

POLITECNICO DI MILANO
Facoltà di Ingegneria dell'Informazione
Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria delle Telecomunicazioni
Dipartimento di Elettronica e Informazione



Modelli di ottimizzazione per il controllo in
tempo reale dei consumi energetici di utenti
residenziali per le future Smart Grid

Relatore: Prof. Antonio CAPONE
Correlatori: Dott. Antimo BARBATO
Dott. Giuseppe CARPENTIERI

Tesi di Laurea di:
Marco LENTINI Matr. 749909

Anno Accademico 2011-2012

Indice

Elenco delle figure	III
Elenco delle tabelle	IV
Abstract	1
Sommario	2
Introduzione	3
1 Stato dell'Arte	7
1.1 Smart Grid	7
1.2 Meccanismi di gestione dell'energia per utenti residenziali	11
2 BEE Project: Scenario Applicativo	16
2.1 Sistemi di domotica	16
2.2 BEE Project	17
2.3 Modelli di gestione dell'energia	19
2.3.1 Introduzione ai modelli	20
2.3.2 Formulazioni	22
3 Definizione dei modelli di ottimizzazione	32
3.1 Modelli on-line	32
3.2 Singolo time slot con gestione batterie	34
3.3 Multi-time slot con gestione batterie	39
3.4 Singolo time slot con gestione batterie e scheduling delle attività	44

3.5	Multi-time slot con gestione batterie e scheduling delle attività . .	49
3.5.1	Fattore di comfort	53
4	Test e risultati	55
4.1	Scenari d'uso	55
4.2	Generazione dell'errore	57
4.2.1	Errore sulla predizione di energia prodotta	57
4.2.2	Errore sullo scheduling delle attività	58
4.3	Risultati numerici	59
4.3.1	Errore sulla predizione di energia prodotta	59
4.3.2	Errore sullo scheduling delle attività	65
5	Conclusioni e sviluppi futuri	70
A	Codice AMPL	74
A.1	Singolo time slot con gestione batterie	74
A.2	Multi-time slot con gestione batterie	77
A.3	Singolo time slot con gestione batterie e scheduling delle attività .	80
A.4	Multi-time slot con gestione batterie e scheduling delle attività . .	83
A.5	Fattore di comfort	86

Elenco delle figure

1.1	Esempio di Smart Grid.	7
2.1	Architettura del sistema BEE per una singola casa.	17
3.1	Esempio di profilo di carico di un'attività.	33
4.1	Potenza generata nell'arco della giornata da un pannello da 1 kWp.	56
4.2	Andamento percentuale dell'errore sulla produzione da PV.	58
4.3	Errore sul PV: influenza dello scheduling nei vari modelli.	64
4.4	Errore sul PV: confronto fra i vari modelli proposti.	66

Elenco delle tabelle

4.1	Attività presenti nello scenario domestico.	56
4.2	Errore sul PV, singolo time slot con gestione batterie.	60
4.3	Errore sul PV, multi-time slot con gestione batterie.	61
4.4	Errore sul PV, singolo time slot gestione batterie e scheduling. . .	61
4.5	Errore sul PV, multi-time slot gestione batterie e scheduling. . . .	62
4.6	Errore sul PV: fattore di comfort.	63
4.7	Errore sullo scheduling: istanze senza batterie.	66
4.8	Errore sullo scheduling: istanze con batterie.	67
4.9	Errore sullo scheduling: fattore di comfort.	68

Abstract

The management of the energy consumption of residential users, currently responsible for a significant portion of the world's energy consumption, can play a key role in improving the efficiency of the entire electrical system. Indeed, the optimization of houses energy plans can allow achieving positive effects for the grid performance, such as reducing the high peaks of the overall energy demand and facilitating the integration of renewable sources. To achieve these goals it's necessary to control home devices and storage systems in an intelligent way, through both the definition of energy plans for future periods and the real-time control of energy resources. In this work I propose some optimization models designed for efficiently managing, in real-time, the energy plan of residential buildings, taking into account also renewable energy sources and storage systems. These models, in particular, are used to react in real-time to events incorrectly predicted or not predictable, with the final goal of executing the energy plan previously defined in an off-line phase of the home energy management system. Finally, I show the results obtained from applying the proposed models on realistic data taken from the italian electricity market.

Sommario

La gestione dei consumi e della produzione di energia di utenze residenziali, ad oggi tra le maggiori responsabili del consumo elettrico mondiale, assume un ruolo chiave per aumentare l'efficienza dell'intero sistema elettrico. Una gestione più efficiente delle risorse energetiche può permettere di ottenere effetti positivi per gli operatori di rete, quali, ad esempio, la riduzione dei picchi di potenza della domanda complessiva di energia o una maggiore facilità di integrazione di fonti rinnovabili. Per perseguire questo obiettivo è necessario controllare in maniera intelligente i dispositivi presenti nell'abitazione e i sistemi di accumulo di energia, sia tramite la definizione di piani energetici per periodi futuri che attraverso il controllo in tempo reale delle risorse energetiche.

In questo lavoro di tesi propongo dei modelli di ottimizzazione che consentono di gestire in maniera efficiente i dispositivi domestici, tenendo conto anche della presenza di fonti di energia rinnovabile e di sistemi di accumulo. Questi modelli, in particolare, sono utilizzati per reagire in tempo reale ad eventi erroneamente previsti o non predicibili, con l'obiettivo finale di rispettare i piani energetici definiti in una precedente fase di lavoro del sistema domestico di gestione dell'energia. Infine, si illustrano i risultati ottenuti dall'applicazione di tali modelli sulla base di dati realistici ricavati dal mercato elettrico italiano.

Introduzione

Negli ultimi anni stiamo assistendo ad un crescente interesse verso l'utilizzo di fonti di energia rinnovabili come solare ed eolico. In Europa, ad esempio, nel 2010 sono stati costruiti impianti per un totale di circa 58,8 GW di potenza, di cui il 40% da energie rinnovabili [1]. L'utilizzo di tali fonti alternative, per loro natura discontinue e talvolta decentralizzate, rende necessario ripensare l'intero sistema elettrico sulla base dei vincoli imposti dalla rete di distribuzione e dall'integrazione della stessa con queste nuove fonti energetiche. In questo nuovo scenario che si va a delineare, i sistemi centralizzati su grande scala, come le centrali nucleari, e i sistemi decentrati dovranno necessariamente cooperare fra loro; questo permetterebbe di gestire efficacemente la discontinuità delle fonti rinnovabili e di far fronte a situazioni in cui le risorse locali non siano sufficienti. Un'altra importante problematica associata alle reti elettriche attuali consiste nel sovradimensionamento delle reti stesse per sostenere i picchi di carico. Tale problema deriva sia dall'assenza di batterie efficienti in grado di stabilizzare la produzione e distribuzione dell'energia, sia alle caratteristiche intrinseche dei profili di domanda dell'energia tipicamente anelastici e altamente correlati. La presenza di picchi di carico provoca un aumento notevole dei costi di costruzione e manutenzione delle infrastrutture, spesso sottoutilizzate durante i periodi non di punta. Infine, la rete elettrica tradizionale soffre di diversi problemi legati ad una distribuzione non efficiente. Una frazione considerevole di energia, infatti, viene sprecata a causa di perdite in fase di trasmissione ed erogazione [2].

Per far fronte a questi problemi si è reso necessario ripensare il concetto della

rete elettrica tradizionale. Stiamo così assistendo ad una reingegnerizzazione della rete elettrica a favore di una struttura “intelligente”, detta Smart Grid. In questo nuovo scenario il singolo utente abbandona il ruolo passivo che rivestiva nelle reti elettriche tradizionali, diventando un attore principale. Grazie all'utilizzo di smart meter, l'utente è ora in grado di reperire in real-time dati sull'attività ed il consumo energetico dei dispositivi all'interno dell'abitazione, e di fornire così alla rete informazioni utili ai distributori in fase di pianificazione. Questo approccio necessita di un'integrazione efficiente tra le tecnologie dell'informazione e le telecomunicazioni, in modo da rendere visibili e fruibili all'utente i vantaggi derivanti dal nuovo sistema elettrico. Le Smart Grid, in particolare, abilitano una serie di meccanismi, quali ad esempio quelli relativi ad una gestione efficiente della domanda di energia (Demand Side Management, DSM), che svolgeranno un ruolo chiave per migliorare l'efficienza della distribuzione di energia e il suo utilizzo. I sistemi DSM inoltre, possono essere utilizzati per massimizzare l'utilizzo di energia proveniente da fonti rinnovabili locali, che si trovano più vicine ai consumatori, riducendo così le perdite.

Il settore residenziale rappresenta uno degli scenari più promettenti per l'implementazione di sistemi DSM. Le abitazioni, infatti, costituiscono il 40% del consumo totale annuo nella maggior parte dei paesi occidentali [3][4]; una gestione più accurata della domanda può ridurre tale consumo. I sistemi DSM si differenziano in due principali categorie: off-line ed on-line. Nello scenario off-line, realizzato sulla base di previsioni su ciò che accadrà nel prossimo futuro (ad esempio, produzione da pannelli fotovoltaici e futuro utilizzo dei dispositivi), il sistema definisce il piano ottimale di energia per periodi a venire. Nel caso on-line invece, la gestione della domanda ha lo scopo di definire in tempo reale il piano energetico, sulla base della situazione reale del mercato dell'energia e sulle effettive esigenze degli utenti. La rete può beneficiare di una gestione più efficiente delle proprie risorse tramite, ad esempio, la riduzione dei picchi di potenza assorbita dalla rete. In tal

modo è possibile evitare sovraccarichi e cadute di tensione elettrica.

In questo ambito si pone il BEE Project [5], un progetto di ricerca del Politecnico di Milano, che definisce dei modelli di ottimizzazione dei consumi energetici di utenze residenziali con l'obiettivo di migliorare l'efficienza della rete elettrica e di apportare benefici alle utenze stesse. A tal fine è stato definito un meccanismo DSM basato su modelli di ottimizzazione, con il compito di programmare, ogni giorno, l'attività degli elettrodomestici nelle abitazioni e gli scambi con la rete per le successive 24 ore. In particolare, al fine di definire il piano energetico per il giorno successivo, i modelli di ottimizzazione necessitano delle previsioni sia sulla produzione di energia da pannelli fotovoltaici che sull'utilizzo futuro dei dispositivi domestici. I risultati di questi modelli off-line sono dei profili energetici, utili al fornitore per ottimizzare la gestione della rete. Purtroppo le previsioni utilizzate dai modelli off-line non saranno mai al 100% corrette, poiché possono essere soggette ad errori dovuti ad errate previsioni o al verificarsi di eventi non predicibili. Per questo motivo diventa indispensabile introdurre meccanismi che siano in grado di reagire in tempo reale a tali eventi, cercando di riprogrammare il consumo di energia in modo coerente con ciò che era stato precedentemente definito.

Obiettivo della tesi

In questo lavoro di tesi propongo alcuni modelli di ottimizzazione dei consumi energetici in ambito residenziale. Questi modelli reagiscono in tempo reale a comportamenti non conformi a ciò che previsto nella fase off-line, con l'obiettivo di rispettare il piano off-line e minimizzare le variazioni riscontrate. In particolare, vengono presentati due diversi modelli di ottimizzazione: il primo compensa tali variazioni con il solo ausilio di sistemi di accumulo di energia (batterie), mentre il secondo è anche in grado di modificare lo scheduling dei dispositivi al fine di perseguire l'obiettivo in esame. Inoltre, per ognuno di questi casi, due diverse varianti

vengono proposte a seconda che la minimizzazione delle variazioni sia realizzata nel singolo time-slot di tempo preso in considerazione, o sull'intera giornata. Infine, sulla base di scenari d'uso e dati realistici, ho valutato le prestazioni dei modelli proposti con differenti errori di previsione.

Piano della tesi

La tesi è suddivisa nel seguente modo:

- *Capitolo 1*: descrive le principali caratteristiche delle Smart Grid ed i meccanismi di gestione dei consumi proposti in letteratura;
- *Capitolo 2*: descrive lo scenario applicativo, analizzando ampiamente il progetto di cui questo lavoro di tesi fa parte;
- *Capitolo 3*: descrive nel dettaglio i modelli utilizzati per la risoluzione del problema;
- *Capitolo 4*: descrive i risultati ottenuti dai test effettuati con i modelli presentati nel precedente capitolo;
- *Capitolo 5*: presenta le considerazioni finali sul lavoro svolto ed indica i possibili sviluppi futuri.

Capitolo 1

Stato dell'Arte

In questo capitolo verrà illustrato il concetto di Smart Grid ed i principali metodi di gestione dell'energia presenti in letteratura.

1.1 Smart Grid

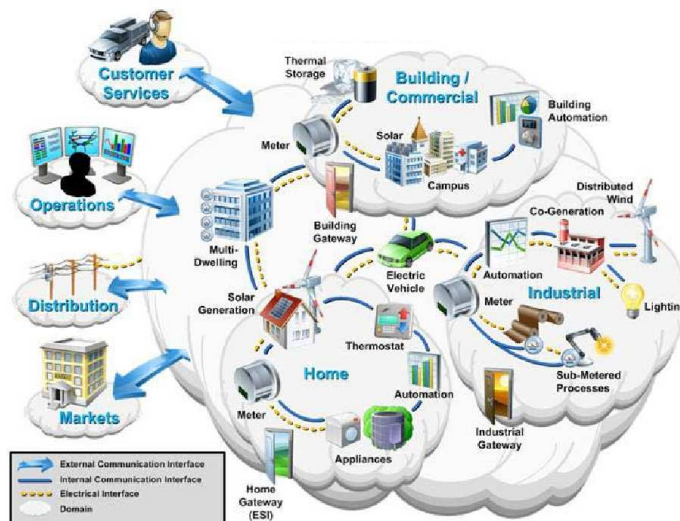


Figura 1.1: Esempio di Smart Grid.

Le idee ed i modelli proposti in questo lavoro vanno inseriti in un contesto nel quale la rete elettrica non è la classica in cui l'utente viene visto solo come un carico passivo, piuttosto il sistema elettrico nel suo complesso deve essere considerato

come una rete intelligente. Una rete elettrica infatti non è un'entità singola ma un aggregato di diverse reti, di molteplici compagnie che ne gestiscono la generazione e di diversi operatori per la trasmissione e la distribuzione. Con l'ampliarsi dell'utilizzo di fonti rinnovabili, anche in ambito domestico, si rende sempre più necessaria una rete di produzione aggiuntiva che si deve ben integrare con quella tradizionale già presente. Questo si traduce in un controllo sul territorio non più centralizzato ma distribuito, in flussi di potenze bidirezionali e in reti attive. Di conseguenza non sarà più sufficiente avere un controllo della produzione a carattere nazionale ma sarà necessario, anche a livello locale, monitorare e gestire la distribuzione di energia prodotta in bassa e in media tensione, nonché integrare quella proveniente da fonti rinnovabili. Per questo motivo non è più sufficiente la rete elettrica esistente, concepita solo per il trasporto unidirezionale dell'energia dalle grandi centrali ad un'utenza passiva, ma è necessaria la creazione di una rete intelligente, detta smart grid. La smart grid aumenta la connettività, l'automazione ed il coordinamento tra i gestori, i distributori, gli utenti e la stessa rete, permettendo una maggiore competizione tra fornitori, un maggiore e più efficiente utilizzo delle energie rinnovabili ed un controllo maggiore su una porzione di rete fondamentale, quella di distribuzione, finora non controllabile. Le principali caratteristiche di una smart grid sono [6]:

- **Auto riparazione:** grazie ad un continuo monitoraggio ed un controllo costante della potenza, la rete può individuare (ed anticipare) problemi di sovraccarico o interruzione di energia;
- **Interazione:** il sistema permette l'interazione tra distributori e utenti, consentendo il flusso bidirezionale di energia ed informazioni;
- **Robustezza:** la rete garantisce una migliore identificazione ed una più celere risposta ad eventi di interruzione manuale della fornitura elettrica o causata da disastri naturali, consentendo di isolare le aree coinvolte e

redirezionare il flusso energetico verso altre reti; si garantisce inoltre una maggiore protezione e sicurezza delle informazioni;

- **Ottimizzazione dei guadagni:** le smart grid permettono un uso più efficiente della rete e, riducendo le perdite di potenza, una riduzione dei costi di manutenzione e di investimento;
- **Compatibilità:** la generazione di potenza, la sua distribuzione e l'accumulo di energia diventano compatibili;
- **Integrazione:** include i processi di ottimizzazione, integrazione dell'informazione e la standardizzazione ed il miglioramento della gestione della rete.

Per rendere tutto ciò possibile, le smart grid utilizzano un'ampia gamma di nuove tecnologie (tecnologie per il controllo della rete, tecnologie dell'informazione e tecnologie di gestione) che coinvolgono tutti gli aspetti della rete: dalla generazione di energia, alla sua trasmissione e distribuzione, alla raccolta di informazioni, raggiungendo così un alto grado di integrazione tra il flusso di energia e di informazioni. Tuttavia, essendo una tecnologia relativamente recente, non esiste una definizione univoca di smart grid nel mondo [6]. Se in America l'obiettivo è principalmente quello di ringiovanire la vecchia rete di distribuzione, migliorando il livello del servizio e l'interazione con l'utente, in Europa si cerca di promuovere l'uso delle energie rinnovabili in modo che l'industria dell'energia diventi più efficiente, flessibile e integrata con l'ambiente in cui opera. Alcuni recenti standard IEEE e NIST [7],[8],[9] ne descrivono l'ossatura principale definendo i seguenti domini:

- **Generazione:** dominio che comprende tutti i siti preposti alla produzione di energia in grande quantità. Le sorgenti possono essere classificate in rinnovabili variabili (solare ed eolico), rinnovabili non variabili (idrico, biomasse e geotermico), o non rinnovabili (nucleare, carbone e gas). Possono

essere inoltre sfruttati dei sistemi di accumulo dell'energia per una successiva distribuzione.

- **Trasmissione:** dominio a cui appartiene la rete di trasporto di grandi quantità di energia attraverso linee di trasmissione su lunga distanza, connettendo i luoghi di generazione ai centri di consumo della rete. In questo stadio sono anche contenute le sottostazioni di trasmissione e distribuzione.
- **Distribuzione:** dominio che comprende la parte di rete che garantisce la fornitura elettrica agli utenti finali ed il prelievo di quella prodotta dagli utenti attivi. La rete di distribuzione è in grado di comunicare con gli smart meters e con tutti i dispositivi intelligenti installati, grazie ad una connessione bidirezionale (wireless o cablata). Può inoltre gestire la connessione con gli apparati di accumulo di energia e con risorse energetiche alternative a livello di distribuzione.
- **Utenti:** dominio di cui fan parte tutti gli utenti finali (domestici, commerciali ed industriali) che sono connessi alla rete di distribuzione tramite gli smart meters. Questi controllano e gestiscono il flusso di energia da e verso gli utenti e forniscono informazioni circa i loro profili di consumo. Ogni utente può inoltre generare, immagazzinare e gestire l'uso dell'energia e dei propri dispositivi connessi alla rete.
- **Operatori:** dominio degli operatori che gestiscono le dimensioni e controllano il flusso di corrente nella rete. Usano una rete di connessione bidirezionale per comunicare con le sottostazioni, gli utenti finali ed i dispositivi; ciò ne consente il monitoraggio, il controllo e la supervisione. Tutte queste informazioni raccolte possono rivelarsi fondamentali come supporto alle decisioni.
- **Mercato:** dominio che coordina e gestisce i partecipanti al mercato elettrico. Provvede alla gestione del mercato, alla vendita, alla distribuzione e alle

contrattazioni circa i servizi elettrici. Si interfaccia con tutti gli altri stadi e si assicura che essi siano coordinati in un mercato competitivo.

- **Service Provider:** gestisce tutti gli operatori nel proprio dominio (come ad esempio gli utenti finali tramite un portale web per la gestione efficiente e la fornitura dell'energia, lo scambio di dati e la gestione dei dispositivi).

Il primo esempio di smart grid è stato installato in Italia da Enel S.p.A.. Il progetto, completato nel 2005, è ad oggi il più ampio esempio di smart grid esistente al mondo [10].

