



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

**La flessibilità energetica degli edifici
residenziali in riscaldamento e
raffrescamento**

Relatore:

Prof. Angelo Zarrella

Correlatore:

Ing. Jacopo Vivian

Laureando:

Umberto Chiodarelli

Matricola: 1132414

Anno Accademico 2017/2018

Indice

1	Introduzione	1
1.1	La definizione di flessibilità energetica	2
1.2	Le metodologie di calcolo della flessibilità	3
1.3	Obiettivi	7
2	Metodo	9
2.1	Metodologia per il calcolo della flessibilità energetica	9
2.2	Parametri decisionali	12
2.2.1	La durata degli eventi	12
2.2.2	Eventi estivi ed eventi invernali	13
2.2.3	La durata del rebound effect	14
2.3	La potenza di progetto degli impianti	15
2.4	Comportamento degli utenti	17
2.5	Applicazione con il software TRNSYS	21
3	Casi studio	27
3.1	Stratigrafia ed aree frontali delle superfici	28
3.2	Caratteristiche e distribuzione degli eventi	33
3.2.1	Distribuzione degli eventi estivi	36
4	Risultati	39
4.1	Effetto dell'involucro edilizio	39
4.1.1	Effetti nei casi estivi	49
4.2	Effetti dei diversi tipi di evento	51
4.2.1	Programmazione temporale degli eventi	56
4.2.2	L'influenza della potenza di progetto	61
4.3	L'effetto delle diverse abitudini dell'utenza	68
4.4	Gli eventi nella stagione di raffrescamento	81
5	Conclusioni	89
	Bibliografia	93

Capitolo 1

Introduzione

Il continuo interesse verso le fonti energetiche intermittenti rinnovabili negli ultimi anni sta causando il bisogno crescente di una gestione della domanda e della disponibilità di energia più intelligente rispetto al passato.

L'eolico e il solare, ad esempio, è ben noto che siano delle fonti non continue: il sole non è disponibile alla sera e il vento soffia in modo discontinuo nel tempo e in intensità in molte zone del mondo. Dunque, se si vuole far entrare un numero maggiore di fonti di questo tipo nella rete elettrica, una soluzione efficiente al problema è quella di riuscire a immagazzinare l'energia per poi rilasciarla nel momento del bisogno. Oppure, si può pensare invece di far variare la domanda di energia in modo tale che si adatti alla intermittenza della fonte.

Il concetto di Active Demand Response (ADR) è definito come la temporanea deviazione dalla domanda di energia rispetto ad uno scenario di riferimento, senza influenzare le normali operazioni dell'edificio [1]. Per gli edifici residenziali si traduce nel riuscire a modificare e adattare la domanda di energia con le disponibilità energetiche in determinate ore della giornata.

Un tipico esempio di ciò, è il caso di ipotetici pannelli solari installati in edifici residenziali. L'ADR applicato a questi casi si dirigerebbe verso soluzioni che permettano di spostare i consumi elettrici dell'utenza nel tempo in modo tale che essi avvengano nelle ore di maggiore disponibilità di energia solare, senza ovviamente che l'utente rinunci al comfort interno.

Questo sarebbe vantaggioso dal punto di vista del risparmio sui consumi elettrici e permetterebbe, in futuri sviluppi, di rendere competitive maggiori fonti rinnovabili intermittenti. Inoltre, con la gestione intelligente della domanda di energia dal punto di vista dell'utente finale, la rete elettrica ne gioverebbe anche dal

punto di vista della stabilità, permettendo lo sviluppo verso un sistema elettrico decentralizzato.

1.1 La definizione di flessibilità energetica

Esiste correntemente un importante progetto dell'agenzia internazionale dell'energia (IEA:International Energy Agency) chiamato "IEA EBC ANNEX 67 Energy Flexible Building" che ha lo scopo di studiare trovare soluzioni efficienti riguardanti il tema della flessibilità energetica. [2]

La prima definizione data dal progetto nei riguardi della flessibilità energetica di un edificio è la seguente:

"The Energy Flexibility of a building is the ability to manage its demand and generation according to local climate conditions, user needs, and energy network requirements. Energy Flexibility of buildings will thus allow for demand side management/load control and thereby demand response based on the requirements of the surrounding energy networks." [2]

Come spiegato nei loro rapporti, trovare una definizione rigorosa per soddisfare tutte le numerose applicazioni diverse a cui può essere implementata la flessibilità energetica non è stato un compito facile e sulla definizione sono pesati di più alcuni fattori rispetto ad altri. In ogni caso, essa è pienamente adatta agli scopi di questa tesi applicata agli edifici residenziali.

Insieme alla definizione però, in tale progetto, si possono delineare altri aspetti riguardanti la flessibilità energetica. Infatti, sono presenti tre principali compiti (*subtask*):

- Nel primo si cercano di definire in modo rigoroso le terminologie comuni utilizzate in questo campo di studio. Poi, si cercano di sviluppare indicatori per quantificare oggettivamente la flessibilità e, infine, si cercano le possibili barriere o le possibilità economiche per futuri aggregatori o utilizzatori economici delle tecnologie applicate alla flessibilità
- Nel secondo si testano e si sviluppano gli strumenti necessari allo sviluppo di strategie di controllo attraverso anche test su edifici esistenti
- Nell'ultimo si va a guardare il punto di vista degli utenti nei riguardi della flessibilità ottenibile in edifici esistenti o aggregati e si pensano a strategie

per abbattere le barriere e motivare gli aggregatori all'interesse per tali strategie.

Nei riguardi delle definizioni di possibili indici per i singoli edifici, il progetto definisce due tipi di famiglie di indicatori per quantificare la flessibilità. Il primo gruppo dipende puramente solo dai parametri fisici o tecnologici dell'edificio e descrivono la quantità di energia potenzialmente in grado di essere spostata nel tempo. Il secondo gruppo descrive le performance della flessibilità dirette verso scopi precisi, come può essere quello di ridurre le emissioni di CO_2 o di ridurre i picchi di energia.

Per quanto riguarda il lavoro di questa tesi, verranno utilizzati due indicatori che riguardano entrambe le famiglie menzionate e lo scopo sarà quello di osservare quanto potenzialmente possono essere ridotte le domande di energia in determinati orari.

1.2 Le metodologie di calcolo della flessibilità

Nel lavoro di [3] vengono riassunte le principali terminologie e i corrispettivi metodi di quantificazione della flessibilità energetica fino ad ora utilizzati in letteratura.

Esse poi vengono applicate per un caso di edificio residenziale simulato tramite un sistema R-C. Il loro lavoro ha portato poi a un quadro completo più chiaro su gli obiettivi su cui si concentravano i vari metodi di calcolo fino ad allora proposti. Ad esempio, le metodologie potevano concentrarsi o meno sui seguenti argomenti:

1. Focus sul tempo o durata del cambiamento forzato dalla flessibilità.
2. Focus sulla possibile rete elettrica collegata all'edificio e sulle compensazioni degli sbilanci in essa.
3. Focus sui consumi elettrici dell'edificio.
4. Focus sul prezzo dell'energia.
5. Focus sulla possibilità di compromettere le performance degli altri edifici.
6. Focus su alcune tipologie di impianti.

Fatto ciò, vengono selezionate le sei metodologie di calcolo ricavate dalla letteratura che direttamente quantificano la flessibilità con determinati indicatori.

La prima metodologia [4] utilizza come caso studio un serbatoio di accumulo termico collegato a una pompa di calore o a un cogeneratore e calcola la flessibilità utilizzando due profili di energia cumulata: uno calcolato con una curva di minimo dove il serbatoio è tenuto alla minima capacità disponibile ma soddisfa la domanda di energia cumulata dell'edificio e una curva di massimo dove il serbatoio è tenuto alla massima capacità disponibile e soddisfa la domanda di energia cumulata. Per ottenere tali curve c'è bisogno di prevedere la domanda futura e le condizioni climatiche. La flessibilità è quindi definita come il tempo in cui la pompa di calore può tenersi spenta dalla condizione di massima capacità dell'accumulo, soddisfano comunque la domanda di energia o il contrario.

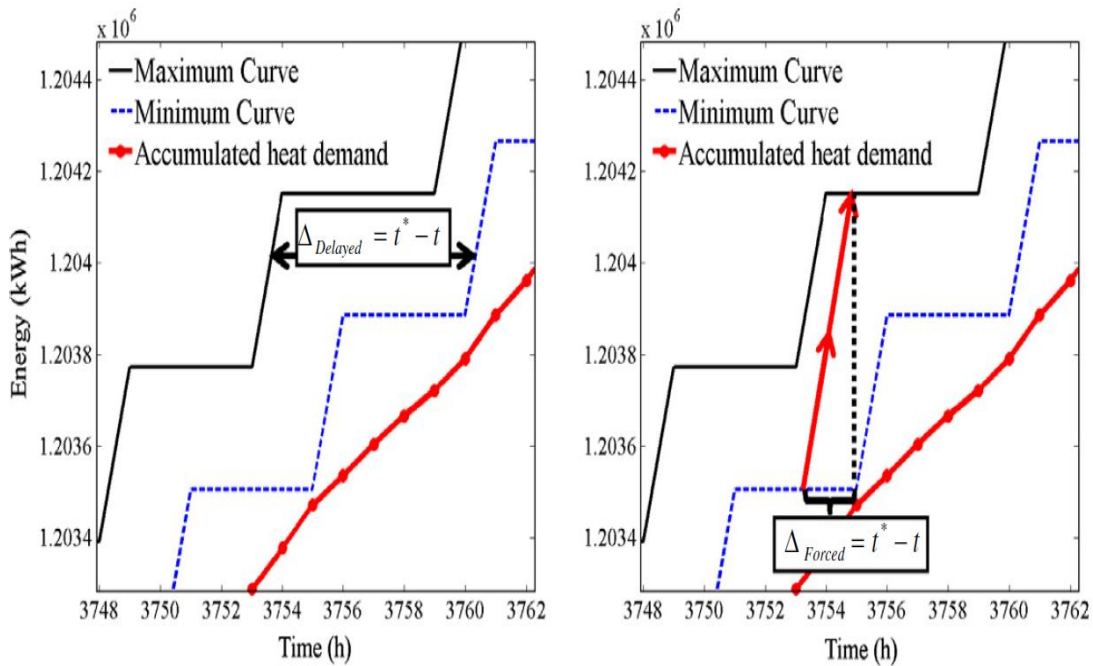


Fig. 1.1: Profili di energia cumulata massima e minima secondo [4]

Nella seconda metodologia [5] vengono usati dati provenienti da misurazioni reali offerte da cinque diversi tipi di macchinari domestici elettrici. Vengono usati anche qui due profili massimi e minimi di energia cumulata che rappresentano rispettivamente due diversi tipi di consumo: uno in cui si cerca di soddisfare la domanda anticipando il prima possibile l'accensione degli oggetti in esame e

un altro in cui si cerca di ritardare il funzionamento il più possibile soddisfacendo comunque la domanda. Successivamente, la flessibilità è espressa come il possibile incremento o decremento della potenza che può essere mantenuto per un determinato periodo di tempo (prima di violare le condizioni di comfort).

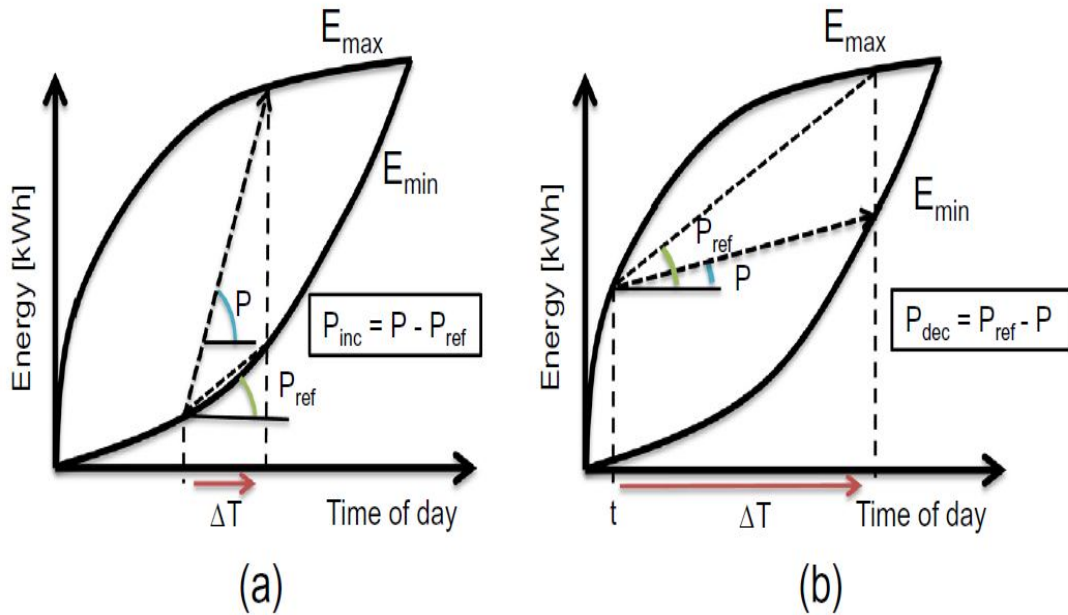


Fig. 1.2: Profili di energia cumulata massima e minima secondo [5]

La terza metodologia [6] inizia ad analizzare la flessibilità tramite specifici eventi nel tempo e non più utilizzando profili cumulati di energia. In particolare, vengono usati diversi sistemi di generazione collegati a un accumulo termico e vengono fatte due simulazioni in ogni istante di tempo, in cui in una viene calcolato il tempo impiegato dal serbatoio per scaricarsi completamente da una situazione di partenza di completa carica (*forced temporal flexibility*) e nell'altra viene fatto esattamente il contrario (*delayed temporal flexibility*). Inoltre, vengono calcolate in maniera analoga anche le differenze di energia e di potenza comparando le richieste durante le operazioni senza flessibilità con quelle in cui si scaricherebbe o si caricherebbe il serbatoio.

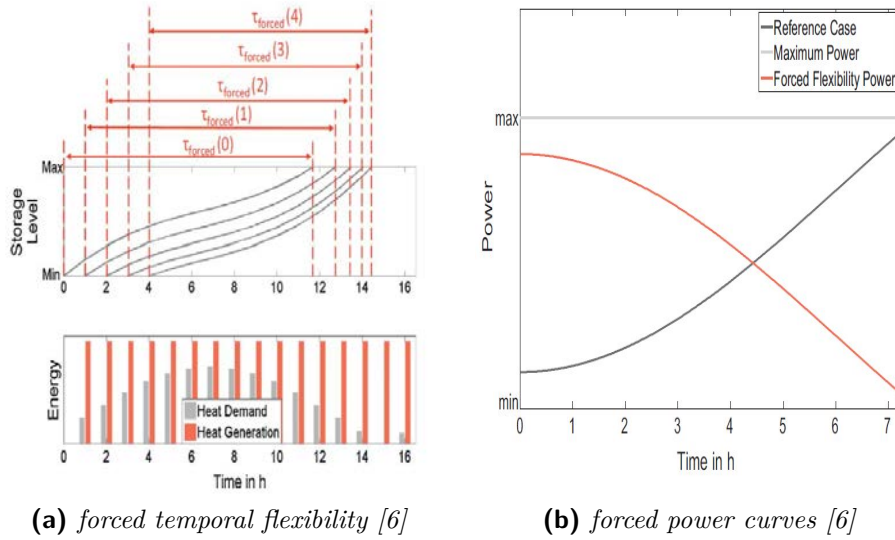


Fig. 1.3: flessibilità di durata e potenza secondo [6]

Nella quarta metodologia [7] viene considerata solo la massa dell'edificio come accumulo, ma vengono anche utilizzate delle curve di costo per definire la flessibilità. Viene infatti calcolata la quantità di energia che si può accumulare o meno in più nell'edificio e il suo relativo costo aggiuntivo. Vi è bisogno quindi di una situazione di riferimento anche in termini di costo, in cui la flessibilità, tramite incentivi esterni, ne rappresenta una sua deviazione negli istanti di tempo.

Nella quinta metodologia [8] viene usata solo la capacità dell'edificio come accumulo e si definisce la flessibilità come la potenza che si potrebbe incrementare o diminuire durante uno specifico lasso di tempo rispetto a un caso di riferimento definito. Viene poi quantificato il tutto tramite delle curve di efficienza che mostrano il possibile aumento o diminuzione della potenza durante un determinato lasso di tempo in funzione di una grandezza chiamata "*Power shifting efficiency*", definita a sua volta come il rapporto tra l'incremento indotto in termini di potenza durante l'evento di flessibilità e il consumo addizionale di energia indotto durante il periodo di test T.

Infine, l'ultima metodologia [1] utilizza anch'essa solamente l'edificio come capacità di accumulo dell'energia. Vengono definiti due indici che misurano la capacità di accumulo dell'edificio durante degli eventi posti in determinate ore dell'anno e la loro efficienza energetica calcolata in un periodo ben definito, il tutto viene effettuato comprando due tipi di simulazione: una di riferimento e una di evento.

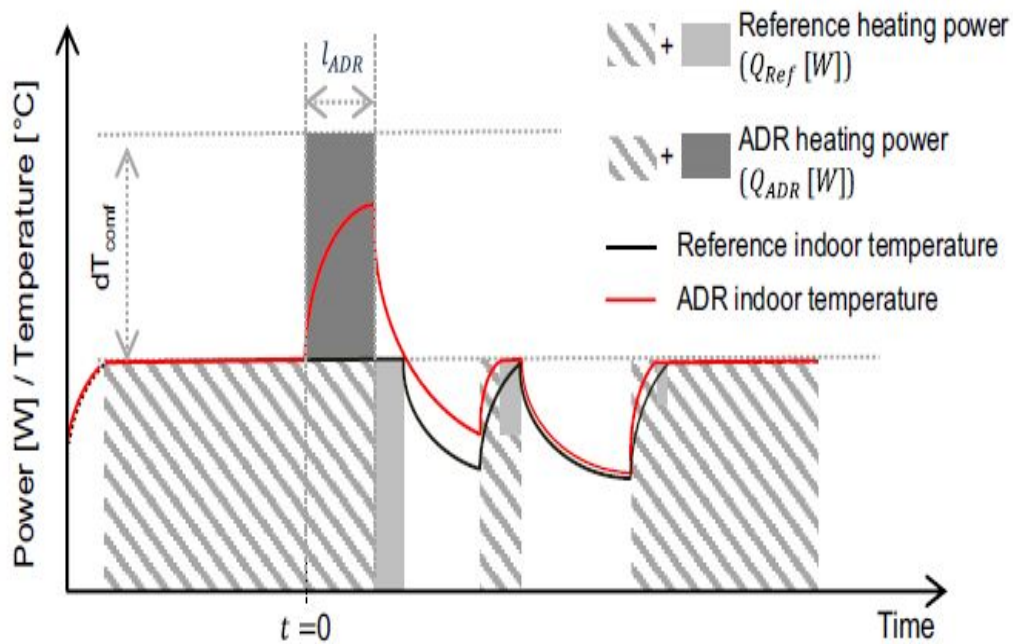


Fig. 1.4: Accumulo di energia ed effetto degli eventi in [1]

1.3 Obiettivi

Per gli scopi di questo lavoro di tesi si ha necessità di studiare il comportamento intrinseco dell'edificio nei confronti della flessibilità energetica. Si vogliono infatti comprendere le potenzialità di accumulo e relativa efficienza senza considerare la capacità aggiuntiva introdotta da possibili serbatoi termici.

Si vuole inoltre capire come varia la flessibilità andando a cambiare alcuni parametri importanti dell'edificio e dell'impianto, come: l'isolamento dell'edificio, la potenza degli impianti, le condizioni climatiche esterne e il comportamento dell'utenza.

Una volta comprese queste variazioni, si vuole disporre alla fine di dati realmente ottenibili sulle capacità ed efficiente della flessibilità, per poi poterli usare per esprimere giudizi qualitativi sul suo andamento nei mesi dell'anno. Per far ciò, è necessario utilizzare indici che possano sfruttare i risultati delle simulazioni TRN-SYS per calcolare potenzialmente in ogni istante di tempo l'energia accumulata, la potenza in gioco e, indirettamente, gli effetti sui consumi dell'edificio dopo l'applicazione delle operazioni di flessibilità.

Capitolo 2

Metodo

La procedura di calcolo che si è scelto di utilizzare è quella citata in precedenza [1], ripresa anche in [3] e denominata come metodologia F. Tra le metodologie analizzate, è risultata essere la più adatta per la facilità di interpretazione degli indici, per la velocità computazionale e per la facilità di implementazione mediante simulazioni numeriche, utilizzando in questo caso il software TRNSYS. [1]

2.1 Metodologia per il calcolo della flessibilità energetica

I due indici introdotti in questa metodologia sono i seguenti:

$$C_{adr} = \int_0^{l_{adr}} (Q_{adr} - Q_{ref}) dt \quad (2.1)$$

dove

- C_{adr} rappresenta quantità di energia accumulato nell'edificio ed è chiamato capacità di accumulo disponibile (*available storage capacity*). Ha le unità di misura dell'energia, come i kWh.
- l_{adr} è chiamato durata dell'evento e rappresenta il tempo in cui si è immesso o asportato calore forzatamente dall'edificio.
- Q_{adr} è il consumo energetico dell'edificio con l'evento di flessibilità.

- Q_{ref} è il consumo energetico di riferimento dell'edificio, cioè senza eventi di flessibilità.

$$\eta_{adr} = 1 - \frac{\int_0^{\infty} (Q_{adr} - Q_{ref}) dt}{\int_0^{t_{adr}} (Q_{adr} - Q_{ref}) dt} \quad (2.2)$$

dove

- η_{adr} è l'efficienza energetica dell'accumulo.
- $\int_0^{\infty} (Q_{adr} - Q_{ref}) dt$ è chiamato "rebound effect" e rappresenta la differenza dei consumi tra simulazione evento e riferimento indotti dopo l'evento.

Essi sono stati utilizzati anche in questo lavoro di tesi, ma riadattati per l'applicazione in ambiente TRNSYS e con vari cambiamenti su alcuni parametri decisionali che si vedranno nelle prossime pagine.

Per i calcoli c'è bisogno di due tipi di simulazione: una chiamata di riferimento e una chiamata dell'evento. In quella di riferimento è simulato il fabbisogno energetico di un edificio in condizioni che si possono definire standard, ad esempio quando esso ha delle predefinite schedule di temperatura di setpoint e carichi interni invernale ed estivo, come 20 °C costanti di temperatura interna in inverno e 26 °C di temperatura costante in estate. In tal modo, si avranno per ogni ora i valori di potenza necessari dall'impianto per mantenere quelle temperature. L'edificio sarà, ovviamente, sottoposto a un determinato tipo di clima e avrà determinate caratteristiche costruttive che lo identificheranno.

La simulazione dell'evento mantiene tutte le caratteristiche precedentemente dette, ma si diversifica per avere in uno o più giorni degli innalzamento o abbassamenti della temperatura di setpoint per una durata prefissata di ore e in orari prefissati dall'operatore.

Per meglio chiarire tutto ciò, viene mostrato l'esempio in Figura 2.1, che descrive un evento con aumento della temperatura a Febbraio dalle 4 alle 6 di mattina.

In blu è rappresentato il consumo energetico dell'edificio nella simulazione di riferimento che ha una semplice schedule che mantiene la temperatura a 21 °C e ha un setback notturno a 18 durante la notte fino alle 6 di mattina. In rosso è rappresentato il consumo con le stesse condizioni precedenti, ma vi è inoltre un aumento della temperatura di setpoint da 18 fino a 21 °C dalle 4 alle 6 di mattina in aggiunta alle condizioni precedenti. Nelle ore mattutine dalle 6 in poi

2.1. METODOLOGIA PER IL CALCOLO DELLA FLESSIBILITÀ ENERGETICA11

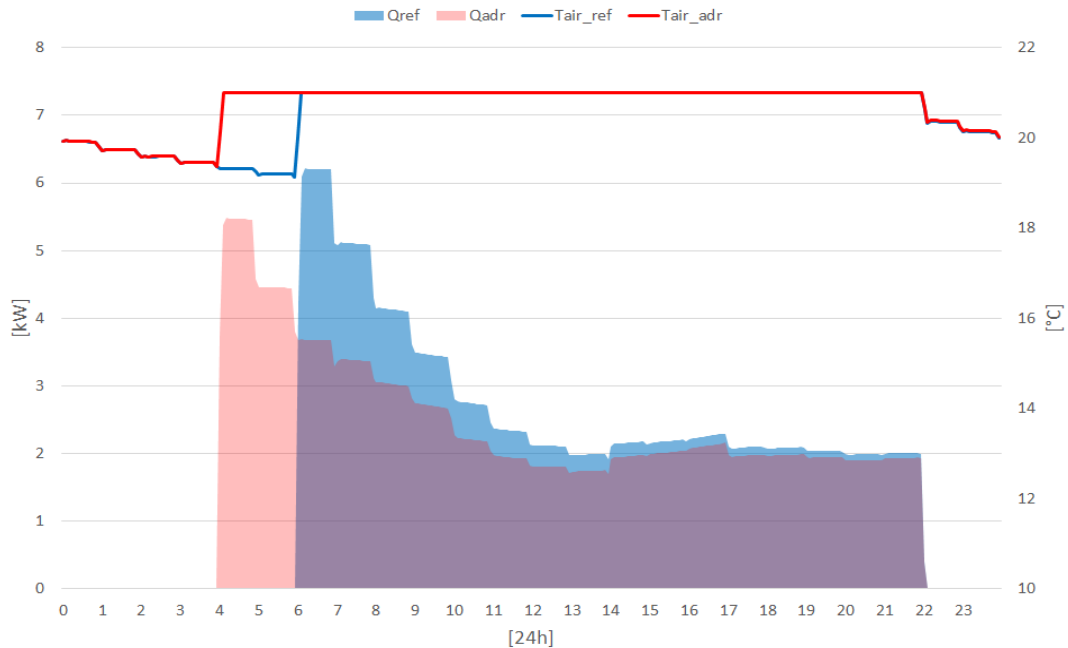


Fig. 2.1: Esempio di una simulazione di riferimento e una con un evento in un giorno di Febbraio

i consumi si sono ridotti nella simulazione con l'evento, per aumentarli però nelle ore mattutine dalle 4 alle 6. La differenza tra i consumi delle due simulazioni si allevia con il passare delle ore della giornata fino a diventare praticamente zero il giorno successivo.

Quello che si è effettuato è un vero e proprio spostamento temporale di consumi verso ore notturne-mattutine. I parametri C_{adr} ed η_{adr} aiutano a quantificare quanta energia si è riusciti a spostare nel tempo ed entrambi sono necessari: C_{adr} è rappresentato dalla porzione di area rossa chiara compresa tra le 4 e le 6 (cioè durante le due ore di evento), mentre η_{adr} è rappresentato dal rapporto tra l'area blu chiara dalle 6 della mattina in poi e dall'area rosso chiara precedentemente definita del C_{adr} .

Si è considerato poi, in questo lavoro di tesi, che C_{adr} sia positivo se l'energia è introdotta nell'edificio nelle ore di evento e sia negativo se l'energia nelle ore di evento è stata prelevata dall'involucro edilizio.

Come già spiegato nell'introduzione di questa metodologia, η_{adr} rappresenta il rapporto che permetterà di capire quanta dell'energia introdotta è poi stata effettivamente utilizzata dall'edificio per ridurre o aumentare i consumi nelle ore

successive all'evento.

Non viene in questo lavoro analizzata l'influenza del terzo parametro del lavoro di [1] chiamato *PSC*, poiché avrebbe bisogno di ulteriori e più profonde analisi successive che esulano dallo scopo di questo lavoro, che ha invece l'obbiettivo di dare le prime basi per quantificare in termini energetici la flessibilità energetica.

2.2 Parametri decisionali

La metodologia F integrata con il programma TRNSYS ha bisogno di alcune scelte preliminari dell'operatore, necessarie per poter iniziare ad effettuare i calcoli degli indici.

Sebbene, si possano fare moltissime prove differenti tra loro cambiando tali parametri, si è deciso di lasciare che alcuni di questi rimangano costanti al variare delle prove. Verrà sicuramente giustificato il motivo per cui li si siano lasciati costanti, ma la decisione è sempre stata presa per avere un buon compromesso tra ottenimento in tempi utili dei risultati da analizzare e avere una vasta varietà di questi ultimi per capire il trend generale.

2.2.1 La durata degli eventi

Il parametro menzionato in precedenza l_{adr} è sicuramente importante per i calcoli degli indici di flessibilità. Nonostante questo, è stato deciso di lasciarlo invariato per tutte le prove che si sono effettuate.

Questa scelta è stata effettuata per il suo comportamento, già stato studiato in [1], ed è stato concluso che un suo incremento avrebbe comportato sicuramente un aumento del C_{adr} , ma anche una diminuzione di η_{adr} , specialmente per edifici vecchi. Di conseguenza, è stato deciso di utilizzare due ore come durata di ogni evento per ogni simulazione effettuata. Questo è un tempo considerato ottimale per avere C_{adr} sufficientemente alti ed η_{adr} non troppo bassi. Come spiegato in [1], infatti, η_{adr} per edifici vecchi con basso isolamento potrebbe decadere anche fino al 70% con una durata di tre ore o più.

2.2.2 Eventi estivi ed eventi invernali

Altra decisione fondamentale presa è stata quella di come e temporalmente dove distribuire gli eventi durante l'anno di simulazione.

Lo scopo di questo lavoro è quello di valutare anche in modo quantitativo il comportamento della flessibilità energetica nel corso dell'anno. Infatti, si vuol capire come si comporta energeticamente l'edificio se si applicano degli eventi in alcuni giorni specifici dell'anno. Dunque, si vuole confrontare quanto efficienti siano questi ultimi rispetto ad altri e quando conviene abbassare od alzare la temperatura di setpoint nei vari mesi dell'anno. Alla luce di ciò, la prima decisione che è stata presa è quella di considerare la stagione invernale staccata da quella estiva: in sostanza, sono state effettuate le simulazioni con eventi invernali senza mai avere degli eventi durante l'estate, mentre le simulazioni estive non hanno eventi durante l'inverno.

