

Metodologie e algoritmi di diagnosi e caratterizzazione energetica degli edifici del terziario

In questo articolo si presentano metodi e algoritmi semplificati di diagnosi e caratterizzazione energetica degli edifici del settore terziario. Trattandosi di un lavoro finalizzato alla creazione di un sistema di supporto alle decisioni (DSS), gli algoritmi di analisi sono stati studiati in funzione dei dati di ingresso e in relazione alle informazioni che sono necessarie al sistema DSS, per una valutazione e confronto delle prestazioni energetiche anche fra strutture di simile utilizzo.

METHODOLOGIES AND CRITERIA FOR DIAGNOSIS AND CHARACTERIZATION OF TERTIARY SECTOR BUILDINGS

This paper presents simplified methods and algorithms aimed at the energy diagnosis and characterization in buildings of the tertiary sector. This work is integrated in a decision support system (DSS) and therefore the analysis algorithms were studied as a function of the input data and in relation to the information needed by the DSS, for evaluation and comparison of the energy performance also of similar use buildings.

INTRODUZIONE

In questo lavoro si descrive la metodologia messa a punto dagli autori all'interno di un Progetto di Ricerca PO FESR Sicilia 2007/2013, riguardante la realizzazione di una "Control Room per l'efficienza energetica e manutentiva" di edifici del settore terziario e, nello specifico, di un campione delle strutture di Poste Italiane presenti in Sicilia. Sono stati elaborati modelli, semplici rispetto a quelli esistenti [1] [2] [3] [4] [5], che consentono il rilievo e il caricamento veloce dei dati di input e che forniscono, in uscita, informazioni ed indicatori (valori di parametri, indici di prestazione stagionali, mensili, giornalieri o orari, segnali di warning, previsioni di consumo e di risparmio etc.) utili al decisore per la gestione del sistema e per una prima individuazione degli interventi di efficienza energetica.

METODOLOGIA PER LA STIMA DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE

Per la stima dei valori di prestazione energetica, da utilizzare per confronti e per il monitoraggio o la valutazione di andamenti dei consumi, è stato adottato, con qualche aggiustamento, il modello statico di bilancio energetico, valido in condizioni stazionarie.

Per ciascun edificio si calcolano i valori di fabbisogno teorico di energia, riferiti a desiderati periodi temporali: stagione di climatizzazione, mese, settimana o giorno. I dati si potranno confrontare con i valori di prestazione registrati o stimati negli stessi periodi o negli anni precedenti in strutture simili o nello stesso edificio in esame.

Il metodo prevede due tipi di analisi:

1) Primo tipo di analisi

Calcolo del fabbisogno teorico (valore di energia finale o primaria) dell'edificio in esame, effettuato sulla base dei parametri climatici della località (Gradi Giorno - GG, Irradiazione) e di quelli termo-fisici e termotecnici della struttura e degli impianti (Superfici, Trasmissioni, Potenze, Rendimenti etc.). Il valore del fabbisogno si può utilizzare per un confronto con quello di altri edifici o con il consumo stagionale reale

di energia per la climatizzazione misurato, "al contatore", nello stesso edificio (consumo finale). Le informazioni dedotte si possono usare per valutare la convenienza di interventi di manutenzione straordinaria, ristrutturazione o, al limite, alienazione dell'edificio/impianto o per l'individuazione di fattori di correlazione per il miglioramento del metodo.

2) Secondo tipo di analisi

Utilizzando lo stesso modello termo-fisico, si elaborano in tempo reale (minuto, ora) i dati rilevati dai sensori installati all'interno e all'esterno dell'edificio e sugli impianti. In questo caso si ottengono informazioni, seppur parziali, sulle dispersioni termiche medie dell'edificio e sull'energia dissipata nei periodi scelti per l'analisi (ora, giorno, settimana, mese).

Le informazioni vengono utilizzate per studiare la correlazione con i dati di consumo di energia rilevati tramite i sensori a bordo di impianti, quadri elettrici, contatori gas etc.

