

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

TESI DI LAUREA  
IN  
GESTIONE DELLE RISORSE ENERGETICHE

**SIMULAZIONE DINAMICA DI EDIFICI AD ENERGIA QUASI ZERO  
ACCOPPIATI A VEICOLI ELETTRICI**

**RELATORI**

CH.MO PROF. FRANCESCO CALISE

**CORRELATORI**

ING. MARIA VICIDOMINI  
ING. FRANCESCO L. CAPPIELLO

**CANDIDATA**

CARMEN ANNUNCIATA MELISSE  
MATRICOLA: M 67/395

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

Il fabbisogno energetico mondiale va costantemente aumentando nel tempo, questo soprattutto nei paesi in via di sviluppo. Soddisfare tale fabbisogno energetico solo attraverso l'utilizzo dei tradizionali combustibili fossili (gas, petrolio, carbone, etc.) diviene sempre più rischioso e difficile, sia a causa del loro effetto fortemente inquinante, sia perché tali combustibili sono destinati ad esaurirsi. Da tali considerazioni risulta quindi la necessità di sviluppare tecnologie adatte alla produzione di energia attraverso fonti rinnovabili ed ecosostenibili. In tale ottica si sviluppa il presente lavoro di tesi, riguardante lo sviluppo di un modello che, attraverso lo svolgimento di simulazioni dinamiche, consenta l'analisi delle prestazioni energetiche, ambientali ed economiche di collettori fotovoltaici termici integrati (Building Integrated Photovoltaics/Thermal, BIPVT), per edifici ad energia quasi zero (Nearly Zero Energy Building, NZEB), accoppiati ad un sistema di accumulo di energia elettrica (batterie al piombo acido) e ad un veicolo elettrico (EV).

Il termine NZEB viene utilizzato per definire un edificio il cui consumo energetico è quasi pari a zero. Si tratta di edifici ad elevatissima prestazione che riducono il più possibile i consumi per il loro funzionamento e l'impatto nocivo sull'ambiente. Questo vuol dire che la domanda energetica per riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, produzione di acqua calda sanitaria ed elettricità è davvero molto bassa. Il termine NZEB è stato utilizzato per la prima volta nel pacchetto di Direttive Europee EPBD (Energy Performance Building Directions), pubblicato nove anni fa. Le Direttive EPBD del 2010 davano indicazioni in merito alle deadline entro cui tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere NZEB, nello specifico il 2021 per l'edilizia privata e il 2018 per quella pubblica. Inoltre le direttive lasciano ad ogni stato UE la libertà di individuare quali caratteristiche definiscono tale una costruzione e come la si deve realizzare.

Non esiste una regola comune per la costruzione di un edificio NZEB, ma ci sono alcuni principi e linee guida da rispettare per sviluppare un progetto il più possibile efficiente. In base al contesto ambientale e climatico, il primo passo è sempre quello di ricercare soluzioni passive che minimizzino la domanda energetica e quindi la necessità di intervento degli impianti meccanici. Per questo motivo è fondamentale studiare aspetti quali la forma, l'orientamento e le strutture dell'edificio, prendendo in considerazione fattori quali l'irraggiamento, i venti prevalenti, le temperature e gli ombreggiamenti. Il calore dev'essere captato il più possibile in inverno e fermato in estate, è importante garantire un buon livello di ventilazione naturale e di raffrescamento passivo, si deve avere un buon livello d'illuminazione naturale e fare in modo che le dispersioni siano minime, con le giuste caratteristiche di isolamento degli elementi opachi e trasparenti.

La presenza del sistema di accumulo serve ad aumentare l'autoconsumo riducendo gli eccessi poiché consente di ridurre la dipendenza dalle condizioni meteorologiche: attualmente la convenienza delle rinnovabili risulta essere fortemente dipendente da alcune forme di incentivazione, come lo scambio sul posto. Il veicolo elettrico è preso in considerazione sia al fine di ridurre il costo energetico, economico ed ambientale del trasporto privato sia per valutare l'efficacia della tecnologia V2H. È importante sottolineare che gli EV non producono alcun tipo di emissioni, ma se caricati dalla rete elettrica nazionale il problema viene solamente spostato visto che la produzione di energia elettrica ha un costo ambientale. Il parco nazionale elettrico utilizza ancora le centrali elettriche a combustibile fossile, quindi si ha lo stesso la produzione di inquinanti e gas a effetto serra.

La riduzione dell'impatto ambientale è reale solo se, per caricare i veicoli elettrici, viene utilizzata l'energia rinnovabile, in particolare si tende a prendere in considerazione l'energia elettrica fotovoltaica.

Il lavoro proposto è completamente nuovo, nessun lavoro disponibile in letteratura si occupa di una modellazione e di una simulazione dei profili di consumo energetico dinamico di un edificio NZEB con sistema BIPVT accoppiato con EV, inoltre in questo studio la simulazione viene effettuata utilizzando un carico elettrico misurato reale. Lo sviluppo del modello e la simulazione dinamica vengono effettuati utilizzando il software TRNSYS. Quest'ultimo è stato utilizzato per poter avere risposte in tempo reale sulle performance dell'impianto, tale software di simulazione dinamica è pensato per l'analisi delle prestazioni di sistemi energetici. L'impianto così modellato è costituito da una serie di componenti i cui modelli matematici di base derivano sia dalla libreria standard del software TRNSYS sia da modelli elaborati esternamente e poi implementati.

I componenti vengono collegati tra loro in modo opportuno, al fine di poter simulare le prestazioni e il funzionamento dell'impianto sono definiti tutti i parametri di input/costanti, e mediante i modelli alla base di ogni componente, è possibile ottenere e visualizzare in modo dinamico i parametri di output oggetto di interesse.