In termini operativi, prendendo come esempio un caso invernale, vengono creati due fogli txt con scritte le temperature di setpoint della casa, uno per il caso di riferimento e uno per il caso con evento. Vengono fatte due simulazioni, in cui viene dato in input al sistema di riscaldamento di TRNSYS la corrispettiva schedule. Il programma quindi, cercherà di seguire l'andamento di queste temperature immettendo una certa potenza. Nel momento in cui la temperatura esterna diventa abbastanza alta da tenere la temperatura interna a valori superiori a quelli della temperatura di setpoint di input dell'impianto di riscaldamento, la potenza invernale si annulla ed entrerà in funzione il sistema di raffreddamento per mantenere costanti i 26 °C. Da qui in poi, non ci saranno più eventi fino a quando la temperatura esterna non scenderà nuovamente verso gli ultimi mesi dell'anno

Discorso analogo vale per il caso estivo: si creano due file txt, uno per la schedule di riferimento a 26 °C costanti e uno per la schedule con un certo evento che abbassa o alza la temperatura di setpoint periodicamente in determinate ore dell'anno. Si fanno le due simulazioni in TRNSYS in cui si danno in input le corrispettive schedule al solo impianto di raffreddamento che le applicherà solo nei mesi in cui la temperatura esterna è sufficientemente alta da tenere quella interna a valori vicini ai 26 °C.

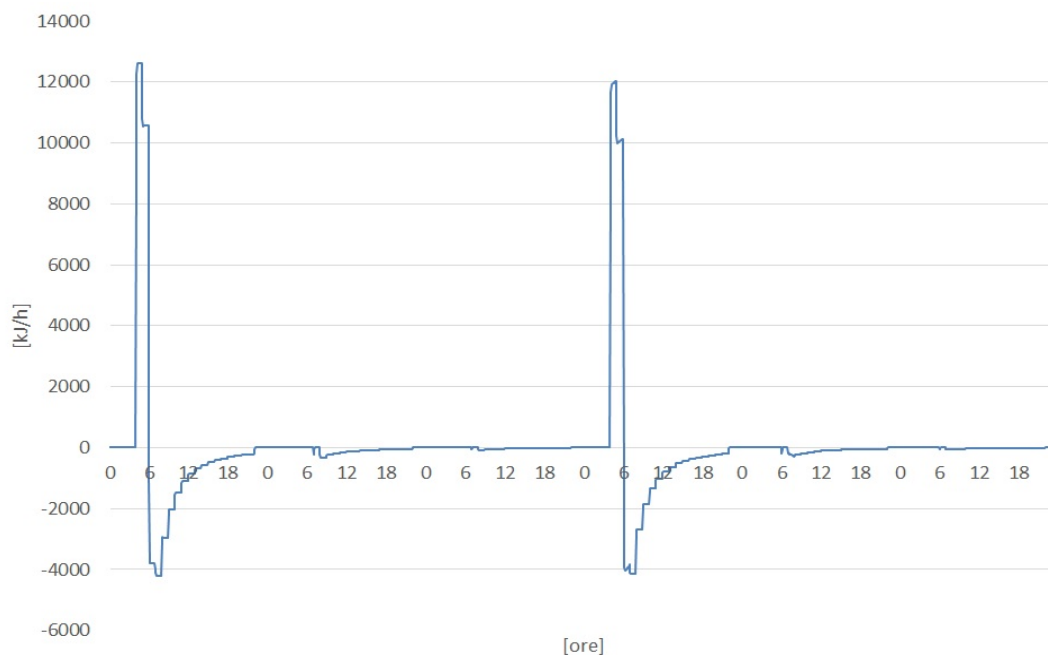


Fig. 2.2: $Q_{adr} - Q_{ref}$ a metà gennaio con due eventi distanti tre giorni tra di loro.

2.2.3 La durata del rebound effect

Un altro punto da chiarire è la definizione degli estremi di integrazione nel numeratore presente nella definizione η_{adr} che è stato chiamato rebound effect. L'integrale va da zero a infinito, questo significa che si calcola dal tempo di inizio evento studiato fino a un tempo di calcolo che, operativamente parlando, è sufficientemente lungo da non escludere nessun possibile contributo di $Q_{adr} - Q_{ref}$.

Infatti, se si scegliesse un tempo troppo corto, si rischierebbe di non considerare gli effetti di flessibilità presenti dopo tale tempo e l'efficienza crescerebbe apparentemente di valore. D'altro canto, se si scegliesse un tempo troppo lungo, si dovrebbero temporalmente piazzare gli eventi molto distanti tra di loro e si rischierebbe di averne un numero molto esiguo.

La scelta di questo tempo è stata presa dopo alcune analisi post-processing. In Figura 2.2 viene mostrato $Q_{adr} - Q_{ref}$ in una simulazione di metà Gennaio con due eventi, in cui la temperatura di setpoint è stata incrementata dalle 4 alle 6 di mattina rispetto al caso di riferimento.

In quest'ultima simulazione, gli eventi distano temporalmente tre giorni tra di essi e si può notare come questa decisione sia molto efficace per gli scopi di questo lavoro: infatti, la differenza tra i consumi della simulazione di riferimento (Q_{ref}) e i consumi della simulazione con evento (Q_{adr}) diventa, man mano che ci si allontana dall'evento, sempre più piccola, fino a diventare praticamente nulla alla fine del terzo giorno. La simulazione è stata fatta per un edificio di nuova costruzione (descritto nel capitolo), dove la scelta del parametro temporale per il calcolo del rebound effect è molto più incidente. Dunque, tre giorni è un tempo sufficiente per lo scopo di questa tesi ed è stato utilizzato in tutte le simulazioni effettuate.

Da notare, infine, che la scelta di un evento ogni tre giorni, con il primo evento che cade sempre il 3 di Gennaio, comporta un numero di eventi pari a 121.

2.3 La potenza di progetto degli impianti

La potenza di progetto influenza significativamente il comportamento dinamico dell'edificio. Per questo motivo, nel il caso invernale è stato deciso di utilizzare due tipi di potenza diversa nei calcoli.

Queste potenze sono, in ogni caso, calcolate con la norma UNI EN 12831 [9] e confermate poi grazie allo strumento di TRNSYS "HEAT MAX LOAD". In Tabella 2.1 è possibile osservare i risultati dei calcoli delle potenze massime per ogni tipo di edificio.

Tabella 2.1: Potenze di progetto utilizzate nei vari tipi di edifici.

	Q_{max} [kW]	$Q_{max,shift}$ [kW]
B70	7.0	9.0
B90	4.5	6.5
BN	2.5	3.5

La prima potenza Q_{max} è la potenza calcolata in puro regime permanente con la norma prima citata, mentre la seconda potenza $Q_{max,shift}$ è calcolata tenendo conto che una potenza aggiuntiva potrebbe essere necessaria in caso di funzionamento intermittente dell'impianto. La potenza aggiuntiva di ripresa è stata determinata dal prospetto D.10b [9], in Tabella 2.2, con la seguente formula:

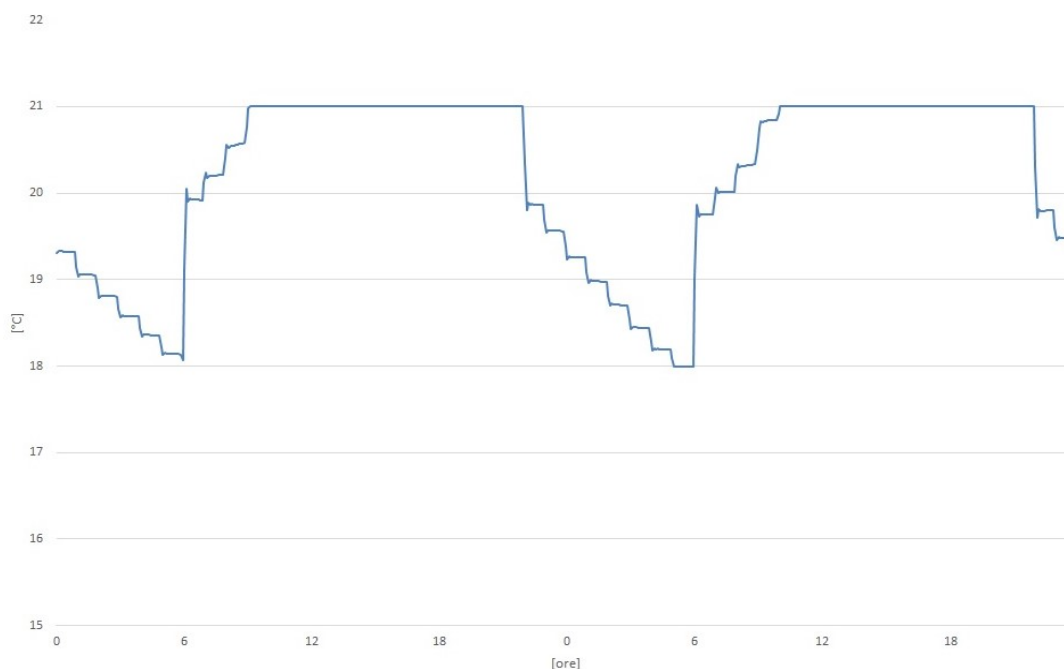


Fig. 2.3: Andamento della temperatura interna in due giornate di Gennaio.

$$Q_{RH} = A_f f_{RH} [W] \quad (2.3)$$

Dove A_f è l'area in pianta del pavimento (sarà di 94.4 m^2 nell'edificio studiato) ed f_{RH} è chiamato fattore di correzione della potenza di ripresa, determinato tramite il prospetto D.10b.

Per effettuare poi le scelte corrette di quest'ultimo fattore, si sono fatte delle osservazioni post-processing per tutte le tipologie di edificio e si è concluso che, scegliendo una durata del periodo di ripresa di due ore, il calo massimo previsto dalla temperatura interna durante il periodo notturno di inattività è di 2 K per gli edifici più recenti (BN) ed è di 3 K per gli edifici più vecchi (B90, B70). In questa maniera f_{RH} è pari a 11 per gli edifici nuovi ed è pari a 22 per quelli più vecchi. Uno zoom di esempio sulla caduta di temperatura nelle ore notturne è osservabile in Figura 2.3 che mostra l'andamento della temperatura interna di un edificio medio isolato durante due giornate di gennaio, di cui la seconda è quella dove si raggiunge la temperatura minima dell'anno.

La scelta della durata del periodo di ripresa è ovviamente arbitraria e più piccolo è questo tempo e più sarà grande la potenza aggiuntiva. Da notare, infatti, che scegliendo una caduta di 3 K e un periodo di ripresa di solo un'ora la potenza

Tabella 2.2: Fattori di correzione per la potenza di ripresa [9].

Durata del periodo di ripresa in ore	f_{RH} [W/m ²]		
	Calo previsto dalla temperatura interna durante il periodo di inattività		
	1 K	2 K	3 K
	massa dell'edificio	massa dell'edificio	massa dell'edificio
	alta	alta	alta
1	11	22	45
2	6	11	22
3	4	9	16
4	2	7	13

aggiuntiva sarebbe stata di 4 kW, che è un valore decisamente molto alto per l'edificio che si andrà ad analizzare e descrivere in seguito.

Un'ultima decisione da prendere sulla potenza, è quella della percentuale radiante e convettiva. TRNSYS necessita di sapere quanta della potenza che viene immessa nell'edificio scalda direttamente il nodo aria (convettiva) e quanta invece scalda le superfici per poi indirettamente immettere all'ambiente (radiante). Si può ben capire che più aumenta la percentuale radiante e più lenta sarà la risposta dell'edificio al variare del setpoint di temperatura.

Se si volesse simulare un sistema che si avvicina di più alle modalità con cui operano gli impianti radianti, la percentuale peserebbe di più sul radiante, mentre se si volesse avvicinare di più al lavoro dei radiatori, allora la percentuale convettiva diverrebbe molto più grande. Per questo lavoro di tesi, si è optato per avere un 80% convettiva.

Per la potenza estiva, si è supposto una potenza di progetto di 7.5 kW, corrispondente alla potenza tipica di un sistema split a tre unità interne, ritenuto consono e sufficiente a far variare la temperatura interna in estate fino ai più bassi valori delle temperature di setpoint negli eventi estivi.

2.4 Comportamento degli utenti

Si andranno ora a spiegare le tipologie di schedule usate. Ognuna di esse rappresenta diversi comportamenti e abitudini dell'utenza negli edifici che presidiano. Questi si traducono in un diverso andamento della temperatura di setpoint e dei carichi interni.

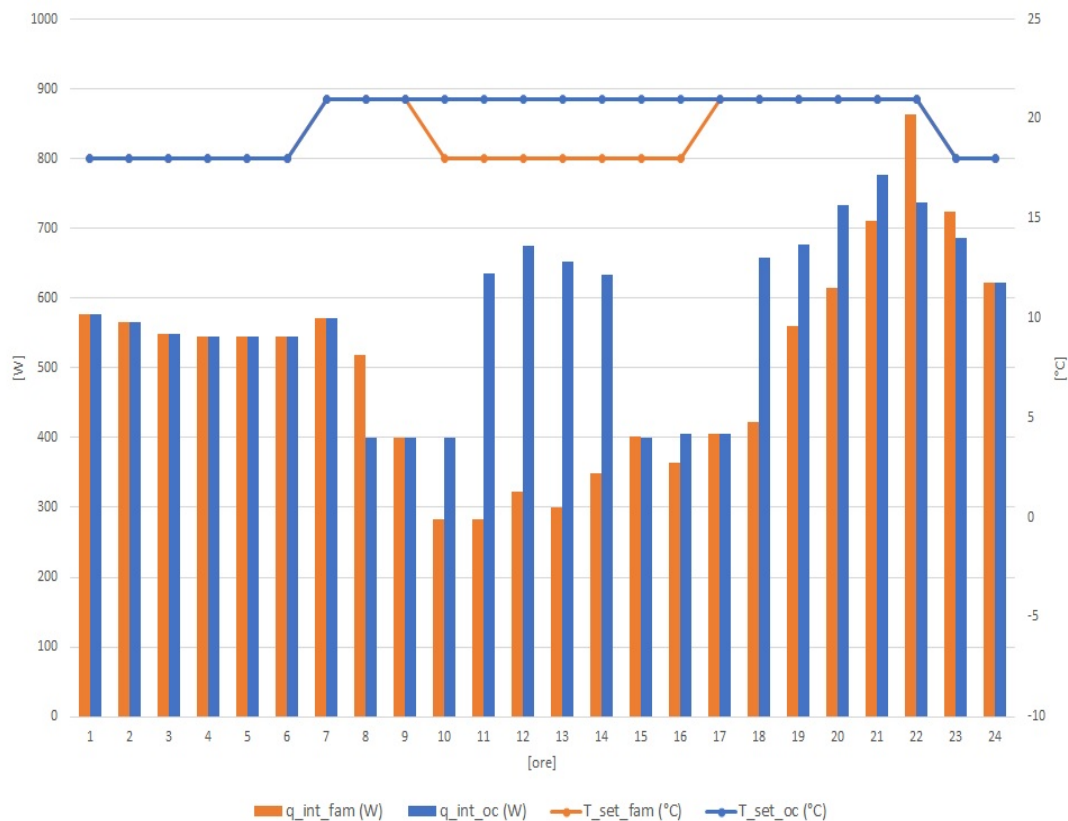


Fig. 2.4: Carichi interni e temperature di setpoint per le schedule invernali.

La prima che si analizzerà è quella fino ad ora vista nei vari esempi precedenti, chiamata OC (old couples) poiché riflette l'occupazione continua per tutta la giornata tipica di una piccola utenza familiare di vecchie abitudini. Gli unici momenti in cui la temperatura può essere abbassata sono le ore notturne, di fatto rappresentando un setback a 18 °C. In Tabella 2.3 sono presenti i valori in W dei carichi interni di questo tipo di schedule insieme ai valori di temperatura di setpoint e in Figura 2.4 è rappresentato l'andamento di queste ultime grandezze in un unico grafico.

La seconda è una schedule chiamata FAM, che riflette invece le abitudini di una tipica piccola utenza familiare moderna in cui gli utenti non sono presenti durante il pomeriggio. Si ha un lungo periodo di sette ore, dalle 9 alle 16, in cui la temperatura interna viene abbassata a 18 °C in aggiunta alla diminuzione notturna. Sempre in Tabella 2.3 è possibile leggere i valori di temperatura e dei carichi interni per questo tipo di schedule ora per ora, per poi essere mostrati graficamente in Figura 2.4.

Tabella 2.3: Temperature e carichi interni delle schedule invernali FAM e OC

Ora	OC		FAM	
	T_{set} [°C]	Q_{int} [W]	T_{set} [°C]	Q_{int} [W]
1	18	577	18	577
2	18	565	18	565
3	18	548	18	548
4	18	546	18	546
5	18	546	18	546
6	18	546	18	546
7	21	571	21	571
8	21	400	21	518
9	21	400	21	400
10	21	400	18	282
11	21	636	18	282
12	21	676	18	322
13	21	653	18	299
14	21	634	18	348
15	21	400	18	401
16	21	406	18	364
17	21	406	21	406
18	21	658	21	422
19	21	678	21	560
20	21	733	21	615
21	21	776	21	711
22	21	738	21	863
23	18	687	18	725
24	18	622	18	622

Tabella 2.4: Umidità prodotta giornalmente per attività domestiche.

Numero di persone in attività	Umidità prodotta espressa in kg al giorno		
	Bassa emissione di umidità	Media emissione di umidità	Alta produzione di umidità
1	3.5	6	9
2	4	8	11
3	4	9	12
4	5	10	14
5	6	11	15
6	7	12	16

Come si può osservare, la differenza tra le due schedule fa in modo che la FAM abbia un comportamento molto discontinuo e, sebbene il suo fabbisogno invernale calcolato per l'intera stagione sia inferiore rispetto alla OC, le potenze necessarie per portare velocemente a 21 °C la temperatura saranno sicuramente più alte rispetto alla schedule OC. Si vedrà nei risultati che questo fatto inciderà moltissimo nella flessibilità, specialmente quando si andranno a confrontare i casi con e senza potenze di ripresa.

I carichi interni presentano poi una grossa differenza tra i due casi soprattutto tra le 10 e le 14 e tra le 18 e le 22.

Queste schedule sono state costruite in modo deterministico a partire dal lavoro di [10] e usando la norma UNI EN 16798, cercando di comporre due casi il più realistici possibile di due comportamenti dell'utenza completamente diversi.

In TRNSYS poi, si sono divisi questi carichi interni in 70% convettivo e 30% radiativo.

Per quanto riguarda l'estate, viene utilizzata una semplice schedule a 26 °C costanti. è obbligatorio però controllare l'umidità relativa, che nel caso di questa schedule è tenuta a un valore costante e pari a 50%. I carichi interni utilizzati in questo caso sono stati scelti di tipo FAM per ogni simulazione di questa stagione. La generazione di umidità interna viene impostata a 9 kg/giorno, ricavando questo valore dalla Tabella 2.4 dell'umidità prodotta giornalmente per attività domestiche dell'appendice A del CEN TR 14788 [11], optando per una emissione media di vapore e 3 persone in attività nell'edificio.

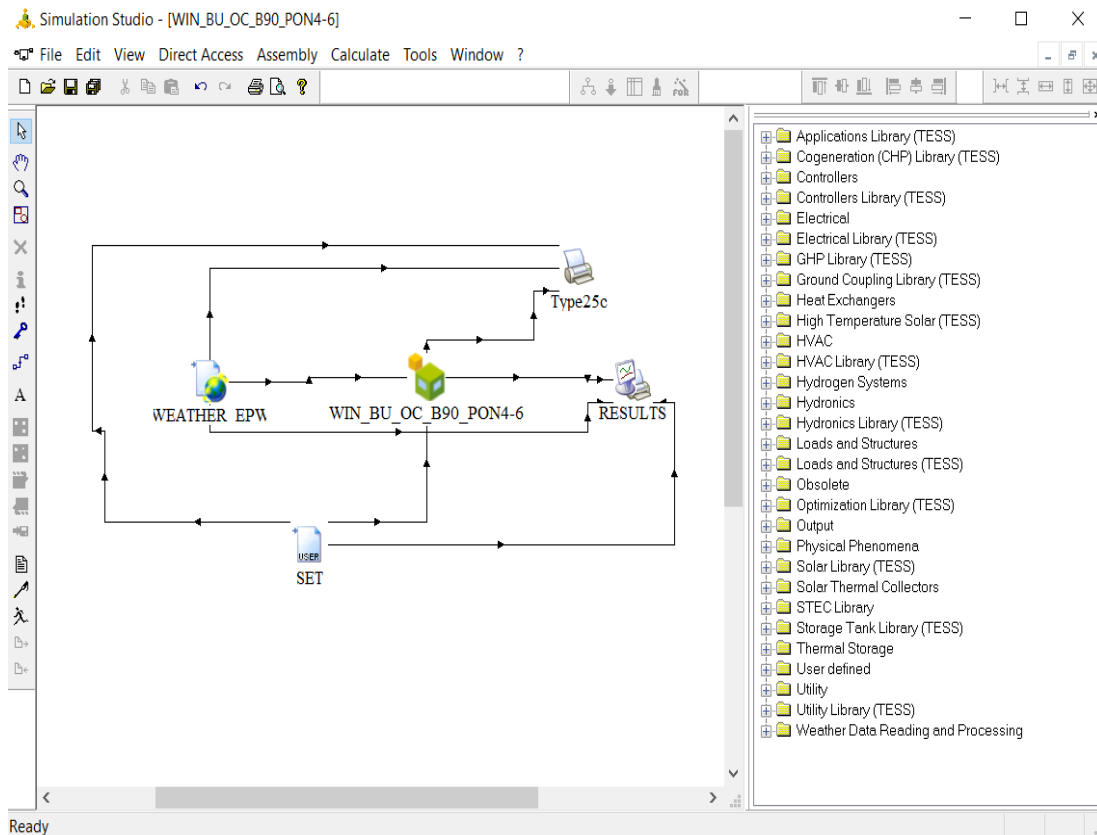


Fig. 2.5: Screenshot del programma Simulation Studio.

2.5 Applicazione con il software TRNSYS

In Figura 2.5 viene mostrata la schermata del TRNSYS Studio.

Come prima type costruita si è andato a definire il clima dell'edificio, che rimarrà lo stesso in ogni simulazione. Per la precisione, è stato scelto il clima di Venezia dell'anno 2017, che viene estrapolato in termini di dati come file epw [12].

Successivamente, in basso, è stata definita la type 9 per leggere il file txt di input contenente in colonna i valori di temperatura e dei carichi interni: vengono scritti quindi in input un numero di valori pari a quello necessario per definire 3 giorni di fila, in cui il terzo è eventualmente quello di evento. Particolare attenzione va data ai carichi interni che devono essere convertiti in [kJ/h]. Una volta scritti i file txt, il programma continua a leggere di continuo il file in loop fino alla fine dell'anno, di fatto andando a simulare 121 eventi totali.

Nella parte centrale vi è il file TRNSYS Build, contenente i dati degli edifici e degli impianti precedentemente descritti, tra cui:

- Stratigrafia di tutte le superfici (attenzione va data alla conversione delle conduttività termiche in kJ/hm^2K)
- Misure frontali di muri e pavimenti, le loro orientazioni e il loro tipo in base al tipo di zona a cui sono confinanti.
- Numero di zone termiche dell'edificio: in ogni caso sarà solo una data la grandezza e la non eccessiva complessità del caso studio.
- Volumi ora di infiltrazione nella casa: il valore standard medio per edifici residenziali anni '90 e '70 è di 0.5, mentre per gli edifici nuovi è di 0.3.
- Il valore dei carichi interni dato come input dal file txt precedentemente descritto e la percentuale radiante e convettiva.
- La potenza massima dell'impianto di riscaldamento(in [kJ/h]), la sua percentuale radiante e il valore delle temperature di setpoint dati come input dallo stesso file txt dei carichi interni. Se la simulazione è di tipo estivo, la temperatura di setpoint è costante e pari a 20 °C. L'umidificazione è sempre settata OFF.
- La potenza massima dell'impianto di raffreddamento (in [kJ/h]), il valore di RH da mantenere per l'impianto di de-umidificazione e la temperatura di setpoint dati come input dal file txt letto dalla type9 del TRNSYS Studio. Se la simulazione è di tipo invernale, la temperatura è costante e pari a 26 °C ed RH è pari a 50%.

Una schermata di lavoro di questo ambiente è mostrata in Figura 2.6.

Infine, ritornando ancora al TRNSYS Studio, si ha la type dei risultati che legge e scrive un file txt con in successione i seguenti dati: l'ora di simulazione, la temperatura dell'aria interna, il setpoint, la temperatura esterna, il calore sensibile dell'edificio, per le simulazioni estive anche il calore latente.

Le simulazioni, infine, hanno un timestep di 5 minuti e i loro risultati in file txt vengono poi importati in file excel dove vengono calcolati gli indici di flessibilità di ogni singolo evento e quelli mensili.

In Figura 2.7 viene mostrato un esempio di un grafico dei risultati finali di TRNSYS per una simulazione di riferimento per un edificio recente con schedule FAM

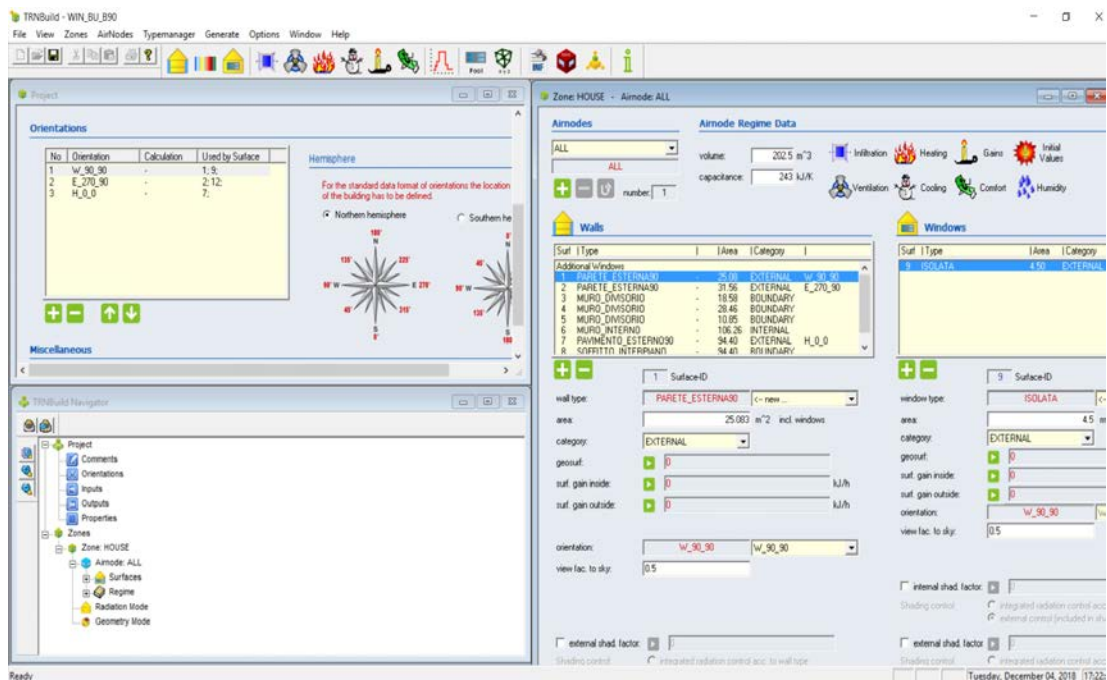


Fig. 2.6: Screenshot del programma TRNSYS Build.

e potenza di ripresa non nulla. Mentre in Figura 2.8 e Figura 2.9 sono mostrati gli screenshot di come è strutturato il file excel che calcola i risultati di TRNSYS. Successivamente, i risultati verranno esposti facendo variare una singola variabile e mantenendo le altre costanti: ad esempio, nel prossimo capitolo verranno mostrati gli andamenti degli indici al solo variare del tipo di edificio, cercando di non far entrare in gioco l'influenza di tutti gli altri parametri come il tipo di schedule, il tipo di evento o la potenza dell'impianto.

