mensile del terreno ricavata dai dati delle temperature dell'aria esterna. Il processo per ricavare tali temperature (non presenti in normativa) ha previsto la consultazione dei dati di temperatura del terreno degli archivi IWEC e IG DG per un campione rappresentativo di città italiane ed il successivo utilizzo di tecniche di regressione numerica.

4.2.5.3 Coefficiente di scambio termico per trasmissione con spazi non climatizzati

L'equazione generale del coefficiente di scambio termico per trasmissione verso locali non climatizzati è la seguente:

$$H_{U,adj} = \sum_x b_{tr,x} A_x U_x \tag{4.20}$$

dove:

- $H_{U,adj}$ = Coefficiente di scambio termico per trasmissione verso locali non climatizzati.
- $b_{tr,x}$ = Fattore di correzione dello scambio termico dovuto al diverso $\Delta\theta$ presente nello scambio termico coi locali non climatizzati.
- A_x = Area del componente edilizio 'x' confinante con spazi non climatizzati.
- U_x = Trasmittanza termica del componente edilizio 'x' confinante con spazi non climatizzati.

Il punto più delicato è chiaramente il calcolo del coefficiente $b_{tr,x}$. La procedura al momento ricalca le indicazioni del prospetto 5 della norma UNI TS 11300-1, che riporta i valori consigliati del fattore di correzione $b_{tr,x}$:

Tabella 4.3 – Fattore di correzione dello scambio termico con spazi non climatizzati ($b_{tr,x}$).

Ambiente confinante	$b_{tr,x}$
Ambiente	
- con una parete esterna	0,4
- senza serramenti e con almeno due pareti esterne	0,5
- con serramenti esterni e con almeno due pareti esterne (per esempio autorimesse)	0,6
- con tre pareti esterne (per esempio vani scala esterni)	0,8
Piano interrato o seminterrato	
- senza finestre o serramenti esterni	0,5
- con finestre o serramenti esterni	0,8
Sottotetto	
- tasso di ventilazione del sottotetto elevato (per esempio tetti ricoperti con tegole o altri materiali di copertura discontinua) senza rivestimento con feltro o assito	1,0
- altro tetto non isolato	0,8
- tetto isolato	1,0
Aree interne di circolazione (senza muri esterni e con tasso di ricambio d'aria minore di $0,5 \text{ h}^{-1}$)	0,0
Aree interne di circolazione liberamente ventilate (rapporto tra l'area delle aperture e volume dell'ambiente maggiore di $0,005 \text{ m}^2/\text{m}^3$)	1,0

La norma definisce una serie di locali non climatizzati standard di cui riporta il valore medio annuale del fattore di correzione.

Va sottolineato che il calcolo mediante i coefficienti $b_{tr,x}$ consigliati dalla norma conduce a errori sostanziali soprattutto per i locali non climatizzati esposti a forte radiazione solare. In questi locali, infatti, la temperatura può assumere facilmente valori esterni al range θ_i - θ_e , soprattutto nel periodo estivo. Questo sistema è quindi valido solo per un'analisi di massima di locali non molto irraggiati.

4.2.5.4 Extra flusso per radiazione infrarossa verso la volta celeste

L'extra-flusso viene definito come il flusso di calore dovuto allo scambio radiativo infrarosso tra le superfici esterne dell'edificio e la volta celeste.

Il calcolo adottato segue fedelmente quello della norma UNI TS 11300 -1 (paragrafo 11.4) riportato qui di seguito:

$$\sum_k F_{r,k} \Phi_{r,mn,k} \quad (4.21)$$

dove:

- $F_{r,k}$ = Fattore di forma tra il componente k-esimo e la volta celeste.
- $\Phi_{r,mn,k}$ = Extra flusso del componente k-esimo.

A loro volta:

$$F_r = F_{sh,ob,dif} (1 + \cos S) / 2 \quad (4.22)$$

dove:

- $F_{sh,ob,dif}$ = Fattore di shading del componente edilizio rispetto alla radiazione diffusa.
- S = Angolo di inclinazione del componente rispetto al piano orizzontale.

$$\Phi_r = R_{se} U_C A_C h_r \Delta\theta_{er} \quad (4.23)$$

dove:

- R_{se} = Resistenza superficiale esterna.
- U_C = Trasmittanza termica.
- A_C = Area del componente edilizio.
- h_r = Fattore di scambio termico per irraggiamento. La norma consiglia di valutarlo in base all'espressione (31) riportata sulla norma.
- $\Delta\theta_{er}$ = Differenza di temperatura tra l'aria esterna e la temperatura apparente del cielo. La norma consiglia un valore pari a $18 - 51,6 e^{-pv,e/1000}$.

4.2.6 Scambio termico per ventilazione invernale

Lo scambio termico per ventilazione viene modellato sempre su base mensile e si compone dello scambio termico verso l'aria esterna e verso spazi non climatizzati.

Di seguito sono illustrate le due modalità di calcolo: quella conforme alla normativa UNI TS 11300 e quella alternativa sviluppata nel presente lavoro.

4.2.6.1 Equazione generale dello scambio termico per ventilazione invernale con metodo normativo

La norma UNI TS 11300-1 definisce la seguente equazione generale per lo scambio termico per trasmissione:

$$Q_{H,ve} = H_{ve,adj} (\theta_{int,set,H} - \theta_e) t \quad (4.24)$$

Il significato dei simboli è il seguente:

- $Q_{H,ve}$ = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento continuo dell'impianto di riscaldamento.
- $H_{ve,adj}$ = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.
- $\theta_{int,set,H}$ = Temperatura interna di regolazione per il riscaldamento della zona considerata (riscaldamento continuo).
- θ_e = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno (da norma UNI 10349).

Il modello calcola lo scambio termico per ventilazione considerando una temperatura interna fissa a set-point 1, una temperatura esterna media mensile fissa, ma una portata di ventilazione che viene calcolata tenendo in considerazione l'effettivo apporto di ventilazione naturale e/o meccanica.

Il calcolo delle portate di ventilazione viene effettuato in base al paragrafo 12 della norma UNI TS 11300-1:2014.

Il calcolo dell'energia legata all'umidificazione viene calcolata come al paragrafo 5.3 della norma UNI TS 11300-1:2014.

4.2.6.2 Equazione generale dello scambio termico per ventilazione invernale con metodo alternativo

L'approccio alternativo, come sottolineato ampiamente al paragrafo 4.2.1.2, fornisce una metodologia di calcolo che abbatta i vincoli di "riscaldamento continuo" e di "temperatura esterna costante". La metodologia di calcolo prevede anche il calcolo esatto delle trasformazioni psicrometriche e della relativa energia. Per ventilazione naturale o meccanica senza trattamenti, lo scambio termico viene calcolato ad ogni intervallo di tempo in base alle temperature e alle portate effettive secondo la formula seguente.

$$Q_{H,ve} = H_{ve}(\theta_i - \theta_e)t_{step} \quad (4.25)$$

dove:

- $H_{ve,adj}$ = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata all'istante di calcolo che tiene conto dell'effettiva portata di ventilazione.
- θ_e = Temperatura dell'ambiente esterno all'istante di calcolo.
- θ_i = Temperatura dell'ambiente interno all'istante di calcolo.
- t_{step} = Durata del time-step di calcolo.

4.2.7 Scambio termico per ventilazione estivo

Lo scambio per ventilazione estivo viene calcolato con modalità simile a quelli invernale.

Di seguito sono illustrate le due modalità di calcolo: quella conforme alla normativa UNI TS 11300 e quella alternativa sviluppata nel presente lavoro.

4.2.7.1 Equazione generale dello scambio termico per ventilazione estivo con metodo normativo

La norma UNI TS 11300-1:2014 paragrafo 5.2.1 definisce le modalità di calcolo dello scambio termico per ventilazione come segue:

$$Q_{C,ve} = H_{ve,adj}(\theta_{int,set,C} - \theta_e)t \quad (4.26)$$

Il significato dei simboli è il seguente:

- $Q_{C,ve}$ = Flusso di calore scambiato per ventilazione tra l'ambiente raffrescato e gli spazi esterni (positivo = uscente) con funzionamento continuo dell'impianto di raffrescamento.
- $H_{ve,adj}$ = Coefficiente globale di scambio termico per ventilazione della zona considerata, corretto (*adjusted*) per tenere conto dell'effettiva temperatura dell'aria di rinnovo.

- $\theta_{int, set, C}$ = Temperatura interna di regolazione per il raffrescamento della zona considerata (raffrescamento continuo).
- θ_e = Temperatura media mensile dell'ambiente esterno (da norma UNI 10349).

Il modello calcola lo scambio termico per ventilazione considerando una temperatura interna fissa a set-point 1, una temperatura esterna media mensile fissa, ma una portata di ventilazione che viene calcolata tenendo in considerazione l'effettivo apporto di ventilazione naturale e/o meccanica.

Il calcolo delle portate di ventilazione viene effettuato in base al paragrafo 12 della norma UNI TS 11300-1:2014.

Il calcolo dell'energia legata alla deumidificazione viene calcolata come al paragrafo 5.3 della norma UNI TS 11300-1:2014.

Il calcolo dei diversi coefficienti di scambio termico verrà illustrato nei paragrafi riguardanti i parametri di ventilazione.

4.2.7.2 Equazione generale dello scambio termico per ventilazione estivo con metodo alternativo

Il calcolo alternativo estivo si svolge con modalità del tutto analoghe al caso invernale.

4.2.8 Coefficienti di scambio termico per ventilazione

Gli scambi per ventilazione, descritti nei paragrafi 4.2.6 e 4.2.7, si basano sulla conoscenza dei coefficienti di scambio termico per ventilazione dei vari componenti dell'edificio. Essi definiscono la tendenza dell'aria dell'edificio a scambiare calore in presenza di una portata di aria di rinnovo esterna e di una differenza di temperatura tra interno ed esterno.

La procedura proposta, in questo caso, è conforme alla norma UNI TS 11300-1.

4.2.8.1 Coefficiente di scambio termico per ventilazione con l'aria esterna o con spazi non climatizzati

Si riporta la formula generale descritta dalla norma ISO 13790, adattata e differenziata come riportato nella formula (8) della norma UNI TS 11300-1:2014:

$$H_{ve,adj} = \rho_a c_a \left\{ \sum_k b_{ve,k} q_{ve,k,mn} \right\} \quad (4.27)$$

dove:

- ρ_a = Densità volumica dell'aria.
- c_a = Calore specifico a pressione costante dell'aria.
- $b_{ve,k}$ = Fattore di correzione della temperatura dell'aria esterna. Tale valore è diverso da 1 nel caso in cui l'aria di ventilazione sia per qualche ragione a temperatura diversa da quella dell'aria esterna, per esempio mediante l'introduzione di recuperatori di calore oppure se avviene da spazi non climatizzati.
- $q_{ve,k,mn}$ = Portata d'aria di ventilazione.

Per quanto riguarda gli spazi non climatizzati si riprendono le indicazioni del prospetto 7 della norma UNI TS 11300-1:2014, che riporta i valori consigliati del fattore di correzione $b_{ve,k} = b_{tr,U}$.

4.2.9 Apporti interni

4.2.9.1 Apporti interni con calcolo normativo

Riguardo ai carichi interni la procedura standard della norma UNI TS 11300-1:2014 paragrafo 5.2.2 prevede che i carichi interni siano valutati come segue:

$$Q_{\text{int}} = \left\{ \sum_k \Phi_{\text{int},mn,k} \right\} \cdot t + \left\{ \sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{\text{int},mn,u,l} \right\} \cdot t \quad (4.28)$$

dove:

- $\Phi_{\text{int},mn,k}$ è il flusso termico prodotto dalla k-esima sorgente di calore interna, mediato sul tempo, espresso in W;
- $\Phi_{\text{int},mn,u,l}$ è il flusso termico prodotto dalla l-esima sorgente di calore interna nell'ambiente non climatizzato adiacente u, mediato sul tempo, espresso in W;
- $b_{tr,l}$ è il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente la sorgente di calore interna l-esima di origine solare (nel caso di ambiente non climatizzato confinante con diverse zone termiche si fa riferimento all'appendice A della stessa norma);

Per ciò che concerne il calcolo dei flussi termici interni la norma prevede due diverse impostazioni per le abitazioni e per gli altri edifici.

Nel primo caso la valutazione dei carichi è molto semplificata, basandosi sulla seguente formula che include all'interno ogni tipo di carico interno di tipo sensibile:

$$\Phi_{\text{int}} = 7,987 A_f - 0,0353 A_f^2 \quad (4.29)$$

dove A_f rappresenta la superficie utile di pavimento fino a 120 m². Per superfici superiori il valore dei carichi è posto sempre uguale a 450W.

I carichi latenti sono invece posti per le abitazioni sempre pari a 250 g/h.

Per gli edifici diversi dalle abitazioni viene fornito un valore di carico per unità di superficie a seconda del tipo di destinazione d'uso, come riportato nella seguente tabella.

Categoria di edificio	Destinazione d'uso	Apporti termici sensibili Φ_{int} / A_t W/m ²	Portata di vapore acqueo $(G_{wv,0c}+G_{wv,A})/A_t$ 10 ⁻³ ·g/(h·m ²)
E.1(1) – E.1(2)	Abitazioni	a)	b)
E.1(1)	Collegi, caserme, case di pena, conventi	6	6
E.1 (3)	Edifici adibiti ad albergo, pensione ed attività similari	6	5
E.2	Edifici adibiti a uffici e assimilabili	6	6
E.3	Edifici adibiti a ospedali, cliniche o case di cura e assimilabili	8	14
E.4 (1)	Cinema e teatri, sale di riunione per congressi	8	27
E.4 (2)	Mostre, musei	8	16
	Biblioteche,	8	12
	Luoghi di culto	8	16
E.4 (3)	Bar	10	31
	Ristoranti	10	26
	Sale da ballo	10	31
E.5	Edifici adibiti ad attività commerciali e assimilabili	8	9
E.6 (1)	Piscine, saune e assimilabili	10	c)
E.6 (2)	Palestre e assimilabili	5	11
E.6 (3)	Servizi di supporto alle attività sportive	4	8
E.7	Edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili	4	16
E.8	Edifici adibiti ad attività industriali ed artigianali e assimilabili	6	c)
a) Dipende dalla superficie utile dell'appartamento come riportato al punto 13.1.1. b) Dipende dalla superficie utile dell'appartamento come riportato al punto 13.2.1. c) Attività di processo indipendente dalla presenza di persone: di conseguenza deve essere valutata in funzione della tipologia di processo e non è possibile determinare un valore univoco.			

Tabella 4.4 – Apporti interni medi globali per unità di superficie di pavimento. Fonte: UNI TS 11300-1:2014 prospetto E.3.

4.2.9.2 Apporti interni con calcolo alternativo

L'approccio alternativo prevede il calcolo puntuale dei singoli apporti di calore sensibile e latente sia degli occupanti che di tutte le apparecchiature elettriche e a combustione presenti.

Gli apporti interni vengono inseriti istante per istante nel bilancio energetico dinamico dell'edificio sotto forma di flussi termici direttamente iniettati nell'aria interna.

4.2.10 Apporti solari da componenti trasparenti

L'apporto solare viene normalmente suddiviso in base al componente su cui incide l'irraggiamento.

Se incide su componenti opachi, come pareti o solai, esso viene in parte assorbito dalla parete ed entra a far parte del bilancio termico della parete, sotto forma di flusso termico iniettato in corrispondenza della superficie della parete. L'irraggiamento opaco entra dunque in ambiente sotto forma conduttiva attraversando le pareti opache.

Se incide su componenti trasparenti, come le vetrate, esso viene in buona parte trasmesso all'interno ed assorbito dalla pareti interne e dall'arredamento. Questa seconda modalità è chiaramente più diretta, produce maggiori carichi e presenta tempi di propagazione molto contenuti.

4.2.11 Apporti solari con calcolo normativo

Riguardo agli apporti solari, la procedura della norma UNI TS 11300-1:2014 considera l'apporto solare opaco come una variazione del carico termico di trasmissione, mentre considera quello trasparente come un vero e proprio carico termico.

L'apporto solare opaco viene calcolato come segue:

$$Q_{sol,op} = \left\{ \sum_k \Phi_{sol,op,mn,k} \right\} \cdot t + \left\{ \sum_l (1 - b_{tr,l}) \cdot \Phi_{sol,mn,u,l} \right\} \cdot t + \sum_j (Q_{sd,op} + Q_{si})_j \quad (4.30)$$

dove:

- $\Phi_{sol,op,mn,k}$ è il flusso termico k-esimo di origine solare, incidente su componenti opachi esterni, mediato sul tempo, espresso in W;
- $\Phi_{sol,op,mn,u,l}$ è il flusso termico l-esimo di origine solare nell'ambiente non climatizzato adiacente u, mediato sul tempo, espresso in W;
- $b_{tr,l}$ è il fattore di riduzione per l'ambiente non climatizzato avente il flusso termico l-esimo di origine solare (nel caso di ambiente non climatizzato confinante con diverse zone termiche si fa riferimento all'appendice A della stessa norma);
- $Q_{sd,op}$ sono gli apporti di energia termica diretti attraverso le partizioni opache, dovuti alla radiazione solare entranti nella zona climatizzata dalla serra j-esima, espressi in MJ, calcolati secondo quanto riportato al punto E.2.3.3 della UNI EN ISO 13790:2008;
- Q_{si} sono gli apporti di energia termica indiretti dovuti alla radiazione solare entranti nella zona climatizzata dalla serra j-esima, espressi in MJ, calcolati secondo quanto riportato al punto E.2.3.3 della UNI EN ISO 13790:2008.

A sua volta il flusso k-esimo di origine solare si calcola con la seguente equazione:

$$\Phi_{sol,op,mn,k} = F_{sh,ob,k} A_{sol,op,k} I_{sol,k} \quad (4.31)$$

dove:

- $F_{sh,ob,k}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie k-esima;
- $A_{sol,op,k}$ è l'area di captazione solare effettiva della superficie opaca k-esima con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, nella zona o ambiente considerato, espressa in m², determinata con l'equazione (4.32);
- $I_{sol,k}$ è l'irradianza solare media del mese considerato o della frazione di mese, sulla superficie k-esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, espressa in W/m².

L'area di captazione solare effettiva di un componente opaco dell'involucro edilizio è calcolata con la seguente equazione:

$$A_{sol,op,k} = \alpha_{sol,c} R_{se} U_{c,eq} A_c \quad (4.32)$$

dove:

- $A_{sol,op,k}$ è l'area di captazione solare effettiva del componente opaco espressa in m²;
- $\alpha_{sol,c}$ è il fattore di assorbimento solare del componente opaco;
- R_{se} è la resistenza termica superficiale esterna del componente opaco, determinata secondo la UNI EN ISO 6946;
- $U_{c,eq}$ è la trasmittanza termica equivalente del componente opaco;
- A_c è l'area proiettata del componente opaco.

L'apporto solare trasparente viene calcolato come segue:

$$Q_{sol,w} = \left\{ \sum_k \Phi_{sol,w,mn,k} \right\} \cdot t + \sum_j Q_{sd,w,j} \quad (4.33)$$

dove:

- $\Phi_{sol,w,k}$ è il flusso termico k-esimo di origine solare, incidente su componenti trasparenti esterni, mediato sul tempo, espresso in W;
- $Q_{sd,op}$ sono gli apporti di energia termica diretti attraverso le partizioni trasparenti, dovuti alla radiazione solare entranti nella zona climatizzata dalla serra j-esima, espressi in MJ, calcolati secondo quanto riportato al punto E.2.3.3 della UNI EN ISO 13790:2008;

A sua volta il flusso k-esimo di origine solare si calcola con la seguente equazione:

$$\Phi_{sol,w,k} = F_{sh,ob,k} A_{sol,w,k} I_{sol,k} \quad (4.34)$$

dove:

- $F_{sh,ob,k}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie k-esima;
- $A_{sol,w,k}$ è l'area di captazione solare effettiva della superficie opaca k-esima con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, nella zona o ambiente considerato, espressa in m², determinata con l'equazione (4.35);
- $I_{sol,k}$ è l'irradianza solare media del mese considerato o della frazione di mese, sulla superficie k-esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, espressa in W/m².