Nella Figura 1 viene mostrata la suddivisione in zone e il layout di sistema.

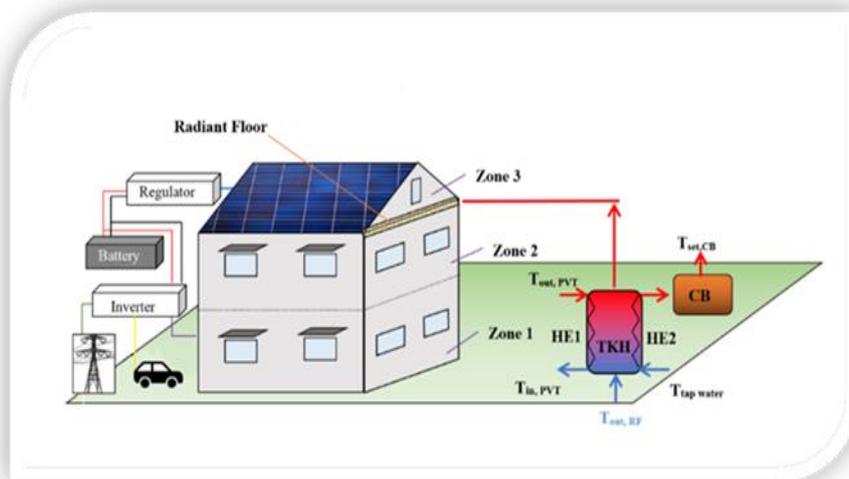


Figura 1-Layout del Sistema Innovativo

L'energia termica prodotta dal campo BIPVT viene fornita a un sistema di accumulo termico (TK) mediante uno scambiatore di calore interno (HE1). L'acqua calda estratta dalla parte superiore del TK viene utilizzata per fornire un pavimento radiante (RF), che riscalda esclusivamente la zona termica 3. Inoltre, nel TK è presente un altro scambiatore di calore (HE2), per produrre l'ACS per i residenti dell'edificio. È importante sottolineare che, come si vedrà successivamente nelle strategie di controllo, quando nella stagione invernale c'è richiesta di riscaldamento dalla zona 3 viene data la precedenza al pavimento radiante. Quindi, visto che durante la stagione fredda l'HE2 viene spesso bypassato, è presente una caldaia a condensazione a gas naturale

(CB) a valle dell'HE2. Pertanto, in pratica la caldaia produce l'acqua calda sanitaria (ACS) d'inverno mentre d'estate si comporta come un sistema ausiliario che garantisce che la temperatura di uscita dell'ACS sia 45°C. Inoltre, durante il periodo di riscaldamento, se l'irradiazione solare non è sufficiente da consentire al pavimento radiante di riscaldare la Zona 3, entra in funzione una pompa di calore ausiliaria. Quindi, questa pompa di calore funziona in parallelo con il pavimento radiante al fine di controllare adeguatamente la temperatura dell'aria interna. Infine, per quanto riguarda la domanda di riscaldamento dell'ambiente della Zona 1 e della Zona 2, essa è assicurata tramite delle pompe di calore elettriche, mentre il raffreddamento dello spazio di ciascuna Zona (Zona 1, Zona 2 e Zona 3) viene fornito attraverso dei chiller elettrici.

L'energia elettrica prodotta dal BIPVT viene utilizzata per soddisfare la richiesta dei dispositivi elettrici dell'edificio, tra cui la pompa di calore, i chiller elettrici e l'EV. L'energia elettrica in eccesso viene inviata a un sistema di stoccaggio rappresentato da una batteria al piombo. La presenza del sistema di accumulo è importante per cercare di raggiungere l'autosufficienza elettrica, infatti consente al sistema di essere meno influenzato dalle condizioni meteorologiche. È importante sottolineare che a monte dei dispositivi elettrici e della batteria è presente un regolatore / inverter. Ha un ruolo chiave in questo tipo di layout. In effetti, il regolatore gestisce la fornitura dell'energia elettrica prodotta dal BIPVT agli utenti. Mentre l'inverter converte la corrente continua (CC) in corrente alternata (CA) e viceversa. L'elettricità prodotta dal BIPVT è in CC, quindi è necessario convertirla in corrente alternata per alimentare i dispositivi elettrici dell'edificio e l'EV, visto che il caricatore utilizzato dal veicolo elettrico lavora in entrata con corrente alternata. Il sistema di archiviazione lavora in CC, quindi, anche in questo caso, è necessario convertirlo in AC per inviarlo agli utenti o all'EV. Quando il sistema di stoccaggio dell'edificio è saturo e si ha ancora energia in eccesso, quest'ultima, se il veicolo è presente e non è completamente carico, viene utilizzata per ricaricare l'EV, sennò viene venduta alla rete elettrica nazionale. Considerando che nel caso in cui l'irraggiamento solare non è sufficiente per soddisfare l'edificio elettrico e la richiesta EV, e il sistema di stoccaggio è scarico, la quantità di energia necessaria viene acquistata dalla rete. Infine, viene studiata la strategia "vehicle to home" (V2H), cioè se l'EV è carico e disponibile, e l'energia prodotta o immagazzinata dal sistema di accumulo dell'edificio non è sufficiente per soddisfare la domanda di energia elettrica di quest'ultimo, l'energia immagazzinata nella batteria del veicolo viene utilizzata per fornire la corrente elettrica richiesta dall'utenza. La batteria dell'EV è una batteria agli ioni di Litio.

In Figura 2 è riportata la strategia di controllo utilizzata per la gestione del circuito elettrico nel momento in cui l'utenza chiede energia al sistema.