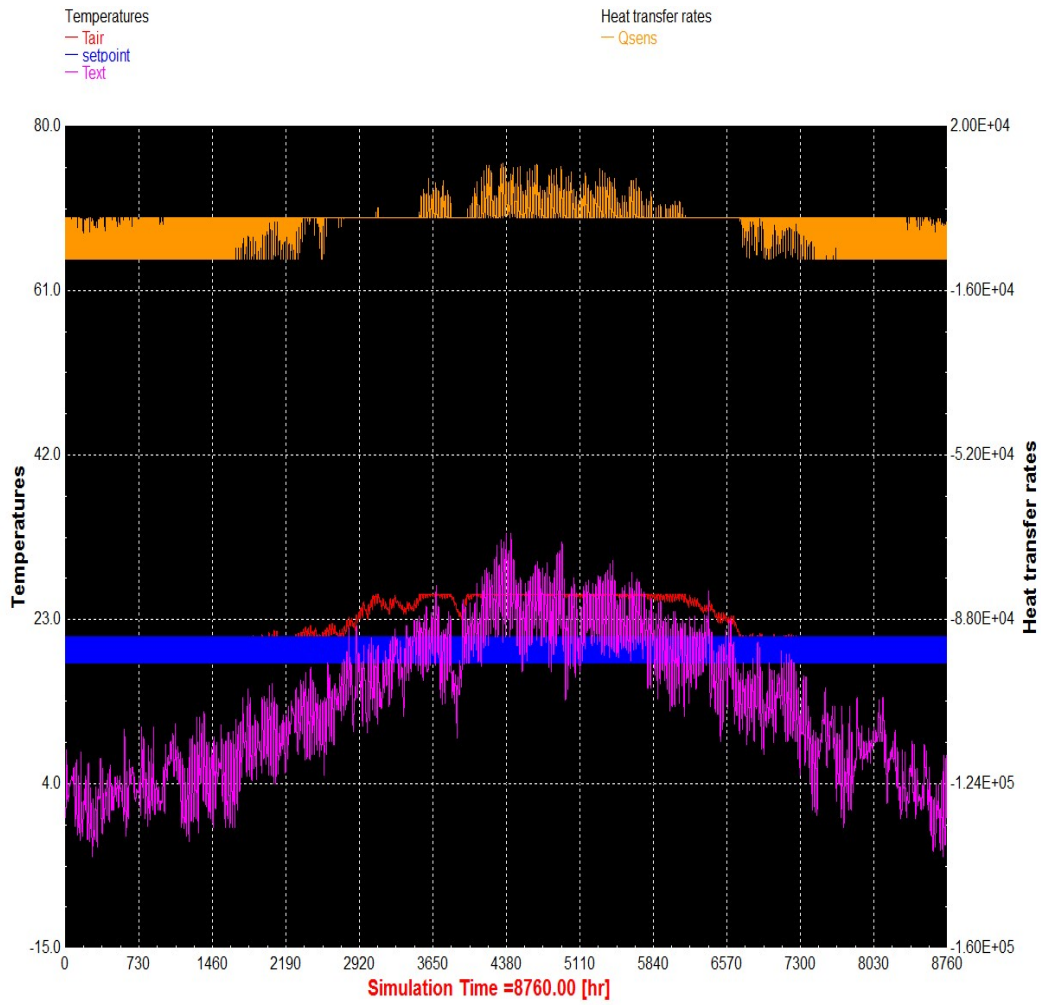


Fig. 2.7: Esempio di Risultati ottenibili tramite il software TRNSYS.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
1	TIME	Tair	sepoint	Text	Ogens	TIME	Tair	sepoint	Text	Ogens	TIME	Tair	sepoint	Text	Ogens	TIME	Tair	sepoint	Text	Ogens	TIME	Tair	sepoint	Text
2	0.00	18.00	18	18	0.10	0.00	18.00	18	18	0.10	0.00	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	4518	26628	0.847	
3	0.08	18.00	18	18	0.11	-4176.47	18.00	18	18	0.11	-4176.47	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	6130	34825	0.821	
4	0.17	18.00	18	18	0.13	-4792.52	18.00	18	18	0.13	-4792.52	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	3950	34499	0.830	
5	0.25	18.00	18	18	0.14	-4723.08	18.00	18	18	0.14	-4723.08	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	4700	38997	0.824	
6	0.33	18.00	18	18	0.16	-4723.18	18.00	18	18	0.16	-4723.18	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	5385	35921	0.834	
7	0.42	18.00	18	18	0.18	-4716.26	18.00	18	18	0.18	-4716.26	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	6500	33150	0.834	
8	0.50	18.00	18	18	0.19	-4710.05	18.00	18	18	0.19	-4710.05	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	5181	33023	0.843	
9	0.58	18.00	18	18	0.21	-4702.71	18.00	18	18	0.21	-4702.71	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	4771	30530	0.844	
10	0.67	18.00	18	18	0.22	-4697.50	18.00	18	18	0.22	-4697.50	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	5452	33390	0.836	
11	0.75	18.00	18	18	0.24	-4691.29	18.00	18	18	0.24	-4691.29	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	4640	30391	0.847	
12	0.83	18.00	18	18	0.26	-4684.96	18.00	18	18	0.26	-4684.96	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	113852	26780	0.835	
13	0.92	18.00	18	18	0.27	-4678.69	18.00	18	18	0.27	-4678.69	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	113144	31627	0.837	
14	1.00	18.00	18	18	0.29	-4673.29	18.00	18	18	0.29	-4673.29	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	134718	30319	0.844	
15	1.08	18.00	18	18	0.31	-4701.50	18.00	18	18	0.31	-4701.50	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	144820	31511	0.844	
16	1.17	18.00	18	18	0.34	-4698.07	18.00	18	18	0.34	-4698.07	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	153152	23698	0.867	
17	1.25	18.00	18	18	0.36	-4688.68	18.00	18	18	0.36	-4688.68	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	163455	24329	0.859	
18	1.33	18.00	18	18	0.39	-4679.90	18.00	18	18	0.39	-4679.90	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	173925	33020	0.830	
19	1.42	18.00	18	18	0.41	-4671.06	18.00	18	18	0.41	-4671.06	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	184884	30759	0.842	
20	1.50	18.00	18	18	0.44	-4662.23	18.00	18	18	0.44	-4662.23	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	193884	26471	0.861	
21	1.58	18.00	18	18	0.46	-4653.40	18.00	18	18	0.46	-4653.40	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	204328	27933	0.846	
22	1.67	18.00	18	18	0.49	-4644.57	18.00	18	18	0.49	-4644.57	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	213555	25159	0.839	
23	1.75	18.00	18	18	0.51	-4635.74	18.00	18	18	0.51	-4635.74	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	223557	26308	0.858	
24	1.83	18.00	18	18	0.54	-4626.91	18.00	18	18	0.54	-4626.91	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	233419	29014	0.851	
25	1.92	18.00	18	18	0.56	-4618.10	18.00	18	18	0.56	-4618.10	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	243995	24621	0.861	
26	2.00	18.00	18	18	0.59	-4598.62	18.00	18	18	0.59	-4598.62	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	252338	16597	0.865	
27	2.08	18.00	18	18	0.61	-4588.83	18.00	18	18	0.61	-4588.83	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	262810	20791	0.865	
28	2.17	18.00	18	18	0.64	-4577.79	18.00	18	18	0.64	-4577.79	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	272715	19324	0.860	
29	2.25	18.00	18	18	0.66	-4568.56	18.00	18	18	0.66	-4568.56	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	282399	16066	0.851	
30	2.33	18.00	18	18	0.69	-4560.18	18.00	18	18	0.69	-4560.18	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	293394	15333	0.781	
31	2.42	18.00	18	18	0.71	-4551.72	18.00	18	18	0.71	-4551.72	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	302916	18221	0.873	
32	2.50	18.00	18	18	0.74	-4543.27	18.00	18	18	0.74	-4543.27	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	312496	18115	0.866	
33	2.58	18.00	18	18	0.76	-4534.82	18.00	18	18	0.76	-4534.82	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	322122	15118	0.867	
34	2.67	18.00	18	18	0.79	-4526.38	18.00	18	18	0.79	-4526.38	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	332854	7109	0.598	
35	2.75	18.00	18	18	0.81	-4517.94	18.00	18	18	0.81	-4517.94	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	34111	1466	0.925	
36	2.83	18.00	18	18	0.84	-4509.50	18.00	18	18	0.84	-4509.50	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	35371	3691	0.913	
37	2.91	18.00	18	18	0.86	-4501.06	18.00	18	18	0.86	-4501.06	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	363875	13877	0.577	
38	3.00	18.00	18	18	0.89	-4500.06	18.00	18	18	0.89	-4500.06	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	374801	0	0.000	
39	3.08	18.00	18	18	0.90	-4556.56	18.00	18	18	0.90	-4556.56	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	382799	8483	0.670	
40	3.17	18.00	18	18	0.91	-4554.34	18.00	18	18	0.91	-4554.34	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	390000	0	0.000	
41	3.25	18.00	18	18	0.92	-4551.55	18.00	18	18	0.92	-4551.55	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	400000	0	0.000	
42	3.33	18.00	18	18	0.93	-4548.82	18.00	18	18	0.93	-4548.82	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	410000	0	0.000	
43	3.42	18.00	18	18	0.94	-4546.08	18.00	18	18	0.94	-4546.08	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	420000	0	0.000	
44	3.50	18.00	18	18	0.95	-4543.35	18.00	18	18	0.95	-4543.35	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	430000	-19	0.000	
45	3.58	18.00	18	18	0.95	-4540.63	18.00	18	18	0.95	-4540.63	18.00	18	18	0.00	0.00	0	0	0	0	440000	0	0.000	

Fig. 2.8: Prima parte di un foglio di calcolo degli indici di excel di esempio.

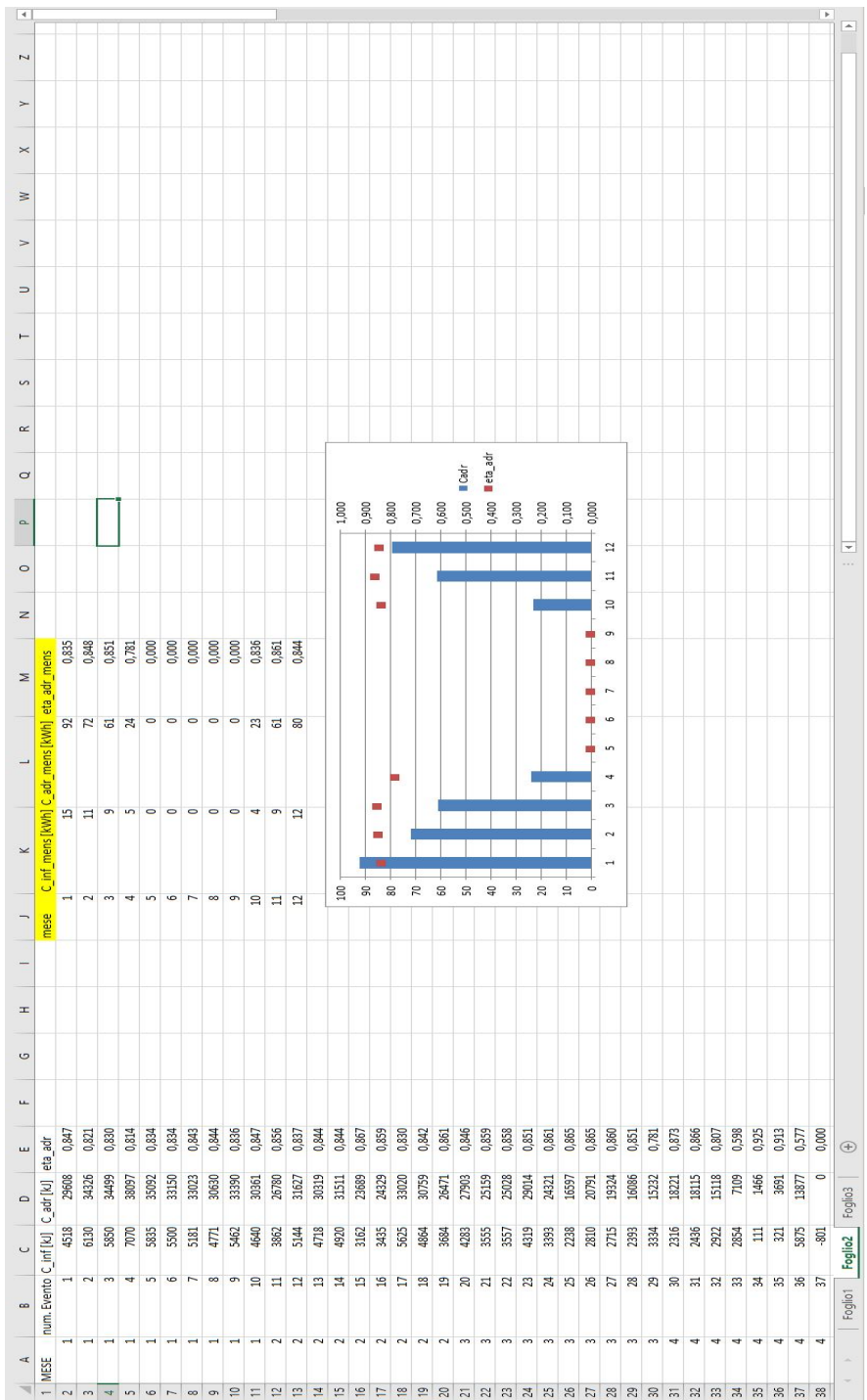


Fig. 2.9: Seconda parte di un foglio di calcolo degli indici di excel di esempio.

Capitolo 3

Casi studio

Per applicare i concetti della flessibilità energetica discussi in precedenza, c'è bisogno di definire tutti i dati necessari all'analisi. I primi tra tutti sono le tipologie di edificio.

I pacchetti costruttivi utilizzati nel lavoro di tesi corrispondono alle tipologie costruttive tipiche del parco edilizio residenziale italiano.

L'isolamento, come si vedrà, influenzerà pesantemente i risultati passando da edifici più datati a edifici più recenti. Vi è quindi l'esigenza di andare a definire dei modelli semplici di casa residenziale che vadano a mostrare il loro comportamento in funzione del diverso tipo di isolamento e categoria di infissi.

Sotto questa ottica, si è deciso di utilizzare un semplice appartamento da 94.4 metri quadri di superficie in pianta situato nel clima di Venezia. In aggiunta, viene anche suddiviso in tre tipologie, che differiscono tra di essi per la stratigrafia e per i tipi di finestre: B70, B90 e BN. 70 e 90 sono gli ipotetici anni di costruzione ed "N" sta per nuovo, ad indicare un edificio di recente sviluppo.

Lo schema dell'appartamento è visibile in Figura 3.1. Le pareti esterne sono rivolte ad est (superficie confinante con la camera matrimoniale) e ad ovest (superficie confinante con il soggiorno e la cucina), mentre il pavimento è stato considerato come una superficie esterna orizzontale disperdente schermata completamente alla radiazione solare. Quest'ultima semplificazione è necessaria per poter tenere conto delle perdite dell'appartamento nei confronti dei garage e, dato che la temperatura all'interno di essi è generalmente molto vicina a quella esterna, non si compiono grossi errori se non si va a modellarli alla perfezione in TRNSYS. Infine, il sud è rivolto in direzione del vano scale.

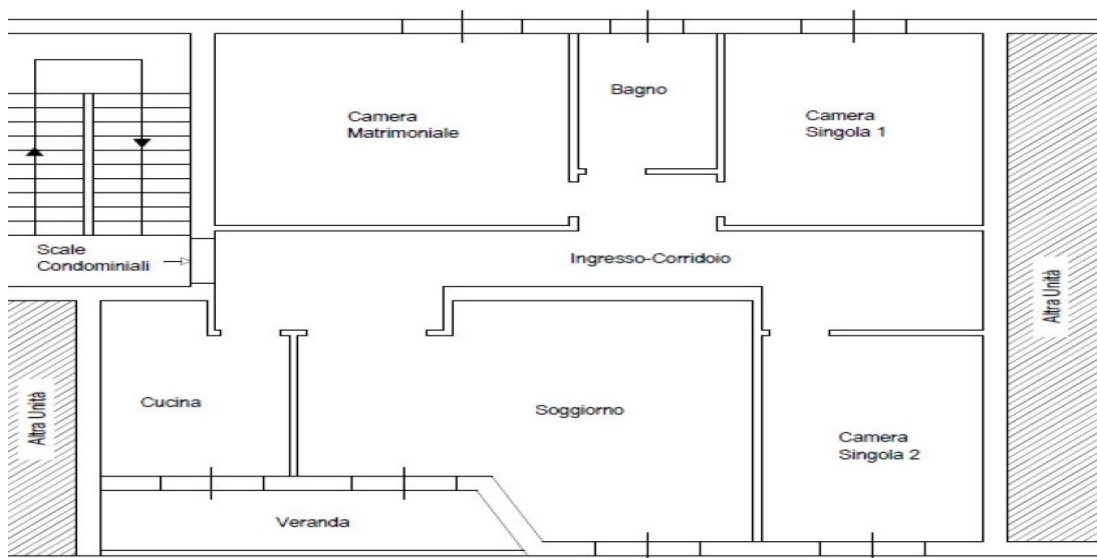


Fig. 3.1: Schema dell'appartamento

Un'altra semplificazione che è stata fatta è il non considerare le perdite verso il vano scale, dato che, se fossero state conteggiate, si sarebbe dovuto costruire tutta la sua geometria in TRNSYS, per poi rischiare che esse siano in realtà molto basse rispetto a quelle delle altre superfici disperdenti, con conseguenti perdite di tempo computazionale in TRNSYS. Dunque, si è ritenuto questo fattore di perdita generalmente molto basso nei vari periodi dell'anno (questa semplificazione è sempre più accettabile man mano che il numero di appartamenti climatizzati confinanti con il vano scale aumentano di numero) e si è considerato il vano scale alla stessa temperatura di quella interna, di fatto eliminando le possibili perdite verso di esso.

Il resto delle superfici, incluso il soffitto, confinano con altri ambienti climatizzati, perciò le loro perdite saranno nulle durante tutto il periodo di simulazione.

3.1 Stratigrafia ed aree frontali delle superfici

Nelle Tabelle 3.1 3.2 e 3.3 vengono riportate le stratigrafie dei muri e superfici orizzontali per tutte e tre le tipologie di edifici che sono state usate nelle simulazioni. Queste ultime sono state scelte per rappresentare delle tipiche situazioni di appartamenti costruito in anni differenti e con trasmittanze diverse tra di loro.

Le trasmittanze totali comprendono anche i valori di resistenza interna $R_i = 0.10 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ e resistenza esterna $R_e = 0.04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ secondo la norma UNI EN

ISO 6946/2008.

In seguito, in Tabella 3.4, sono mostrate anche le trasmittanze totali di tutte le pareti e pavimenti descritte nelle stratigrafie di seguito.

Tabella 3.1: Stratigrafia dell'edificio anni '70.

B70					
Pareti esterne	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco interno	0.015	0.700	1200	1.010	0.022
Mattone Forato	0.080	0.360	1200	0.840	0.223
Intercapedine d'aria	0.050				0.151
Mattone semipieno esterno	0.200	0.608	1800	0.840	0.328
Intonaco esterno	0.015	0.900	1800	0.910	0.018
Muro divisorio	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco interno	0.020	0.700	1200	1.010	0.022
Mattone semipieno esterno	0.280	0.608	1800	0.840	0.328
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018
Pavimento verso l'esterno	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Piastrelle ceramiche	0.015	1.200	2300	1.000	0.011
Malta di cemento	0.060	0.619	1200	1.000	0.097
Solaio interpiano	0.260	0.742	1800	0.920	0.349
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018
Muro interno	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco interno	0.020	0.700	1200	1.010	0.022
Mattone forato	0.080	0.360	1200	0.840	0.223
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018

Continua Tabella 3.1

Soffitto interpiano	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018
Solaio interpiano	0.220	0.742	1800	0.920	0.349
Malta di cemento	0.060	0.619	1200	1.000	0.097
Piastrelle ceramiche	0.020	1.200	2300	1.000	0.011

Tabella 3.2: Stratigrafia dell'edificio anni '90.

B90					
Pareti esterne	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco interno	0.015	0.700	1200	1.010	0.022
Mattone Forato	0.080	0.360	1200	0.840	0.223
Isolante esterno	0.040	0.053	20	1.450	0.752
Mattone semipieno esterno	0.200	0.608	1800	0.840	0.328
Intonaco esterno	0.015	0.900	1800	0.910	0.018
Muro divisorio	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco interno	0.020	0.700	1200	1.010	0.022
Mattone semipieno esterno	0.280	0.608	1800	0.840	0.328
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018
Pavimento verso l'esterno	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Piastrelle ceramiche	0.015	1.200	2300	1.000	0.011
Malta di cemento	0.060	0.619	1200	1.000	0.097
Isolante esterno	0.040	0.053	20	1.450	0.752
Argilla espansa	0.040	0.240	1800	0.840	0.167
Solaio interpiano	0.220	0.742	1800	0.920	0.296
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018

Continua Tabella 3.2

Muro interno	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco interno	0.020	0.700	1200	1.010	0.022
Mattone forato	0.080	0.360	1200	0.840	0.223
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018

Soffitto interpiano	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018
Solaio interpiano	0.220	0.742	1800	0.920	0.349
Malta di cemento	0.060	0.619	1200	1.000	0.097
Piastrelle ceramiche	0.020	1.200	2300	1.000	0.011

Tabella 3.3: Stratigrafia dell'edificio di nuova costruzione.

BN					
Pareti esterne	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco interno	0.015	0.700	1200	1.010	0.022
Mattone semipieno esterno	0.280	0.608	1800	0.840	0.461
Isolante esterno	0.100	0.040	20	1.450	2.499
Intonaco esterno	0.015	0.900	1800	0.910	0.018

Muro divisorio	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco interno	0.020	0.700	1200	1.010	0.022
Mattone semipieno esterno	0.280	0.608	1800	0.840	0.328
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018

Pavimento verso l'esterno	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Piastrelle ceramiche	0.015	1.200	2300	1.000	0.011
Malta di cemento	0.060	0.619	1200	1.000	0.097
Isolante esterno	0.080	0.040	20	1.450	2.002

Continua Tabella 3.3

	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Solaio interpiano	0.260	0.742	1800	0.920	0.349
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018
<hr/>					
Muro interno	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco interno	0.020	0.700	1200	1.010	0.022
Mattone forato	0.080	0.360	1200	0.840	0.223
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018
<hr/>					
Soffitto interpiano	Spessore [m]	Conducibilità [W/(m ² K)]	Densità [kg/m ³]	Calore specifico [kJ/(kg K)]	Resistenza [(m ² K)/W]
Intonaco esterno	0.020	0.900	1800	0.910	0.018
Solaio interpiano	0.220	0.742	1800	0.920	0.349
Malta di cemento	0.060	0.619	1200	1.000	0.097
Piastrelle ceramiche	0.020	1.200	2300	1.000	0.011

Tabella 3.4: Trasmittanze totali dei pavimenti e delle pareti

Trasmittanze totali	B70 [W/(m ² K)]	B90 [W/(m ² K)]	BN [W/(m ² K)]
Pareti esterne	1.138	0.674	0.317
Muro divisorio	1.406	1.406	1.406
Pavimento verso l'esterno	1.607	0.672	0.381
Muro interno	2.114	2.114	2.114
Soffitto interpiano	1.581	1.581	1.581

In Tabella 3.5 invece, è possibile osservare i valori di trasmittanza usati per le superfici vetrate. Dagli anni '70 agli anni '90 non c'è nessun miglioramento, poiché si considera che l'edificio abbia già rinnovato i vecchi infissi a vetro semplice, mentre per l'edificio nuovo vi è un netto calo della trasmittanza. La percentuale di superficie vetrata rispetto al totale è del 85%.

Infine, in Tabella 3.6 sono riassunte le superfici frontali dei muri esterni e delle superfici vetrate. È da notare come l'area vetrata rivolta ad Est sia molto più grande di quella ad ovest: questo influenzerà molto il comportamento in estate dell'edificio nei confronti del consumo energetico. Le superfici finestrate sono la somma delle aree dei fori di tutte le finestre rivolte nella corrispondente direzione.

Tabella 3.5: Trasmittanza delle superfici vetrate per i tre tipi di edificio

Trasmittanza	B70	B90	BN
	$[W/m^2K]$	$[W/m^2K]$	$[W/m^2K]$
Vetro	2.830	2.830	1.400
Telaio	2.270	2.270	2.270
Infisso	2.750	2.750	1.530

Tabella 3.6: Superfici frontali disperdenti di muri, finestre e pavimento

	Superficie $[m^2]$
Superficie opaca Ovest	25.1
Superficie opaca Est	31.6
Pavimento	94.4
Superficie delle finestre rivolte ad Ovest	12.2
Superficie delle finestre rivolte ad Ovest	4.5

3.2 Caratteristiche e distribuzione degli eventi

Fino ad ora non è mai stato specificato quanto sarebbe il salto di temperatura in ogni evento e, soprattutto, come sono distribuiti nelle ore della giornata.

Si è detto che vengono studiati i singoli eventi separatamente gli uni dagli altri e che viene fatta la divisione estate ed inverno. Ma, le scelte su che tipo di eventi fare e dove distribuirli sono idealmente infinite: si possono piazzare in qualsiasi ora del giorno e il salto di temperatura possibile può essere teoricamente di qualsiasi entità. Dunque, si sono seguiti alcuni principi logici che hanno permesso di avere un numero limitato di eventi, ma sufficienti a spiegare poi il comportamento e l'andamento di tutti gli altri teoricamente possibili distribuiti nelle diverse ore del giorno.

I principi di scelta seguiti sono stati i seguenti:

- Non vengono mai piazzati gli aumenti o le diminuzioni di temperatura a cavallo dei cambiamenti di setpoint delle schedule di riferimento. Ad esempio, se nella schedule OC si ha normalmente alle 7 un salto di temperatura dai 18 ai 21 °C, non ci sarà mai un evento della durata di due ore dalle 6 alle 8 di mattina in cui si aumenta o diminuisce la temperatura. Se si scegliesse un aumento di 3 °C per quelle due ore, risulterebbe infatti un evento che

porta la temperatura di setpoint per la sua prima ora a $18 + 3 = 21$ °C e nella sua seconda ora a $21 + 3 = 24$ °C.

- Gli eventi vengono preferibilmente collocati all'inizio o alla fine del periodo di presunta occupazione (quando la temperatura è a 21 °C), con in aggiunta un evento a metà di quest'ultimo. La motivazione verrà meglio giustificata poi visualmente nei risultati, ma l'idea di ciò sta nel cercare di ottenere l'andamento generale dei valori finali ricavando solo quelli ai limiti di ben definiti periodi più uno aggiuntivo a metà per confermare il trend ottenuto.
- Gli eventi invernali che portano ad aumenti di temperatura vengono sempre piazzati nei periodi di bassa occupazione quando la temperatura di setpoint è di 18 °C, mentre gli eventi invernali che diminuiscono la temperatura sono collocati nei periodi di occupazione quando la temperatura di setpoint è di 21 °C. Questa motivazione è una conseguenza logica di come si comporterebbero gli edifici in relazione a questi cambiamenti.

Supponiamo infatti, di voler effettuare un evento che diminuisca la temperatura di notte in inverno. La relazione di C_{adr} dice che per avere questo valore in termini assoluti più alto possibile per queste diminuzioni, si dovrebbe avere idealmente Q_{adr} pari a zero (impianto totalmente spento nelle due ore di evento) e Q_{ref} pari al valore massimo possibile (pari all'energia che l'impianto fornisce alla massima potenza per quelle due ore di evento). Sicuramente, come si può immaginare, un edificio con setback notturno funzionerà difficilmente alla massima potenza nelle ore notturne.

Per eventi che alzano la temperatura valgono analoghe considerazioni: per avere C_{adr} più alto possibile in termini assoluti, si deve avere Q_{adr} pari al valore massimo possibile (accensione dell'impianto alla massima potenza per due ore di evento) e Q_{ref} pari a zero (impianto nel caso di riferimento completamente spento nelle due ore considerate). La conseguenza di ciò è che sarà molto difficile avere Q_{ref} pari a zero durante le ore di occupazione, quando la richiesta è generalmente molto alta.

- Tutti gli eventi invernali provocano una differenza di temperatura dal caso di riferimento pari a 3 °C. Quindi, gli eventi che alzano la temperatura, portano sempre l'edificio dai 18 ai 21 °C, mentre nel caso contrario la temperatura viene portata dai 21 ai 18 °C. Infatti, i valori di queste temperature sono

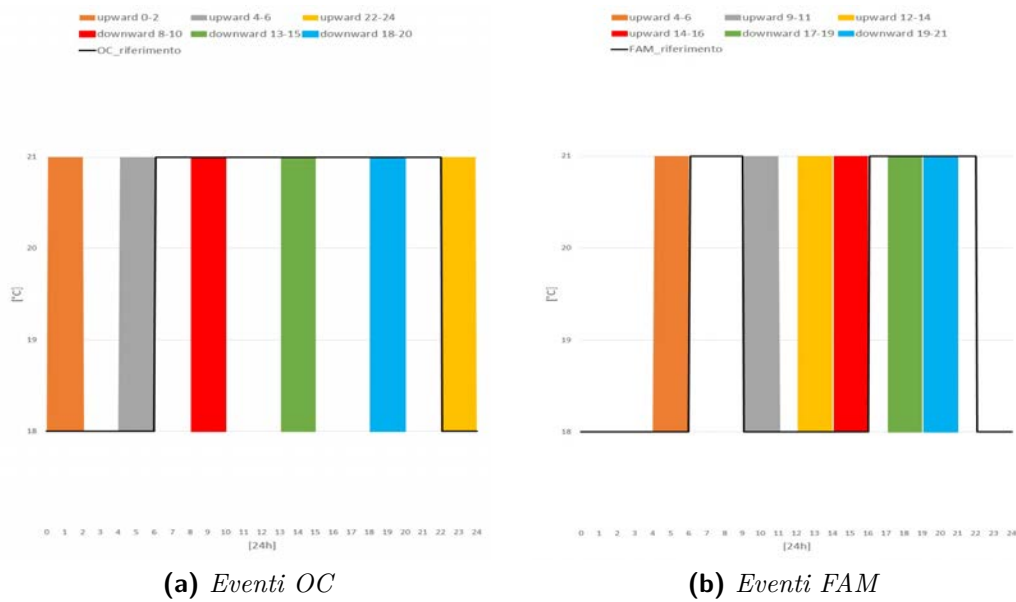


Fig. 3.2: Distribuzione grafica degli eventi invernali.

considerati di comfort massimi o minimi possibile e i trend ottenibili con valori intermedi del salto di temperatura possono essere dedotti dallo studio dei casi considerati in questo lavoro.

Nella Tabella 3.7 sono sintetizzati tutti gli eventi utilizzati secondo queste logiche per i casi invernali e nelle Figure 3.2a e 3.2b si possono osservare graficamente le disposizioni di queste variazioni di temperatura durante il giorno rispetto alla schedule base di riferimento.

Tabella 3.7: Distribuzione temporale dei singoli eventi nelle ore delle giornate invernali.

Eventi invernali	FAM	OC
	Ora di inizio dell' evento e durata	Ora di inizio dell' evento e durata
Eventi che incrementano la temperatura (upward modulation)	4-6	0-2
	9-11	4-6
	12-14	22-24
	14-16	
Eventi che decrementano la temperatura (downward modulation)	17-19	8-10
	19-21	13-15
		18-20

3.2.1 Distribuzione degli eventi estivi

Per quanto riguarda i casi estivi, le considerazioni fatte fino ad ora sono molto più complicate da applicare.

Si ha una schedule di riferimento di 26 °C costanti, con carichi interni di tipo FAM. Non vi sono dunque presunti periodi di occupazione a giudicare dalle temperature di setpoint e la complicazione di avere i carichi solari molto variabili, in aggiunta alla grande influenza della capacità dell'edificio nel spostare tutti i carichi nel tempo, non rende facile la scelta della locazione degli eventi come effettuato in precedenza.

L'unica soluzione preliminare possibile è quella di impostare degli eventi che avvengono regolarmente ogni tot ore: nel caso di questa tesi, è stato scelto di avere un evento ogni quattro ore a partire dalla mezzanotte. Dunque, sempre ogni tre giorni, si avrà un aumento o un decremento di temperatura di setpoint per due ore a mezzanotte, alle 4, alle 8, alle 12, alle 16 e alle 20 del giorno di evento.

Naturalmente, ognuno di questi, è trattato singolarmente. Per maggiore chiarezza, è stata comunque creata la Tabella 3.8 che riassume ciò che è stato appena detto.

Tabella 3.8: Distribuzione temporale dei singoli eventi nelle ore delle giornate estive.