L'area di captazione solare effettiva di un componente trasparente dell'involucro edilizio è calcolata con la seguente equazione:

$$A_{sol,w} = F_{sh,gl} g_{gl} (1 - F_F) A_{w,p} \quad (4.35)$$

dove:

- $A_{sol,w}$ è l'area di captazione solare effettiva del componente vetrato, espressa in m²;
- $F_{sh,gl}$ è il fattore di riduzione degli apporti solari relativo all'utilizzo di schermature mobili;
- g_{gl} è la trasmittanza di energia solare della parte trasparente del componente;
- F_F è la frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato;
- $A_{w,p}$ è l'area proiettata totale del componente vetrato (vano finestra).

4.2.12 Apporti solari con calcolo alternativo

L'approccio alternativo calcola i flussi di origine solare $\Phi_{sol,op,mn,k}$ e $\Phi_{sol,w,k}$ in modalità simile al calcolo normativo, con alcune differenze (soprattutto per l'apporto opaco) e salvo il fatto che vengono calcolati con intervallo orario anziché mensile.

L'apporto solare opaco del metodo alternativo non può essere espresso direttamente con una formula in quanto entra a far parte del bilancio termico dinamico della parete opaca sotto forma di un flusso termico che viene iniettato nello strato superficiale della parete, tra la resistenza superficiale esterna e la resistenza della porzione esterna della parete.

Il flusso k-esimo di origine solare si calcola con la seguente equazione, identica a quella normativa :

$$\Phi_{sol,op,mn,k} = F_{sh,ob,k} A_{sol,op,k} I_{sol,k} \quad (4.36)$$

dove:

- $F_{sh,ob,k}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie k-esima;
- $A_{sol,op,k}$ è l'area di captazione solare effettiva della superficie opaca k-esima con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, nella zona o ambiente considerato, espressa in m², determinata con l'equazione (4.32);
- $I_{sol,k}$ è l'irradianza solare media del mese considerato o della frazione di mese, sulla superficie k-esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, espressa in W/m².

L'area di captazione solare effettiva di un componente opaco dell'involucro edilizio è calcolata con la seguente equazione. La formula è differente rispetto al calcolo normativo perché non è necessario inserire R e U, dal momento che il calcolo viene svolto in modo dinamico col bilancio termico della parete.

$$A_{sol,op,k} = \alpha_{sol,c} A_c \quad (4.37)$$

dove:

- $A_{sol,op,k}$ è l'area di captazione solare effettiva del componente opaco espressa in m²;
- $\alpha_{sol,c}$ è il fattore di assorbimento solare del componente opaco;

- A_c è l'area proiettata del componente opaco.

L'apporto solare trasparente viene calcolato invece con modalità del tutto simile a quella normativa, non essendo soggetto ad accumulo da parte delle strutture (l'accumulo interno viene trascurato), come segue:

$$Q_{sol,w} = \left\{ \sum_k \Phi_{sol,w,mn,k} \right\} \cdot t + \sum_j Q_{sd,w,j} \quad (4.38)$$

dove:

- $\Phi_{sol,w,k}$ è il flusso termico k-esimo di origine solare, incidente su componenti trasparenti esterni, mediato sul tempo, espresso in W;
- $Q_{sd,op}$ sono gli apporti di energia termica diretti attraverso le partizioni trasparenti, dovuti alla radiazione solare entranti nella zona climatizzata dalla serra j-esima, espressi in MJ, calcolati secondo quanto riportato al punto E.2.3.3 della UNI EN ISO 13790:2008;

A sua volta il flusso k-esimo di origine solare si calcola con la seguente equazione:

$$\Phi_{sol,w,k} = F_{sh,ob,k} A_{sol,w,k} I_{sol,k} \quad (4.39)$$

dove:

- $F_{sh,ob,k}$ è il fattore di riduzione per ombreggiatura relativo ad elementi esterni per l'area di captazione solare effettiva della superficie k-esima;
- $A_{sol,w,k}$ è l'area di captazione solare effettiva della superficie opaca k-esima con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, nella zona o ambiente considerato, espressa in m^2 , determinata con l'equazione (4.35);
- $I_{sol,k}$ è l'irradianza solare media del mese considerato o della frazione di mese, sulla superficie k-esima, con dato orientamento e angolo d'inclinazione sul piano orizzontale, espressa in W/m^2 .

L'area di captazione solare effettiva di un componente trasparente dell'involucro edilizio è calcolata con la seguente equazione:

$$A_{sol,w} = F_{sh,gl} g_{gl} (1 - F_F) A_{w,p} \quad (4.40)$$

dove:

- $A_{sol,w}$ è l'area di captazione solare effettiva del componente vetrato, espressa in m^2 ;
- $F_{sh,gl}$ è il fattore di riduzione degli apporti solari relativo all'utilizzo di schermature mobili;
- g_{gl} è la trasmittanza di energia solare della parte trasparente del componente;
- F_F è la frazione di area relativa al telaio, rapporto tra l'area proiettata del telaio e l'area proiettata totale del componente finestrato;

- $A_{w,p}$ è l'area proiettata totale del componente vetrato (vano finestra).

4.3 Fabbisogno di energia utile per la preparazione di acqua calda sanitaria

Il fabbisogno di energia legato al consumo di acqua calda sanitaria viene calcolato in modalità del tutto conforme alla norma UNI TS 11300-2:2014 (par. 7):

$$Q_W = \rho_w c_w \sum_i [V_{w,i} (\theta_{er,i} - \theta_0)] \cdot G \quad (4.41)$$

dove:

- Q_W = Fabbisogno di energia termica per riscaldare il volume d'acqua richiesto alla temperatura di set-point [kWh].
- V_w = Volume d'acqua giornaliero richiesto durante il periodo di calcolo [m^3/G].
- ρc = Densità volumica dell'acqua per calore specifico = 1,162 kWh/ m^3K .
- $(\theta_{er,i} - \theta_0)$ = Differenza tra la temperatura di erogazione e quella di ingresso dell'acqua fredda sanitaria [K]. La norma consiglia di fissare la prima a 40°C e la seconda pari alla media delle temperature medie mensili dell'aria esterna.
- G = Numero di giorni del periodo di calcolo.

I valori di fabbisogno giornaliero sono riferiti a dati medi giornalieri³:

- nel caso di edifici a destinazione residenziale si considera il volume di acqua calda sanitaria giornaliero;
- nel caso di edifici non residenziali i fabbisogni di acqua calda e le relative temperature di utilizzo possono essere relativi a più attività; per esempio per un albergo (3 stelle) che fornisce anche i servizi di centro benessere, ristorazione e lavanderia, l'energia termica richiesta per soddisfare il fabbisogno di acqua calda è data dalla somma dei fabbisogni delle attività svolte nell'edificio; nel caso di edificio in cui si svolgano più attività i fabbisogni di energia per uso sanitario devono essere indicati separatamente dai singoli fabbisogni per altre attività.

Per gli edifici residenziali il volume di acqua richiesto V_w , espresso in litri/giorno, è calcolato come:

$$V_w = a \cdot S_u + b \quad (4.42)$$

- a è un parametro ricavabile dalla Tabella 4.5 [L/(m^2 giorno)];
- b è un parametro ricavabile dalla Tabella 4.5 [L/giorno];
- S_u è la superficie utile dell'abitazione [m^2].

Tabella 4.5 – Valori dei parametri a e b.

	$S_u \leq 35$	$35 < S_u \leq 50$	$50 < S_u \leq 200$	$S_u > 200$
a [litri/(m^2 giorno)]	0	2,667	1,067	0
b [litri/giorno];	50	-43,33	36,67	250

Per gli edifici non residenziali il volume di acqua richiesto V_w , espresso in litri/giorno, è calcolato come

³ La determinazione dei fabbisogni di energia termica per acqua calda sanitaria in base alle portate e temperature specificate non tiene conto dei fabbisogni richiesti per rispettare servizi aggiuntivi quali ad esempio la prevenzione e il controllo della legionella oppure il ricambio periodico dell'acqua nelle piscine pubbliche.

$$V_w = a \cdot N_u \quad (4.43)$$

- a è il fabbisogno specifico giornaliero in litri/(giorno $\times N_u$);
- N_u è un parametro variabile in funzione del tipo di edificio.

Tabella 4.6 – Valori dei parametri a ed N_u per gli edifici non residenziali.

Tipo di attività	a	N_u
Dormitori, Residence e B&B	40	Numero di letti
Hotel fino a tre stelle	60	Numero di letti
Hotel quattro stelle e oltre	80	Numero di letti
Attività ospedaliera con pernottamento	80	Numero di letti
Attività ospedaliera day hospital (senza pernottamento)	15	Numero di letti
Scuole e istruzione	0,2	Numero di allievi
Scuole materne e asili nido	8	Numero di bambini
Attività sportive/palestre	50	Docce installate
Spogliatoi di stabilimenti	10	Docce installate
Uffici	0,2	Sup. netta climatizzata
Esercizio commerciale senza obbligo di servizi igienici per il pubblico	0	-
Esercizio commerciale con obbligo di servizi igienici per il pubblico	0,2	Sup. netta climatizzata
Ristoranti – Caffetterie	65	Numero di coperti*
Catering, self service, Bar	25	Numero di coperti*
Servizio lavanderia	50	Numero di letti
Centri benessere	200	Numero di ospiti
Altro	0	-
*Il numero di coperti viene determinato come 1,5 volte l'occupazione convenzionale.		

4.4 Modellazione degli impianti di riscaldamento, raffrescamento e preparazione acqua calda sanitaria – Calcolo dei rendimenti

Una volta determinato il fabbisogno energetico netto dell'edificio deve essere valutato il rendimento degli impianti, per valutare il consumo energetico effettivo dell'edificio e la conseguente spesa energetica.

La modellazione degli impianti è realizzata conformemente a quanto specificato nelle norme UNI TS 11300 - 2, -3, -4, cercando di coprire il più ampio spettro di configurazioni impiantistiche sia per quanto riguarda le tecnologie utilizzate, sia per quanto riguarda le tecniche di regolazione.

Riguardo al primo aspetto le tecnologie impiantistiche sono definite scegliendo un generatore ed associandovi i relativi sottosistemi di emissione/erogazione, regolazione, distribuzione e accumulo.

Il calcolo degli impianti è effettuato su base mensile. La scelta di passare dal calcolo orario dell'involucro al calcolo mensile degli impianti è stata effettuata in considerazione del fatto che un calcolo orario delle tecnologie impiantistiche, a fronte di un aumento di circa 30 volte del numero di dati da trattare, non avrebbe portato a significativi miglioramenti nell'accuratezza. Infatti nella quasi totalità dei casi non è possibile reperire i dati prestazionali delle tecnologie impiantistiche in tutte le possibili condizioni di utilizzo (ai carichi parziali, con condizioni termo-igrometriche dell'aria variabili, ecc.). Ciò rende dunque spesso inutile un calcolo eccessivamente dettagliato.

Il fabbisogno energetico degli impianti è effettuato sulla base dei fabbisogni netti dell'edificio sommando le perdite di energia legate ai sottosistemi impiantistici (erogazione/emissione, distribuzione, accumulo, regolazione, generazione) e considerando la quota di accensione effettiva di ciascun impianto. Il fabbisogno risultante, integrato con l'assorbimento dei sistemi ausiliari, viene poi suddiviso per tipologia di combustibile in base agli impianti utilizzati.

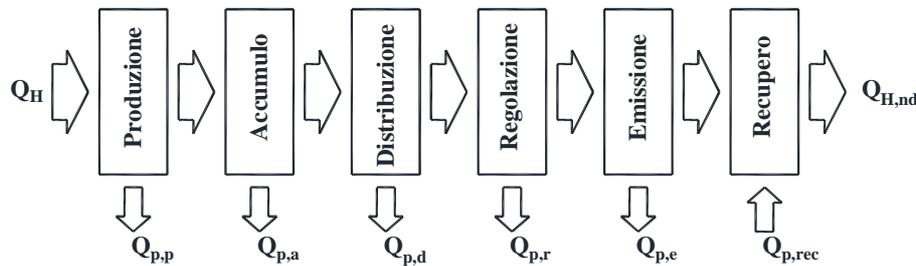


Figura 4.9 - Schema per il calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento.

Lo schema di Figura 4.9 si riferisce ai fabbisogni per il riscaldamento; schemi analoghi valgono per il raffrescamento e per la preparazione di acqua calda sanitaria.

Per determinare il fabbisogno di energia per riscaldamento (Q_H), per il raffrescamento (Q_C) e per la preparazione di acqua calda sanitaria (Q_W), si applicano rispettivamente le seguenti formule:

$$Q_H = Q_{H,nd} + Q_{p,e} + Q_{p,r} + Q_{p,d} + Q_{p,a} + Q_{p,p} - Q_{rec} \quad (4.44)$$

$$Q_C = Q_{C,nd} + Q_{p,e} + Q_{p,r} + Q_{p,d} + Q_{p,a} + Q_{p,p} - Q_{rec} \quad (4.45)$$

$$Q_W = Q_{W,nd} + Q_{p,d} + Q_{p,a} + Q_{p,p} \quad (4.46)$$

dove tutte le grandezze sono espresse in chilowattora [kWh] e:

- $Q_{H,nd}$, $Q_{C,nd}$, $Q_{W,nd}$ sono i fabbisogni utili dell'edificio, per riscaldamento, per raffrescamento e per l'acqua calda sanitaria;
- $Q_{p,e}$ sono le perdite del sottosistema di emissione, congruenti con il sistema che si sta considerando, sia esso di riscaldamento o di raffrescamento;
- $Q_{p,r}$ sono le perdite del sottosistema di regolazione, sia esso di riscaldamento o di raffrescamento;
- $Q_{p,d}$ sono le perdite del sottosistema di distribuzione, sia esso di riscaldamento, di raffrescamento o per l'acqua calda sanitaria;
- $Q_{p,acc}$ sono le perdite nell'eventuale sottosistema di accumulo, sia esso di riscaldamento, di raffrescamento o per l'acqua calda sanitaria;
- $Q_{p,p}$ sono le perdite del sottosistema di preparazione ACS, sia esso di riscaldamento, di raffrescamento o per l'acqua calda sanitaria;
- Q_{rec} è l'energia termica o frigorifera eventualmente recuperata, se la configurazione del sistema edificio-impianto consente dei recuperi di energia utilizzabili per il riscaldamento o per il raffrescamento.

4.5 Impianti solari termici e fotovoltaici

Il comportamento degli impianti solari termici o fotovoltaici è simulato attraverso una procedura derivata in gran parte dalla norma tecnica UNI TS 11300-4:2016.

L'energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico è calcolata mediante la seguente formula:

$$E_{el,pv,out} = \frac{E_{pv} \cdot W_{pv} \cdot f_v}{I_{ref}} \quad (4.47)$$

dove:

- E_{pv} è l'irradiazione solare mensile incidente sull'impianto fotovoltaico [kWh/m²];
- W_{pv} è la potenza di picco, che rappresenta la potenza elettrica di un impianto fotovoltaico di una data superficie, per una irradianza di 1 kW/m² su questa superficie a 25°C;
- l'irradiazione solare mensile incidente sull'impianto fotovoltaico [kWh/m²];

- f_{pv} è il fattore di efficienza del sistema che tiene conto dell'efficienza dell'impianto fotovoltaico integrato nell'edificio e dipende dall'impianto di conversione da corrente continua a corrente alternata, dalla temperatura operativa reale dei moduli fotovoltaici e dall'integrazione nell'edificio dei moduli stessi;
- I_{ref} è l'irradianza solare di riferimento pari a 1 kW/m^2 .

L'irraggiamento solare sul piano dei moduli è calcolato su base oraria in modo del tutto analogo a quanto descritto per gli apporti solari, considerando come superficie irraggiata quella dei moduli fotovoltaici.

All'energia elettrica prodotta è poi assegnato un fattore di autoconsumo, a seconda dell'entità e della distribuzione temporale dei carichi elettrici, ed è quindi valutata la quota di energia prodotta che viene autoconsumata per gli usi interni dell'abitazione e quella che viene immessa in rete.

4.6 Cucina

La stima dei consumi energetici per i piani di cottura viene effettuata utilizzando quanto riportato in Figura 4.10 e assumendo per i piani di cottura a gas un rendimento pari a 0,55 e per i piani cottura a induzione un rendimento pari a 0,9, per i piani cottura elettrici un rendimento pari a 0,6.

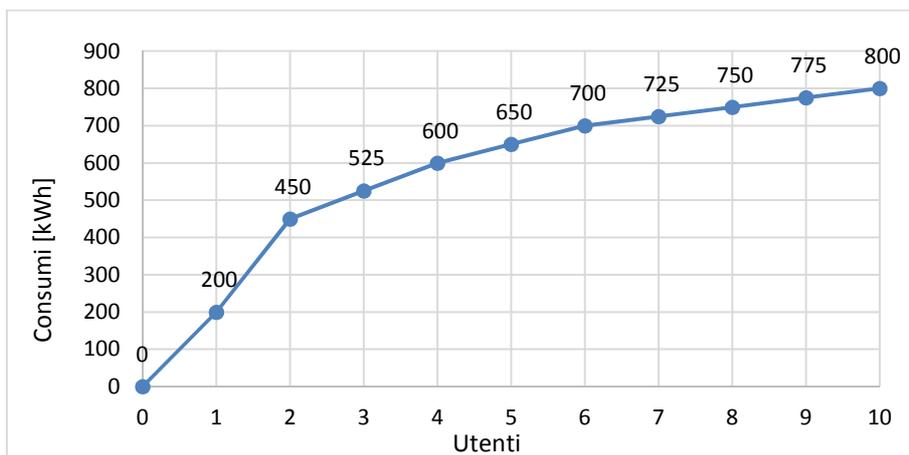


Figura 4.10 – Consumi per cottura cibi in funzione del numero di utenti.

Per le altre apparecchiature di cucina (forno a microonde, forno elettrico, forno a gas, griglia, bistecchiera/piastra elettrica, tostapane, macchina caffè espresso elettrica, macchina moka elettrica, frullatore, robot da cucina) i consumi sono stimati assumendo potenze medie di mercato e i minuti di uso medio giornaliero.

4.7 Apparecchiature elettriche sottoposte a etichettatura energetica

La stima dei consumi energetici viene effettuata sulla base dei dati raccolti, utilizzando quanto riportato in [19], [20], [21], [22], [23], [25], [25].

4.8 Illuminazione

La stima dei consumi energetici viene effettuata sulla base della potenza elettrica delle lampade installata (P_n) e del numero di ambienti occupati, considerando un tempo di utilizzo medio nel periodo estivo ed invernale.

Viene prima ricavata la densità di persone per stanza, che viene considerata pari alla quota di stanze occupate. Il calcolo viene ripetuto per ogni ora o per ogni periodo al variare dell'occupazione interna.

$$DPS = \frac{N_{persone}}{N_{stanze}} = QSO \quad (4.48)$$

Viene poi determinato il fattore di utilizzo (F_u) dell'impianto di illuminazione, per ciascuna ora dell'anno, secondo il seguente calcolo:

$$F_u = QSO \cdot FG \quad (4.49)$$

dove FG rappresenta il "Fattore giornaliero" e tiene in considerazione il fatto che l'utilizzo dell'illuminazione varia da giorno a notte e varia anche in base all'attività degli occupanti (ad es. durante le ore di sonno, benché sia notte, quasi tutte le luci restano spente).

