

POLITECNICO DI MILANO  
Facoltà di Ingegneria dell'Informazione  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica  
Dipartimento di Elettronica, Informazione e Bioingegneria



Metodologie e strumenti per la gestione efficiente  
dell'energia nelle unità residenziali e l'interazione  
con le reti elettriche intelligenti

Relatore: Prof.ssa Donatella Sciuto  
Correlatore: Ing. Alessandro Antonio Nacci

Tesi di Laurea di:  
Giovanni Bettinazzi, Matr. 787114

Anno Accademico 2013-2014



*Alla mia famiglia e a tutti quelli che mi hanno supportato durante la  
stesura della tesi*



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>15</b>
1.0.1	Obiettivi della tesi . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Nozioni di base</b>	<b>21</b>
2.1	La rete elettrica intelligente . . . . .	21
2.2	Domotica e i gestori dell'energia in ambito residenziale	25
2.3	Meccanismi della Domanda Attiva e i programmi del Domanda e Risposta . . . . .	28
2.4	Tecniche di predizione dell'utilizzo della rete domestica	31
<b>3</b>	<b>Stato dell'arte</b>	<b>35</b>
3.1	Il panorama internazionale dei sistemi di gestione ener- getica . . . . .	35
3.2	Il panorama europeo dei sistemi di gestione energetica .	38
<b>4</b>	<b>Il progetto del sistema di gestione del consumo energe- tico</b>	<b>47</b>
4.1	Simulazione SystemC per il comportamento energetico	48
4.2	Il sistema di simulazione proposto e il modello dei com- ponenti . . . . .	50
4.3	Flusso di esecuzione del sistema: dalla definizione dei componenti della rete ai risultati . . . . .	55
4.3.1	Integrazione del sistema con i meccanismi di Do- manda e Risposta . . . . .	63
4.4	Algoritmo di apprendimento per la previsione del com- portamento energetico dell'utente . . . . .	65
4.4.1	I modelli delle utenze domestiche . . . . .	67
4.4.2	Struttura dell'algoritmo di apprendimento e di predizione dell'utilizzo della rete domestica . . .	71

4.4.3	Presentazione dei casi d'uso all'utente . . . . .	83
<b>5</b>	<b>Realizzazioni sperimentali e valutazione</b>	<b>87</b>
5.1	Illustrazione dei casi di studio . . . . .	88
5.1.1	Primo caso di studio: Persona Singola . . . . .	91
5.1.2	Secondo caso di studio: Famiglia . . . . .	113
<b>6</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>137</b>
6.1	Direzioni future di ricerca . . . . .	137
6.1.1	Ampliamento della rete di dispositivi della piattaforma di simulazione . . . . .	137
6.1.2	I modelli delle utenze . . . . .	142
6.2	Conclusioni . . . . .	143
	<b>Bibliografia</b>	<b>147</b>
<b>A</b>	<b>Risultati del sondaggio sull'utilizzo degli elettrodomestici</b>	<b>155</b>
<b>B</b>	<b>Caratteristiche degli elettrodomestici e dei dispositivi elettronici della rete</b>	<b>159</b>
B.1	Lavatrice . . . . .	159
B.2	Lavastoviglie . . . . .	160
B.3	Asciugatrice . . . . .	162
B.4	Televisore . . . . .	163
B.5	Condizionatore d'aria . . . . .	163
B.6	Forno elettrico . . . . .	165
B.7	Computer portatile . . . . .	166
B.8	Frigorifero e congelatore . . . . .	167

# Elenco delle figure

2.1	Struttura di in una rete elettrica intelligente (Fonte NI-ST [1]) . . . . .	22
2.2	Esempi di modifiche delle curve di carico elettrico tramite tecniche di Peak Shaving(a) e Load Leveling(b) . . . . .	28
2.3	La struttura del modello Domanda e Riposta . . . . .	29
2.4	Generico modello di interazione Gestore-Aggregatore-Utenti . . . . .	30
3.1	Stato di introduzione del Domanda e Risposta in Europa (fonte SECD [2]) . . . . .	40
3.2	Architettura domotica proposta dal consorzio Energy@Home (fonte Energy@Home Use Cases [3]) . . . . .	42
4.1	Schema comunicazione TLM 2.0 . . . . .	49
4.2	Struttura del modulo Energy Box . . . . .	51
4.3	Struttura interna del modulo Power Generator . . . . .	51
4.4	Struttura del modulo Batteria . . . . .	52
4.5	Struttura interna del modulo Smart Appliance . . . . .	54
4.6	Diagramma del flusso di esecuzione . . . . .	55
4.7	Esempi dei due file di configurazione della rete . . . . .	57
4.8	Schema logico dello script Python <i>create-components.py</i> . . . . .	59
4.9	Schema logico dello script Python <i>create-top.py</i> . . . . .	60
4.10	Schema logico dello script Python <i>ea-sim.py</i> . . . . .	62
4.11	Schema logico dello script Python <i>ea-sim.py</i> considerando l'input dell'Aggregatore . . . . .	64
4.12	Funzione densità di probabilità di attivazione nell'arco di una giornata di una lavatrice . . . . .	70
4.13	Funzione densità di probabilità di attivazione nell'arco di una giornata di una lavastoviglie . . . . .	71

4.14	Funzione densità di probabilità di attivazione nell'arco di una giornata di una asciugabiancheria . . . . .	71
4.15	Flusso di esecuzione complessivo del sistema . . . . .	83
4.16	Utilizzo del database come archivio delle simulazioni . . . . .	85
5.1	Risultati sondaggio per il profilo "Persona singola (Uomo)" . . . . .	91
5.2	Funzione densità di probabilità di attivazione di una lavatrice . . . . .	93
5.3	Flusso di dati dalla definizione della rete alla simulazione . . . . .	94
5.4	Esempi di file CSV di codifica della probabilità di attivazione (a) e di file di configurazione della rete network-description.json (b) . . . . .	95
5.5	Punteggi relativi ai giorni di attivazione della lavatrice dell'utente . . . . .	98
5.6	Punteggi relativi ai giorni di attivazione del computer dell'utente . . . . .	99
5.7	Punteggi relativi ai giorni di attivazione della televisione dell'utente . . . . .	99
5.8	Punteggi relativi alle ore di attivazione della lavatrice dell'utente . . . . .	101
5.9	Punteggi relativi alle ore di attivazione del computer dell'utente . . . . .	101
5.10	Esempi dei due file di configurazione della rete . . . . .	106
5.11	Profilo di potenza medio di una lavatrice . . . . .	108
5.12	Risultato simulazione dello Scenario 4: lavatrice attivata alle 07:45 e soglia non rispettata . . . . .	111
5.13	Risultato simulazione dello Scenario 8: lavatrice attivata alle 08:45 e soglia rispettata . . . . .	111
5.14	Diagramma di Gantt relativo allo scenario 8 . . . . .	112
5.15	Risultati sondaggio per il profilo "Famiglia con più di un figlio" . . . . .	113
5.16	Funzione densità di probabilità di attivazione di una lavastoviglie . . . . .	115
5.17	Funzione densità di probabilità di attivazione di un'asciugatrice . . . . .	116
5.18	File di configurazione della rete network-description.json . . . . .	116
5.19	Punteggi relativi ai giorni di attivazione della lavatrice . . . . .	119
5.20	Punteggi relativi ai giorni di attivazione della lavastoviglie . . . . .	120
5.21	Punteggi relativi ai giorni di attivazione dell'asciugatrice . . . . .	120



5.22	Punteggi relativi alle ore di attivazione della lavatrice dell'utente . . . . .	122
5.23	Punteggi relativi alle ore di attivazione della lavastoviglie dell'utente . . . . .	123
5.24	Punteggi relativi alle ore di attivazione dell'asciugatrice dell'utente . . . . .	123
5.25	Esempi dei due file di configurazione della rete . . . . .	128
5.26	Profilo di potenza medio di una lavastoviglie . . . . .	130
5.27	Profilo di potenza medio di un'asciugatrice . . . . .	130
5.28	Risultato simulazione dello Scenario 3 . . . . .	133
5.29	Risultato simulazione dello Scenario 19 . . . . .	134
5.30	Risultato simulazione dello Scenario 5 . . . . .	134
5.31	Risultato simulazione dello Scenario 21 . . . . .	134
5.32	Risultato simulazione dove gli elettrodomestici vengono attivati all'istante di inizio del proprio intervallo . . . . .	136
6.1	Energia elettrica prodotta da impianti eolici e fotovoltaici rispetto alla domanda nazionale (Fonte [4]) . . . . .	139
A.1	Risultati sondaggio per il profilo "Appartamento Condiviso" . . . . .	156
A.2	Risultati sondaggio per il profilo "Famiglia con un figlio" . . . . .	156
A.3	Risultati sondaggio per il profilo "Coppia" . . . . .	157
A.4	Risultati sondaggio per il profilo "Famiglia con più di un figlio" . . . . .	157
A.5	Risultati sondaggio per il profilo "Persona singola (Uomo)" . . . . .	158
A.6	Risultati sondaggio per il profilo "Persona singola (Donna)" . . . . .	158
B.1	Profilo di potenza medio di una lavatrice . . . . .	160
B.2	Profilo di potenza medio di una lavastoviglie . . . . .	161
B.3	Profilo di potenza medio di un'asciugatrice . . . . .	162
B.4	Profilo di potenza medio di un televisore LCD . . . . .	163
B.5	Profilo di potenza medio di un condizionatore d'aria . . . . .	164
B.6	Profilo di potenza medio di un forno elettrico . . . . .	165
B.7	Profilo di potenza medio di un computer portatile . . . . .	166
B.8	Profilo di potenza medio di un frigorifero . . . . .	168
B.9	Profilo di potenza medio di un congelatore . . . . .	168



# Elenco delle tabelle

4.1	Esempio di file di configurazione di un elettrodomestico	60
4.2	Esempio di cronologia di attivazione dei dispositivi . . .	75
4.3	Esempio di richiesta di riduzione energetica . . . . .	79
5.1	Dispositivi della rete dell'utente . . . . .	92
5.2	Dati della cronologia di utilizzo della rete per la prima settimana . . . . .	96
5.3	Dati della cronologia di utilizzo della rete per la seconda settimana . . . . .	96
5.4	Dati della cronologia di utilizzo della rete per la terza settimana . . . . .	97
5.5	Richiesta di riduzione energetica pervenuta all'utenza considerata . . . . .	102
5.6	Valori di soglia per i giorni settimanali e per gli intervalli temporali relativi al giorno di Lunedì ( $\tau_d = 0,5$ e $\tau_h = 0,6$ ) . . . . .	104
5.7	Predizione dell'utilizzo degli elettrodomestici . . . . .	104
5.8	Scenari d'uso ottenuti ritardando l'attivazione del ciclo di funzionamento della lavatrice di multipli di 15 minuti	107
5.9	Divisione degli scenari d'uso in base ai loro risultati: in alto si mostrano gli scenari dove i consumi risultanti rispettano la soglia richiesta, in basso quelli in cui i consumi superano tale soglia . . . . .	110
5.10	Dispositivi della rete dell'utente . . . . .	114
5.11	Dati della cronologia di utilizzo della rete per le prime tre settimane . . . . .	117
5.12	Dati della cronologia di utilizzo della rete per le prime tre settimane . . . . .	118
5.13	Dati della cronologia di utilizzo della rete per le prime tre settimane . . . . .	118

5.14	Richiesta di riduzione energetica pervenuta all'utenza considerata . . . . .	124
5.15	Confronto valori di soglia per i giorni settimanali e per gli intervalli temporali relativi al giorno di Lunedì . . .	125
5.16	Confronto delle previsioni effettuate . . . . .	126
5.17	Confronto delle previsioni effettuate . . . . .	127
5.18	Scenari d'uso ottenuti ritardando l'attivazione del ciclo di funzionamento degli elettrodomestici all'interno dell'intervallo critico . . . . .	129
5.19	Divisione degli scenari d'uso in base ai loro risultati: in alto si mostrano gli scenari dove i consumi risultanti rispettano la soglia richiesta, in basso quelli in cui i consumi superano tale soglia . . . . .	132
5.20	Intervalli di attivazione consigliati all'utenza . . . . .	135

# Sommario

Grazie alla diffusione di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER), allo sviluppo di nuove tecnologie in ambito abitativo e all'orientamento *low carbon* dell'economia mondiale, negli ultimi anni l'idea del sistema di produzione e distribuzione dell'energia elettrica si è evoluta verso il concetto di rete attiva o Smart Grid che consentirà di soddisfare i bisogni sempre crescenti di energia dei consumatori tramite un miglior sfruttamento delle risorse di rete, l'integrazione di fonti energetiche alternative e consentendo alle utenze di interagire in tempo reale con la rete stessa.

Mentre la realizzazione di tali reti intelligenti contribuirà a rendere gli utenti maggiormente consapevoli e responsabili dei propri consumi energetici, servizi quali quelli di Domanda-Risposta si profilano come standard futuri al fine di ottenere una forte interazione fra le Smart House e gli enti responsabili della trasmissione e distribuzione dell'energia (es. Terna, Enel e AEEG).

Tali servizi prevedono un insieme di programmi [5, 6] e strategie di aggregazione che permettano ai gestori di dialogare con gli utenti al fine di regolarne i consumi per un determinato intervallo di tempo, basandosi sul costo della produzione energetica e sullo stato della rete previsto per quel periodo.

Un passo fondamentale verso lo sviluppo di una rete elettrica innovativa è quello di dotare l'utente degli strumenti necessari affinché possa interagire costruttivamente con la rete e assumere un ruolo centrale nel mercato energetico.

Il sistema proposto si prefigge l'obiettivo di supportare le utenze nell'interazione con il gestore della distribuzione dell'energia, utilizzando le informazioni sui dispositivi presenti e sul profilo dell'utente e stimandone il comportamento energetico futuro. In questo modo è possibile proporre diversi casi di utilizzo che verranno formulati in base ai segnali

di riduzione inviati dal gestore della distribuzione, secondo il modello di Domanda e Risposta.

L'obiettivo ultimo è quello di riuscire ad integrarsi nei moderni gestori dell'energia presenti nel mercato tecnologico ed energetico italiano orientati all'ambiente domestico. Tali sistemi di gestione possono avvalersi dei meccanismi di previsione e simulazione proposti per guidare l'utente a dialogare in maniera costruttiva con il gestore della distribuzione e dunque per modificare il suo tipico ruolo di consumatore passivo all'interno della rete energetica, divenendone una parte attiva e consapevole.