Eventi estivi	Ora di inizio e durata dell'evento nella giornata
	0-2
Eventi che diminuiscono la temperatura (upward modulation)	4-6
	8-10
	12-14
	16-18
	20-22
	0-2
Eventi che aumentano la temperatura (downward modulation)	4-6
	8-10
	12-14
	16-18
	20-22

La seconda questione da chiarire è il quanto aumentare o diminuire la temperatura di setpoint. In estate, infatti, il controllo di temperatura deve essere affiancato a un controllo dell'umidità relativa per garantire il miglior comfort di chi abita

nell'appartamento. Normalmente si hanno costantemente 26 °C e 50% RH, ma durante gli eventi questi due parametri dovranno variare in modo consono secondo normativa.

La normativa utilizzata è stata presa dallo standard 55 ASHRAE [13], con il grafico riportato in Figura 3.3. l'area di applicazione è ovviamente quella degli 0.5 clo che soddisfa anche il vincolo di $-0.5 < PMV < 0.5$.

La Figura 3.3 mostra anche i punti di funzionamento scelti nei vari eventi per garantire il comfort estivo:

- Il punto B rappresenta il punto di funzionamento degli eventi che abbassano la temperatura, quindi forzano l'impianto di raffreddamento a esportare più calore dall'edificio rispetto a quello effettuato nella schedule di riferimento. La temperatura scende a 24 °C ed RH è stato impostato al 60%, ricercando il punto di funzionamento limite che stesse comunque all'interno dell'area di comfort.
- Il punto C rappresenta il punto di funzionamento degli eventi che alzano la temperatura, quindi forzano l'impianto di raffreddamento a spegnersi e ad esportare in generale meno calore rispetto al caso di riferimento. La temperatura sale a 27 °C ed RH è stato impostato al 45%, ricercando il punto limite che stesse comunque all'interno dell'area di comfort.

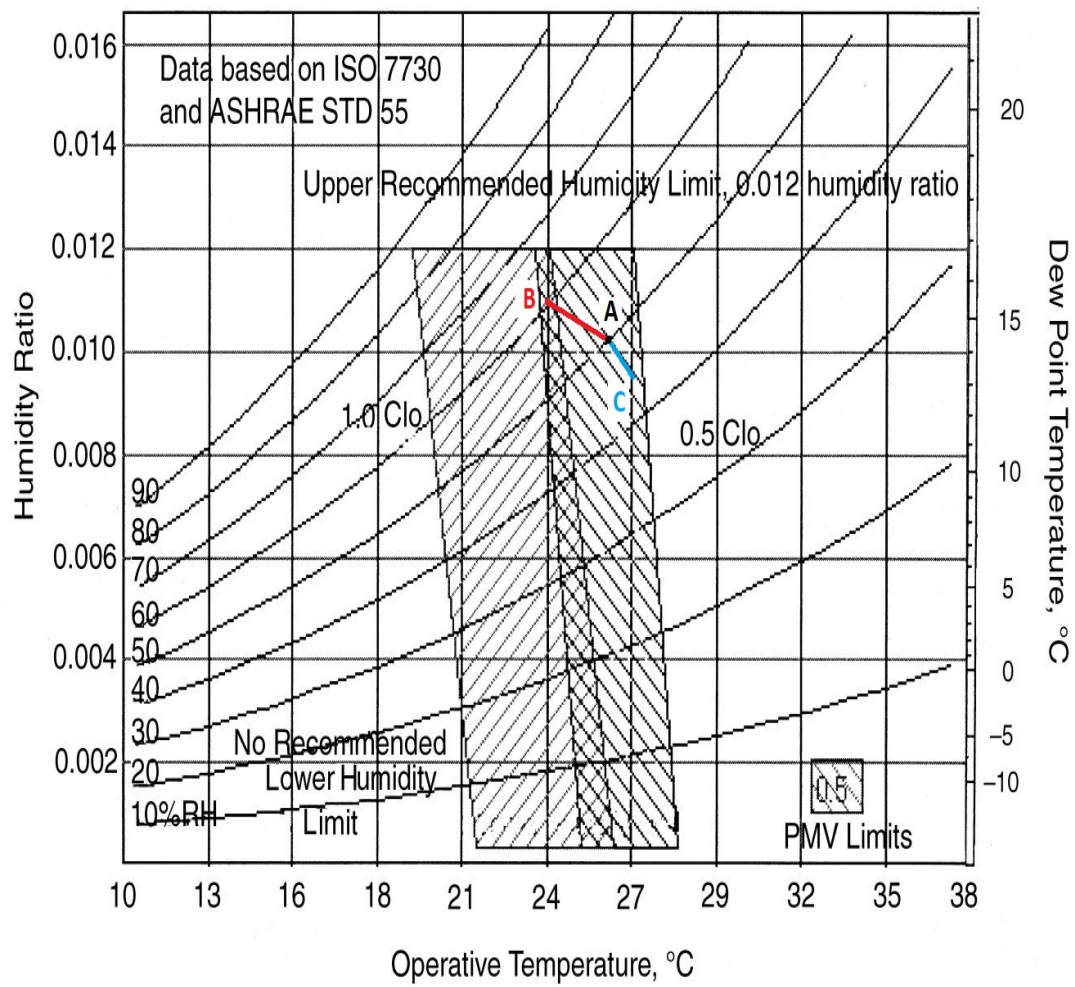


Fig. 3.3: ASHRAE Standard 55 [13] con punti di funzionamento degli eventi.

Capitolo 4

Risultati

Una volta chiariti tutti gli strumenti necessari ai calcoli, le simulazioni possono essere avviate e, come già ripetuto, il programma utilizzato in questa tesi è stato TRNSYS.

In questo capitolo si mostrano i risultati del lavoro effettuato tramite il software, cercando di trattare l'influenza delle principali condizioni al contorno quali l'involucro edilizio e le tipologie di schedule in modo indipendente. Quindi si fa variare uno solo di questi tenendo gli altri costanti.

4.1 Effetto dell'involucro edilizio

Si considera ora la sola variazione del tipo di involucro, cercando di mantenere il più possibile costante ogni altra grandezza. In particolare, viene usata la media effettuata tra i diversi eventi di segno uguale delle schedule per gli indici di flessibilità.

I grafici 4.1 4.2 presentano i valori medi di C_{adr} ed η_{adr} al variare del tipo di edificio in ogni mese dell'anno. Vengono inoltre separati i risultati che si otterrebbero per diverse schedule.

Inoltre, C_{adr} è presentato come kWh medio accumulato in un'ora di evento, ricavandolo come valore totale mensile dell'energia accumulata dall'evento considerato per le sue ore totali mensili. Ad esempio, se a Gennaio si hanno 130 kWh accumulati, il valore medio orario sarà $130/20=6.5$ kWh dove 20 sono le ore totali di evento per quel mese (10 eventi da 2 ore ciascuno).

Da notare che la potenza di progetto per l'edificio B70 è 9 kW considerando anche quella di ripresa, la conseguenza è che il valore massimo di energia accumulabile in un evento invernale in tal caso è di $9 \cdot 2 = 18$ kWh se l'impianto rimane acceso per due ore alla massima potenza. Dunque, si hanno in un'ora 9 kWh massimi accumulabili (che convenientemente sono numericamente pari alla potenza degli impianti) e il confronto con i valori dei grafici aiuta a capire quanto si è avvicinati al massimo potenziale di accumulo dell'edificio.

Considerando poi, ad esempio, per quel mese un'efficienza dell'83%, si avrebbero 22 kWh perduti attraverso l'involucro nei tre giorni successivi agli eventi rispetto ai 130 kWh immessi durante le ore di quest'ultimi.

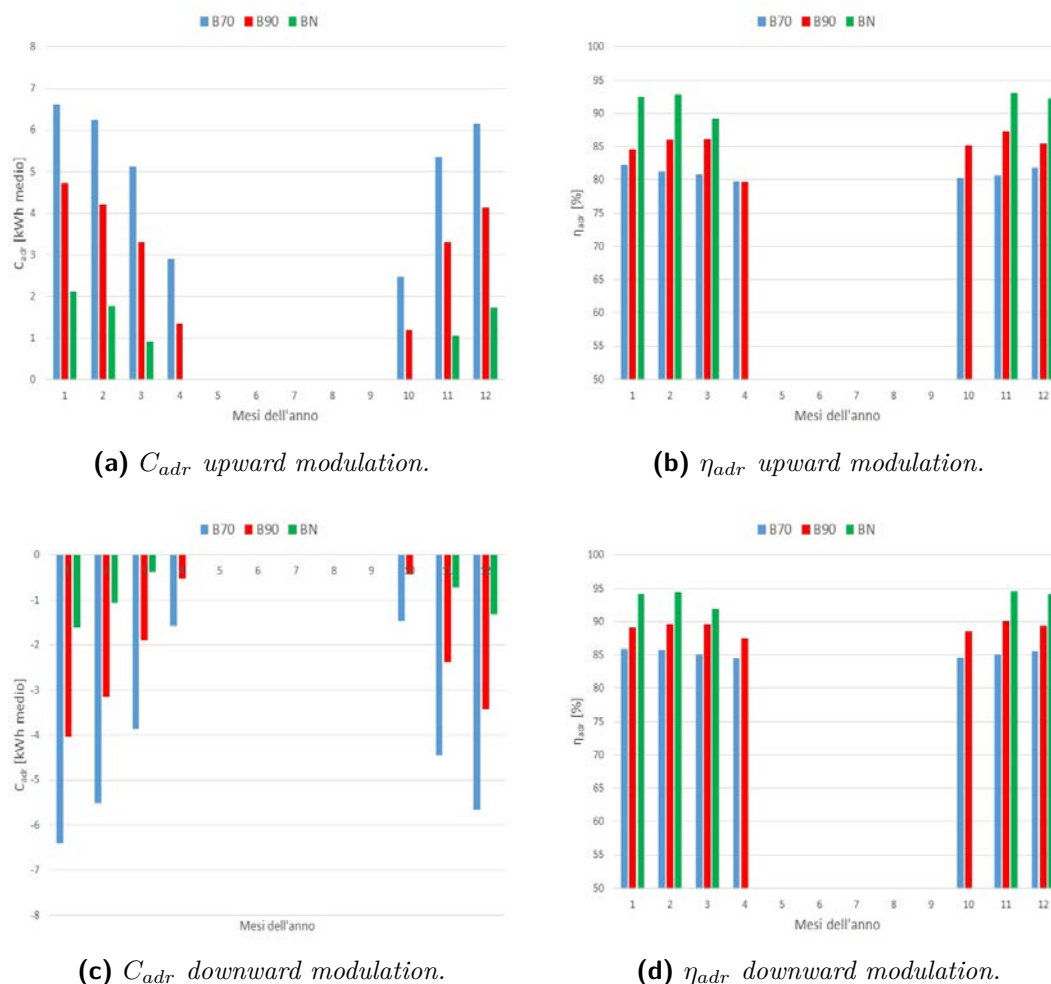
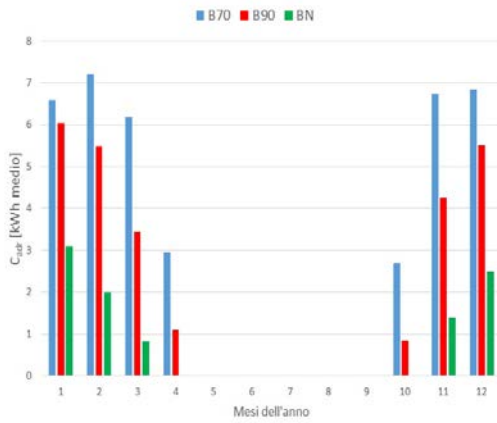
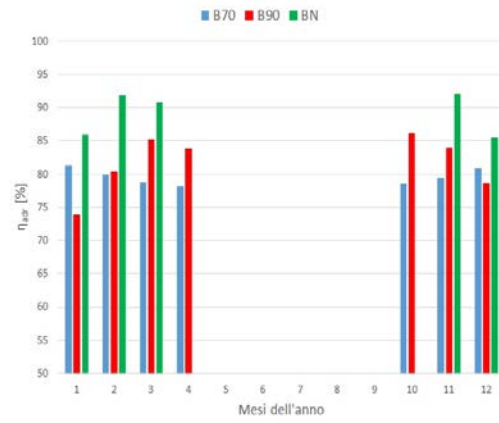


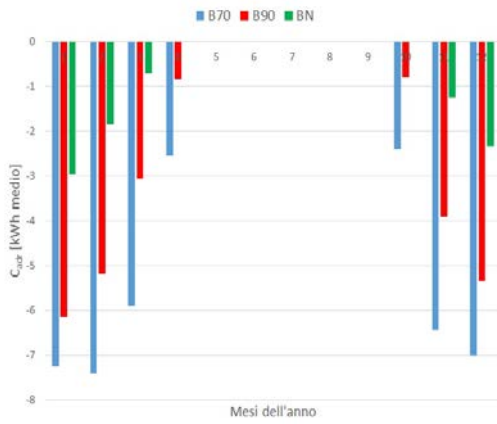
Fig. 4.1: Risultati medi mensili invernali con potenza di ripresa, schedule OC, considerando solo l'effetto dell'involucro.



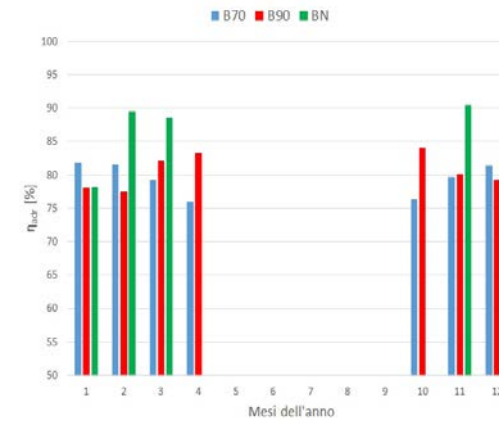
(a) C_{adr} upward modulation.



(b) η_{adr} upward modulation.



(c) C_{adr} downward modulation.



(d) η_{adr} downward modulation.

Fig. 4.2: Risultati medi mensili invernali con potenza di ripresa, schedule FAM, considerando solo l'effetto dell'involucro.

Il trend presentato nei grafici 4.1 è in realtà molto generale e valido in qualsiasi caso: gli edifici con isolamento sempre più grande hanno anche rendimenti crescenti e C_{adr} più bassi.

I C_{adr} bassi sono dovuti al fatto che la potenza di progetto è molto più piccola (e il tempo di evento è costante) e perché negli edifici più isolati la temperatura tende a rimanere sopra i 19 °C anche quando il setpoint è a 18, quindi il salto di temperatura per arrivare ai 21 °C sarà sempre inferiore rispetto a quello necessario per edifici con poco isolamento. Nel caso di diminuzione della temperatura di setpoint, i trend sono molto simili, ma di segno negativo. Dunque, si avranno dei valori più elevati, in valore assoluto, di C_{adr} per gli edifici anni '70 che poi decresceranno fino al BN.

I rendimenti crescenti sono invece causati dalle perdite verso l'esterno dell'edificio via via più basse con lo strato isolante che aumenta. In tal modo, il surplus di calore accumulato durante l'evento influenzerà la differenza tra i consumi delle simulazioni evento-riferimento per molte più ore successive all'evento, senza che avvengano forti dispersioni attraverso l'involucro. Nel caso contrario, la diminuzione di temperatura di setpoint in edifici ben isolati provoca nelle ore successive aumenti del consumo nelle simulazioni con evento che, avendo un isolamento maggiore, disperderanno questi aumenti del calore emesso dall'impianto in quantità minori rispetto a degli edifici datati.

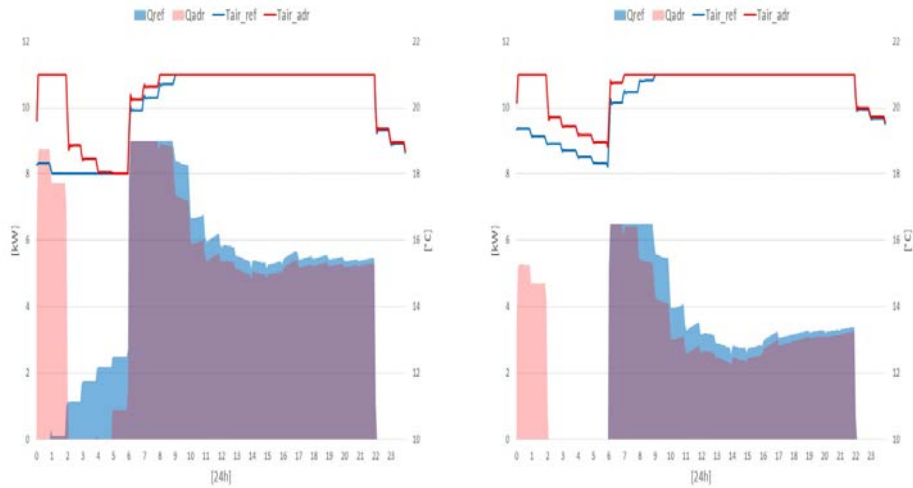
Esempi di tali concetti sono mostrati nei grafici 4.3 e 4.4. I primi sono relativi a eventi di aumento della temperatura dalla mezzanotte alle due, mentre gli altri rappresentano eventi diminuzione della temperatura dalle 13 alle 15, ma tutti usano la stessa schedule OC e fanno variare il tipo di edificio includendo anche la potenza di ripresa nel sistema di riscaldamento.

Essi confermano ciò che è stato detto. In 4.3a, C_{adr} è più alto a causa delle condizioni interne dell'edificio, inoltre la potenza nella prima ora di evento è praticamente la massima dell'impianto (9 kW), mentre nel B90 la potenza nella prima ora di evento non è la massima e nel BN è quasi la metà.

Il parametro η_{adr} , rappresentato dal rapporto tra l'area azzurro chiaro dopo l'evento e l'area rosso chiaro, diviene sempre più alto man mano che si passa verso gli edifici BN: in questi esempio, il caso di Gennaio ha una efficienza non così bassa anche per il B70 (83.7%) visto che dalle 2 alle 6 vi è comunque un certo consumo di energia che può essere ridotto dal surplus immesso. In ogni caso, il

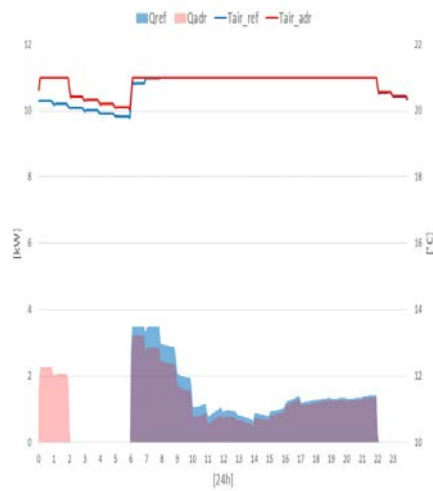
basso isolamento e la temperatura esterna avversa disperde molta dell'energia e non permette di avere gli stessi rendimenti degli altri due edifici.

Nel caso contrario di diminuzione della temperatura, ancora una volta vale la regola spiegata in precedenza: l'energia maggiore disponibile da asportare nel caso B70 lo rende il caso con il più alto C_{adr} e, man mano che l'isolamento cresce e i consumi diminuiscono l'energia disponibile decresce, riducendo il valore dell'indicatore in termini assoluti. Ovviamente, η_{adr} diviene sempre più alto verso gli edifici BN a causa delle minori dispersioni di calore nei consumi maggiorati provocati dopo l'evento.



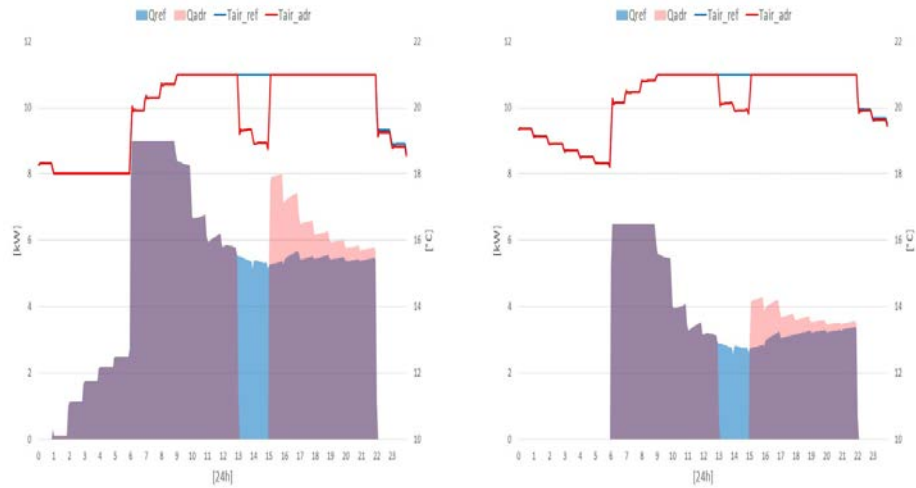
(a) Edificio anni '70, schedule OC con potenza di ripresa.

(b) Edificio anni '90, schedule OC con potenza di ripresa.



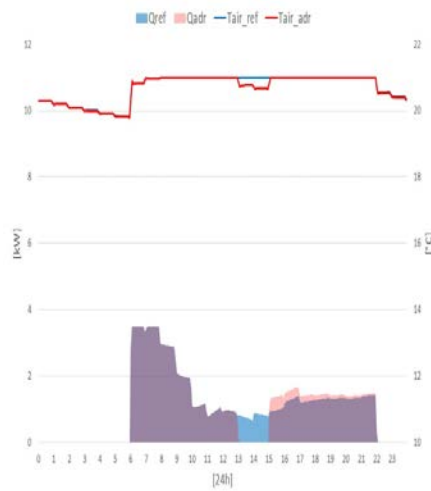
(c) Edificio recente, schedule OC con potenza di ripresa.

Fig. 4.3: Esempio di evento con aumento della temperatura dalla mezzanotte alle 2 a Gennaio.



(a) Edificio anni '70, schedule OC con potenza di ripresa.

(b) Edificio anni '90, schedule OC con potenza di ripresa.



(c) Edificio recente, schedule OC con potenza di ripresa.

Fig. 4.4: Esempio di evento con diminuzione della temperatura dalla mezzanotte alle 2 a Gennaio.

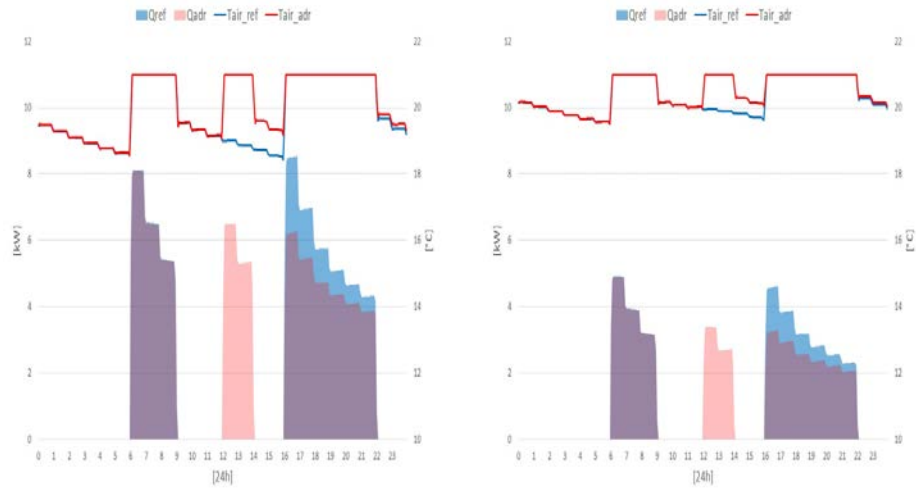
Infine, si può notare come il trend descritto dei due parametri sia sempre valido in tutti i mesi dell'anno. Questo in realtà non sarà sempre vero e le eccezioni verranno analizzate meglio nei capitoli seguenti, quando si studieranno nel dettaglio l'influenza delle schedule nei risultati. Dei primi esempi utilizzando le schedule FAM vengono mostrati in 4.5 e in 4.6, che seguono la regola generale appena introdotta.

Gli esempi di Marzo sono stati fatti il 16 dello stesso mese e si può notare come le richieste di energia negli edifici nuovi siano estremamente basse, tanto che il C_{adr} per upward modulation è dell'ordine del mezzo kW e il rendimento di quell'evento è addirittura inferiore a quello dell'edificio anni '90.

In questi esempi è anche possibile constatare l'influenza delle condizioni esterne più favorevoli: una più alta temperatura esterna e un maggior carico solare permettono di disperdere molta meno energia attraverso l'involucro nelle ore successive agli eventi, incrementando il rendimento e permettendo di ridurre i picchi di energia che si avrebbero negli eventi upward modulation alle 16 o aumentando le richieste per eventi downward.

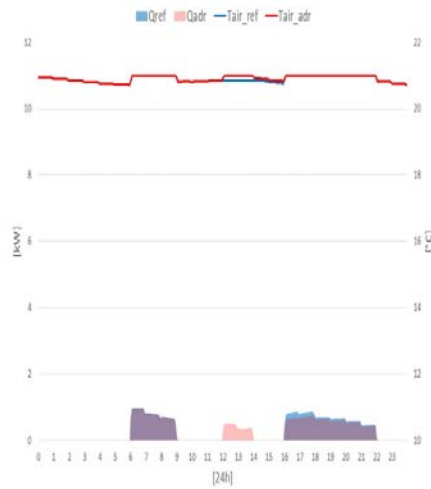
Da notare, per questi ultimi, che la temperatura riesce a non decadere mai ai 18 °C o meno, quindi si avrà sempre Q_{adr} pari a zero che è la condizione per cercare di massimizzare il valore di C_{adr} .

Il caso di Marzo è però l'unico che segue la regola generale alla perfezione, negli altri mesi vi è sempre un'eccezione nel trend dei rendimenti. Ad esempio, a Gennaio sembrerebbero decadere i valori del BN e del B90, addirittura nel caso di edificio anni '90 si hanno efficienze inferiori rispetto all'anno '70.



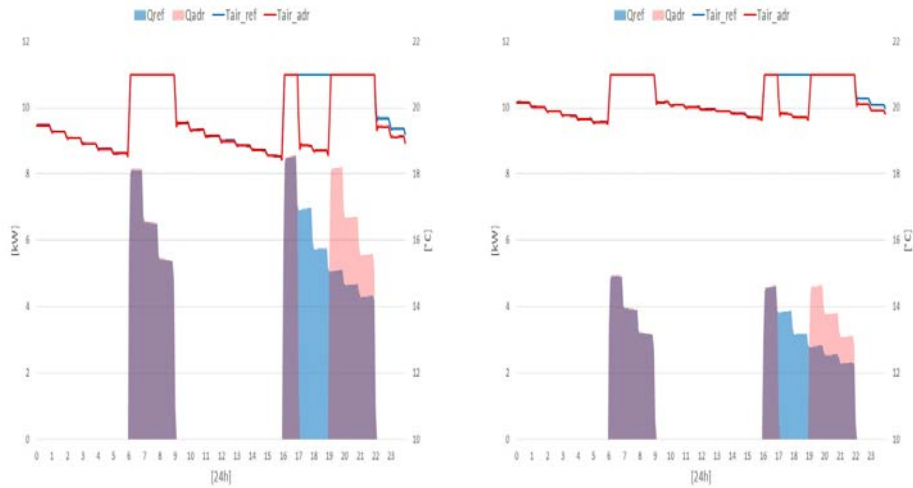
(a) Edificio anni '70, schedule FAM con potenza di ripresa.

(b) Edificio anni '90, schedule FAM con potenza di ripresa.



(c) Edificio recente, schedule FAM con potenza di ripresa.

Fig. 4.5: Esempio di evento con aumento della temperatura dalle 12 alle 14 a Marzo.



(a) Edificio anni '70, schedule FAM con potenza di ripresa.

(b) Edificio anni '90, schedule FAM con potenza di ripresa.



(c) Edificio recente, schedule FAM con potenza di ripresa.

Fig. 4.6: Esempio di evento con diminuzione della temperatura dalle 13 alle 15 a Marzo.

4.1.1 Effetti nei casi estivi

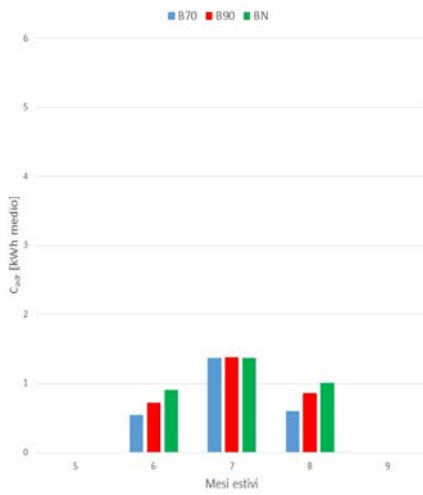
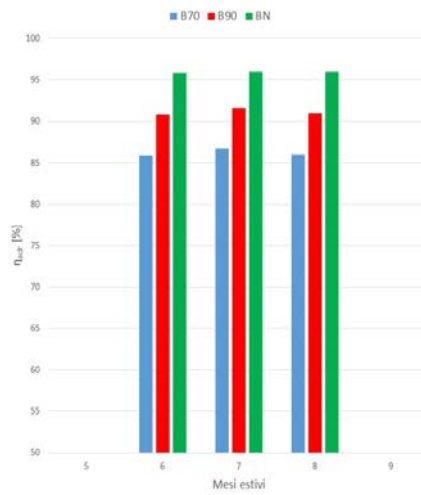
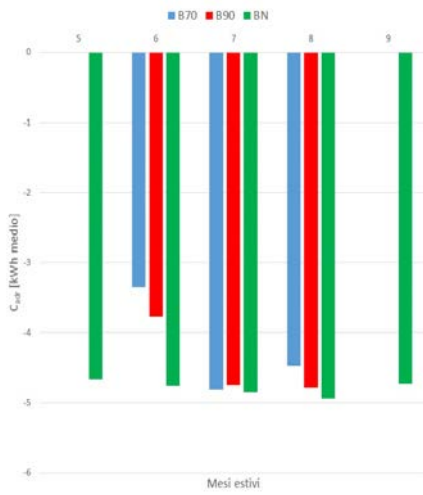
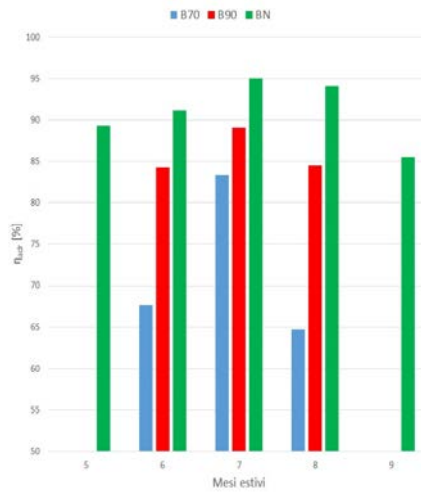
Nella Figura 4.7 sono rappresentate le medie degli indici di flessibilità dei diversi eventi nella stagione di raffrescamento, di fatto andando a guardare solo l'influenza dell'edificio.