FG assume i seguenti valori:

- $FG = 0,1$ nelle ore di giorno;
- $FG = 0,45$ nelle ore di notte attive;
- $FG = 0,09$ nelle ore di notte non attive.

L'energia elettrica effettiva assorbita dall'impianto di illuminazione per ciascuna ora vale dunque:

$$E = P_n \cdot F_u \cdot \Delta t \quad (4.50)$$

dove:

- P_n = potenza elettrica nominale dell'impianto di illuminazione [kW];
- F_u = fattore di utilizzazione;
- Δt = intervallo di tempo [h].

La potenza elettrica P_n viene determinata sulla base del tipo di lampada, considerando le tipologie e caratteristiche delle lampade indicate in Tabella 4.7.

Tabella 4.7 – Tipologie e caratteristiche delle lampade.

Tipo illuminazione	Eff. Luminosa [lm/W]	Pn [W/lamp]
Obsoleta (lampade a incandescenza)	12	60,0
Tradizionale (lampade alogene)	19	38,0
A risparmio energetico (lampade fluorescenti)	40	18,0
Ad alta efficienza (lampade LED)	90	8,0

Il metodo descritto è stato considerato il migliore in quanto prescinde dal livello di illuminamento effettivamente presente o desiderabile, poiché quest'ultimo risulta arduo da calcolare con i pochi dati richiesti; inoltre, per le abitazioni non esistono prescrizioni stringenti sull'illuminamento medio mantenuto, perciò si tratta di un parametro fortemente soggettivo difficile da far quantificare da parte di un utente non esperto.

Il numero di lampade e la loro tipologia, invece, risulta un dato più oggettivo.

Anche il fattore di utilizzo legato all'occupazione dei locali e ai periodi di attività risulta essere sufficientemente attendibile.

4.9 Altre apparecchiature elettriche

Per le altre apparecchiature di cucina (forno a microonde, forno elettrico, griglia, bistecchiera/piastra elettrica, tostapane, macchina caffè espresso elettrica, macchina moka elettrica, frullatore, robot da cucina) i consumi elettrici sono stimati assumendo potenze medie di mercato e i minuti di uso medio giornaliero.

4.10 Sistemi di automazione

Per valutare i risparmi energetici connessi all’impiego di sistemi di automazione e controllo degli edifici si è fatto riferimento alla norma UNI EN15232 [30]; tale norma riporta le modalità di calcolo di sistemi aventi la funzione di massimizzare l’efficienza energetica degli impianti tecnici in relazione alle condizioni ambientali esterne e ai differenti profili di utilizzo e occupazione dei singoli ambienti dell’edificio, comportando una riduzione dei consumi energetici e fornendo nel contempo i massimi livelli di comfort, sicurezza e qualità. Gli impianti considerati sono quelli di riscaldamento, di preparazione acqua calda sanitaria, di raffrescamento, di ventilazione e condizionamento, di illuminazione, di controllo delle schermature solari, di gestione tecnica dell’edificio.

Secondo la norma EN15232, il calcolo dell’impatto delle funzioni di gestione, controllo e automazione dell’edificio sulle prestazioni energetiche dello stesso, può essere svolto attraverso un metodo dettagliato o un metodo statistico, chiamato "metodo dei fattori BAC":

- il metodo dettagliato è utilizzabile al meglio solo quando il sistema è completamente noto, ovvero sono disponibili conoscenze sufficienti sulle funzioni di automazione, controllo e gestione utilizzate per l’edificio ed i sistemi energetici, da considerare durante la procedura di calcolo;
- il metodo dei fattori BAC è una procedura di calcolo rapida e su base tabellare che permette una stima approssimativa dell’impatto delle funzioni BAC e TBM in base alla classe di efficienza A, B, C o D implementata; tale metodo è particolarmente appropriato per la fase di progettazione iniziale di un edificio, in quanto non è richiesta nessuna informazione specifica riguardo le funzioni di automazione e controllo se non la classe BAC di riferimento (già presente) e quella prevista (da implementare).

In Figura 4.11 è riassunto il procedimento logico utilizzato nei due diversi approcci.

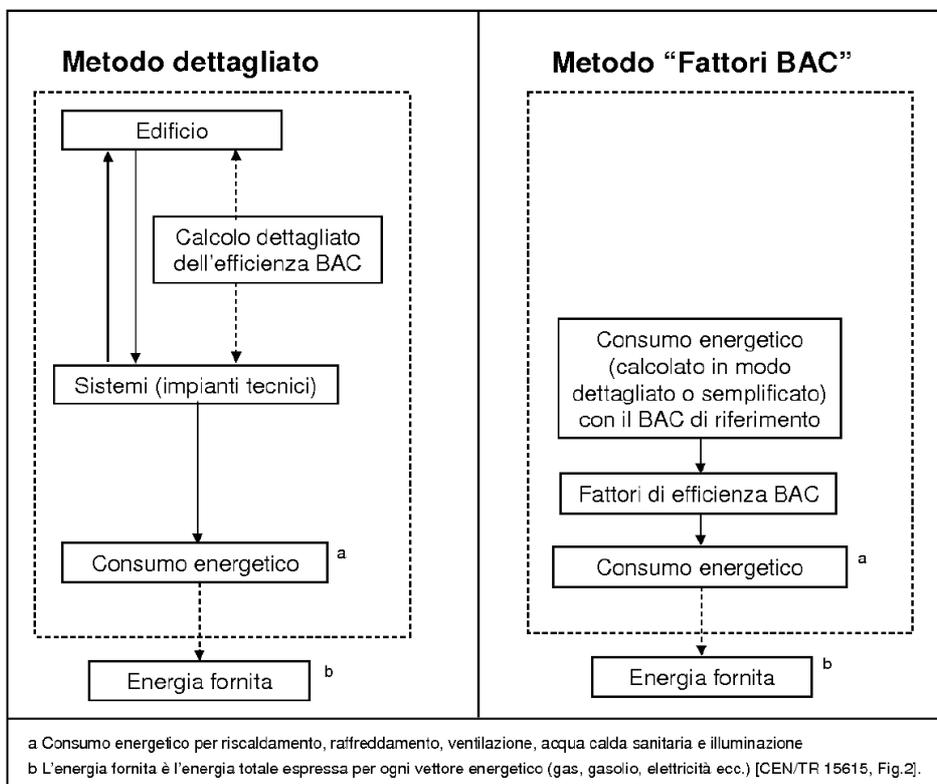


Figura 4.11 – Differenza tra metodo dettagliato e metodo dei fattori BAC.

La norma introduce una classificazione in 4 classi di efficienza energetica delle funzioni di controllo degli impianti tecnici degli edifici, così come riportato in Tabella 4.8.

Tabella 4.8 – Classificazione dei sistemi di automazione secondo UNI EN15232.

Classe D NON ENERGY EFFICIENT	Comprende gli impianti tecnici tradizionali e privi di automazione e controllo, non efficienti dal punto di vista energetico
Classe C STANDARD	Corrisponde agli impianti dotati di sistemi di automazione e controllo degli edifici (BAC) "tradizionali", eventualmente dotati di BUS di comunicazione, comunque a livelli prestazionali minimi rispetto alle loro reali potenzialità
Classe B ADVANCED	Comprende gli impianti dotati di un sistema di automazione e controllo (BAC) avanzato e dotati anche di alcune funzioni di gestione degli impianti tecnici di edificio (TBM) specifiche per una gestione centralizzata e coordinata dei singoli impianti
Classe A HIGH ENERGY PERFORMANCE	Corrisponde a sistemi BAC e TBM "ad alte prestazioni energetiche" cioè con livelli di precisione e completezza del controllo automatico tali da garantire elevate prestazioni energetiche all'impianto
BACS: "Building Automation and Control" – Sistemi di automazione e controllo degli edifici TBM: "Technical Home and Building Management" - Gestione tecnica dell'edificio.	

La classe C è considerata dal normatore la classe di riferimento, sebbene gli edifici esistenti, nei quali pochissime funzioni risultano automatizzate, si possano considerare mediamente in Classe D.

Per stimare l'impatto dei sistemi di automazione e controllo sulle prestazioni energetiche degli edifici è stato impiegato il metodo semplificato, detto anche metodo dei fattori BAC; questo metodo si basa su una procedura tabellare che permette una stima rapida dell'impatto delle funzioni BAC e TBM sui consumi energetici degli impianti tecnici dell'edificio.

La procedura di calcolo seguita si è articolata come segue:

1. individuazione delle funzionalità BAC presenti nell'edificio descritto, suddividendole nell'ambito termico ed elettrico;
2. confronto con la "Table 5" della norma EN 15232-1:2017 per l'assegnazione di una classe BAC a ciascuna delle funzionalità individuate;
3. determinazione della classe BAC effettiva dell'ambito termico ed elettrico seguendo l'approccio descritto al paragrafo 5.6 della norma EN 15232-1:2017;
4. determinazione della classe BAC media dell'ambito termico ed elettrico seguendo l'approccio descritto al paragrafo 5.6 della norma EN 15232-1:2017 con le modificazioni descritte in seguito;
5. determinazione del coefficiente di risparmio elettrico e termico dovuto all'automazione, rispettivamente tramite le Table A.2 e A.4 della suddetta norma, riportate di seguito; il calcolo è stato svolto in base alla classe BAC media ed è stata svolta un'interpolazione lineare per valori intermedi tra le classi;
6. ripetizione dei passi 1-5 ma prendendo in analisi l'edificio con applicate le migliori relative ai 3 kit di automazione Enea.
7. calcolo dei coefficienti di risparmio relativo come rapporto tra il coefficiente di risparmio della soluzione migliorativa analizzata ed il coefficiente di risparmio dello stato di fatto;
8. applicazione dei coefficienti di risparmio relativo ai consumi elettrici e termici calcolati tramite la simulazione per determinare i nuovi consumi con l'applicazione dei kit;
9. applicazione dei coefficienti di risparmio massimo per determinare i minimi consumi realizzabili tramite building automation.

In Tabella 4.9, in Tabella 4.10 e in Tabella 4.11 sono riportati i fattori BAC (per l'energia termica e elettrica) e le relative stime di risparmio energetico in percentuale, ottenibile passando da una classe di efficienza energetica attiva (A, B, C o D) all'altra.

Tabella 4.9 – Energia termica in edifici residenziali.

Classi e fattori di efficienza BAC				Risparmio (rif. Classe D)			Risparmio (rif. Classe C)	
D	C (rif.)	B	A	C/D	B/D	A/D	B/C	A/C
Senza automazione	Automazione standard	Automazione avanzata	Alta efficienza	C/D	B/D	A/D	B/C	A/C
1,10	1,00	0,88	0,81	9%	20%	26%	12%	19%

Tabella 4.10 – Energia elettrica in edifici residenziali.

Classi e fattori di efficienza BAC				Risparmio (rif. Classe D)			Risparmio (rif. Classe C)	
D	C (rif.)	B	A	C/D	B/D	A/D	B/C	A/C
Senza automazione	Automazione standard	Automazione avanzata	Alta efficienza	C/D	B/D	A/D	B/C	A/C
1,08	1,00	0,93	0,92	7%	14%	15%	7%	8%

Tabella 4.11 – Energia per acqua calda sanitaria in edifici residenziali.

Classi e fattori di efficienza BAC				Risparmio (rif. Classe D)			Risparmio (rif. Classe C)	
D	C (rif.)	B	A	C/D	B/D	A/D	B/C	A/C
Senza automazione	Automazione standard	Automazione avanzata	Alta efficienza	C/D	B/D	A/D	B/C	A/C
1,11	1,00	0,9	0,8	10%	19%	28%	10%	20%

La determinazione della classe BAC media dell’ambito termico ed elettrico è stata svolta con un approccio modificato rispetto alle indicazioni stringenti del paragrafo 5.6 della norma EN 15232-1:2017.

La norma impone, infatti, che la classe BAC di un edificio sia determinata dalla più bassa delle classi BAC di ciascuna delle funzionalità presenti; è quindi sufficiente che sia presente un “punto debole” nell’abitazione per far decadere la classe dell’edificio.

L’applicazione pratica di questa metodologia porta di fatto ad un appiattimento della classificazione e quindi del risparmio atteso, soprattutto nei casi in cui l’introduzione del sistema di automazione avvenga in tempi diversi rispetto alla realizzazione dei sistemi controllati.

L’impostazione della norma è stata ritenuta eccessivamente conservativa e generalmente non rispondente all’obiettivo di questo lavoro, non consentendo di valorizzare miglioramenti anche piccoli ma significativi.

Per rendere il calcolo più flessibile, mantenendo comunque ben saldo l’impianto normativo, è stato associato ad ogni classe un valore numerico e si è calcolata la classe finale come media delle classi BAC di ciascuna funzionalità. Infine si è svolta un’interpolazione lineare tra i coefficienti delle Table A.2 e A.4 in base alla classe risultante. In questo modo si è ottenuta una valutazione più sfumata e maggiormente sensibile alle modifiche, anche piccole, apportate al sistema di automazione.

5 Costi legati ai consumi energetici

Per la valutazione dei costi legati ai consumi di gas e di energia elettrica, è stato impiegato lo strumento messo a disposizione dall’Autorità per l’energia elettrica, il gas e il sistema idrico [26] (Figura 5.1).

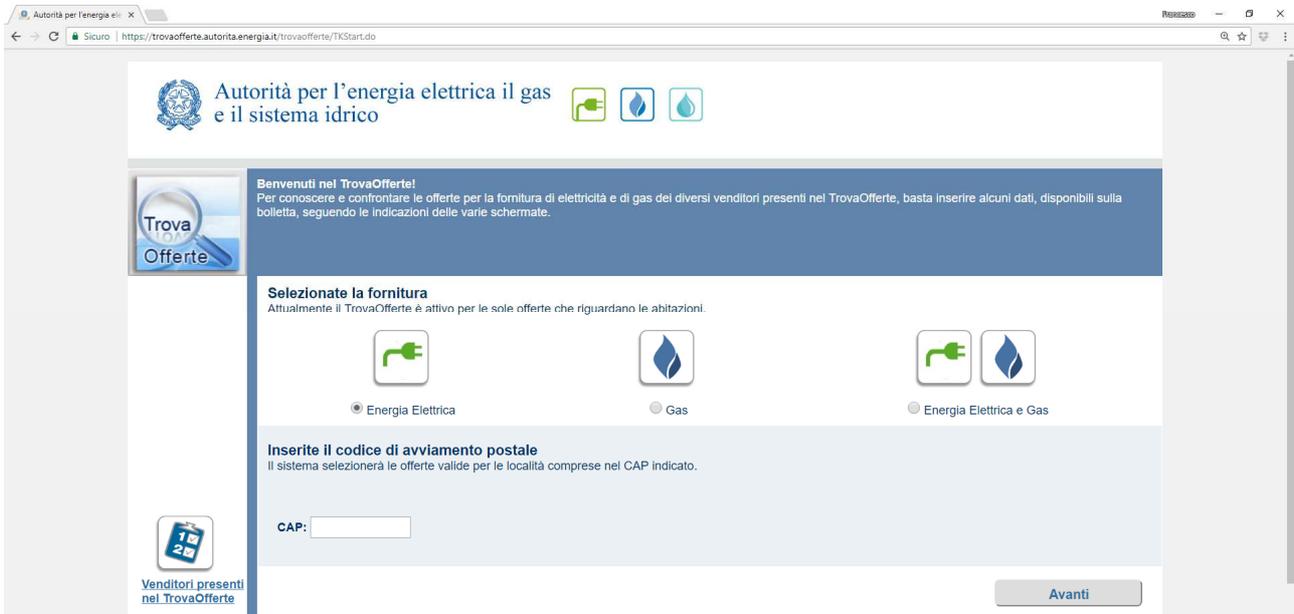


Figura 5.1 – Schermata iniziale sito web per la valutazione dei costi energetici.

Attraverso tale strumento⁴, sono stati valutati i costi dell’energia elettrica e del gas, al lordo di tasse e imposte, per le diverse tipologie di utenza (residente o non residente, limitatamente all’energia elettrica) e per le diverse forme di contratto (servizio di maggior tutela o mercato libero). In particolare, con riferimento al mercato libero, l’indicazione di costo rilevata è stata quella corrispondente alla migliore offerta sul mercato libero (Figura 5.2).

Offerta	Venditore	Prezzo dell'energia	Spesa annua stimata senza sconti*	Sconti* permanenti	una tantum	Spesa annua stimata*
Servizio di maggior tutela (prezzo monorario)	Fornitura a condizioni regolate dall'Autorità	Variabile	516,08	---	---	516,08
1.	[redacted]	Bloccato per almeno 1 anno	423,71	---	---	423,71
2.	[redacted]	Bloccato per almeno 1 anno	437,99	---	---	437,99
3.	[redacted]	Bloccato per almeno 1 anno	443,09	---	---	443,09

Figura 5.2 – Schermata finale sito web per la valutazione dei costi energetici.

⁴ Utilizzando per semplicità di trattazione il CAP 00197, corrispondente all’indirizzo del Centro di Ricerca CITERA.

I grafici di Figura 5.3 e Figura 5.4 riportano i risultati delle valutazioni effettuate.

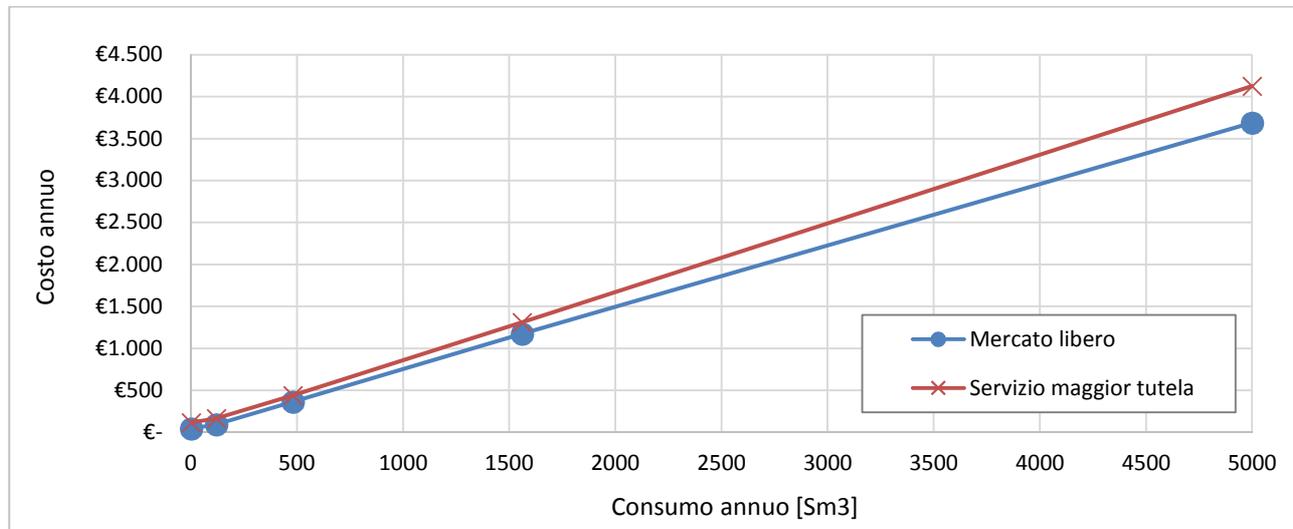


Figura 5.3 – Costi gas. Confronto tra servizio di maggior tutela e mercato libero.

Con riferimento al costo del gas, si osserva un andamento quasi rettilineo dei costi in rapporto ai consumi. Esistono ampie differenze, tra il servizio di maggior tutela e il mercato libero, risultando le migliori offerte sul mercato libero più convenienti rispetto al servizio di maggior tutela.