# Capitolo 1

## Introduzione

*“Ardo dal desiderio di spiegare, e la mia massima soddisfazione è prendere qualcosa di ragionevolmente intricato e renderlo chiaro passo dopo passo. È il modo più facile per chiarire le cose a me stesso”*

- Isaac Asimov -

La struttura della rete elettrica così com'è concepita ai giorni nostri è una struttura passiva basata sull'utilizzo di pochi grandi poli di produzione collegati agli utenti finali tramite reti di trasmissione e distribuzione [7]. Grazie alla diffusione di Fonti Energetiche Rinnovabili (FER), allo sviluppo di nuove tecnologie in ambito abitativo e all'orientamento *low carbon* dell'economia mondiale, negli ultimi anni l'idea del sistema di produzione e distribuzione dell'energia elettrica attuale si è evoluta verso il concetto di rete attiva o Smart Grid [8, 9, 10] che consentirà di soddisfare i bisogni di energia dei consumatori in termini di flessibilità, economicità ed affidabilità, consentendo loro di interagire in tempo reale con la rete stessa usufruendo dei benefici che ne conseguono.

Il paradigma delle Smart Grid è considerato uno degli elementi chiave per il raggiungimento degli obiettivi che l'Unione Europea ha sancito per l'anno 2020 che consistono nell'aumento del 20% dell'energia prodotta tramite fonti rinnovabili, l'aumento del 20% dell'efficienza energetica e la riduzione del 20% delle emissioni di gas climalteranti [11]; tali obiettivi possono essere raggiunti solo attraverso lo sviluppo e l'utilizzo di nuove tecnologie per una gestione efficiente e *intelligente* delle risorse di produzione e distribuzione dell'energia. La Smart Grid dovrà appoggiarsi, pertanto, su capillare rete di comunicazione che consenta

non solo la connettività fra i sistemi e i dispositivi che la costituiscono, ma anche l'erogazione di informazioni e servizi al consumatore per una efficiente e conveniente gestione della domanda di energia. Quest'ultimo concetto in particolare richiede lunghi processi di trasformazione e sviluppo che interessano un quadro articolato di aspetti tecnici, normativi ed economici che possano agevolare l'introduzione nel mercato energetico e regolamentarne l'utilizzo. Ciò che emerge dalla letteratura scientifica moderna è che tale gestione attiva della domanda di energia da parte dell'utente si concretizzerà auspicabilmente grazie a due concetti fondamentali: lo sviluppo delle *Smart House* [12, 13] e i cosiddetti meccanismi di *Demand-Response* [14, 15].

Una Smart House o casa intelligente è un ambiente domestico dove i dispositivi installati presentano un alto grado di automazione e di interoperabilità e possono essere gestiti sia localmente che in remoto al fine di aumentare il benessere dell'utente e al contempo di incrementare l'efficienza energetica della casa. Tali dispositivi, conosciuti come *Smart Appliances* o *elettrodomestici intelligenti* hanno un ruolo chiave nel consentire una miglior gestione dei consumi energetici nel pieno rispetto delle abitudini d'uso dell'utente. Essi infatti possono accendersi autonomamente o attivare determinate funzioni quando il costo dell'energia è minimo, consigliando l'utente ed interagendo con esso durante i vari processi, contribuendo a rendendolo più consapevole del peso e delle conseguenze delle proprie scelte in termini di utilizzo energetico [16]. La crescente produzione di elettrodomestici e dispositivi intelligenti da parte delle aziende del settore affiancata da un continuo sviluppo di soluzioni software atte a gestirne l'utilizzo e monitorarne i consumi stanno contribuendo a rendere le Smart House una realtà concretizzabile nel prossimo futuro.

Mentre la realizzazione di tali ambienti domestici contribuirà a rendere l'utente maggiormente consapevole e responsabile dei propri consumi energetici, servizi quali quelli di Domanda-Risposta si profilano come standard futuri al fine di ottenere una forte interazione fra le Smart House e gli enti responsabili della trasmissione e distribuzione dell'energia (es. Terna, Enel e AEEG).

Le tecnologie *Demand-Response* prevedono un insieme di programmi [5, 6] e strategie di aggregazione che permettano ai gestori di dialogare con gli utenti al fine di ridurne o regolarne i consumi per un determinato intervallo di tempo, basandosi sul costo della produzione energetica



e sullo stato della rete previsto per quel dato periodo. La partecipazione dell'utente a tali programmi di riduzione dei consumi è facoltativa ma è incentivata tramite retribuzioni economiche da parte del gestore della distribuzione, erogate qualora l'utente vi partecipasse riuscendo a ridurre effettivamente i propri consumi. Risulta utile in tale contesto un supporto che permetta all'utente di partecipare in maniera informata a tali programmi, pianificando l'utilizzo della propria rete in modo da soddisfare i requisiti richiesti. Grazie a questa interazione l'utente diviene dunque una componente attiva e vitale nella gestione dell'energia elettrica, contribuendo a rendere la rete più stabile ed efficiente, a ridurre la produzione energetica e quindi l'impatto ambientale che ne deriva.

A conferma dell'efficacia e dei benefici che tale interazione comporta, i meccanismi di Demand-Response si stanno affermando sempre di più sul mercato dell'energia in paesi come Australia, Stati Uniti, Canada, Giappone e Corea del Sud [17] mentre nel panorama Europeo paesi quali Francia, Finlandia, Belgio, Austria e Gran Bretagna hanno dato inizio ad una serie di interventi strutturali, normativi ed economici volti all'adozione di tali paradigmi di interazione [2].

Da tale contesto risulta dunque evidente che un passo fondamentale verso lo sviluppo di una rete elettrica innovativa sia quello di dotare l'utente degli strumenti necessari affinché possa interagire costruttivamente con la rete e assumere un ruolo centrale nel mercato energetico. La presenza di elettrodomestici e dispositivi intelligenti (luci, sensori, allarmi) all'interno dell'ambiente domestico deve essere infatti affiancata da un'infrastruttura di controllo che permetta all'utente di gestire e monitorare efficacemente tali dispositivi. Inoltre nell'ottica dei moderni meccanismi di Demand Response tale infrastruttura deve agevolare l'utente non solo nella comunicazione dei propri dati alla rete esterna ma anche nella partecipazione ai programmi di riduzione che tale tecnologia comporta.

Ciò che emerge dalla letteratura scientifica è che molti sistemi di gestione domotica dell'energia sono presentati come soluzioni teoriche e le loro implementazioni fisiche unite a casi di test e studi di fattibilità tardano ad essere proposte concretamente, specialmente nel mercato europeo [18, 19, 20, 4]. La creazione anche solo teorica di tali sistemi deve fronteggiare problemi legati soprattutto all'interoperabilità dei dispositivi, alla standardizzazione dei protocolli di comunicazione e alla

sicurezza e integrità delle informazioni, affiancati dallo studio dei meccanismi di interazione con la rete per una gestione attiva della domanda di energia dell'utente. Quest'ultimo aspetto è di fondamentale importanza nell'ottica di uno sviluppo di una Smart House perfettamente integrata nella rete di distribuzione e in grado di garantire all'utente benefici sia economici sia in termini di comfort e qualità della vita.

Nel contesto del mercato italiano, Indesit Company ha fondato nel 2012 insieme a Electrolux, Telecom Italia ed Enel Distribuzione il progetto di collaborazione *Energy@Home* [21] nato con lo scopo di promuovere lo sviluppo e la diffusione di prodotti e servizi basati sull'interoperabilità e l'interazione degli elettrodomestici di nuova generazione con gli utenti.

Un primo risultato raggiunto è stato quello di definire un linguaggio standard e open source per la gestione energetica degli elettrodomestici creando con la Zigbee Alliance una semantica che fa ora parte del nuovo standard Home Automation 1.2. Un secondo importante traguardo è stato quello di definire un'architettura ICT di controllo dell'ambiente domestico intelligente basata su tale linguaggio e predisposta all'integrazione nei futuri meccanismi di Demand-Response. Tale architettura è stata testata in cinque diversi paesi europei, tra i quali l'Italia con un pool di 50 famiglie, con ottimi risultati sia dal punto di vista funzionale che di accettazione e collaborazione da parte degli utenti coinvolti.

Il progetto Energy@Home, introducendo tali standard strutturali e di comunicazione, rappresenta dunque l'*avant-garde* del mercato energetico in Italia del quale ne sta tracciando le linee guida fondamentali.

### 1.0.1 Obiettivi della tesi

Poiché nello stato dell'arte esistono attualmente numerosi *progetti pilota* e ricerche per lo sviluppo delle reti elettriche attive di distribuzione e trasmissione [22, 9, 8, 23], il lavoro proposto si colloca all'interno di un'area di ricerca maggiormente focalizzata sull'interazione tra tali reti e gli utenti finali e sullo sviluppo di tecnologie in ambito residenziale [13, 12, 14, 15].

L'obiettivo ultimo è infatti quello di riuscire ad integrarsi nei moderni gestori dell'energia presenti nel mercato tecnologico ed energetico italiano e orientati all'ambiente domestico, come il progetto Java Energy Management Application (JEMMA, [24]) proposto da Energy@Home.

Tali sistemi di gestione possono avvalersi dei meccanismi di apprendimento e simulazione proposti per agevolare e guidare l'utente a dialogare in maniera costruttiva con il gestore della distribuzione della rete elettrica e dunque per modificare il suo tipico ruolo di consumatore passivo all'interno della rete energetica, divenendone una parte attiva e consapevole.

Il sistema proposto, illustrato in dettaglio nel Capitolo 4 della tesi, utilizzando le informazioni sui dispositivi presenti e sul profilo dell'utente, è in grado di stimare il comportamento energetico futuro della rete proponendo all'utente diversi casi di utilizzo formulati in base a possibili segnali di riduzione inviati dal gestore della distribuzione secondo il modello Demand-Response. L'utente sarà in grado di selezionare il proprio profilo abitativo, di specificare le componenti installate nella rete domestica e di selezionarne le proprie preferenze di utilizzo. Tali preferenze saranno espresse sia in termini di frequenze di utilizzo settimanali sia in specifici intervalli di tempo per tutti dispositivi *controllabili* presenti nella rete, ovverosia elettrodomestici per i quali l'istante di attivazione può essere anticipato o posticipato senza una sostanziale riduzione del comfort dell'utente (come lavatrice, lavastoviglie, asciugatrice etc ...).

Ottenute tali informazioni, il sistema è in grado di formulare il modello di un'utenza al fine di creare una *cronologia* di utilizzo della rete e dei dispositivi, salvando giornalmente gli orari di attivazione degli elettrodomestici presenti per un tempo predefinito. Si propone dunque un *algoritmo di apprendimento* il quale, utilizzando la cronologia di attivazione dei dispositivi, è in grado sia di apprendere le abitudini dell'utente sia, una volta pervenuta una richiesta di riduzione energetica per un intervallo di tempo specifico, di prevedere quale sarà l'utilizzo effettivo della rete per quell'arco temporale, proponendo all'utente diversi casi d'uso attraverso i quali egli potrà partecipare con successo al programma di riduzione richiesto dal servizio aggregato. Una volta ricevuta la richiesta di riduzione energetica e la previsione di utilizzo della rete, ci si avvale del sistema di simulazione EA-SIM [25], elaborato durante il lavoro di tesi. Tale piattaforma è stata sviluppata nel linguaggio di programmazione SystemC, un insieme di librerie e classi che estendono il linguaggio C++, che forniscono dei metodi molto efficaci per simulare processi concorrenti e per definire e descrivere il comportamento di dispositivi hardware; ci si è avvalsi anche di alcuni

moduli scritti in linguaggio Python per automatizzare la creazione dei componenti e l'esecuzione delle simulazioni. Utilizzando tale simulatore si è in grado di creare dinamicamente un insieme di possibili scenari, ottenuti simulando il comportamento energetico dell'intera rete, che verranno presentati all'utente in una forma semplice e intuitiva.

Contestualizzando il processo all'interno di un programma di Demand-Response, ogni qualvolta il gestore della distribuzione invierà una proposta di riduzione dei consumi energetici per un certo periodo della giornata, il sistema cercherà di prevedere il *comportamento energetico* dell'utente, il quale potrà servirsi in maniera immediata dei risultati del simulatore per avere una stima dei suoi consumi associati ad uno specifico scenario di utilizzo dei propri elettrodomestici e decidere in maniera informata se accettare o meno la proposta.

La tesi è strutturata nel modo seguente.

I capitoli 2 e 3 illustrano i concetti preliminari e lo stato dell'arte delle reti elettriche intelligenti e dei sistemi di gestione energetica in ambito residenziale.

I successivi capitoli 4, 5 descrivono in dettaglio la struttura del sistema, i casi di studio proposti e si discuteranno i risultati ottenuti, con uno sguardo alle future implementazioni e direzioni di ricerca nel capitolo 6.

L'appendice A riporta i risultati del sondaggio condotto al fine di raccogliere informazioni sulle varie tipologie di utenze, quali frequenze di utilizzo degli elettrodomestici e diffusione di questi ultimi.

L'appendice B riporta le caratteristiche dei cicli di funzionamento degli elettrodomestici, utilizzate per caratterizzarne e modellarne il comportamento energetico all'interno della piattaforma di simulazione EA-SIM.

## Capitolo 2

# Nozioni di base

*“Tutto ciò che non è noto appare straordinario”*

- Il mastino dei Baskerville, Artur Conan Doyle -

Questo capitolo introduce i concetti fondamentali inerenti all'area di ricerca e alla problematica affrontata. Nella Sezione 2.1 verrà introdotto il concetto di rete elettrica intelligente, che rappresenta l'avanguardia nel panorama energetico mondiale. Successivamente nella Sezione 2.2 ci si focalizzerà sui moderni sistemi di gestione energetici dell'ambiente domestico, mentre nella Sezione 2.3 si approfondirà il tema della domanda attiva e si presenteranno i meccanismi di interazione fra l'utente finale e il gestore della rete di distribuzione. Infine nella Sezione 2.4 verrà analizzata la tematica dell'utilizzo di tecniche di apprendimento (*learning*) finalizzate a conoscere l'utente e prevederne i consumi energetici.