1.2 Meccanismi di gestione dell'energia per utenti residenziali

La gestione delle smart grid è un concetto introdotto in letteratura solo recentemente. I differenti punti di vista sono correlati ai diversi aspetti del mercato dell'energia che caratterizzano ogni paese, alle differenti fonti di energia analizzate ed a molti altri fattori. In [11],[12],[13],[14],[15] si discute dell'importanza di una gestione ottimizzata dei consumi per migliorare le prestazioni dell'intera rete. In particolare, tramite l'introduzione di un controllore locale, si provvede all'ottimizzazione delle decisioni locali tenendo però conto dei bisogni dell'intera rete. Il controllore gestisce i punti chiave per la generazione locale ed i dispositivi di accumulo e fornisce all'utente un'interfaccia per la partecipazione al mercato elettrico ed il coordinamento con le condizioni di mercato. Le informazioni sono ricevute dal controllore attraverso una connessione o immesse manualmente dall'utente. Il controllore deve operare in maniera consapevole rispetto ai parametri commerciali, quali le tariffe delle utility, le condizioni del mercato elettrico ed i prezzi dell'energia ricavata da fonti alternative. La capacità di gestire tali informazioni è un requisito chiave per un coordinamento intelligente delle risorse distribuite in una smart grid, specialmente in un ambiente competitivo come

quello del mercato elettrico. Tuttavia, il controllore gestisce esclusivamente la rete elettrica di distribuzione considerandola quindi come una parte isolata dal resto del sistema. L'ambiente domestico viene analizzato in numerosi articoli scientifici. In [16],[17],[18] vengono presentati dei modelli matematici con l'obiettivo di massimizzare i prodotti derivanti dalla partecipazione al mercato elettrico. Una più intelligente gestione dell'energia può infatti portare notevoli guadagni [19],[20],[21]. Il progetto Multisol, descritto in [16], ha come obiettivo la gestione dei consumi dell'utente domestico (che avrà una partecipazione attiva al mercato) in relazione alla produzione dei pannelli fotovoltaici. In particolare questa architettura attua una separazione tra i lati produzione e consumo. Le risorse per la produzione (pannelli fotovoltaici, sistemi di accumulo di energia, etc.) sono connesse alla "Power production control board" per fornire la potenza ai carichi attraverso una classica linea di alimentazione. Un modulo di gestione integrato nel lato produzione regola i vari flussi di potenza. Sono inoltre essenziali gli apparati di misura e per le telecomunicazioni. Il sistema di predizione è infatti il "cuore" che riceve i dati, calcola la strategia da attuare e invia le istruzioni agli apparati. Tuttavia non vengono analizzate le prestazioni complessive del sistema e non viene realizzata una descrizione matematica degli utenti, i cui carichi non sono perciò ottimizzati. Inoltre viene introdotto un modello di mercato molto semplificato non corrispondente alla realtà né italiana, né di alcun altro paese dell'Unione Europea.

I meccanismi di gestione della domanda (Demand Side load Management, DSM) sono oggetto di studio da parte della comunità scientifica, per via dei possibili vantaggi realizzabili attraverso questo tipo di meccanismo [22], come il "peak shaving" [23] e lo spostamento del carico [24]. L'avvio degli elettrodomestici, per esempio, può essere rinviato arrecando solo un piccolo disagio agli utenti; anche solo ottimizzare questa procedura può portare a riduzioni significative del picco [25]. I sistemi DSM sono generalmente divisi in due categorie: off-line e on-line.

Nel primo scenario tali meccanismi si basano su dati frutto di previsioni per periodi futuri. In [26] ad esempio, uno scenario di programmazione dinamica si propone di bilanciare il livello di comfort degli utenti e il loro stile di vita con un algoritmo in grado di ridurre la spesa necessaria per l'energia elettrica utilizzata per soddisfare tali preferenze. Il modello proposto gestisce il consumo di energia elettrica su archi temporali di minuti o secondi, valutando, negli stessi periodi, l'andamento del prezzo di mercato e le previsioni meteorologiche per definire una soluzione ottima per periodi futuri. Inoltre, un'interfaccia tra utility e consumatori è in grado di attivare/disattivare i dispositivi domestici, secondo accordi presi con lo scopo di ottenere un effetto di riduzione del carico. Questo lavoro viene esteso in [27], in cui è presentata una soluzione più generalizzata per ottimizzare la gestione dell'energia, supponendo che tali decisioni siano prese senza che le previsioni siano note. I meccanismi DSM off-line però, devono tener conto delle possibili discrepanze fra i dati frutto di previsioni e ciò che si verifica in tempo reale. Per questa ragione sono stati introdotti algoritmi on-line, con l'obiettivo di ridefinire in tempo reale il piano energetico e di reagire agli eventi che si verificano durante il giorno. In [28] ad esempio, è presentato un modello di ottimizzazione per regolare il carico orario di un utente residenziale in base alla variazione dei prezzi del mercato dell'elettricità. La gestione della domanda in tempo reale è anche discussa in [29]. In questo lavoro si descrive un modello di ottimizzazione multilivello per la gestione della domanda di carico di un gruppo di case. L'algoritmo di controllo fornisce le previsioni del consumo di energia, il cui profilo può essere modificato in real-time per far fronte alle variazioni riscontrate rispetto alle previsioni. In [30] è illustrato il metodo chiamato "Energy on Demand": in tale sistema le necessità di carico vengono soddisfatte da un sistema basato su esplicita richiesta. Con l'applicazione di questo metodo è possibile ridurre il consumo di energia senza ridurre la qualità della vita delle famiglie. Inoltre, i fornitori di energia sono autorizzati ad impostare e modificare i limiti di carico sottoscritti con i propri clienti. L'ap-

plicazione di meccanismi di DSM al settore residenziale attraverso una struttura multi livello è discussa in [29],[31],[32]; il consumo energetico viene controllato usando la flessibilità dei vari servizi che hanno la possibilità di essere modificati e controllati, riuscendo in tale modo a ridurre i picchi di energia. Il controllo viene gestito come un problema di scheduling in cui l'energia è considerata come una risorsa condivisa dalle applicazioni non tenendo tuttavia conto delle preferenze dell'utente. L'idea principale dei meccanismi di controllo multi-livello è quella di utilizzare più livelli di controllo. Il sistema elettrico è infatti composto da molti elementi spesso eterogenei tra loro come le differenti fonti di energia ed il sistema di distribuzione, dall'alta alla bassa tensione che raggiunge i consumatori. Inoltre all'interno delle case sono presenti numerose applicazioni (sistema di ventilazione e condizionamento, sistema di illuminazione, elettrodomestici). Un sistema che possa gestire tutti questi aspetti simultaneamente risulta molto complesso ed il problema diventa difficile da risolvere. La suddivisione in più livelli permettere al sistema di decomporre il problema in tanti problemi più piccoli per trovare una soluzione molto vicina a quella ottima. Il flusso di informazione fra i vari livelli permette la loro sincronizzazione ed il coordinamento tra di essi. In [29] vengono analizzati due schemi di decomposizione, lungo l'asse spaziale e temporale. Prima il sistema di distribuzione dell'energia viene diviso in tanti livelli che rappresentano la realtà domestica; successivamente ognuna di queste realtà viene suddivisa in tanti strati rappresentanti le diverse applicazioni. Questi livelli sono poi suddivisi in due livelli temporali, uno predittivo ed uno reattivo. Mentre il livello predittivo predice i consumi, quello reattivo si occupa dell'allocazione real time, seguendo le previsioni e reagendo alle perturbazioni. I problemi di DSM sono NP-difficili da risolvere e perciò in [33] sono affrontati con metodi di tipo Tabu Search. Questi sono utilizzati per risolvere un algoritmo di controllo che consiste nella ricerca della soluzione globale per il problema della gestione dell'energia in ambito domestico. Il sistema di automazione domestico controlla i dispositivi determinandone

il tempo d'inizio ed alcune caratteristiche del loro funzionamento (per esempio la temperatura dei sistemi di condizionamento). L'ottimizzazione dell'uso dell'energia in ambito domestico è anche realizzata con modelli di ottimizzazione [34] e con la teoria dei giochi [35],[32]. Con questo tipo di algoritmi anche se tutti i "giocatori" sono egoisti, cercando di raggiungere il proprio obiettivo finiscono per raggiungere anche l'obiettivo globale. Tuttavia, in tutti i lavori svolti finora non è mai stato considerato l'intero ambiente domestico, con carichi e generatori, insieme alla disponibilità di energia ed ai prezzi di mercato. Inoltre, lo scenario costituito da più utenze cooperative, è stato analizzato solo in maniera superficiale, senza approfondire i reali vantaggi che potrebbero essere determinati da un tale tipo di approccio.

Capitolo 2

BEE Project: Scenario Applicativo

In questo capitolo verrà descritto lo scenario applicativo, analizzando ampiamente il progetto di cui questo lavoro di tesi fa parte.

2.1 Sistemi di domotica

La Home Automation, più comunemente detta domotica, è la scienza che si occupa della gestione e dell'automazione delle attività domestiche al fine di migliorare la qualità della vita, la sicurezza domestica, ridurre i costi e risparmiare energia in ambito residenziale. Il perseguimento di tali obiettivi richiede l'apporto di molte tecnologie e professionalità, tra le quali ingegneria edile, elettrotecnica, elettronica, delle telecomunicazioni ed informatica. Negli ultimi anni, nel campo della domotica e del risparmio energetico sono stati sviluppati numerosi strumenti per aumentare la consapevolezza degli utenti riguardo i consumi domestici in un'ottica di risparmio energetico. Grazie a sistemi automatici di lettura dei consumi e di controllo dei dispositivi domestici, l'utente è in grado di avere in qualsiasi momento ogni dettaglio sull'utilizzo degli elettrodomestici, aumentando così la consapevolezza dei propri consumi energetici. È stato dimostrato che un semplice utilizzo più responsabile e consapevole degli elettrodomestici possa portare ad

una riduzione dei consumi anche del 15% [36] . In questo contesto si pone il BEE Project, di seguito illustrato.

2.2 BEE Project

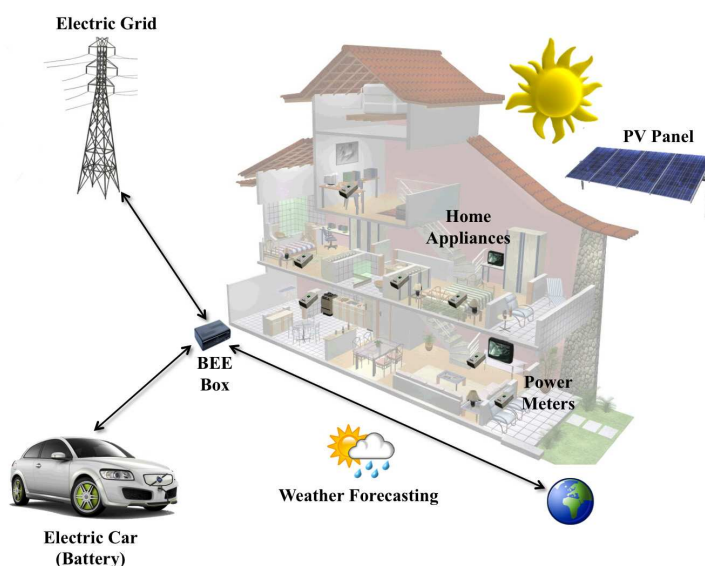


Figura 2.1: Architettura del sistema BEE per una singola casa.

Il BEE (Bright Energy Equipment) Project [5] è un'attività di ricerca nata all'interno di un laboratorio interdipartimentale del Politecnico di Milano, esso comprende sia il Dipartimento dell'Energia che quello di Elettronica e Telecomunicazioni. L'obiettivo del progetto è sviluppare dei prototipi di infrastrutture, sia hardware che software, capaci di fornire strumenti avanzati alle utenze residenziali al fine di renderle parti attive nel futuro sviluppo delle Smart Grid. In tale scenario, rappresentato in modo sintetico in Figura 2.1, le utenze sono in grado sia di comprare che di vendere al mercato l'energia elettrica. Ogni abitazione, dunque, potrà essere dotata di pannelli fotovoltaici (PV) per la produzione di energia, ma anche di sistemi di accumulo (batterie) che consentano al sistema di immagazzinare energia; per gli elettrodomestici utilizzati durante la giornata, a seconda delle abitudini e delle preferenze dei singoli utenti, si conoscerà l'esatto

istante di avvio. Per poter supportare l'utente nella gestione del piano energetico è stata realizzata una nuova architettura che permette di monitorare e controllare il consumo di energia in tempo reale. Gli elementi principali dell'architettura sono:

- **Power Meter:** gli Smart Meter sono utilizzati per il monitoraggio dei consumi degli elettrodomestici nella casa; in un prossimo sviluppo dell'architettura verranno introdotti dei Meters anche per il gas e l'acqua.
- **Il generatore locale (es. Pannelli fotovoltaici):** la previsione della produzione non programmabile del generatore è parte integrante del sistema, garantendo così una previsione migliore dello scambio tra la rete e l'utente.
- **Batteria:** l'uso di dispositivi capaci di immagazzinare energia consente al sistema una gestione flessibile nello scambio con la rete.
- **Sensori:** i dati letti giocano un ruolo chiave nel sistema; informazioni interessanti sono ad esempio la posizione nella casa dell'utente o le informazioni riguardanti l'ambiente domestico, come temperatura e illuminazione.
- **Interfaccia Utente:** è stata sviluppata un'interfaccia grafica per l'utente, sia per terminali fissi che mobili, consentendo così una migliore e più semplice interazione dell'utente col sistema. Le applicazioni di cui sopra permettono di gestire la rete di sensori e di consultare i dati e i risultati forniti dal sistema in modo efficace ed intuitivo.
- **BEE Box:** è il cuore dell'architettura proposta. Questa unità di elaborazione si basa su meccanismi di gestione delle richieste, ha l'obiettivo di gestire e ottimizzare il piano energetico per i periodi futuri e di scambiare le informazioni con tutti i componenti del sistema elettrico, come il fornitore di energia ed il mercato.

Il sistema è stato quindi progettato come uno strumento di supporto per gestire i consumi e la produzione di energia per singole residenze o gruppi cooperanti, con lo scopo duplice di minimizzare la bolletta dell'utente e di aumentare l'efficienza della rete elettrica complessiva. A tal fine è stato introdotto un meccanismo di gestione delle richieste basato su metodi di ottimizzazione con l'obiettivo di programmare giorno per giorno le attività degli elettrodomestici nella casa e gli scambi di potenza con la rete per le future 24 ore, tramite modelli di ottimizzazione. La definizione del piano energetico della giornata è ottenuta per mezzo di modelli di ottimizzazione che richiedono una previsione della produzione dei pannelli fotovoltaici (PV) e dell'utilizzo dei dispositivi. Per quanto riguarda i PV è stato definito un metodo di apprendimento ad-hoc che consulta le previsioni meteorologiche dal web, riuscendo a prevedere la produzione del pannello per le successive 24 ore. Sono stati poi definiti degli algoritmi predittivi per le richieste di carico della casa (quali apparecchi saranno attivati e quando) che utilizzano le informazioni e i dati forniti dalla rete di sensori. Grazie alle previsioni fatte (produzione PV e carico richiesto) ed alla conoscenza della tariffa energetica, i modelli sono quindi in grado di definire un piano energetico per il giorno seguente, con l'obiettivo di minimizzare la bolletta. Nello specifico i modelli sono usati per programmare quando:

- comprare, vendere o immagazzinare energia;
- avviare gli elettrodomestici nell'abitazione.

2.3 Modelli di gestione dell'energia

Si illustrano i modelli esistenti per la gestione dell'energia nel sistema BEE Project.

2.3.1 Introduzione ai modelli

Nel creare un sistema di gestione dei consumi in un ambiente domestico l'obiettivo finale non è esclusivamente quello di minimizzare la spesa elettrica (data la natura molto economica della commodity il risparmio ottenuto non giustificherebbe la spesa necessaria per l'installazione dell'intero impianto), ma anche quello di migliorare l'efficienza dell'intera rete. Ciò si traduce in risparmi per i produttori ed i distributori dell'energia, con conseguenti vantaggi economici anche per l'utenza finale. In proposito sono stati definiti due diversi casi:

- **Utenti non cooperativi:** nel quale gli utenti sono gestiti come unità singole a sé stanti in grado di gestire autonomamente l'energia in base alle proprie esigenze. In questo scenario sono previsti due modelli che differiscono per il modo in cui vengono gestite le attività di utilizzo degli elettrodomestici; in un primo caso, per ognuna di queste attività, viene definito esclusivamente il tempo di attivazione, imponendo che non possa essere interrotta; nel secondo modello, invece, viene presa in considerazione la possibilità di interrompere le attività, laddove questo possa portare beneficio, per poi riprenderle in un secondo momento.
- **Utenti cooperativi:** nel quale gli utenti non vengono più considerati come delle entità singole ma decidono di cooperare per raggiungere uno scopo comune, tenendo comunque in conto le esigenze del singolo utente. Come per gli utenti non cooperativi si cerca quindi di rispettare le preferenze e le abitudini dell'utente, di sfruttare la presenza dei pannelli fotovoltaici e delle batterie in modo da risparmiare, avendo come vincolo la massima potenza prelevabile dalla rete. Nel caso in cui però più utenti decidano di cooperare fra loro, non è più solo la potenza prelevata dal singolo ad essere limitata, ma bisogna tener conto anche del limite sulla potenza cumulativa prelevabile dalla rete. Di contro, la gestione di utenti cooperanti è particolarmente

gradita alle società di distribuzione di energia elettrica, che possono così dimensionare i propri impianti di distribuzione su grandi utenze.

Per meglio gestire l'utilizzo e l'attivazione dei dispositivi durante la giornata, l'intero arco di tempo analizzato viene diviso in 96 time slot di 15 minuti ciascuno (insieme T). In ogni time slot può essere eseguita una attività, associata ad un elettrodomestico presente nell'abitazione, raggruppate nell'insieme A. Più precisamente in ogni time slot può essere eseguita una specifica fase "f" dell'intero periodo di attività di ogni elettrodomestico. Queste fasi sono contenute nell'insieme F. Per ognuna di queste fasi, per ogni dispositivo, è noto il profilo di carico lp_{af} che ne descrive il consumo di potenza. Sono inoltre dati del problema e definiti per ogni attività "a", il tempo minimo di inizio ST_a , il tempo di fine ET_a , a seconda delle particolari esigenze ed abitudini dell'utente, e la durata dell'intero periodo di attività del dispositivo nt_a in time slot. In realtà per il tempo di fine di ogni attività sono definite due quantità, ET_a^{min} ed ET_a^{max} , che indicano un intervallo di tempo entro il quale l'attività può avere fine: maggiore è la quantità ($ET_a^{max} - ST_a$), maggiore sarà la flessibilità lasciata al modello per poter gestire in maniera efficiente l'ambiente casa. I time slot utili per l'attivazione sono anche raccolti nell'insieme Ts_a , sottoinsieme di T definito per ogni attività. Caratteristica principale dello scenario è, come già detto, la possibilità sia di vendere che di acquistare energia dalla rete; g_t e c_t ne rappresentano rispettivamente il prezzo in ogni time slot.

Nell'implementazione di un modello che ottimizzi il consumo di energia in un contesto domestico munito di generatori locali (PV) si possono prevedere due fasi di lavoro:

- Off-line: il sistema pianifica l'utilizzo di energia per il giorno seguente;
- On-line: il sistema reagisce in real-time agli eventi non previsti e/o per i quali la predizione è risultata errata, cercando di operare nella maniera più coerente possibile con quanto pianificato nella fase off-line.

In primo luogo è necessario quindi definire un modello di ottimizzazione che consenta di realizzare la pianificazione off-line. Vengono riportate quattro formulazioni per questa fase.

2.3.2 Formulazioni

Definizioni

- Insieme orizzonte temporale: T
 - time-slot della stessa lunghezza: $t \in T$
- Insieme delle fasi: F
- Insieme delle attività: A (ognuna associata ad un elettrodomestico)
 - tempo d’inizio: $ST_a \quad \forall a \in A$
 - tempo di fine: $ET_a^{min} / ET_a^{max} \quad \forall a \in A$
 - durata: $nt_a \quad \forall a \in A$
 - insieme dei time slot utili per l’attivazione: $Ts_a \quad \forall a \in A$
 - profilo di carico: $lp_{af} \quad \forall a \in A, f \in F$ [W]
 - banda di controllo: $cb_{af} \quad \forall f \in F$ (%)
 - preemption: $P_{af} \quad \forall a \in A, f \in F$ (binario)
- Insieme delle batterie: B
 - carica minima: $\gamma_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - carica massima: $\gamma_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità minima di carica: $\tau_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità massima di carica: $\tau_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità minima di scarica: $\vartheta_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]

- velocità massima di scarica: $v_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
- istante in cui è richiesta la carica: $dd_b \quad \forall b \in B$
- quantità di carica richiesta: $rch_b \quad \forall b \in B$ [W]
- carica iniziale: $ich_b \quad \forall b \in B$ [W]
- efficienza della batteria: $\eta_b \quad \forall b \in B$ ($0 \leq \eta_b \leq 1$)
- tempo di carica/scarica: h
- perdita quando la batteria non è in uso: λ

- Costi:

- acquisto: $c_t \quad \forall t \in T$ [€/W]
- vendita: $g_t \quad \forall t \in T$ [€/W]

- Potenze:

- potenza generata dai PV: $\pi_t^{PV} \quad \forall t \in T$ [W]
- potenza limite in entrata: $\pi_t^{IN} \quad \forall t \in T$ [W]
- potenza limite in uscita: $\pi_t^{OUT} \quad \forall t \in T$ [W]
- rumore bianco: $n_t \quad \forall t \in T$
- potenza istantanea: $p_{atf} \quad \forall a \in A, t \in T, f \in F$ [W]
- potenza istantanea della batteria: $p_{bt}^B \quad \forall b \in B, t \in T$ [W]

Formulazioni base

In questa prima formulazione vengono fatte due assunzioni:

- Le attività non sono interrompibili;
- Ogni fase di ogni attività deve rispettare esattamente il proprio profilo di carico.