Lo scopo è quello di pervenire a indicazioni di tendenze e comportamenti del complesso edificio-impianto, ovvero a segnalazioni di anomalie, tutte informazioni utilizzabili per studiare strategie di gestione e interventi real time.

LINEE GENERALI DEL PRIMO MODELLO DI ANALISI

Per la climatizzazione invernale, come metodo d'approccio si è utilizzato, debitamente adattato, quello statico, semplificato, per il calcolo della prestazione energetica invernale degli edifici, indicato nelle Linee guida nazionali per la certificazione energetica [6].

Per il calcolo dell'Indice di prestazione energetica invernale, EPI, in kWh/(m³ anno) o kWh/(m² anno), viene prima valutato il consumo di riferimento medio stagionale, Fabbisogno Finale (FFi) o Fabbisogno di Energia Primaria (FEPi), in condizioni di climatizzazione standard interna a 20°C e senza intermittenza dell'impianto di climatizzazione. Non si tratta, quindi di consumi effettivi ma di valori a questi proporzionali.

Il valore del fabbisogno FF_i si può confrontare col dato di consumo di energia effettivamente registrato dall'edificio nella stagione e, insieme al parametro EP_i , può usarsi per un confronto col consumo specifico di altri edifici, una volta uniformato e normalizzato tenendo conto della zona climatica (p.e. dividendolo per il numero di GG della località per la stagione invernale), a parità di tipo di utilizzazione e di utenza dell'immobile.

Un altro valore di fabbisogno può calcolarsi sostituendo, nel modello, al valore dei GG della località [8], un valore calcolato come somma, estesa ai giorni del periodo di riscaldamento [7], o di un qualsiasi periodo, delle differenze medie giornaliere fra la temperatura misurata all'interno dell'edificio e quella misurata dalla stazione meteo installata all'esterno, se presente.

Calcolando il numero di GG su base mensile, disponendo di previsioni meteo o di dati degli anni precedenti [9], o sulla base di temperature interne "imposte", gli algoritmi forniscono una stima del nuovo consumo, da utilizzare per previsioni di spesa o di risparmio.

Nel caso estivo si è proceduto come nel caso della stagione invernale. Naturalmente gli apporti energetici gratuiti (solari o da metabolismo, computer, illuminazione etc.), che nel caso della stagionale invernale rappresentano una componente positiva, nel caso estivo costituiscono, al contrario, una componente negativa da smaltire con l'impianto di climatizzazione. Nel caso estivo, inoltre, va condotta l'analisi dell'attenuazione del carico termico attraverso i muri, in conseguenza della maggiore influenza che la capacità della parete di accumulare il calore ha sul ritardo di penetrazione dell'onda termica e, quindi, sullo smorzamento della sua intensità.

Nel seguito si riportano i tratti essenziali della metodologia rimandando, per i dettagli, allo specifico documento del progetto [10].

Caso climatizzazione invernale

L'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale da attribuire all'edificio (EP_i), riferito al volume lordo, si può ricavare come:

$$EP_i = \frac{(Q_{hi} / V_{lordo})}{\eta_{gi}} \quad (1)$$

con:

- Q_{hi} fabbisogno netto di energia termica dell'edificio (kWh/anno)
- V_{lordo} volume lordo climatizzato (m^3)
- η_{gi} rendimento globale medio stagionale che tiene conto, nel caso di impianti a pompa di calore (PDC), anche del rendimento del sistema elettrico medio nazionale ($\eta_{sen} = 0,46$ [11]).

Il fabbisogno netto Q_{hi} si calcola come (Figura 1):

$$Q_{hi} = 0,024 \cdot GG_i \cdot (H_{Ti} + H_{Vi}) - f_x (Q_{si} + Q_{ii}) \quad (2)$$

con:

- GG_i Gradi Giorno invernali della città in cui è ubicato l'edificio (Kgiorno)
- H_{Ti} coefficiente globale di scambio termico per trasmissione, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno di ciascuna superficie disperdente se prospiciente un locale non riscaldato o l'esterno (W/K)

- H_{Vi} coefficiente globale di scambio termico per ventilazione (W/K)
- f_x coefficiente di utilizzazione degli apporti gratuiti (adimensionale), assunto pari a 0,95
- Q_{si} apporti solari attraverso i componenti di involucro trasparente (kWh)
- Q_{ii} apporti gratuiti interni (kWh).