### 2.1 La rete elettrica intelligente

Il concetto di rete di distribuzione elettrica intelligente (*Smart Grid*), è correntemente usato per esprimere “una visione combinata che utilizza la rete informativa per aumentare la funzionalità della rete elettrica” [26]. Esse rappresentano l'evoluzione delle attuali reti elettriche, frutto di un'integrazione tra tecnologie consolidate ed emergenti nell'ambito della trasmissione e distribuzione energetica e dell'Information Technology. A differenza delle reti elettriche classiche, le Smart Grid sono in grado di gestire flussi bidirezionali di energia ed informazioni, collegando i propri elementi tramite una complessa rete di comunicazione

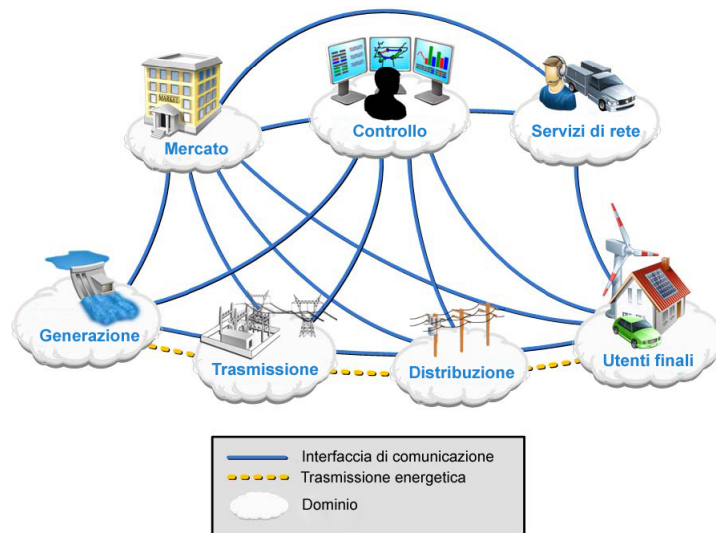


Figura 2.1: Struttura di in una rete elettrica intelligente (Fonte NIST [1])

e controllo. Aumentare l'efficienza energetica grazie alla pianificazione e previsione dei consumi, operare una ingente riduzione dei picchi di assorbimento lato consumatore, integrare la generazione distribuita da fonti rinnovabili nella rete di distribuzione e l'utilizzo di sistemi di accumulo controllabili sono solo alcune delle applicazioni e dei benefici che lo sviluppo di tali reti potrebbero offrire [16, 27, 28, 29].

Benchè non esista una definizione globale e completa di tali reti intelligenti, enti quali l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE, [30]) e il National Institute of Standards and Technology (NIST, [1]) stanno lavorando attivamente alla creazione di nuovi standard inerenti ai protocolli di comunicazione, alla definizione dei componenti della rete e della loro interoperabilità, a meccanismi di sicurezza, controllo e protezione della rete.

Dalla definizione di tali standard emerge la visione di una rete complessa la cui infrastruttura di trasmissione energetica e di comunicazione si sta sempre più consolidando (Fig. 2.1), presentando i seguenti domini generali [31]:

- **Generazione:** dominio che comprende tutti i siti preposti alla produzione di energia elettrica a partire da una fonte primaria di energia. Tali fonti energetiche possono essere classificate in fonti rinnovabili variabili come il solare e l'eolico, rinnovabili non variabili ad esempio le biomasse, o fonti non rinnovabili quali

nucleare e combustibili fossili. Oltre ai sistemi di generazione tradizionali, tale dominio comprendere a livello logico generatori di energia distribuiti nella rete e 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. Nel contesto della rete italiana il gruppo Terna è l'ente responsabile della trasmissione energetica [32].
- **Distribuzione:** tale dominio comprende la parte di rete che garantisce la fornitura elettrica agli utenti finali ed il prelievo di quella prodotta dagli utenti attivi, ad esempio tramite fonti energetiche rinnovabili. Può inoltre gestire la connessione con sistemi di accumulo di energia e con dispositivi quali i veicoli elettrici e *contatori interattivi* installati presso le utenze finali con i quali è in grado stabilire una comunicazione bidirezionale. All'interno della rete italiana il più grande gestore della rete di distribuzione è Enel Energia [33].
- **Mercato:** questo dominio racchiude tutti gli enti e gli operatori che partecipano attivamente al mercato dell'energia. Provvede alla gestione della vendita, alla distribuzione e alle contrattazioni circa i servizi elettrici. Si interfaccia con tutti gli altri domini e si assicura che essi siano coordinati in un mercato competitivo.
- **Controllo:** dominio degli operatori che gestiscono e controllano il flusso dell'energia elettrica nella rete e ne supervisionano lo stato garantendone la sicurezza. Tutte queste informazioni raccolte possono rivelarsi fondamentali come supporto alle decisioni sia in termini di azioni di mercato sia di gestione attiva della domanda energetica.
- **Servizi di rete:** in questo dominio sono racchiuse tutte le organizzazioni e gli enti che intendono offrire agli utenti finali servizi per la fornitura e la gestione efficiente dell'energia attraverso lo scambio di dati e informazioni sui consumi. In questo dominio rientrano i servizi di Domanda e Risposta che verranno ampiamente discussi all'interno del Sezione 2.3.

- **Utenti consumatori:** appartengono a questo dominio tutti gli utenti commerciali, industriali e domestici che sono connessi alla rete di distribuzione energetica. Nel contesto di una rete energetica intelligente essi non sono più delle unità di consumo passive, bensì dialogano con la rete e usufruiscono dei servizi proposti per partecipare attivamente nel processo di distribuzione dell'energia.

Attraverso l'interazione tra i domini precedentemente definiti, l'idea di una rete elettrica innovativa è quella di creare un'infrastruttura di comunicazione che consenta non solo l'interoperabilità fra i sistemi e i dispositivi che la costituiscono, ma anche l'erogazione di informazioni e servizi al consumatore per una efficiente e conveniente gestione della domanda di energia. Inoltre le tecnologie informatiche e di gestione coinvolte garantiscono un uso più efficiente della rete, migliorando l'identificazione e la risposta ad eventi di sovraccarico o interruzione della fornitura elettrica con la conseguente riduzione dei costi di manutenzione e di investimento. Tale aumento dell'efficienza insieme ad un miglior supporto alla diffusione delle energie rinnovabili, dei sistemi di accumulo e della mobilità elettrica contribuiscono alla riduzione dell'impatto ambientale della rete e delle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti dalla generazione dell'energia [2].

Lo sviluppo delle reti intelligenti è considerato uno degli elementi chiave per il raggiungimento degli obiettivi che l'Unione Europea ha sancito per l'anno 2020 che consistono nell'aumento del 20% dell'energia prodotta tramite fonti rinnovabili, l'aumento del 20% dell'efficienza energetica e la riduzione del 20% delle emissioni di gas climalteranti [11]. In tale contesto, la società di distribuzione Enel Energia, in collaborazione con diverse aziende del settore energetico, ha dato vita ad un insieme di iniziative e progetti volti allo sviluppo e all'introduzione delle reti intelligenti nel panorama energetico nazionale [22] ed europeo. In particolare il progetto *Grid4EU*, lanciato ufficialmente a Parigi nel novembre 2011, ha come obiettivo la dimostrazione su larga scala di soluzioni avanzate di Smart Grids per l'Europa. L'iniziativa è finanziata dalla Comunità Europea e mira a implementare in 6 paesi della UE (Italia, Francia, Germania, Spagna, Svezia e Repubblica Ceca) 6 progetti dimostrativi che mostrino soluzioni innovative all'integrazione di tali reti. Il dimostrativo italiano, guidato da Enel e realizzato in collaborazione con Ricerca Sistema Energetico (RSE, [34]), Selta [35], Siemens [36] e Cisco [37], è focalizzato sull'integrazione della genera-



zione da rinnovabili connessa alla rete di media tensione, attraverso la realizzazione di un sistema di controllo avanzato e l'uso di dispositivi di accumulo per l'immagazzinamento e successiva generazione di energia. Altri progetti hanno invece l'obiettivo di promuovere la diffusione della mobilità elettrica in Italia, di raggiungere standard per i sistemi intelligenti di gestione dei contatori elettronici o di sviluppare una piattaforma di comunicazione tra dispositivi di gestione energetica ed elettrodomestici di ultima generazione in ambito domestico, come il progetto *Energy@Home* [21] i cui dettagli saranno approfonditi nelle sessioni successive.

All'interno di tale contesto, l'elaborato proposto si focalizzerà sull'interazione tra la rete di distribuzione e gli utenti finali domestici attraverso i servizi di rete presenti, con l'obiettivo di integrarsi in un panorama scientifico e tecnologico in fase di forte sviluppo.

## 2.2 Domotica e i gestori dell'energia in ambito residenziale

Una delle maggiori rivoluzioni e, al contempo, sfide che l'introduzione delle reti elettriche intelligenti (*Smart grid*) si trova ad affrontare consiste nel portare l'innovazione all'interno dell'ambiente domestico e nell'educare l'utente ad un utilizzo più consapevole e responsabile delle proprie risorse [38, 39, 40, 41, 42]. La scienza multidisciplinare che si occupa dello studio delle tecnologie atte a migliorare la qualità della vita negli edifici ad uso abitativo è la *Domotica*. Il termine domotica, infatti, deriva dall'importazione del neologismo francese *domotique*, a sua volta contrazione della parola latina *domus* (casa) e di *automatique* (automatica) e dunque racchiude in se il concetto di automazione in ambito domestico [43].

La domotica nasce principalmente con il fine di massimizzare il risparmio energetico negli edifici abitati, consentendo abbattimenti molto significativi dei consumi grazie al controllo automatico dell'illuminazione, dell'accensione degli elettrodomestici e di altre funzionalità, tramite tecnologie derivanti dall'automazione, dall'elettronica, dall'informatica, e dalle telecomunicazioni. Accanto al risparmio energetico, ambito di interesse dell'elaborato finale, si collocano però anche altri obiettivi della domotica, quali l'assistenza ad anziani e disabili, mediante l'automazione di alcune procedure domestiche, e la sicurezza della casa.

Nel contesto delle reti elettriche intelligenti (*Smart Grid*) risulta sempre più evidente il ruolo fondamentale della domotica e l'importanza di una gestione ottimizzata dei consumi domestici per migliorare le prestazioni dell'intera rete elettrica [12, 13, 44, 45]. Un'applicazione domotica per la gestione dei consumi energetici è generalmente composta da tre principali componenti: una rete di interconnessione, un'interfaccia utente e un sistema di controllo *intelligente*.

La **rete** è il sistema che interconnette ogni componente dell'impianto domotico (quali elettrodomestici, luci, sensori, etc ...) e che consente la loro gestione, in termini di monitoraggio dei consumi e attivazione, sia locale che remota. Tale rete può essere implementata utilizzando connessioni via cavo dedicato, connessioni di rete locale, onde convogliate, connessioni wireless e altri tipi di protocolli di comunicazione, come Zigbee Home Automation 1.2 [46] della Zigbee Alliance utilizzato all'interno del progetto Energy@Home [3]. I dispositivi che appartengono a tale rete, spesso chiamata *Home Area Network (HAN)* [47], devono possedere un certo grado di automazione e di *intelligenza* per essere in grado non soltanto di comunicare con il sistema di controllo e con l'interfaccia utente, ad esempio fornendo informazioni sui propri consumi energetici, ma anche di adattarsi alle esigenze dell'utente e a modificare il proprio comportamento.

A tale categoria di dispositivi appartengono ad esempio i cosiddetti *elettrodomestici intelligenti (Smart Appliances)* o di ultima generazione.

L'**interfaccia utente**, invece, consente alla persona di impostare le diverse preferenze e configurare il sistema a suo piacimento, per meglio adattarlo all'uso in un determinato ambiente o situazione. Questa può essere, per esempio, un sistema di input come una tastiera, un telecomando, uno smartphone o un tablet. Tramite questi dispositivi l'utente può impostare diversi parametri, ad esempio l'ora del giorno a cui far accendere un elettrodomestico o la temperatura desiderata in ogni stanza, oppure controllare i propri consumi energetici in tempo reale.

Infine il **sistema intelligente di controllo** è tipicamente un'unità di elaborazione che ha il compito di raccogliere i dati forniti dall'utente e dai dispositivi e successivamente attuare su questi ultimi implementando una determinata funzione. Si tratta quindi della parte più importante della rete domotica, in quanto unico centro decisionale e

coordinatore per ogni componente del sistema. Nel contesto dei meccanismi di Domanda e Risposta, il sistema di controllo svolge anche la funzione di collegamento tra la rete domestica e la rete esterna, raccogliendo eventuali segnali e indicazioni da parte del gestore della rete di distribuzione e inviando dati riguardanti i consumi dell'utente. Il sistema proposto ed analizzato in questo elaborato, è stato concepito con l'obiettivo di integrarsi all'interno del sistema di controllo di un'applicazione domotica.

Obiettivo della domotica è dunque di aiutare le persone ad abitare in case più sicure, confortevoli e a minore impatto ambientale, con un sistema d'automazione semplice, affidabile, flessibile ed economico e alla portata di tutti.

### 2.3 Meccanismi della Domanda Attiva e i programmi del Domanda e Risposta

L'architettura di controllo e gestione descritta nella precedente sezione è concepita non solo per aumentare il comfort e l'abitabilità degli ambienti domestici, ma anche per permettere all'utente di gestire in maniera *attiva* la propria domanda di energia. La *domanda attiva*, consiste infatti in un nuovo modello di interazione fra gli enti produttori e distributori di energia e gli utenti, attuato attraverso una serie di politiche e programmi che in letteratura scientifica prendono il nome di *Demand Side Management (DSM)* [15]. Tali programmi, proposti dagli enti responsabili della trasmissione e distribuzione energetica, sono concepiti per modificare la curva di carico giornaliera degli utenti che vi partecipano.

Lo scopo del Demand Side Management è dunque quello di portare l'utente a consumare meno energia ad esempio durante le ore di *picco* (*Peak Shaving*, Figura 2.2(a)) o a effettuare le proprie richieste nei periodi di minor domanda energetica, come la notte e i fine settimana (*Load Leveling*, Figura 2.2(b)).