Funzione Obiettivo:

L'obiettivo è di massimizzare il guadagno avuto dalla produzione di energia rispetto alla spesa dovuta all'acquisto di energia dalla rete

$$\max \sum_{t \in T} (g_t \cdot z_t - c_t \cdot y_t) \quad (2.1)$$

Scheduling delle attività:

Definiamo una variabile che indica il tempo d'inizio di ogni attività

$$x_{at} = \begin{cases} 1 & \text{se l'attività a inizia nel time slot } t \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Perché un'attività venga eseguita all'interno dell'intervallo (ST_a, ET_a^{max}) , essa deve avere inizio in un intervallo che sia compreso tra $(ST_a, ET_a^{max} - nt_a + 1)$

$$\sum_{t=ST_a}^{ET_a^{max} - nt_a + 1} x_{at} = 1 \quad \forall a \in A \quad (2.2)$$

In ogni fase di ogni attività, la potenza istantanea deve essere uguale al profilo di carico definito per quella specifica fase

$$p_{atf} = lp_{af}x_{a(t-f+1)} \quad \forall a \in A, t \in T, f \in F : f \leq t \quad (2.3)$$

Carica / Scarica delle batterie:

Definiamo due variabili binarie che indichino, istante per istante, lo stato della batteria

$$\omega_{bt}^C = \begin{cases} 1 & \text{se la batteria } b \text{ viene caricata nell'istante } t \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

$$\omega_{bt}^D = \begin{cases} 1 & \text{se la batteria } b \text{ viene scaricata nell'istante } t \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

In ogni istante di tempo una batteria può essere in tre stati: carica, scarica, non utilizzo. I due stati di carica e scarica non possono verificarsi contemporaneamente

$$\omega_{bt}^C + \omega_{bt}^D \leq 1 \quad \forall t \in T, b \in B \quad (2.4)$$

Le velocità di carica e scarica delle batterie non possono essere scelte arbitrariamente ma sono regolate dai rispettivi tempi

$$\begin{aligned} v_{bt}^C &\leq \tau_b^{max} \cdot \omega_{bt}^C & v_{bt}^C &\geq \tau_b^{min} \cdot \omega_{bt}^C \\ v_{bt}^D &\leq \vartheta_b^{max} \cdot \omega_{bt}^D & v_{bt}^D &\geq \vartheta_b^{min} \cdot \omega_{bt}^D \end{aligned} \quad (2.5)$$

La carica di una batteria all'istante t è legata alla carica della batteria all'istante $t-1$; a questa va aggiunta la carica acquisita (se la batteria è in fase di carica) e sottratta la quantità di carica persa a causa della scarica (dovuta ad una fase di scarica) oppure durante un periodo di mancato utilizzo

$$e_{bt}^B = e_{b(t-1)}^B + \eta_b v_{bt}^C - \frac{1}{\eta} v_{bt}^D - \lambda (a - \omega_{bt}^C - \omega_{bt}^D) \quad \forall b \in B, t \in [2, 96] \quad (2.6)$$

con:

- $e_{b(t-1)}^B$ energia della batteria al tempo $t-1$
- $\eta_b v_{bt}^C$ energia immessa nella batteria in un time slot tenendo conto dello stato di efficienza della batteria
- $\frac{1}{\eta} v_{bt}^D$ energia prelevata dalla batteria in un time slot tenendo conto dello stato di efficienza della batteria
- $\lambda (a - \omega_{bt}^C - \omega_{bt}^D)$ energia persa durante un periodo di non utilizzo della batteria

Per ogni batteria il livello di energia è condizionato dalle costanti che ne determinano la capacità massima ed il livello di carica minimo necessario a non danneggiarla

$$e_{bt}^B \geq \gamma^{min} \quad \forall b \in B, t \in T \quad (2.7)$$

$$e_{bt}^B \leq \gamma^{max} \quad \forall b \in B, t \in T \quad (2.8)$$

Bilanciamento Consumo / Produzione:

La potenza acquistata e quella venduta devono essere quantità positive

$$\left. \begin{array}{l} y_t \geq 0 \quad \text{potenza acquistata} \\ z_t \geq 0 \quad \text{potenza venduta} \end{array} \right\} \forall t \in T \quad (2.9)$$

Potenza complessiva:

La potenza consumata complessiva deve essere uguale alla totale potenza prodotta

$$y_t + \pi_t^{PV} + \sum_{b \in B} v_{bt}^D = z_t + n_t + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F} p_{atf} + \sum_{b \in B} v_{bt}^C \quad \forall t \quad (2.10)$$

Limiti contrattuali:

Devono essere rispettati i limiti contrattuali su

$$\left. \begin{array}{l} y_t \leq \pi_t^{IN} \quad \text{Limite sulla massima potenza prelevabile dalla rete} \\ z_t \leq \pi_t^{OUT} \quad \text{Limite sulla massima potenza cedibile alla rete} \end{array} \right\} \forall t \in T \quad (2.11)$$

Formulazione con attività interrompibili

In questa formulazione viene mantenuta l'assunzione fatta riguardo il profilo di carico che ogni attività è tenuta a rispettare in ogni singola fase, viene però meno l'ipotesi di non interrompibilità delle attività. Per ogni fase di ciascuna attività viene infatti definito un parametro di preemption che indica se la fase è interrompibile o meno. Questo comporta una modifica dei vincoli riguardanti lo scheduling delle attività:

- per le attività in cui $P_{af} = 0 \quad \forall 1 \leq f \leq nt_a$ (tutte le fasi dell'attività a non sono interrompibili) il modello rimane quello della formulazione base;
- per le attività in cui almeno un $P_{af} = 1$:

Definiamo una variabile che indica quale fase di un'attività viene svolta in ogni time slot

$$x_{atf} = \begin{cases} 1 & \text{se la fase } f \text{ dell'attività } a \text{ è eseguita nel time slot } t \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Questa variabile è definita solo per:

$$\begin{aligned} 1 &\leq f \leq nt_a \\ t &\geq ST_a \\ t &\leq ET_a^{max} \end{aligned}$$

Perché le attività vengano eseguite all'interno dell'intervallo desiderato è necessario imporre che la fase finale sia compresa tra il tempo minimo ed il tempo massimo di fine dell'attività

$$\sum_{t=ET_a^{min}}^{t=ET_a^{max}} x_{atnt_a} \geq 1 \quad \forall a \in A \quad (2.12)$$

e che tutte le fasi dell'attività vengano eseguite tra il tempo minimo di inizio ed il tempo massimo di fine attività

$$\sum_{t=ST_a}^{t=ET_a^{max}} x_{atf} \geq 1 \quad \forall a, f : 1 \leq f \leq nt_a \quad (2.13)$$

Tuttavia è possibile che in una attività interrompibile possano esserci delle fasi che devono essere eseguite immediatamente dopo la fase precedente; per le fasi non interrompibili, è necessario quindi introdurre il vincolo

$$x_{atf} \leq x_{a(t+1)(f+1)} \quad \forall a, t, f : 1 \leq f \leq nt_a - 1, P_{af} = 0, ST[a] \leq t \leq ET_a^{max}[a] - 1 \quad (2.14)$$

È necessario imporre, inoltre, l'unicità di esecuzione di ogni fase: una fase di un'attività deve infatti essere eseguita una ed una sola volta

$$x_{atf} + \sum_{\tau=t+1}^{ET_a^{max}[a]} x_{a\tau(f-1)} \leq 1 \quad \forall a, t, f : 1 < f \leq nt[a], ST[a] \leq t \leq ET_a^{max}[a] - 1 \quad (2.15)$$

e non possono essere eseguite più fasi contemporaneamente

$$\sum_{f=1}^{nt_a} x_{atf} \leq 1 \quad \forall a, t : ST_a \leq t \leq ET_a^{max} \quad (2.16)$$

Il vincolo sulla potenza istantanea diventa

$$p_{atf} = lp_{af} x_{atf} \quad \forall a, t : ST_a \leq t \leq ET_a^{max}, 1 \leq f \leq nt_a \quad (2.17)$$

I vincoli di Carica/Scarica delle batterie, Bilanciamento Consumo/Produzione e sui Limiti contrattuali rimangono inalterati rispetto alla Formulazione Base, così come la funzione obiettivo.

Sono introdotti due ulteriori vincoli per definire i limiti di interrompibilità di ogni attività. Il primo vincolo impone che, quando un'attività viene interrotta, questa pausa non possa durare più di due time slot:

$$\sum_{\tau=t+1}^{t+3} x_{a,\tau,f+1} \geq x_{a,t,f} \quad \forall a, t : ST_a \leq t \leq ET_a^{max} - 3, 1 \leq f \leq nt_a - 1, P_{a,f} = 1 \quad (2.18)$$

Il secondo vincolo impone ad ogni attività una sola possibile interruzione

$$\sum_{\tau=t}^{t+nt_a-f} \sum_{\phi=f}^{nt_a} x_{a,\tau,\phi} \geq (nt_a - f + 1) \cdot (x_{a,t,f} - x_{a,t-1,f-1}) \quad (2.19)$$

$$\forall a, t : ST_a + 1 \leq t \leq ET_a^{max} - nt_a + f, 2 \leq f \leq nt_a, P_{a,f-1} = 1$$

Formulazione con flessibilità sulla potenza

In questo modello si prende in considerazione la possibilità di introdurre una banda di controllo, all'interno della quale è possibile variare la potenza istantanea di ogni attività già durante la fase di pianificazione off-line. È invece mantenuta l'assunzione fatta nella Formulazione Base riguardo alla non interrompibilità delle attività.

Il vincolo (2.3) della Formulazione Base viene sostituito da:

$$\begin{aligned}
 p_{atf}^N &= lp_{af}x_{a(t-f)} \\
 p_{at}^E &= \sum_{f=1}^{nt_a} (p_{atf}^N + \delta_{atf}) \\
 \delta_{atf} &\leq cb_{af}p_{atf}^N \\
 \delta_{atf} &\geq -cb_{af}p_{atf}^N
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Si introduce quindi una distinzione tra la potenza nominale (p_{atf}^N) e la potenza effettiva che tiene conto della possibilità di introdurre una banda di controllo (sia in positivo che in negativo) della potenza.

Anche questo vincolo viene quindi modificato, introducendo la potenza effettiva:

$$\sum_{t=ST_a}^{ET_a^{max}} p_{at}^E = \sum_{f=1}^{nt_a} lp_{af} \quad \forall a \in A \tag{2.21}$$

Il vincolo (2.10) diventa quindi:

$$y_t + \pi_t^{PV} + \sum_{b \in B} v_{bt}^D h = z_t + n_t + \sum_{a \in A} p_{atf}^E + \sum_{b \in B} v_{bt}^C h \quad \forall t \tag{2.22}$$

Flessibilità della potenza consumata:

Viene introdotta un'altra classe di vincoli che regola la variazione di potenza ammissibile

$$\begin{aligned}
 \mu_{at}^+ &\geq 0 \quad \text{Variazione di potenza in positivo} \\
 \mu_{at}^- &\geq 0 \quad \text{Variazione di potenza in negativo} \\
 \mu_{at}^+ &\leq \sum_f cb_{af}p_{atf}^N - \delta_{atf} \\
 \mu_{at}^- &\leq \sum_f cb_{af}p_{atf}^N + \delta_{atf} \\
 \sum_{a \in A} \mu_{at}^+ &\geq \sigma \\
 \sum_{a \in A} \mu_{at}^- &\geq \sigma
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

I restanti vincoli e la funzione obiettivo rimangono inalterati.

Formulazione completa

In questo modello, che risulta essere il più completo, vengono eliminate entrambe le assunzioni fatte nel modello base. In questo caso le attività possono

quindi essere definite interrompibili, definendo inoltre una banda di controllo per la potenza istantanea di ogni fase di ciascuna attività.

Rispetto alla Formulazione con attività interrompibili, é necessario modificare i vincoli sulla potenza istantanea e sulla potenza totale di ogni attività, così come fatto nella Formulazione con flessibilità sulla potenza.

Il vincolo (2.17) diventa quindi

$$\begin{aligned} p_{atf}^N &= lp_{af}x_{atf} \\ p_{at}^E &= \sum_{f=1}^{nt_a} (p_{atf}^N + \delta_{atf}) \\ \delta_{atf} &\leq cb_{af}p_{atf}^N \\ \delta_{atf} &\geq -cb_{af}p_{atf}^N \end{aligned} \quad (2.24)$$

ed il vincolo sulla potenza totale diventa, così come in (2.21)

$$\sum_{t=ST_a}^{ET_a^{max}} p_{at}^E = \sum_{f=1}^{nt_a} lp_{af} \quad \forall a \in A \quad (2.25)$$

Gli altri vincoli rimangono uguali al modello proposto per la Formulazione Flessibile con l'aggiunta della classe di vincoli (2.23) che regola la flessibilità della potenza istantanea.

Utenti cooperativi

In questo scenario si suppone che una comunità di utenti U , cooperi nella gestione dello scambio di potenza con la rete elettrica. Per ogni utenza i modelli rimangono quelli descritti nella sezione precedente. La funzione obiettivo si prefiggerà di massimizzare il guadagno avuto dalla produzione di energia rispetto alla spesa totale dovuta all'acquisto di energia dalla rete dell'intera comunità:

$$\max \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} (g_t \cdot z_t - c_t \cdot y_t) \quad (2.26)$$

Viene inoltre aggiunto un vincolo sulla potenza massima prelevabile dalla rete dall'intera comunità U:

$$\sum_{u=U} y_t^u \leq \pi^{GCPP-IN} \quad \forall t \in T \quad (2.27)$$

Capitolo 3

Definizione dei modelli di ottimizzazione

In questo capitolo verranno illustrati in dettaglio i modelli definiti per la risoluzione del problema.

3.1 Modelli on-line

La realizzazione dei modelli di ottimizzazione on-line, oggetto del lavoro di questa tesi, ha come obiettivo quello di mantenere per quanto possibile il profilo di acquisto e vendita dell'energia definito dal modello off-line per la giornata in corso. Tale proposito permette di ridurre le variazioni causate da errori, quali ad esempio errori di previsione del fotovoltaico, in modo da non sconvolgere le attese degli operatori di rete. In prima analisi è stato necessario analizzare i modelli già presenti nel BEE Project per il caso off-line. Partendo da questi ho definito quattro tipologie di modello che intervengono in maniera differente e considerano archi temporali diversi. In particolare ho suddiviso in due casi: nel primo si interviene in real-time nella correzione di errori sul piano energetico previsto utilizzando solo i sistemi di accumulo di energia (batterie); nel secondo si può modificare anche lo scheduling delle attività dei dispositivi all'interno dell'abitazione. Questo approccio permette di analizzare con precisione se e quanto influisca l'utilizzo efficiente delle sole batterie, e di valutare in aggiunta quali conseguenze implichi una modifi-

ca dello scheduling dei dispositivi. In seguito ho definito, per entrambe le tipologie di modello, una variante che, intervenendo nell'istante in cui il modello viene eseguito per bilanciare gli errori riscontrati, valuti anche gli effetti di tali modifiche nei time slot rimanenti della giornata. In questo modo è possibile valutare se e come le previsioni per gli istanti di tempo futuri condizionano le decisioni istantanee.

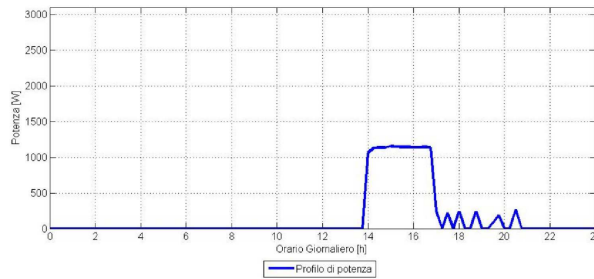


Figura 3.1: Esempio di profilo di carico di un'attività.

I modelli proposti hanno quindi il compito di gestire il piano energetico di un gruppo di abitazioni durante l'intera giornata. Per questo, come già visto nella Sez. 2.3, l'arco di tempo analizzato viene suddiviso in 96 time slots di 15 minuti ciascuno (insieme T). Ognuna delle attività dei dispositivi domestici, raggruppate nell'insieme A , è suddivisa in fasi "f" (insieme F) da 15 minuti ciascuna, per ognuna delle quali è specificato un particolare profilo di consumo di potenza. Ad esempio in Figura 3.1 viene mostrato il profilo di carico energetico nel caso del boiler: questo sarà attivo per 28 fasi, per un totale di 7 ore. Per lo scheduling delle attività viene mantenuta la notazione usata nel modello off-line 2.3.2, che descrive grazie al parametro binario x_{at} il time slot di avvio del dispositivo "a", e con lp_{af} il profilo di carico nelle varie fasi di utilizzo. Per ciò che riguarda i parametri che descrivono i tempi di attivazione di ogni attività, vengono definiti dei sottoinsiemi

di time slots dell'insieme T che raggruppano, per ognuno dei dispositivi presenti nelle singole abitazioni, tutti i time slots utili nei quali è possibile avviare una determinata attività, definiti appunto T_{s_a} . Più grande sarà questo insieme, maggiore sarà la flessibilità lasciata ai modelli nel modificare lo scheduling al fine di gestire in maniera più efficiente il piano energetico.

Se l'abitazione è dotata di sistemi di accumulo di energia, le batterie (insieme B), per ognuna di queste sono definiti alcuni parametri. In particolare, come già detto, sono definiti i valori di capacità massima γ_b^{max} e di carica minima necessaria per non danneggiare la batteria γ_b^{min} , il valore di efficienza η_b , i valori di velocità di carica massima e minima τ_b^{max} e τ_b^{min} , e di scarica θ_b^{max} e θ_b^{min} . Infine, per il caso di modelli cooperativi, viene definito l'insieme che raggruppa le abitazioni (insieme H) degli utenti cooperanti, i cui sottoinsiemi H_p ed H_b descrivono rispettivamente gli utenti dotati di sistemi di generazione di energia (PV) e quelli dotati di batterie.

3.2 Singolo time slot con gestione batterie

Il modello di seguito illustrato ha come scopo l'ottimizzazione dei consumi energetici in real-time, valutando l'errore solo nel singolo time slot preso in considerazione. Più nel dettaglio il modello si propone di minimizzare la differenza fra i valori di energia acquistata e venduta preventivati nella fase off-line 2.9 e quelli realmente necessari rilevati in tempo reale, rispettando i vincoli di bilanciamento 2.10 e lo scheduling delle attività pianificato il giorno precedente, e compensando eventuali variazioni con il solo ausilio delle batterie.

Definizioni

- Insieme delle abitazioni: H
 - sottoinsieme delle abitazioni con batterie: H_b
 - sottoinsieme delle abitazioni con pannello fotovoltaico: H_p
- Insieme orizzonte temporale: T

- time slot della stessa lunghezza: $t \in T$
- puntatore al time slot attuale: ts
- Insieme delle fasi: F
- Insieme delle attività: A (ognuna associata ad un elettrodomestico)
 - insieme dei time slot utili per l’attivazione: $T_{s_{ha}} \quad \forall h \in H, a \in A$
(sottoinsieme di T)
 - tempo d’inizio di ogni attività: $x_{hat} \quad \forall h \in H, a \in A, t \in T$
 - profilo di carico: $lp_{af} \quad \forall a \in A, f \in F$ [W]
- Insieme delle batterie: B
 - carica minima: $\gamma_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - carica massima: $\gamma_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità minima di carica: $\tau_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità massima di carica: $\tau_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità minima di scarica: $\vartheta_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità massima di scarica: $\vartheta_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - carica al time slot precedente: $icha_{hb} \quad \forall b \in B, h \in H_b$ [W]
 - efficienza della batteria: $\eta_b \quad \forall b \in B$ ($0 \leq \eta_b \leq 1$)
- Potenze:
 - profilo di potenza acquistata nel singolo time slot in offline: $y_h^{old} \quad \forall h \in H$ [W]
 - profilo di potenza venduta nel singolo time slot in offline: $z_h^{old} \quad \forall h \in H$ [W]
 - potenza generata dai PV nel singolo time slot: $\pi_{hts}^{PV} \quad \forall h \in H_p$ [W]

- potenza limite in entrata nel singolo time slot: π_{ts}^{IN} [W]
- potenza limite in entrata aggregata nel singolo time slot: π_{ts}^{INTOT} [W]
- potenza istantanea della batteria: $e_{hb} \quad \forall b \in B, h \in H_b$ [W]

Funzione obiettivo

Siano y_h^{old} e z_h^{old} i parametri che rappresentano i valori di energia acquistata e venduta in ogni singolo time slot e per ogni utente “h”, definiti nella fase off-line. L’obiettivo di questo primo modello è quello di minimizzare la differenza fra questi parametri ed i valori di energia acquistata e venduta in real-time, rispettivamente indicati dalle variabili y_h e z_h :

$$\min \sum_{h \in H} (|y_h - y_h^{old}| + |z_h - z_h^{old}|) \tag{3.1}$$

Si noti che la funzione obiettivo così posta non è lineare. Per poter ricondurre questo problema ad un problema di Programmazione Lineare (PL) è quindi necessario introdurre delle variabili aggiuntive che permettano di ottenere un problemi di PL del tipo:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \min \sum_{h \in H} (k_h + d_h) & \\ y_h - y_h^{old} \leq k_h & \forall h \in H \\ y_h - y_h^{old} \geq -k_h & \forall h \in H \\ z_h - z_h^{old} \leq d_h & \forall h \in H \\ z_h - z_h^{old} \geq -d_h & \forall h \in H \end{array} \right.$$

Limiti contrattuali

Nella definizione dei vincoli è stato indispensabile tenere in considerazione alcuni di questi già presenti nella formulazione dei modelli off-line, ai quali debba sottostare necessariamente anche il modello on-line.

$$y_h \leq \pi_{ts}^{IN} \quad \forall h \in H \tag{3.2}$$

$$\sum_{h \in H} y_h \leq \pi_{ts}^{INTOT} \tag{3.3}$$

Ad esempio i vincoli 3.2 e 3.3 rappresentano rispettivamente il limite contrattuale a cui deve sottostare ogni singola utenza, ed il limite di picco massimo aggregato fra tutte le utenze. Questi limiti, così come visto in 2.11, sono indicati per ogni singolo time slot; dato che il modello in esame agisce solo sul singolo time slot, nei vincoli esposti si fa riferimento al parametro ts che tiene traccia del time slot in cui il modello in questione viene eseguito.