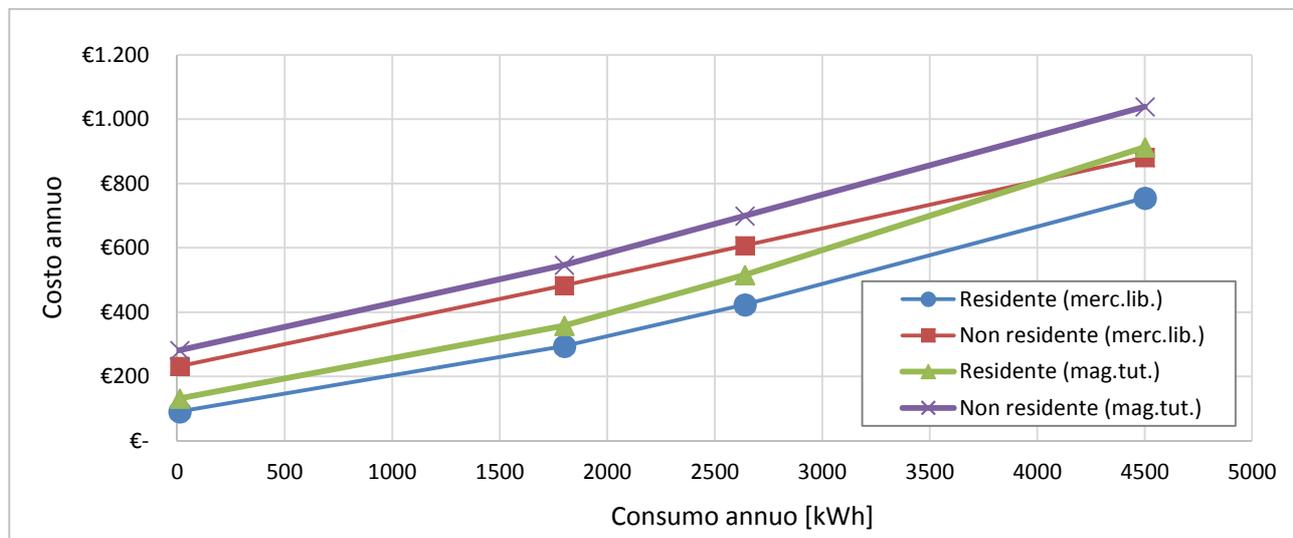


Figura 5.4 – Costi energia elettrica. Confronto tra servizio di maggior tutela e mercato libero e tra utenze residenti e non residenti.

Con riferimento al costo dell'energia elettrica, si osserva un generale appiattimento delle curve conseguente alla riconfigurazione delle tariffe volta all'eliminazione della progressività, che dovrebbe concludersi a gennaio 2018, senza alterare in modo significativo la struttura attuale, nella quale l'incremento di pendenza delle curve è principalmente dovuto alla struttura a scaglioni delle accise gravanti sul consumo di energia elettrica.

Esistono invece ampie differenze, tra il servizio di maggior tutela e il mercato libero (risultando le migliori offerte sul mercato libero più convenienti rispetto al servizio di maggior tutela) e tra le utenze residenti e le utenze non residenti (risultando le residenze avvantaggiate dall'attuale struttura tariffaria).

6 Riferimenti per i consumi energetici nel settore residenziale

L'attività di ricerca è incentrata sul settore residenziale ed ha l'obiettivo di valutare il potenziale di aggregazione della generica utenza.

Il procedimento proposto consente di stimare sulla base dei dati forniti da un utente non esperto i consumi di gas ed i consumi di energia elettrica. Resta tuttavia la necessità di un confronto con dati reali, sia riguardanti la dotazione tecnologica delle abitazioni, sia i consumi reali e i costi realmente sostenuti per la gestione energetica di un'abitazione.

A tal proposito, sulla linea di quanto sviluppato in [1], si è fatto riferimento all'indagine ISTAT sui consumi energetici delle famiglie [27] per quanto riguarda la dotazione tecnologia e impiantistica delle residenze italiane e per un riferimento relativo alla spesa connessa ai consumi energetici.

Tabella 6.1 – Famiglie per presenza/assenza e tipologia di impianto unico o prevalente di riscaldamento dell'abitazione, per ripartizione, composizione percentuale.

	Impianto centralizzato	Impianto autonomo	Apparecchi singoli fissi o portatili	Impianto non presente
Nord - Ovest	30,7	59,1	10,2	..
Nord - Est	12,3	72,9	14,8	..
Centro	14,7	70,8	14,6	1,1
Mezzogiorno	4,6	64,1	31,3	5,3
Italia	15,7	65,8	18,5	2,0

Tabella 6.2 – Famiglie per tipologia di impianto unico o prevalente di riscaldamento dell'abitazione, per fonte di alimentazione dell'impianto, composizione percentuale.

	Impianto centralizzato	Impianto autonomo	Apparecchi singoli fissi	Apparecchi singoli portatili	Totale
Metano	83,8	86,5	6,1	-	70,9
Energia elettrica	1,4	0,4	17,7	54,2	5,1
Biomasse	0,7	4,8	73,9	-	14,5
GPL	2,5	5,3	2,3	45,8	5,8
Gasolio	11,6	3,0	-	-	3,7

Tabella 6.3 – Famiglie per presenza/assenza e tipologia di impianto unico o prevalente per il condizionamento dell'aria, ripartizione, composizione percentuale.

	Sistema di condizionamento centralizzato o autonomo	Condizionatori fissi o portatili (solo raffreddamento)	Climatizzatori caldo/freddo fissi o portatili (a pompa di calore)	Impianto non presente
Nord - Ovest	1,2	7,3	15,0	76,6
Nord - Est	2,5	13,6	23,0	60,9
Centro	0,5	7,1	16,5	76,0
Mezzogiorno	0,7	6,5	25,0	67,8
Italia	1,1	8,2	20,0	70,6

Tabella 6.4 – Famiglie per fonte di alimentazione dell'impianto unico o prevalente di riscaldamento dell'acqua, ripartizione, composizione percentuale.

	Metano	Energia elettrica	Biomasse	GPL	Gasolio	Energia solare	Totale
Nord - Ovest	81,6	8,9	1,2	4,2	3,3	0,8	100,0
Nord - Est	81,1	4,4	2,0	6,5	5,0	1,0	100,0
Centro	71,3	16,3	2,6	6,9	2,1	0,7	100,0
Mezzogiorno	58,0	24,3	3,6	11,7	1,8	0,5	100,0
Italia	71,9	14,4	2,4	7,6	2,9	0,7	100,0

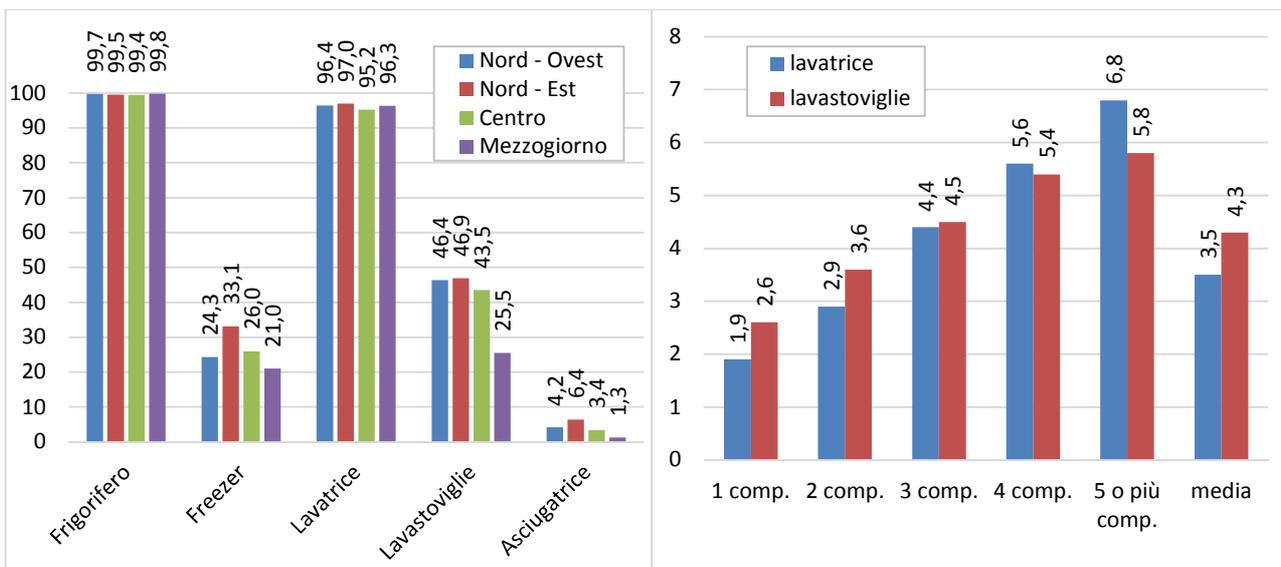


Figura 6.1 – A sinistra: famiglie in possesso di elettrodomestici effettivamente utilizzati, per tipologia di elettrodomestici e ripartizione, per 100 famiglie. A destra: numero medio di lavaggi a settimana in lavatrice e in lavastoviglie, per numero di componenti della famiglia.

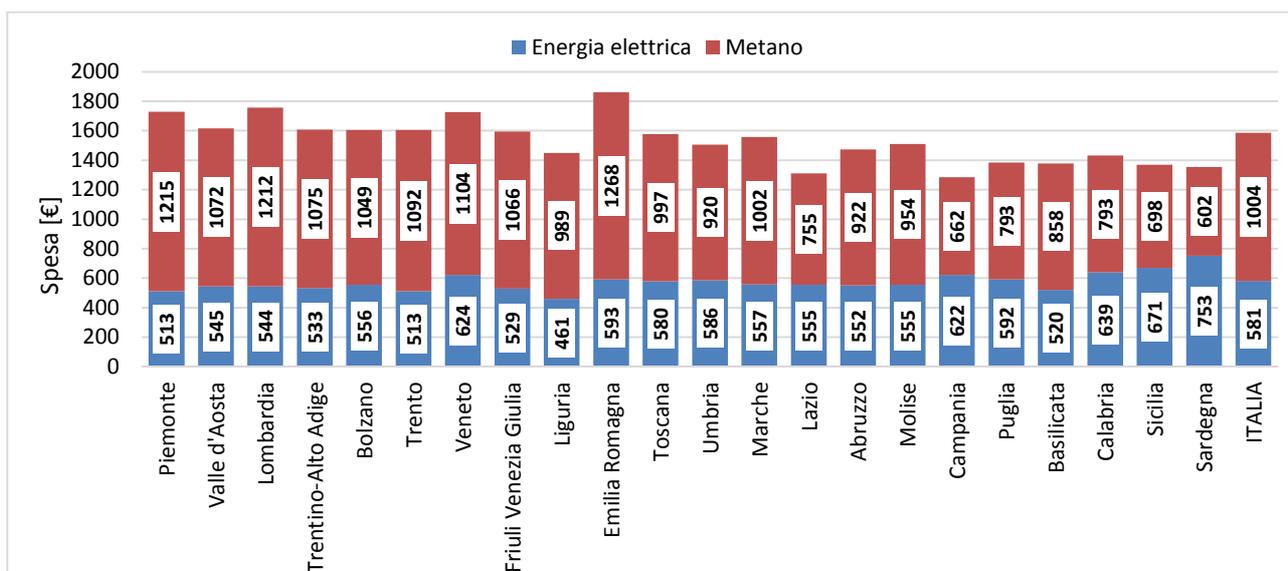


Figura 6.2 – Spesa media delle famiglie per consumi energetici per fonte, ripartizione e regione (per la Sardegna i dati riguardanti la spesa per metano sono stati elaborati a partire dai dati relativi a GPL, gasolio, legna e pellet).

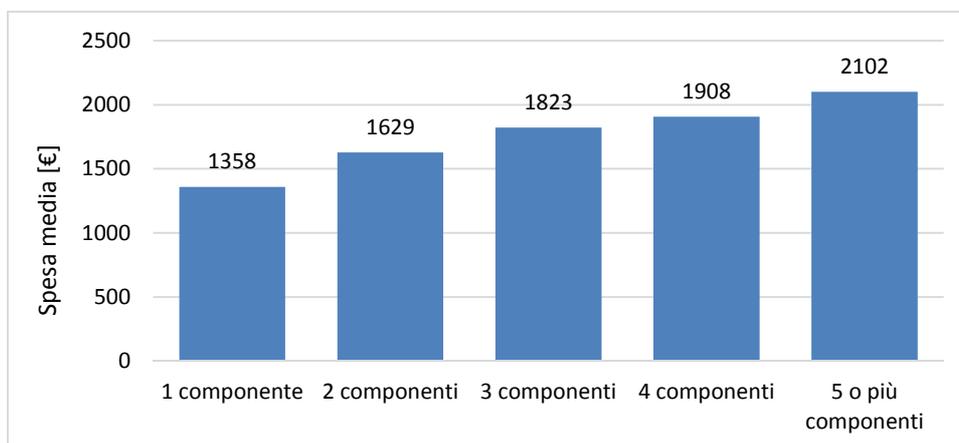


Figura 6.3 – Spesa media per consumi energetici, per numero di componenti della famiglia.

Per quanto riguarda i consumi elettrici, si è fatto riferimento a quanto pubblicato da Terna, relativamente alla suddivisione dei consumi elettrici per settore merceologico e per province [28] per definire il consumo medio pro-capite per le diverse province italiane, avendo ritenuto non trascurabile lo scostamento tra i consumi pro-capite della generica provincia rispetto al valore medio nazionale (982,4 kWh a persona).

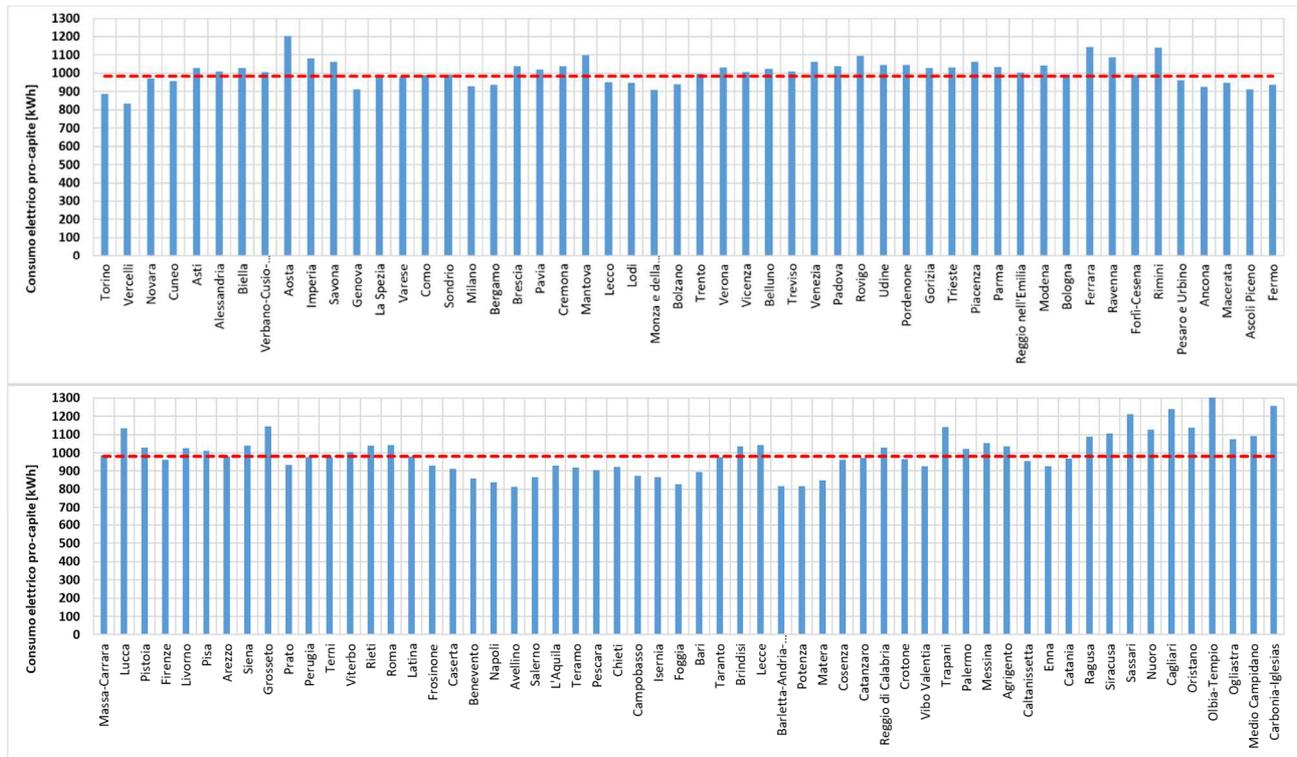


Figura 6.4 – Consumi di energia elettrica pro-capite nel settore residenziale e nelle province italiane.

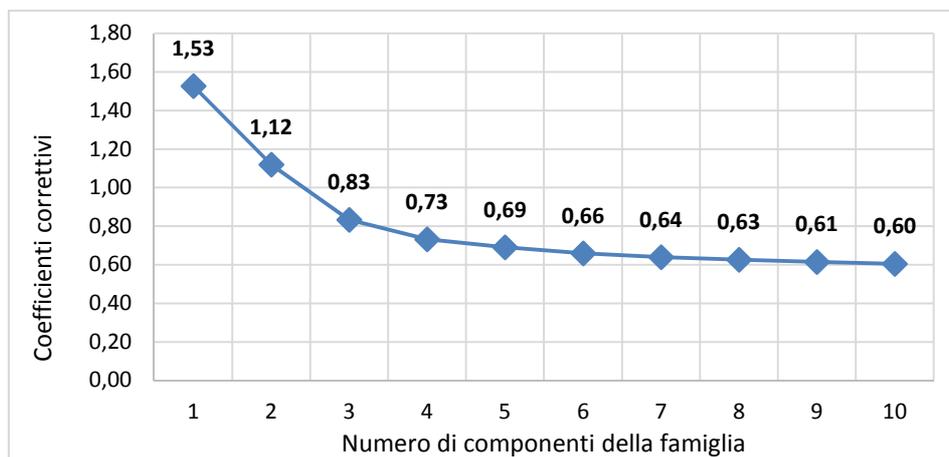


Figura 6.5 – Coefficienti correttivi del consumo pro-capite in funzione del numero di componenti della famiglia.

A partire dai consumi pro-capite calcolati, la ricostruzione dei consumi elettrici di una famiglia è stata effettuata utilizzando i coefficienti correttivi del consumo pro-capite riportati in Figura 6.5. Tali coefficienti correttivi sono ottenuti elaborando quanto riportato in [29], relativamente ai benchmark domestici.

Infine, il valore medio del livello di elettrificazione della generica utenza domestica è stato stabilito elaborando, in termini di energia primaria i consumi di gas e di energia elettrica del consumatore tipo stabilito dall’Autorità per l’energia elettrica, il gas e il sistema idrico.

7 Kit di automazione

Si è detto che l'aggregazione delle utenze comporta necessariamente l'utilizzo di sistemi di controllo (Energy Box) per il coordinamento e l'automazione di tutti gli usi energetici.

Allo stato attuale, gli edifici residenziali risultano generalmente sprovvisti di sistemi di automazione e pertanto l'installazione di dispositivi idonei è presupposto essenziale per l'aggregazione della generica utenza. La presenza di tali dispositivi favorisce l'ottimizzazione degli usi energetici e può portare ad un risparmio energetico anche importante rispetto alla situazione originaria.

In questo lavoro si farà riferimento a tre kit di automazione e controllo per la smart home proposti da ENEA, caratterizzati da un diverso numero di dispositivi e da diverse configurazioni.