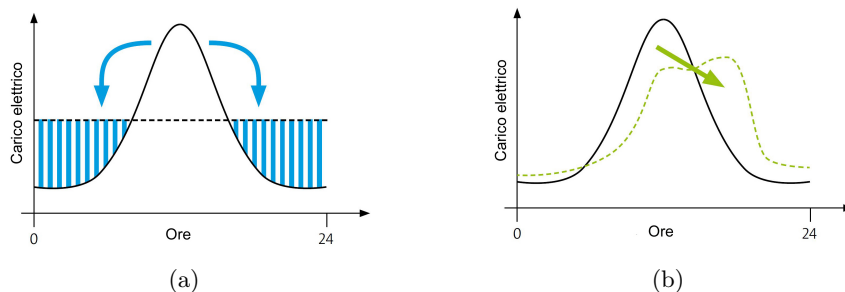


Figura 2.2: Esempi di modifiche delle curve di carico elettrico tramite tecniche di *Peak Shaving*(a) e *Load Leveling*(b)

I meccanismi di Peak Shaving hanno l'obiettivo di ridurre drasticamente il carico elettrico delle utenze durante i periodi in cui la domanda e il costo dell'energia risultano generalmente elevati. Durante questi periodi, infatti, se le richieste energetiche dovessero superare la capacità della rete, potrebbero comprometterne l'integrità forzando i gestori della distribuzione e della trasmissione dell'energia a interrompere temporaneamente l'erogazione energetica con conseguenti disservizi preso

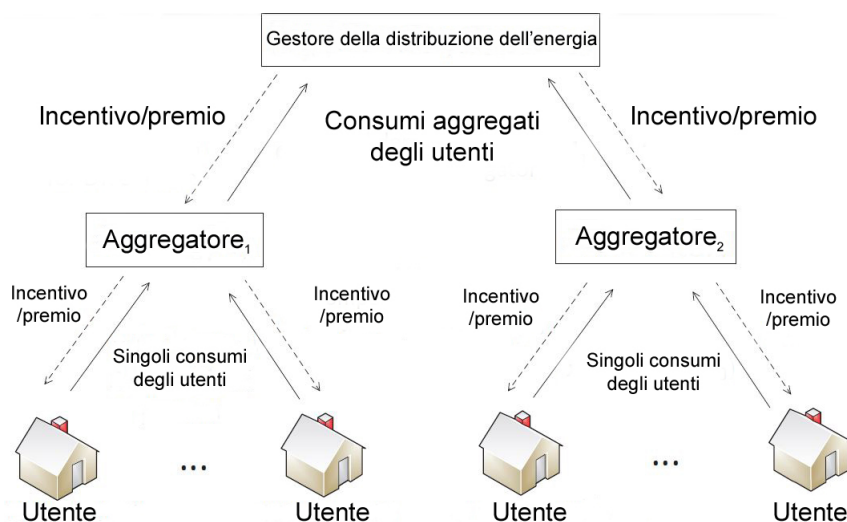


Figura 2.3: La struttura del modello Domanda e Riposta

le utenze.

Le tecniche di Load Leveling, invece, presentano caratteristiche simili ma mirano ad un livellamento del carico elettrico delle utenze piuttosto che eliminare il singolo picco di richieste. Questo è dovuto al fatto che avere un carico di rete più uniforme e *prevedibile* consente ai gestori di distribuzione e trasmissione di rete di allocare le risorse energetiche in maniera più efficiente e al contempo permette di evitare situazioni di criticità strutturali.

Entrambe le tecniche vengono generalmente attuate con l'utilizzo di risorse energetiche alternative e sistemi di accumulo distribuiti in grado di fornire o assorbire ingenti carichi elettrici per un determinato periodo di tempo. Inoltre, in cambio di diversi incentivi di carattere economico, il gestore della distribuzione può temporaneamente controllare i carichi delle utenze e applicare dei vincoli di utilizzo o limitazioni sull'energia fornita per prevenire situazioni critiche.

Ma la riduzione o la modifica dei consumi energetici in ambito domestico può avere origine a partire dallo stesso utente senza l'intervento diretto del gestore della distribuzione energetica. I cosiddetti programmi di *Domanda e Risposta* denotano tutte quelle azioni effettuate volontariamente dall'utente per ridurre o ritardare i suoi consumi di energia, azioni che vengono intraprese in risposta a dei *segnali* inviati dal gestore dell'energia [14, 15, 48]. Infatti, mentre il *Demand Side Management* è focalizzato maggiormente sulla riduzione dei consumi

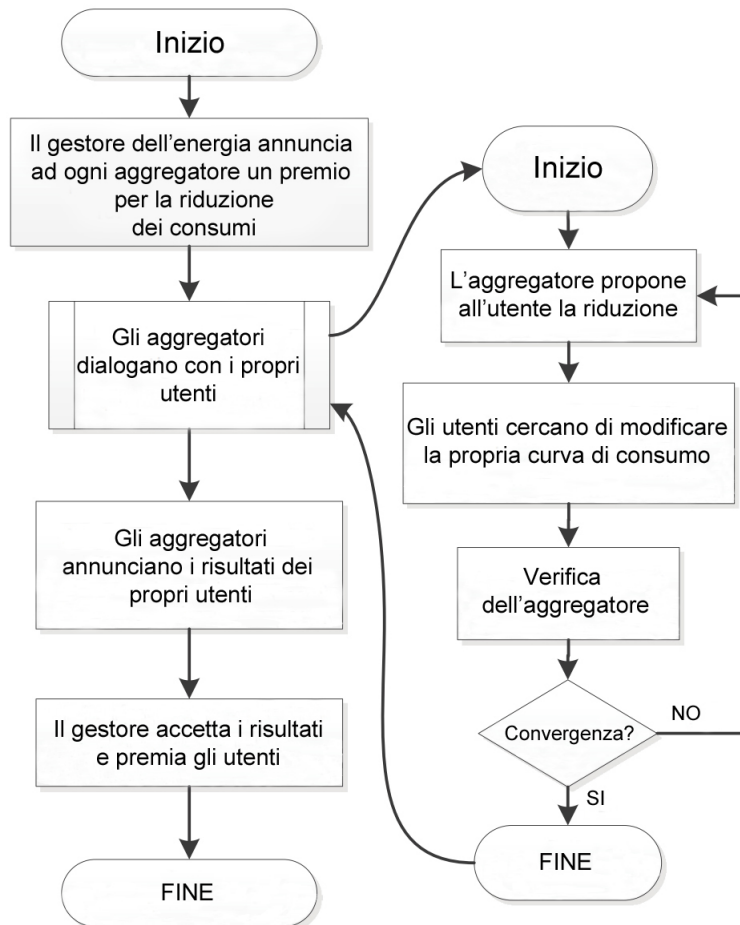


Figura 2.4: Generico modello di interazione Gestore-Aggregatore-Utenti

e sull'efficienza energetica, il *Demand Response* incoraggia le utenze a sfruttare le proprie risorse per ottenere dei profitti partecipando al mercato dell'energia attraverso dei servizi di *aggregazione*.

Il cosiddetto *Aggregatore* è infatti una figura centrale affinché i sistemi di Domanda e Risposta possano essere sfruttati efficacemente dai consumatori [49, 2].

La Figura 2.4 si mostra un generico modello di interazione tra il gestore dell'energia e gli utenti finali tramite l'Aggregatore. Quest'ultimo riceve un'offerta da parte del gestore affinché gli utenti dei quali è responsabile riducano i propri consumi in uno specifico intervallo temporale. L'entità dell'offerta è basata principalmente sul costo dell'energia e sui costi operativi e di gestione della rete previsti per quel dato in-

tervallo. Una volta ricevuta tale offerta l'Aggregatore si preoccupa di negoziare con gli utenti che hanno deciso di partecipare al programma di riduzione, proponendo un incentivo economico in base alla quantità di energia che essi sono disposti a rinunciare nell'intervallo di tempo specificato. Tale negoziazione può andare sempre più raffinandosi man mano che l'utente dichiara di rinunciare a una maggior quantità di energia, fino a raggiungere la convergenza e dunque un accordo. Al termine di tale fase, dunque, i consumi dei vari utenti vengono "aggregati" e presentati al gestore dell'energia che provvederà a premiare l'Aggregatore e quindi gli utenti che hanno rispettato i termini della riduzione energetica. Inoltre, in base al tipo di programma o contratto stipulato tra l'Aggregatore e i propri utenti, è possibile che questi ultimi ricevino una penale qualora non riuscissero a mantenere i propri consumi al di sotto della soglia prevista [49].

Da tale scenario risulta evidente che il ruolo dell'utente è destinato a cambiare radicalmente nei prossimi anni, non solo da un punto di vista prettamente economico ma anche ecologico e sociale, educandolo ad un utilizzo più consapevole e responsabile delle proprie risorse energetiche. A conferma dell'efficacia e dei benefici che tale interazione comporta, i meccanismi di Demand-Response si stanno affermando sempre di più sul mercato dell'energia in paesi come Australia, Stati Uniti, Canada, Giappone e Corea del Sud [17] mentre nel panorama Europeo paesi quali Francia, Finlandia, Belgio, Austria e Gran Bretagna hanno dato inizio ad una serie di interventi strutturali, normativi ed economici volti all'adozione di tali paradigmi di interazione [2].

## 2.4 Tecniche di predizione dell'utilizzo della rete domestica

Le tecniche di predizione dei consumi hanno ricoperto, nel corso degli anni, un ruolo sempre più importante nel contesto delle reti attive ad alta efficienza energetica. Il loro scopo è infatti quello di effettuare una predizione dei consumi energetici di una o più utenze per un periodo che può andare dall'ordine delle ore (*Short-term load forecasting*) all'ordine delle settimane o mensilità (*Long-term load forecasting*). Tali predizioni possono essere dunque utilizzate dai gestori della generazione, della trasmissione e della distribuzione per migliorare l'allocazione

delle risorse della rete evitando effetti di sovrapproduzione energetica. Generalmente le tecniche di predizione dei consumi, in particolare quelle relative ad una singola unità abitativa, si avvalgono sia di dati relativi ai consumi passati sia di informazioni sul profilo dell'utente quali aspetti antropologici e strutturali dell'abitazione. Per aspetti antropologici si intendono tutte quelle informazioni riguardanti le caratteristiche degli occupanti dell'unità abitativa come età, sesso e abitudini, mentre per aspetti strutturali si intendono tutte le caratteristiche *fisiche* della casa come numero di stanze, estensione e tipologia degli elettrodomestici presenti [50].

I dati relativi ai consumi possono essere ottenuti attraverso il monitoraggio dei singoli elettrodomestici dell'utente tramite l'utilizzo di sensori ad essi collegati o tramite innovative tecniche non intrusive di profilazione di carico (discusse nel capitolo 3), salvaguardando informazioni di interesse quali l'ora e il giorno di accensione e la durata media di utilizzo dell'elettrodomestico; mentre le informazioni sulla composizione familiare e sulle abitudini dell'utente vengono in genere immesse manualmente nel sistema durante la fase iniziale di installazione e configurazione.

L'obiettivo è dunque quello di ottenere un modello che sfrutti i dati raccolti per *apprendere* il comportamento dell'utente e che sia in grado di effettuare delle previsioni di consumo e di utilizzo della rete.

Per via della loro importanza sempre crescente, le tecniche di predizione sono state ampiamente trattate nella letteratura scientifica e un gran numero di modelli sono stati proposti negli ultimi anni [51, 52, 53]. Generalmente tali modelli presentano una forte base statistica e risultano onerosi da un punto di vista computazionale, presentando spesso problemi di scostamento numerico tra i valori predetti e i dati reali (bias) [54].

Per questi motivi, negli anni, tecniche derivanti dal campo dell'Intelligenza Artificiale quali l'apprendimento per rinforzo, apprendimento supervisionato e non supervisionato e reti neurali sono state preferite ai metodi puramente statistici per risolvere problemi di previsione, non solo in ambito energetico ma anche in campi quali economia e medicina. La ragione risiede nella capacità di questi metodi di riconoscere e al contempo apprendere correlazioni e tendenze nei dati fornitigli nella cosiddetta fase di allenamento (*training*) e di utilizzare tale *esperienza iniziale* per formulare ipotesi o prevedere orientamenti futuri



dimostrando inoltre grande tolleranza agli errori e bassa complessità computazionale grazie anche a tecniche di calcolo parallelo [54].

Per tale ragione, nel lavoro svolto, si è scelto di attingere dal campo dell'Intelligenza Artificiale per formulare un algoritmo di apprendimento atto ad effettuare previsioni sul comportamento futuro dell'utente e sul suo utilizzo dei dispositivi domestici che sarà dettagliatamente discusso nel capitolo 4 della tesi.



## Capitolo 3

# Stato dell'arte

*“Siamo come nani sulle spalle di giganti, così che possiamo vedere più cose di loro e più lontane, non certo per l'acume della vista o l'altezza del nostro corpo, ma perchè siamo sollevati e portati in alto dalla statura dei giganti”*

- Bernardo di Chartres -

Nel contesto delle reti elettriche attive e delle case intelligenti, negli ultimi anni si è assistito al susseguirsi di diverse proposte per modelli di architetture e sistemi di gestione energetica in ambito residenziale [55, 56, 57, 58, 21].

Mentre molti degli esempi presenti nella letteratura scientifica propongono soluzioni che permangono in uno stadio prototipale o teorico, esistono, in particolare nel mercato energetico statunitense, soluzioni tecnologiche concrete e attualmente disponibili agli utenti.

L'obiettivo di questo capitolo è introdurre il lettore allo stato dell'arte dei sistemi di gestione energetica in ambito residenziale, riportando gli esempi ritenuti più significativi e attualmente in fase di sviluppo e commercializzazione ed evidenziando lo stato di avanzamento delle tecniche di Domanda e Risposta all'interno del contesto europeo e italiano.

### **3.1 Il panorama internazionale dei sistemi di gestione energetica**

I paesi che risultano più attivi nel mercato mondiale dei sistemi di gestione della domanda attiva sono la Corea del Sud e gli Stati Uniti. Questi ultimi in particolare, grazie all'introduzione di piani normativi

adeguati e alla presenza di supporti tecnologici e strutturali all'avanguardia, presentano delle soluzioni per l'ottimizzazione dei consumi energetici attualmente commercializzate e di grande rilevanza, delle quali vengono presentati due esempi tra i più significativi. La giovane azienda Bidgely [59], fondata nel 2011 a Sunnyvale in California, propone ai suoi clienti un innovativo sistema di monitoraggio e gestione dei consumi e della domanda energetica. Basandosi sulle moderne tecniche non invasive di misurazione dei consumi (*Non Intrusive Appliance Load Monitoring, NIALM* [60, 61]) l'azienda ha sviluppato un software che, a partire dalla disaggregazione della curva di carico giornaliera dell'utente, riconosce e memorizza le *firme energetiche* dei diversi elettrodomestici e dispositivi presenti nella rete senza la necessità di installare alcun tipo di sensore [62]. Inoltre attraverso qualsiasi dispositivo portatile connesso alla rete Internet domestica, Bidgely fornisce all'utente diverse informazioni in tempo reale, ad esempio il suo consumo attuale e il costo del medesimo, ma anche offerte personalizzate e consigli sul risparmio energetico mostrando il grado di inefficienza dei dispositivi installati e le conseguenze economiche e ambientali che ne derivano.

Il sistema prevede anche un'interazione dell'utente con il gestore della distribuzione tramite i meccanismi della domanda attiva. Attraverso un sistema di avvisi, infatti, il sistema allerta l'utente sui possibili eventi di riduzione della domanda energetica programmati dal gestore per i giorni successivi, guidandolo nella pianificazione di utilizzo dei propri dispositivi e mostrandone i benefici immediati.

Tramite dunque un meccanismo di visualizzazione delle informazioni di tipo *azione - effetto - costo* il sistema cerca di responsabilizzare l'utente e di aumentare il suo grado di consapevolezza e partecipazione.