Carica/Scarica delle batterie

Anche i vincoli riguardanti la carica e la scarica delle batterie, già illustrati in 2.5, restano immutati. Vengono introdotte le variabili binarie $\omega_{hb}^C, \omega_{hb}^D$ che descrivono lo stato della “b-esima” batteria nell’istante di tempo considerato: questa può essere in carica, in scarica o non utilizzata.

$$\omega_{hb}^C + \omega_{hb}^D \leq 1 \quad \forall b \in B, h \in H_b \quad (3.4)$$

In 3.4 si impone che ogni batteria, per ogni utenza che ne dispone, non sia contemporaneamente negli stati di carica e scarica. Inoltre le velocità di carica v_{hb}^C e di scarica v_{hb}^D delle batterie sono regolate da precisi limiti:

$$\begin{aligned} v_{hb}^C &\leq \tau_b^{max} \cdot \omega_{hb}^C & \forall b \in B, h \in H_b \\ v_{hb}^C &\geq \tau_b^{min} \cdot \omega_{hb}^C & \forall b \in B, h \in H_b \\ v_{hb}^D &\leq \vartheta_b^{max} \cdot \omega_{hb}^D & \forall b \in B, h \in H_b \\ v_{hb}^D &\geq \vartheta_b^{min} \cdot \omega_{hb}^D & \forall b \in B, h \in H_b \end{aligned} \quad (3.5)$$

In ogni time slot il modello dovrà tener conto della carica istantanea di ogni batteria; questa sarà legata alla carica della batteria nel time slot precedente, a cui va aggiunta la carica acquisita o sottratta la quantità di carica persa:

$$e_{hb} = icha_{hb} + \eta_b v_{hb}^C - \frac{1}{\eta} v_{hb}^D \quad \forall b \in B, h \in H_b \quad (3.6)$$

con:

- e_{hb} energia della batteria nel time slot in cui opera il modello
- $icha_{hb}$ carica della batteria nel time slot precedente
- $\eta_b v_{hb}^C$ carica immessa nella batteria tenendo conto dello stato di efficienza della stessa
- $\frac{1}{\eta} v_{hb}^D$ carica prelevata dalla batteria tenendo conto dello stato di efficienza della stessa

ricordando però che ogni batteria ha una capacità massima γ_b^{max} ed è necessario garantire una carica minima γ_b^{min} per non danneggiarla:

$$\begin{aligned} e_{hb} &\leq \gamma_b^{max} & \forall b \in B, h \in H_b \\ e_{hb} &\geq \gamma_b^{min} & \forall b \in B, h \in H_b \end{aligned} \quad (3.7)$$

Nel caso in cui ci si trovi nel primo time slot della giornata il valore di carica iniziale sarà noto come il valore di carica residua dalla giornata precedente.

Bilanciamento Consumo/Produzione

L'ultima classe di vincoli definita per questo modello è quella necessaria a garantire il bilanciamento fra consumo energetico ed eventuale produzione. È necessario cioè che il totale dell'energia prodotta eguagli il totale di quella consumata, ricordando però che in questa prima formulazione il modello non modificherà lo scheduling delle attività già programmato in fase off-line. A questo proposito il vincolo già visto in 2.10 viene suddiviso in più vincoli per poter meglio adattare il bilanciamento alle singole diverse utenze, che possono essere dotate, o meno, di pannelli fotovoltaici e/o batterie. Nel dettaglio, il vincolo 3.8 è riferito alle utenze dotate di batterie e pannelli fotovoltaici, il vincolo 3.9 alle utenze dotate di soli pannelli fotovoltaici, il vincolo 3.10 alle utenze dotate di sole batterie, infine 3.11 per le utenze prive sia di batterie che di pannelli fotovoltaici.

$$y_h + \pi_{hts}^{PV} + \sum_{b \in B} v_{hb}^D = z_h + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: f \leq ts} (lp_{af} \cdot x_{ha}(ts-f+1)) + \sum_{b \in B} v_{hb}^C \quad \forall h \in H_b \cap H_p \quad (3.8)$$

$$y_h + \pi_{hts}^{PV} = z_h + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: f \leq ts} (lp_{af} \cdot x_{ha}(ts-f+1)) \quad \forall h \in H_p \setminus H_b \quad (3.9)$$

$$y_h + \sum_{b \in B} v_{hb}^D = z_h + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: f \leq ts} (lp_{af} \cdot x_{ha}(ts-f+1)) + \sum_{b \in B} v_{hb}^C \quad \forall h \in H_b \setminus H_p \quad (3.10)$$

$$y_h = z_h + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: f \leq ts} (lp_{af} \cdot x_{ha}(ts-f+1)) \quad \forall h \in H \setminus (H_b \cup H_p) \quad (3.11)$$

dove:

- y_h rappresenta la quantità di energia acquistata dalla rete elettrica nel time slot di riferimento ts
- π_{hts}^{PV} rappresenta la produzione del pannello fotovoltaico nel time slot di riferimento ts
- $\sum_{b \in B} v_{hb}^D$ rappresenta l'energia totale prelevata dalle batterie nel time slot di riferimento ts
- z_h rappresenta la quantità di energia venduta alla rete nel time slot di riferimento ts
- $\sum_{a \in A} \sum_{f \in F: f \leq ts} (lp_{af} \cdot x_{ha}(ts-f+1))$ rappresenta il consumo totale di energia dovuto all'attività degli elettrodomestici il cui avvio avviene nel time slot ts , o che sono stati attivati in precedenza ma risultano ancora in funzione
- $\sum_{b \in B} v_{hb}^C$ rappresenta l'energia totale immagazzinata nelle batterie nel time slot di riferimento ts

3.3 Multi-time slot con gestione batterie

Nel modello proposto nella sezione precedente si interveniva nel minimizzare gli eventuali errori fra i valori di acquisto e vendita di energia preventivati in off-line

e quelli realmente necessari nel solo singolo time slot, controbilanciando possibili variazioni con il solo utilizzo delle batterie. In questa seconda formulazione si considererà l'ipotesi di intervenire non soltanto nel singolo time slot di tempo preso in considerazione, ma sull'arco temporale dell'intera giornata.

Definizioni

- Insieme delle abitazioni: H
 - Sottoinsieme delle abitazioni con batterie: H_b
 - Sottoinsieme delle abitazioni con pannello fotovoltaico: H_p
- Insieme orizzonte temporale: T
 - time slot della stessa lunghezza: $t \in T$
 - puntatore al time slot attuale: ts
 - insieme dei time slot passati: T^{old} (sottoinsieme di T)
- Insieme delle fasi: F
- Insieme delle attività: A (ognuna associata ad un elettrodomestico)
 - insieme dei time slot utili per l'attivazione: $T_{sha} \quad \forall h \in H, a \in A$
(sottoinsieme di T)
 - tempo d'inizio di ogni attività: $x_{hat} \quad \forall h \in H, a \in A, t \in T$
 - profilo di carico: $lp_{af} \quad \forall a \in A, f \in F$ [W]
- Insieme delle batterie: B
 - carica minima: $\gamma_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - carica massima: $\gamma_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità minima di carica: $\tau_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità massima di carica: $\tau_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]

- velocità minima di scarica: $\vartheta_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
- velocità massima di scarica: $\vartheta_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
- carica al time slot precedente: $icha_{hb} \quad \forall b \in B, h \in H_b$ [W]
- efficienza della batteria: $\eta_b \quad \forall b \in B$ ($0 \leq \eta_b \leq 1$)

• Potenze:

- profilo di potenza acquistata in offline in tutti i time slot restanti di giornata: $y_{ht}^{old} \quad \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old}$ [W]
- profilo di potenza venduta in offline in tutti i time slot restanti di giornata: $z_{ht}^{old} \quad \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old}$ [W]
- potenza generata dai PV in tutti i time slot restanti di giornata: $\pi_{ht}^{PV} \quad \forall h \in H_p, t \in T \setminus T^{old}$ [W]
- potenza limite in entrata nei time slot restanti di giornata: $\pi_t^{IN} \quad \forall t \in T \setminus T^{old}$ [W]
- potenza limite in entrata aggregata nei time slot restanti di giornata: $\pi_t^{INTOT} \quad \forall t \in T \setminus T^{old}$ [W]
- potenza istantanea della batteria nei time slot: $e_{hbt} \quad \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old}$ [W]

Funzione obiettivo

La funzione obiettivo della prima formulazione (3.1) deve quindi essere in parte modificata, dato che l'intento è ora quello di minimizzare la differenza complessiva fra i valori del profilo energetico off-line ed on-line in tutti i time slots successivi a quello attuale. Per questo motivo si è resa necessaria la definizione di un nuovo sottoinsieme di T che contenga i time slots passati, precedenti all'istante di esecuzione del modello, chiamato T^{old} . Inoltre, si utilizza la stessa nomenclatura vista in precedenza, ma si specifica un pedice t nelle variabili e nei parametri per specificarne il valore al variare del time slot. Siano y_{ht}^{old} e z_{ht}^{old} i parametri che

rappresentano i valori di energia acquistata e venduta in ogni singolo time slot e per tutti i time slot di giornata definiti nella fase off-line, e y_{ht} e z_{ht} le variabili che ne rappresentano i rispettivi valori on-line.

$$\min \sum_{h \in H} \sum_{t \in T \setminus T^{old}} (|y_{ht} - y_{ht}^{old}| + |z_{ht} - z_{ht}^{old}|) \quad (3.12)$$

Tale formulazione si riconduce al problema di PL:

$$\begin{cases} \min \sum_{h \in H} \sum_{t \in T \setminus T^{old}} (k_{ht} + d_{ht}) \\ y_{ht} - y_{ht}^{old} \leq k_{ht} & \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old} \\ y_{ht} - y_{ht}^{old} \geq -k_{ht} & \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old} \\ z_{ht} - z_{ht}^{old} \leq d_{ht} & \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old} \\ z_{ht} - z_{ht}^{old} \geq -d_{ht} & \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old} \end{cases}$$

Limiti contrattuali

I vincoli sui limiti contrattuali (3.2) e sul picco massimo aggregato (3.3), definiti nella precedente formulazione, vengono quindi sostituiti dai vincoli che seguono.

$$y_{ht} \leq \pi_t^{IN} \quad \forall t \in T \setminus T^{old}, h \in H \quad (3.13)$$

$$\sum_{h \in H} y_{ht} \leq \pi_t^{INTOT} \quad \forall t \in T \setminus T^{old} \quad (3.14)$$

Carica/scarica delle batterie

Anche i vincoli sulla carica e scarica delle batterie visti in 3.4 - 3.7 dovranno essere modificati, poiché anche questi vincoli, che regolano l'utilizzo dei sistemi di accumulo di energia, devono essere riformulati su tutto l'arco temporale che il nuovo modello prende in considerazione, dal time slot in cui viene eseguito fino a fine giornata:

$$\omega_{hbt}^C + \omega_{hbt}^D \leq 1 \quad \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} v_{hbt}^C &\leq \tau_b^{max} \cdot \omega_{hbt}^C & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \\ v_{hbt}^C &\geq \tau_b^{min} \cdot \omega_{hbt}^C & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \\ v_{hbt}^D &\leq \vartheta_b^{max} \cdot \omega_{hbt}^D & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \\ v_{hbt}^C &\geq \vartheta_b^{min} \cdot \omega_{hbt}^D & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} e_{hbts} &= icha_{hb} + \eta_b v_{hbts}^C - \frac{1}{\eta} v_{hbts}^D & \forall b \in B, h \in H_b \\ e_{hbt} &= e_{hb(t-1)} + \eta_b v_{hbt}^C - \frac{1}{\eta} v_{hbt}^D & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus (T^{old} \cup \{ts\}) \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} e_{hbt} &\leq \gamma_b^{max} & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \\ e_{hbt} &\geq \gamma_b^{min} & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \end{aligned} \quad (3.18)$$

In particolare il vincolo 3.6 viene sostituito dai vincoli 3.17. Il primo vincolo garantisce che la carica della batteria al time slot attuale ts sia funzione della carica nel time slot precedente $icha_{hb}$ e della carica acquisita o sottratta nello stesso istante; il secondo, allo stesso modo, garantisce che lo stesso principio sia rispettato per tutti i restanti time slots di giornata.

Bilanciamento Consumo/Produzione

Altresì, i vincoli di bilanciamento energetico definiti in 3.8 - 3.11 diventano:

$$\begin{aligned} y_{ht} + \pi_{ht}^{PV} + \sum_{b \in B} v_{hbt}^D &= z_{ht} + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: f \leq t} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}) + \sum_{b \in B} v_{hbt}^C \\ &\forall h \in H_b \cap H_p, t \in T \setminus T^{old} \end{aligned} \quad (3.19)$$

$$y_{ht} + \pi_{ht}^{PV} = z_{ht} + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: f \leq t} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}) \quad \forall h \in H_p \setminus H_b, t \in T \setminus T^{old} \quad (3.20)$$

$$y_{ht} + \sum_{b \in B} v_{hbt}^D = z_{ht} + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: f \leq t} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}) + \sum_{b \in B} v_{hbt}^C \quad \forall h \in H_b \setminus H_p, t \in T \setminus T^{old} \quad (3.21)$$

$$y_{ht} = z_{ht} + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: f \leq t} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}) \quad \forall h \in H \setminus (H_b \cap H_p), t \in T \setminus T^{old} \quad (3.22)$$

3.4 Singolo time slot con gestione batterie e scheduling delle attività

Il terzo modello descritto, così come visto nella Sez.3.2, segue l'ipotesi di compensare le variazioni nel solo time slot di tempo preso in considerazione; tuttavia, in questa nuova formulazione il modello è anche in grado di modificare lo scheduling delle attività dei dispositivi, al fine di perseguire l'obiettivo in esame.

Definizioni

- Insieme delle abitazioni: H
 - sottoinsieme delle abitazioni con batterie: H_b
 - sottoinsieme delle abitazioni con pannello fotovoltaico: H_p
- Insieme orizzonte temporale: T
 - time slot della stessa lunghezza: $t \in T$
 - puntatore al time slot attuale: ts
- Insieme delle fasi: F
- Insieme delle attività: A (ognuna associata ad un elettrodomestico)
 - insieme dei time slot utili per l'attivazione: $T_{s_{ha}} \quad \forall h \in H, a \in A$
(sottoinsieme di T)
 - tempo d'inizio di ogni attività per le attività da schedulare: $x_{hat} \quad \forall h \in H, a \in A, t \in T \setminus T^{old}$
 - tempo d'inizio di ogni attività per le attività già avviate: $x_{hat}^{old} \quad \forall h \in H, a \in A, t \in T^{old}$
 - profilo di carico: $lp_{af} \quad \forall a \in A, f \in F$ [W]

- Insieme delle batterie: B
 - carica minima: $\gamma_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - carica massima: $\gamma_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità minima di carica: $\tau_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità massima di carica: $\tau_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità minima di scarica: $\vartheta_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità massima di scarica: $\vartheta_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - carica al time slot precedente: $icha_{hb} \quad \forall b \in B, h \in H_b$ [W]
 - efficienza della batteria: $\eta_b \quad \forall b \in B$ ($0 \leq \eta_b \leq 1$)

- Potenze:
 - profilo di potenza acquistata nel singolo time slot in offline: $y_h^{old} \quad \forall h \in H$ [W]
 - profilo di potenza venduta nel singolo time slot in offline: $z_h^{old} \quad \forall h \in H$ [W]
 - potenza generata dai PV nel singolo time slot: $\pi_{hts}^{PV} \quad \forall h \in H_p$ [W]
 - potenza limite in entrata nel singolo time slot: π_{ts}^{IN} [W]
 - potenza limite in entrata aggregata nel singolo time slot: π_{ts}^{INTOT} [W]
 - potenza istantanea della batteria: $e_{hb} \quad \forall b \in B, h \in H_b$ [W]

Funzione obiettivo

Come si evince, ciò non comporta la necessità di modificare la funzione obiettivo del modello vista in 3.1, che rimane quindi:

$$\min \sum_{h \in H} (|y_h - y_h^{old}| + |z_h - z_h^{old}|) \quad (3.23)$$

dove le variabili e i parametri utilizzati si riferiscono al singolo time slot di riferimento ts .

$$\begin{cases} \min \sum_{h \in H} (k_h + d_h) \\ y_h - y_h^{old} \leq k_h & \forall h \in H \\ y_h - y_h^{old} \geq -k_h & \forall h \in H \\ z_h - z_h^{old} \leq d_h & \forall h \in H \\ z_h - z_h^{old} \geq -d_h & \forall h \in H \end{cases}$$

Scheduling delle attività

Si rende necessario però riformulare i vincoli che riguardano lo scheduling. La notazione usata in 2.3.2 del modello off-line, va di conseguenza rivista; infatti è ora indispensabile separare i parametri che tengono conto dell'avvio dei dispositivi già avvenuto in un time slot precedente a quello osservato, dalle variabili che permettano al modello di decidere se e quando avviare un'attività non ancora cominciata. In particolare le variabili binarie x_{ha} , definite per ogni abitazione e per ogni attività, sono le variabili che permettono al modello di decidere se avviare l'attività "a" nel time slot preso in considerazione. Si definisce, invece, con il parametro x_{hat}^{old} lo scheduling delle attività per tutti quei time slot che rappresentano l'arco temporale della giornata già trascorso. I nuovi vincoli che ne conseguono, sono dunque:

$$x_{ha} + \sum_{t \in (T^{old} \cap T_{sha})} x_{hat}^{old} \leq 1 \quad \forall h \in H, a \in A : ts \in T_{sha} \quad (3.24)$$

$$x_{ha} + \sum_{t \in (T^{old} \cap T_{sha})} x_{hat}^{old} = 1 \quad \forall h \in H, a \in A : |T_{sha} \setminus (T^{old} \cap \{ts\})| = 0 \quad (3.25)$$

Il vincolo 3.24 garantisce che le attività abbiano inizio una sola volta durante l'intero arco della giornata, e solo se in un tempo compreso nei time slots definiti nell'insieme T_{sha} . Si ricorda infatti che i time slots contenuti all'interno di

tale insieme delimitano tutti gli istanti temporali nei quali è possibile avviare un dispositivo. Il vincolo 3.25, allo stesso modo, impone che ogni attività venga sicuramente avviata all'interno del medesimo intervallo.