In particolare, i diversi kit di automazione, al crescere del numero di dispositivi, sono definitivi rispettivamente LOW, MEDIUM e HIGH e sono composti dagli elementi costitutivi riportati in Tabella 7.1.

Tabella 7.1 – Caratteristiche kit di automazione.

Device		numero di dispositivi per tipologia di configurazione		
		LOW	MEDIUM	HIGH
Funzione	Tipo	quantità	quantità	quantità
Monitoraggio	METER elettricità	1	1	1
	METER gas			1
	Multisensore temperatura, presenza, luminosità	1	1 per stanza	1 per stanza
	Rilevatore apertura e chiusura finestre/porte	1	1	1 per finestra + 1
Controllo	Smart valve		1 per radiatore	1 per radiatore
	Smart plug	2	4	6
Energy box	Gateway	1	1	1

Ai fini della valutazione dei costi di installazione, per ognuno dei dispositivi elencati e per alcuni dispositivi accessori, si è fatto riferimento ai costi indicativi riportati in Tabella 7.2.

Tabella 7.2 – Costi indicativi.

Funzione	Tipo	Descrizione	Prezzo unitario [Euro]
Monitoraggio	METER elettricità	Power meter (2Clamp 60A), v. G2	98
	METER gas	Registratore di consumo Gas per contatori NorthQ - 9121	91
	Multisensori	fibaro motion sensor	48
	Apertura e chiusura	Rilevatore di apertura con contatto a secco e sensore analogico Fibaro	41
Controllo	Per funzione di Cronotermostato	Micro Doppio Switch Module Z-Wave Plus Qubino with metering	50
	Smart valve	Radiator Thermostat Danfoss LC13	66
	Smart plug	Fibaro	60
	Smart switch	Interruttore On/Off occulto AeonLabs (G2) with metering	50
Energy box	Gateway	Gateway Apio	289
	Dongle Z-Wave	Adattatore USB con batteria AeonLabs	69

8 Il foglio di calcolo

8.1 Struttura del foglio di calcolo

Gli usi energetici, nel settore residenziale, possono essere sommariamente divisi in usi energetici per riscaldamento e per raffrescamento degli ambienti, per la preparazione di acqua calda sanitaria, per cottura cibi, per illuminazione e per gli elettrodomestici. In funzione della loro natura, i carichi possono essere classificati in carichi accumulabili, carichi differibili, carichi interrompibili, carichi di base (non interrompibili) e autogenerazione (cfr. capitolo 3).

Seguendo la classificazione illustrata, il foglio di calcolo è stato strutturato per acquisire tutte le informazioni necessarie a caratterizzare una generica utenza, con informazioni che anche un utente non esperto può fornire. In particolare, gli usi energetici che sono stati considerati sono quelli relativi a:

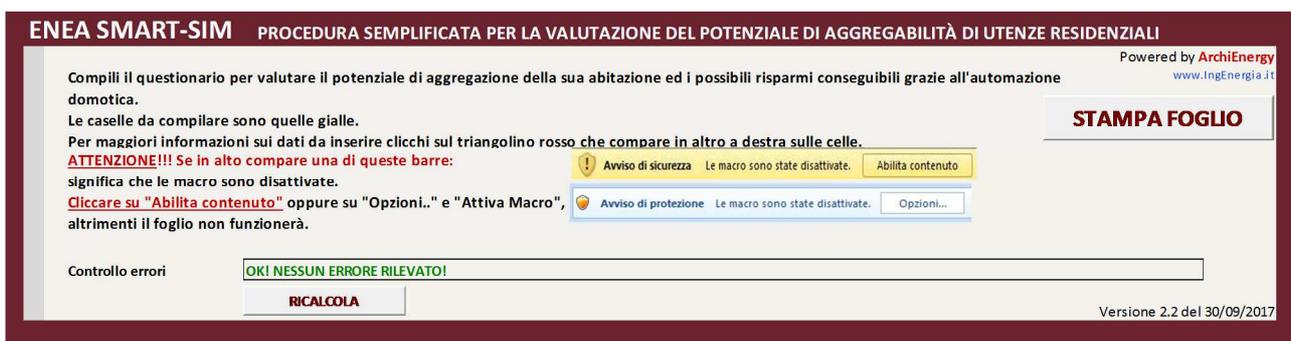
- riscaldamento ambienti;
- raffrescamento ambienti;
- preparazione di acqua calda sanitaria;
- lavaggio biancheria;
- asciugatura biancheria;
- lavaggio stoviglie;
- altri usi differibili (ferro da stiro, aspirapolvere);
- postazioni audio-video (intrattenimento);
- postazioni PC
- illuminazione
- refrigerazione e congelazione
- altri usi non differibili.

Il foglio di calcolo è stato sottoposto a dei test successivi, su casi studio reali, al fine di verificare la rispondenza all'obiettivo iniziale.

La prima fase di test è stata rivolta ad una selezione dei dati input, con il vincolo forte rappresentato dalla tipologia di utenza chiamata a fornire informazioni. Tale fase è stata portata avanti, sottoponendo il questionario in forma semplificata ad utenti generici e ad utenti esperti (cfr. **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

La seconda fase di test ha riguardato invece l'affidabilità della procedura dal punto di vista numerico e la stabilità della stessa di fronte ad un'immissione di input anomali o fuori intervallo. Tale fase ha condotto in molti casi a vincolare l'immissione dei dati a dei menù a tendina, bloccando in questa maniera i possibili input a valori predefiniti.

Il foglio di calcolo è realizzato in ambiente Excel ed implementa macro e funzioni scritte in VBA (Visual Basic for Applications).



ENEA SMART-SIM PROCEDURA SEMPLIFICATA PER LA VALUTAZIONE DEL POTENZIALE DI AGGREGABILITÀ DI UTENZE RESIDENZIALI

Powered by ArchiEnergy
www.IngEnergia.it

Compili il questionario per valutare il potenziale di aggregazione della sua abitazione ed i possibili risparmi conseguibili grazie all'automazione domotica.

Le caselle da compilare sono quelle gialle.

Per maggiori informazioni sui dati da inserire clicchi sul triangolino rosso **che compare in alto a destra sulle celle.**

ATTENZIONE!!! Se in alto compare una di queste barre: significa che le macro sono disattivate.

Cliccare su "Abilita contenuto" oppure su "Opzioni.." e "Attiva Macro", altrimenti il foglio non funzionerà.

Avviso di sicurezza Le macro sono state disattivate. Abilita contenuto

Avviso di protezione Le macro sono state disattivate. Opzioni...

Controllo errori **OK! NESSUN ERRORE RILEVATO!**

RICALCOLA

Versione 2.2 del 30/09/2017

Figura 8.1 – Informazioni generali.

Le celle hanno colorazioni differenti in funzione del contenuto e possono essere di semplice informazione, di input o di output. Gli input al foglio possono essere dati in maniera libera o attraverso dei menù a tendina. In alcune celle è presente un suggerimento utile alla compilazione, attivabile cliccando sul triangolino rosso in alto a destra.

2.1 DATI GENERALI	
Periodo di costruzione	1946-61
Numero di piani dell'abitazione (non dell'intero edificio)	1
Altezza media di ogni piano	2,66m
Numero di stanze (compresi disimpegni e corridoi)	Altezza netta, senza considerare lo spessore dei solai
Numero di finestre	8
Colore dei muri esterni	Molto chiaro (bianco)
Colore della copertura	Medio

Figura 8.2 – Colorazione celle e commenti.

8.2 Dati di input

8.2.1 Informazioni generali

La raccolta dati inizia con delle informazioni generali (Figura 8.3), relative al compilatore ed alla collocazione dell'edificio.

Il foglio elettronico contiene un archivio dei comuni italiani, cui è possibile accedere attraverso un menù a tendina, selezionando prima la Provincia e successivamente il Comune. Sulla base dell'indicazione relativa al Comune, in automatico il foglio carica tutti i dati climatici relativi alla località, fornendo immediatamente un'indicazione dei gradi giorno e della zona climatica.

1. DATI GENERALI					
1.1 ANAGRAFICA UTENTE					
Nome	Livio de Santoli, Francesco Mancini, Marco Cecconi				
Cognome	CITERA				
Indirizzo	Via Gramsci, 53				
Identificativo scheda	LC50615				
Data	18/11/2017				
1.2 UBICAZIONE EDIFICIO					
Provincia	RM				
Comune	Roma				
Gradi-giorno	1.415				
Zona climatica	D				
Ombreggiamento dal sole	Alcune ore				
1.3 UTILIZZO DELLA CASA					
Inserisci il numero di occupanti che si trovano in casa nei giorni in cui è abitata:					
	Mattina (8-13)	Pomeriggio (13-19)	Sera (19-0)	Notte (0-8)	
Numero di occupanti	1	2	4	4	4 persone
Occupazione famiglia di 4 persone					

Figura 8.3 – Informazioni generali.

Sono poi richiesti degli input relativi alle modalità di occupazione dell'edificio, per fasce orarie (8-13; 13-19; 19-0; 0-8). Per velocizzare l'immissione dei dati è presente un pulsante laterale attraverso il quale è possibile inserire rapidamente una modalità di occupazione "media presunta" per una famiglia di quattro persone.

8.2.2 Informazioni edificio e abitazione

La caratterizzazione dell'abitazione utile al calcolo dei fabbisogni energetici è effettuata attraverso una serie di informazioni riguardanti la tipologia edilizia, il numero di piani, l'altezza media di ogni piano, il numero di stanze, il numero di finestre, il colore delle pareti esterne e della copertura (Figura 8.4).

Relativamente all'epoca di costruzione la scelta è effettuata attraverso un menù a tendina, con possibile scelta tra i periodi preimpostati (prima del 1919; 1919-45; 1946-61; 1962-71; 1972-81; 1982-91; 1992-2005; 2005-08; 2006-08; 2008-10; 2010-15; dopo il 2015). Ad ogni periodo sono collegati valori di trasmittanza

caratteristici, attraverso una tipizzazione relativa alle tecniche costruttive caratterizzanti il periodo di costruzione dell'edificio (Figura 8.4).

Anche con riferimento ai colori di pareti e coperture, la scelta è vincolata alle possibilità offerte da un menù a tendina (molto chiaro, chiaro, medio, scuro, molto scuro).

2. CARATTERISTICHE ARCHITETTONICHE

2.1 DATI GENERALI

Periodo di costruzione	1972-81
Numero di piani dell'abitazione	1
Altezza media di ogni piano	3,00 m
Numero di stanze (compresi disimpegni e corridoi)	7
Numero di finestre	8
Colore dei muri esterni	Medio
Colore della copertura	Medio

Figura 8.4 – Dati generali.

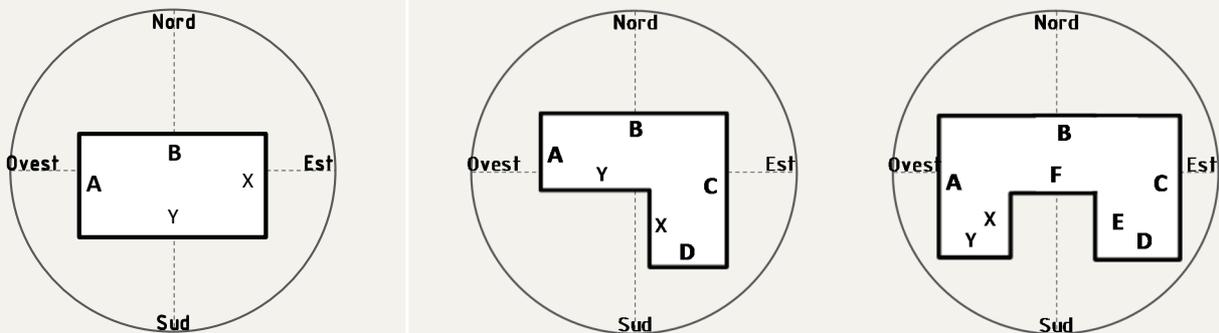
Le dimensioni dell'abitazione possono essere fornite in input per tre diverse forme in pianta (pianta rettangolare, pianta ad angolo; pianta a doppio angolo), ritenute significative della maggior parte delle abitazioni (Figura 8.5). Per ognuna delle tre forme in pianta vengono richiesti i dati necessari ad una completa definizione e l'orientamento.

È poi necessario indicare, utilizzando un menù a tendina, se le pareti confinano con l'ambiente esterno, con un altro appartamento o con uno spazio non riscaldato.

2.2 PIANTE E CONFINI

Scegli la tipologia di pianta più appropriata guardando la figura sotto:

Forma della pianta dell'abitazione	Pianta rettangolare o quadrata
Posizione del nord (vedi disegno sotto)	0°



Indica la lunghezza dei lati ed il relativo confine:

	LUNGHEZZA [m]	CONFINE
Lato A (Ovest)	10,00	Altro appartamento
Lato B (Nord)	11,00	Esterno
Lato C (Est)	10,00	Altro appartamento
Lato D (Sud)	11,00	Esterno
Lato E (Est)	10,00	Altro appartamento
Lato F (Sud)	11,00	Esterno
Lato X (Est)	10,00	Esterno
Lato Y (Sud)	11,00	Esterno
Confine superiore (cosa si trova sopra)		Altro appartamento
Confine inferiore (cosa si trova sotto)		Altro appartamento

Figura 8.5 – Pianta e confini.

Al di sotto delle celle di inserimento dei dati geometrici è proposto un riepilogo dei dati geometrici salienti (superficie calpestabile di un piano, superficie calpestabile totale, superficie lorda di un piano, superficie lorda totale, volume totale netto, volume totale lordo) ottenuti elaborando i dati inseriti (Figura 8.6).

2.3 RIEPILOGO DATI GEOMETRICI	
Superficie calpestabile di un piano	91 m ²
Superficie calpestabile totale	91 m ²
Superficie lorda di un piano	111 m ²
Superficie lorda totale	111 m ²
Volume totale netto	273 m ³
Volume totale lordo	377 m ³

Figura 8.6 – Riepilogo dati geometrici.

Come ultimo dato di input, relativamente all’involucro, è necessario inserire eventuali lavori di riqualificazione, indicandone il periodo e la percentuale di realizzazione (Figura 8.7).

2.4 LAVORI EFFETTUATI SULL’INVOLUCRO EDILIZIO			
Inserisci se sono stati effettuati interventi di miglioramento energetico dell’involucro edilizio.			
	SI/NO	PERIODO	% DI REALIZZAZIONE
Isolamento delle pareti	NO	1991-2005	20%
Isolamento del soffitto	NO	2010-2015	100%
Isolamento del pavimento	NO	Dopo 2015	50%
Sostituzione infissi	SI	Dopo 2015	100%

Nessun intervento di riqualificazione

Figura 8.7 – Lavori di riqualificazione energetica effettuati sull’involucro edilizio.

L’indicazione del periodo (1991-2005; 2006-08; 2008-10; 2010-15; dopo il 2015) consente di calcolare le trasmittanze delle pareti riqualificate; l’indicazione della percentuale consente di calcolare la superficie dell’intervento, sulla base dei dati precedentemente forniti. È possibile, attraverso un pulsante laterale, un’immissione rapida corrispondente a “nessun intervento di riqualificazione”.

8.2.3 Impianti tecnologici (riscaldamento, raffrescamento, preparazione acqua calda sanitaria, autoproduzione di energia elettrica)

Si è fatto riferimento alla situazione tipica delle residenze italiane [5], considerando la presenza di impianti di riscaldamento al servizio dell’intera abitazione, impianti di preparazione acqua calda sanitaria e impianti di raffrescamento, con apparecchiature fisse o portatili, al servizio di singoli ambienti dell’abitazione. Sono stati considerati solo impianti di riscaldamento alimentati a gas o a energia elettrica, escludendo, in questa prima versione del foglio di calcolo, gli impianti alimentati a biomassa, in ragione della natura “in isola” di questi impianti e del basso potenziale di aggregabilità da essi rappresentato.

Relativamente all’impianto di riscaldamento (Figura 8.8) è prevista la scelta tra impianti centralizzati e autonomi, con generatori di calore di tipo diverso (caldaia tradizionale, caldaia a condensazione; pompa di calore elettrica); per le pompe di calore elettriche è possibile indicare la classe energetica in riscaldamento. Devono anche essere indicati i terminali di impianto (radiatori, ventilconvettori, pavimenti radianti) e la modalità di regolazione dell’impianto stesso (solo climatica in caldaia; termostato manuale; termostato programmabile; termostato e valvole termostatiche su ogni radiatore; termostato e valvole termostatiche su programmabili su ogni radiatore).

Per velocizzare l’immissione dei dati sono presenti due pulsanti laterali, attraverso i quali riportare i dati tipici di un impianto centralizzato o i dati tipici di un impianto autonomo.

3. IMPIANTI	
3.1 IMPIANTO DI RISCALDAMENTO	
Tipo di impianto di riscaldamento	Autonomo
Tipo di generatore di calore	Caldaia a condensazione
Classe energetica media in riscaldamento	A+
Terminali in ambiente	Radiatori (termosifoni)
Modalità di regolazione	Termostato programmabile

Impianto autonomo a gas con radiatori e termostato

Impianto centralizz. a gas con radiatori

Figura 8.8 – Impianto di riscaldamento.

Sono state assimilate a “impianto di raffrescamento” (Figura 8.9) tutte le apparecchiature impiegate ai fini del comfort termoigrometrico nella stagione estiva.

Per i condizionatori elettrici è necessario indicare la classe energetica in raffrescamento e il numero di stanze climatizzate; per gli altri apparecchi ad uso marginale è richiesto di indicare la quantità e le ore di uso giornaliero. Anche in questo caso sono presenti pulsanti laterali per immissione rapida dei dati, che consentono di riportare rapidamente la condizione di totale assenza di questi apparecchi e la condizione con tutti gli ambienti climatizzati.

3.2 IMPIANTO DI RAFFRESCAMENTO		
Tipo di impianto di raffrescamento	Condizionatore elettrico	
Classe energetica media in raffrescamento	A+	
Numero di stanze climatizzate	2	su un totale di 7 stanze
ALTRI APPARECCHI		
	QUANTITA'	ORE USO GIORNALIERO
Ventilatore		10
Deumidificatore portatile		10

Nessun condizionatore

Condizionatori in tutte le stanze

Nessun apparecchio

Figura 8.9 – Impianto di raffrescamento.

Relativamente agli impianti per la preparazione dell’acqua calda sanitaria, è possibile scegliere tra diverse tipologie (caldaia tradizionale, caldaia a condensazione, scaldabagno a pompa di calore, scaldabagno elettrico a resistenza) e indicare la eventuale presenza di un impianto solare termico (a circolazione naturale o forzata, con pannelli piani o sottovuoto) con le relative caratteristiche dimensionali (numero di pannelli) e di collocazione (inclinazione e orientamento).

3.3 IMPIANTO DI PREPARAZIONE DELL'ACQUA CALDA SANITARIA	
Tipo di impianto di preparazione dell'acqua calda sanitaria	Caldaia a condensazione

3.4 IMPIANTO SOLARE TERMICO (per acqua calda)	
Tipo di impianto	Nessuno
Numero di pannelli solari termici	
Inclinazione (tilt)	°
Orientamento rispetto al sud (azimut)	°

Figura 8.10 – Impianto di preparazione acqua calda sanitaria.

Le informazioni necessarie a calcolare l’autoproduzione di energia elettrica effettuata con impianti fotovoltaici sono quelle riportate in Figura 8.11, ovvero la potenza nominale dell’impianto, la sua inclinazione e il suo orientamento.

3.5 IMPIANTO SOLARE FOTOVOLTAICO (per energia elettrica)	
Potenza dell'impianto fotovoltaico	kWp
Inclinazione (tilt)	°
Orientamento rispetto al sud (azimut)	°

Figura 8.11 – Autoproduzione di energia elettrica con impianti fotovoltaici.