A dimostrazione dell'efficacia di tale metodo di interazione si riportano i risultati di un caso di studio condotto dall'azienda [63], dove il 41% dei partecipanti ha effettivamente modificato le proprie abitudini basandosi sulle informazioni fornitegli dal sistema, ad esempio sostituendo gli elettrodomestici inefficienti o ritardando il loro utilizzo durante il giorno, mentre l'81% dei partecipanti si è detto molto soddisfatto del servizio e ne raccomanderebbe l'utilizzo a terzi.

Un altro valido esempio di implementazione reale e commercializzazione di sistemi per la gestione energetica residenziale sono i prodotti sviluppati dalla compagnia americana Opower [64]. Fondata nel 2007 e con sede centrale ad Arlington, Virginia, l'azienda conta più di cin-

quecento dipendenti e rappresenta una delle realtà più importanti nel campo dello sviluppo software orientato al risparmio energetico.

Essa ad oggi vanta tra i suoi clienti i maggiori gestori e distributori dell'energia di otto diversi paesi e milioni tra utenti residenziali ed industriali [64].

Grazie a questa forte collaborazione con utenti e gestori, l'azienda ha sviluppato diverse soluzioni e progetti pilota per la realizzazione dei meccanismi di interazione di Domanda e Risposta (vedasi la sezione 2.3 della tesi).

Un esempio è il programma *Behavioral Demand Responses* sviluppato da Opower in collaborazione con la società di distribuzione Baltimore Gas and Electric (BGE, [65]) e coinvolgendo un ingente numero di utenze domestiche. In tale programma l'utente, attraverso un'applicazione installata in un dispositivo portatile o semplicemente tramite posta, è in grado di ricevere avvisi personalizzati sui programmi di riduzione energetica pianificati per le settimane o mesi successivi, ed è dunque incoraggiato a prendervi parte.

Poco prima dell'inizio effettivo della riduzione l'utente è nuovamente contattato dal gestore della distribuzione che lo avvisa dell'inizio del programma, l'utente può dunque accettare di partecipare e autonomamente cercare di limitare i propri consumi (ad esempio decidendo di non utilizzare un determinato elettrodomestico quel giorno o impostando il termostato della casa ad una temperatura più elevata). Al termine del programma l'applicazione invierà dunque all'utente un resoconto dettagliato del programma e i risultati raggiunti in termini di risparmio energetico ed economico.

La differenza tra la soluzione proposta da Opower e, ad esempio, quella dell'azienda Bidgely è che la prima può essere portata avanti con successo anche senza l'installazione di software di gestione o di dispositivi quali elettrodomestici *intelligenti*. Questo è attuabile solo grazie ad una forte collaborazione tra i gestori dell'energia e gli utenti dove la compagnia Opower assume il ruolo di intermediario. Gestire le riduzioni dei consumi in ambito residenziale solo attraverso un proficuo scambio di informazioni tra utenti e gestori è dunque possibile, con il risultato di abbattere notevolmente i costi iniziali di installazione e dunque aumentare la predisposizione dell'utente nel parteciparvi.

Di contro, la mancanza di un sistema automatizzato di gestione dell'energia, presuppone una partecipazione e un coinvolgimento dell'utente

costante, con un incessante scambio di messaggi informativi e una gestione *manuale* delle risorse.

Quello che si vorrebbe avere invece è un sistema di gestione energetica che presenti ridotti costi di installazione ma che al contempo abbia un buon grado di automazione e trasparenza all'utente e che funga da supporto fondamentale per quest'ultimo per interagire in maniera semplice ed efficace con il gestore della distribuzione e per partecipare in maniera informata e consapevole ai programmi proposti.

### 3.2 Il panorama europeo dei sistemi di gestione energetica

Una delle imprese più rappresentative all'interno del mercato della gestione energetica e dei sistemi domotici europeo è la storica azienda Schneider Electric, fondata nel 1836 e con sede sociale a Rueil-Malmaison in Francia. Con oltre 200 siti produttivi nel mondo dei quali sei in Italia, l'azienda presenta un'ampia gamma di soluzioni hardware e software non solo per la gestione dell'energia in ambito industriale e residenziale ma anche per la distribuzione e generazione energetica a livello di rete [66].

Nell'ambito di interesse l'azienda ha sviluppato una vasta gamma di prodotti orientati all'efficienza energetica e al controllo dei consumi residenziali, che possono essere interconnessi per formare una complessa rete domotica.

Tali prodotti, tutti progettati secondo lo standard KNX [67], sono principalmente di tre categorie: i *sensori* i quali raccolgono le informazioni dall'ambiente e dai dispositivi come temperatura, movimento e consumo energetico; gli *attuatori* che ricevono le informazioni e le convertono in azioni come accensione e spegnimento dei dispositivi, gestione oscuranti e controllo riscaldamento; infine abbiamo l'insieme dei componenti necessari per far funzionare il sistema che comprendono ad esempio gli accoppiatori per connettere le diverse linee o aree e le interfacce per la programmazione e il controllo. I dispositivi che utilizzano la tecnologia KNX sono dotati di un proprio micro controllore e sono connessi tra di loro attraverso una linea bus installata in parallelo all'alimentazione elettrica a 230V che consente lo scambio dei dati e di informazioni. Tutti i dispositivi sono caratterizzati da indirizzi specifici sul bus e per evitare collisioni e la perdita dei dati, viene utilizzato il protocollo

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance).

L'architettura prevede anche la presenza di un piccolo server (*iSE*), collegato al bus di comunicazione KNX e alla rete Internet domestica, che permette di accedere alle funzioni presenti all'interno della casa, attraverso due applicativi dedicati rispettivamente all'installatore e al cliente finale e scaricabili sul proprio dispositivo portatile. Tramite il server e la relativa applicazione l'utente è dunque in grado di gestire i dispositivi presenti in casa, definendone le priorità e i tempi di attivazione, visualizzare i consumi totali e dei singoli carichi oltre ad altre funzioni come l'utilizzo degli impianti antintrusione o la termoregolazione degli ambienti.

Il sistema consente dunque all'utente un controllo pressoché totale della propria rete domestica, ma al contempo presenta un alto grado di invasività e dei costi di installazione e manutenzione elevati per un singolo utente. Inoltre la rete risulta nel suo complesso una rete *chiusa* in quanto non prevede alcun meccanismo di interazione con la rete elettrica esterna e con il gestore della distribuzione, rendendo di fatto impraticabili, allo stato attuale, l'adozione di meccanismi di gestione attiva della domanda tramite il sistema di Domanda e Risposta.

Nel mercato Europeo infatti, mentre in ambito industriale alcune forme di domanda attiva tramite Domanda e Risposta sono già presenti o stanno per essere introdotte, in ambito residenziale tali soluzioni tardano ad arrivare [2].

Ciò è dovuto al fatto che, nonostante la Commissione Europea abbia confermato il suo completo appoggio all'introduzione del Domanda e Risposta (vedasi Direttiva Efficienza Energetica , Art.15.8), nella maggior parte degli stati membri mancano ad oggi adeguati piani regolatori, riforme e finanziamenti mirati all'ambito residenziale, mancanze che stanno di fatto rallentando notevolmente lo sviluppo di un mercato unico e di tecnologie adeguate.

In Figura 3.1 è mostrato un quadro dello stato di introduzione attuale del sistema di Domanda e Risposta in Europa [2], dal quale si evince che solo pochi stati risultano effettivamente in linea con le direttive della Commissione Europea e dove molte imprese hanno iniziato a commercializzare soluzioni di gestione della domanda attiva prettamente in ambito industriale o a servizio dei gestori di trasmissione e distribuzione dell'energia [68, 69, 70, 71].

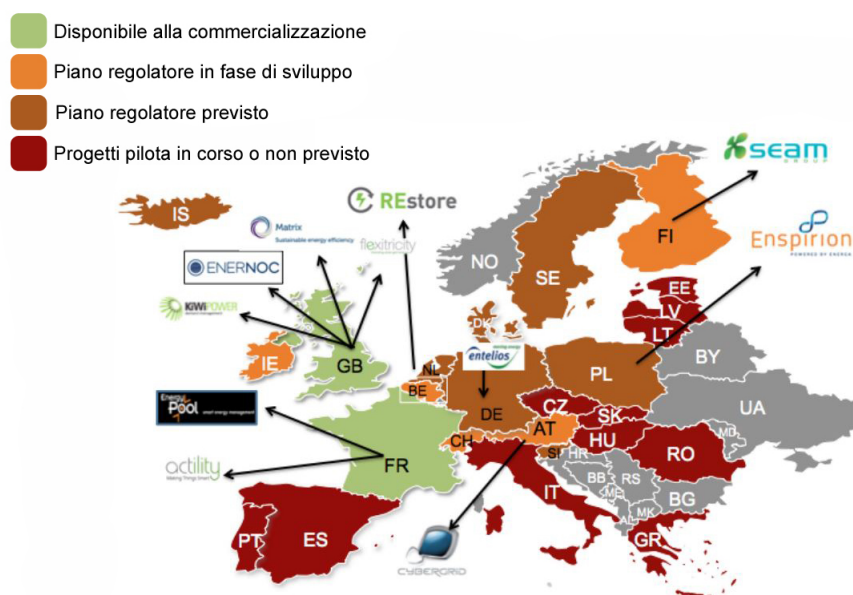


Figura 3.1: Stato di introduzione del Domanda e Risposta in Europa (fonte SECD [2])

In particolare, l'Italia, pur essendo il primo paese europeo ad aver fornito ai propri utenti moderni contatori elettronici, figura tra quei paesi dove, a livello comunitario, non esiste ad oggi un quadro normativo specifico per il Domanda e Risposta.

Nonostante tali mancanze da parte delle istituzioni competenti, diverse imprese del settore tecnologico e della distribuzione energetica hanno dato vita a consorzi aziendali e progetti pilota con lo scopo di elaborare uno standard architetturale e di comunicazione nell'ambito della gestione energetica residenziale e di porre le basi per un futuro mercato energetico italiano.

Due dei principali consorzi italiani attualmente molto attivi sono il consorzio Homelab [72] e Energy@Home [21].

Il consorzio Homelab, fondato nel 2011, presenta otto soci fondatori, imprese ed enti leader del settore domestico quali Ariston Thermo, Gruppo Elica, Indesit Company, Loccioni, MR&D Institute, Spes, Teuco-Guzzini e l'Università Politecnica delle Marche. Scopo del consorzio è dunque la definizione di standard di comunicazione ed interoperatività tra i vari prodotti e servizi all'interno della casa con obiettivi di efficienza energetica e migliori prestazioni, oltre allo studio e l'implementazione di sensori e di tecnologie in grado di migliorare la qualità e la funzionalità degli ambienti domestici.



Perseguendo tali obiettivi il consorzio ha dato vita ad Homelab Open World un linguaggio sviluppato dai partner di Homelab che consente a prodotti di interagire ed interoperare con gli altri oggetti della casa domotica a livello di IP (Internet Protocol) e che è tuttora in fase di sperimentazione.

Risultati molto concreti sono invece stati ottenuti dal consorzio Energy@Home fondato nel 2012 da Electrolux, Telecom Italia ed Enel Distribuzione, nato anch'esso con lo scopo di promuovere uno standard di comunicazione in ambito domotico e lo sviluppo e la diffusione di prodotti e servizi basati sull'interoperabilità e l'interazione degli elettrodomestici di nuova generazione con gli utenti.

Un primo risultato raggiunto è stato quello di definire un linguaggio standard e *open source* per la gestione energetica degli elettrodomestici creando con la Zigbee Alliance una semantica che fa ora parte del nuovo standard Zigbee Home Automation 1.2.

Un secondo importante risultato consiste nello sviluppo del software di gestione energetica JEMMA (Java-based Energy Management Application framework) creato per permettere agli utenti di monitorare i propri consumi e di interagire con la rete di dispositivi installati [24]. Il software è stato rilasciato sotto licenza LGPL (Lesser General Public License v3) che permette di scaricare gratuitamente il software, modificarlo ed estenderlo con prodotti di terze parti.

Il rilascio di JEMMA come software *open source* dimostra come tale consorzio sia effettivamente aperto a proposte e innovazioni, incoraggiando un dialogo in favore della creazione di nuove tecnologie per l'ambiente domestico del futuro.

Energy@Home ha inoltre rilasciato in forma pubblica le specifiche del protocollo di comunicazione formulato con Zigbee Alliance, la definizione dell'architettura e infrastruttura domotica proposta nonché un documento contenente diversi scenari d'uso di quest'ultima. Altro merito che distingue tale consorzio da altri presenti nel panorama italiano è l'aver considerato, nei propri scenari d'uso, la figura dell'Aggregatore come intermediario fra gli utenti e il gestore dell'energia, mostrando fin da subito una forte propensione all'integrazione con i moderni servizi del Domanda e Risposta.

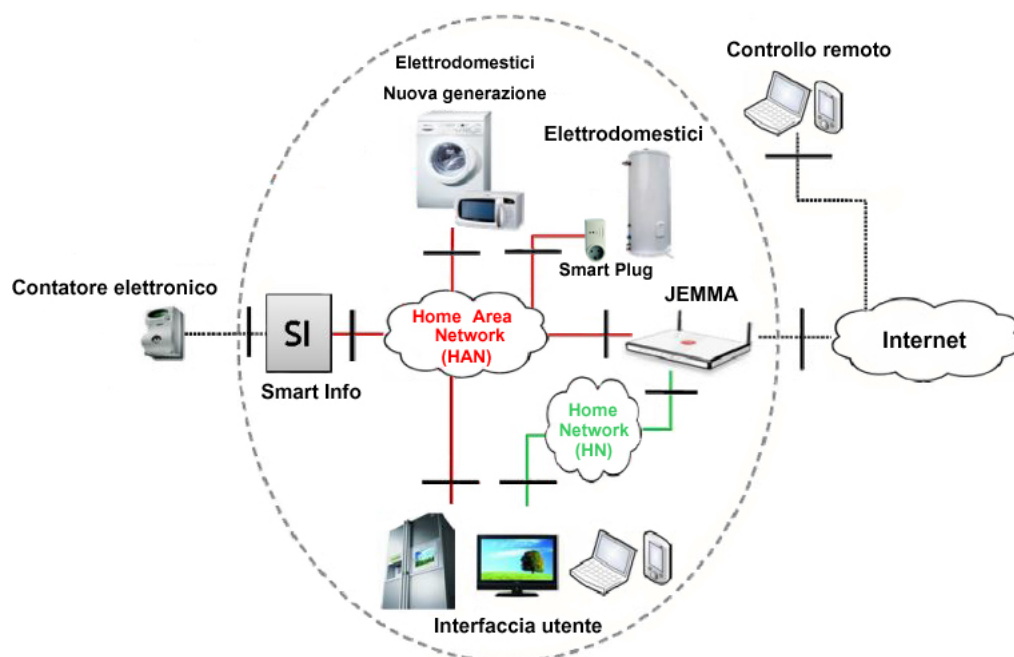


Figura 3.2: Architettura domotica proposta dal consorzio Energy@Home (fonte Energy@Home Use Cases [3])

L'architettura proposta da Energy@Home e mostrata in Figura 3.2, è composta da due sottoreti principali: la Home Area Network (HAN) e la Home Network (HN). Nella Home Area Network sono presenti tutti i dispositivi installati nell'ambiente domestico che l'utente intende controllare e monitorare. Tali dispositivi possono essere elettrodomestici tradizionali (o *legacy devices*) che non implementano nessun protocollo di comunicazione e che possono essere controllati solo attraverso delle cosiddette *prese intelligenti*, che ne permettono il monitoraggio dei consumi e l'attuazione diretta. Oppure possono essere elettrodomestici di nuova generazione (*Smart Appliances*) che possono dialogare con altri dispositivi presenti nella rete, secondo lo standard Zigbee Home Automation 1.2 proposto, fornendo informazioni sui consumi, sul tipo di carico e su eventuali problemi tecnici e permettendone l'attuazione in maniera sicura, cioè garantendone l'accensione e lo spegnimento solo in determinati stati del ciclo di funzionamento del dispositivo [3]. All'interno della HAN è prevista anche la presenza dell'Enel Smart Info, un dispositivo che si interpone fra la rete locale domestica e il contatore elettronico esterno permettendone una facile interazione e mostrando informazioni di controllo all'utente [73].