Considerato uno schema impiantistico di tipo misto, caldaie+PDC, si avrà una quota di Fabbisogno Finale di energia per la climatizzazione invernale coperta da caldaie, data da:

$$FFic = \frac{Q_{hi}}{\eta_{gc}} \times Q_{CC} / 100 \quad (3)$$

dove Q_{cc} è il valore percentuale di copertura del fabbisogno tramite caldaie.

Nel caso di caldaie il valore di $FFic$ si considera coincidente con il Fabbisogno di Energia Primaria non rinnovabile per la climatizzazione invernale (FEP_{ic}).

Analogamente, si può calcolare la quota di Fabbisogno Finale di energia coperta con PDC (FF_{iPDC}) data da:

$$FF_{iPDC} = \frac{Q_{hi}}{\eta_{gPDCi}} \times Q_{CPDC} / 100 \quad (4)$$

In questo caso, il valore di FF_{iPDC} rappresenta il consumo finale, "al contatore", di energia elettrica per l'alimentazione delle PDC. Il Fabbisogno di Energia Primaria per la climatizzazione invernale con PDC elettriche, si calcola come:

$$FEP_{iPDC} = \frac{FF_{iPDC}}{\eta_{sen}} \quad (5)$$

Il Fabbisogno Finale e quello di Energia Primaria, complessivi dell'edificio, si calcoleranno, naturalmente, come somma dei corrispondenti fabbisogni parziali.

Con la precedente simbologia, si possono calcolare gli Indici di prestazione energetica riferiti a: Superficie Utile S_{netta} , Superficie Utile e normalizzato alla zona climatica (GG_i), Superficie disperdente lorda $S_{displorda}$, Superficie disperdente lorda e normalizzato alla zona climatica (GG_i), Volume Lordo climatizzato V_{lordo} e Volume lordo e normalizzato alla zona climatica (GG_i) (Figura 1).

Caso climatizzazione estiva

Vista la rilevanza dei consumi per il raffrescamento degli edifici e la conseguente opportunità di una valutazione della qualità energetica non solo invernale degli stessi, si è ritenuto utile impostare un sistema di calcolo semplificato del fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva. Il quadro normativo tecnico attuale delle UNI-TS 11300 e altre [11], in materia di climatizzazione estiva degli edifici, richiede grandi quantità di informazioni e, pur risultando assai oneroso e complesso in termini di utilizzazione e di calcolo, non pare presenti altrettanta precisione nei risultati.