8.2.4 Elettrodomestici

Le informazioni relative agli usi energetici di cucina, refrigerazione e congelazione sono quelle riportate in Figura 8.12.

Per il piano cottura è possibile scegliere tra tre diverse alternative (a gas, elettrico, elettrico a induzione), indicando i minuti di uso giornaliero; per il forno è possibile scegliere tra due alternative (elettrico, a gas); per le altre apparecchiature è unicamente necessario indicare i minuti di uso giornaliero.

Sono presenti tre pulsanti laterali per velocizzare l’immissione, che consentono di riportare i minuti di uso giornaliero corrispondenti ad un uso alto, medio o basso.

4. ELETTRODOMESTICI		
4.1 CUCINA		
	TIPO	MINUTI USO GIORN.
Piano cottura	A gas	60
Forno a microonde		5
Forno	Elettrico	7
Griglia		0
Bistecchiera/Piastra elettrica		0
Tostapane		0
Macchina caffè espresso elettrica		0
Macchina moka elettrica		0
Frullatore		0
Robot cucina		0

Altri apparecchi non inclusi nella lista possono essere inseriti in 4.8

Uso giornaliero ALTO

Uso giornaliero MEDIO

Uso giornaliero BASSO

Figura 8.12 – Cucina.

Le apparecchiature utilizzate per la refrigerazione e per la congelazione possono essere selezionate attraverso un menù a tendina (frigorifero a temperatura moderata o cantina; frigorifero con scomparto a 1 stella; frigorifero con scomparto a 2 stelle; frigorifero con scomparto a 3 stelle; frigo-congelatore, congelatore verticale; congelatore a pozzetto). Per le apparecchiature presenti è necessario indicare il volume utile e la classe energetica.

4.2 REFRIGERAZIONE		
TIPO DI FRIGORIFERO	VOLUME [litri]	CLASSE ENERGETICA
Frigo-congelatore	320	A+
Congelatore a pozzetto	125	A+
Nessuno		
Nessuno		

Figura 8.13 – Refrigerazione, congelazione.

Per i grandi elettrodomestici (lavatrice, asciugatrice, lavastoviglie, lavasciuga) è necessario indicare la capacità di carico, il numero di cicli settimanali e la classe energetica. È presente un pulsante laterale che consente di immettere rapidamente il numero medio di cicli settimanali, conformemente a quanto riportato in [5]. Per le altre apparecchiature è unicamente necessario indicare i minuti di uso giornaliero.

4.3 LAVAGGIO, PULIZIA E STIRATURA			
	CAPACITA' DI CARICO	CICLI SETTIMANALI	CLASSE ENERGETICA
Lavatrice [kg]	7	5,0	A+
Asciugatrice [kg]		5,8 (val. medio per 5 o più persone)	B
Lavastoviglie [coperti]		6,3 (val. medio per 5 persone)	A
Lavasciuga [kg]		4,00	

Utilizzo medio in base al numero di persone

	MINUTI USO GIORN.
Aspirapolvere	5
Scopa elettrica	
Ferro da stiro senza caldaia	
Ferro da stiro con caldaia	

Altri apparecchi non inclusi nella lista possono essere inseriti in 4.8

Figura 8.14 –Lavaggio biancheria, asciugatura biancheria, lavaggio stoviglie, pulizia, stiratura.

Le informazioni relative all’illuminazione degli ambienti sono quelle riportate in Figura 8.15 e prevedono una semplice numerazione delle lampade, con suddivisione tra le diverse tipologie (a incandescenza; alogene; fluorescenti; a led). Sono presenti dei pulsanti laterali per un’immissione rapida, attraverso i quali è possibile inserire dei valori precalcolati per illuminazione poco efficiente, media o molto efficiente.

4.4 ILLUMINAZIONE

Inserisci qui sotto tutte le lampadine che hai a casa, comprese le lampade da tavolo, degli specchi, ecc.
Non mettere quelle del frigorifero (sono comprese nei consumi del frigo) e quelle della cappa (sono comprese nei consumi della cappa).

TIPO LAMPADE	NUMERO DI LAMPADE
Obsolete (lampade a incandescenza)	2
Tradizionali (lampade alogene)	4
A risparmio energetico (lampade fluorescenti)	10
Ad alta efficienza (lampade, moduli o strisce LED)	2

illuminazione poco efficiente

illuminazione media

illuminazione molto efficiente

Figura 8.15 – Illuminazione ambienti.

Le informazioni relative alle postazioni PC, alle postazioni audio-video e ad altri elettrodomestici di uso marginale sono quelle riportate in Figura 8.16.

Si tratta in generale di apparecchiature per le quali la caratterizzazione energetica viene effettuata con riferimento a valori medi di potenza elettrica e in base all'uso effettuato.

Unica eccezione sono i televisori o i monitor, sottoposti a etichettatura energetica [25], per i quali è necessario fornire indicazioni circa le dimensioni e la classe energetica.

4.5 AUDIO/VIDEO

	QUANTITA'	DIMENSIONI [pollici]	CLASSE ENERGETICA	ORE USO GIORNALIERO
Televisore o monitor 1	1	23" = 58,4 cm	A+	6,0
Televisore o monitor 2	1	26" = 66 cm	A+	6,0
Televisore o monitor 3		20" = 50,8 cm	A+	1,0
Televisore o monitor 4		15" = 38,1 cm	F	2,0

	QUANTITA'	ORE USO GIORNALIERO
Decoder		2,0
Videoregistratore		2,0
Letto DVD		2,0
Riproduttore audio (radio, stereo p		2,0
Impianto hi-fi/home theatre		3,0

Altri apparecchi non inclusi nella lista possono essere inseriti in 4.8

Uso giornaliero alto

Uso giornaliero medio

Uso giornaliero basso

4.6 COMPUTER/INTERNET

	QUANTITA'	ORE USO GIORNALIERO
Computer fisso (il monitor va messo tra le TV)		2,0
Computer portatile	4	6,0

	Flat (sempre connessa)
Connessione a internet	

	QUANTITA'	STAMPE AL GIORNO
Stampante a getto di inchiostro	1	5,0
Stampante laser		5,0

Altri apparecchi non inclusi nella lista possono essere inseriti in 4.8

Uso giornaliero alto

Uso giornaliero medio

Uso giornaliero basso

4.7 CURA DELLA PERSONA

	MINUTI USO GIORN.
Asciugacapelli	40
Piastra per capelli	

Altri apparecchi non inclusi nella lista possono essere inseriti in 4.8

4.8 ALTRI APPARECCHI

	QUANTITA'	POTENZA MEDIA [W]	MINUTI USO GIORN.
Apparecchio 1		20	2
Apparecchio 2		25	5
Apparecchio 3			
Apparecchio 4			

Nessun apparecchio

Figura 8.16 – Postazioni audio/video, computer/internet, cura della persona, altri elettrodomestici.

8.3 Risultati delle simulazioni

8.3.1 Consumi elettrici

I dati raccolti vengono utilizzati per stimare i consumi elettrici e i costi ad essi associati (Figura 8.17). I risultati delle stime effettuate sono confrontati con i dati reali forniti dall'utente, in maniera tale che si possa procedere ad una correzione dei dati in caso di discordanza alta. In particolare, è presente una cella nella quale viene riportato il risultato del confronto, che assume colorazioni differenti (verde, arancione, rosso) al crescere della differenza percentuale (in valore assoluto) tra i dati della bolletta e i dati stimati e che suggerisce un elenco dei paragrafi sui quali effettuare eventuali correzioni dei dati di input. In automatico, vengono sviluppate semplici considerazioni sull'uso dell'energia elettrica (efficiente, non efficiente, intensivo non intensivo) con suggerimenti volti al risparmio energetico, nella misura indicata dal confronto tra i consumi reali e i consumi simulati.

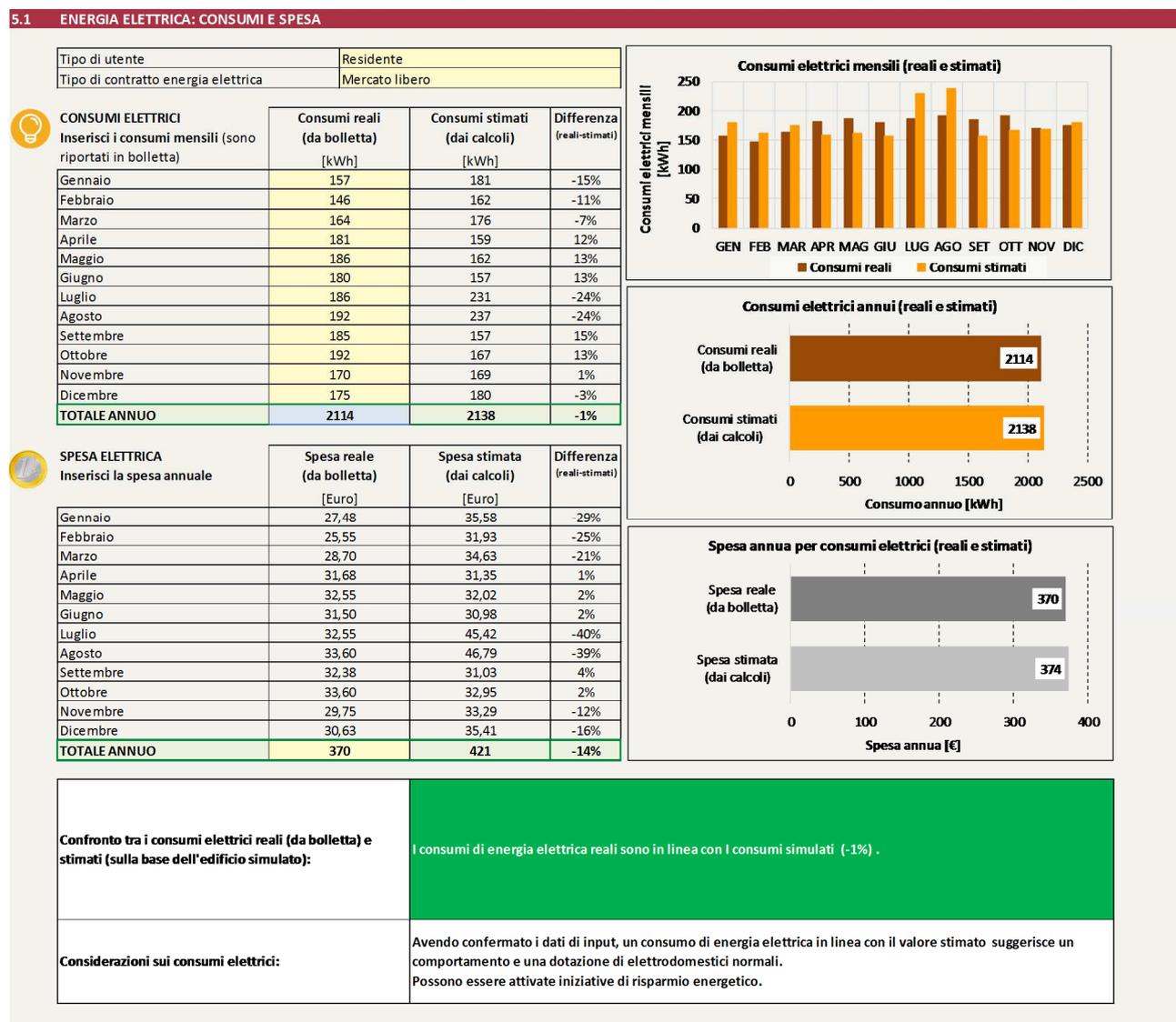


Figura 8.17 – Energia elettrica: consumi e spesa.

8.3.2 Consumi di gas

In maniera analoga a quanto visto per i consumi di energia elettrica, i dati raccolti vengono utilizzati per stimare i consumi di gas e i costi ad essi associati (Figura 8.18).

I risultati delle stime effettuate sono confrontati con i dati reali forniti dall'utente, in maniera tale che si possa procedere ad una correzione dei dati in caso di discordanza alta. In particolare, è presente una cella nella quale viene riportato il risultato del confronto, che assume colorazioni differenti (verde, arancione, rosso) al crescere della differenza percentuale (in valore assoluto) tra i dati della bolletta e i dati stimati e che suggerisce un elenco dei paragrafi sui quali effettuare eventuali correzioni dei dati di input.

Vengono poi sviluppate, in automatico, semplici considerazioni sull'uso del gas (efficiente, non efficiente, intensivo non intensivo) con suggerimenti volti al risparmio energetico, nella misura indicata dal confronto tra i consumi reali e i consumi stimati.

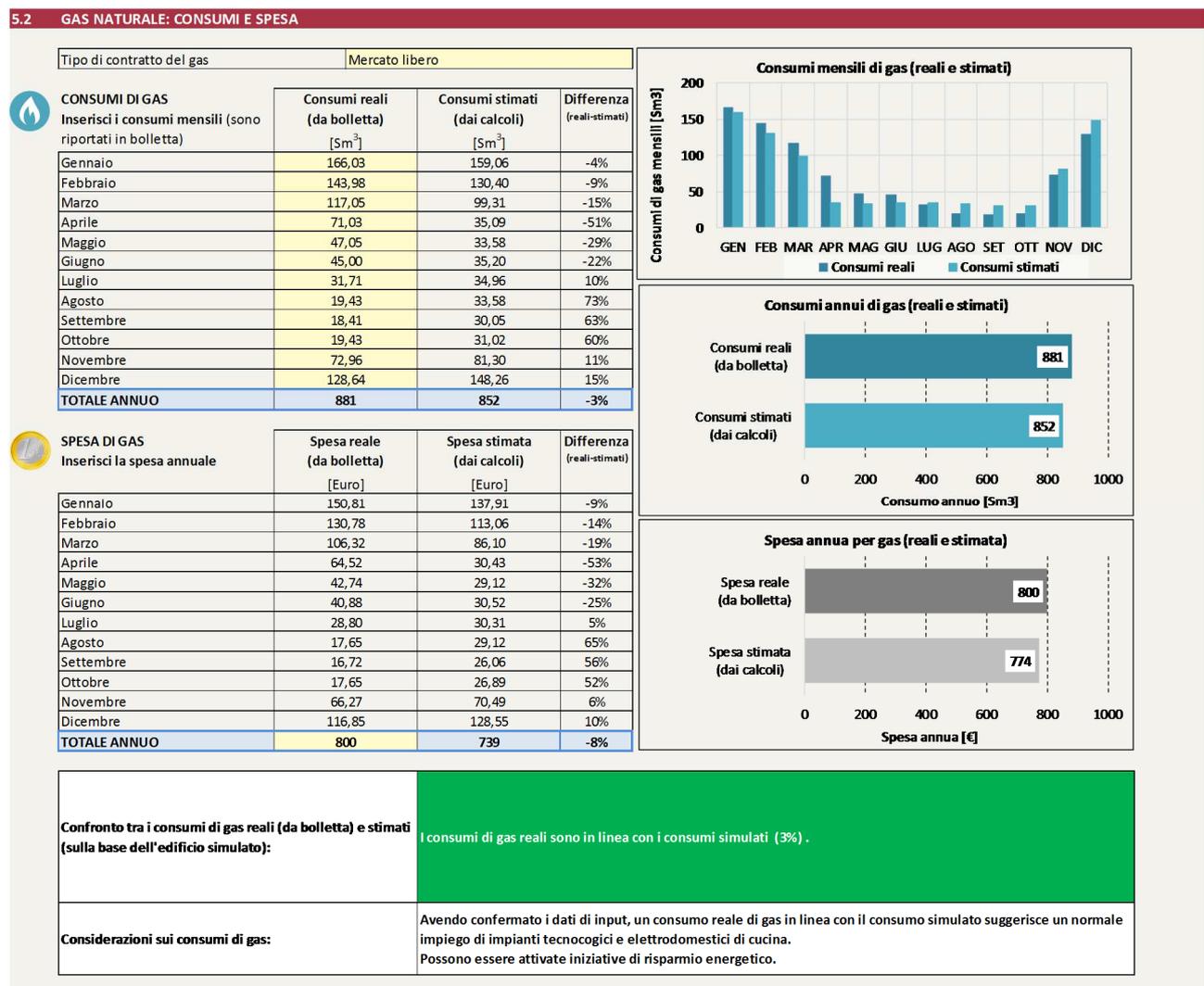


Figura 8.18 – Gas naturale: consumi e spesa.

8.3.3 Costi, elettrificazione, automazione

A valle dell’analisi dei consumi energetici, il foglio di calcolo presenta un confronto tra il costo medio dell’energia elettrica e del gas (Figura 8.19).

Viene effettuato anche un confronto tra i costi indicati dall’utente e i costi stimati sulla base dei migliori contratti disponibili, al fine di verificare se ci sono scostamenti dovuti semplicemente ad un contratto non idoneo o non aggiornato. Il risultato del confronto è mostrato in una cella che assume colorazioni differenti (verde, arancione, rosso) a seconda del confronto tra il costo unitario realmente sostenuto (calcolato sulla base degli input dati dall’utente) e il costo unitario stimato sulla base del miglior contratto offerto sul mercato libero dell’energia. Nel caso in cui vengano riscontrate possibilità di risparmio, il foglio di calcolo propone il link al sito web dell’Autorità per l’energia elettrica, il gas e il sistema idrico.

È anche proposta una indicazione della classe di efficienza energetica del sistema di automazione sulla base della Norma EN 15232:2007, con differenziazione tra gli usi termici e gli usi elettrici.

È poi valutato il grado di elettrificazione dell’abitazione, ottenuto rapportando, in termini di energia primaria, i consumi elettrici ai consumi totali; il calcolo è effettuato sia per l’edificio reale (sulla base dei dati di input relativi alle bollette), sia per l’edificio simulato (sulla base della simulazione effettuata). I valori ottenuti vengono confrontati con il riferimento rappresentato dal consumatore medio residenziale. A completamento del confronto, vengono poi sviluppate, in automatico, semplici considerazioni sul livello di elettrificazione dell’abitazione (basso, medio-basso, medio-alto, alto) con colorazioni diverse della cella, in base al confronto effettuato.

Da ultimo è riportato un riepilogo informativo riguardante la classificazione dei consumi elettrici dell’abitazione, con la suddivisione tra consumi accumulabili, differibili e non differibili (cfr. cap. 3).