Innanzitutto, lo stesso regolatore assicura che lo stato di carica in percentuale (FSoC) della batteria dell'edificio rientra nei limiti di sicurezza della batteria, questi limiti sono molto importanti per il corretto funzionamento della batteria e consentono di estendere la sua durata. Si fissa il limite inferiore e il limite superiore del FSoC pari a 0,4 e 0,9, rispettivamente. Pertanto, la carica della batteria viene impedita quando il FSoC è superiore a 0,9, mentre l'energia non viene prelevata dalla batteria quando il FSoC è inferiore a 0,4. La batteria dell'EV ha gli stessi limiti di sicurezza, anche se è una batteria al litio, in questo caso il limite inferiore serve anche a garantire l'energia necessaria a compiere viaggi di medie distanze senza problemi. Il controller, che gestisce il

collegamento elettrico tra il sistema di accumulo, l'edificio e l'EV, dà priorità alle richieste elettriche dell'utenza. Quindi, la scarica del sistema di stoccaggio, al fine di soddisfare la richiesta elettrica dell'edificio, è consentita quando il FSoC è superiore a 0,4. Mentre la carica dell'EV da parte della batteria è consentita solo quando il FSoC del sistema di stoccaggio dell'edificio è superiore a 0,6, la domanda elettrica dell'edificio è quasi assente, l'EV è ovviamente a casa e il suo FSoC è inferiore a 0,4.

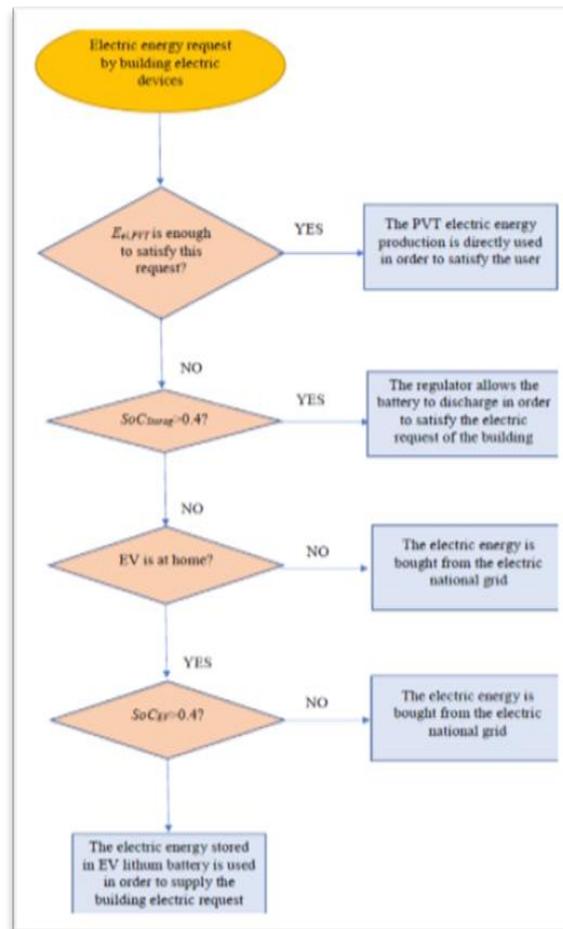


Figura 2- Strategia di controllo utilizzata nel sistema innovativo per la gestione del circuito elettrico nel momento in cui l'utenza chiede energia al sistema

Le prestazioni dell'innovativo layout di sistema appena definito e la potenzialità del modello di simulazione dinamica, vengono sviluppate attraverso quattro casi studio, nello specifico quattro piccoli alberghi situato rispettivamente a Palermo, Napoli, Pescara e Milano. Quest'ultimo è un Hotel avente una clientela presente tutto l'anno, a differenza degli altri tre che, invece, sono prevalentemente stagionali, con clientela presente soprattutto da aprile ad ottobre. Il carico elettrico assunto per le simulazioni è un carico elettrico reale, mentre il carico termico viene valutato mediante TRNBUILD. Nella Figura 3 viene mostrato un tipico carico giornaliero invernale degli Hotel.

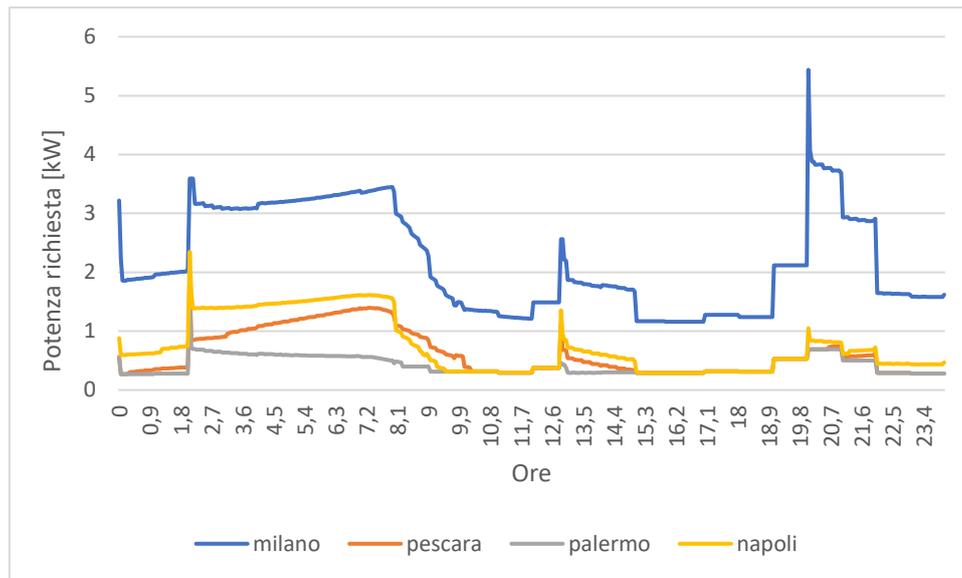


Figura 3-Carico giornaliero degli edifici analizzati per un tipico giorno invernale