Alla Home Network (HN) appartengono invece i componenti che svolgono il ruolo sia di interfaccia utente con la rete dei dispositivi (*Customer Interface*) sia di controllo di questi ultimi (*Home Gateway*). L'interfaccia utente può essere implementata tramite qualsiasi dispositivo in grado di connettersi alla rete Internet domestica o tramite il software JEMMA proposto da Energy@Home e permette all'utente di visionare i propri consumi attuali e passati, controllare le proprie specifiche contrattuali e trasmettere informazioni di controllo alla rete dei dispositivi ad esempio programmandone l'accensione.

Il cosiddetto *Home Gateway* invece, svolge un ruolo fondamentale all'interno dell'architettura, poichè è in grado di interfacciarsi sia con i dispositivi presenti nella rete domestica tramite il protocollo Zigbee, sia con utente tramite il software JEMMA e con la rete esterna, tramite ad esempio protocollo HTTP, fungendo dunque da centro di trasmissione delle informazioni e collegamento tra la Home Area Network, la Home Network e la rete esterna.

Inoltre nella guida ai casi d'uso proposta da Energy@Home [3] si mostra come tramite tale dispositivo il gestore della distribuzione energetica e in particolare l'Aggregatore, nel contesto del Demand Response, possano interagire con l'utente. Ricevuta ad esempio una proposta di riduzione energetica da parte dell'Aggregatore, l'Home Gateway è in grado guidare l'utente tramite l'interfaccia predisposta, nel valutare la possibilità di accettare tale proposta. È previsto infatti che l'Home Gateway sia predisposto per implementare un algoritmo di risparmio energetico che pianifichi i tempi di attivazione degli elettrodomestici per l'intervallo di tempo necessario affinché il consumo risultante del sistema rispetti la richiesta dell'Aggregatore. L'utente potrà dunque consultare il *piano di attivazione* risultante e decidere in maniera informata e consapevole se partecipare o meno al programma di riduzione proposto.

L'architettura e il protocollo di comunicazione per la gestione energetica proposti da Energy@Home sono stati testati in cinque diversi paesi europei, tra i quali l'Italia con un pool di 50 famiglie e in Olanda coinvolgendo oltre 300 utenze, con ottimi risultati sia dal punto di vista funzionale che di accettazione e collaborazione da parte degli utenti coinvolti.

Prendendo come riferimento il modello proposto dal consorzio Energy@Home, il sistema proposto si prefigge l'obiettivo di integrarsi all'interno di un'architettura per l'efficienza energetica e affiancarsi ai software di gestione già presenti nei dispositivi preposti al controllo e all'attuazione della rete in modo da estenderne le funzionalità e aumentarne il grado di interazione con l'utente e con il gestore della distribuzione energetica. Tali dispositivi possono infatti avvalersi dei meccanismi di apprendimento e simulazione proposti e illustrati in dettaglio nel capitolo 4 della tesi, per agevolare e guidare l'utente a dialogare in maniera costruttiva con il gestore della distribuzione della rete elettrica e dunque per modificare il suo tipico ruolo di consumatore passivo all'interno della rete energetica, divenendone una parte attiva e consapevole.

Uno degli aspetti più complessi nel contesto dello sviluppo di reti domestiche e in generale di reti di dispositivi capaci di interoperare con un alto grado di efficienza consiste nella fase di progettazione di tali reti. Infatti, ogniqualvolta vi è la necessità di creare una nuova rete per un dato utente, il progettista deve *manualmente* definire il numero e la locazione dei componenti, definire un protocollo di comunicazione fra essi, creare un software di gestione energetica o adattarne uno esistente e successivamente implementare fisicamente la rete e testarne il funzionamento generale. Inoltre, sicchè in tali reti *intelligenti* si ha una forte interazione tra componenti hardware e software, determinata da politiche gestione energetica oltre che dalle azioni degli utenti finali, risulta di estrema utilità l'utilizzo di un framework che, partendo da una rappresentazione ad alto livello della rete e delle sue funzionalità, permetta di simulare tale interazione tra dispositivi, di valutare l'efficienza della rete generale e dunque di facilitarne la progettazione.

Siccome ogni utente presenta delle caratteristiche proprie in termini di utilizzo e struttura dell'ambiente domestico, le politiche di gestione che determinano l'utilizzo della rete dovranno essere modellate e personalizzate in base a tali caratteristiche.

Per questo motivo, un framework di simulazione orientato agli ambienti domestici intelligenti dovrà non solo essere efficiente, accurato e affidabile ma anche abbastanza dinamico per permettere di testare differenti politiche e strategie di gestione energetica al fine di estrapolare quella che risulta più adatta ai bisogni specifici dell'utente.

Inoltre, nel contesto delle tecniche di Domanda e Risposta dove l'interazione con il gestore della distribuzione energetica è prevista tramite richieste di partecipazione a programmi di riduzione energetica, il framework di simulazione può risultare un valido strumento per guidare l'utente all'interno di tali programmi, non soltanto tramite meccanismi di simulazione ma anche tramite tecniche di *load forecasting* in grado di predire quale sarà l'utilizzo futuro della rete basandosi sulle abitudini dell'utente stesso.

Nella letteratura esistono diversi esempi di software di simulazione di ambienti domestici ad alta efficienza energetica: in [74] viene proposto un sistema di simulazione dove gli elettrodomestici sono rappresentati da eventi caratterizzati da una richiesta di energia ed una durata e la cui frequenza è determinata tramite una funzione di probabilità discreta (o di Poisson); in [18] la piattaforma proposta utilizza algoritmi di ottimizzazioni come i PSO (Particle Swarm Optimization) per coordinare i tempi di attivazioni degli elettrodomestici al fine di ottimizzare il costo totale dell'energia; la piattaforma di simulazione proposta in [19] permette invece di simulare, pianificare e monitorare tramite eventi discreti un intero edificio residenziale. I lavori proposti però risultano non estensibili in quanto progettati per simulare ambienti strutturalmente complessi implementando una singola politica di gestione dell'energia orientata alla minimizzazione del costo derivante dai consumi totali del sistema. Oltre ad una maggiore flessibilità di utilizzo, un sistema di simulazione efficiente dovrebbe utilizzare un linguaggio il cui livello di astrazione si avvicini il più possibile all'implementazione fisica dei singoli dispositivi ma che al contempo permetta di simulare l'uso di un protocollo di comunicazione generico con la possibilità di specificarlo in una fase successiva di progettazione.

A tale proposito nel lavoro presentato in [20] si propone una piattaforma di simulazione dove il comportamento energetico degli elettrodomestici e la loro interazione è modellizzata tramite l'uso di SystemC, un insieme di librerie e classi del linguaggio C++ che consentono di creare modelli di dispositivi hardware e di simulare processi concorrenti. Tale piattaforma risulta molto accurata e realistica nel modellare la potenza dissipata dai singoli elettrodomestici e il consumo di energia totale del sistema e il codice risultante potrebbe essere riutilizzato facilmente qualora si volesse implementare a livello fisico l'intera rete, di contro utilizza uno specifico protocollo di comunicazione tra elettrodomestici,

sensori e i vari dispositivi installati che risulta difficilmente modificabile o estendibile.

Per tale motivo il simulatore proposto nel lavoro di tesi utilizza SystemC come linguaggio di definizione dei suoi componenti insieme a *Transaction Level Modeling* (TLM 2.0), una estensione del linguaggio che permette di modellare un protocollo di comunicazione hardware ad alto livello e che sarà dettagliatamente discussa nel prossimo capitolo.

## Capitolo 4

# Il progetto del sistema di gestione del consumo energetico

*“Ciò che un uomo può inventare, un altro può scoprire”*

- Il ritorno di Sherlock Holmes, Artur Conan Doyle -

Questo capitolo descrive dettagliatamente il lavoro svolto. Nella successiva Sezione si mostrerà come ci si è avvalsi del linguaggio di programmazione e modellazione hardware SystemC per rappresentare le componenti di un sistema di gestione dell'energia in ambito residenziale utilizzate per simularne il comportamento energetico attraverso la piattaforma di simulazione EA-SIM illustrata in dettaglio nella Sezione 4.2.

Nella Sezione 4.3 si illustra il flusso di esecuzione del simulatore EA-SIM, dalla definizione della rete e delle sue componenti alla creazione dei file di configurazione necessari alla simulazione, mostrando come l'intero processo di esecuzione sia stato automatizzato attraverso l'utilizzo di sottoprogrammi scritti in linguaggio Python. Successivamente nella Sezione 4.4 si descrive l'algoritmo di predizione dei consumi energetici proposto, illustrando come esso, a partire dalla definizione di un modello di utenza e dalla creazione di una cronologia di attivazione degli elettrodomestici della rete, sia in grado di apprendere il comportamento dell'utente e di effettuare delle previsioni di utilizzo futuro dei dispositivi di rete a fronte di una richiesta di riduzione dei consumi energetici da parte di un servizio aggregato di Domanda e Risposta.

## 4.1 Simulazione SystemC per il comportamento energetico

In questa Sezione si analizza il funzionamento della piattaforma di simulazione proposta, EA-SIM [25], e di come essa possa essere utilizzata non soltanto per determinare il comportamento energetico di una rete domestica ma anche per simulare l'interazione fra tale rete e il gestore della distribuzione dell'energia attraverso la figura dell'Aggregatore e i programmi del Domanda e Risposta.

Come precedentemente accennato, il simulatore proposto è basato sul linguaggio di modellazione SystemC, un insieme di librerie e classi che estendono il linguaggio C++, che forniscono dei metodi molto efficaci per simulare processi concorrenti e per definire e descrivere il comportamento di dispositivi hardware tramite i cosiddetti *moduli* [75]. I moduli costituiscono gli elementi basilari (*building blocks*) di SystemC i quali consentono, in fase di progettazione, di suddividere una complessa architettura in semplici componenti fondamentali.

Un modulo è definito attraverso l'uso della classe *sc\_module* di SystemC, dove è possibile dichiarare un numero dinamico di *porte* del componente e specificarne variabili, funzioni e metodi interni che vengono utilizzati per interagire con gli altri componenti del sistema collegati a delle porte specifiche. Inoltre SystemC fornisce una soluzione ideale alla modellazione dello scambio di informazioni e dati tra i componenti del sistema, il Transaction Level Modeling 2.0 (TLM 2.0), che definisce un'insieme di metodi e interfacce per un approccio ad alto livello alle comunicazioni digitali.

Nella piattaforma di simulazione presentata, TLM 2.0 è stato utilizzato per simulare la propagazione delle informazioni e le richieste di energia da parte degli elettrodomestici presenti nella rete definiti tramite moduli SystemC, rappresentando in questo modo l'interazione fra le componenti di un sistema di gestione residenziale dell'energia. In particolare la comunicazione tra moduli avviene attraverso le cosiddette *transazioni*, strutture dati standard del linguaggio C++, contenenti un payload, un comando di lettura o scrittura e un insieme di parametri ulteriori quali l'indirizzo di destinazione o il tipo e la grandezza del dato inviato. Una transazione è inizializzata da un modulo cosiddetto *initiator* verso un altro modulo definito come *target*, è importante sottolineare come lo stesso modulo possa fungere sia da iniziatore sia da



ricevente di una transazione, permettendo in questo modo di modellizzare il tipico comportamento di componenti hardware come router o bus in grado di instaurare connessioni bidirezionali di dati.

In SystemC le transazioni sono generalmente istanziate tra moduli tramite due porte (*sc\_port*) interconnesse che tramite l'uso di metodi e chiamate a funzioni (come *sc\_export*) inizializzano un canale di comunicazione attraverso il quale scambiare dati; con l'uso di TLM 2.0, invece, le funzionalità delle porte e i loro metodi sono associate e integrate all'interno dei cosiddetti *socket*. I socket TLM 2.0 possono essere di due tipi: *initiator* e *target* dove i primi sono responsabili di inizializzare la struttura della transazione e di inviarla attraverso il canale di comunicazione, mentre i secondi implementano un singolo metodo (*b\_transport*) che consente loro di ricevere e memorizzare i dati; inoltre ogni *initiator* socket deve essere collegato tramite il metodo *bind* con il *target* socket con la quale intende intraprendere una comunicazione (Figura 4.1).

TLM 2.0 fornisce dunque le basi per definire uno o più protocolli di comunicazione, ottenibili andando a specificare sempre con maggior dettaglio i metodi che tale libreria offre al programmatore.

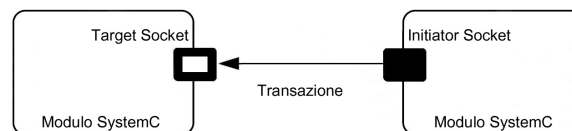


Figura 4.1: Schema comunicazione TLM 2.0

## 4.2 Il sistema di simulazione proposto e il modello dei componenti

In questa Sezione si definiscono le componenti base della piattaforma di simulazione proposta EA-SIM [25], mostrandone la struttura logica interna e le loro interconnessioni, e come queste possano creare un modello di rete domotica quanto più aderente possibile alle attuali reti energetiche in ambito residenziale.