Anche questi ultimi casi seguono la regola generale, ma i C_{adr} crescono con l'isolamento dell'edificio. Gli η_{adr} invece decrescono andando verso edifici meno isolati, come nei casi invernali. Questo è sempre vero per il caso downward modulation, che coincide con l'innalzamento della temperatura. Inoltre, questo tipo di modulazione, presenta valori molto bassi di C_{adr} , minori sempre di 1.5 kW medi di potenza e costanti nel mese di Luglio.

Le eccezioni sembrano presentarsi quando si passa alla upward modulation, coincidente con l'abbassamento della temperatura, in particolare verso Luglio in cui si hanno delle energie medie durante gli eventi di valore pressoché uguale tra i tre casi. Questo è dovuto principalmente al come incide carico solare e nella non contemporaneità dei carichi in questa stagione: infatti, senza andare per il momento nel dettaglio, il diagramma di carico estivo in tale mese è praticamente quasi uguale per tutti e tre gli edifici, con delle leggere differenze che si mostrano nel momento in cui si hanno i picchi della radiazione solare.

Interessante notare che a Maggio e a Settembre, gli unici valori apprezzabili di C_{adr} sono nel caso BN.

Infine, il perché i valori di C_{adr} a Giugno siano molto diversi da edificio ad edificio è da ricercarsi nella diversa curva di domanda di energia di raffrescamento che risulta dalle tre tipologie di edificio. Nei casi B70 e B90 si è osservato che i fabbisogni sono concentrati in un intervallo ristretto di ore tra il mattino e il pomeriggio (che, per il basso isolamento diventare più alti rispetto a quelli di un edificio molto coibentato nelle ore di picco), mentre negli edifici molto isolati tali consumi energetici sono più distribuiti durante la notte. Infatti, in edifici poco isolati la temperatura notturna potrebbe scendere sotto i 26 gradi e generare il fenomeno del free-cooling, di fatto andando ad annullare le richieste di energia frigorifera in ore serali.

(a) C_{adr} downward modulation.(b) η_{adr} downward modulation.(c) C_{adr} upward modulation.(d) η_{adr} upward modulation.**Fig. 4.7:** Risultati medi mensili estivi considerando solo l'effetto dell'involucro.

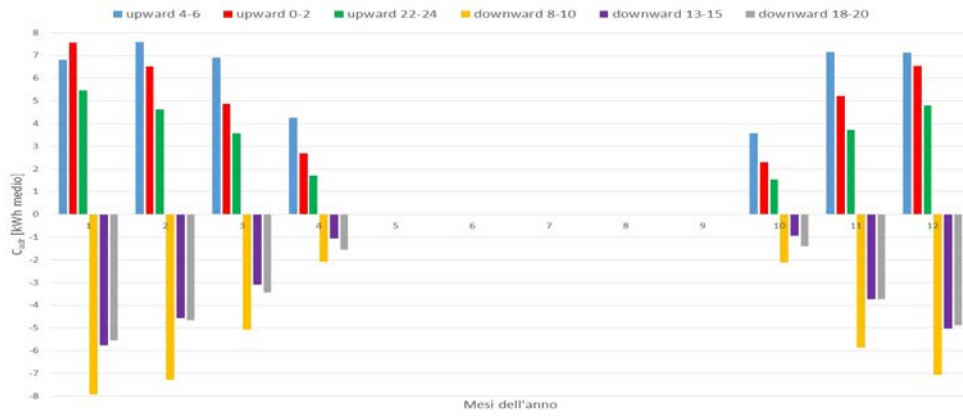
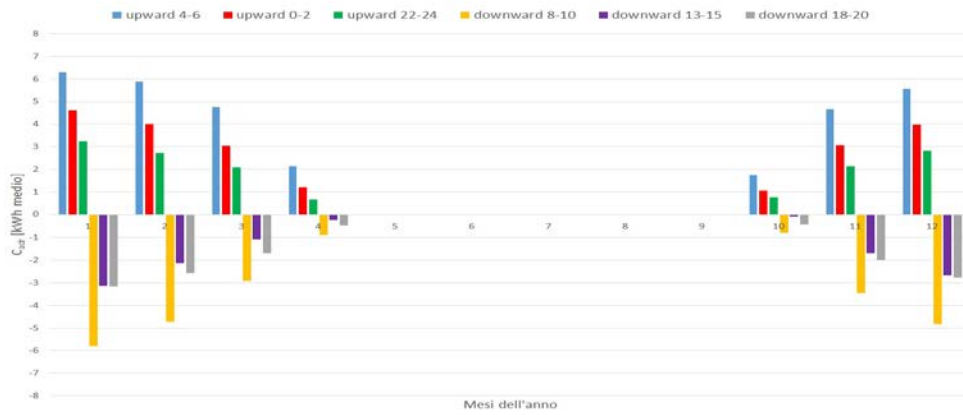
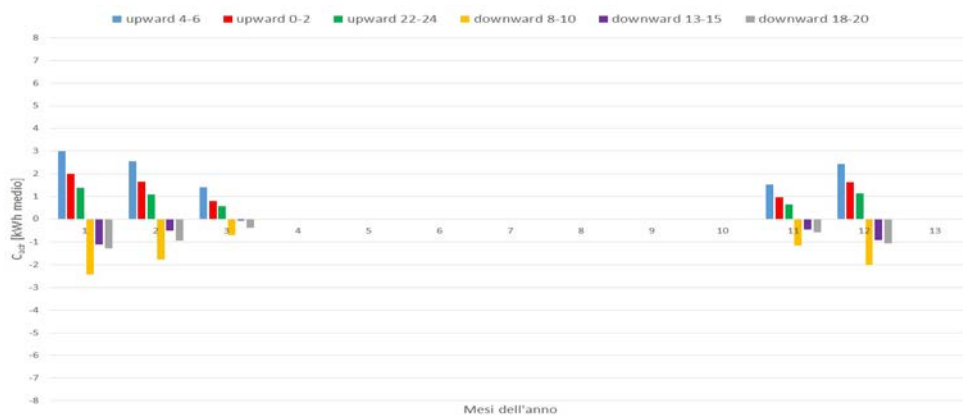
4.2 Effetti dei diversi tipi di evento

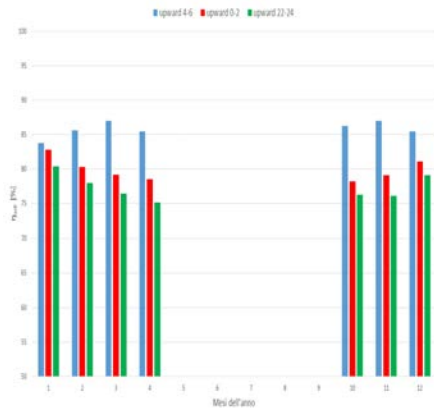
Vengono presentati nelle prossime pagine i grafici che riassumono in modo completo l'andamento degli indici mensili per ogni tipo di evento studiato.

I primi grafici 4.8 e 4.9 si riferiscono alle schedule OC e con potenza di ripresa, mentre i due successivi 4.10 e 4.11 non considerano la potenza aggiuntiva. Nel capitolo del comportamento dell'utenza verranno invece introdotti grafici analoghi per la schedule FAM.

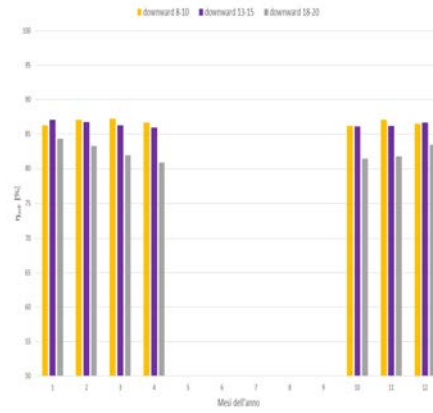
Come primo argomento affrontato dall'analisi dei primi risultati, verrà studiata la più efficiente programmazione generale degli eventi nell'arco della giornata. In seguito, si ricercheranno le condizioni per cui tale organizzazione non è più valida e necessita di essere adattata caso per caso.

Giocheranno quindi un ruolo fondamentale la variazione della potenza di progetto degli impianti e la variazione delle abitudini dell'utenza tramite la diversa schedule di temperature di setpoint e carichi interni.

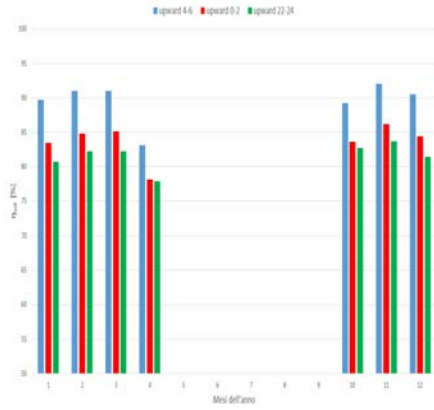
(a) *Edificio anni '70.*(b) *Edificio anni '90.*(c) *Edificio recente.***Fig. 4.8:** Risultati mensili di C_{adr} per la schedule OC con potenza di ripresa.



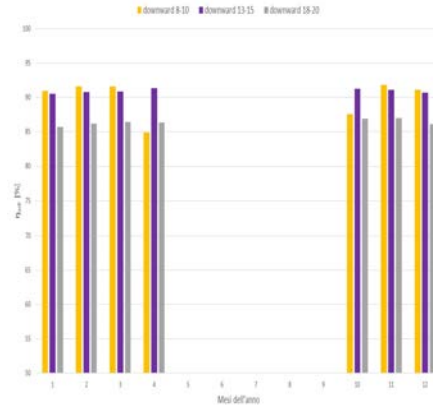
(a) *Upward modulation
Edificio anni '70.*



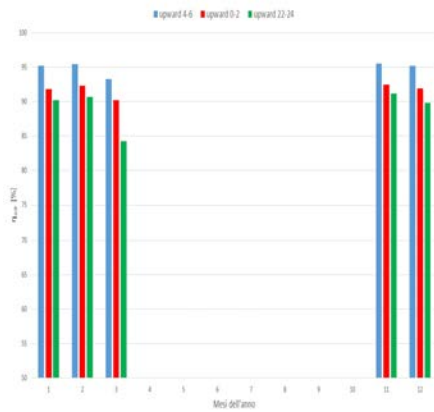
(b) *Downward modulation
Edificio anni '70.*



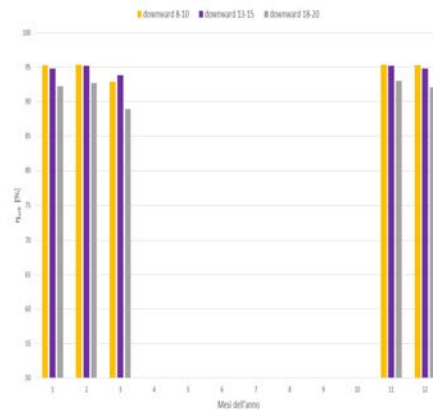
(c) *Upward modulation
Edificio anni '90.*



(d) *Downward modulation
Edificio anni '90.*

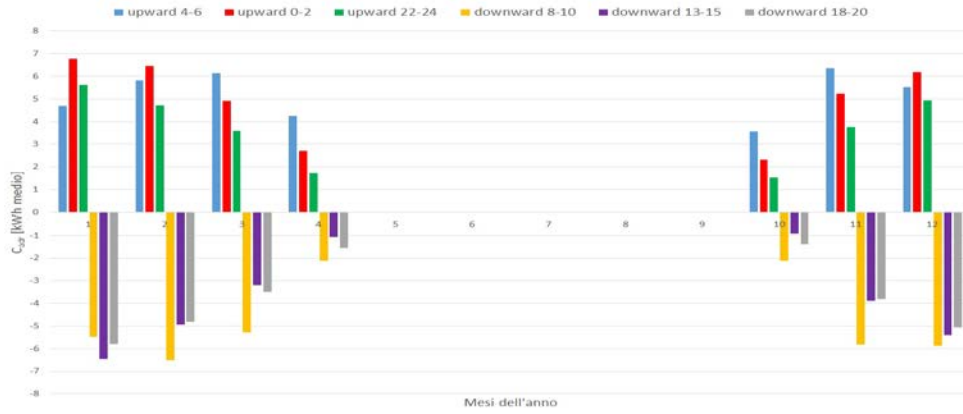
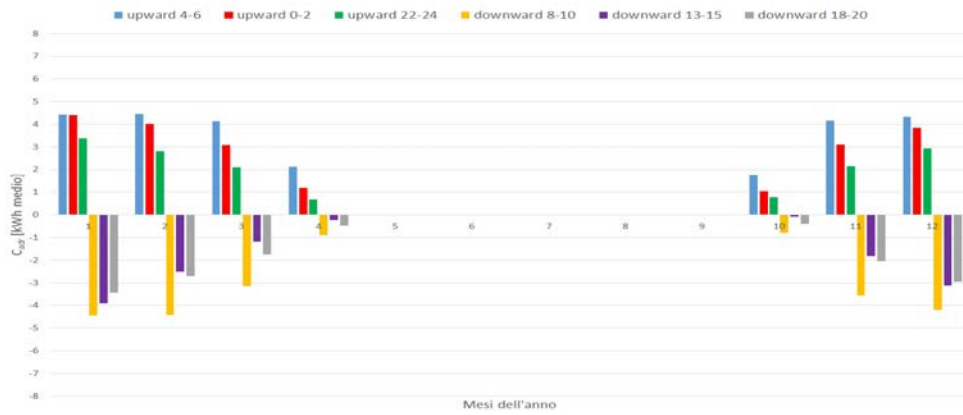
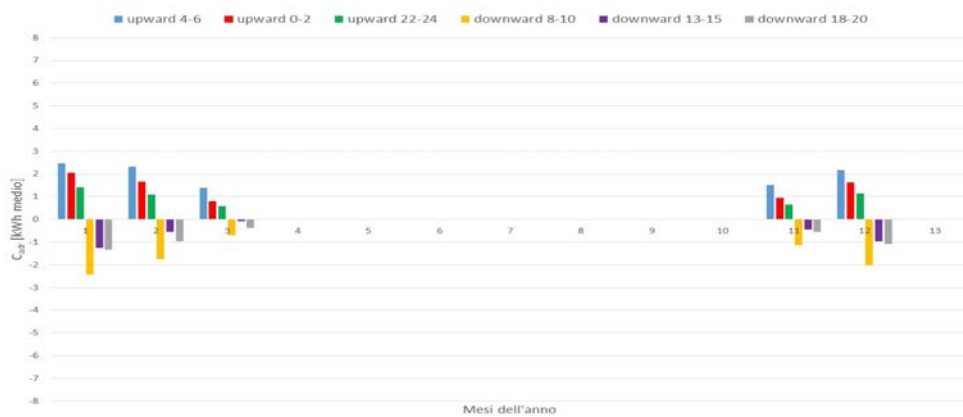


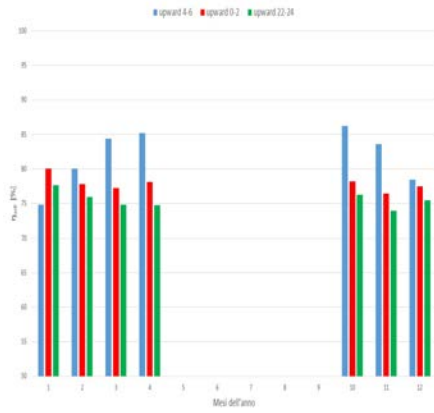
(e) *Upward modulation
Edificio recente.*



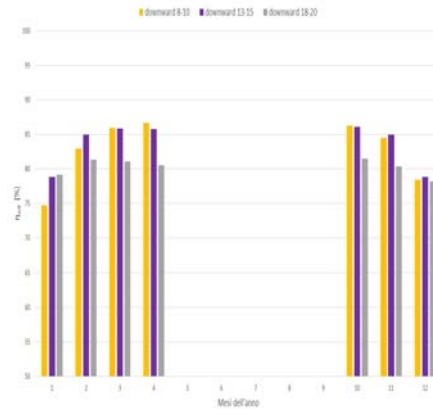
(f) *Downward modulation
Edificio recente.*

Fig. 4.9: Risultati mensili di η_{adr} per la schedule OC con potenza di ripresa.

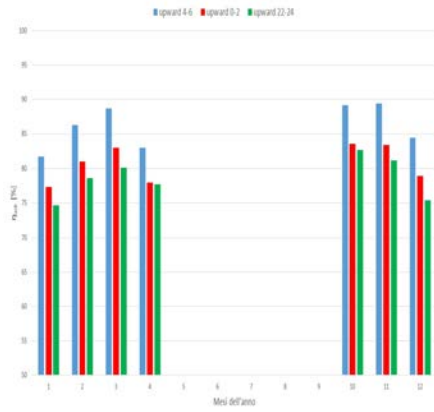
(a) *Edificio anni '70.*(b) *Edificio anni '90.*(c) *Edificio recente.***Fig. 4.10:** Risultati mensili di C_{adr} per la schedule OC senza potenza di ripresa.



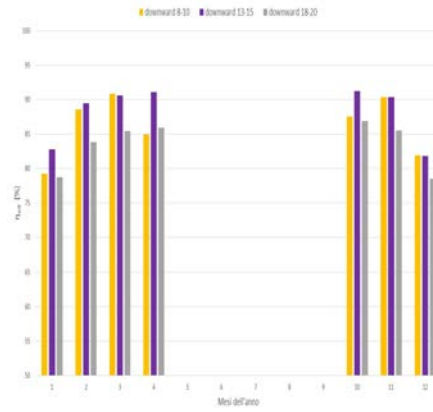
(a) *Upward modulation
Edificio anni '70.*



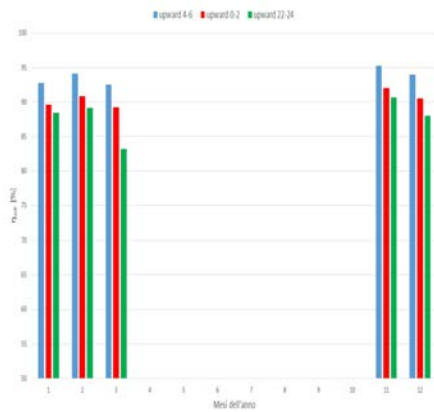
(b) *Downward modulation
Edificio anni '70.*



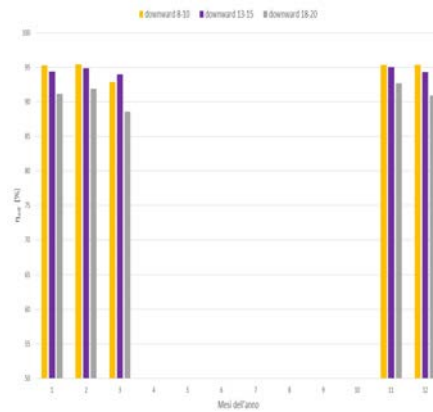
(c) *Upward modulation
Edificio anni '90.*



(d) *Downward modulation
Edificio anni '90.*



(e) *Upward modulation
Edificio recente.*



(f) *Downward modulation
Edificio recente.*

Fig. 4.11: Risultati mensili di η_{adr} per la schedule OC senza potenza di ripresa.

4.2.1 Programmazione temporale degli eventi

Inizialmente si considerano solo gli eventi con potenza di ripresa inclusa nel calcolo di quella di progetto. Guardando i primi grafici in Figura 4.8 e 4.9 con schedule OC, si può osservare come tendenzialmente vi sia un evento tra quelli upward modulation che presenta le migliori performance rispetto agli altri due: l'orario di tale evento in questione è quello tra le 4 e le 6 di mattina.

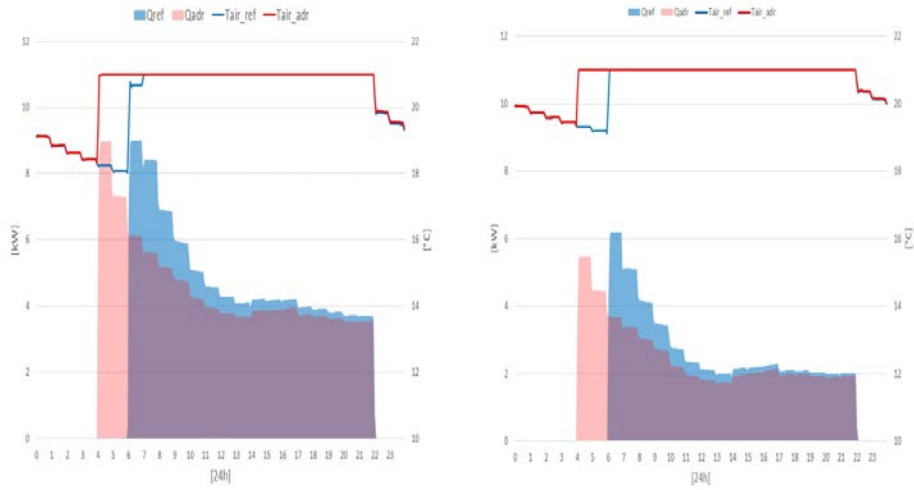
La causa del valore elevato degli indici di flessibilità per un orario di quel tipo, è da ricercarsi nella sua distanza temporale dall'orario di alto consumo, che per la schedule OC è situato tra le 6 e le 9 di mattina. Dunque, è localizzato nelle immediate vicinanze.

Quello che succede è che il surplus di calore immesso dalle 4 alle 6 viene immediatamente utilizzato durante tutte le ore successive fino alle 22 dall'edificio per calare i consumi che altrimenti si sarebbero avuti nella simulazione di riferimento. Non vi sono quindi "buchi" di orario dalle 6 fino alle 22 in cui non vi è richiesta e quindi il calore verrebbe disperso attraverso l'involucro.

Questa caratteristica di avere una tale richiesta continua per lunghe ore della giornata tende ad aumentare il rendimento per questa tipologia di eventi. Convenientemente, accade anche che l'orario selezionato sia localizzato alla fine del periodo notturno, dove l'edificio ha scaricato la maggior parte, se non tutto, il calore accumulato nella giornata precedente.

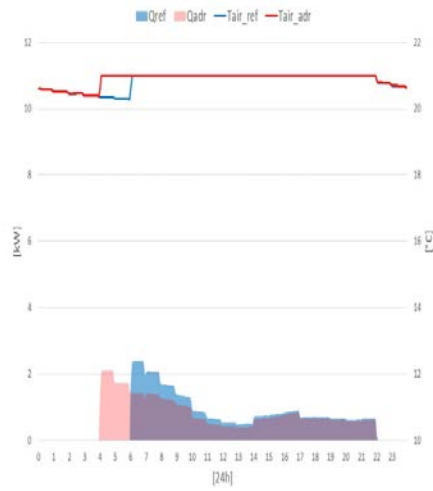
Al contrario, l'orario dalle 22 alle 24 sembrerebbe essere il peggiore di tutti quelli della upward modulation, con i rendimenti e i surplus di calore immessi più bassi di tutti. Questo perché in quelle ore l'edificio presenta una temperatura iniziale molto vicina ai 21 °C, di conseguenza, il calore immesso forzatamente dall'evento è relativamente basso dato si sta cercando di immettere forzatamente calore aggiuntivo alla fine del lungo periodo di carica iniziato alle 6 e finito alle 22. Non solo, ma la sua distanza temporale dalla zona di alto consumo delle 6 di mattina è la massima possibile. Si potrebbe definire questo evento un ritardo nello spegnimento serale forzato dell'impianto di riscaldamento. Dunque, gran parte del calore è disperso durante la notte e di fatto viene completamente sprecato ai fini della flessibilità energetica.

Nelle figure 4.12 e 4.13 sono mostrati degli esempi di eventi appena descritti.



(a) Edificio anni '70.

(b) Edificio anni '90.



(c) Edificio recente.

Fig. 4.12: Evento upward dalle 4 alle 6 a Febbraio, schedule OC, con potenza di ripresa.

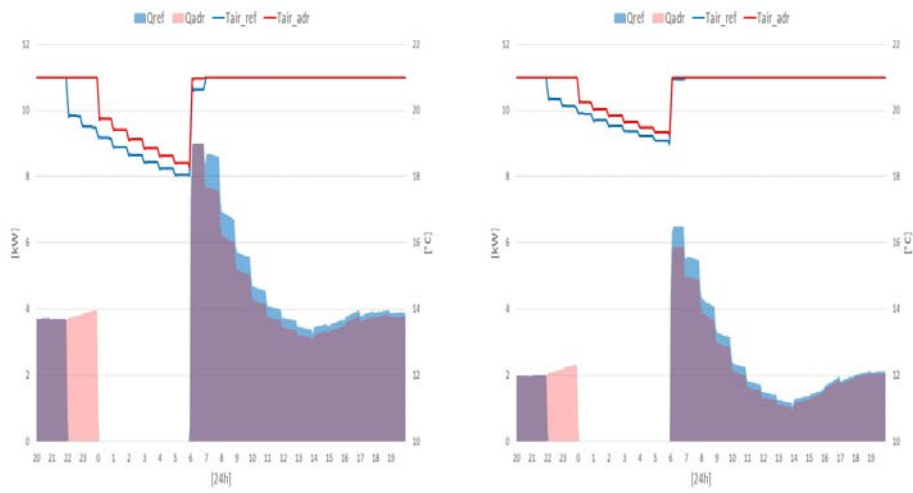
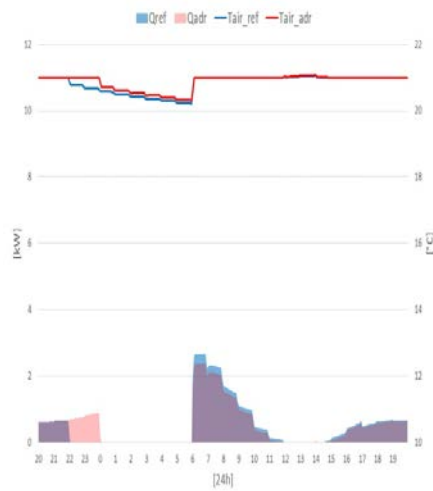
(a) *Edificio anni '70.*(b) *Edificio anni '90.*(c) *Edificio recente.*

Fig. 4.13: Evento upward dalle 22 alle 24 a Febbraio, schedule OC, con potenza di ripresa.

Un discorso simile può essere fatto anche nel caso di downward modulation: come in precedenza, un evento sembra essere il più performante tra gli altri due dall'osservazione delle Figure 4.8 e 4.9. L'orario corrispondente è quello dalle 8 alle 10 di mattina.

Il deficit di energia indotto in questo orario fa in modo che nelle ore immediatamente successive vi sia un aumento dei consumi nelle simulazioni dell'evento rispetto a quelle di riferimento. Per ottenere alti valori di C_{adr} , il Q_{adr} dovrebbe rimanere a zero per tutte le due ore di evento, mentre il Q_{ref} dovrebbe essere pari al valore massimo di energia che l'impianto riesce a immettere per due ore (quindi dovrebbe funzionare alla massima potenza per tutta la durata). Quest'ultimo orario si avvicina molto a queste condizioni, essendo molto vicino ai picchi di richiesta mattutina rilevabili tra le 6 e le 9.

Inoltre, è favorevole anche dal punto di vista del rendimento, dato che dalle 10 fino alle 22 vi è continua richiesta di potenza per mantenere la temperatura di 21 °C e possono essere indotti aumenti del consumo per tutto questo tempo. Di fatto, eseguendo una operazione esattamente contraria rispetto al caso upward.

Gli eventi 13-15 e 18-20 sono invece meno efficienti, a causa del più basso valore del Q_{ref} nelle ore pomeridiane e per la vicinanza temporale al setback notturno, dove l'induzione dei consumi notturni non può essere molto elevata dato che l'edificio si trova dal punto di vista termico quasi del tutto carico. Infatti, nelle ore successive agli eventi vicino al setback, i consumi aumentano ma in maniera molto più ridotta rispetto a quelli indotti nelle ore pomeridiane, dove la temperatura dell'aria interna, dopo essere stata diminuita forzatamente dall'evento, è costretta a ritornare ai 21 utilizzando più potenza da parte dell'impianto. Generalmente, nelle ore notturne, si possono indurre dei piccoli consumi, ma nelle ore mattutine di picco di richiesta non è più possibile effettuare flessibilità di questo tipo, dato che si sta già utilizzando la massima potenza disponibile dall'impianto. Un esempio di evento di questo tipo è mostrato in Figura 4.14.

Dunque, dalle ultime osservazioni si possono trarre queste prime conclusioni:

- Gli eventi upward più efficienti sono collocati nelle immediate vicinanze subito prima degli orari di alto consumo. Più si anticipano questi momenti di alto consumo e più gli indicatori peggiorano.

- Gli eventi downward più efficienti sono collocati nelle immediate vicinanze subito dopo gli orari di alto consumo. Più si ritardano questi momenti e più gli indicatori peggiorano.