Gli edifici analizzati sono di 450 m<sup>2</sup> su 3 piani, la parte del tetto esposta a sud, precisamente 125,78 m<sup>2</sup>, è coperti da un sistema BIPVT, come mostrato in Figura 1. Il campo solare fornisce energia elettrica e termica simultaneamente. Per garantire il massimo comfort nelle abitazioni durante il periodo invernale, esistono delle precise regole sulla gestione del riscaldamento. In particolare, lo Stato italiano ha previsto un preciso e rigido regolamento, disciplinato dalla legge 10-1991, atto a stabilire la data di accensione e di spegnimento delle caldaie condominiali e private ed il numero massimo di ore in cui potranno essere accese. La legge, dunque, ha suddiviso il Paese in diverse zone, ognuna con regole differenti. Le regole, dunque, valgono sia per gli impianti centralizzati che per quelli autonomi. Secondo la legge 10-1991 l'accensione e spegnimento dei termosifoni dipende dall'area in cui si vive. Ecco la suddivisione completa in Figura 4:

Zona climatica	Accensione riscaldamento	Spegnimento riscaldamento	Ore di accensione al giorno
Zona A	01/12/2018	15/03/2019	6 ore
Zona B	01/12/2018	31/03/2019	8 ore
Zona C	15/11/2018	31/03/2019	10 ore
Zona D	01/11/2018	15/04/2019	12 ore
Zona E	15/10/2018	15/04/2019	14 ore
Zona F	Libera	Libera	Libere

Figura 4-Accensione e spegnimento riscaldamento in funzione delle zone di appartenenza

Al di fuori di tali periodi, gli impianti termici possono essere attivati solo in presenza di situazioni climatiche che ne giustificano l'utilizzo e, comunque, con una durata giornaliera non superiore alla metà di quella consentita in via ordinaria.

I Comuni oggetto di studio ricadono rispettivamente:

ZONA B = Palermo;

ZONA C = Napoli;

ZONA D = Pescara;

ZONA E = Milano.

Il veicolo elettrico preso in considerazione è una Renault Zoe 40 con una capacità della batteria pari a 41 kWh. La ricarica domestica è prevista tramite una tipica stazione di ricarica per veicoli modo 3 IEC61851 con cavo lato veicolo integrato di Tipo 2 - 32A 230V che si adatta perfettamente al veicolo scelto, un esempio è raffigurato in Figura 5.



Figura 5-Tipica stazione di ricarica domestica utilizzata

Per quanto riguarda i sistemi di riferimento, essi consistono in alberghi situati nelle quattro aree di studio, che effettuano, a differenza dei sistemi proposti, prelievi di energia elettrica dalla rete, utilizzano una caldaia per la produzione di acqua calda sanitaria e dispongono di veicoli diesel. Il fine della simulazione consiste nell'effettuare analisi economiche, ambientali ed energetiche per valutare la fattibilità e l'efficienza dell'intervento proposto.

Di seguito sono riportati i risultati annuali inerenti alla simulazione annuale (Tabella 7.1)

	Carico utenza [kWh]	Carico tot [kWh]	Carica EV [kWh]	BIPVT [kWh]	Rete [kWh]	Rete to utenza [kWh]	Rete to EV [kWh]	Eccesso [kWh]	Autocons. Utenza [kWh]	Autocons Tot [kWh]
Milano	26885	31776	4891	13888	19268	16274	2994	32	10611	11895

Napoli	20107	25555	5443	17388	10373	8859	1514	795	11248	13945
Palermo	19302	24509	5208	18632	9297	8060	1237	1700	11242	14149
Pescara	19936	25311	5375	17655	9932	8489	1443	750	11448	14159

*Tabella 7.1-Risultati energetici annuali relativi al carico dell'utenza, carico totale, energia assorbita dal veicolo elettrico, energia fotovoltaica generata, energia richiesta alla rete, energia richiesta dall'edificio alla rete, energia richiesta dal veicolo alla rete, energia in eccesso venduta, energia autoconsumata dall'utenza ed energia autoconsumata totale delle quattro aree di studio*

Nella Tabella 7.2 si prendono in considerazione i vari contributi della rete, della batteria, del veicolo e del fotovoltaico nel soddisfacimento del solo carico dell'utenza.

	Carico utenza [kWh]	Rete [kWh]	BIPVT [kWh]	Batteria [kWh]	Veicolo [kWh]
Milano	26885	19268	8485	1702	422
Napoli	20107	10373	8034	2375	838
Palermo	19302	9297	8165	2409	668
Pescara	19936	9932	8143	2477	827

*Tabella 7.2-Contributi annuali della rete, del fotovoltaico, della batteria e del veicolo nel soddisfacimento del solo carico richiesto dall'utenza delle quattro aree di studio*

Nella Tabella 7.3 sono riportati i risultati inerenti alla sola energia richiesta dal veicolo.

	Carica EV [kWh]	BIPVT [kWh]	Rete [kWh]	Batteria [kWh]
Milano	4891	1897	2994	0
Napoli	5443	3838	1514	90
Palermo	5208	3867	1237	104
Pescara	5375	3880	1443	51

*Tabella 7.3-Contributi annuali del fotovoltaico, della rete e della batteria nel soddisfacimento del solo carico richiesto dal veicolo delle quattro aree di studio*

Nella Tabella 7.4 sono riportati i risultati energetici derivanti dal confronto del sistema di riferimento con il sistema proposto.