Si ricorda, tuttavia, che le componenti che determinano il consumo

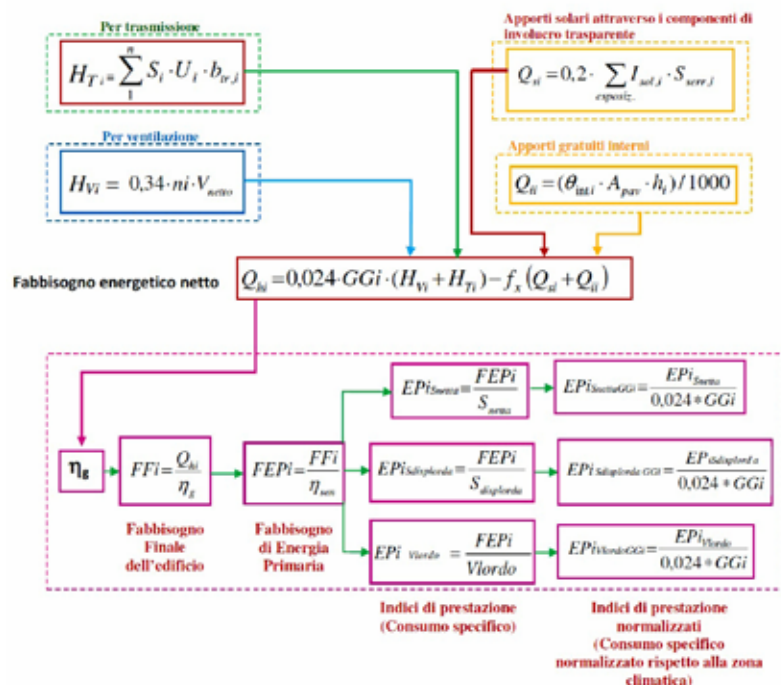


FIGURA 1 - Le componenti del Bilancio energetico di un edificio - caso invernale

energetico estivo di un edificio sono le stesse di quelle della stagione invernale: trasmissione di calore attraverso le pareti, irraggiamento solare su pareti e su finestre, carichi interni di calore e umidità dovuti a presenza di persone – utenti e personale – ed apparecchiature (PC, stampanti, Illuminazione...). Cambia, naturalmente, il punto di vista: gli apporti gratuiti invernali diventano carichi in estate, compresi i quelli di calore e di umidità da metabolismo umano.

Si è ritenuto comunque utile, anche per il caso estivo, partire dall'equazione generale di bilancio energetico, adattandola al caso estivo circa ritardi e smorzamenti dell'onda termica.

In tali ipotesi semplificative, l'indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva da attribuire all'edificio (EP_e), può essere ricavato come:

$$EP_e = \frac{(Q_{he} / V_{lordo})}{\eta_{ge}} \quad (6)$$

con:

Q_{he} fabbisogno di energia per il raffrescamento (kWh/anno)

V_{lordo} volume lordo climatizzato (m³)

η_{ge} rendimento globale medio stagionale.

Nel caso estivo il fabbisogno netto di energia Q_{he} si calcola come (Figura 2):

$$Q_{he} = 0,024 \cdot GGe \cdot (H_{Te} + H_{Ve}) + f_x \cdot (Q_{se} + Q_{ie}) \quad (7)$$

con:

GGe Gradi Giorno estivi della città in cui è ubicato l'edificio in esame
 H_{Te} coefficiente globale di scambio termico per trasmissione, corretto per tenere conto della differenza di temperatura interno-esterno

di ciascuna superficie di trasmissione se prospiciente locali non raffrescati o direttamente verso l'esterno (W/K)
 H_{Ve} coefficiente globale di scambio termico per ventilazione (W/K)

f_x coefficiente di utilizzazione dei carichi per irraggiamento solare attraverso le superfici vetrate e per apporti interni, assunto pari a 0,95

Q_{se} apporti solari attraverso i componenti trasparenti (kWh)

Q_{ie} apporti interni di carico termico da smaltire (kWh).
Il Fabbisogno Finale di energia dell'edificio, fornito usualmente con gruppi frigo elettrici, è dato da:

$$FFE = \frac{Q_{he}}{\eta_{ge}} \quad (8)$$

Il valore di FFe è da intendere proporzionale al consumo di energia elettrica "al contatore".

Il Fabbisogno di Energia Primaria per la climatizzazione dell'edificio con PDC o gruppi frigoriferi è pari a

$$FEPE = \frac{FFE}{\eta_{sen}} \quad (9)$$

Si possono adesso calcolare gli indici di prestazione energetica per la climatizzazione estiva riferiti a: Superficie Utile, Superficie Utile e normalizzato alla zona climatica (GGe), Superficie disperdente lorda, Superficie disperdente lorda e normalizzato alla zona climatica (GGe), Volume Lordo climatizzato e Volume lordo e normalizzato alla zona climatica (GGe) (Figura 2).

LINEE GENERALI DEL SECONDO MODELLO DI ANALISI

Per la conduzione del secondo tipo di analisi, allo scopo di acquisire informazioni utili al confronto fra i consumi teorici per la climatizzazione, in un periodo scelto, e i dati di assorbimento effettivo di energia registrato nello stesso periodo, è stato adoperato debitamente adattato, il modello termo fisico prima visto.