### Energy Box

Questo componente rappresenta la logica di controllo del sistema e può essere assimilato ai moderni software di gestione dell'energia, come ad esempio il software JEMMA proposto dal consorzio Energy@Home presentato nel Capitolo 3. L'Energy Box ha il compito di monitorare e gestire i componenti presenti, quali elettrodomestici e sistemi di accumulo, e controllare lo stato della rete. È rappresentato tramite un modulo del linguaggio SystemC e presenta soltanto socket della tipologia TLM *initiator* in quanto sarà sempre questo componente a inizializzare le transazioni verso gli altri dispositivi, richiedendo informazioni e inviando segnali di controllo. Un primo gruppo di socket sono utilizzati per comunicare con le unità di controllo degli elettrodomestici, un secondo gruppo per comunicare con le unità di controllo dei sistemi di accumulo, se presenti, e infine un ultimo socket sarà utilizzato per ricevere informazioni sullo stato della rete (Figura 4.2). Essendo consapevole della topologia dell'intera rete l'Energy Box può attuare delle politiche di risparmio energetico interagendo con tutti dispositivi presenti, ad esempio indirizzando le richieste energetiche degli elettrodomestici verso gli accumulatori durante le ore di massimo costo dell'energia, per poi ricaricare gli accumulatori durante le ore notturne. In questo modo le richieste saranno assorbite per la maggior parte dai sistemi di accumulo senza che queste pervengano direttamente alla rete, riducendo notevolmente i costi derivati dai consumi.

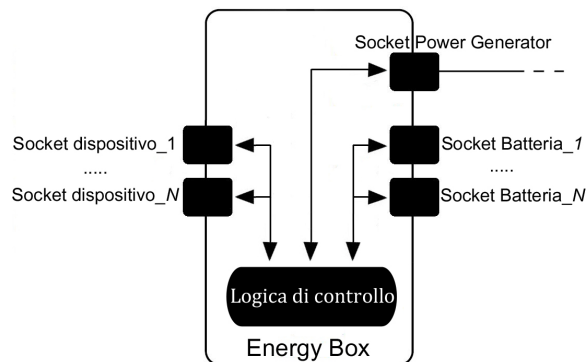


Figura 4.2: Struttura del modulo Energy Box

### Power Generator

Questo componente simula la fornitura di energia elettrica da parte della rete e supporta anche l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili, quali impianti fotovoltaici, all'interno della rete di dispositivi. Il componente è connesso ad ogni dispositivo installato e presenta  $N$  TLM *target socket* dove  $N-1$  di questi sono riservate per rispondere a tutte le richieste di energia provenienti ad esempio dagli elettrodomestici installati o dai sistemi di accumulo, se presenti. Come mostrato in Figura 4.3, sotteso ad ognuno di questi socket vi è un registro il cui valore viene incrementato ad ogni richiesta pervenuta dal dispositivo corrispondente, permettendo di tener traccia dei consumi di ogni singolo componente. L'ultimo *target socket* è invece riservato per inviare informazioni sullo stato della rete e sui consumi totali al componente Energy Box.

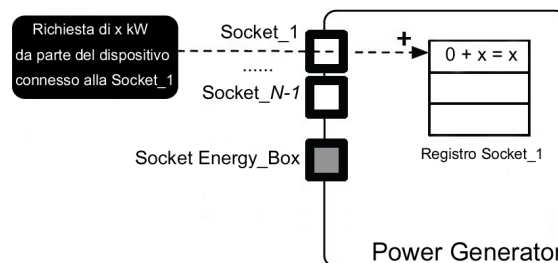


Figura 4.3: Struttura interna del modulo Power Generator

## Batteria

Questi componenti simulano la presenza nella rete di sistemi di accumulo controllabili, ossia degli accumulatori il cui comportamento energetico può essere modificato grazie ad un'unità di controllo ad essi connessa. Il loro utilizzo risulta fondamentale nel caso in cui si volessero attuare politiche di risparmio energetico e di taglio nei picchi di richieste, poichè sono in grado di assorbire ingenti carichi elettrici per un certo periodo di tempo in base al loro dimensionamento [28, 4].

Come nel caso dei componenti *Appliance*, le caratteristiche fisiche di una singola batteria, quali il C-rate, la potenza nominale e l'energia nominale [76], sono precedentemente definite in un file di configurazione facilmente modificabile in modo tale da poter testare, anche per la stessa rete, diversi modelli di batterie e dunque valutarne il corretto dimensionamento.

Nella topologia della rete, essi possono essere connessi a più dispositivi e presentano dei *target socket*, simili al componente Power Generator, per rispondere alle richieste energetiche. Inoltre presentano un socket di tipo *initiator* attraverso la quale possono richiedere energia alla rete durante la loro fase di ricarica. Per controllare le fasi di carica/scarica, la componente Batteria è connessa ad un componente **Control Unit** che a sua volta comunica con il dispositivo di controllo centrale inviando informazioni sullo stato della batteria e ricevendo segnali di attuazione. È infatti il componente Energy Box a determinare se un sistema di accumulo debba ricaricare o meno in base alla politica di risparmio energetico che sta attuando.

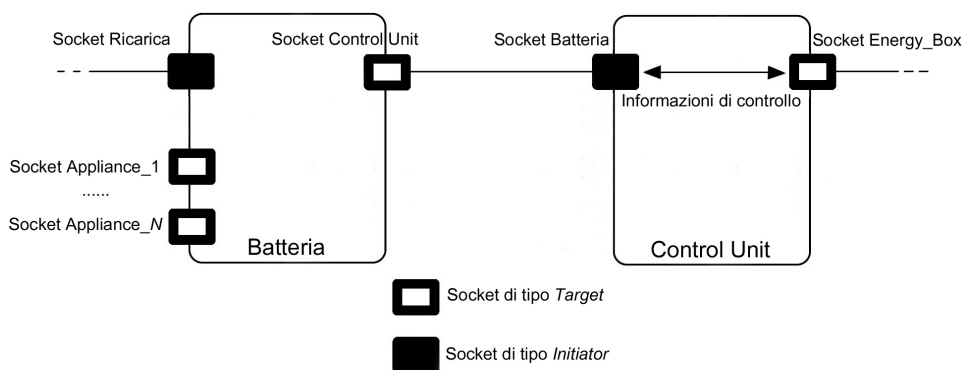


Figura 4.4: Struttura del modulo Batteria

### Appliances (Elettrodomestici)

Questi componenti modellano tutti quei dispositivi connessi alla rete elettrica che richiedono energia per il loro funzionamento. La frequenza e le entità delle richieste energetiche sono uniche per ogni dispositivo in modo da poter simulare le curve di carico dei diversi elettrodomestici che si intendono introdurre nella rete. Tali *profili energetici* sono ricavati dinamicamente dal sistema, in fase di compilazione, per ogni dispositivo a partire da dei file di configurazione e incorporati all'interno del codice sorgente del modulo SystemC corrispondente.

Il sistema proposto è in grado di supportare due tipi di dispositivi: le cosiddette *standard appliances* e le *smart appliances*.

Le prime rappresentano tutti i dispositivi presenti nella rete che non possiedono alcun grado di automazione e che non possono essere controllati da altri componenti. Sono rappresentati come dei moduli SystemC che presentano un singolo initiator socket attraverso il quale inviano richieste di energia al componente Power Generator.

Le *smart appliances* invece, rappresentano tutti gli elettrodomestici di nuova generazione i cui consumi possono essere monitorati e il cui funzionamento può essere controllato da un dispositivo esterno. Essi sono rappresentati con dei moduli SystemC gerarchici (Figura 4.5), formati cioè da un sotto modulo di tipo *standard appliances* connesso ad altri due moduli che ne rappresentano la logica di controllo. Essi sono:

- **Appliance Control Unit:** questo modulo è responsabile di coordinare l'utilizzo del componente Smart Appliance al quale è collegato. La sua interfaccia è costituita da un target socket in grado di ricevere istruzioni dall'unità di controllo centrale (Energy Box) e un initiator socket in grado di inoltrare tali istruzioni. Il suo ruolo all'interno della rete rispecchia quello dei moderni misuratori di consumo o delle centraline elettroniche installate all'interno degli elettrodomestici di nuova generazione, in grado di ricevere segnali dalla rete, attuare sui dispositivi connessi e inviare informazioni sui consumi e sullo stato di attivazione di quest'ultimi.
- **Power Switch:** questo componente è responsabile di inoltrare le richieste di energia dell'elettrodomestico al quale è collegato verso la corretta fonte di energia. Infatti, oltre al Power Generator che rappresenta la rete elettrica domestica, il sistema è in grado di supportare l'utilizzo di sistemi di accumulo come fonte energeti-

ca alternativa per i dispositivi presenti. Questo componente non presenta nessun grado di automazione, bensì è la Appliance Control Unit che è incaricata di forzare il cambio di risorsa energetica in base ai comandi pervenuti dal componente Energy Box.

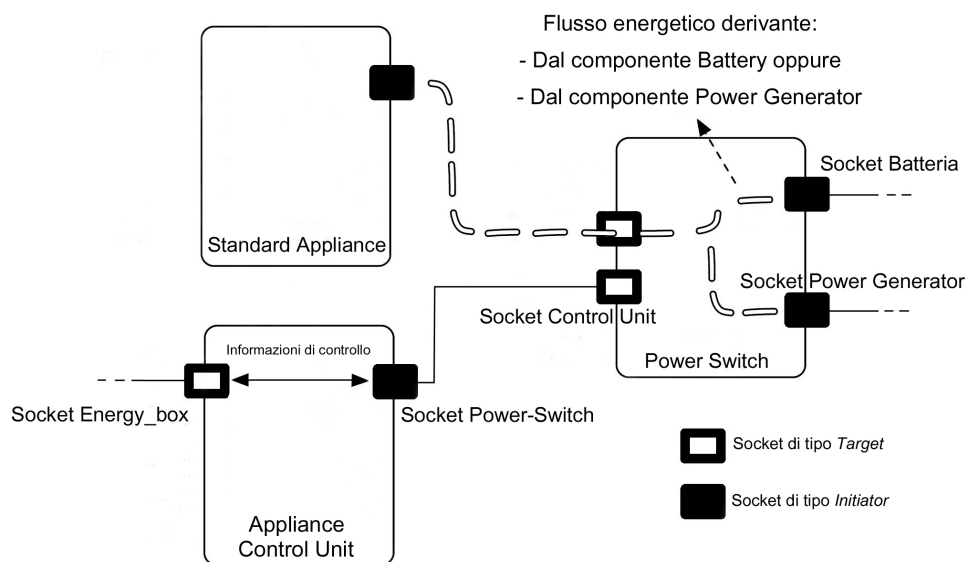


Figura 4.5: Struttura interna del modulo Smart Appliance

### 4.3 Flusso di esecuzione del sistema: dalla definizione dei componenti della rete ai risultati

Nelle sue prime implementazioni, la piattaforma di simulazione EASIM [25] si avvaleva di un'interfaccia utente di tipo *drag&drop* (Synopsys Platform Architect [77]) che permetteva di importare i moduli SystemC con le definizioni dei componenti, connetterli tra loro manualmente e infine simulare l'intera rete così creata. Il risultato delle simulazioni veniva dunque esportato in un file di testo (*dump*) ed elaborato tramite l'utilizzo di un programma scritto in linguaggio Python che ne estraeva le informazioni di interesse, quali il consumo dei singoli elettrodomestici, l'evoluzione del livello di carica degli accumulatori e il consumo totale del sistema, salvandoli in dei file di tipo CSV. Infine ci si avvaleva di alcune funzioni MATLAB per creare dei grafici a partire dai file CSV creati precedentemente (Figura 4.6).

Sebbene funzionante, tale flusso di esecuzione risultava piuttosto laborioso poichè richiedeva di svolgere diversi passaggi, spesso condotti manualmente dal programmatore, e coinvolgeva l'utilizzo di programmi differenti con il risultato di dilazionare i tempi di esecuzione e di estrazione dei risultati delle simulazioni.

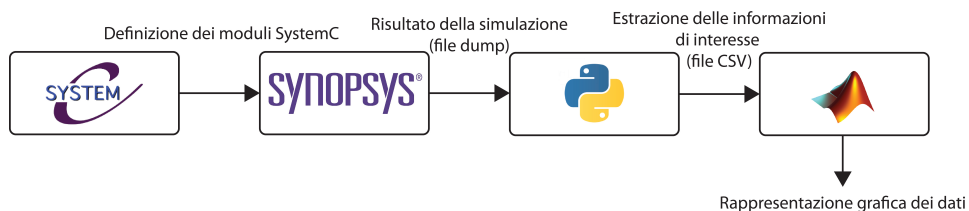


Figura 4.6: Diagramma del flusso di esecuzione

In particolare l'importazione delle definizioni dei moduli, la creazione manuale dei collegamenti tra i dispositivi e successivamente testare il funzionamento tramite il software Synopsys Platform Architect richiedeva un certo grado di dimestichezza ed esperienza di utilizzo del sistema. Inoltre tale software è maggiormente orientato alla progettazione e ottimizzazione di componenti hardware, risultando dunque poco adatto allo scopo di valutare l'efficienza energetica di una rete di dispositivi.

Il primo obiettivo è stato dunque quello di snellire il flusso di esecuzione, dalla definizione dei componenti all'estrazione e consultazione dei risultati, automatizzando la maggior parte dei processi attraverso l'uso

di sottoprogrammi eseguiti tramite riga di comando.

Essendo infatti le componenti del sistema di simulazione proposto interamente scritte in linguaggio SystemC/C++, si è scelto di avvalersi del compilatore GCC (GNU Compiler Collection) per creare e simulare il comportamento della rete, escludendo quindi l'utilizzo di programmi esterni e sfruttando l'ambiente della shell testuale dei sistemi Unix.

Inoltre, per automatizzare la creazione dei file necessari alla compilazione e per richiamare lo stesso compilatore GCC ed eseguire la simulazione, sono stati creati degli *script* scritti in Python, che possono essere facilmente richiamati ed eseguiti tramite riga di comando. Questi si avvalgono principalmente di due file di configurazione per ottenere le caratteristiche dei dispositivi che si intendono modellare all'interno della rete. I file sono stati introdotti nell'ottica di implementare in futuro un'interfaccia web dove l'utente stesso possa selezionare il proprio profilo di utenza (uomo/donna single, famiglia con figlio, coppia, etc...), descrivere gli elettrodomestici presenti nella rete domestica e indicare le sue preferenze in termini di tempi e frequenze di attivazione di questi ultimi. I due file di configurazione sono infatti il risultato di tale processo che rappresenta il punto di partenza grazie al quale è possibile simulare una rete quanto più rassomigliante, in termini di dispositivi presenti e *comportamento energetico* di questi, alla rete domestica dell'utente.

### I files di configurazione

I due files di configurazione sono stati scritti in formato JSON (JavaScript Object Notation) [78], che risulta molto semplice da scrivere e da interpretare ed essendo basato su un sottoinsieme del linguaggio di programmazione JavaScript è adatto allo scambio di dati in applicazioni Web.