Bilanciamento Consumo/Produzione

Per ciò che concerne i vincoli di bilanciamento fra consumo e produzione le ipotesi fatte in 3.8 - 3.11 restano valide, ma è necessario dividere l'espressione che rappresenta il consumo totale di energia dovuto all'attività degli elettrodomestici. Più propriamente tale espressione è suddivisa in una prima parte che esprime il consumo di quei dispositivi che sono stati attivati in un precedente istante temporale ma che potrebbero essere ancora in funzione nel time slot considerato, e per i quali si considera il profilo di carico relativo alla fase in esecuzione; nella seconda parte, invece, la variabile x_{ha} lascia al modello la possibilità di attivare un dispositivo non ancora attivo e, nel qual caso, di considerare il profilo di carico della prima fase di attività lp_{a1} . Come ovvio, tale attivazione potrà avvenire purché il time slot preso in considerazione sia fra i time slots utili all'attivazione.

$$\begin{aligned}
 y_h + \pi_{hts}^{PV} + \sum_{b \in B} v_{hb}^D = z_h + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (ts-f+1) \in Ts_{ha} \cap T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha}^{old}(ts-f+1)) + \\
 + \sum_{a \in A: ts \in Ts_{ha}} (lp_{a1} \cdot x_{ha}) + \sum_{b \in B} v_{hb}^C \quad \forall h \in H_b \cap H_p
 \end{aligned} \tag{3.26}$$

$$\begin{aligned}
 y_h + \pi_{hts}^{PV} = z_h + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (ts-f+1) \in Ts_{ha} \cap T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha}^{old}(ts-f+1)) + \\
 + \sum_{a \in A: ts \in Ts_{ha}} (lp_{a1} \cdot x_{ha}) \quad \forall h \in H_p \setminus H_b
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

$$\begin{aligned}
 y_h + \sum_{b \in B} v_{hb}^D = z_h + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (ts-f+1) \in Ts_{ha} \cap T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha}^{old}(ts-f+1)) + \\
 + \sum_{a \in A: ts \in Ts_{ha}} (lp_{a1} \cdot x_{ha}) + \sum_{b \in B} v_{hb}^C \quad \forall h \in H_b \setminus H_p
 \end{aligned} \tag{3.28}$$

$$\begin{aligned}
 y_h = z_h + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (ts-f+1) \in Ts_{ha} \cap T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha}^{old}) + \\
 + \sum_{a \in A: ts \in Ts_{ha}} (lp_{a1} \cdot x_{ha}) \quad \forall h \in H \setminus (H_b \cap H_p)
 \end{aligned} \tag{3.29}$$

Limiti contrattuali

Gli ulteriori vincoli rimangono inalterati rispetto alla formulazione presentata nel paragrafo 3.2. In particolare, i vincoli che impongono di rispettare i limiti contrattuali restano i seguenti:

$$y_h \leq \pi_{ts}^{IN} \quad \forall h \in H \tag{3.30}$$

$$\sum_{h \in H} y_h \leq \pi_{ts}^{INTOT} \tag{3.31}$$

Carica/scarica delle batterie

$$\omega_{hb}^C + \omega_{hb}^D \leq 1 \quad \forall b \in B, h \in H_b \tag{3.32}$$

$$\begin{aligned}
 v_{hb}^C &\leq \tau_b^{max} \cdot \omega_{hb}^C & \forall b \in B, h \in H_b \\
 v_{hb}^C &\geq \tau_b^{min} \cdot \omega_{hb}^C & \forall b \in B, h \in H_b \\
 v_{hb}^D &\leq \vartheta_b^{max} \cdot \omega_{hb}^D & \forall b \in B, h \in H_b \\
 v_{hb}^C &\geq \vartheta_b^{min} \cdot \omega_{hb}^D & \forall b \in B, h \in H_b
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

$$e_{hb} = icha_{hb} + \eta_b v_{hb}^C - \frac{1}{\eta} v_{hb}^D \quad \forall b \in B, h \in H_b \tag{3.34}$$

$$\begin{aligned}
 e_{hb} &\leq \gamma_b^{max} & \forall b \in B, h \in H_b \\
 e_{hb} &\geq \gamma_b^{min} & \forall b \in B, h \in H_b
 \end{aligned} \tag{3.35}$$

3.5 Multi-time slot con gestione batterie e scheduling delle attività

L'ultimo modello proposto in questo lavoro di tesi coniuga le ipotesi formulate nelle Sez.3.3 e 3.4; in particolare il modello che segue si preme di controbilanciare possibili variazioni rispetto al piano energetico off-line sia con l'ausilio delle batterie che con modifiche dello scheduling delle attività, nell'intero arco temporale che copre la giornata.

Definizioni

- Insieme delle abitazioni: H
 - Sottoinsieme delle abitazioni con batterie: H_b
 - Sottoinsieme delle abitazioni con pannello fotovoltaico: H_p
- Insieme orizzonte temporale: T
 - time slot della stessa lunghezza: $t \in T$
 - puntatore al time slot attuale: ts
 - insieme dei time slot passati: T^{old} (sottoinsieme di T)
- Insieme delle fasi: F
- Insieme delle attività: A (ognuna associata ad un elettrodomestico)
 - insieme dei time slot utili per l'attivazione: $T_{s_{ha}} \quad \forall h \in H, a \in A$
(sottoinsieme di T)
 - tempo d'inizio di ogni attività per le attività da schedulare: $x_{hat} \quad \forall h \in H, a \in A, t \in T \setminus T^{old}$
 - tempo d'inizio di ogni attività per le attività già avviate: $x_{hat}^{old} \quad \forall h \in H, a \in A, t \in T^{old}$
 - profilo di carico: $lp_{af} \quad \forall a \in A, f \in F$ [W]

- Insieme delle batterie: B
 - carica minima: $\gamma_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - carica massima: $\gamma_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità minima di carica: $\tau_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità massima di carica: $\tau_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità minima di scarica: $\vartheta_b^{min} \quad \forall b \in B$ [W]
 - velocità massima di scarica: $\vartheta_b^{max} \quad \forall b \in B$ [W]
 - carica al time slot precedente: $icha_{hb} \quad \forall b \in B, h \in H_b$ [W]
 - efficienza della batteria: $\eta_b \quad \forall b \in B$ ($0 \leq \eta_b \leq 1$)

- Potenze:
 - profilo di potenza acquistata in offline nei restanti time slot di giornata: $y_{ht}^{old} \quad \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old}$ [W]
 - profilo di potenza venduta in offline nei restanti time slot di giornata: $z_{ht}^{old} \quad \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old}$ [W]
 - potenza generata dai PV nei restanti time slot di giornata: $\pi_{ht}^{PV} \quad \forall h \in H_p, t \in T \setminus T^{old}$ [W]
 - potenza limite in entrata nei restanti time slot di giornata: $\pi_t^{IN} \quad \forall t \in T \setminus T^{old}$ [W]
 - potenza limite in entrata aggregata nei restanti time slot di giornata: $\pi_t^{INTOT} \quad \forall t \in T \setminus T^{old}$ [W]
 - potenza istantanea della batteria nei vari time slot: $e_{hbt} \quad \forall b \in B, h \in H_b, t \in T$ [W]

Funzione obiettivo

$$\min \sum_{h \in H} \sum_{t \in T \setminus T^{old}} (|y_{ht} - y_{ht}^{old}| + |z_{ht} - z_{ht}^{old}|) \quad (3.36)$$

$$\begin{cases} \min \sum_{h \in H} \sum_{t \in T \setminus T^{old}} (k_{ht} + d_{ht}) \\ y_{ht} - y_{ht}^{old} \leq k_{ht} & \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old} \\ y_{ht} - y_{ht}^{old} \geq -k_{ht} & \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old} \\ z_{ht} - z_{ht}^{old} \leq d_{ht} & \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old} \\ z_{ht} - z_{ht}^{old} \geq -d_{ht} & \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old} \end{cases}$$

Scheduling delle attività

Anche in questo caso, così come già illustrato in 3.24 e 3.25, è necessario formulare un vincolo che garantisca che le attività abbiano inizio una sola volta durante l'intero arco della giornata, e solo se in un tempo compreso nei time slots definiti nell'insieme T_{sha} , ma che tutte le attività vengano avviate:

$$\sum_{t \in (T_{sha} \setminus T^{old})} x_{hat} + \sum_{t \in (T^{old} \cap T_{sha})} x_{hat}^{old} = 1 \quad \forall h \in H, a \in A \quad (3.37)$$

Bilanciamento Consumo/Produzione

Per quanto riguarda i vincoli di bilanciamento fra consumo e produzione, vale il ragionamento illustrato in 3.26 - 3.29; è il caso di ricordare, però, che in questa formulazione il modello considera l'intero arco temporale di giornata. Quindi:

$$\begin{aligned} & y_{ht} + \pi_{ht}^{PV} + \sum_{b \in B} v_{hbt}^D = z_{ht} + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (t-f+1) \in T_{sha} \cap T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}^{old}) + \\ & + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (t-f+1) \in T_{sha} \setminus T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}) + \sum_{b \in B} v_{hbt}^C \quad \forall h \in H_b \cap H_p, t \in T \setminus T^{old} \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned}
 y_{ht} + \pi_{ht}^{PV} &= z_{ht} + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (t-f+1) \in T_{sha} \cap T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}^{old}) + \\
 &+ \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (t-f+1) \in T_{sha} \setminus T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}) \quad \forall h \in H_p \setminus H_b, t \in T \setminus T^{old}
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

$$\begin{aligned}
 y_{ht} + \sum_{b \in B} v_{hbt}^D &= z_{ht} + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (t-f+1) \in T_{sha} \cap T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}^{old}) + \\
 &+ \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (t-f+1) \in T_{sha} \setminus T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}) + \sum_{b \in B} v_{hbt}^C \quad \forall h \in H_b \setminus H_p, t \in T \setminus T^{old}
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

$$\begin{aligned}
 y_{ht} &= z_{ht} + \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (t-f+1) \in T_{sha} \cap T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}^{old}) + \\
 &+ \sum_{a \in A} \sum_{f \in F: (t-f+1) \in T_{sha} \setminus T^{old}} (lp_{af} \cdot x_{ha(t-f+1)}) \quad \forall h \in H \setminus (H_b \cap H_p), t \in T \setminus T^{old}
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

Limiti contrattuali

Rimangono invariati, purché formulati sull'intera giornata, i vincoli che impongono di rispettare i limiti contrattuali:

$$y_{ht} \leq \pi_t^{IN} \quad \forall t \in T \setminus T^{old}, h \in H \tag{3.42}$$

$$\sum_{h \in H} y_{ht} \leq \pi_t^{INTOT} \quad \forall t \in T \setminus T^{old} \tag{3.43}$$

Carica/scarica delle batterie

$$\omega_{hbt}^C + \omega_{hbt}^D \leq 1 \quad \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \tag{3.44}$$

$$\begin{aligned}
 v_{hbt}^C &\leq \tau_b^{max} \cdot \omega_{hbt}^C & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \\
 v_{hbt}^C &\geq \tau_b^{min} \cdot \omega_{hbt}^C & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \\
 v_{hbt}^D &\leq \vartheta_b^{max} \cdot \omega_{hbt}^D & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \\
 v_{hbt}^D &\geq \vartheta_b^{min} \cdot \omega_{hbt}^D & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old}
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

$$\begin{aligned}
 e_{hbts} &= icha_{hb} + \eta_b v_{hbts}^C - \frac{1}{\eta} v_{hbts}^D & \forall b \in B, h \in H_b \\
 e_{hbt} &= e_{hb(t-1)} + \eta_b v_{hbt}^C - \frac{1}{\eta} v_{hbt}^D & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus (T^{old} \cup \{ts\})
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

$$\begin{aligned}
 e_{hbt} &\leq \gamma_b^{max} & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old} \\
 e_{hbt} &\geq \gamma_b^{min} & \forall b \in B, h \in H_b, t \in T \setminus T^{old}
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

3.5.1 Fattore di comfort

In ultima analisi si mostra una seconda formulazione, alternativa al modello proposto in Sez 3.5. Come detto, il modello fa fronte alle possibili variazioni rispetto al piano energetico off-line sia con l'ausilio delle batterie che con modifiche dello scheduling delle attività, nell'intero arco temporale della giornata. In questo ulteriore modello si dà la possibilità all'utente di decidere di preservare parte dello scheduling pianificato. Più precisamente l'utente definisce un numero massimo di dispositivi il cui scheduling può essere modificato. Si definisce quindi "fattore di comfort" μ il numero massimo di dispositivi che possono essere avviati in un time slot diverso da quello programmato dal piano energetico, tale che:

$$\sum_{t \in T \setminus T^{old}} \sum_{a \in A: t \in T_{s_{ha}}} |x_{hat} - x_{hat}^{off}| \leq \mu \quad \forall h \in H \tag{3.48}$$

dove con x_{hat}^{off} si intende lo scheduling delle attività programmato nella fase off-line. Il problema diventa quindi:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sum_{t \in T \setminus T^{old}} \sum_{a \in A: t \in T_{s_{ha}}} j_{hat} \leq \mu & \forall h \in H \\ x_{hat} - x_{hat}^{off} \leq j_{hat} & \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old}, a \in A: t \in T_{s_{ha}} \\ x_{hat} - x_{hat}^{off} \geq -j_{hat} & \forall h \in H, t \in T \setminus T^{old}, a \in A: t \in T_{s_{ha}} \end{array} \right.$$

Capitolo 4

Test e risultati

In questo capitolo descrivo lo scenario utilizzato nei test per analizzare il comportamento dei modelli descritti nel precedente capitolo, ed i metodi impiegati per generare l'errore al quale verranno sottoposti. Infine, presento i risultati ottenuti dall'implementazione dei modelli.

4.1 Scenari d'uso

I modelli proposti sono stati formulati utilizzando il linguaggio AMPL [37] e risolti utilizzando CPLEX [38]. La configurazione impiegata nei test considerati, ottenuta da dati che rilevano gli standard utilizzati in Italia [39], prevede per ogni singola abitazione 11 dispositivi domestici (tabella 4.1), i cui profili di carico sono stati definiti secondo dati presenti in letteratura [40]. Ogni utente dispone di un contratto con il distributore della rete per una potenza massima prelevabile di 3 kW ed un limite cumulativo sulla potenza prelevabile.

Partendo da questa configurazione sono definiti diversi scenari per i gruppi di utenze:

- gruppi di abitazioni che non dispongono di batterie e pannelli fotovoltaici;
- gruppi di abitazioni nei quali solo alcune dispongono di batterie;
- gruppi di abitazioni nei quali solo alcune dispongono di pannelli fotovoltaici;

Dispositivi Domestici	
Aspirapolvere	Illuminazione
Boiler	Lavastoviglie
Depuratore	Lavatrice
Ferro da stiro	Microonde
Forno	Tv e Pc
Frigorifero	

Tabella 4.1: Attività presenti nello scenario domestico.

- gruppi di abitazioni nei quali alcune dispongono di batterie e/o pannelli fotovoltaici.

Per quanto concerne la produzione di energia rinnovabile da pannelli fotovoltaici, si ipotizza la presenza di un impianto con potenza di picco di 1 kWp; in Figura 4.1 viene riportato un esempio di tale produzione nell'arco dell'intera giornata.

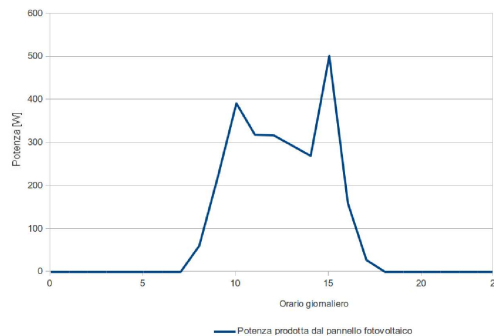


Figura 4.1: Potenza generata nell'arco della giornata da un pannello da 1 kWp.

Per ciò che riguarda le batterie invece, si ipotizza un impianto per l'accumulo massimo di 10 kWh con potenza di 3 kW, ossia tempi di ricarica di poco più di 3 ore. Si tiene presente, come visto in 3.7, che ogni batteria necessita di una quantità minima di energia per non danneggiarsi, supposta in questa fase di test pari a 50

Wh; inoltre la quantità di carica residua dalla precedente giornata, definita dal parametro $icha_{hb}$ nel time slot 1, si suppone pari a 200 Wh per ogni batteria.

4.2 Generazione dell'errore

Per poter esaminare il comportamento dei modelli di ottimizzazione proposti è necessario in fase di test introdurre nei dati vari errori. Generare dell'errore, infatti, permette di valutare come il modello, nelle sue varie formulazioni, reagisca in tempo reale all'alterazione dei valori previsti in fase off-line. Inoltre è opportuno considerare come per i diversi errori introdotti il problema possa diventare non risolvibile per via del superamento dei limiti contrattuali imposti.

4.2.1 Errore sulla predizione di energia prodotta

Uno dei parametri utilizzati dal modello off-line per formulare il piano energetico è la previsione sulla produzione di energia rinnovabile da pannelli fotovoltaici. Come detto in precedenza, nel BEE Project [5] è stato definito un metodo di apprendimento ad-hoc che sulla base delle previsioni meteorologiche è in grado di prevedere la produzione del pannello per le successive 24 ore. Tuttavia è utile considerare come si comporterà il modello in tempo reale, nel caso in cui tali previsioni dovessero essere non corrette. In fase di test sono stati dunque realizzati quattro possibili scenari di errori, a seconda che la produzione reale sia maggiore, molto maggiore, minore o molto minore del previsto. Nel dettaglio si definiscono i seguenti casi:

- cielo molto più coperto, che rappresenta il caso in cui la produzione del PV sia minore del previsto, con punte massime del 25% in meno;
- cielo più coperto, che rappresenta il caso in cui la produzione sia minore del previsto, con punte massime del 15% in meno;

- cielo più soleggiato, che rappresenta il caso in cui la produzione sia maggiore del previsto, con punte massime del 15% in più;
- cielo molto più soleggiato, che rappresenta il caso in cui la produzione sia molto maggiore del previsto, con punte massime del 25% in più.

In Figura 4.2 viene riportato l'andamento percentuale dell'errore nei vari casi illustrati, durante l'intera giornata.

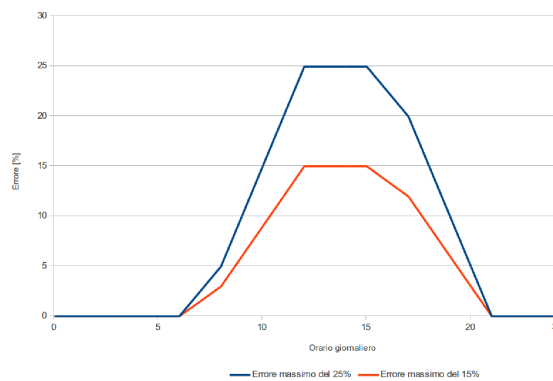


Figura 4.2: Andamento percentuale dell'errore sulla produzione da PV.

4.2.2 Errore sullo scheduling delle attività

Un altro importante fattore che determina la formulazione off-line del piano energetico è la previsione sul futuro utilizzo dei dispositivi domestici da parte dell'utente. Non è difficile immaginare, però, che l'utente sia in circostanze che gli impediscano di rispettare il programma delle attività stabilito. Ci si potrà trovare quindi, in fase on-line, ad aver necessità di maggiore energia in un determinato momento della giornata per far fronte ad una richiesta di carico non prevista o, in caso di ritardato avvio di un'attività, a dover gestire una quantità di energia maggiore di quella realmente impiegata. È utile ricordare che per ogni dispositivo domestico presente nelle abitazioni è definito un insieme T_{sha} , sottoinsieme dell'insieme T , che raccoglie i time slot nei quali è possibile avviare l'attività "a".

Per ottenere un errore sullo scheduling delle attività si è simulato un avvio diverso da ciò che previsto nel piano energetico, in due modalità differenti. Nei modelli con sola gestione delle batterie viene modificato direttamente lo scheduling; in altre parole l'avvio dei dispositivi viene spostato in un time slot diverso da ciò che previsto, ritardando o anticipando in maniera del tutto casuale, purché tale time slot sia sempre contenuto nell'insieme $T_{s_{ha}}$ del relativo dispositivo. Nei modelli con gestione delle batterie e dello scheduling, invece, vengono modificati proprio gli insiemi di attivazione; in particolare gli estremi di tali insiemi vengono traslati, in ritardo o in anticipo, di un numero uguale di time slots. Per rendere comparabili i risultati ottenuti in fase di test di entrambe le tipologie di modelli realizzati, si è ipotizzato di spostare gli estremi degli insiemi di attivazione di un numero pari alla differenza fra il time slot di attivazione previsto in off-line e quello affetto da errore utilizzato nei modelli con sola gestione delle batterie; naturalmente a condizione che i “nuovi” estremi ricadano sempre in time slots relativi alla medesima giornata.

Sono stati definiti poi due possibili casi:

- errore del 10% sullo scheduling delle attività previste per l'intero gruppo di utenze;
- errore del 30% sullo scheduling delle attività previste per l'intero gruppo di utenze.

4.3 Risultati numerici

4.3.1 Errore sulla predizione di energia prodotta

Ruolo delle batterie nella minimizzazione dell'errore

Il primo caso esaminato riguarda, come detto, il caso in cui si verifichi una produzione di energia da parte dei pannelli fotovoltaici diversa da quella prevista. È utile in questo senso mettere a confronto i diversi scenari in cui ci si riferisce ad

utenze che abbiano sistemi di accumulo di energia e il caso in cui tali sistemi non siano presenti.

Analizzando i risultati ottenuti nel caso di applicazione del modello a singolo time slot e con sola gestione delle batterie, riassunti nella tabella 4.2, si vede come nel caso in cui le utenze non dispongano di batterie l'errore sia maggiore.