Si è operato sostituendo ai GG il valore della differenza di temperatura ΔT_i registrato, in un certo istante τ_i , fra l'interno e l'esterno della struttura edilizia. ΔT_i viene direttamente rilevato tramite i sensori interni all'edificio ed esterni della stazione meteo. Il risultato dei calcoli fornisce un valore correlabile, approssimativamente, alla potenza dispersa per trasmissione attraverso le pareti e per i ricambi d'aria.

Si può agire con intervalli di misura $\Delta \tau_i$ tutti uguali e costanti, purché abbastanza piccoli da poter ritenere costanti i parametri rilevati dai sensori. In questo modo è possibile calcolare il fabbisogno energetico istantaneo di potenza, mentre tale valore, moltiplicando per l'intervallo di tempo $\Delta \tau_i$, fornirà l'energia media consumata nel $\Delta \tau_i$, e, per sommatoria, il consumo di energia in un qualunque desiderato intervallo di tempo, ora, giorno, mese, stagione.

Occorre sottolineare, ancora una volta, che si è in presenza di un regime termico non stazionario. Il dato di potenza o quello di energia calcolato, col modello adottato, non è immediatamente correlabile agli

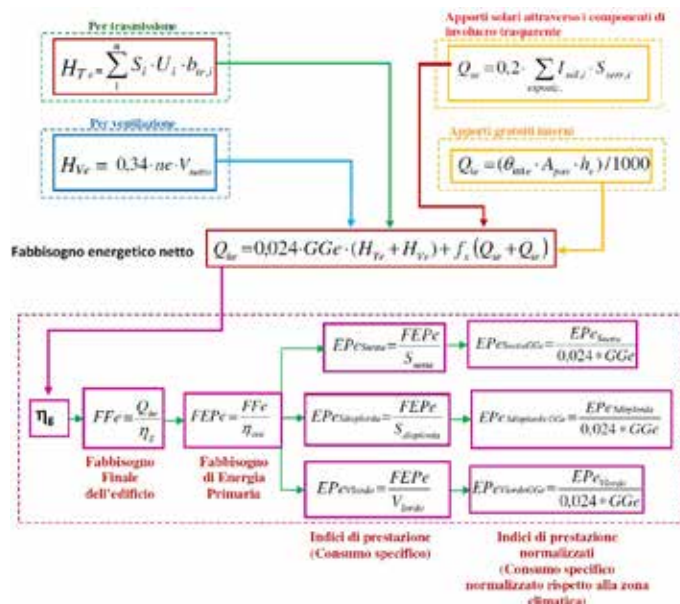


FIGURA 2 - Le componenti del Bilancio energetico di un edificio - caso estivo

delle costanti di assestamento o di correlazione, opportunamente introdotte per dare la possibilità di adattare, nel periodo scelto (ora, giorno, settimana, mese, stagione), gli andamenti del fabbisogno reale (di potenza o di energia) ai corrispondenti valori di consumo, in particolare, elettrico.

In seguito all'accumularsi delle misure e dei dati, sulla base di un confronto degli andamenti del fabbisogno teorico stimato e di quello di consumo misurato, nel periodo scelto per l'analisi, e anche dal confronto con i dati storici degli anni precedenti si possono modificare tali parametri, per un affinamento della correlazione fra i due andamenti (fabbisogno energetico teorico - consumo reale di energia).

Lo studio di questi coefficienti ed il confronto fra di essi e con quelli di altri edifici, di simile tipologia costruttiva, climatica e di tipo di utilizzazione, potrebbe risultare utile a successivi miglioramenti tanto della metodologia e degli algoritmi quanto degli aspetti teorici e pratici del bilancio termico degli edifici.

Per il caso estivo si hanno le stesse problematiche prima esaminante e si procede allo stesso modo: sostituendo ai GGe, il valore della differenza di temperatura ΔT registrato, in un certo istante, fra l'interno e l'esterno della struttura edilizia. Il dato è quello direttamente rilevato tramite i sensori, quelli interni all'edificio e quelli esterni della stazione meteo.

Operando in questo modo è possibile calcolare un fabbisogno energetico istantaneo (potenza) o, operando e sommando i consumi di energia in un qualunque desiderato intervallo di tempo, ora, giorno, mese, stagione.