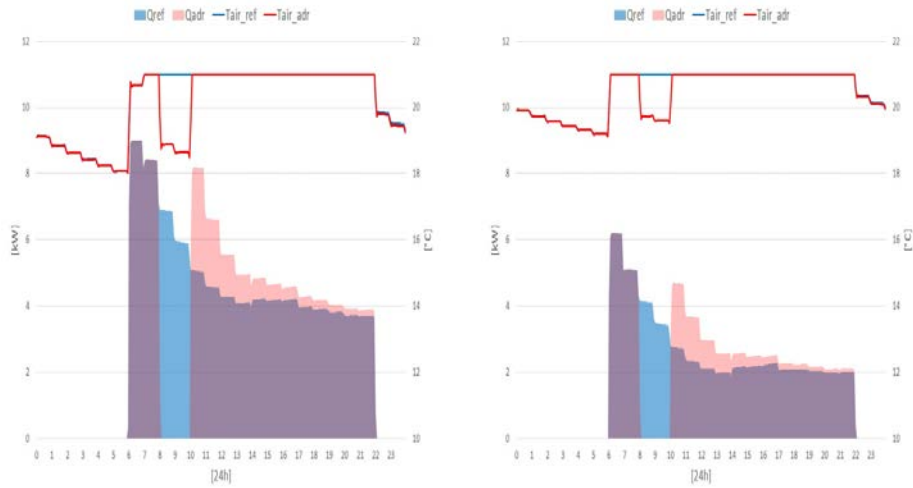
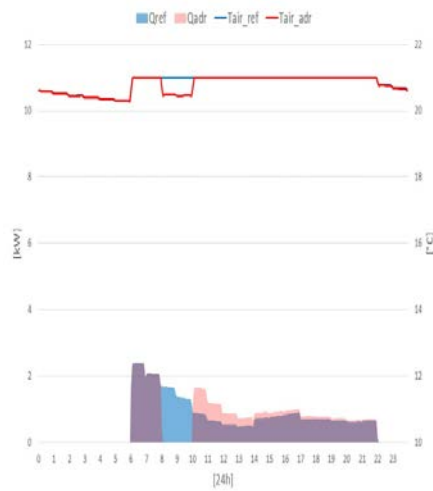
(a) *Edificio anni '70.*(b) *Edificio anni '90.*(c) *Edificio recente.*

Fig. 4.14: Evento downward dalle 8 alle 10 a Febbraio, schedule OC, con potenza di ripresa.

4.2.2 L'influenza della potenza di progetto

Il secondo fattore importante da considerare per la flessibilità è la potenza di progetto dell'impianto. Non soltanto modifica il C_{adr} come ovvia conseguenza di avere potenze minori, ma può influenzare anche il rendimento di alcuni eventi.

In Figura 4.10 e 4.11 sono mostrati i risultati per la schedule OC degli indici con la potenza di impianto più bassa descritta nel capitolo dei Metodi.

Iniziando dall'edificio BN, non vi sono apparentemente cambiamenti sull'andamento dei risultati sugli indici, a parte un leggero calo sul rendimento e sui C_{adr} nei mesi invernali.

Nel B90, come in precedenza, calano tutti i valori di C_{adr} , ma insieme a questo cambiamento, vi è anche una diminuzione più accentuata del rendimento di tutti nei mesi più freddi dell'anno: ad esempio, nel caso con potenza di ripresa a Gennaio si aveva un rendimento medio di circa il 90%, mentre nel caso con potenza limitata si ha invece un'efficienza di circa l'82% considerando gli eventi upward 4-6.

Per il B70 tale diminuzione è ancora più marcata: sempre nel caso upward 4-6 a Gennaio si passa da rendimenti del 90% a valori del 75% nello stesso mese.

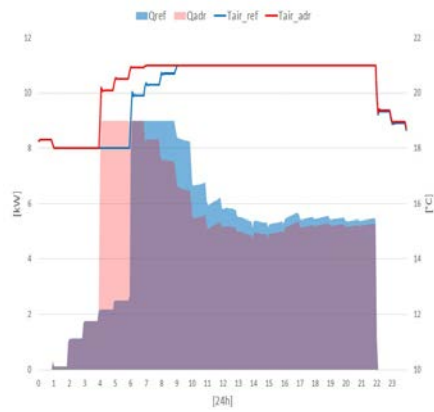
Per capire il motivo di tutto ciò, si osservano gli esempi in Figura 4.15, che considerano l'evento 4-6 a Gennaio per il caso con e senza potenza di ripresa.

La potenza più bassa fa sì che il sistema raggiunga la temperatura di setpoint di 21 °C molto più lentamente rispetto al caso con la potenza di ripresa. Questo provoca che vi siano ore in cui l'impianto deve necessariamente lavorare al massimo della sua potenza e che non vi sia possibilità di ridurre i consumi dopo l'evento. Inoltre, anche dopo che si raggiunge il setpoint, la differenza tra i consumi delle simulazioni evento-riferimento sono comunque limitate.

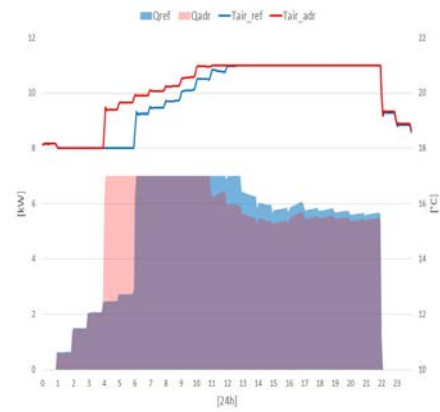
Un ulteriore peggioramento è dato dal fatto che proprio nell'orario dalle 4 alle 6 vi possa essere un ulteriore peggioramento del C_{adr} dovuto al Q_{ref} maggiore di zero, quindi a un consumo di energia per mantenere la temperatura di 18 °C in quelle ore tipiche dei mesi più rigidi dell'anno. Dunque, il C_{adr} diminuisce drasticamente di valore, il surplus di energia immessa diminuisce, il calore immesso non viene utilizzato a scopi di flessibilità immediatamente e la porzione relativa di perdite attraverso l'involucro aumenta, facendo diminuire il rendimento.

L'effetto appena spiegato tende a essere molto più incidente se si applica flessibilità in mesi invernali rigidi come Gennaio e Dicembre e per edifici con isolamento

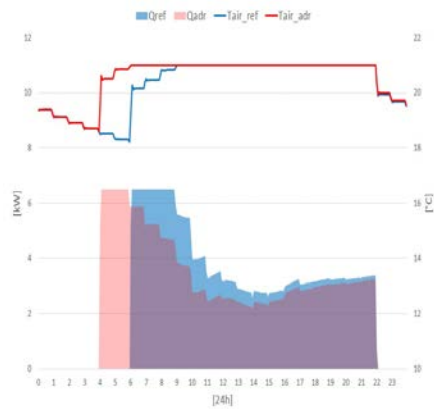
limitato. Questo spiega il perché C_{adr} dell'evento upward 0-2 sia più elevato di quello dell'evento 4-6 nei mesi di Gennaio per edifici BN e B90 senza potenza di ripresa. Da notare poi, che il rendimento di tale evento è anche più grande nel caso di Gennaio nel B70 con potenza limitata. La figura 4.16 mostra il motivo di tale comportamento. Esso è dovuto ai consumi notturni che, essendo relativamente elevati per le temperature esterne rigide e per il basso isolamento, possono essere ridotti per scopi di flessibilità.



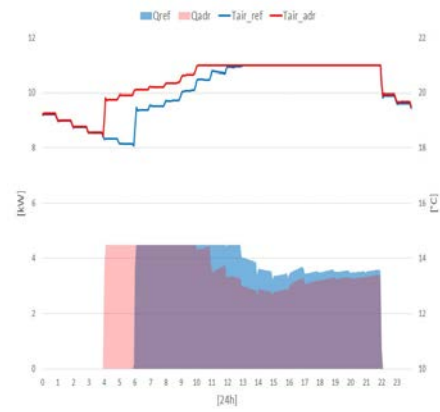
(a) Edificio anni '70
Con potenza di ripresa.



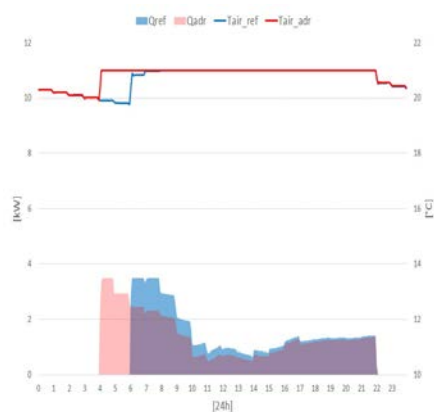
(b) Edificio anni '70
Senza potenza di ripresa.



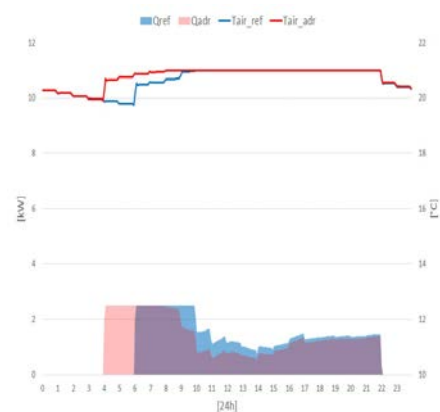
(c) Edificio anni '90
Con potenza di ripresa.



(d) Edificio anni '90
Senza potenza di ripresa.



(e) Edificio recente
Con potenza di ripresa.



(f) Edificio recente
Senza potenza di ripresa.

Fig. 4.15: Confronto tra gli eventi upward 4-6 a Gennaio, schedule OC per diverse potenze.

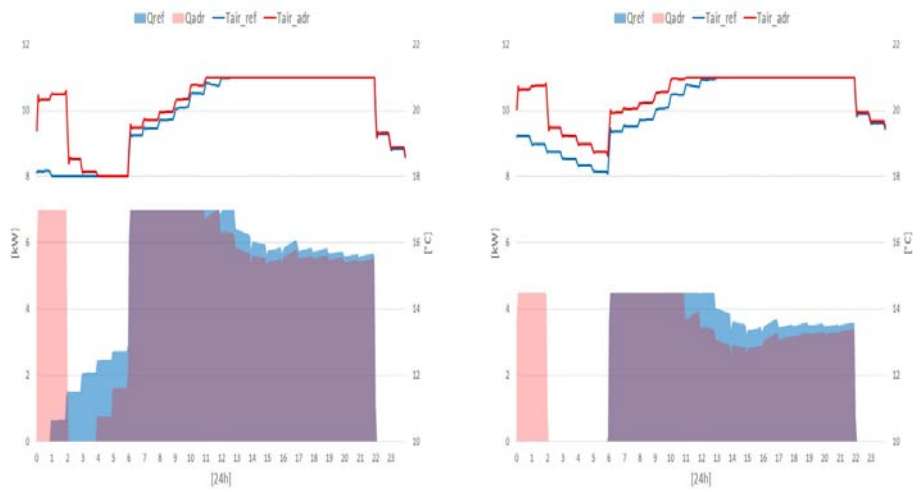
(a) *Edificio anni '70.*(b) *Edificio anni '90.*(c) *Edificio recente.*

Fig. 4.16: Evento upward da mezzanotte alle 2 a Gennaio, schedule OC, senza potenza di ripresa.

L'influenza del limite sulla potenza incide in modo analogo anche nel caso di downward modulation. Non solo il C_{adr} ne è influenzato, ma lo è anche η_{adr} , specialmente per edifici datati e nei mesi invernali.

I grafici in Figura 4.10 e 4.11 mostrano i risultati sia con sia senza potenza di ripresa anche per questi ultimi casi.

Come per l'upward, i cambiamenti nell'andamento degli indici al variare dei mesi iniziano a diventare sempre più marcati andando in edifici con isolamento sempre più limitato e nei mesi più freddi. Nel caso di Gennaio per il B90 e per il B70, l'evento 8-10 cala circa del 10% il suo valore di η_{adr} passando a una potenza minore di progetto.

Gli esempi di figura 4.17 permettono di chiarire il perché di tutto ciò.

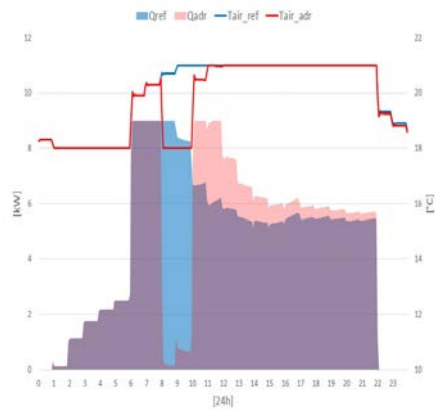
Per gli edifici BN, la differenza è praticamente nulla poiché le potenze spese per mantenere le temperature di setpoint sono minori di 2.5 kW che è la potenza di progetto senza considerare la porzione di ripresa.

Per quanto riguarda B90, considerando la potenza più piccola, l'edificio raggiunge i 21 °C di setpoint alle 16 del pomeriggio circa e fino alle 13 la differenza tra i consumi delle simulazioni riferimento-evento sono nulle. Oltre a questo, la differenza tra le domande di energia nel pomeriggio e alla sera tra le simulazioni sono relativamente basse e non permettono di ottenere in proporzione gli stessi aumenti dei consumi che si hanno invece nel caso con potenza di ripresa. Da notare che non si raggiungono mai completamente i 18 °C in questi eventi a causa dell'isolamento che tiene la temperatura a valori superiori per le due ore di evento.

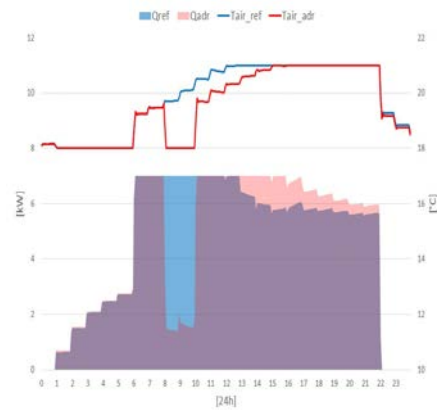
Infine, per il B70, si ha una situazione analoga al B90, ma con l'aggiunta che si raggiungono in tempi brevissimi i 18 °C durante l'evento e l'impianto è costretto ad accendersi per queste due ore per mantenerli, andando ad aumentare il Q_{adr} e diminuendo (in valore assoluto) di conseguenza C_{adr} . La porzione di Q_{adr} nell'evento nel caso senza potenza di ripresa è anche più grande per colpa della temperatura dell'aria interna minore a inizio evento che costringe a spendere più potenza per mantenere i 18 °C.

Ovviamente, anche per questo tipo di edificio, le differenze dei consumi indotte nel pomeriggio sono molto limitate a causa dalle alte potenze usate già nella simulazione di riferimento in proporzione alla potenza massima utilizzata, andando quindi a diminuire il rendimento.

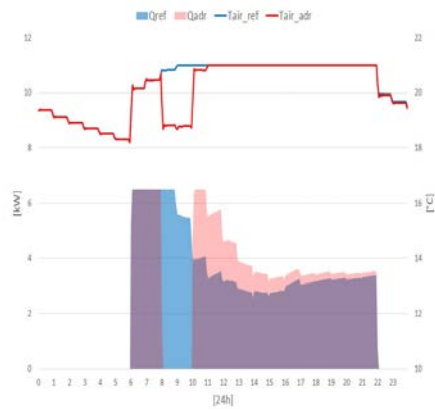
Per edifici B70 a Gennaio, in downward modulation risulta più efficiente l'evento 13-15. Un esempio di quest'ultimo è mostrato in figura 4.18.



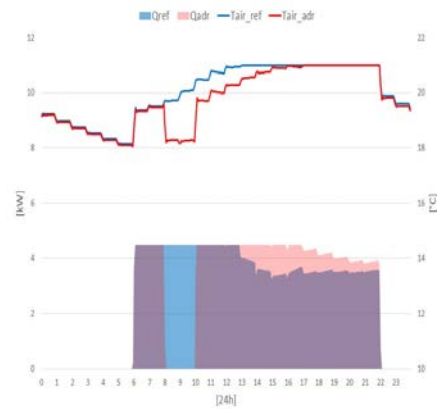
(a) Edificio anni '70
Con potenza di ripresa.



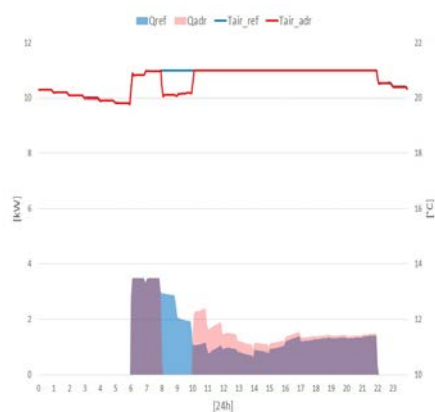
(b) Edificio anni '70
Senza potenza di ripresa.



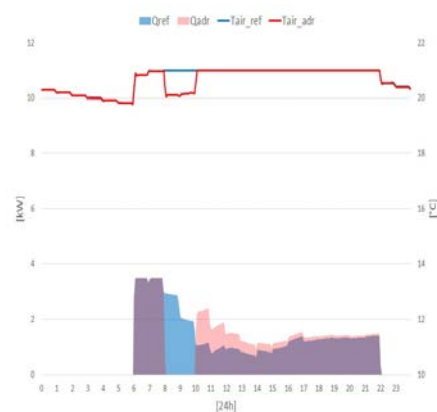
(c) Edificio anni '90
Con potenza di ripresa.



(d) Edificio anni '90
Senza potenza di ripresa.

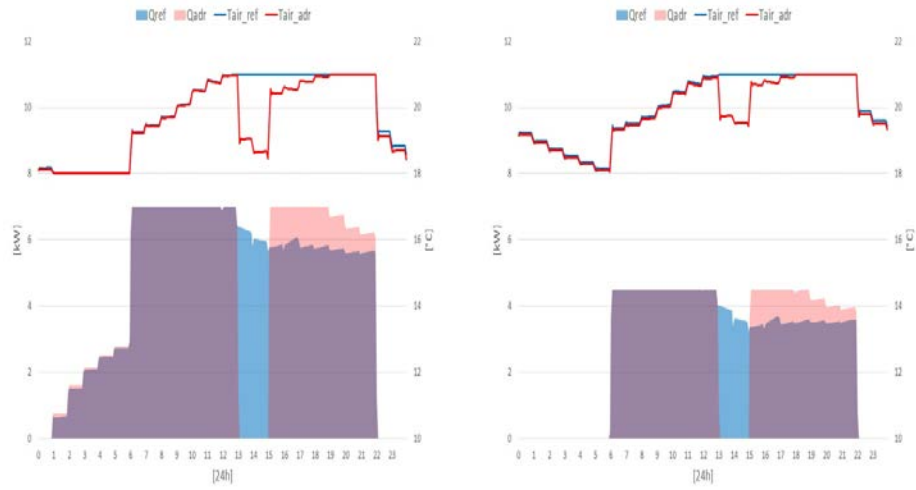


(e) Edificio recente
Con potenza di ripresa.



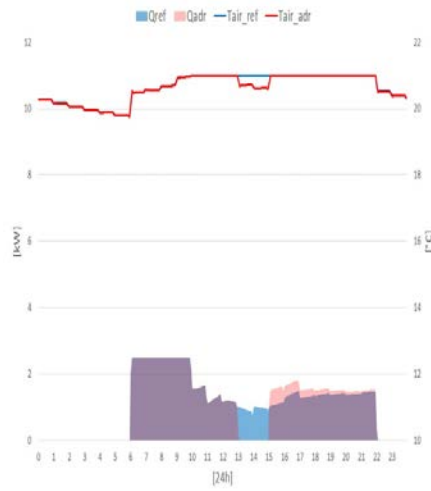
(f) Edificio recente
Senza potenza di ripresa.

Fig. 4.17: Confronto tra gli eventi downward 8-10 a Gennaio, schedule OC per diverse potenze.



(a) Edificio anni '70.

(b) Edificio anni '90.



(c) Edificio recente.

Fig. 4.18: Evento downward dalle 13 alle 15 a Gennaio, schedule OC, senza potenza di ripresa.

4.3 L'effetto delle diverse abitudini dell'utenza

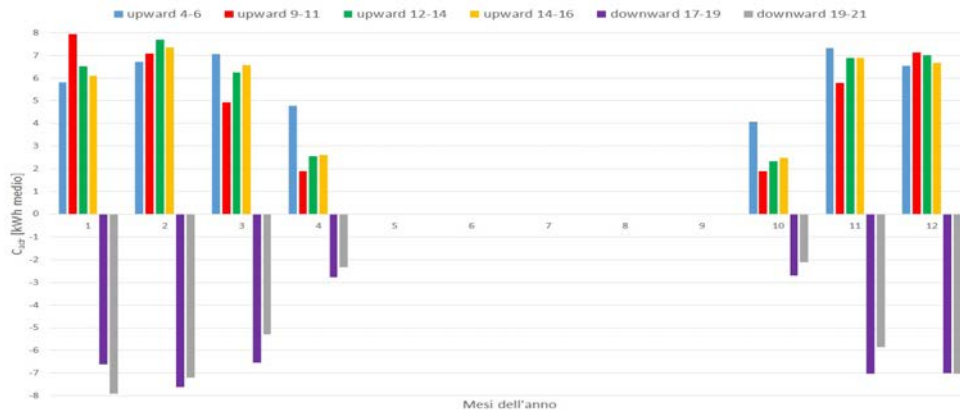
In questa sezione verranno introdotte le conclusioni della schedule FAM, sia con sia senza potenza di ripresa.

Tale schedule presenta lunghi periodi in cui la temperatura viene portata a 18 °C, precisamente uno alla notte dalle 22 alle 6 e uno verso il pomeriggio dalle 9 alle 16. Questo significa che vi è molta discontinuità nel mantenimento delle temperature.

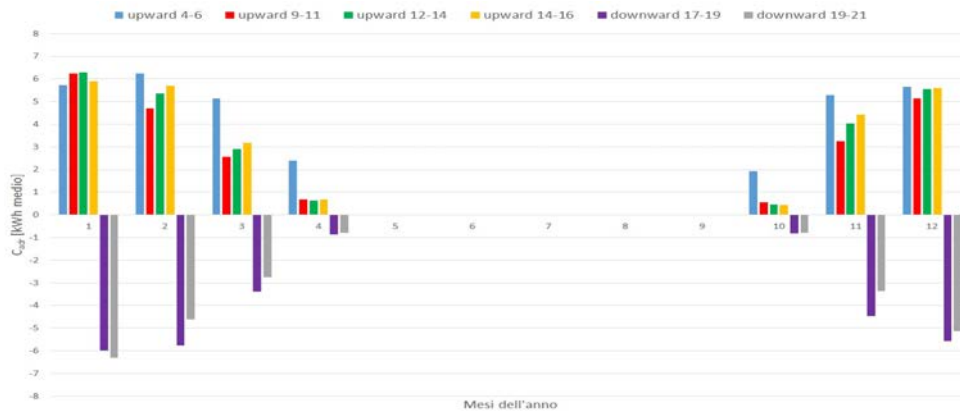
A causa anche di questa discontinuità, gli eventi che diminuiscono la temperatura di setpoint sono solo due, mentre quelli upward modulation sono ben quattro. Questo perché non sarebbe stato opportuno collocare eventi che portano la temperatura a 18 °C la mattina durante le tre ore di occupazione dalle 6 alle 9.

Come è stato fatto per la precedente schedule, vengono mostrati nelle prossime pagine i grafici per gli andamenti degli indicatori al variare dei mesi e del tipo di edificio per ogni evento utilizzato.

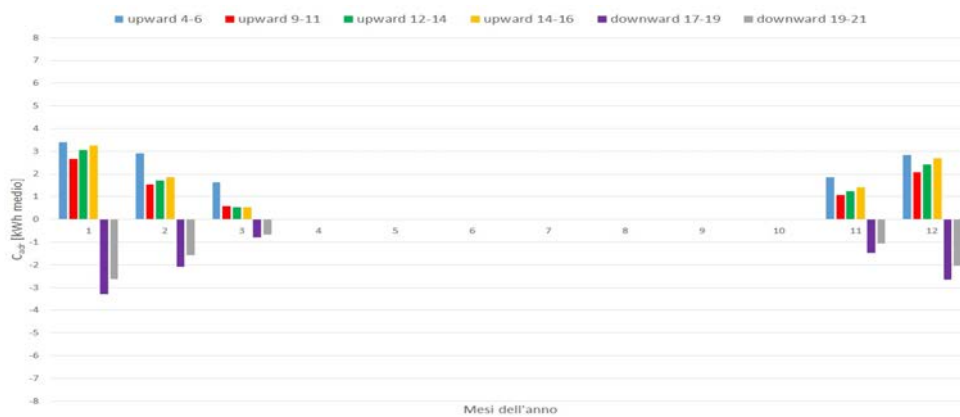
Le regole generali della programmazione temporale e della limitazione di potenza valgono anche per questo tipo di schedule, ma il setback pomeridiano modifica le conclusioni che si trarrebbero sulla selezione degli eventi più efficienti. Tale momento della giornata, infatti, rappresenta una dispersione aggiuntiva di potenziali surplus che lo anticipano. Inoltre, osservando i cambiamenti della temperatura di setpoint, si vengono a definire due momenti di alto consumo energetico nel corso della giornata, in cui l'impianto utilizza potenze vicine alla massima possibile per effettuare il salto di temperatura dalle 18 alle 21.



(a) Edificio anni '70.

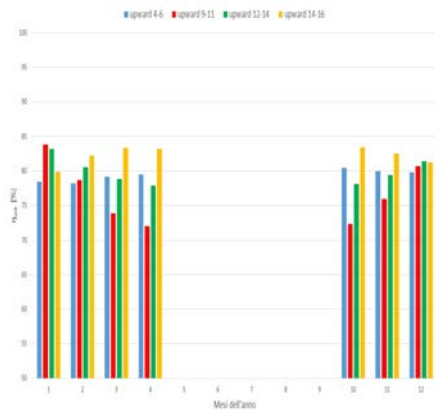


(b) Edificio anni '90.

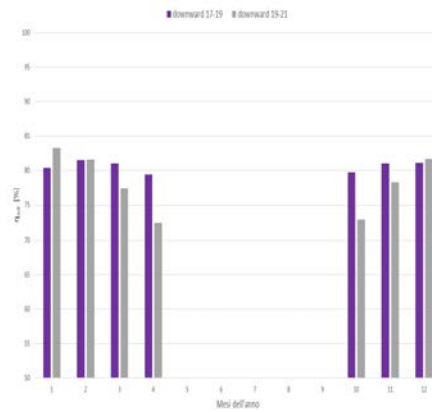


(c) Edificio recente.

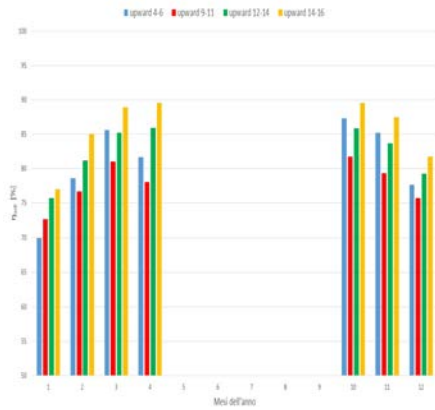
Fig. 4.19: Risultati mensili di C_{adr} per la schedule FAM con potenza di ripresa.



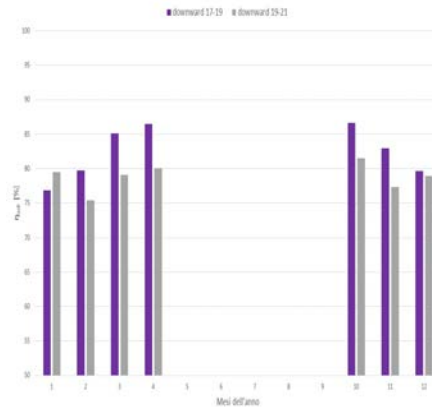
(a) *Upward modulation*
Edificio anni '70.



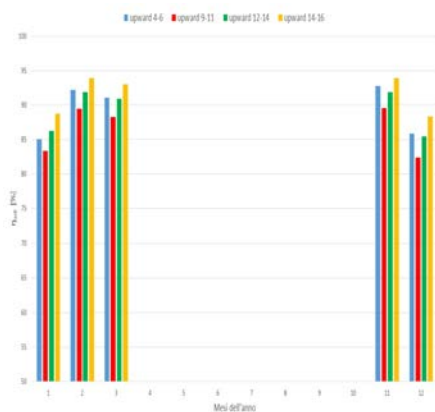
(b) *Downward modulation*
Edificio anni '70.



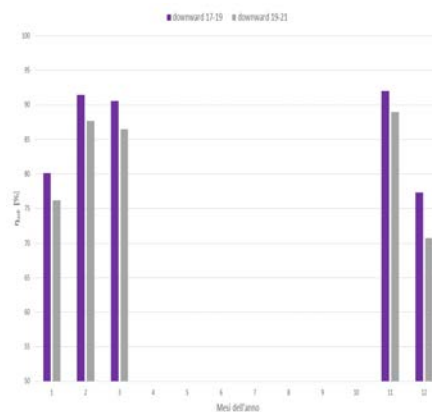
(c) *Upward modulation*
Edificio anni '90.



(d) *Downward modulation*
Edificio anni '90.

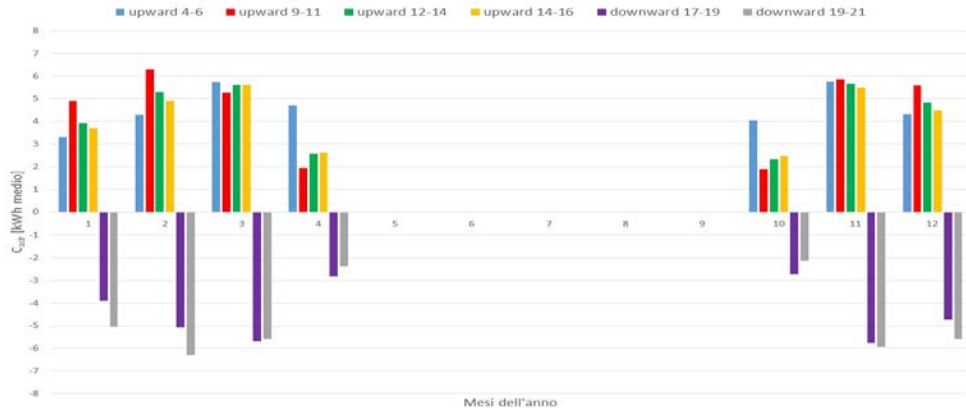


(e) *Upward modulation*
Edificio recente.