		<i>Tipologie di errore</i>			
		cielo molto più coperto	cielo più coperto	cielo più soleggiato	cielo molto più soleggiato
<i>Istanze</i>	senza batterie	10169,575 W	6101,745 W	6101,745 W	10169,575 W
	con batterie	10288,187 W	6371,912 W	5896,541 W	9827,568 W

Tabella 4.2: *Errore sul PV, singolo time slot con gestione batterie.*

Questo risultato però, non è sempre verificato. I casi in cui l'energia prodotta dai pannelli fotovoltaici è minore del previsto sono più problematici da gestire di quelli in cui si produce più energia, dato che, come detto, i livelli di carica delle batterie ad inizio giornata sono tipicamente bassi (200 Wh). Quando si produce più energia, la batteria può immagazzinarla in vista di un successivo utilizzo, compensando in tal modo l'errore di predizione. Nel caso di produzione minore, invece, si può ovviare solo in parte alla mancata energia in ingresso al sistema, scaricando il più possibile la batteria. Tale operazione, come mostrano i risultati ottenuti, non porta conseguenze particolarmente positive dal punto di vista della minimizzazione dell'errore sui profili. Diversamente, nel caso di produzione maggiore di ciò che ci si attende, si nota come l'ausilio delle batterie comporti una diminuzione dell'errore di circa il 3,5%.

Nel caso del modello multi-time slot e con sola gestione delle batterie, riassunto in tabella 4.3, è immediato notare che, come previsto, in assenza di sistemi di accumulo l'errore sia lo stesso riportato per il precedente modello. Questo perché, osservando il problema nel singolo time slot oppure nel multi-time slot, l'energia in ingresso deve necessariamente essere sempre uguale a quella in uscita, e quindi

le cose non cambiano. Nel caso in cui siano presenti delle batterie, invece, si può notare come i valori siano diversi rispetto a ciò che si è riscontrato per il modello precedente, seppur non di molto; se l'errore si riferisce ad una potenza prodotta minore, infatti, si può osservare come il modello gestisca in maniera più efficiente l'attività delle batterie nell'arco dell'intera giornata.

		<i>Tipologie di errore</i>			
		cielo molto più coperto	cielo più coperto	cielo più soleggiato	cielo molto più soleggiato
<i>Istanze</i>	senza batterie	10169,575 W	6101,745 W	6101,745 W	10169,575 W
	con batterie	10169,575 W	6101,745 W	5896,541 W	9827,568 W

Tabella 4.3: *Errore sul PV, multi-time slot con gestione batterie.*

Nel caso del modello a singolo time slot, a cui si aggiunge l'opportunità di modificare lo scheduling degli elettrodomestici nelle abitazioni, i risultati ottenuti nei differenti scenari sono riassunti nella tabella 4.4.

		<i>Tipologie di errore</i>			
		cielo molto più coperto	cielo più coperto	cielo più soleggiato	cielo molto più soleggiato
<i>Istanze</i>	senza batterie	26032,316 W	24452,996 W	36130,595 W	48733,627 W
	con batterie	42117,575 W	39493,05 W	37069,237 W	38329,012 W

Tabella 4.4: *Errore sul PV, singolo time slot gestione batterie e scheduling.*

Come si nota immediatamente dai dati riportati, questo modello non produce alcun beneficio dal punto di vista della minimizzazione dell'errore. Il motivo è dato dal fatto che, trattandosi di un modello che opera per singoli istanti di tempo, le decisioni che il risolutore prende per far fronte ad eventuali variazioni sul bilancio energetico e che riguardano l'attivazione anticipata o ritardata dei dispositivi domestici, non tengono conto in nessun modo di come tali decisioni abbiano effetti sugli istanti temporali futuri della giornata.

Infine si analizzano i risultati ottenuti dall'applicazione del precedente modello nel caso multi-time slot (Tabella 4.5).

		<i>Tipologie di errore</i>			
		cielo molto più coperto	cielo più coperto	cielo più soleggiato	cielo molto più soleggiato
<i>Istanze</i>	senza batterie	10169,575 W	6101,745 W	6101,745 W	10169,575 W
	con batterie	10279,887 W	6101,745 W	5635,716 W	9352,618 W

Tabella 4.5: *Errore sul PV, multi-time slot gestione batterie e scheduling.*

Dai risultati illustrati è evidente, una volta di più, come le batterie svolgano un ruolo fondamentale; grazie alle batterie infatti è possibile immagazzinare energia e riutilizzarla quando più conveniente. Inoltre, confrontando i risultati con quelli visti per le formulazioni precedenti, dove non è possibile apportare nessuna modifica allo scheduling degli elettrodomestici, si riscontra un'ulteriore diminuzione dell'errore. Con questo modello, se ci si trova di fronte ad un errore generato esclusivamente dall'errata previsione sulla produzione dei pannelli, lo scheduling delle attività già pianificato verrà modificato per ridurre ulteriormente le variazioni occorse. È necessario sottolineare che per la risoluzione di questo modello, indubbiamente il più laborioso, CPLEX necessita di un tempo di risoluzione molto maggiore rispetto ai casi sopra citati. Trattandosi di modelli che operano in tempo reale, è indispensabile tenere in considerazione anche le tempistiche di risoluzione, che dovranno necessariamente essere contenute. Per questo motivo viene imposto al risolutore un tempo limite di esecuzione pari a 120 secondi per ciascun time slot. Nei modelli discussi in precedenza tale limite non viene mai superato, di conseguenza la soluzione trovata corrisponde alla soluzione ottima; in questa formulazione invece, come verrà discusso a conclusione di questa sezione, la soluzione porta con sé un gap.

Infine vengono riportati i risultati ottenuti dall'applicazione della formulazione alternativa al modello precedente, nella quale viene fatta l'ipotesi di prevedere un

“fattore di comfort”, con il quale l’utente decide il numero massimo di dispositivi che potranno essere attivati in un time slot differente da ciò che pianificato in off-line.

Tipologie di errore

	cielo molto più coperto	cielo molto più soleggiato
$\mu = 0$	10169,575 W	9827,568 W
$\mu = 1$	10169,575 W	9827,568 W
$\mu = 2$	10169,575 W	9442,037 W
$\mu = 3$	10169,575 W	9442,037 W
$\mu = 4$	10169,575 W	9442,037 W
$\mu = 5$	10169,575 W	9442,037 W
$\mu = 6$	10169,575 W	9352,618 W
$\mu = 7$	10169,575 W	9352,618 W
$\mu = 8$	10169,575 W	9352,618 W
$\mu = 9$	10169,575 W	9352,618 W
$\mu = 10$	10175,575 W	9352,618 W

Tabella 4.6: *Errore sul PV: fattore di comfort.*

La tabella 4.6 mostra, per differenti valori di μ , come i risultati ottenuti non si discostino da ciò che illustrato in precedenza. In particolare è immediato notare come i casi limite rappresentino in realtà i casi già visti nei modelli sopra citati. Il caso con $\mu = 0$, ad esempio, altro non è che quanto già visto nei modelli per i quali non vi è la possibilità di apportare alcuna modifica allo scheduling pianificato in fase off-line; stesso dicasi per il caso $\mu = 10$, che è coincidente con il caso del modello che non prevede nessun vincolo di comfort. I casi intermedi mostrano come in caso di produzione minore, pur variando il numero massimo di dispositivi attivabili in un time slot differente rispetto a ciò che previsto, l’incidenza delle batterie resta invariata.

Ruolo dello scheduling nella minimizzazione dell’errore

Si vuole ora analizzare quale ruolo ricopra il solo scheduling nella minimizzazione dell’errore, per i diversi modelli proposti.

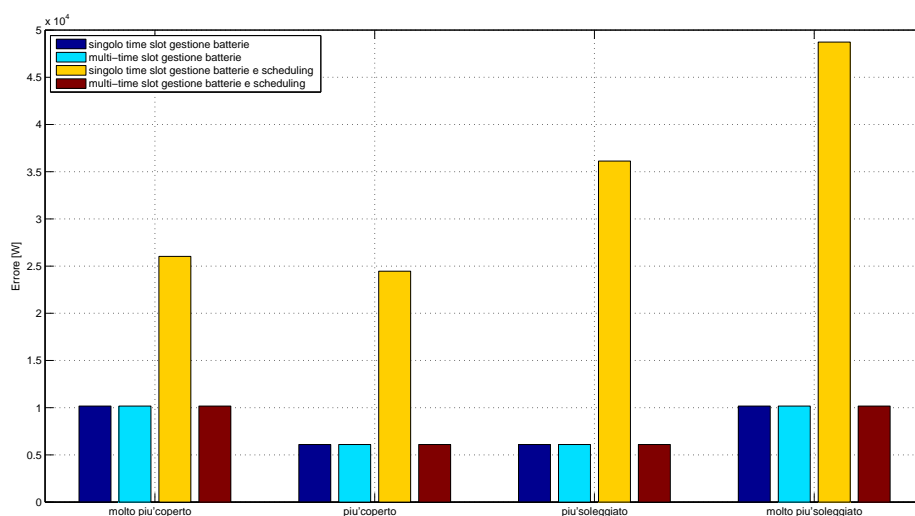


Figura 4.3: Errore sul PV: influenza dello scheduling nei vari modelli.

In particolare i risultati in Figura 4.3 rappresentano l'errore ottenuto in fase di test per istanze che non dispongo di batterie. Come si nota, l'applicazione del modello a singolo time slot con gestione delle batterie e dello scheduling delle attività non fa rilevare alcun vantaggio. Come detto infatti, le decisioni che il risolutore prende sullo scheduling per far fronte all'errore causato da una diversa produzione di energia dal pannello fotovoltaico non tengono conto in nessun modo di quali effetti abbiano tali decisioni sugli istanti temporali futuri della giornata. Nei casi delle altre formulazioni invece, si può notare come i risultati ottenuti siano gli stessi; appare chiaro quindi che se l'errore riguarda esclusivamente una diversa produzione di energia rinnovabile, il solo scheduling, senza l'ausilio dei dispositivi di accumulo di energia, non porti nessun beneficio in termini di minimizzazione dell'errore. In assenza di batterie, non essendo possibile accumulare energia per un successivo utilizzo, anche cambiando i tempi di avvio degli elettrodomestici l'errore risulterà sempre il medesimo.

Confronto fra le diverse formulazioni

In conclusione si vuole mostrare come i diversi modelli presentati minimizzino l'errore rispetto al piano energetico previsto. Nella Figura 4.4 vengono illustrati i risultati ottenuti nella fase di test nel caso di istanze con batterie. Si esclude dall'analisi il modello a singolo time slot con gestione delle batterie e dello scheduling, per cui vale il discorso fatto in precedenza. Per i modelli con sola gestione delle batterie, come detto, si osserva come il modello multi-time slot sia in grado di meglio gestire l'attività delle batterie durante tutto l'arco della giornata rispetto a quanto fatto dalla formulazione a singolo time slot, riducendo così seppur sensibilmente l'errore nel caso in cui la potenza generata dai PV sia minore di ciò che ci si attendeva. Infine, nel caso del modello multi-time slot a cui si aggiunge la gestione dello scheduling, si può rilevare un'ulteriore diminuzione dell'errore; questo sottolinea come un'efficiente gestione dei sistemi di accumulo di energia, unita alla possibilità di modificare in maniera opportuna l'avvio delle attività, permetta di ottenere ulteriori benefici. I confortanti risultati ottenuti da questa formulazione inoltre, fanno intendere quanto sarebbe opportuno introdurre nel sistema BEE un algoritmo in grado di aggiornare la predizione in tempo reale, per ridurre ulteriormente i margini di errore.

4.3.2 Errore sullo scheduling delle attività

Si osservano ora i risultati ottenuti simulando un errore causato dall'impossibilità di rispettare il programma delle attività stabilito, come già illustrato in Sez.4.2.2. Le considerazioni fatte in precedenza vengono confermate anche nel caso di errore sullo scheduling, come sarà chiaro dai risultati presentati di seguito.

Gruppi di utenze senza batterie

Il primo caso si riferisce a istanze che non dispongono di sistemi di accumulo di energia. Osservando i risultati ottenuti, riassunti in tabella 4.7, come lecito attendersi, gli approcci multi e singolo time slot con sola gestione delle batterie

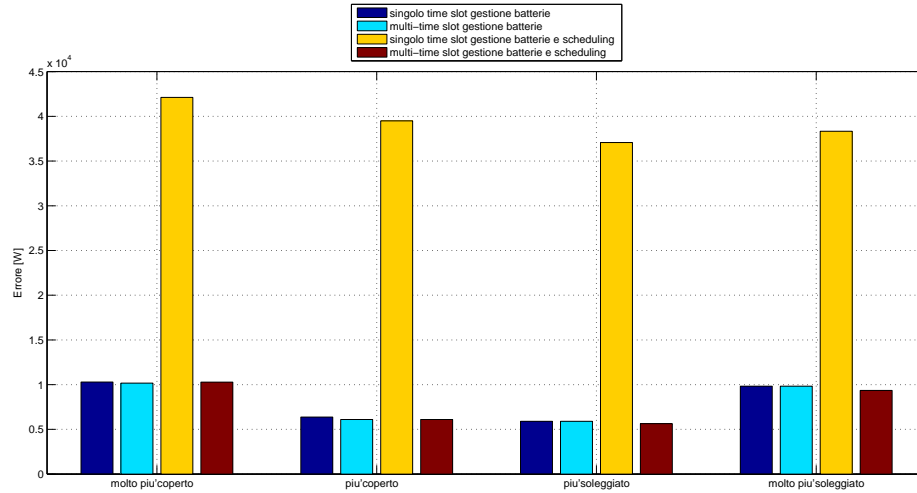


Figura 4.4: Errore sul PV: confronto fra i vari modelli proposti.

danno gli stessi valori. Capita più di frequente inoltre che la richiesta alla rete di distribuzione sia maggiore di ciò che concesso dai limiti contrattuali (potenza massima prelevabile di 3 kW), rendendo il problema irrisolvibile.

		errore 10%	errore 30%
Formulazioni	singolo time slot gestione batterie	120058 W	290253 W
	multi-time slot gestione batterie	120058 W	290253 W
	singolo time slot gestione batterie e scheduling	148410 W	279453 W
	multi-time slot gestione batterie e scheduling	94332 W	218961 W

Tabella 4.7: Errore sullo scheduling: istanze senza batterie.

Diverso è il caso dei modelli con gestione dello scheduling. Anche in questo scenario appare chiaro come l'applicazione del modello a singolo time slot non produca alcun beneficio dal punto di vista della minimizzazione dell'errore, risultando perfino meno utile dei casi sopra citati. Il modello, inoltre, si trova spesso in condizione di non poter trovare una soluzione: quasi mai infatti è possibile rispettare i fabbisogni energetici richiesti senza eccedere il vincolo contrattuale individuale

sulla massima potenza acquistabile dalla rete. Nel caso del modello multi-time slot, invece, si può notare come i risultati ottenuti siano particolarmente significativi. Con questa formulazione il modello è in grado di distribuire meglio durante tutta la giornata le variazioni occorse dall'introduzione del "nuovo" scheduling.

Gruppi di utenze con batterie

Osservando i risultati ottenuti nel caso in cui ci siano abitazioni fornite di sistemi di accumulo di energia, descritti in tabella 4.8, e confrontandoli con quelli già visti nel caso di utenze senza batterie, si nota una volta di più come le batterie permettano una riduzione molto significativa dell'errore, con riduzioni che possono superare il 30% dell'errore totale. Anche in questo caso però può spesso capitare di non riuscire a far fronte alla richiesta di energia complessiva in singoli istanti della giornata, nei quali il carico derivato dal nuovo scheduling è superiore ai limiti contrattuali imposti. Si nota altresì che i modelli con sola gestione delle batterie, se pur adottando delle decisioni che riguardano archi temporali diversi, non differiscono nei risultati ottenuti.

		errore 10%	errore 30%
<i>Formulazioni</i>	singolo time slot gestione batterie	79822,75 W	214799 W
	multi-time slot gestione batterie	79822,75 W	214799 W
	singolo time slot gestione batterie e scheduling	102223,112 W	263766,167 W
	multi-time slot gestione batterie e scheduling	61940 W	192014 W

Tabella 4.8: *Errore sullo scheduling: istanze con batterie.*

Lo stesso si può dire per i modelli con gestione dello scheduling. Il modello a singolo time slot vede ridurre sensibilmente l'errore rispetto al caso senza batterie; tuttavia il suo funzionamento anche in questo scenario non è da considerarsi proficuo. Nel caso del modello multi-time slot, invece, si riscontra una diminuzione ulteriore dell'errore e si segnala come i casi in cui il risolutore è costretto a supe-

rare il limite sulla potenza massima prelevabile di 3 kW si riducano drasticamente.

Vengono riportati infine, così come per il caso di errore sulla produzione di energia rinnovabile, i risultati ottenuti dall'applicazione del modello con fattore di comfort (tabella 4.9). Anche in questo caso per alcuni valori di μ , i risultati ottenuti rappresentano i casi limite già visti nei modelli sopra citati. Il caso con $\mu = 0$ rispecchia quanto già visto nei modelli per i quali non vi è la possibilità di apportare alcuna modifica allo scheduling; il caso $\mu = 10$ è del tutto paragonabile al caso del modello che decide di modificare lo scheduling come più opportuno. Negli altri casi invece, si vede che già per valori intermedi si ottengono miglioramenti rilevanti in termini di riduzione dell'errore. Può rivelarsi utile, in tal senso, stabilire un adeguato compromesso fra riduzione dell'errore e comodità per l'utente residenziale.

Tipologie di errore

	errore 10%	errore 30%
$\mu = 0$	79822,75 W	214799 W
$\mu = 1$	79822,75 W	214799 W
$\mu = 2$	68122,75 W	206819 W
$\mu = 3$	68122,75 W	202247 W
$\mu = 4$	65088,3 W	202247 W
$\mu = 5$	62360 W	199708,1 W
$\mu = 6$	62360 W	199708,1 W
$\mu = 7$	61940 W	197939 W
$\mu = 8$	61940 W	192014 W
$\mu = 9$	61940 W	192014 W
$\mu = 10$	61940 W	192014 W

Tabella 4.9: *Errore sullo scheduling: fattore di comfort.*

Tempi di risoluzione e gap

Come accennato nella precedente analisi dei risultati, l'obiettivo che i modelli proposti intendono perseguire non può trascendere dal considerare anche il tempo

di esecuzione che il risolutore necessita per ottenere una soluzione. Questi tempi infatti devono essere necessariamente ridotti per poter permettere ai modelli di intervenire in tempo reale nell'individuare le modifiche da apportare al piano energetico delle abitazioni. Per questo motivo i test effettuati sono stati risolti impostando un tempo massimo di risoluzione pari a 120 secondi. Nei modelli a singolo time slot e nel modello multi-time slot con sola gestione della batteria tale limite non viene mai superato, con tempi medi di risoluzione per singolo time slot che non superano il tempo di 0,5 secondi. Nel caso del modello multi-time slot con gestione delle batterie e dello scheduling, invece, i tempi si allungano di molto, specie se si considerano istanze con batterie e conseguente aumento delle variabili del problema. Più precisamente i tempi di soluzione del problema possono superare, in particolari istanze e nei primi time slot della giornata, anche i 900 secondi nel singolo time slot, rendendo di fatto il modello inutilizzabile. Avendo impostato un tempo massimo di risoluzione, nei risultati sopra esposti ottenuti per tale formulazione del modello, i valori riportati non rappresentano l'ottimo e sono caratterizzati da un gap medio per time slot di circa 0,042%.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

La crescente domanda di energia, la riduzione dei combustibili fossili e la necessità di ridurre le emissioni di biossido di carbonio, hanno portato in primo piano i temi riguardanti l'efficienza energetica. Questi temi, legati ad una sempre crescente produzione di energia da fonti rinnovabili, inducono a ridefinire il vecchio paradigma della rete elettrica tradizionale, a favore di una più prolifica coordinazione istantanea tra domanda e produzione. In questa nuova idea di rete "intelligente", detta appunto Smart Grid, il singolo utente abbandona il ruolo passivo che rivestiva nelle reti elettriche tradizionali, diventando un attore principale in grado di fornire alla rete informazioni utili ai distributori in fase di pianificazione. Tale approccio però, necessita di un'integrazione efficiente tra le tecnologie dell'informazione e le telecomunicazioni, in grado di realizzare efficienti meccanismi di gestione della domanda detti anche Demand Side Management. Il settore residenziale rappresenta uno degli scenari più promettenti per l'implementazione di sistemi DSM. Questi sistemi possono essere di due diverse tipologie: off-line ed on-line. Nello scenario off-line, realizzato sulla base di previsioni su ciò che accadrà nel prossimo futuro, il sistema definisce il piano ottimale di energia per periodi a venire. Nel caso on-line invece, la gestione della domanda ha lo scopo di definire in tempo reale il piano energetico, sulla base delle effettive esigenze degli utenti e facendo fronte ad eventuali previsioni non corrette. L'opportunità di seguire il piano energetico predefinito risulta utile nel ridurre lo "stress" della

rete elettrica, che si traduce spesso in interventi di manutenzione o potenziamento. Tali vantaggi per il sistema avrebbero inoltre un consistente impatto anche sull'utente finale, in termini di incentivi e riduzioni sulla spesa energetica.