La formula diventa (Figura 4):

$$Q_{hp} = a_{pest} + \sum_p (0,001 \cdot \Delta T \cdot (b_{pest} \cdot H_{Te} + c_{pest} \cdot H_{Ve}) - f_x (d_{pest} \cdot W_{se} + e_{pest} \cdot W_{ie})) \times \Delta t \quad (11)$$

nella quale, circa la simbologia, vale quanto detto nel caso invernale.

Anche nel caso estivo alla curva di fabbisogno teorico si potrà sovrapporre quella relativa all'andamento del consumo effettivo di energia misurato al contatore. Dal confronto degli andamenti si deducono informazioni utili alle scelte gestionali: accensioni, regolazioni, segnali di warning etc.

CONCLUSIONI

Nonostante i limiti già esposti, circa stazionarietà dei modelli termo-fisici, periodicità delle sollecitazioni, inerzie termiche delle strutture edilizie e degli impianti termici, la metodologia di diagnosi e monitoraggio energetico, messa a punto dagli autori, è risultata di semplice applicazione e utile supporto ai fini della gestione energetica delle strutture edilizie e degli impianti. Le informazioni dedotte si possono usare per valutare la convenienza di interventi di manutenzione straordinaria, ristrutturazione o, al limite, alienazione dell'edificio/impianto. Trattandosi, inoltre, di un sistema dinamico, l'analisi dei dati acquisiti permetterà di dedurre informazioni utili alle scelte gestionali, in tempo reale, di accensioni, spegnimenti, regolazioni o invio di segnali di warning, e consentirà anche di migliorare l'approccio metodologico e l'affinamento degli algoritmi.

assorbimenti effettivi di potenza o di consumo di energia. Bisognerebbe considerare ritardi e smorzamenti delle onde termiche dovuti alle inerzie di edifici ed impianti e a sollecitazioni climatiche ed apporti gratuiti variabili nell'arco della giornata e della stagione. È opportuno far notare che il sistema previsto è, comunque, dinamico e che l'analisi dei dati acquisiti permette di dedurre informazioni utili alle scelte gestionali (accensioni, spegnimenti, regolazioni, invio di segnali di warning o di allarme) ma anche di migliorare il metodo stesso.

Dal punto di vista del calcolo, nella formula (2) si vanno ad effettuare gli opportuni aggiustamenti in considerazione della tipologia di dati dinamici, quelli rilevati. I valori degli apporti di carico, solari ed interni sono considerati ed espressi in termini di potenza e per tale motivo sono indicati con W_{si} e W_{ii} . Nel calcolo di W_{si} si assume il valore di irradianza misurato dalla centralina e solo sulle superfici vetrate con le esposizioni da SE a SO, mentre per gli apporti interni gratuiti si opera assumendo, per esempio, il dato di potenza complessiva dovuto a computer e altri dispositivi di servizio e di illuminazione presenti nell'edificio in esame e al numero medio di persone presenti moltiplicato per il valore di 0,1 kW/persona, valore questo assumibile come dato medio della potenza termica emessa da ciascun individuo, in inverno, quando non impegnato in lavori manuali (0,2-0,3 kW/p in estate).

La formula, invernale, diventa (Figura 3):

$$Q_{hi} = a_{pinv} + \sum_p (0,001 \cdot \Delta T \cdot (b_{pinv} \cdot H_{Ti} + c_{pinv} \cdot H_{Vi}) - f_x (d_{pinv} \cdot W_{si} + e_{pinv} \cdot W_{ii})) \times \Delta t \quad (10)$$

ove con Δt , si sono indicati i tempi di misura, in ore, durante i quali i valori di temperatura, irradianza e utilizzazione dell'edificio si presume non varino.

Scelto il passo di misura e memorizzati i valori di consumo di energia di ciascun intervallo, si può operare a piacimento estendendo la somma degli intervalli al periodo di tempo desiderato, ora, giorno, settimana, mese, stagione.