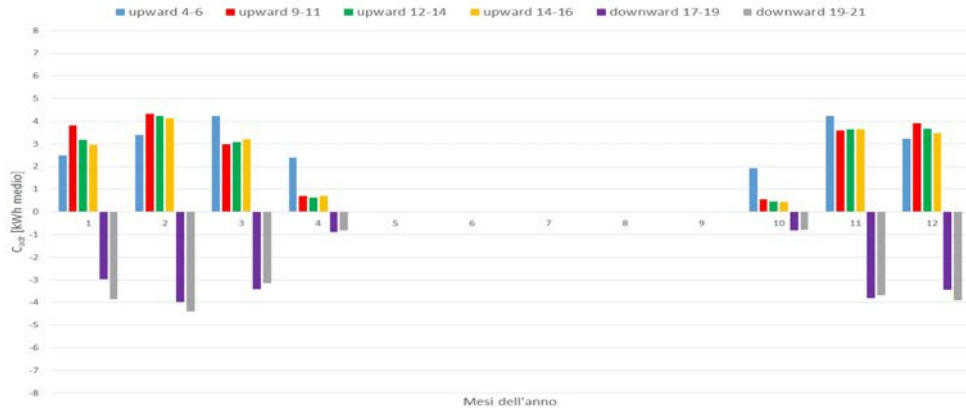


(f) *Downward modulation*
Edificio recente.

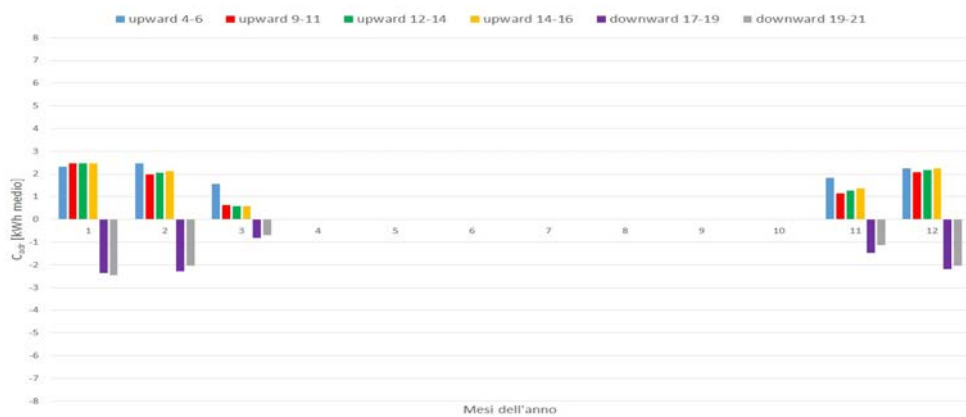
Fig. 4.20: Risultati mensili di η_{adr} per la schedule FAM con potenza di ripresa.



(a) Edificio anni '70.

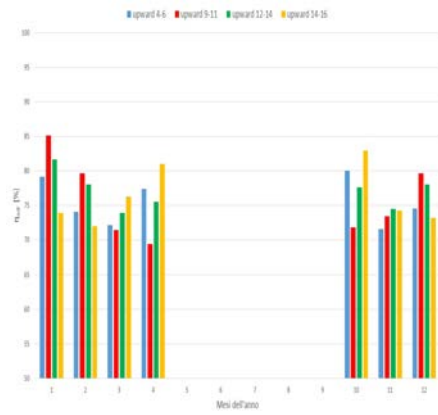


(b) Edificio anni '90.

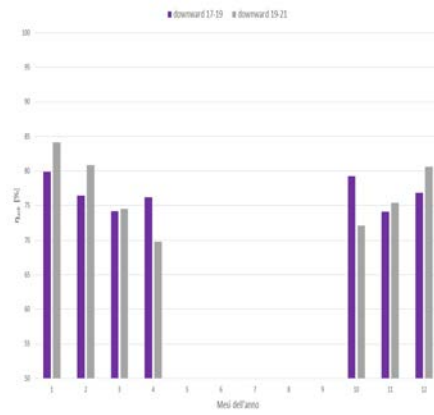


(c) Edificio recente.

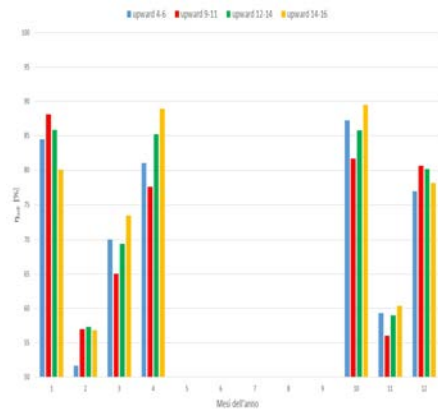
Fig. 4.21: Risultati mensili di C_{adr} per la schedule FAM senza potenza di ripresa.



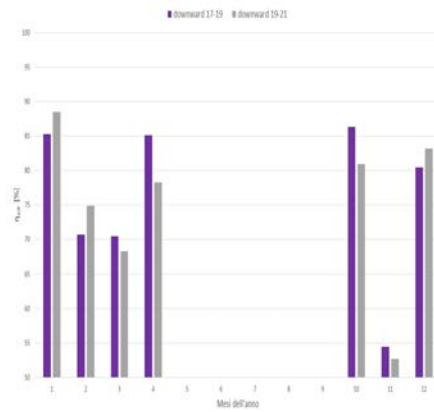
(a) *Upward modulation*
Edificio anni '70.



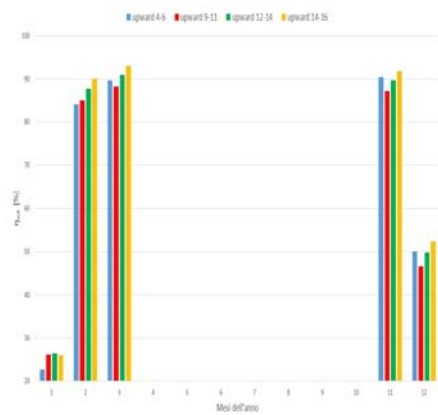
(b) *Downward modulation*
Edificio anni '70.



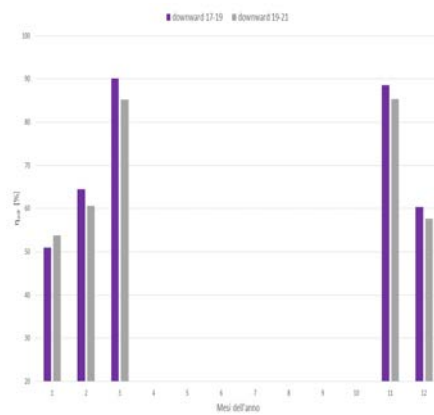
(c) *Upward modulation*
Edificio anni '90.



(d) *Downward modulation*
Edificio anni '90.



(e) *Upward modulation*
Edificio recente.



(f) *Downward modulation*
Edificio recente.

Fig. 4.22: Risultati mensili di η_{adr} per la schedule FAM senza potenza di ripresa.

In Figura 4.24 sono mostrati i casi di due eventi che aumentano la temperatura di setpoint dalle 4 alle 6 in due diversi mesi per la schedule FAM e includendo la potenza di ripresa. I mesi in questione sono Gennaio e Marzo.

Per l'edificio BN, i consumi a Marzo sono estremamente bassi, tanto che la temperatura interna non scende mai sotto i 20 °C. Le efficienze sono ovviamente molto alte poiché la piccola quantità di calore aggiuntiva immessa è immediatamente compensata da risparmi nelle ore successivi fino alle 9 e in piccola parte anche dopo le 16. Nel caso di Gennaio, la temperatura interna può raggiungere valori vicini ai 19-19.5 °C alla fine del periodo notturno. Questo fa sì che la potenza utilizzata durante le ore di evento sia molto elevata e spesso sia la massima possibile per tutte le due ore (in Figura 4.19c si hanno circa 3.5 kWh medi di evento che è il valore massimo). Dunque, rispetto al caso OC di figura 4.15e, in cui solo nella prima ora circa di utilizzava la massima potenza dell'impianto, nella schedule FAM si hanno potenze in gioco vicine a quelle di progetto anche in edifici recenti. Questo a causa principalmente delle abitudini degli utenti nell'edificio, che rendono la temperatura di setpoint più discontinua rispetto a quella OC. Inoltre, il Q_{ref} è in quasi tutti i giorni nullo per le ore di evento di questo tipo.

Per l'edificio B90, le osservazioni tratte per il BN sono applicabili anche in questo caso, ma la diminuzione dell'isolamento e l'intermittenza della schedule provocano l'aumento dei consumi notturni, specialmente durante l'evento 4-6 a Gennaio, che vede il suo C_{adr} calare per questo tipo di edificio. Tutto questo provoca che gli eventi upward nelle ore successive abbiano un maggior valore di tale indicatore a causa del Q_{ref} nullo durante il setback pomeridiano e la possibilità di utilizzare comunque potenze elevate durante queste ore di Gennaio. Specialmente in questo mese, hanno anche η_{adr} in genere più elevato a causa della loro maggior vicinanza temporale all'orario di alta richiesta delle 16, mentre, andando verso i mesi di metà stagione, l'orario 4-6 aumenta gradualmente la sua efficienza per le maggiori temperature esterne che permettono di spostare i picchi mattutini e anche, leggermente, i consumi pomeridiani dopo le 16.

Per B70, il contributo negativo di Q_{ref} notturno aumenta a Gennaio e Febbraio, traducendosi in maggiori consumi durante il setback pomeridiano per mantenere la temperatura di 18 °C.

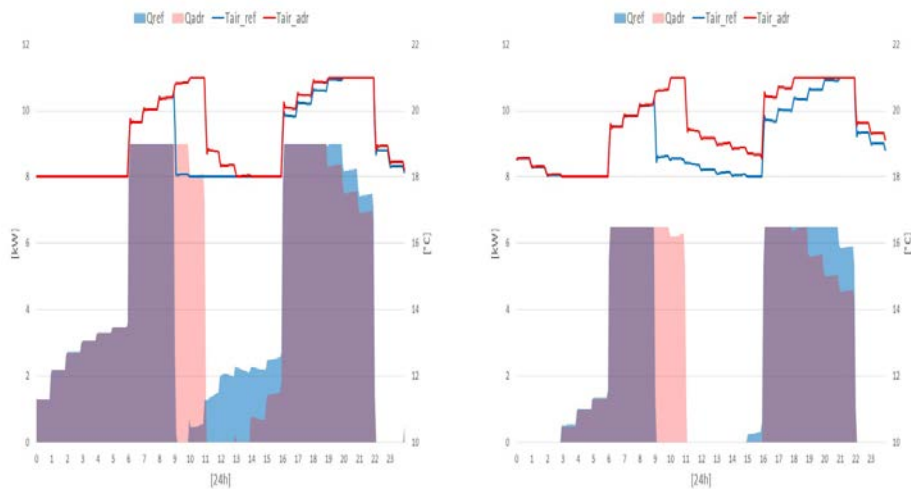
A Gennaio, l'orario 9-11 è il più efficiente in ogni indicatore di flessibilità poiché permette di spostare i consumi durante i setback pomeridiani di tale edificio e di lavorare con potenze elevate durante l'evento, in quanto la temperatura interna non riesce a raggiungere completamente i 21 °C alle 9 di mattina. Un confronto tra eventi 4-6 di questo mese con quelli di Gennaio è mostrato in Figura 4.24. Gli orari successivi alle 11 presentano Q_{ref} di valore più elevato durante gli orari di immissione forzata, dunque C_{adr} tende a calare. Inoltre anche η_{adr} tenderebbe a decrescere per eventi successivi alle 9 dato che l'edificio deve utilizzare potenze relativamente molto alte per portare la temperatura interna dai 18 ai 21 °C dopo le 16. Un esempio di evento upward 9-11 è visibile in Figura 4.23, dove in 4.23a è possibile osservare lo spostamento dei consumi pomeridiani nel B70 spiegato prima.

Dunque, la regola di η_{adr} che aumenta dai mesi invernali verso le mezze stagioni non è sempre valida, specialmente per edifici con isolamento limitato e nei mesi invernali, dove l'andamento può essere esattamente il contrario come nei casi upward 9-11 e 12-14 in Figura 4.20a. Anche per il C_{adr} vi sono eventi che non seguono la regola generale e sembrano crescere verso le mezze stagioni invece che diminuire, come mostrato nei 4-6 di Figura 4.19a.

Ma, non appena si passa ad edifici isolati o si considerano solo le mezze stagioni in cui la temperatura esterna limita le perdite verso l'esterno, le considerazioni tratte nel capitolo della programmazione degli eventi rimangono valide, andando ad incentivare l'efficienza degli indicatori di eventi upward 4-6 e 14-16, situati temporalmente subito prima degli orari di alto consumo. La differenza tra il 4-6 e il 14-16 nelle mezze stagioni è che l'energia immessa durante l'evento mattutino è maggiore rispetto all'altro caso, in cui vi è una temperatura esterna relativamente più alta e una minore possibilità di immettere grandi potenze (a meno che non si vada sopra il setpoint di 21 °C), ma nell'evento pomeridiano si hanno rendimenti più grandi a causa del lungo periodo di grande consumo energetico dopo le 16 rispetto a quello più breve la mattina.

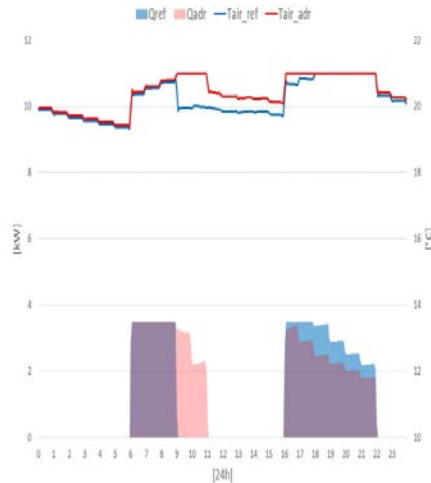
Nella Figura 4.25 vengono mostrati i casi 9-11 e 14-16 a Marzo per dimostrare come nelle mezze stagioni valga la regola generale enunciata in precedenza nella programmazione degli eventi. L'orario 9-11 si dimostra dunque, in queste condizioni, il meno efficiente data la sua distanza dalla zona di alto consumo delle 16.

Il caso downward segue, invece, le stesse considerazioni fatte per la schedule OC: l'orario 17-19 che è quello più vicino alle 16, è sempre il più efficiente per entrambi gli indici se lo si considera per edifici nuovi e/o nelle mezze stagioni. Nel momento in cui si analizza un edificio con isolamento limitato e verso il pieno inverno, il 19-21 diventa più performante a causa delle temperature dell'aria interna più alte a inizio evento e per la possibilità di aumentare i consumi notturni in modo più marcato rispetto a edifici più isolati.



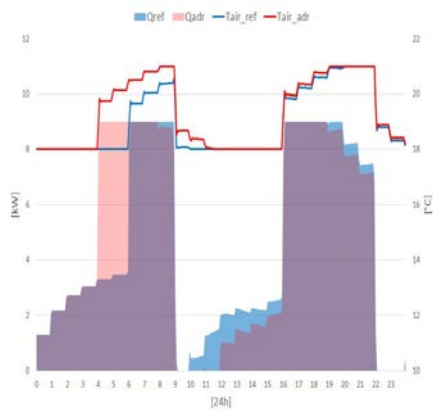
(a) Edificio anni '70.

(b) Edificio anni '90.

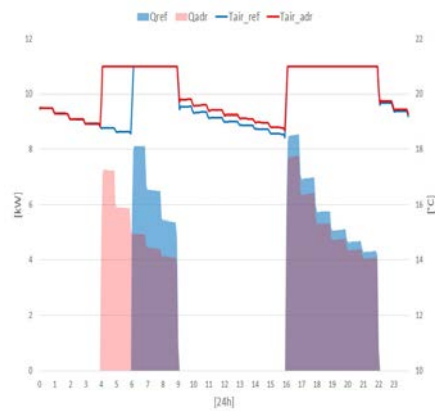


(c) Edificio recente.

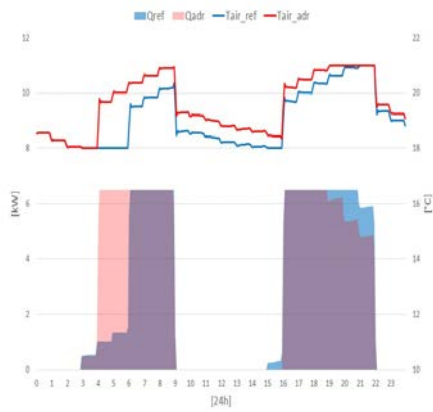
Fig. 4.23: Evento upward dalle 9 alle 11 a Gennaio, schedule FAM, con potenza di ripresa.



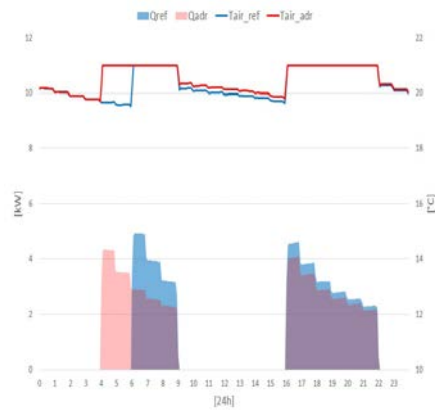
(a) Edificio anni '70 a Gennaio.



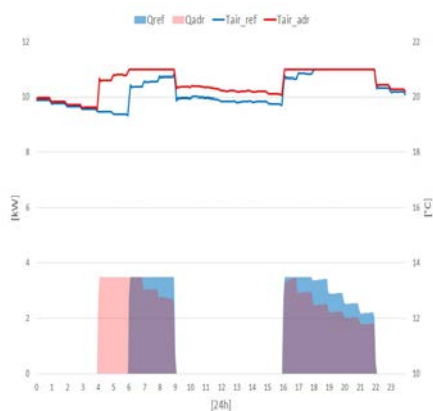
(b) Edificio anni '70 a Marzo.



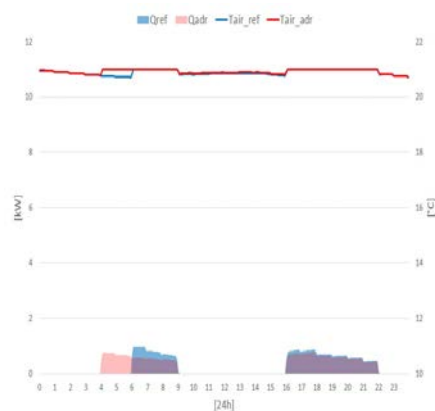
(c) Edificio anni '90 a Gennaio.



(d) Edificio anni '90 a Marzo.



(e) Edificio recente a Gennaio.



(f) Edificio recente a Marzo.

Fig. 4.24: Confronto tra gli eventi upward 4-6 in due diversi mesi, schedule FAM, con potenza di ripresa.

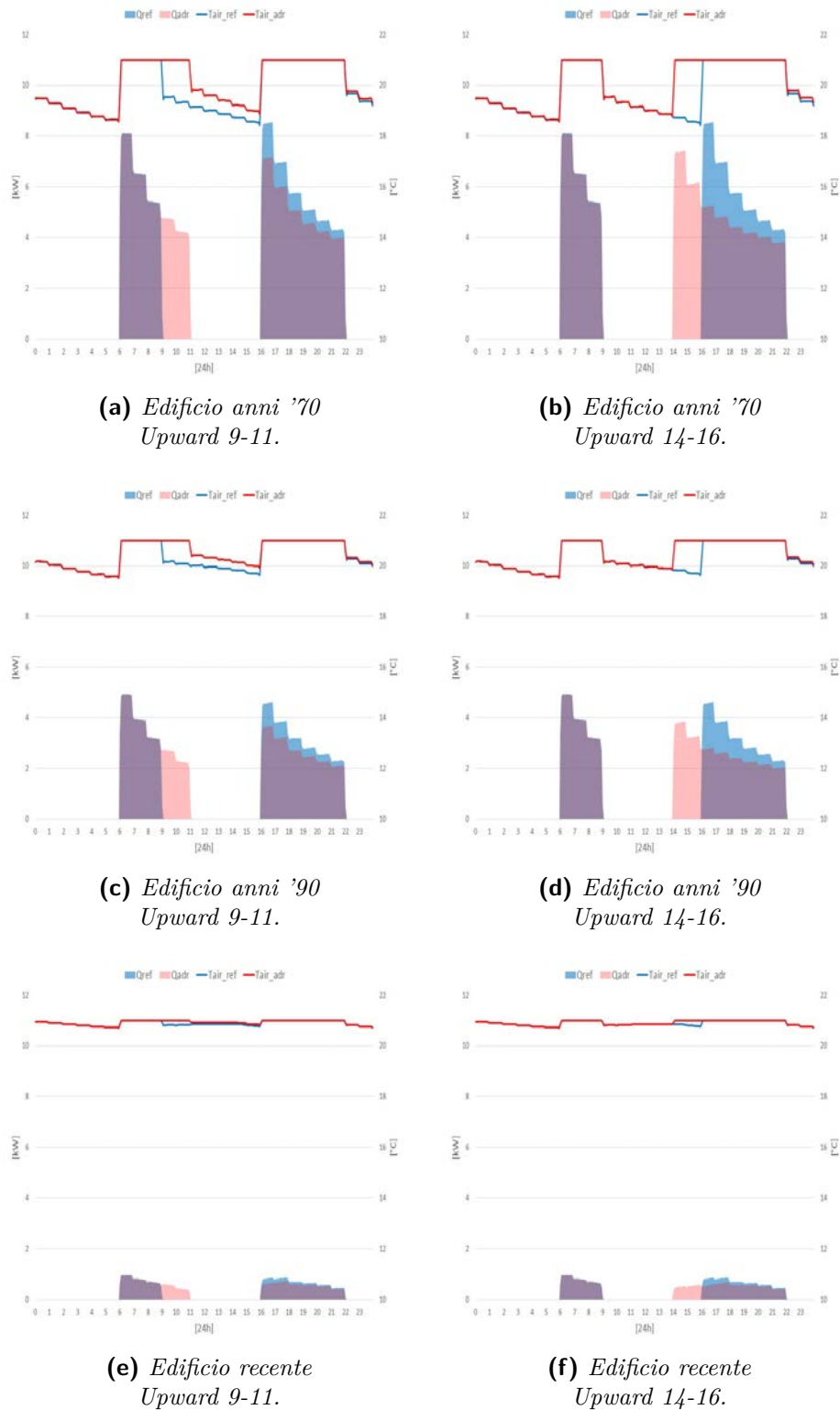


Fig. 4.25: Confronto tra gli eventi upward 9-11 e 14-16, schedule FAM, con potenza di ripresa.

Nei casi in cui la potenza è minore e non si considera il contributo di ripresa, ciò che risulta è illustrato in Figura 4.21 e 4.21.

Si può notare come il limite sulla potenza, per questa schedule, cambia radicalmente i risultati ottenuti sugli indicatori di flessibilità: i più evidenti tra tutti sono i bruschi cali di rendimento che si hanno a Febbraio nel B90 e a Gennaio nel BN. Per comprendere il motivo di tutto ciò, vengono fatti gli esempi di Figura 4.26.

Nel BN, per potenze di progetto così basse e per schedule così intermittenti, la temperatura interna non riesce a rimanere a valori elevati nel mese di Gennaio. Nell'esempio 4.26a non arriva nemmeno a 20 °C. Inoltre, si può osservare la comparsa di consumi nel caso di riferimento alla fine dei periodi notturni, quando al temperatura riesce a calare fino ai 18 °C.

In generale, la domanda di energia in questo mese è molto alta, tanto che la potenza impiegata per quasi tutto il mese è pari alla massima di progetto per tutti i periodi di occupazione. Tutto ciò comporta che C_{adr} , specialmente per l'evento 4-6 in cui Q_{ref} è maggiore di zero, subisca un netto calo rispetto al caso con potenza di ripresa e i rendimenti diventino estremamente bassi, poiché non vi sono possibilità di ridurre i consumi nelle ore di occupazione. Nel momento in cui si considera il mese di Febbraio, gli indici migliorano per le temperature esterne più alte e la possibilità di mantenere quelle interne a valori molto più alti, consentendo di poter spostare i consumi nelle ore con setpoint di 21 °C.

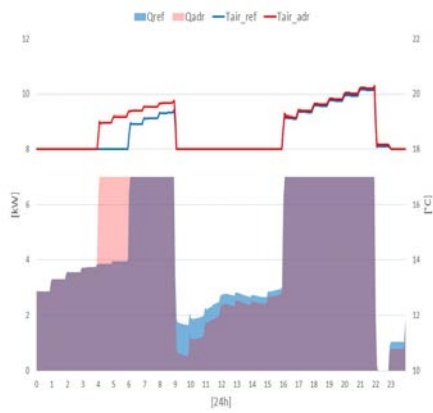
Nel caso di edificio B90 a Gennaio, i consumi notturni aumentano drasticamente e il Q_{ref} dalle 4 alle 6 diventa di valore relativamente alto. Infatti, proprio come negli altri tipi di edificio, il C_{adr} per gli eventi in quelle ore sono i più bassi di tutti. Il rendimento però, non cala bruscamente come accadeva per il BN, poiché nelle ore pomeridiane di setpoint a 18 °C vi sono delle richieste di energia che possono essere abbassate. Sono proprio queste ultime che permettono al rendimento di non calare ai livelli di quello dell'edificio recente.

Quando si passa però nel mese di Febbraio, i consumi pomeridiani non sono più presenti a causa delle temperature esterne più alte e inoltre, le potenze richieste durante le ore di occupazione sono comunque vicine a quelle della potenza massima dell'impianto, a causa del più lento raggiungimento a regime della temperatura interna quando il setpoint è a 21 °C. Tutto ciò comporta che i surplus immessi di energia non vengono utilizzati per scopi di flessibilità e lentamente

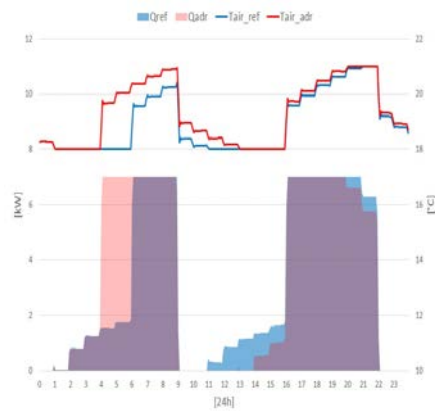
l'energia viene persa attraverso l'involucro.

Infine, nel BN valgono ancora tutte le considerazioni fatte per il B90, ma l'isolamento ridotto permette di avere consumi pomeridiano durante i 18 °C di setpoint anche nel mese di Febbraio, permettendo così di non avere grossi cali di efficienza. Rispetto agli altri tipi di edificio però, si possono osservare nella figura 4.22a dei rendimenti decrescenti verso le metà stagioni (ad eccezione di Aprile e Ottobre). Questo perché, ancora una volta, la temperatura interna raggiunge i 21 °C molto lentamente e i consumi pomeridiani diminuiscono andando verso le mezze stagioni, comportando sempre minori possibilità di ridurre i consumi dopo le ore di evento. L'unico che invece aumenta di valore a Marzo è all'orario dalle 14 alle 16, che è l'evento temporalmente più vicino alle 16.

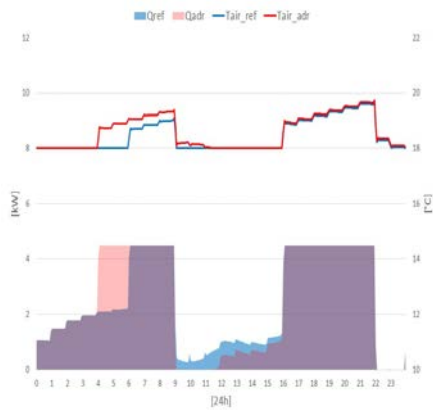
Per quanto riguarda gli eventi downward, il loro andamento nelle Figure 4.21 e 4.22 è interpretabile dalle ultime conclusioni tratte: l'evento 19-21 risulta più efficiente in entrambi gli indicatori di flessibilità nel momento in cui è possibile aumentare in modo importante i consumi notturni dopo le sue ore di azione. Per potenze così basse, tale condizione è realizzata per molti più mesi rispetto ai casi con potenza di ripresa.



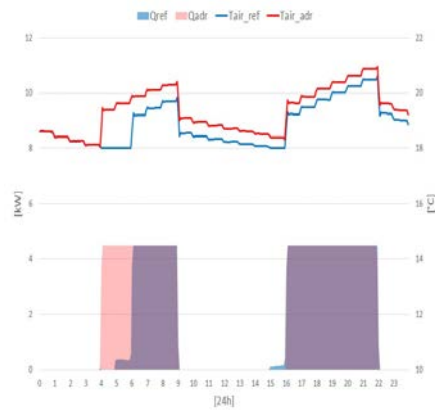
(a) Edificio anni '70 a Gennaio.



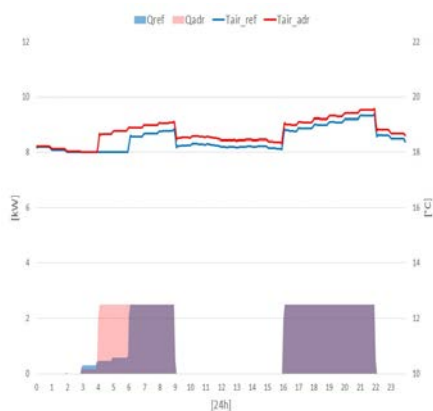
(b) Edificio anni '70 a Febbraio.



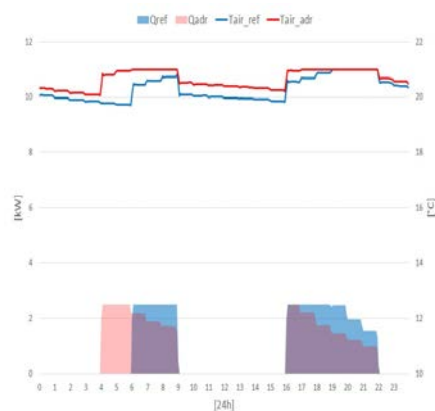
(c) Edificio anni '90 a Gennaio.



(d) Edificio anni '90 a Febbraio.



(e) Edificio recente a Gennaio.



(f) Edificio recente a Febbraio.

Fig. 4.26: Confronto tra gli eventi upward 4-6 in due diversi mesi, schedule FAM, senza potenza di ripresa.

4.4 Gli eventi nella stagione di raffrescamento

Nelle figure 4.28 e 4.27 vengono mostrati i risultati degli eventi estivi da Maggio a Settembre di ogni evento riassunto nella tabella 3.8.

Nel BN l'energia frigorifera immagazzinata, rappresentata dal C_{adr} , è maggiore per tutti i mesi estivi, ad eccezione di Luglio in cui i valori di tale indice diventano prossimi di valore per tutte e tre le tipologie di edificio. Nell'edificio più recente si hanno inoltre possibilità di accumulo anche a Maggio e a Settembre e, in generale, presenta efficienze più alte rispetto agli edifici più vecchi.