	$\Delta EP_{utenza}$ [kWh]	$PES_{utenza}$	$\Delta EP_{veicolo}$ [kWh]	$PES_{veicolo}$	$\Delta EP_{tot}$ [kWh]	$PES_{tot}$
Milano	13023	22 %	9543	60 %	22566	30 %
Napoli	25290	47%	12759	80%	38050	54%
Palermo	28600	54%	13362	83%	41963	60%
Pescara	27471	50%	12914	80%	40385	56%

Tabella 7.4- $\Delta EP$  e  $PES$  derivanti dal confronto tra sistema di riferimento e sistema proposto delle quattro aree di studio

Nella Tabella 7.5 sono mostrati i risultati ambientale derivanti dal confronto tra SR e SP.

	$\Delta CO_2_{utenza}$ [kg]	$\% CO_2_{risp_{utenza}}$	$\Delta CO_2_{veicolo}$ [kg]	$\% CO_2_{risp_{veicolo}}$	$\Delta CO_2_{tot}$ [kg]	$\% CO_2_{risp_{tot}}$
Milano	2855	22%	2067	60%	4921	30%
Napoli	5571	47%	2777	80%	8349	55%
Palermo	6293	54%	2910	83%	9203	61%
Pescara	6052	50%	2811	80%	8863	57%

Tabella 7.5- $\Delta CO_2$  e  $\% CO_2$  risparmiata derivanti dal confronto tra i quattro sistemi di riferimento e i quattro sistemi proposti

Nella Tabella 7.6 sono riportati i risultati relativi all'analisi economica.

	Risparmio (€)	Investimento (€)	SPB (anni)	VAN (€)	IP	$SPB_{incent}$ (anni)	$VAN_{incent}$ (€)	$IP_{incent}$
Milano	1927	40411	21	-16339,66	-0.40	12	1366	0,06
Napoli	3461	40411	12	2851,21	0,07	7	20557	0,91
Palermo	3813	40411	11	7254,07	0,18	6	24959	1,10
Pescara	3535	40411	11	3775,39	0,09	7	21480	0,95

Tabella 7.6-Indici economici, con e senza incentivi, relativi al confronto tra SR e SP delle quattro aree di studio

Dai risultati sopra elencati si evidenzia la minore produzione di energia green da parte di Milano, rispetto a Napoli, Palermo e Pescara. Ciò porta ad avere comunque dei risparmi sia in termini economici che in termini energetici ed ambientali, anche se in misura minore. Inoltre senza considerare un incentivo del 50% sull'investimento i tempi di ritorno e gli indici di profitto, sempre relativi a Milano, risultano troppo elevati, addirittura negativi.

È stata effettuata un'analisi parametrica facendo variare sia la disponibilità dei veicoli durante le ore del giorno sia i km percorsi. Tutti gli altri parametri sono uguali alle simulazioni standard. Praticamente si è deciso di analizzare tre tipologie di uscite da parte del veicolo ovvero in mattinata, nel pomeriggio e alla sera; tutte e tre le tipologie di uscite sono state studiate considerando anche una variazione nei km, ovvero 60 km, 95 km, e 80 km. Tutto ciò, è stato effettuato per tutte e quattro le zone analizzate; inoltre le velocità delle auto vengono assunte costanti al valore di 50 km/h.

Da quest'analisi parametrica emerge che i risparmi maggiori avvengono per gli spostamenti serali, poiché si dà la possibilità al veicolo elettrico di godere dell'energia fotovoltaica prodotta, ciò permette di non prelevare energia elettrica dalla rete, e per le lunghe distanze (95 km); ciò è evidente anche per quanto riguarda gli indici economici poiché è sulle grandi distanze che il risparmio tende ad aumentare. Quanto appena detto è visibile nei grafici sottostanti.

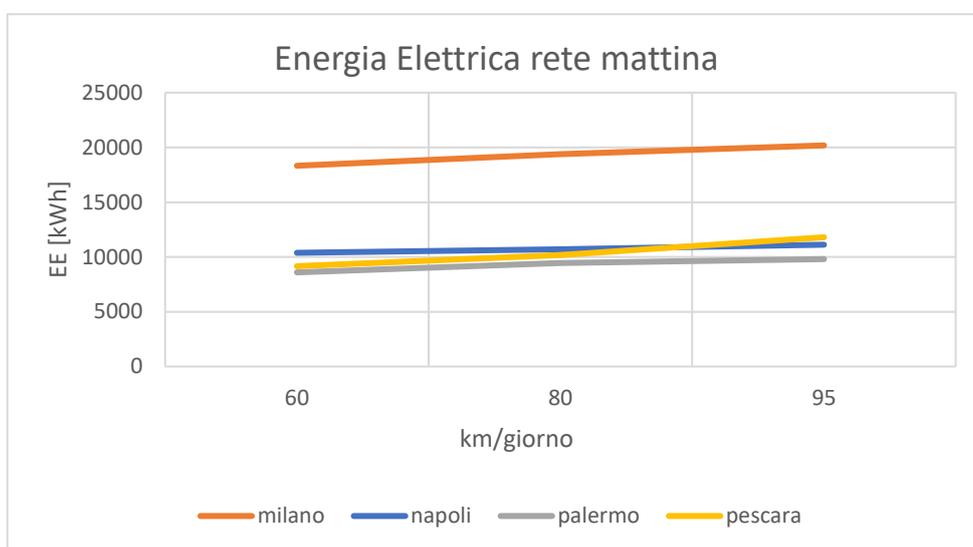


Figura 6-Valori annuali dell'energia totale richiesta alla rete in mattinata, dai sistemi al variare dei casi dell'analisi parametrica