Nella formula, inoltre, sono indicate con a_{pinv} , b_{pinv} , c_{pinv} , d_{pinv} , e_{pinv}

BIBLIOGRAFIA

1. UNI/TS 11300-Parte 1: "Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale"
2. UNI/TS 11300-Parte 2 "Prestazioni energetiche degli edifici - Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale, ..."
3. UNI/TS 11300-Parte 3 "Prestazioni energetiche degli edifici - Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva"
4. UNI/TS 11300-Parte 4 - "Prestazioni energetiche degli edifici - Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per riscaldamento di ambienti ..."
5. DM 26/6/2009 - MISE: "Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici"
6. All. 2 al DM 26/06/2009: "Schema di procedura semplificata per la determinazione dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale dell'edificio EPI"
7. D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412: "Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ..."
8. Allegato A, D.P.R. 26 agosto 1993, n. 412: "Tabella dei gradi/giorno dei Comuni italiani raggruppati per Regione e Provincia"
9. Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano - Assessorato regionale dell'Agricoltura, dello Sviluppo Rurale e della Pesca Mediterranea
10. F. Cappello, M. Iudicello e altri: D3.1 "Algoritmi di analisi dati e diagnostica delle prestazioni" - Progetto CREEM (Control Room per l'Efficienza Energetica e Manutenativa) PO FESR Sicilia 2007/2013
11. AEEG Delibera EEN 3/08: "Aggiornamento del fattore di conversione dei kWh in tonnellate equivalenti di petrolio ..."
12. UNI EN ISO 13790 - "Prestazione energetica degli edifici - Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento"

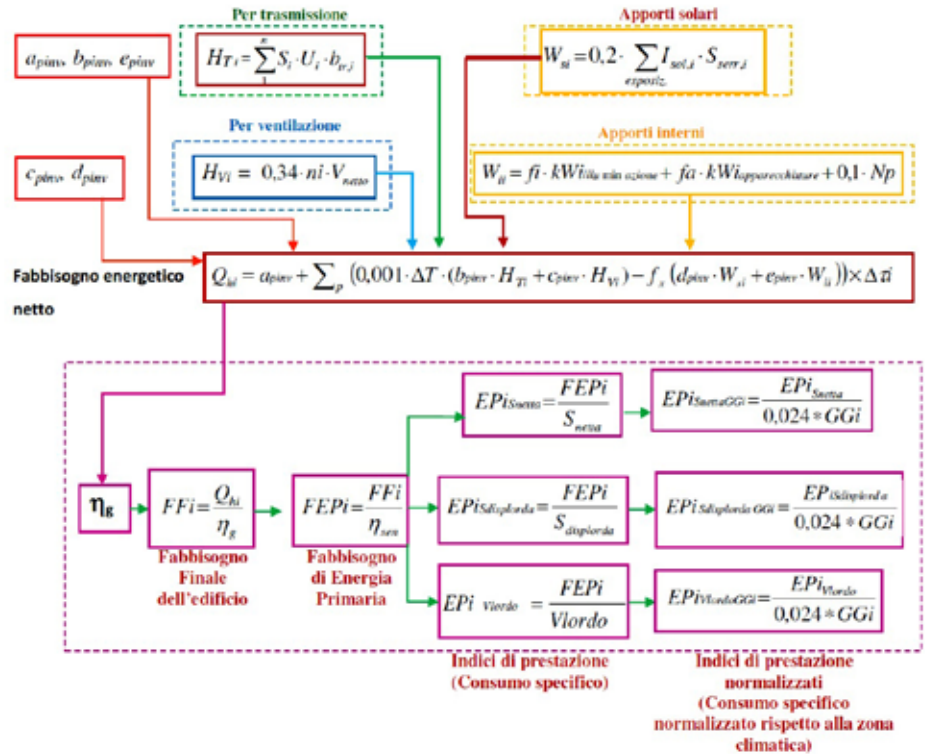


FIGURA 3 - Schematizzazione dell'algoritmo del modello di monitoraggio del fabbisogno energetico di un edificio - caso invernale

FIGURA 4 - Schematizzazione dell'algoritmo del modello di monitoraggio del fabbisogno energetico di un edificio - caso estivo