Per quanto riguarda il caso downward modulation (che coincide con l'innalzamento della temperatura di setpoint e una leggera de-umidificazione aggiuntiva) le energie immagazzinate sono generalmente molto basse e non arrivano mai ad assumere valori al di sopra dei 2.5 kWh medi di evento. Inoltre, i tre eventi serali (0-2, 4-6 e 20-22) non raggiungono nemmeno il kWh ora medio di evento.

Per capire il motivo dei risultati nei grafici precedenti, vengono mostrate le Figure 4.29, 4.30 e 4.31 che rappresentano gli eventi upward 8-10 in diversi giorni di mesi differenti: Maggio, Giugno, Luglio, Agosto, Settembre per il BN e Giugno, Luglio, Agosto per B70 e B90.

In qualsiasi caso, grazie alla curva di carico del Q_{ref} , si possono prevedere gli andamenti presenti nei grafici 4.27: utilizzando il principio già studiato nel caso invernale dove gli eventi con gli indicatori migliori erano quelli vicini agli orari di alto consumo energetico.

Quindi, si può capire perché l'evento 8-10 ha C_{adr} leggermente inferiori rispetto agli eventi posti in orari successivi, infatti esso è situato proprio in uno dei due picchi di domanda giornaliera di raffrescamento.

I picchi di domanda sono posti in due intervalli di tempo: il primo tra le 8 e le 11, mentre il secondo tra le 15 e le 18 circa. Questi sono causati dalla disposizione delle superfici vetrate e opache, una ad Est che ha anche la parte vetrata più ampia e una ad Ovest.

Il rendimento dell'evento mostrato è anche generalmente il più alto nella stagione di raffrescamento poiché è situato in orari che precedono quasi tutta la parte di alta domanda energetica dell'edificio, riuscendo quindi a indurre riduzione di consumi consistenti nelle ore successive alla sua azione.

I rendimenti degli eventi serali, per l'edificio recente, rimangono comunque alti anche per la possibilità di spostare i fabbisogni di raffrescamento notturni che,

negli edifici di questo tipo, permangono per tutta la durata della notte. Mentre, in edifici meno isolati, durante la notte potrebbe presentarsi il fenomeno del free-cooling che azzerava il fabbisogno dell'edificio, non permettendo nessun tipo di riduzione del consumo e di conseguenza diminuendo l'efficienza.

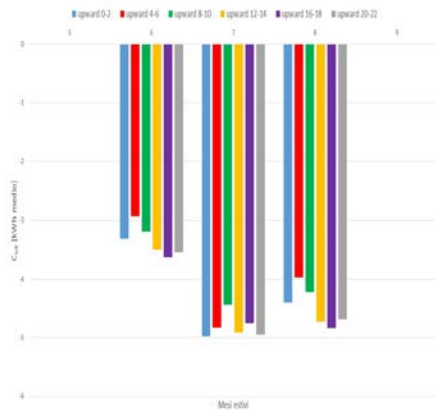
Gli eventi più spostati verso le prime ore della giornata come il 4-6 o il 0-2 tendono ad avere performance migliori nei mesi più caldi come Luglio ed Agosto, ma nei mesi di Giugno, Maggio e Settembre diminuiscono il valore dei loro indici a causa della maggior possibilità di avere free cooling serale (specialmente in edifici datati) e quindi di aumentare la dispersione attraverso l'involucro di una porzione maggiore di energia accumulata durante l'evento.

L'evento 12-14 è collocato in un orario a metà tra i due picchi di domanda e precede di poco il secondo, dunque presenta indicatori di C_{adr} ed η_{adr} relativamente alti in tutti i mesi della stagione estiva.

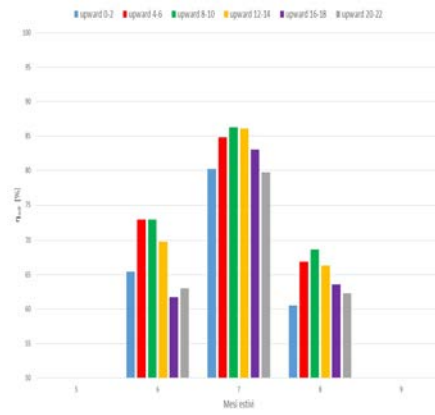
Infine, ancora grazie alle curve di domanda, si può comprendere anche l'andamento degli indicatori downward in Figura 4.28.

L'impossibilità di fare flessibilità di questo tipo in ore serali, specialmente in edifici datati, è causata dalle basse temperature esterne serali che limitano di molto il valore di C_{adr} .

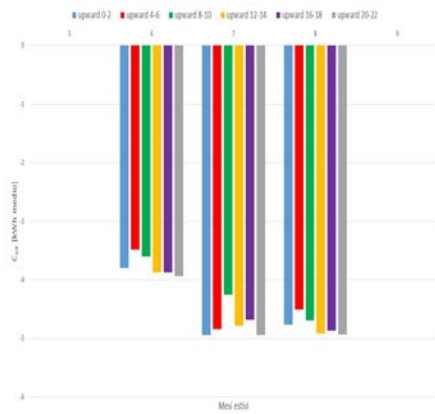
Nelle altre tipologie di eventi, i risultati migliori si ottengono in orari coincidenti con i picchi di domanda, come accade per l'8-10 e per il 16-18. Da notare che le efficienze tendono ad assumere valori costanti al variare della tipologia di evento a causa del bassissimo calore aggiuntivo accumulato nell'edificio e immediatamente compensato dall'impianto di raffreddamento nelle ore successive.



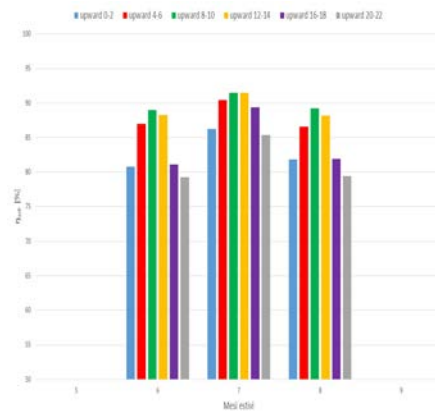
(a) C_{adr} edificio anni '70.



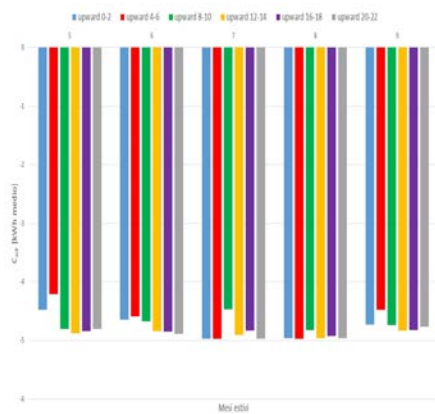
(b) η_{adr} edificio anni '70.



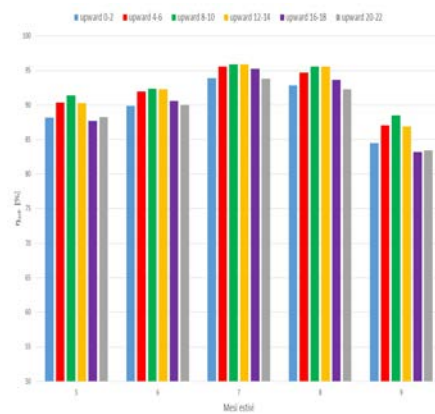
(c) C_{adr} edificio anni '90.



(d) η_{adr} edificio anni '90.



(e) C_{adr} edificio recente.



(f) η_{adr} edificio recente.

Fig. 4.27: Risultati mensili degli indici di flessibilità per upward modulation, nella stagione di raffrescamento.

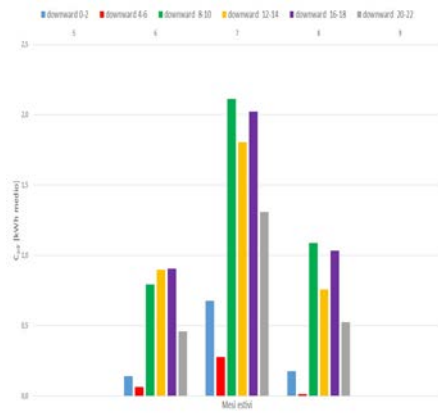
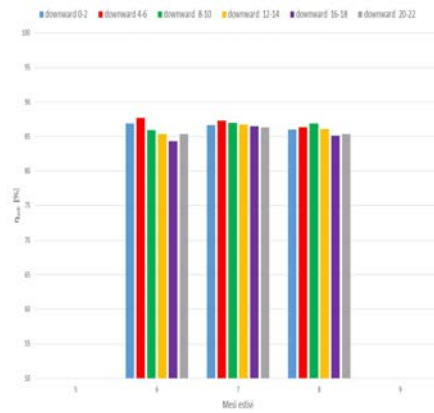
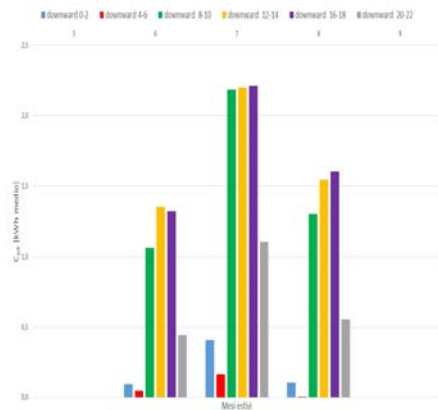
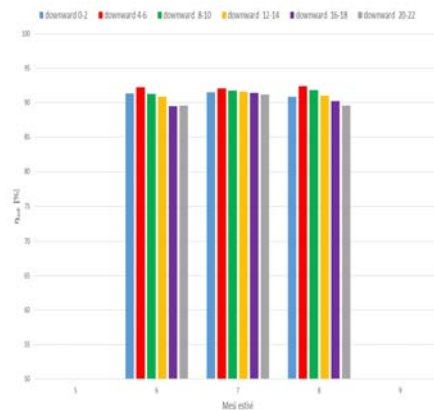
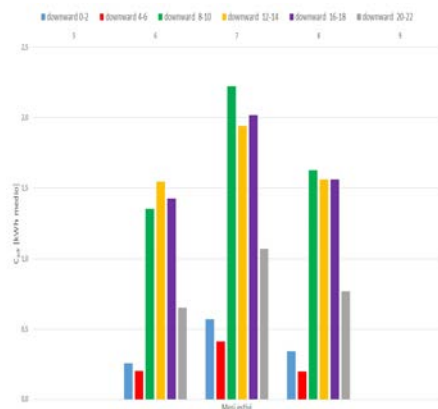
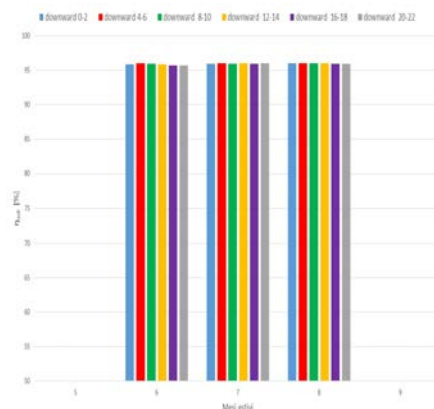
(a) C_{adr} edificio anni '70.(b) η_{adr} edificio anni '70.(c) C_{adr} edificio anni '90.(d) η_{adr} edificio anni '90.(e) C_{adr} edificio recente.(f) η_{adr} edificio recente.

Fig. 4.28: Risultati mensili degli indici di flessibilità per downward modulation, nella stagione di raffreddamento.

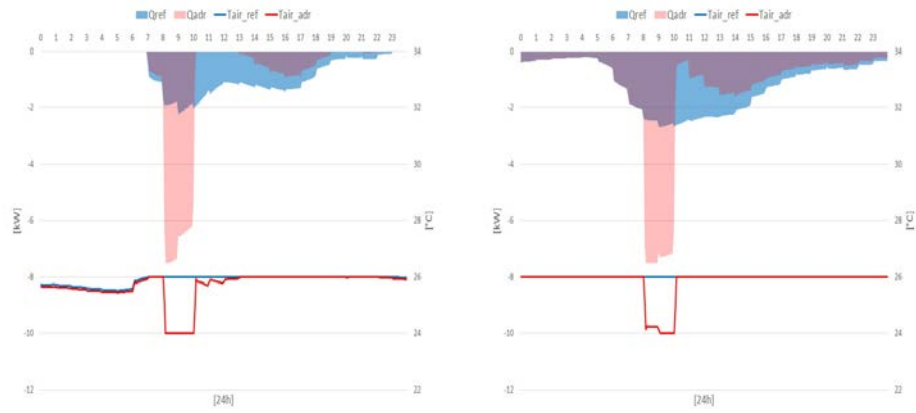
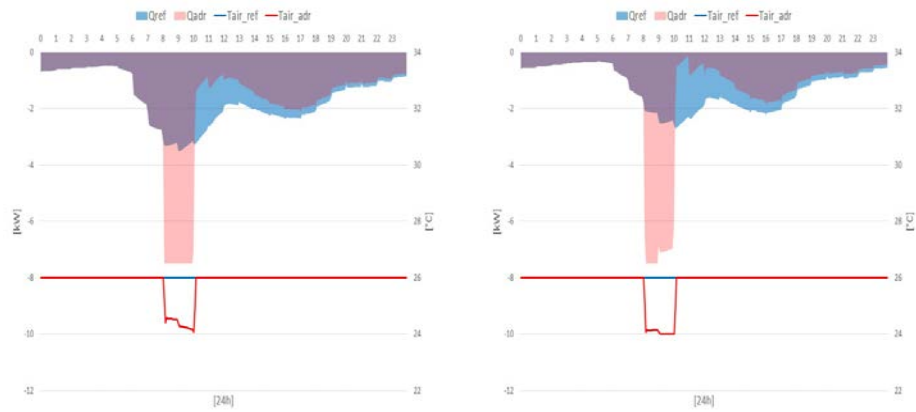
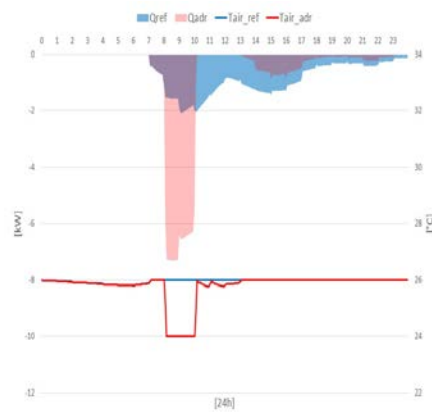
(a) *Evento a Maggio.*(b) *Evento a Giugno.*(c) *Evento a Luglio.*(d) *Evento ad Agosto.*(e) *Evento a Settembre.*

Fig. 4.29: Eventi upward estivi dalle 8 alle 10 nell'edificio recente, nei vari mesi della stagione di raffrescamento.

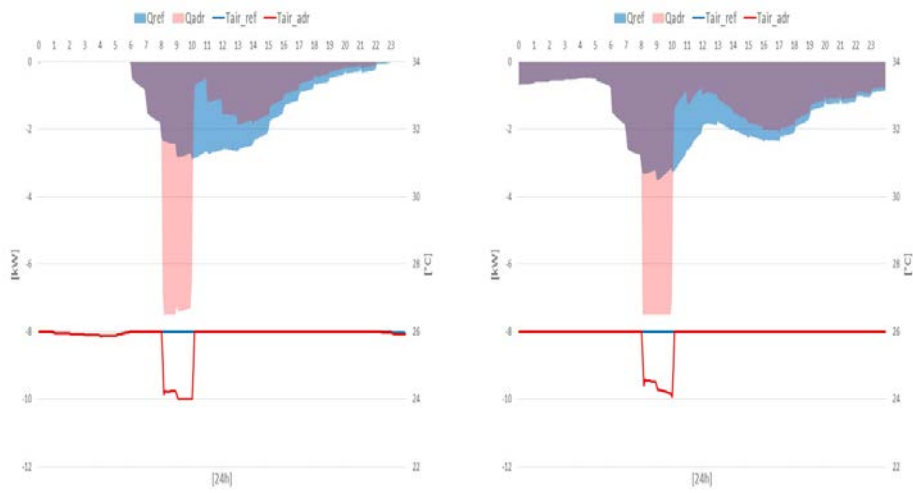
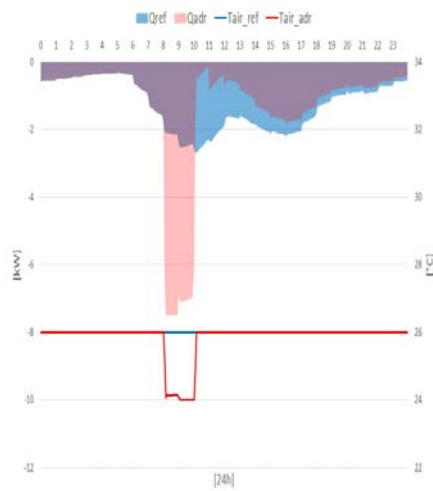
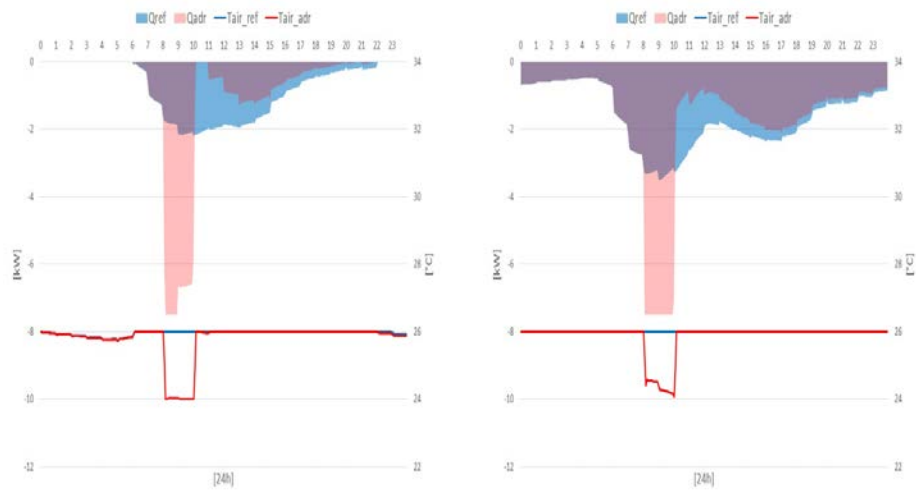
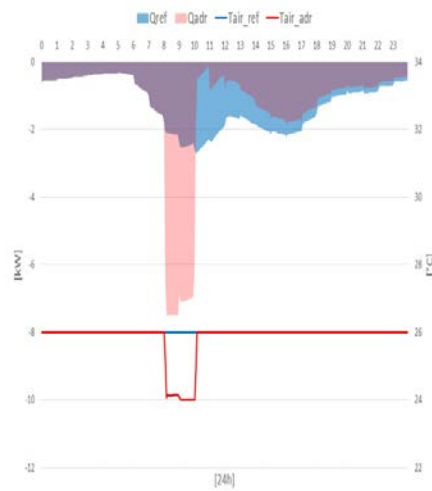
(a) *Evento a Giugno.*(b) *Evento a Luglio.*(c) *Evento ad Agosto.*

Fig. 4.30: Eventi upward estivi dalle 8 alle 10 nell'edificio anni '90, nei vari mesi della stagione di raffrescamento.



(a) Evento a Giugno.

(b) Evento a Luglio.



(c) Evento ad Agosto.

Fig. 4.31: Eventi upward estivi dalle 8 alle 10 nell'edificio anni '70, nei vari mesi della stagione di raffrescamento.

Capitolo 5

Conclusioni

La flessibilità energetica degli edifici è una misura della loro capacità di partecipare ai meccanismi di Demand Response.

La tesi ha lo scopo di analizzare e quantificare la flessibilità energetica in edifici residenziali, sia nella stagione di riscaldamento sia in quella di raffrescamento.

Una prima ricerca sui metodi di quantificazione della flessibilità, ha portato alla decisione di utilizzare gli indicatori C_{adr} ed η_{adr} descritti in [1] e definiti come l'energia aggiuntiva accumulata durante gli eventi ADR e l'efficienza di questi nello spostare i consumi nelle ore successive. Gli eventi non sono altro che aumenti o diminuzioni della temperatura di setpoint dell'impianto per un determinato periodo di tempo e collocati in determinate ore del giorno.

Per valutare questi indici, si è simulato tramite il software TRNSYS il comportamento degli edifici considerati con e senza eventi ADR. In totale sono state eseguite 84 simulazioni per la stagione di riscaldamento e 42 per quella di raffrescamento, corrispondenti a diversi tipi di eventi e a diverse tipologie di edificio.

Nelle simulazioni sono state variate le condizioni al contorno in termini di comportamento degli utenti (setpoint della temperatura interna e carichi interni), potenza di progetto e orario di inizio dell'evento. La durata degli eventi invece è rimasta costante in tutte le prove effettuate.

Indipendentemente dalle altre condizioni al contorno (comportamento degli utenti, potenze di progetto e tipologia di edificio) si è notato che gli eventi che determinano una diminuzione del carico (downward modulation) nella stagione di raffrescamento comportano valori molto bassi di capacità disponibile di accumulo (C_{adr}) rispetto agli eventi che determinano un aumento del carico (upward mo-

dulation). Nella stagione invernale, invece, i C_{adr} delle due tipologie di evento sono paragonabili.

Le simulazioni della stagione di riscaldamento hanno evidenziato che involucri ben isolati comportano più basse capacità disponibili di accumulo (C_{adr}) e più alte efficienze di accumulo (η_{adr}). Infatti, in edifici poco isolati le potenze di progetto sono elevate e la temperatura interna durante i periodi di setback si riduce velocemente. Questo porta ad avere elevati carichi termici durante le accensioni forzate dell'impianto e quindi una elevata capacità disponibile di accumulo.

Analogamente, durante gli spegnimenti forzati dell'impianto (downward modulation) il deficit di energia termica durante gli eventi cresce al diminuire dell'isolamento termico dell'involucro.

Al contrario, le efficienze di accumulo sia negli spegnimenti forzati sia nelle accensioni forzate migliorano passando da edifici poco isolati ad edifici con una buona coibentazione.

Durante i mesi più caldi della stagione di raffrescamento (Luglio e Agosto) il C_{adr} rimane pressochè costante per le tre tipologie edilizie considerate. Nei mesi più miti (Maggio, Giugno e Settembre) la tipologia di involucro edilizio determina la possibilità spostare o meno il carico frigorifero. In edifici poco isolati la domanda è bassa e concentrata nelle ore in cui sono presenti le forzanti climatiche (carico solare, temperatura esterna), mentre in edifici di recente costruzione la difficoltà di disperdere il calore nelle ore notturne rende la domanda più distribuita nell'arco della giornata. L'inerzia termica dell'edificio rende quindi possibile lo spostamento del carico tramite eventi ADR sia upward che downward modulation. Per lo stesso motivo, η_{adr} permette agli edifici più recenti di avere efficienze migliori. In questo caso, il trend è valido su tutta la stagione estiva, inclusi i mesi di Luglio ed Agosto.

L'analisi fatta evento per evento porta poi a definire quali orari, posizionati in vari periodi nelle 24 ore della giornata, si ottengono i valori migliori degli indici. Non può esserci più di un evento ogni tre giorni.

Con queste considerazioni, si è potuto constatare che vi sono alcuni orari che ottengono generalmente indici migliori rispetto ad altri, sia se si considera una schedule per le temperatura di setpoint a semplice setback notturno (OC), sia se si utilizza una schedule con un setback pomeridiano aggiuntivo (FAM).

In entrambe le stagioni, la caratteristica che accomuna gli eventi più efficienti è la loro posizione rispetto alle ore di alto consumo dell'edificio. Per gli eventi upward le più alte efficienze si ottengono se gli orari dell'evento precedono immediatamente le ore di alta domanda energetica, mentre gli indicatori di flessibilità per eventi downward ottengono valori più alti se questi sono posti in orari successivi a quelli di alto consumo. Una diretta conseguenza di questa regola è che le preaccensioni mattutine degli impianti risultano essere gli eventi più convenienti sia per l'elevato valore di C_{adr} sia per le elevate efficienze di accumulo.

Questa regola generale presenta delle eccezioni dovute alle diverse abitudini degli utenti. Infatti nelle simulazioni con setback pomeridiano (FAM), le efficienze di accumulo risultano ridotte a causa del ridotto consumo pomeridiano che determina una elevata dispersione del calore accumulato durante gli eventi. Un discorso analogo vale per la downward modulation. Per quanto riguarda i C_{adr} degli eventi mattutini, essi sono ridotti a causa delle frequenti accensioni notturne soprattutto nei mesi invernali più rigidi.

Tali riduzioni sugli indici risultano ancora più accentuate se viene ridotta la potenza di progetto. Infatti, le accensioni notturne e le dispersioni del calore durante le ore di setback pomeridiano risultano ancora più accentuate. Il risultato è un'ulteriore diminuzione degli indici di flessibilità degli eventi vicini alle ore di alta domanda energetica.

In sintesi, le eccezioni precedenti, che valevano solamente negli edifici meno isolati e nei mesi invernali più rigidi, assumono una più ampia validità anche per edifici ben isolati in pieno inverno e anche per edifici poco coibentati nei mesi di metà stagione se vengono incontrate le seguenti condizioni:

- L'utenza inizia a presentare, oltre a un setback notturno, anche un setback pomeridiano tipico della schedule FAM.
- Le potenze di progetto vengono diminuite.

Infine, i risultati sugli andamenti degli indici di flessibilità nei vari eventi della stagione di raffrescamento confermano la validità della logica di programmazione degli eventi spiegata in precedenza. Infatti, in upward modulation gli eventi che precedono i picchi della domanda frigorifera tendono ad avere efficienze migliori. Per i C_{adr} dei vari eventi, il loro valore dipende fortemente dall'andamento della curva dei consumi di riferimento.

Bibliografia

- [1] Glenn Reynders, Jan Diriken, and Dirk Saelens. Generic characterization method for energy flexibility: Applied to structural thermal storage in residential buildings. *Applied Energy*, 198:192 – 202, 2017.
- [2] Søren Østergaard Jensen, Anna Marszal-Pomianowska, Roberto Lollini, Wilmer Pasut, Armin Knotzer, Peter Engelmann, Anne Stafford, and Glenn Reynders. Iea ebc annex 67 energy flexible buildings. *Energy and Buildings*, 155:25 – 34, 2017.
- [3] Glenn Reynders, Rui Amaral Lopes, Anna Marszal-Pomianowska, Daniel Aelenei, João Martins, and Dirk Saelens. Energy flexible buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage. *Energy and Buildings*, 166:372 – 390, 2018.
- [4] Thomas Nuytten, Bert Claessens, Kristof Paredis, Johan Van Bael, and Daan Six. Flexibility of a combined heat and power system with thermal energy storage for district heating. *Applied Energy*, 104:583 – 591, 2013.
- [5] R. D’hulst, W. Labeeuw, B. Beusen, S. Claessens, G. Deconinck, and K. Vanthournout. Demand response flexibility and flexibility potential of residential smart appliances: Experiences from large pilot test in belgium. *Applied Energy*, 155:79 – 90, 2015.
- [6] Sebastian Stinner, Kristian Huchtemann, and Dirk Müller. Quantifying the operational flexibility of building energy systems with thermal energy storages. *Applied Energy*, 181:140 – 154, 2016.
- [7] Roel De Coninck and Lieve Helsen. Quantification of flexibility in buildings by cost curves – methodology and application. *Applied Energy*, 162:653 – 665, 2016.

- [8] J. Le Dréau and P. Heiselberg. Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass. *Energy*, 111:991 – 1002, 2016.
- [9] Comitato Tecnico CEN/TC 228. *UNI en 12831, Impianti di riscaldamento negli edifici - Metodo di calcolo del carico termico di progetto*, 2006.
- [10] V. M. Barthelmes, C. Becchio, and S. P. Corgnati. Occupant behavior lifestyles in a residential nearly zero energy building: Effect on energy use and thermal comfort. *Science and Technology for the Built Environment*, 22:960–975, 2016.
- [11] Technical Committee CEN/TC 156. *CEN TR 14788, Ventilation for buildings - Design and dimensioning of residential ventilation systems.*, 2006.
- [12] Department of Energy U.S. www.energyplus.net, 2018.
- [13] American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). *Standard 55-2004, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, 2004.

Ringraziamenti

Vorrei prima di tutto ringraziare il mio relatore, il prof. Angelo Zarella e il mio correlatore, l'ing. Jacopo Vivian per avermi accompagnato lungo il tortuoso cammino verso la fine di questa faticosa ma soddisfacente tesi magistrale. Li ringrazio soprattutto per la loro immensa pazienza nel spiegarmi anche i minimi dettagli necessari per lo svolgimento dei calcoli e dell'elaborazione dei dati che ha impiegato una grande fetta del mio tempo. Soprattutto, non dimenticherò la loro grande disponibilità nell'aiutarmi in ogni difficoltà incontrata lungo il cammino. Infine, la loro professionalità e la loro precisione nel lavoro saranno sicuramente esempi importanti per la mia futura carriera lavorativa.

Vorrei inoltre ringraziare tutti gli altri professori e ingegneri del dipartimento di Fisica Tecnica che mi hanno incoraggiato e sostenuto durante il periodo di realizzazione del lavoro.

Un grosso e caloroso ringraziamento va alla mia famiglia che, sebbene sia stato molte volte freddo e distaccato nei loro confronti, sono sempre stati il mio primo pensiero della giornata e continueranno ad esserlo per tutta la mia vita. Probabilmente, senza i loro incoraggiamenti giornalieri, a quest'ora non sarei qui a scrivere questo capitolo di ringraziamenti.

Calorosi ringraziamenti vanno anche a tutti i miei amici che mi hanno sostenuto e tirato su il morale nei momenti più difficili e stressanti di questi mesi. In particolare ringrazio molto Filippo Baruffaldi per essere stato disponibile nello spiegarmi e risolvermi i problemi del software $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ che ho utilizzato per la prima volta in questa tesi.

Ancora una volta, grazie a tutti coloro che mi sono stati vicini in questi anni di università e specialmente in questo ultimo periodo di lavoro di questa tesi.

Padova, 6 Dicembre 2018