In questo lavoro di tesi ho proposto alcuni modelli di ottimizzazione on-line dei consumi energetici in ambito residenziale. Questi modelli reagiscono in tempo reale a comportamenti non conformi a ciò che previsto nella fase off-line, con l'obiettivo di rispettare il piano definito e minimizzare le variazioni riscontrate. In particolare, sono stati presentati due diversi modelli di ottimizzazione: il primo compensa tali variazioni con il solo ausilio di sistemi di accumulo di energia (batterie), mentre il secondo è anche in grado di modificare lo scheduling dei dispositivi al fine di perseguire l'obiettivo in esame. Inoltre, per ognuno di questi casi, due diverse varianti sono state proposte a seconda che la minimizzazione delle variazioni sia realizzata nel singolo time-slot di tempo preso in considerazione, o sull'intera giornata. L'obiettivo finale proposto è di programmare in modo ottimale le attività dei dispositivi domestici e decidere quando è più opportuno immagazzinare, comprare o vendere energia, in modo da minimizzare la differenza tra la domanda di energia definita in tempo reale e quella individuata nella pianificazione off-line.

I metodi esposti sono stati testati su dati relativi al mercato elettrico italiano per apprezzare correttamente le prestazioni di ogni algoritmo. I test hanno riguardato i possibili errori che possono verificarsi nelle previsioni utilizzate, sia che si tratti di errate valutazioni sulla produzione di energia rinnovabile, sia che si tratti di errori sui tempi di avvio degli elettrodomestici. Tali test confermano i benefici ottenibili dall'implementazione di sistemi di DSM che operino in real-time, capaci di ridurre gli errori dovuti ad errate previsioni. Come previsto, un ruolo fondamentale è svolto dalle batterie, che forniscono ai metodi on-line la possibilità di acquistare o vendere energia (per carica e scarica della batteria) per poter ridurre considerevolmente le variazioni dai profili di acquisto e vendita definiti dal modello off-line.

Nel caso di errore sulla produzione di energia rinnovabile i risultati hanno evidenziato un diverso comportamento fra i casi in cui si produce più o meno del previsto. Se la produzione è maggiore di quanto stabilito nel piano energetico off-line, le batterie sono in grado di accumulare energia per un utilizzo successivo, compensando in tal modo l'errore di predizione. Nel caso di produzione minore, invece, si può ovviare solo in parte alla mancata energia in ingresso al sistema, scaricando il più possibile la batteria, con risultati non particolarmente positivi dal punto di vista della minimizzazione dell'errore sui profili. In entrambe le tipologie di errore valutate il modello multi-time slot si è mostrato in grado di meglio gestire l'attività delle batterie durante tutto l'arco della giornata rispetto a quanto fatto dal modello a singolo time slot; nella formulazione a cui si aggiunge alla gestione dei sistemi di accumulo di energia, la gestione dello scheduling, si può inoltre rilevare un'ulteriore diminuzione dell'errore. Infine si è visto come l'applicazione del modello a singolo time slot con gestione delle batterie e dello scheduling non produca alcun beneficio dal punto di vista della minimizzazione dell'errore, risultando perfino meno utile delle altre formulazioni esposte.

I test effettuati rappresentano solo un primo passo nello sviluppo di modelli on-line di gestione dell'energia per utenze residenziali. Possibili sviluppi futuri potrebbero consistere nell'effettuare ulteriori test nel caso di utenti cooperativi, valutando il comportamento del sistema nel caso di gruppi di utenze eterogenee, con differenti scenari e configurazioni di utilizzo dell'energia. Sarebbe inoltre utile accrescere le dimensioni del problema, in modo da considerare gruppi più numerosi di utenti. Per permettere ciò è necessario rianalizzare il problema e ridefinire il modello attraverso nuove tecniche; potrebbe essere utile, in tal senso, definire delle euristiche che permettano di risolvere in maniera più veloce e con un maggior numero di utenti i problemi di cui discusso. Infatti, come già detto, i tempi di calcolo rappresentano un punto focale nell'analisi dei risultati ottenuti, dal momento che nel gestire l'energia in tempo reale si necessita di tempistiche precise per poter

prendere decisioni in tempi utili. Potrebbero essere inoltre definiti nuovi modelli per permettere di avere maggiore flessibilità e maggior controllo sui dispositivi, dando ad esempio al risolutore un certo grado di controllo sui profili di consumo e consentendo ai modelli di poter interrompere tali attività ed eseguirle in momenti più favorevoli, oppure analizzando con maggior dettaglio i vincoli relativi alle attività dei dispositivi, riservando maggior attenzione alle necessità degli utenti e al loro comfort. Infine, un ulteriore sviluppo potrebbe consistere nel definire nella fase off-line diversi piani energetici per la giornata, ognuno dei quali tenga conto di possibili variazioni on-line; oppure ancora si potrebbe considerare l'introduzione di un algoritmo in grado di aggiornare la predizione in tempo reale. Tali soluzioni implicherebbero però una maggiore flessibilità da parte del fornitore di energia, che dovrebbe essere in grado di tener conto di diversi possibili piani per l'utente.

Appendice A

Codice AMPL

A.1 Singolo time slot con gestione batterie

```
# DEFINIZIONE DEGLI INSIEMI
set B;
set F;
set A;
set T;
set H;
set Hb;
set Hp;

#insieme case con batterie
#insieme case con pannello fotovoltaico

# DEFINIZIONE DEI PARAMETRI
param ts >= 0;
param piIN {T} >= 0;
param piINTot {T} >= 0;
param piPV {h in Hp,t in T} >= 0;
param yOLD {h in H} >= 0;
param zOLD {h in H} >= 0;
param x {h in H,a in A,t in T}, binary;
param lp {a in A,f in F} >= 0;

#puntatore al time slot attuale
#limite contrattuale potenza
#potenza massima prelevabile totale
#potenza prodotta dal PV
#profilo acquisto potenza offline
#profilo vendita potenza offline
#1 se l'attività a inizia nel time slot t
#Profilo di carico

#Parametri delle batterie
param gammamin {B} >= 0;
param gammamax {B} >= 0;
param taumin {B} >= 0;
param taumax {B} >= 0;
param tetamin {B} >= 0;
param tetamax {B} >= 0;
param icha {Hb,B} >= 0;
param eta {B} >= 0;

#Carica minima
#Carica massima
#velocità minima di carica
#velocità massima di carica
#velocità minima di scarica
#velocità massima di scarica
#carica batteria time slot precedente
#efficienza della batteria
```

```

# DEFINIZIONI DELLE VARIABILI
var omegaC {Hb,b in B}, binary;          #1 se la batteria viene caricata in t
var omegaD {Hb,b in B}, binary;          #1 se la batteria viene scaricata in t
var vC {Hb,b in B} >= 0;                 #velocità di carica della batteria
var vD {Hb,b in B} >= 0;                 #velocità di scarica della batteria
var e {Hb,b in B} >= 0;                  #potenza istantanea della batteria
var k {h in H} >= 0;                      #variabile linearizzazione
var d {h in H} >= 0;                      #variabile linearizzazione
var z {h in H} >= 0;                      #potenza venduta
var y {h in H} >= 0;                      #potenza comprata

# FUNZIONE OBIETTIVO
minimize variazione:
sum{h in H}(k[h]+d[h]);

# DEFINIZIONE DEI VINCOLI
subject to lin1{h in H}:                  #vincolo linearizzazione
(y[h]-yOLD[h]) <= k[h];

subject to lin2{h in H}:                  #vincolo linearizzazione
(y[h]-yOLD[h]) >= -k[h];

subject to lin3{h in H}:                  #vincolo linearizzazione
(z[h]-zOLD[h]) <= d[h];

subject to lin4{h in H}:                  #vincolo linearizzazione
(z[h]-zOLD[h]) >= -d[h];

subject to sogliacompr{h in H}:          #massima potenza acquistabile
y[h] <= piIN[ts];

subject to sogliaggregata:               #massimo picco aggregato
sum{h in H} y[h] <= piINTot[ts];

subject to vincoloenergetico{h in H diff Hb diff Hp}:
y[h] = z[h]+sum{a in A, f in F:f<=ts}(lp[a,f]*x[h,a,ts-f+1]);
#bilancio energetico
#case senza PV e batterie

subject to vincoloenergetico2{h in Hp inter Hb}:
y[h]+piPV[h,ts]+sum{b in B} vD[h,b] = z[h]+
+sum{a in A, f in F:f<=ts}(lp[a,f]*x[h,a,ts-f+1])+sum{b in B} vC[h,b];
#bilancio energetico
#case con PV e batterie

subject to vincoloenergetico3{h in Hp diff Hb}:
y[h]+piPV[h,ts] = z[h]+sum{a in A, f in F:f<=ts}(lp[a,f]*x[h,a,ts-f+1]);
#bilancio energetico
#case con solo PV

```



```

subject to vincoloenergetico4{h in Hb diff Hp}:
y[h]+sum{b in B} vD[h,b] = z[h]+
+sum{a in A, f in F:f<=ts}(lp[a,f]*x[h,a,ts-f+1])+sum{b in B} vC[h,b];
#bilancio energetico
case con solo batterie

subject to contemp {h in H inter Hb,b in B}:
omegaC[h,b] + omegaD[h,b] <= 1;
#una batteria non può essere
contemporaneamente in carica
ed in scarica

subject to vcmx {h in H inter Hb,b in B}:
vC[h,b] <= taumax[b]*omegaC[h,b];
#rate massimo di carica

subject to vcmin {h in H inter Hb,b in B}:
vC[h,b] >= taumin[b]*omegaC[h,b];
#rate minimo di carica

subject to vdmax {h in H inter Hb,b in B}:
vD[h,b] <= tetamax[b]*omegaD[h,b];
#rate massimo di scarica

subject to vdmin {h in H inter Hb,b in B}:
vD[h,b] >= tetamin[b]*omegaD[h,b];
#rate minimo di scarica

subject to caricamin {h in H inter Hb,b in B}:
e[h,b] >= gammamin[b];
#carica minima della batteria

subject to caricamax {h in H inter Hb,b in B}:
e[h,b] <= gammamax[b];
#carica massima della batteria

subject to carica {h in H inter Hb,b in B}:
e[h,b] = icha[h,b] + eta[b]*vC[h,b]*1/4-(1/eta[b])*vD[h,b]*1/4;
#la quantità di carica è legata all'istante
precedente e alla carica immessa o prelevata

```

A.2 Multi-time slot con gestione batterie

```

# DEFINIZIONE DEGLI INSIEMI
set B;
set F;
set A;
set T;
set H;
set Hb;
set Hp;
param begin;
param end;
set Told := begin .. end;

# DEFINIZIONE DEI PARAMETRI
param ts >= 0;
param piIN {T} >= 0;
param piIntot {T} >= 0;
param piPV {h in Hp,t in T} >= 0;
param yOLD {h in H,t in T diff Told} >= 0;
param zOLD {h in H,t in T diff Told} >= 0;
param x {h in H,a in A,t in T}, binary;
param lp {a in A,f in F} >= 0;

#Parametri delle batterie
param gammamin {B} >= 0;
param gammamax {B} >= 0;
param taumin {B} >= 0;
param taumax {B} >= 0;
param tetamin {B} >= 0;
param tetamax {B} >= 0;
param icha {Hb,B} >= 0;
param eta {B} >= 0;

# DEFINIZIONE DELLE VARIABILI
var omegaC {Hb,b in B,t in T diff Told}, binary;
var omegaD {Hb,b in B,t in T diff Told}, binary;
var vC {Hb,b in B,t in T diff Told} >= 0;
var vD {Hb,b in B,t in T diff Told} >= 0;
var e {Hb,b in B,t in T diff Told} >= 0;
var k {h in H,t in T diff Told} >= 0;
var d {h in H,t in T diff Told} >= 0;
var z {h in H,t in T diff Told} >= 0;
var y {h in H,t in T diff Told} >= 0;

# FUNZIONE OBIETTIVO
minimize variazione:
sum{h in H,t in T diff Told} (k[h,t]+d[h,t]);

# DEFINIZIONE DEI VINCOLI
subject to lin1{h in H,t in T diff Told}:#vincolo linearizzazione
(y[h,t]-yOLD[h,t]) <= k[h,t];

subject to lin2{h in H,t in T diff Told}:#vincolo linearizzazione
(y[h,t]-yOLD[h,t]) >= -k[h,t];

subject to lin3{h in H,t in T diff Told}:#vincolo linearizzazione
(z[h,t]-zOLD[h,t]) <= d[h,t];

subject to lin4{h in H,t in T diff Told}:#vincolo linearizzazione
(z[h,t]-zOLD[h,t]) >= -d[h,t];

```

```

subject to sogliacompr{h in H,t in T diff Told}:#massima potenza acquistabile
y[h,t] <= piIN[t];

subject to sogliaggregata{t in T diff Told}: #massimo picco aggregato
sum{h in H} y[h,t] <= piINTot[t];

subject to vincoloenergetico{h in H diff Hb diff Hp,t in T diff Told}:
y[h,t] = z[h,t]+sum{a in A, f in F:f<=t}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1]);
#bilancio energetico
case senza PV e batterie

subject to vincoloenergetico2{h in Hp inter Hb,t in T diff Told}:
y[h,t]+piPV[h,t]+sum{b in B} vD[h,b,t] = z[h,t]+
+sum{a in A, f in F:f<=t}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1])+sum{b in B} vC[h,b,t];
#bilancio energetico
case con PV e batterie

subject to vincoloenergetico3{h in Hp diff Hb,t in T diff Told}:
y[h,t]+piPV[h,t] = z[h,t]+sum{a in A, f in F:f<=t}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1]);
#bilancio energetico
case con solo PV

subject to vincoloenergetico4{h in Hb diff Hp,t in T diff Told}:
y[h,t]+sum{b in B} vD[h,b,t] = z[h,t]+
+sum{a in A, f in F:f<=t}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1])+sum{b in B} vC[h,b,t];
#bilancio energetico
case con solo batterie

subject to contemp {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
omegaC[h,b,t] + omegaD[h,b,t] <= 1;
#una batteria non può essere
contemporaneamente in carica
ed in scarica

subject to vcmax {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vC[h,b,t] <= taumax[b]*omegaC[h,b,t];
#rate massimo di carica

subject to vcmin {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vC[h,b,t] >= taumin[b]*omegaC[h,b,t];
#rate minimo di carica

subject to vdmax {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vD[h,b,t] <= tetamax[b]*omegaD[h,b,t];
#rate massimo di scarica

subject to vdmin {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vD[h,b,t] >= tetamin[b]*omegaD[h,b,t];
#rate minimo di scarica

subject to caricamin {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
e[h,b,t] >= gammamin[b];
#carica massima della batteria

subject to caricamax {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
e[h,b,t] <= gammamax[b];
#carica minima della batteria

subject to caricainiziale {h in H inter Hb,b in B}:
e[h,b,ts] = icha[h,b]+ eta[b]*vC[h,b,ts]*1/4-(1/eta[b])*vD[h,b,ts]*1/4;
#carica della batteria al tempo ts

```

```
subject to carica {h in H inter Hb,b in B,t in T diff (Told union {ts})}:  
e[h,b,t] = e[h,b,t-1] + eta[b]*vC[h,b,t]*1/4-(1/eta[b])*vD[h,b,t]*1/4;  
#la quantità di carica è legata all'istante  
precedente e alla carica immessa o prelevata
```

A.3 Singolo time slot con gestione batterie e scheduling delle attività

```

# DEFINIZIONE DEGLI INSIEMI
set B;
set F;
set A;
set T;
set H;
set Hb;
set Hp;
set Ts {H,A} within T ordered;

param begin;
param end;
set Told := begin .. end;

# DEFINIZIONE DEI PARAMETRI
param ts >= 0;
param piIN {T} >= 0;
param piINTot {T} >= 0;
param piPV {h in Hp,t in T} >= 0;
param yOLD {h in H} >= 0;
param zOLD {h in H} >= 0;
param xOLD {h in H,a in A,t in Told}, binary;

param lp {a in A,f in F} >= 0;

#Parametri delle batterie
param gammamin {B} >= 0;
param gammamax {B} >= 0;
param taumin {B} >= 0;
param taumax {B} >= 0;
param tetamin {B} >= 0;
param tetamax {B} >= 0;
param icha {Hb,B} >= 0;
param eta {B} >= 0;

# DEFINIZIONE DELLE VARIABILI
var omegaC {Hb,b in B}, binary;
var omegaD {Hb,b in B}, binary;
var x {h in H,a in A}, binary;
var vC {Hb,b in B} >= 0;
var vD {Hb,b in B} >= 0;
var e {Hb,b in B} >= 0;
var k {h in H} >= 0;
var d {h in H} >= 0;
var z {h in H} >= 0;
var y {h in H} >= 0;

# FUNZIONE OBIETTIVO
minimize variazione:
sum{h in H}(k[h]+d[h]);

# DEFINIZIONE DEI VINCOLI
subject to lin1{h in H}:
(y[h]-yOLD[h]) <= k[h];

```

#insieme case con batterie
#insieme case con pannello fotovoltaico
#insieme dei time slot validi per l'attivazione di ogni a
#insieme dei time slot passati
#puntatore al time slot attuale
#limite contrattuale potenza
#potenza massima prelevabile dalla
#energia prodotta dal PV
#profilo acquisto potenza offline
#profilo vendita potenza offline
#1 se il dispositivo a è attivato nel time slot t (dispositivi già attivati)
#Profilo di carico
#Carica minima
#Carica massima
#velocità minima di carica
#velocità massima di carica
#velocità minima di scarica
#velocità massima di scarica
#carica batteria time slot precedente
#efficienza della batteria
#1 se la batteria viene caricata in t
#1 se la batteria viene scaricata in t
#1 se il dispositivo a viene attivato in t
#velocità di carica della batteria
#velocità di scarica della batteria
#potenza istantanea della batteria
#variabile linearizzazione
#variabile linearizzazione
#potenza venduta
#potenza comprata
#vincolo linearizzazione


```

subject to lin2{h in H}:                #vincolo linearizzazione
(y[h]-yOLD[h]) >= -k[h];

subject to lin3{h in H}:                #vincolo linearizzazione
(z[h]-zOLD[h]) <= d[h];

subject to lin4{h in H}:                #vincolo linearizzazione
(z[h]-zOLD[h]) >= -d[h];

subject to sogliacompr{h in H}:         #massima potenza acquistabile
y[h] <= piIN[ts];

subject to sogliagggregata:             #massimo picco aggregato
sum{h in H} y[h] <= piINTot[ts];

subject to vincoloenergetico{h in H diff Hb diff Hp}:
y[h] = z[h]+sum{a in A, f in F:(ts-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,ts-f+1])+
+sum{a in A:ts in Ts[h,a]}(lp[a,1]*x[h,a]);
#bilancio energetico
case senza PV e batterie

subject to vincoloenergetico2{h in Hp inter Hb}:
y[h]+piPV[h,ts]+sum{b in B} vD[h,b] = z[h]+
+sum{a in A, f in F:(ts-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,ts-f+1])+
+sum{a in A:ts in Ts[h,a]}(lp[a,1]*x[h,a])+sum{b in B} vC[h,b];
#bilancio energetico
case con PV e batterie

subject to vincoloenergetico3{h in Hp diff Hb}:
y[h]+piPV[h,ts] = z[h]+
+sum{a in A, f in F:(ts-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,ts-f+1])+
+sum{a in A:ts in Ts[h,a]}(lp[a,1]*x[h,a]);
#bilancio energetico
case con solo PV

subject to vincoloenergetico4{h in Hb diff Hp}:
y[h]+sum{b in B} vD[h,b] = z[h]+
+sum{a in A, f in F:(ts-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,ts-f+1])+
+sum{a in A:ts in Ts[h,a]}(lp[a,1]*x[h,a])+sum{b in B} vC[h,b];
#bilancio energetico
case con solo batterie

subject to notmoreone {h in H,a in A:ts in Ts[h,a]}:
x[h,a] + sum{t in Told inter Ts[h,a]} xOLD[h,a,t] <= 1;
#impedisce che a sia attivato
più di una volta

subject to atleast {h in H,a in A:card(Ts[h,a] diff Told diff {ts})=0}:
x[h,a] + sum{t in Told inter Ts[h,a]} xOLD[h,a,t] = 1;
#forza l'attivazione nell'ultimo
time slot utile

```

```

subject to contemp {h in H inter Hb,b in B}:
omegaC[h,b] + omegaD[h,b] <= 1;
#una batteria non può essere
#contemporaneamente in carica ed in scarica

subject to vcmax {h in H inter Hb,b in B}:
vc[h,b] <= taumax[b]*omegaC[h,b];
#rate massimo di carica

subject to vcmin {h in H inter Hb,b in B}:
vc[h,b] >= taumin[b]*omegaC[h,b];
#rate minimo di carica

subject to vdmax {h in H inter Hb,b in B}:
vD[h,b] <= tetamax[b]*omegaD[h,b];
#rate massimo di scarica

subject to vdmin {h in H inter Hb,b in B}:
vD[h,b] >= tetamin[b]*omegaD[h,b];
#rate minimo di scarica

subject to caricamin {h in H inter Hb,b in B}:
e[h,b] >= gammamin[b];
#carica massima della batteria

subject to caricamax {h in H inter Hb,b in B}:
e[h,b] <= gammamax[b];
#carica minima della batteria

subject to carica {h in H inter Hb,b in B}:
e[h,b] = icha[h,b] + eta[b]*vc[h,b]*1/4-(1/eta[b])*vD[h,b]*1/4;
#la quantità di carica è legata all'istante
#precedente e alla carica immessa o prelevata