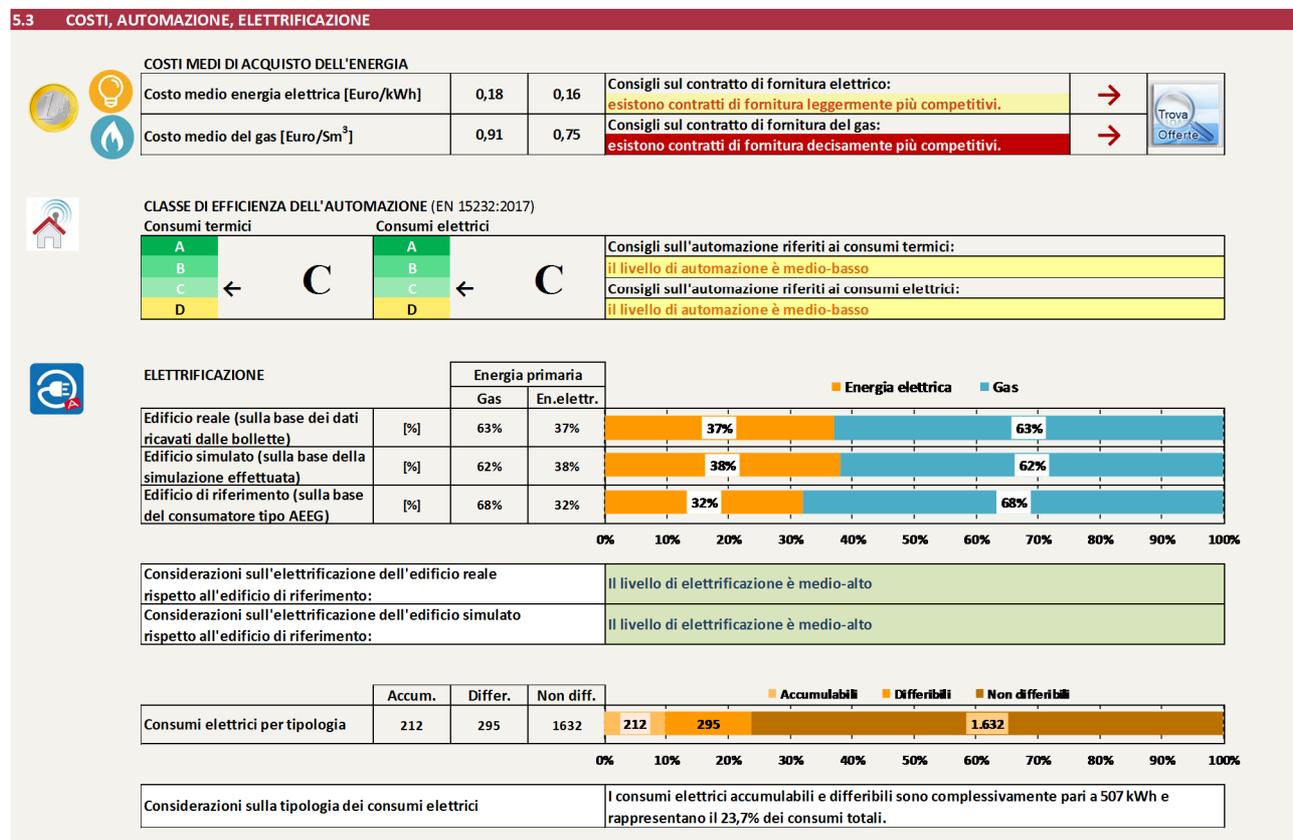


Figura 8.19 – Consumi, emissioni, costi complessivi.

8.4 Variazioni della dotazione tecnologica: risparmi potenziali

Il foglio di calcolo si conclude con una valutazione dei risparmi potenziali raggiungibili con una variazione della dotazione tecnologica dell'edificio.

La valutazione conclusiva è offerta in due versioni distinte:

- la versione per utente, che prevede una formulazione sintetica dei risultati, nella misura utile alla semplice informazione dell'utente;
- la versione per aggregatore, che invece propone la valutazione dei kit di automazione e che consente di simulare il potenziale di aggregazione, con una variazione delle dotazioni rappresentata dall'elettificazione delle utenze tradizionalmente termiche di cucina, preparazione dell'acqua calda sanitaria e riscaldamento.

I risparmi economici, in entrambe le versioni, sono calcolati a partire dai risparmi energetici e considerando anche i benefici raggiungibili grazie alla partecipazione ad un programma di Demand Response.

In particolare:

- per stimare il beneficio ottenibile dalla partecipazione ad un programma di DR implicito è stata considerata una traslazione di 12 ore dei consumi elettrici accumulabili e differibili, assumendo per questi consumi un minor costo del 20%, conformemente a quanto rappresentato in Figura 3.3;
- il beneficio ottenibile dalla partecipazione ad un programma di DR esplicito è stato considerato pari a 7 €/MWh, conformemente a quanto rappresentato in Figura 3.4.

8.4.1 Risparmi energetici ed economici ottenibili con sistemi di automazione – Versione per utente

A partire dalla configurazione esistente, il foglio di calcolo, in automatico, effettua una valutazione media dei risparmi energetici ed economici ottenibili introducendo un kit di automazione ENEA (LOW, MEDIUM, HIGH) e scegliendo i migliori contratti di fornitura (dell'energia elettrica e del gas) disponibili.

I risparmi energetici sono valutati effettuando una media tra i risparmi ottenibili con i tre diversi kit di automazione, volendo dare all'utente solo una prima indicazione dei risparmi potenziali e volendo lasciare all'aggregatore (o in ogni caso ad un soggetto esperto) la scelta definitiva del kit più appropriato.

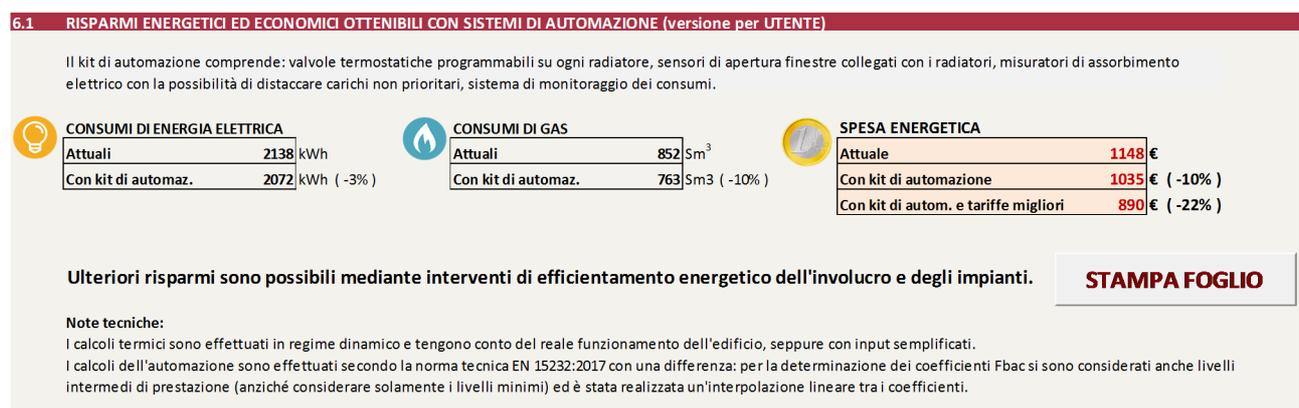


Figura 8.20 – Risparmi energetici ed economici ottenibili con sistemi di automazione – Versione per utente.

8.4.2 Risparmi energetici ed economici ottenibili con sistemi di automazione – Versione per aggregatore

La valutazione per l'aggregatore prevede delle analisi preliminari sui consumi energetici, a valle di quelle già effettuate, utili a rappresentare all'aggregatore la gestione energetica dell'abitazione da un diverso punto di vista, in una chiave di ottimizzazione dell'investimento; in particolare, i confronti qui effettuati vogliono porre all'attenzione dell'aggregatore eventuali ulteriori margini di risparmio nella gestione energetica dell'abitazione, soprattutto in presenza di consumi dichiarati alti.

Viene riproposto il confronto tra i consumi di gas reali e simulati e viene effettuato un confronto tra i consumi reali e i consumi medi statistici di una famiglia tipo della stessa composizione e residente nella stessa

provincia; il risultato del confronto è ancora proposto in una cella che assume colorazioni differenti (verde intenso, verde chiaro, bianco, arancione, rosso) a seconda del risultato del confronto (molto inferiore, inferiore, in linea, superiore o molto superiore).

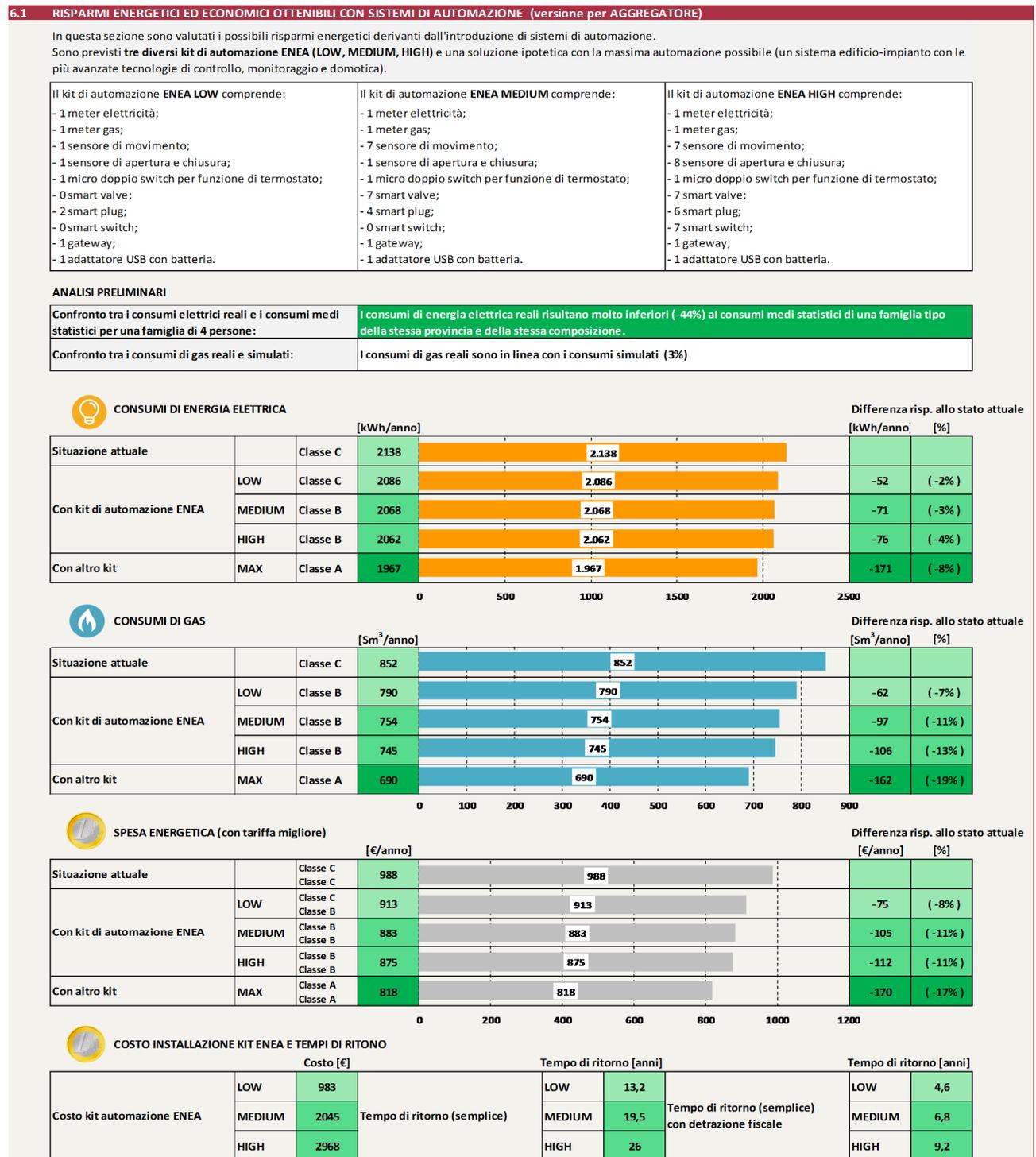


Figura 8.21 – Risparmi energetici ed economici ottenibili con sistemi di automazione – Versione per aggregatore.

A partire dalla configurazione esistente, il foglio di calcolo, in automatico, effettua una valutazione dei risparmi energetici ed economici ottenibili introducendo i tre diversi kit di automazione ENEA (LOW, MEDIUM, HIGH) e un ipotetico kit, in grado di raggiungere la classe A di automazione. Relativamente ai kit di automazione ENEA il foglio di calcolo propone la classificazione sulla base della EN15232 con riferimento agli usi elettrici e agli usi termici ed effettua un computo dei componenti necessari,

in funzione delle caratteristiche dell'abitazione, una stima preliminare del costo di installazione e una valutazione del tempo di ritorno semplice (costo/risparmio) dell'investimento, con o senza detrazioni fiscali.

8.4.3 Potenziale di elettrificazione dell'abitazione – Versione per aggregatore

A partire dalla situazione esistente, è possibile anche valutare il potenziale di elettrificazione dell'abitazione. In particolare, è possibile valutare i potenziali risparmi energetici ed economici derivanti dall'elettrificazione delle utenze di cucina, di preparazione dell'acqua calda sanitaria e di riscaldamento.

A differenza delle altre sezioni del foglio di calcolo, in questa sezione il calcolo deve essere avviato manualmente utilizzando il pulsante presente. Questa differenziazione si è resa necessaria per non appesantire il foglio di calcolo, che nella versione proposta ha già una dimensione di circa 10,5 MB.

Con riferimento ai carichi elettrici di ognuna delle varianti esaminate, con l'intenzione di valutare il potenziale di aggregazione, è anche effettuata una ripartizione tra carichi accumulabili, carichi differibili e carichi non differibili, utilizzando la classificazione precedentemente descritta.

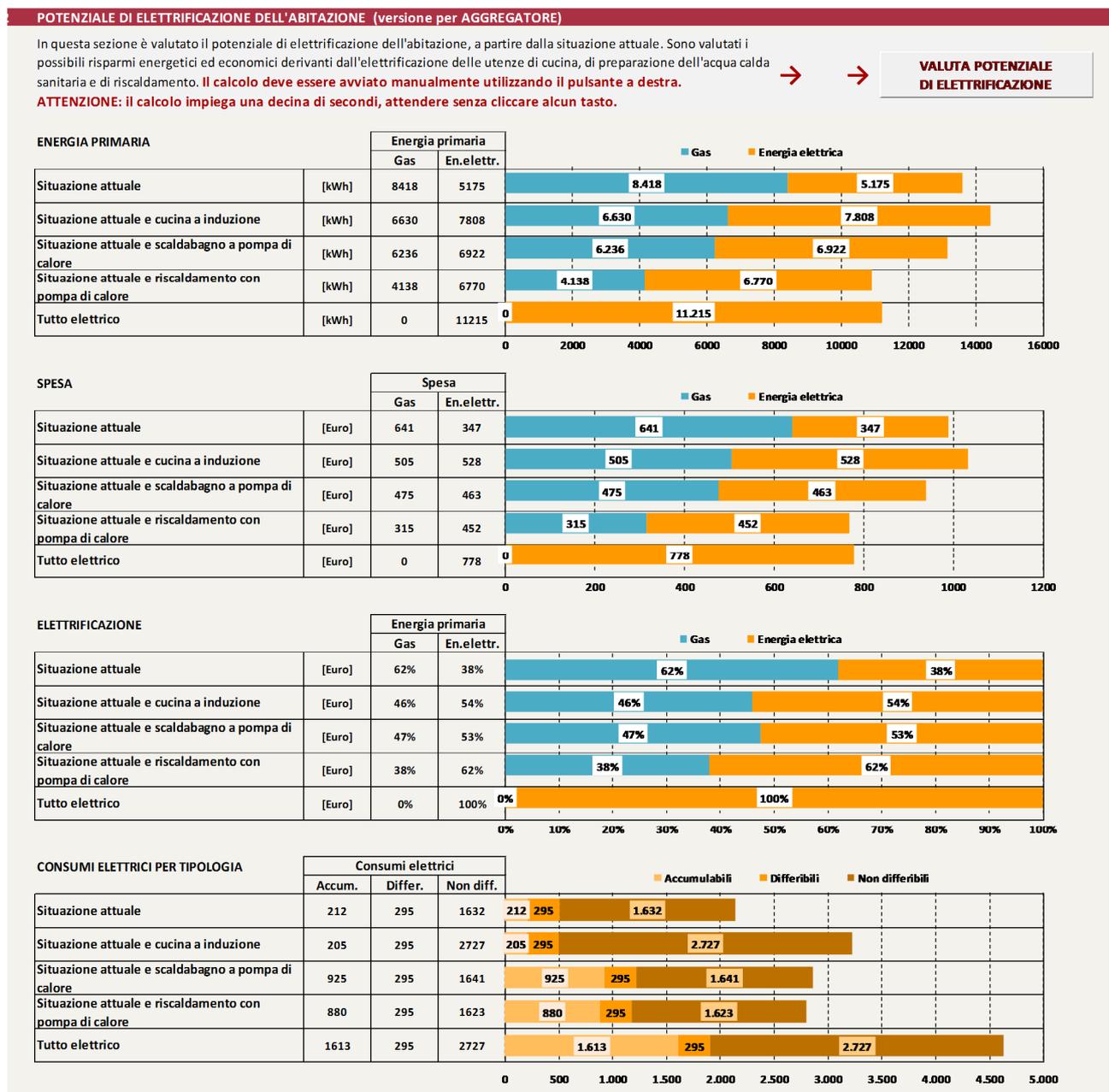


Figura 8.22 – Potenziale di elettrificazione dell'abitazione.

9 Casi studio

L'ultima fase di test del foglio di calcolo ha riguardato la raccolta delle informazioni su edifici reali. Tale fase è stata condotta inviando il foglio di calcolo ad una serie di utenti selezionati, al fine di poter avere un riscontro rapido sui dati immessi e al fine di reperire informazioni affidabili.

Tabella 9.1 – Casi studio esaminati: caratteristiche salienti.

Id.	Comune	Superficie abitazione [m ²]	Occupanti	Generatore di calore (Riscaldamento)	Impianto di raffrescamento	Stanze climatizzate	Preparazione acqua calda sanitaria	Piano cottura
CD7922	Civitavecchia	106	4	Caldaia a gas naturale tradizionale	Nessuno	5	Caldaia a gas naturale tradizionale	A gas
GM6718	Manziana	237	4	Caldaia a gas naturale a condensazione	Condizionatore elettrico	2	Caldaia a gas naturale a condensazione	A gas
FF8618	Roma	126	4	Caldaia tradizionale	Condizionatore elettrico	4	Caldaia tradizionale	A gas
SL7541	Velletri	149	5	Caldaia a gas naturale a condensazione	Condizionatore elettrico	2	Caldaia a gas naturale a condensazione	A gas
PT61019	Viterbo	110	1	Caldaia a gas naturale a condensazione	Condizionatore elettrico	2	Caldaia a gas naturale a condensazione	A gas
ET5523	Roma	140	4	Caldaia a gas naturale a condensazione	Condizionatore elettrico	3	Caldaia a gas naturale a condensazione	A gas
FA8818	Ciampino	120	4	Caldaia a gas naturale a condensazione	Nessuno	3	Caldaia a gas naturale a condensazione	A gas
CF6918	San Mango Piemonte	270	3	Caldaia a gas naturale tradizionale	Condizionatore elettrico	3	Caldaia a gas naturale tradizionale	A gas
LF7614	Viterbo	168	3	Caldaia a gas naturale a condensazione	Nessuno	3	Caldaia a gas naturale a condensazione	A gas
EG5815	Genzano di Roma	200	4	Caldaia a gas naturale tradizionale	Nessuno	3	Caldaia a gas naturale tradizionale	A gas
PP51029	Roma	240	3	Caldaia a gas naturale tradizionale	Nessuno	3	Caldaia a gas naturale tradizionale	A gas
FM5913	Roma	100	3	Caldaia a gas naturale a condensazione	Condizionatore elettrico	2	Caldaia a gas naturale a condensazione	A gas
RV6719	Roma	90,4	3	Caldaia a gas naturale a condensazione	Nessuno	2	Caldaia a gas naturale a condensazione	A gas
AR7819	Viterbo	110	4	Caldaia a gas naturale a condensazione	Nessuno	2	Caldaia a gas naturale a condensazione	A gas
FM9719	Viterbo	110	4	Caldaia a gas naturale a condensazione	Condizionatore elettrico	2	Scaldabagno a pompa di calore	A gas

La Figura 9.1 riporta un confronto tra i dati reali e i dati stimati per i casi studio, sia con riferimento ai consumi elettrici, sia con riferimento ai consumi di gas. Gli scostamenti, in valore assoluto, risultano inferiori al 15% per quanto riguarda i consumi elettrici e inferiori al 20% per quanto riguarda i consumi di gas.

Tali scostamenti possono essere ritenuti accettabili, vista la modalità di raccolta dei dati e le approssimazioni insite nella procedura.