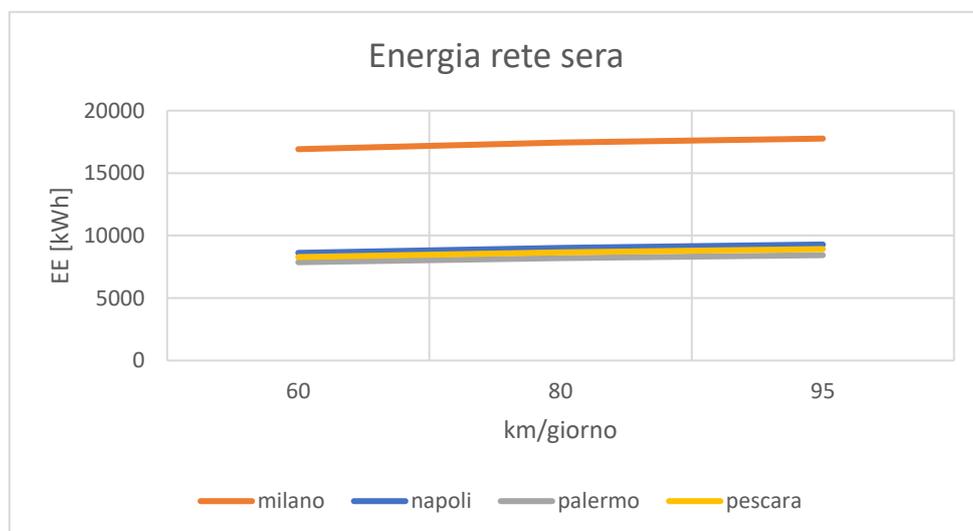


Figura 7-Valori annuali dell'energia totale richiesta alla rete alla sera, dai sistemi al variare dei casi dell'analisi parametrica

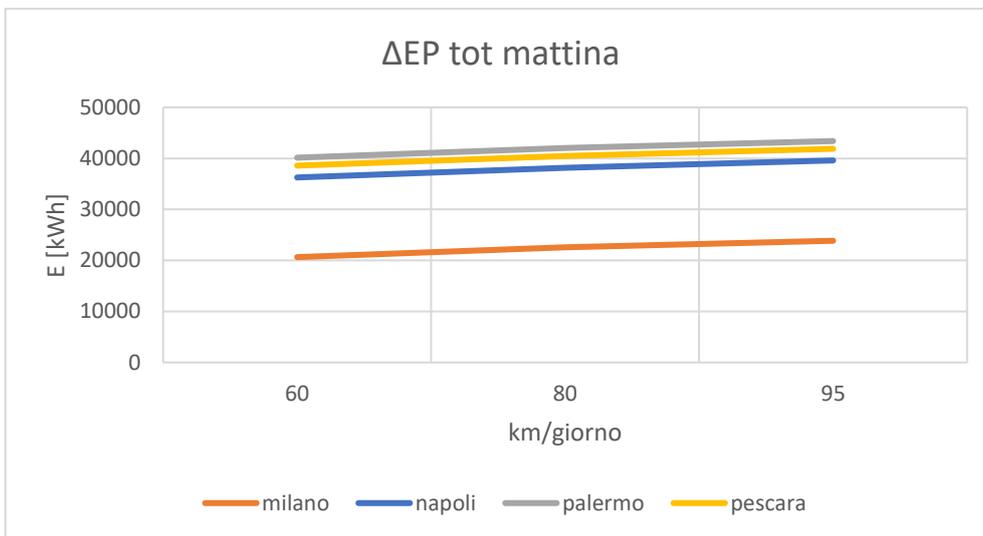


Figura 8 -Risparmio di energia primaria totale tra SR e SP , al mattino , nei vari casi analizzati

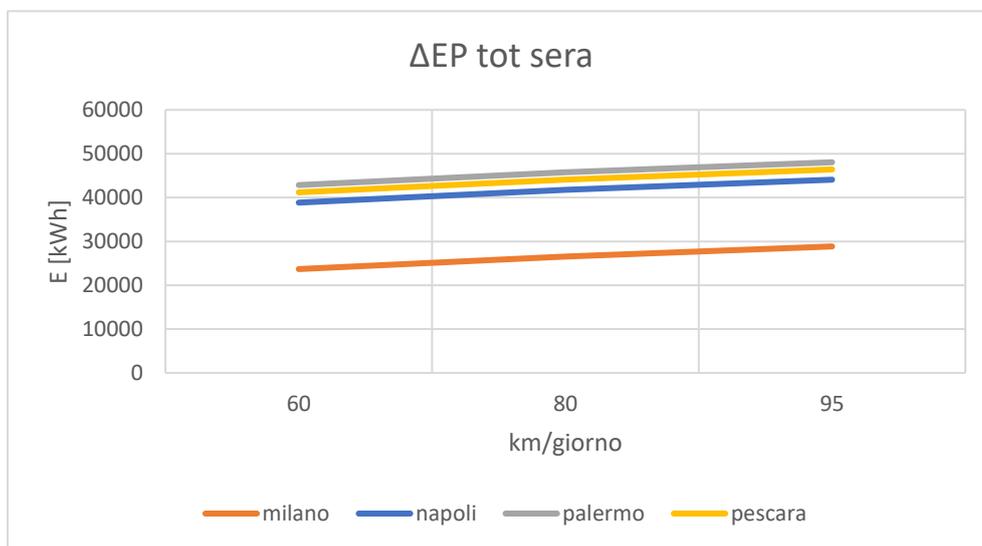


Figura 9 -Risparmio di energia primaria totale tra SR e SP , alla sera , nei vari casi analizzati