```

A.4 Multi-time slot con gestione batterie e scheduling delle attività

```

# DEFINIZIONE DEGLI INSIEMI
set B;
set F;
set A;
set T;
set H;
set Hb;
set Hp;
set Ts {H,A} within T ordered;

param begin;
param end;
set Told := begin .. end;

# DEFINIZIONE DEI PARAMETRI
param ts >= 0;
param piIN {T} >= 0;
param piINTot {T} >= 0;
param piPV {h in Hp,t in T} >= 0;
param yOLD {h in H,t in T diff Told} >= 0;
param zOLD {h in H,t in T diff Told} >= 0;
param xOLD {h in H,a in A,t in Told}, binary;

param lp {a in A,f in F} >= 0;

#Parametri delle batterie
param gammamin {B} >= 0;
param gammamax {B} >= 0;
param taumin {B} >= 0;
param taumax {B} >= 0;
param tetamin {B} >= 0;
param tetamax {B} >= 0;
param icha {Hb,B} >= 0;
param eta {B} >= 0;

# DEFINIZIONE DELLE VARIABILI
var omegaC {Hb,b in B,t in T diff Told}, binary;#1 se la batteria viene caricata in t
var omegaD {Hb,b in B,t in T diff Told}, binary;#1 se la batteria viene scaricata in t
var x {h in H,a in A, t in T diff Told}, binary;#1 se il dispositivo a viene attivato in t
var vC {Hb,b in B,t in T diff Told} >= 0;
var vD {Hb,b in B,t in T diff Told} >= 0;
var e {Hb,b in B,t in T diff Told} >= 0;
var k {h in H,t in T diff Told} >= 0;
var d {h in H,t in T diff Told} >= 0;
var z {h in H,t in T diff Told} >= 0;
var y {h in H,t in T diff Told} >= 0;

#insieme case con batterie
#insieme case con pannello fotovoltaico
#insieme dei time slot validi per
l'attivazione di ogni a

#insieme dei time slot passati

#puntatore al time slot attuale
#limite contrattuale
#potenza massima prelevabile dalla rete
#potenza prodotta dal PV
#profilo acquisto potenza offline
#profilo vendita potenza offline
#1 se il dispositivo a è attivato nel
time slot t (dispositivi già attivati)
#Profilo di carico

#Carica minima
#Carica massima
#velocità minima di carica
#velocità massima di carica
#velocità minima di scarica
#velocità massima di scarica
#carica batteria time slot precedente
#efficienza della batteria

#velocità di carica della batteria
#velocità di scarica della batteria
#potenza istantanea della batteria
#variabile linearizzazione
#variabile linearizzazione
#potenza venduta
#potenza comprata

# FUNZIONE OBIETTIVO
minimize variazione:
sum{h in H,t in T diff Told} (k[h,t]+d[h,t]);

```



```

# DEFINIZIONE DEI VINCOLI
subject to lin1{h in H,t in T diff Told}:      #vincolo linearizzazione
(y[h,t]-yOLD[h,t]) <= k[h,t];

subject to lin2{h in H,t in T diff Told}:      #vincolo linearizzazione
(y[h,t]-yOLD[h,t]) >= -k[h,t];

subject to lin3{h in H,t in T diff Told}:      #vincolo linearizzazione
(z[h,t]-zOLD[h,t]) <= d[h,t];

subject to lin4{h in H,t in T diff Told}:      #vincolo linearizzazione
(z[h,t]-zOLD[h,t]) >= -d[h,t];

subject to sogliacompr{h in H,t in T diff Told}:#massima potenza acquistabile
y[h,t] <= piIN[t];

subject to sogliagggregata{t in T diff Told}:  #massimo picco aggregato
sum{h in H} y[h,t] <= piINTot[t];

subject to vincoloenergetico{h in H diff Hb diff Hp,t in T diff Told}:
y[h,t] = z[h,t]+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,t-f+1])+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] diff Told}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1]);
#bilancio energetico
case senza PV e batterie

subject to vincoloenergetico2{h in Hp inter Hb,t in T diff Told}:
y[h,t]+piPV[h,t]+sum{b in B} vD[h,b,t] = z[h,t]+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,t-f+1])+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] diff Told}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1])+sum{b in B} vC[h,b,t];
#bilancio energetico
case con PV e batterie

subject to vincoloenergetico3{h in Hp diff Hb,t in T diff Told}:
y[h,t]+piPV[h,t] = z[h,t]+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,t-f+1])+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] diff Told}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1]);
#bilancio energetico
case con solo PV

subject to vincoloenergetico4{h in Hb diff Hp,t in T diff Told}:
y[h,t]+sum{b in B} vD[h,b,t] = z[h,t]+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,t-f+1])+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] diff Told}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1])+sum{b in B} vC[h,b,t];
#bilancio energetico
case con solo batterie

subject to oncenotwice {h in H,a in A}:
sum{t in Ts[h,a] diff Told} x[h,a,t] + sum{t in Told inter Ts[h,a]} xOLD[h,a,t] = 1;
#impedisce che a sia attivato più di
una volta, ma almeno una

subject to contemp {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
omegaC[h,b,t] + omegaD[h,b,t] <= 1;
#una batteria non può essere contemporaneamente
in carica ed in scarica

subject to vcmax {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vC[h,b,t] <= taumax[b]*omegaC[h,b,t];
#rate massimo di carica

```

```

subject to vCmin {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vC[h,b,t] >= taumin[b]*omegaC[h,b,t];
                                                    #rate minimo di carica

subject to vDmax {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vD[h,b,t] <= tetamax[b]*omegaD[h,b,t];
                                                    #rate massimo di scarica

subject to vDmin {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vD[h,b,t] >= tetamin[b]*omegaD[h,b,t];
                                                    #rate minimo di scarica

subject to caricamin {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
e[h,b,t] >= gammamin[b];
                                                    #carica massima della batteria

subject to caricamax {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
e[h,b,t] <= gammamax[b];
                                                    #carica minima della batteria

subject to caricainiziale {h in H inter Hb,b in B}:
e[h,b,ts] = icha[h,b]+ eta[b]*vC[h,b,ts]*1/4-(1/eta[b])*vD[h,b,ts]*1/4;
                                                    #carica della batteria al tempo ts

subject to carica {h in H inter Hb,b in B,t in T diff (Told union {ts})}:
e[h,b,t] = e[h,b,t-1] + eta[b]*vC[h,b,t]*1/4-(1/eta[b])*vD[h,b,t]*1/4;
                                                    #la carica nei successivi time slots

```

A.5 Fattore di comfort

```

# DEFINIZIONE DEGLI INSIEMI
set B;
set F;
set A;
set T;
set H;
set Hb;
set Hp;
set Ts {H,A} within T ordered;

#insieme case con batterie
#insieme case con pannello fotovoltaico
#insieme dei time slot validi per
l'attivazione di ogni a

param begin;
param end;
set Told := begin .. end;

#insieme dei time slot passati

# DEFINIZIONE DEI PARAMETRI
param ts >= 0;
param piIN {T} >= 0;
param piIntot {T} >= 0;
param piPV {h in Hp,t in T} >= 0;
param yOLD {h in H,t in T diff Told} >= 0;
param zOLD {h in H,t in T diff Told} >= 0;
param xOLD {h in H,a in A,t in Told}, binary;

#puntatore al time slot attuale
#limite contrattuale
#potenza massima prelevabile dalla rete
#potenza prodotta dal PV
#profilo acquisto potenza offline
#profilo vendita potenza offline
#1 se il dispositivo a è attivato nel
time slot t (dispositivi già attivati)

param lp {a in A,f in F} >= 0;
param mu >= 0;
param xOFF {h in H,a in A,t in T diff Told}, binary;

#Profilo di carico
#fattore di comfort
#scheduling OFFLINE dal time slot
corrente fino a fine giornata

#Parametri delle batterie
param gammamin {B} >= 0;
param gammamax {B} >= 0;
param taumin {B} >= 0;
param taumax {B} >= 0;
param tetamin {B} >= 0;
param tetamax {B} >= 0;
param icha {Hb,B} >= 0;
param eta {B} >= 0;

#Carica minima
#Carica massima
#velocità minima di carica
#velocità massima di carica
#velocità minima di scarica
#velocità massima di scarica
#carica batteria time slot precedente
#efficienza della batteria

# DEFINIZIONE DELLE VARIABILI
var omegaC {Hb,b in B,t in T diff Told}, binary;
var omegaD {Hb,b in B,t in T diff Told}, binary;
var x {h in H,a in A, t in T diff Told}, binary;
var vC {Hb,b in B,t in T diff Told} >= 0;
var vD {Hb,b in B,t in T diff Told} >= 0;
var e {Hb,b in B,t in T diff Told} >= 0;
var k {h in H,t in T diff Told} >= 0;
var d {h in H,t in T diff Told} >= 0;
var z {h in H,t in T diff Told} >= 0;
var y {h in H,t in T diff Told} >= 0;
var j {h in H,a in A,t in T diff Told} >= 0;

#1 se la batteria viene caricata in t
#1 se la batteria viene scaricata in t
#1 se il dispositivo a viene attivato in t
#velocità di carica della batteria
#velocità di scarica della batteria
#potenza istantanea della batteria
#variabile linearizzazione
#variabile linearizzazione
#potenza venduta
#potenza comprata
#linearizzazione scheduling

# FUNZIONE OBIETTIVO
minimize variazione:
sum{h in H,t in T diff Told} (k[h,t]+d[h,t]);

# DEFINIZIONE DEI VINCOLI
subject to lini{h in H,t in T diff Told}:
(y[h,t]-yOLD[h,t]) <= k[h,t];

#vincolo linearizzazione

```

```

subject to lin2{h in H,t in T diff Told}:          #vincolo linearizzazione
(y[h,t]-yOLD[h,t]) >= -k[h,t];

subject to lin3{h in H,t in T diff Told}:          #vincolo linearizzazione
(z[h,t]-zOLD[h,t]) <= d[h,t];

subject to lin4{h in H,t in T diff Told}:          #vincolo linearizzazione
(z[h,t]-zOLD[h,t]) >= -d[h,t];

subject to lin5{h in H,t in T diff Told,a in A:t in Ts[h,a]}:
(x[h,a,t]-xOFF[h,a,t]) <= j[h,a,t];
                                                    #linearizzazione scheduling

subject to lin6{h in H,t in T diff Told,a in A:t in Ts[h,a]}:
(x[h,a,t]-xOFF[h,a,t]) >= -j[h,a,t];
                                                    #linearizzazione scheduling

subject to comfort{h in H}:
sum{t in T diff Told,a in A:t in Ts[h,a]} j[h,a,t] <= mu;
                                                    #numero di dispositivi
                                                    spostabili rispetto all'offline

subject to sogliacompr{h in H,t in T diff Told}:#massima potenza acquistabile
y[h,t] <= piIN[t];

subject to sogliaggregata{t in T diff Told}:      #massimo picco aggregato
sum{h in H} y[h,t] <= piINTot[t];

subject to vincoloenergetico{h in H diff Hb diff Hp,t in T diff Told}:
y[h,t] = z[h,t]+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,t-f+1])+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] diff Told}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1]);
                                                    #bilancio energetico
                                                    case senza PV e batterie

subject to vincoloenergetico2{h in Hp inter Hb,t in T diff Told}:
y[h,t]+piPV[h,t]+sum{b in B} vD[h,b,t] = z[h,t]+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,t-f+1])+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] diff Told}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1])+sum{b in B} vC[h,b,t];
                                                    #bilancio energetico
                                                    case con PV e batterie

subject to vincoloenergetico3{h in Hp diff Hb,t in T diff Told}:
y[h,t]+piPV[h,t] = z[h,t]+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,t-f+1])+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] diff Told}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1]);
                                                    #bilancio energetico
                                                    case con solo PV

subject to vincoloenergetico4{h in Hb diff Hp,t in T diff Told}:
y[h,t]+sum{b in B} vD[h,b,t] = z[h,t]+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] inter Told}(lp[a,f]*xOLD[h,a,t-f+1])+
+sum{a in A, f in F:(t-f+1) in Ts[h,a] diff Told}(lp[a,f]*x[h,a,t-f+1])+sum{b in B} vC[h,b,t];
                                                    #bilancio energetico
                                                    case con solo batterie

subject to oncenotwice {h in H,a in A}:
sum{t in Ts[h,a] diff Told} x[h,a,t] + sum{t in Told inter Ts[h,a]} xOLD[h,a,t] = 1;
                                                    #impedisce che a sia attivato più di
                                                    una volta, ma almeno una

```

```

subject to contemp {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
omegaC[h,b,t] + omegaD[h,b,t] <= 1;
                                     #una batteria non può essere
                                     contemporaneamente in carica ed in scarica

subject to vcmax {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vc[h,b,t] <= taumax[b]*omegaC[h,b,t];
                                     #rate massimo di carica

subject to vcmin {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vc[h,b,t] >= taumin[b]*omegaC[h,b,t];
                                     #rate minimo di carica

subject to vdmax {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vD[h,b,t] <= tetamax[b]*omegaD[h,b,t];
                                     #rate massimo di scarica

subject to vdmin {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
vD[h,b,t] >= tetamin[b]*omegaD[h,b,t];
                                     #rate minimo di scarica

subject to caricamin {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
e[h,b,t] >= gammamin[b];
                                     #carica massima della batteria

subject to caricamax {h in H inter Hb,b in B,t in T diff Told}:
e[h,b,t] <= gammamax[b];
                                     #carica minima della batteria

subject to caricainiziale {h in H inter Hb,b in B}:
e[h,b,ts] = icha[h,b]+ eta[b]*vc[h,b,ts]*1/4-(1/eta[b])*vD[h,b,ts]*1/4;
                                     #carica della batteria al tempo ts

subject to carica {h in H inter Hb,b in B,t in T diff (Told union {ts})}:
e[h,b,t] = e[h,b,t-1] + eta[b]*vc[h,b,t]*1/4-(1/eta[b])*vD[h,b,t]*1/4;
                                     #la carica nei successivi time slots

```

Bibliografia

- [1] J. Wilkes, J. Moccia, et al. Wind in power 2010 european statistics. 2011.
- [2] A.E. Outlook. Energy information administration. *US Department of Energy, Januar, 2010.*
- [3] S.C. Davis, S.W. Diegel, R.G. Boundy, Oak Ridge National Laboratory. Engineering, Transportation Science Division, and Vehicle Technologies Program (US). Transportation energy data book: Edition 29. Technical report, Oak Ridge National Laboratory, 2010.
- [4] P. Bertoldi and B. Atanasiu. Electricity consumption and efficiency trends in the enlarged european union. *IES-JRC. European Union, 2007.*
- [5] BEE Project Website. url: <http://beeproject.dei.polimi.it/index.html>.
- [6] Z. Xue-song, C. Li-qiang, and M. You-jie. Research on smart grid technology. In *Computer Application and System Modeling (ICCASM), 2010 International Conference on*, volume 3, pages V3–599. IEEE, 2010.
- [7] E. Hooper. Strategic and intelligent smart grid systems engineering. In *Internet Technology and Secured Transactions (ICITST), 2010 International Conference for*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [8] IEEE Smart Grid. - website. url: <http://smartgrid.ieee.org/>., 2010.
- [9] Smart Grid homepage NIST Website. 2010. url: <http://www.nist.gov/smartgrid/>.

- [10] Progetto Smart Grid Enel Website. 2010. url: http://www.enel.it/it/IT/reti/enel_distribuzione/qualita/progetti_smart_grids/.
- [11] A. Chuang and M. McGranaghan. Functions of a local controller to coordinate distributed resources in a smart grid. In *Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2008.
- [12] A. Molderink, V. Bakker, M.G.C. Bosman, J.L. Hurink, and G.J.M. Smit. Management and control of domestic smart grid technology. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 1(2):109–119, 2010.
- [13] A. Agnetis, G. Dellino, P. Detti, G. Innocenti, G. de Pascale, and A. Vicino. Appliance operation scheduling for electricity consumption optimization. 2011.
- [14] P. Samadi, R. Schober, and V.W.S. Wong. Optimal energy consumption scheduling using mechanism design for the future smart grid. In *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on*, pages 369–374. IEEE, 2011.
- [15] S. Kishore and L.V. Snyder. Control mechanisms for residential electricity demand in smartgrids. In *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, pages 443–448. IEEE, 2010.
- [16] C. Clastres, TT Ha Pham, F. Wurtz, and S. Bacha. Ancillary services and optimal household energy management with photovoltaic production. *Energy*, 35(1):55–64, 2010.
- [17] A. Molderink, V. Bakker, M.G.C. Bosman, J.L. Hurink, and G.J.M. Smit. Domestic energy management methodology for optimizing efficiency in smart grids. In *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*, pages 1–7. IEEE, 2009.

- [18] N. Li, L. Chen, and S.H. Low. Optimal demand response based on utility maximization in power networks. In *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE*, pages 1–8. IEEE, 2011.
- [19] M. Newborough and SD Probert. Intelligent automatic electrical-load management for networks of major domestic appliances. *Applied Energy*, 37(2):151–168, 1990.
- [20] D-L Ha. “an advanced system of energy management in building to production and consumption coordination”. in *French. Ph.D. dissertation. Departement Eletrical Engineering, Grenoble Institute of Thechnology,*, 2007.
- [21] A.H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 1(2):120–133, 2010.
- [22] G. Strbac. Demand side management: Benefits and challenges. *Energy Policy*, 36(12):4419–4426, 2008.
- [23] AD Peacock and M. Newborough. Controlling micro-chp systems to modulate electrical load profiles. *Energy*, 32(7):1093–1103, 2007.
- [24] M. Newborough and P. Augood. Demand-side management opportunities for the uk domestic sector. In *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, volume 146, pages 283–293. IET, 1999.
- [25] DJ Hammerstrom, R. Ambrosio, J. Brous, TA Carlon, DP Chassin, JG De-Steese, RT Guttromson, GR Horst, OM Järvegren, R. Kajfasz, et al. Pacific northwest gridwise testbed demonstration projects. *Part I. Olympic Peninsula Project*, 2007.
- [26] D. Livengood and R. Larson. The energy box: Locally automated optimal control of residential electricity usage. *Service Science*, 1(1):1–16, 2009.

- [27] N. Kowahl and A. Kuh. Micro-scale smart grid optimization. In *Neural Networks (IJCNN), The 2010 International Joint Conference on*, pages 1–8. IEEE, 2010.
- [28] A.J. Conejo, J.M. Morales, and L. Baringo. Real-time demand response model. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 1(3):236–242, 2010.
- [29] D.L. Ha, F.F. de Lamotte, and Q.H. Huynh. Real-time dynamic multilevel optimization for demand-side load management. In *Industrial Engineering and Engineering Management, 2007 IEEE International Conference on*, pages 945–949. IEEE, 2007.
- [30] T. Kato, K. Yuasa, and T. Matsuyama. Energy on demand: Efficient and versatile energy control system for home energy management. In *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on*, pages 392–397. IEEE, 2011.
- [31] H. Goudarzi, S. Hatami, and M. Pedram. Demand-side load scheduling incentivized by dynamic energy prices. In *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on*, pages 351–356. IEEE, 2011.
- [32] A. Mohsenian-Rad, V.W.S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober, and A. Leon-Garcia. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 1(3):320–331, 2010.
- [33] L.D. Ha, S. Ploix, E. Zamai, and M. Jacomino. Tabu search for the optimization of household energy consumption. In *Information Reuse and Integration, 2006 IEEE International Conference on*, pages 86–92. IEEE, 2006.
- [34] S. Hatami and M. Pedram. Minimizing the electricity bill of cooperative users under a quasi-dynamic pricing model. In *Smart Grid Communi-*

- cations (SmartGridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, pages 421–426. IEEE, 2010.
- [35] C. Ibars, M. Navarro, and L. Giupponi. Distributed demand management in smart grid with a congestion game. In *Smart Grid Communications (Smart-GridComm), 2010 First IEEE International Conference on*, pages 495–500. IEEE, 2010.
- [36] Sis magazine Website. url: <http://www.sis-statistica.it/magazine/spip.php?article145>.
- [37] AMPL Website. url: <http://www.ampl.com>.
- [38] CPLEX Website. url: http://www-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex_optimizer.
- [39] R. Viadana and L. Croci. Domotic applications for the demand side management. *Final Report Project ECORET, available in Italian on: http://www.ricercadisistema.it/Documenti/SintesiDoc.aspx*.
- [40] Micene Project. [http://www.eerg.it/index.php?p=Progetti MICENE](http://www.eerg.it/index.php?p=Progetti_MICENE).