In particolare, nel valutare i casi studio, si è osservata una generale difficoltà a leggere i dati dalle bollette (elettriche o del gas) da parte di un utente non esperto e una diffusa abitudine a non conservare i dati di consumo delle bollette, che rende alquanto difficoltosa la ricostruzione di dati medi di consumo e di spesa.

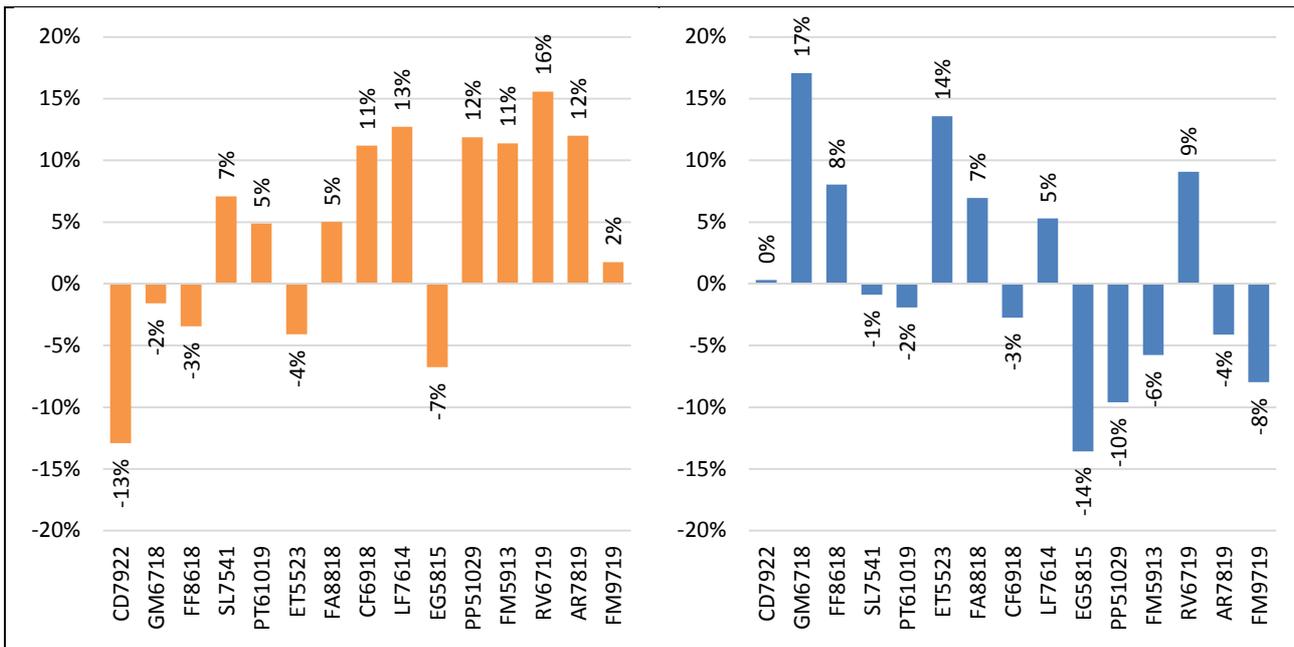


Figura 9.1 – Casi studio: confronto tra dati reali e stimati; consumi elettrici (a sinistra); consumi di gas (a destra).

I casi studio selezionati, con alcune eccezioni, sono caratterizzati da una elettrificazione non troppo diversa dal valore di riferimento individuato (32,1%) sulla base del consumatore tipo definito dall’Autorità per l’energia elettrica, il gas e il sistema idrico.

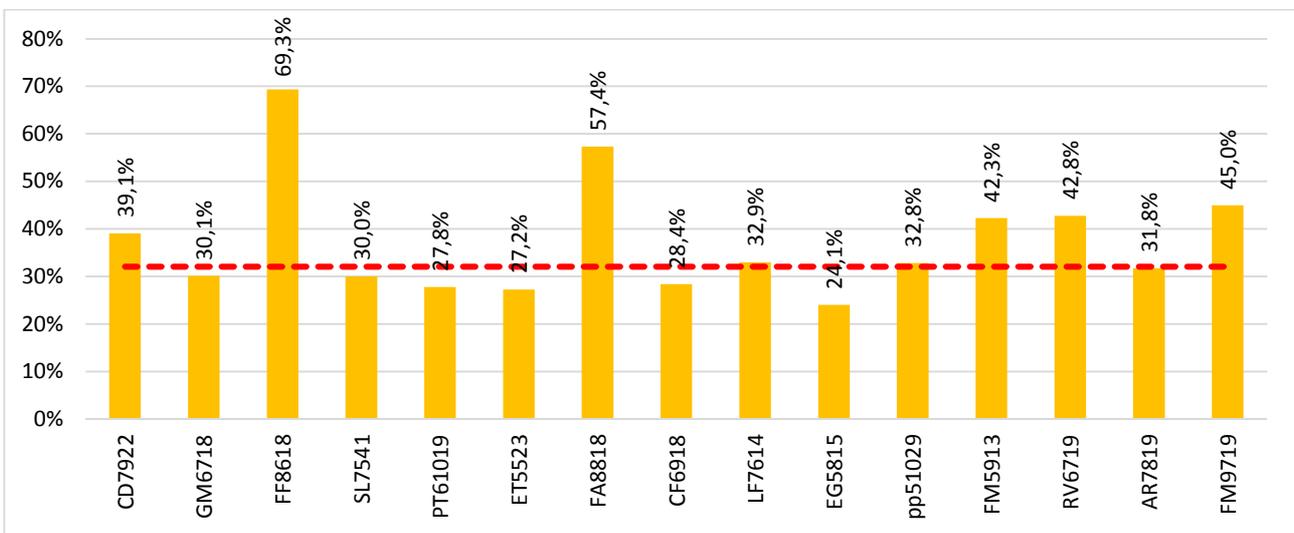


Figura 9.2 – Elettrificazione dei casi studio.

Per i casi studio, è stata anche valutata l’introduzione dei kit di automazione previsti da ENEA (LOW, MEDIUM, HIGH).

Il kit LOW consente risparmi medi di circa il 8,7%, con tempi di ritorno mediamente pari a 3,7 anni in presenza di detrazioni fiscali del 65%.

Il kit MEDIUM consente risparmi medi di circa il 13,6%, con tempi di ritorno mediamente pari a 5,1 anni in presenza di detrazioni fiscali del 65%.

Il kit HIGH consente risparmi medi di circa l’14,5%, con tempi di ritorno mediamente pari a 7 anni in presenza di detrazioni fiscali del 65%.

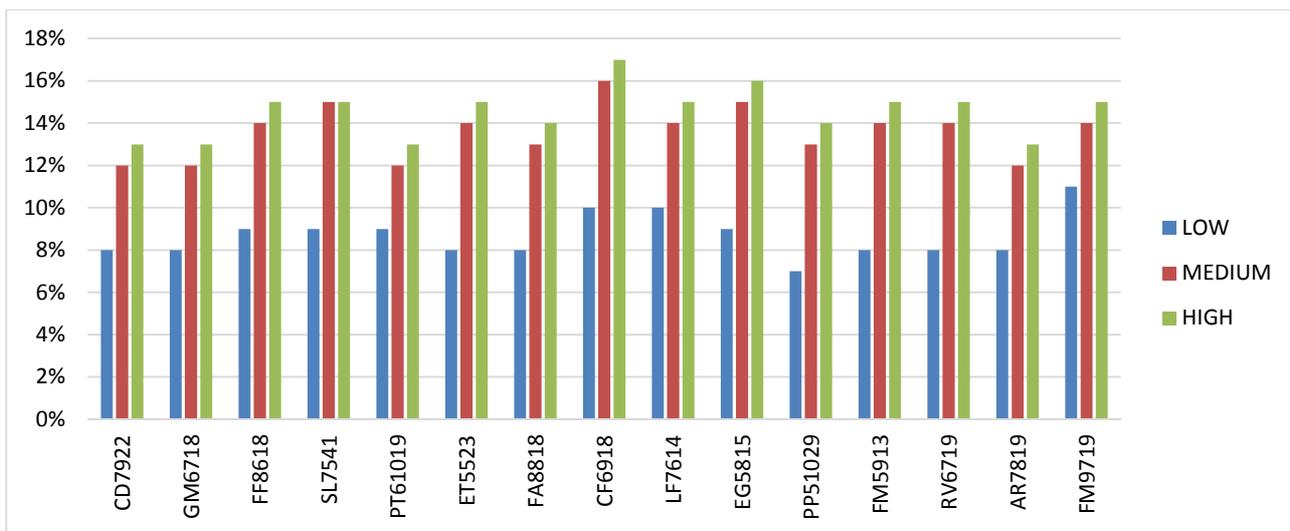


Figura 9.3 – Risparmi potenziali con kit di automazione, in percentuale.

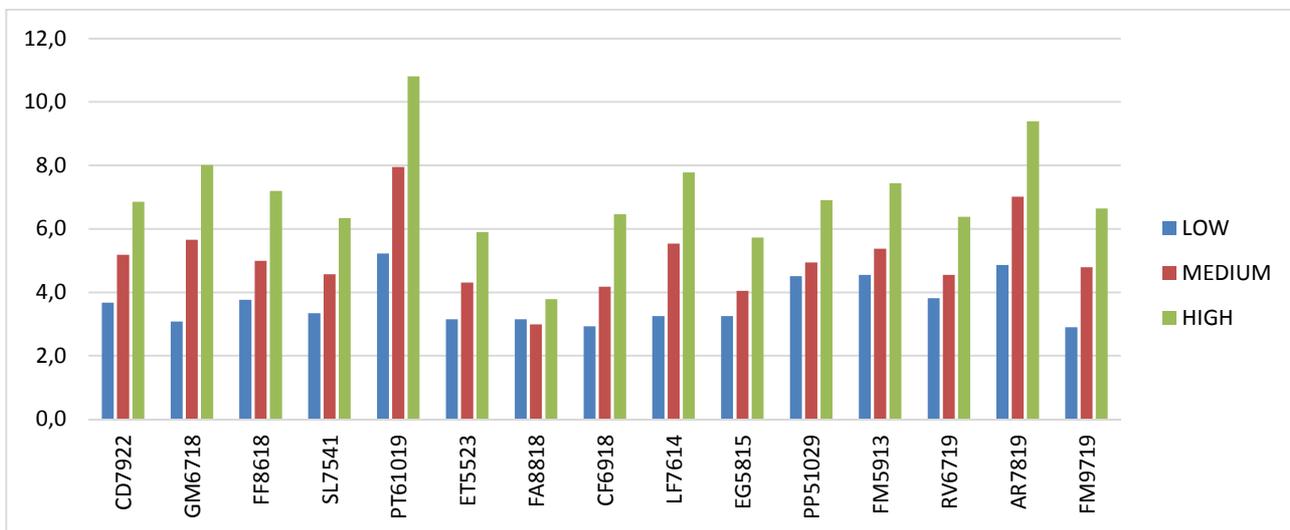


Figura 9.4 – Kit di automazione: tempi di ritorno semplici con detrazione fiscale del 65%, in anni.

Al fine di incrementare il numero di casi studio, coinvolgendo utenti mediamente esperti, il foglio di calcolo è stato inviato, sotto forma di newsletter, a tutti gli utenti iscritti al sito www.ingegneria.it. Tale sito è nella disponibilità degli autori di questo lavoro e viene utilizzato come interscambio di informazioni riguardanti la didattica e la ricerca che coinvolgono gli stessi autori.

10 Conclusioni

Il risultato del lavoro è il foglio di calcolo, che implementa la procedura e che è immediatamente disponibile su piattaforma Excel e che sta per essere reso disponibile anche su piattaforma web.

L'analisi dei dati già raccolti consente una prima caratterizzazione delle utenze residenziali e una prima valutazione del loro potenziale di aggregabilità.

Al crescere del numero di fogli di calcolo compilati, l'analisi dei dati raccolti consentirà di fare delle valutazioni approfondite di sensibilità sugli input, selezionando quelli maggiormente influenti ai fini della stima della prestazione energetica di un edificio residenziale.

Consentirà anche di individuare la propensione del generico utente a partecipare e a fornire informazioni utili e attendibili.

11 Riferimenti bibliografici

- [1] L. de Santoli, F. Mancini - Studio di un modello di aggregatore di uno smart district - Ricerca di Sistema Elettrico – settembre 2016
- [2] Smart Energy Demand Coalition (SEDC) - Demand Response: Clarification of the standard processes required between BRPs and independent aggregators.
- [3] X. He, N. Keyaerts, I. Azevedo, L. Meeus, L. Hancher, J. Glachant - How to engage consumers in demand response: a contract perspective - European University Institute (2013). ISSN 1028-3625
- [4] De Santoli L., Mancini F., Cecconi M. 2010. Riqualificazione dell'edilizia residenziale di una città. Il caso Roma AICARR JOURNAL, 18- 22, 1-2010;
- [5] De Santoli L., Mancini F., Cecconi M. 2009 Analisi energetica e proposte di riqualificazione del patrimonio edilizio residenziale della città di Roma Energy analysis for retrofitting proposals in Rome residential sector. AiCARR OTTOBRE 2009 Tivoli (RM).
- [6] ISTAT – I consumi energetici delle famiglie (2014)
- [7] www.kilowattene.enea.it/KiloWattene-consumi-famiglie.html
- [8] Raccomandazione CTI 14/2013 “Prestazioni energetiche degli edifici – Determinazione dell’energia primaria e della prestazione energetica EP per la classificazione dell’edificio” e successive norme tecniche che ne conseguono;
- [9] UNI/TS 11300-1 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale (2014)
- [10] UNI/TS 11300-2 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l’illuminazione in edifici non residenziali (2014)
- [11] UNI/TS 11300-3 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva (2010)
- [12] UNI/TS 11300-4 - Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria (2012)
- [13] Direttiva 2010/31/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 maggio 2010 sulla prestazione energetica nell’edilizia
- [14] ASHRAE. 1997 ASHRAE Handbook - Fundamentals. Chapter 28: Nonresidential cooling and heating load calculations.
- [15] Ip Seng lu. 1999. Experimental validation of the radiant time series method for cooling load calculations. University of Macau.
- [16] Spitler J.D., Fisher D.E., Pedersen C.O. 1997. The radiant time series cooling load calculation procedure. ASHRAE Transactions, Vol.103 part 2: 503-514.
- [17] Ceylan, H.T., and G.E. Myers. 1985. Application of response-coefficient method to heat-conduction transients. ASHRAE Transactions 91(1A): 30-39
- [18] Delsante A. E. 1991. A response-factor method for calculating coupled heat and moisture transfer in buildings.
- [19] Regolamento delegato (UE) n. 626/2011 della Commissione del 4 maggio 2011 che integra la direttiva 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l'etichettatura indicante il consumo d’energia dei condizionatori d’aria.
- [20] Regolamento delegato (UE) N. 1060/2010 della Commissione del 28 settembre 2010 che integra la direttiva 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l’etichettatura indicante il consumo d’energia degli apparecchi di refrigerazione per uso domestico.
- [21] Regolamento delegato (UE) N. 1061/2010 della Commissione del 28 settembre 2010c he integra la direttiva 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l’etichettatura indicante il consumo d’energia delle lavatrici per uso domestico.

- [22] Regolamento delegato (UE) N. 392/2012 della Commissione del 1 marzo 2012 che integra la direttiva 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l'etichettatura indicante il consumo d'energia delle asciugabiancheria per uso domestico.
- [23] Regolamento delegato (UE) N. 1059/2010 della Commissione del 28 settembre 2010 che integra la direttiva 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l'etichettatura indicante il consumo d'energia delle lavastoviglie per uso domestico.
- [24] DIRETTIVA 96/60/CE DELLA COMMISSIONE del 19 settembre 1996 recante modalità d'applicazione della direttiva 92/75/CEE del Consiglio per quanto riguarda l'etichettatura indicante il consumo di energia delle lavasciuga biancheria domestiche.
- [25] Regolamento delegato (UE) N. 1062/2010 della Commissione del 28 settembre 2010 che integra la direttiva 2010/30/UE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda l'etichettatura indicante il consumo d'energia dei televisori.
- [26] <http://trovaofferte.autorita.energia.it/trovaofferte/TKStart.do>
- [27] ISTAT – I consumi energetici delle famiglie (2014)
- [28] Terna S.p.A. – www.terna.it
- [29] Autorità per l'energia elettrica, il gas e il sistema idrico - Documento per la consultazione 34/2015/R/eel
- [30] UNI EN 15232-1:2017 - Prestazione energetica degli edifici - Parte 1: Impatto dell'automazione, del controllo e della gestione tecnica degli edifici - Moduli M10-4,5,6,7,8,9,10

Appendice: curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

Prof. Livio de Santoli

Professore ordinario (ING-IND/11) presso Sapienza Università di Roma; cattedra di Energy Management (Facoltà ingegneria, corso di laurea in Ingegneria Energetica) e Impianti Tecnici (facoltà di Architettura, corso di laurea in Architettura UE).

- Delegato dell'Ateneo della Sapienza per l'Edilizia e l'Energia
- Già preside della Facoltà di Architettura Valle Giulia, Sapienza Università di Roma (2009-2010)
- Presidente di AiCARR, Associazione Italiana Condizionamento dell'Aria, Riscaldamento, Refrigerazione, triennio 2014-2016
- Esperto di gestione dell'energia certificato secondo UNI-CEI 11339/2009 e in conformità con lo schema di cui all'art. 12 del DI 102/2014
- Coordinatore dell'Osservatorio della Autorità dell'Energia AEEGSI sull'efficienza energetica
- Membro del Comitato Direttivo del Coordinamento FREE (Fonti Rinnovabili e Efficienza Energetica) tra le associazioni italiane delle fonti energetiche e dell'efficienza energetica
- Membro dell'International Advisory Board della rivista scientifica internazionale Building Services Engineering Research & Technology (UK)

Ing. Francesco Mancini

Ingegnere meccanico, Dottore di Ricerca in Energetica, Ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale presso la Facoltà di Architettura dell'Università La Sapienza di Roma.

Docente dal 2002 presso la stessa Facoltà, dove è attualmente titolare dell'insegnamento di Impianti Tecnici. Dal 1999 svolge attività di ricerca prima presso il Dipartimento di Fisica Tecnica poi presso il Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura, dove si occupa prevalentemente di:

- procedure e metodologie per il controllo e il miglioramento della qualità energetico-ambientale in edilizia, con particolare riferimento allo studio del comportamento passivo dell'involucro edilizio;
- sistemi impiantistici a basso consumo di energia primaria, che impiegano fonti rinnovabili di energia o sistemi impiantistici ad alta efficienza;
- definizione di strategie di manutenzione per incrementare l'efficienza energetica di un patrimonio edilizio.

E' autore di 70 pubblicazioni scientifiche aventi come oggetto le ricerche svolte.

Ing. Marco Cecconi

Ingegnere elettrico ed elettronico, Dottore di Ricerca in Risparmio energetico e microgenerazione distribuita, libero professionista nel campo dell'uso razionale dell'energia.

Docente a contratto dal 2012 per università e istituti tra cui l'Università Sapienza e l'Università LUISS Guido Carli, sulle materie di Fisica Tecnica, Impianti, Efficienza energetica, Energie rinnovabili.

Ricercatore a contratto per università tra cui Sapienza e Marconi e aziende (Terna S.p.A., Avvenia s.r.l., Sustech s.r.l., Green network s.r.l.) su tematiche inerenti l'uso razionale dell'energia e sull'implementazione di software per la simulazione energetica dinamica degli edifici.

Responsabile della progettazione gli impianti elettrici del team Sapienza che rappresenterà l'Italia al Solar Decathlon Middle East 2018.

Libero professionista nel campo degli impianti, delle energie rinnovabili e della gestione razionale dell'energia, con oltre 80 incarichi completati.

Autore di 11 pubblicazioni scientifiche aventi come oggetto le ricerche svolte.