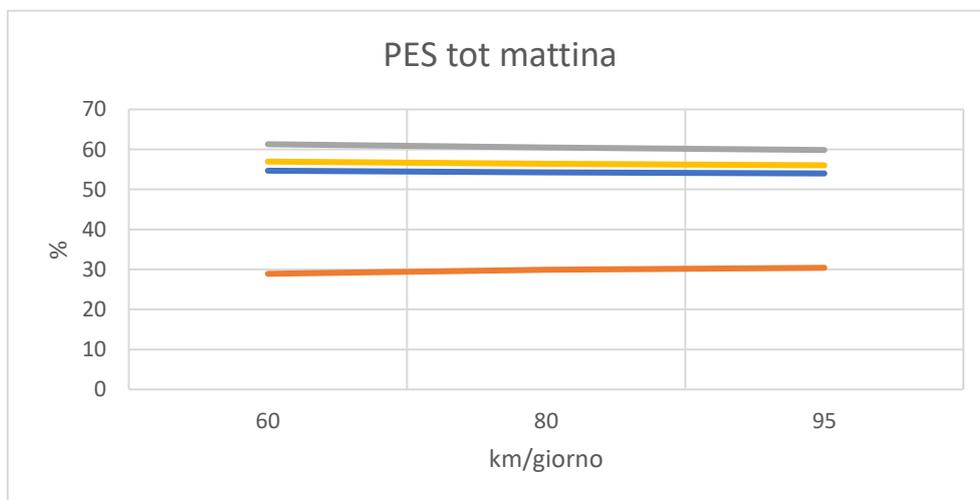


Figura 10 -Risparmio percentuale di energia primaria totale tra SR e SP , al mattino , nei vari casi analizzati

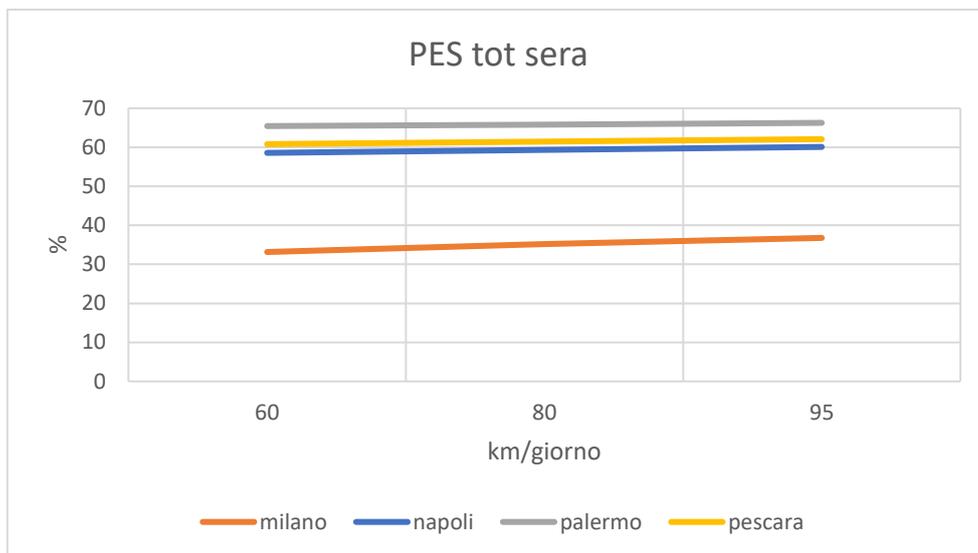


Figura 7.11 -Risparmio percentuale di energia primaria totale tra SR e SP , alla sera , nei vari casi analizzati

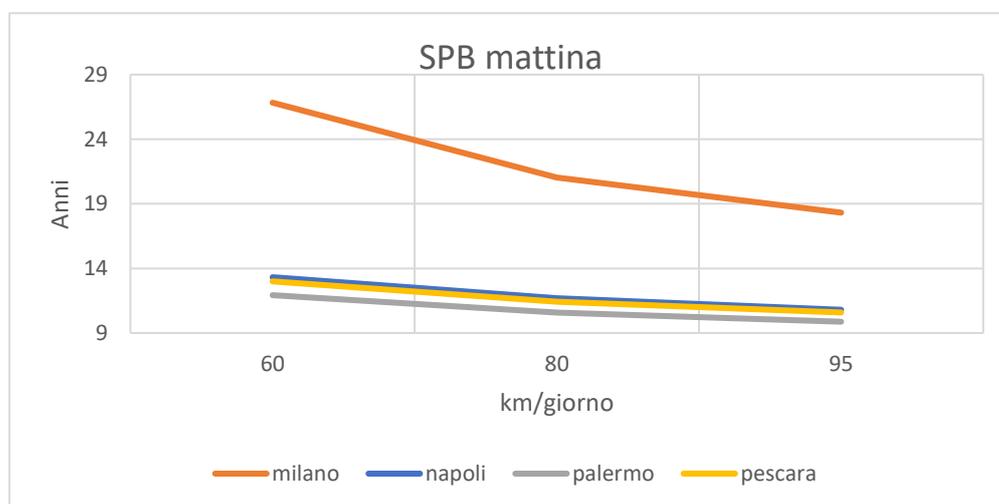


Figura 12- SPB , al mattino al variare dei casi analizzati

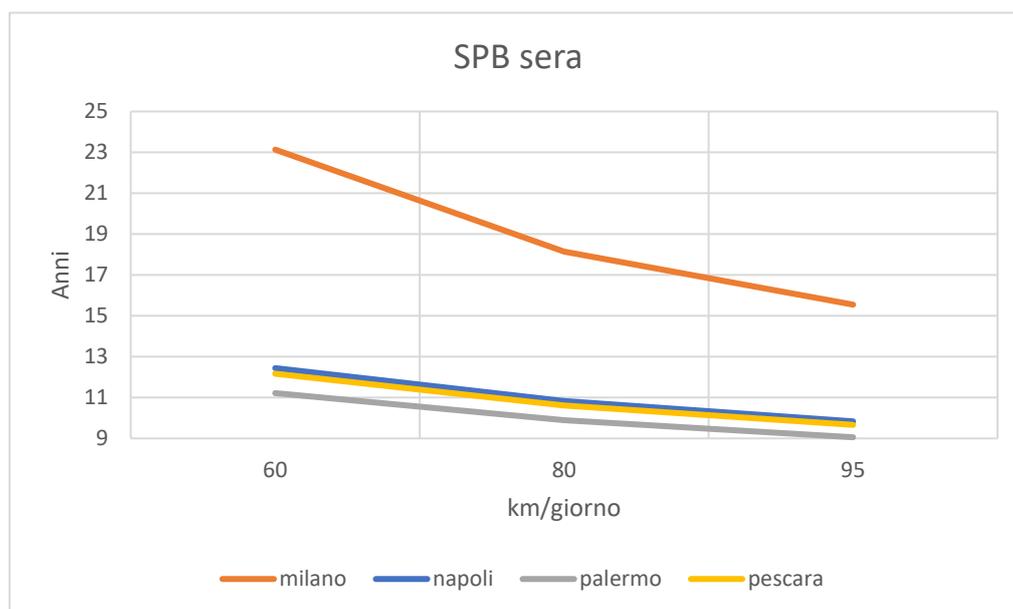
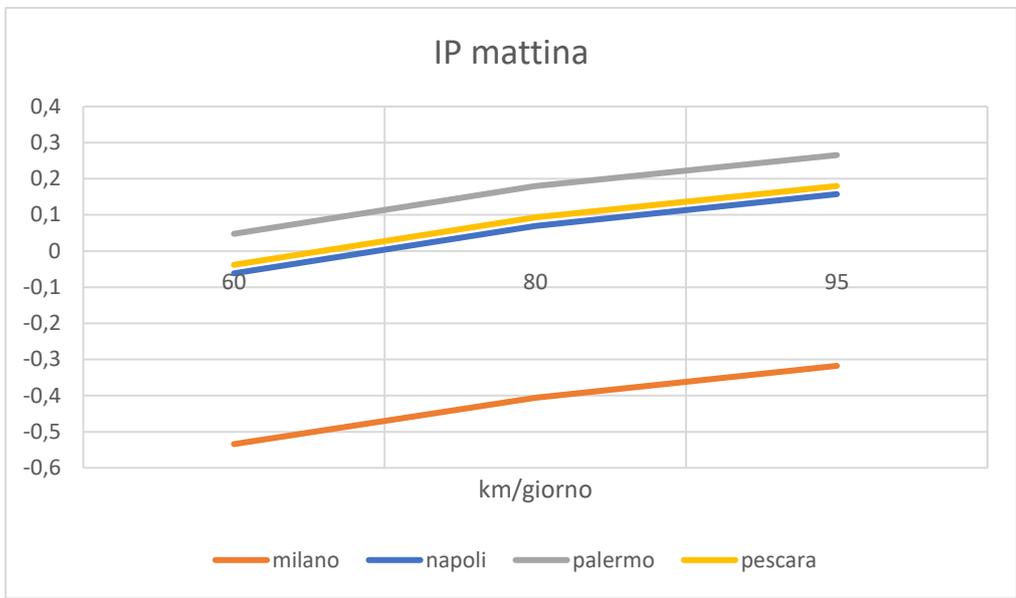
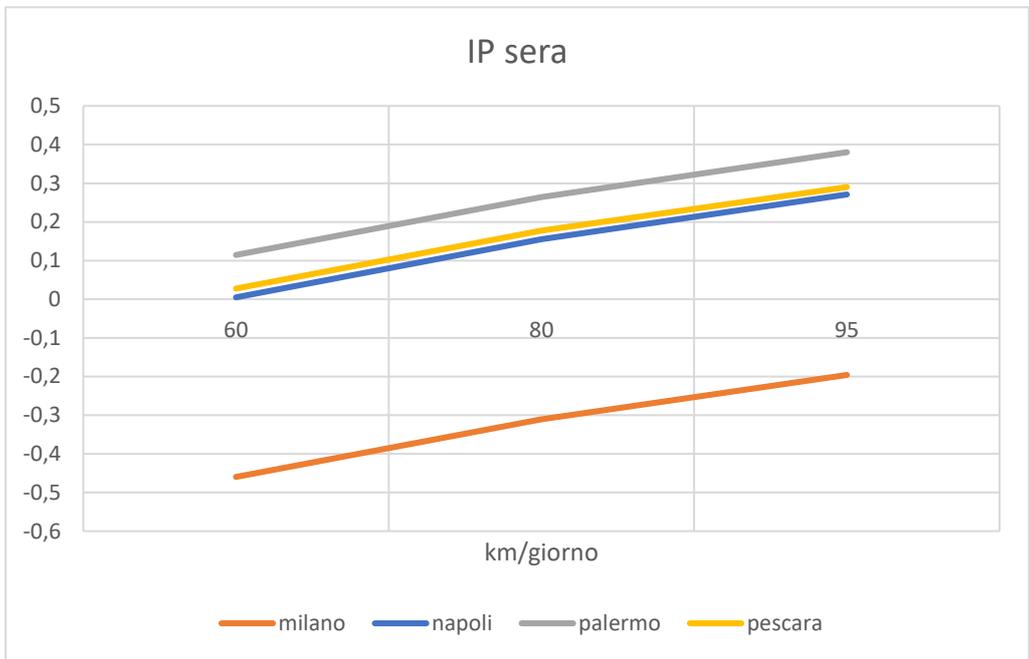


Figura 13- SPB, alla sera al variare dei casi analizzati



*Figura 14-IP al variare dei casi analizzati, al mattino*



*Figura 15-IP al variare dei casi analizzati, alla sera*