La sintassi JSON è basata fondamentalmente su due strutture: un insieme di coppie nome/valore (*pairs*) e un elenco ordinato di valori generalmente rappresentato con un elemento di tipo (*array*). JSON utilizza convenzioni dei linguaggi della famiglia del C, come C, C++, Java, JavaScript, Perl, Python, e molti altri, che lo rendono un linguaggio ideale per descrivere insiemi di dati che sia facilmente interpretabile da un programma esterno.

I file risultanti dal processo iniziale di configurazione da parte dell'utente sono il file *gantt.json* e *network-description.json*, la cui struttura



generica è mostrata in Figura 4.7.

Il primo consiste nella codifica JSON di un diagramma di Gantt, cioè una rappresentazione grafica di un insieme di attività o eventi. Questo tipo di diagrammi sono generalmente utilizzati per supporto alla gestione di progetti, e sono costruiti partendo da un asse orizzontale rappresentante l'arco temporale totale desiderato e da un asse verticale contenente i singoli eventi generalmente rappresentati tramite barre orizzontali di lunghezza variabile in base alla loro durata. Nel nostro caso, il diagramma di Gantt rappresenta dunque l'insieme degli eventi di accensione degli elettrodomestici che si susseguono nell'arco di una giornata. Nel formato JSON ogni evento del diagramma è stato

```
{
  "appliance_0": [
    {
      "continuous": "FALSE",
      "elastic": "TRUE",
      "from": "18:00",
      "to": "22:00"
    }
  ],
  "appliance_1": [
    {
      "continuous": "FALSE",
      "elastic": "TRUE",
      "from": "18:00",
      "to": "22:00"
    }
  ],
  .....
  "appliance_N": [
    {
      "continuous": "TRUE",
      "elastic": "FALSE",
      "from": "01:00",
      "to": "24:00"
    }
  ]
}
(a) gantt.json

{
  "network": [
    {
      "batterie": [
        {
          "id": "battery_0",
          "Name": "Batteria_litio"
        }
      ],
      "appliances": [
        {
          "id": "appliance_0",
          "Name": "Lavastoviglie",
          "Cycle": "7200",
        },
        {
          "id": "appliance_1",
          "Name": "Lavatrice",
          "Cycle": "7200",
        },
        .....
      ],
      "generatori": [
        {
          "id": "generator_1",
        }
      ],
      "connessioni": [
        {"battery_0": " appliance_1"},
        .....
      ],
    }
  ]
}
(b) network-description.json
```

Figura 4.7: Esempi dei due file di configurazione della rete

codificato tramite un vettore il cui nome è l'identificativo dell'elettrodomestico corrispondente e che è costituito da quattro valori: i campi *from* e *to* rappresentano i tempi di inizio e di fine dell'intervallo di tempo preferenziale per l'attivazione dell'elettrodomestico che l'utente ha indicato nella fase di configurazione, il campo *elastic* rappresenta la possibilità per alcuni elettrodomestici di essere ritardati nel tempo rispetto all'istante di attivazione indicato precedentemente (i cosiddetti elettrodomestici *Time Shiftable*), il campo *continuous* indica invece se l'elettrodomestico in questione sia continuativamente attivo durante l'arco della giornata, rappresentando il tipico comportamento ad esempio del frigorifero o del congelatore presente in casa.

Il secondo file di configurazione, *network-description.json*, consiste nella rappresentazione JSON della rete di dispositivi che si intende modellare. Esso contiene alcuni attributi di interesse degli elettrodomestici, quali l'identificativo, il nome e la durata del suo *ciclo di funzionamento*, e degli accumulatori ove presenti. Presenta inoltre le caratteristiche della rete e l'insieme dei collegamenti tra i componenti che la costituiscono. Alcuni componenti di base del sistema, come le *Processing Unit*, *Power Switch* e *Energy Box* non sono indicati all'interno di tale file poichè sono aggiunti alla rete e collegati ai rispettivi componenti automaticamente. Grazie ai due file di configurazione è dunque possibile non solo descrivere la struttura della rete ma anche modificarla semplicemente alterando il contenuto dei due file. È possibile dunque creare diverse architetture di rete o *scenari* che possono differire tra loro non solo per i dispositivi presenti, ma anche per i singoli tempi di attivazione degli elettrodomestici nella stessa rete. In particolare la piattaforma EA-SIM si avvale dei file di configurazione per l'utilizzo di tre sottoprogrammi differenti: *create-components.py*, *create-top.py* e *create-curves.py*.

### Creazione dei codici sorgente SystemC per le componenti di sistema

Il sottoprogramma *create-components.py*, ha il compito di creare i codici sorgente SystemC per tutti i dispositivi che si desiderano installare nella rete, quali *Smart Appliances* e Batterie (Sezione 4.2). Come mostra la Figura 4.8, oltre ai due file JSON di configurazione, lo script riceve in input due insiemi di file contenenti rispettivamente le caratteristiche degli elettrodomestici e degli accumulatori. Per ogni tipo di elettrodomestico infatti, sono stati creati dei file di tipo CSV contenenti il loro profilo di carico per la durata del loro ciclo di funzionamento e che vengono automaticamente interpretati dal programma e utilizzati per scrivere il codice sorgente del modulo SystemC corrispondente e dunque descriverne il comportamento energetico durante la durata della simulazione.

La tabella 4.1 mostra l'esempio del contenuto di uno dei file sopracita-

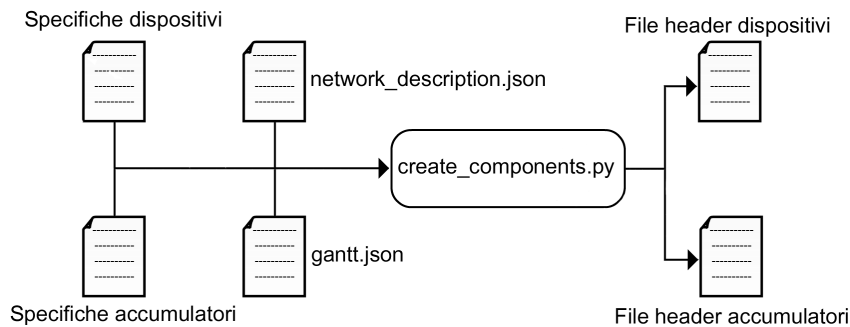


Figura 4.8: Schema logico dello script Python *create-components.py*

ti dove nella colonna di sinistra abbiamo il tempo indicato in secondi, con lo zero a indicare l'istante di inizio relativo al ciclo, mentre nella colonna di destra è indicata la potenza istantanea richiesta dall'elettrodomestico in un determinato istante del ciclo. Tali file sono stati costruiti in base alle indicazioni presenti nell'articolo Stammering et al. [16], dove per ogni classe di elettrodomestici è indicata una tabella simile a quella riportata che ne descrive il comportamento energetico. Con l'ausilio di tali file e utilizzando le indicazioni presenti nel file *gantt.json* il sottoprogramma è dunque in grado di creare i sorgenti SystemC (*header files*) per ogni elettrodomestico inclusi dei tempi di attivazione e del profilo energetico corrispondente.

Una volta creati i codici sorgenti di tutti i dispositivi presenti nella rete, per effettuare una simulazione è necessario creare un ulteriore file, denominato *top file*, che includa tali sorgenti, allochi in memoria i moduli SystemC tramite appositi metodi costruttori e dichiarati esplicitamente i collegamenti tra i loro socket TLM 2.0.

Secondi	Potenza richiesta (W)
0	0
1	15
2	18,56
...	...
500	1200
501	1213
...	...
durata ciclo	12,4

Tabella 4.1: Esempio di file di configurazione di un elettrodomestico

### Creazione del file sorgente di simulazione

Il file *top* è creato mediante tramite l'esecuzione del sottoprogramma *create-top.py* il cui schema logico di input/output è mostrato in Figura 4.9. Oltre ai file sorgenti creati dallo dallo script precedentemente descritto, questo sottoprogramma utilizza anche i file di configurazione *gantt* e *network-description* per reperire informazioni sui dispositivi e in particolare sui collegamenti che caratterizzano la rete.

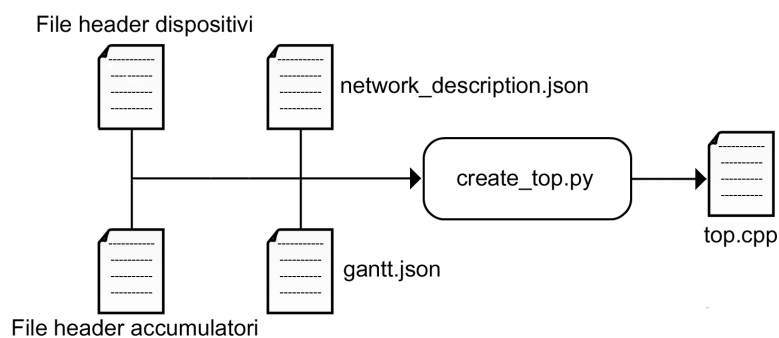


Figura 4.9: Schema logico dello script Python *create-top.py*

Il file così generato è pronto per essere compilato dal compilatore GCC e successivamente eseguito tramite linea di comando. L'output di questa esecuzione consiste di una serie di messaggi di controllo scambiati tra le componenti del sistema durante il tempo di simulazione. Per ogni *transazione TLM* portata a termine, infatti, i dispositivi mostreranno un messaggio di avvenuta ricezione o di corretto invio dei dati scambiati tramite il collegamento dei loro socket, facilitando in questo modo l'analisi dei risultati e la verifica della correttezza di esecuzione. L'insieme di questi messaggi viene salvato in un semplice file di testo, chiamato *dump* poichè contiene tutte le informazioni riguardanti l'esecuzione della simulazione.

### Creazione dei grafici di utilizzo della rete

Il file *dump* viene dunque esaminato dall'ultimo script Python utilizzato internamente dal sistema EA-SIM, *create-curves.py*, che per ogni componente di interesse, quali gli elettrodomestici, gli accumulatori e il modulo Power Generator che emula il comportamento della rete elettrica domestica, estrapola informazioni rilevanti. Per ogni elettrodomestico presente ad esempio, lo script estrarrà l'evoluzione delle sue richieste energetiche durante il tempo della simulazione, utilizzando i messaggi che l'elettrodomestico stesso ha scambiato con la componente Energy Box. Grazie ai messaggi di controllo inviati da quest'ultima componente verso il modulo Power Generator, il sottoprogramma è in grado di estrarre informazioni sull'evoluzione dei consumi generali della rete.

Tutte queste informazioni vengono automaticamente estratte dal programma e presentate all'utilizzatore in forma grafica, rappresentando l'evoluzione, ad esempio, dei consumi energetici di un elettrodomestico nel tempo oppure l'andamento del livello di carica di un accumulatore durante la simulazione. I grafici così creati vengono salvati all'interno di cartelle di sistema in modo da poter essere consultati in qualsiasi momento per future verifiche o confronti con simulazioni di configurazioni distinte della rete. Nella sezione 4.3.1 verrà inoltre illustrato un metodo per salvare tali grafici insieme alle informazioni sull'architettura della rete all'interno di un database SQL per future consultazioni.

### Script per il flusso di esecuzione

Per agevolare l'utilizzo del sistema e per aumentare ulteriormente il grado di automazione e dinamicità del flusso di esecuzione, i tre sottoprogrammi Python sopra descritti sono a loro volta richiamati ed eseguiti da un altro sottoprogramma, ugualmente scritto in linguaggio Python, che prende il nome di *ea-sim.py* e il cui flusso di esecuzione è mostrato in Figura 4.10.

Tale sottoprogramma rappresenta logicamente l'intera piattaforma di simulazione EA-SIM, il cui unico dato di input consiste nell'intervallo temporale all'interno del quale simulare la rete descritta dai file di configurazione *gantt* e *network-description*. Ricevuto questo dato e iniziata la sua esecuzione, lo script automaticamente richiamerà i sottoprogrammi responsabili di creare i sorgenti dei moduli SystemC e il file *top*, eseguirà la simulazione tramite il compilatore GCC e infine creerà il file *dump* estraendone i risultati in forma grafica salvandoli all'interno delle cartelle di sistema.

Grazie all'utilizzo del linguaggio di programmazione Python unito all'uso dell'ambiente shell Unix e all'intuitiva sintassi JSON, che permette di modificare facilmente il contenuto dei file di configurazione, il sistema si presenta più dinamico e lineare nel flusso di esecuzione ed in grado di simulare l'architettura di rete per l'intervallo di tempo desiderato tramite l'esecuzione di un singolo programma.

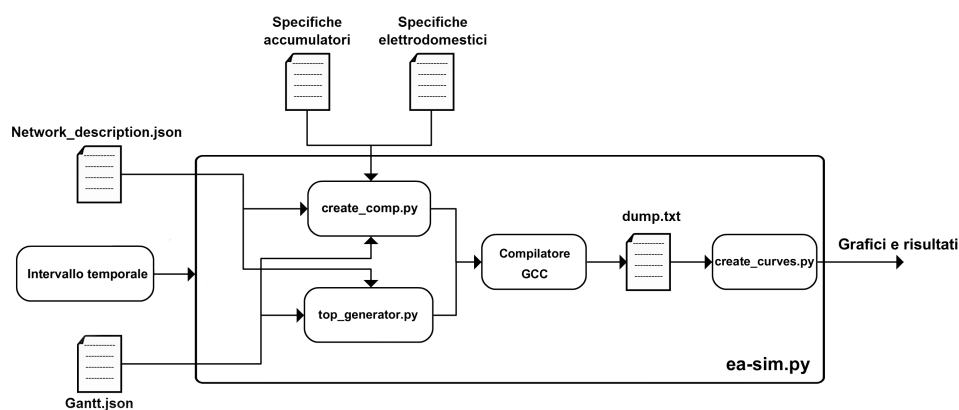


Figura 4.10: Schema logico dello script Python *ea-sim.py*

### 4.3.1 Integrazione del sistema con i meccanismi di Domanda e Risposta

La piattaforma di simulazione EA-SIM, descritta nella Sezione 4.2, permette di modellare una rete di dispositivi e di simularne l'interazione e il comportamento energetico per un determinato intervallo di tempo. Modificando inoltre il contenuto dei due file di configurazione è possibile creare diverse architetture di rete o *scenari* e valutarne l'efficienza energetica, scenari che possono differire tra loro non solo per i dispositivi presenti, ma anche per i singoli tempi di attivazione degli elettrodomestici nella stessa rete.

Il sistema può dunque considerarsi come un utile strumento di simulazione, utilizzabile anche da programmi esterni il cui unico onere sarebbe quello di modificare o creare i file di configurazione e di eseguire un singolo script per ottenere dei validi risultati.

Nel contesto dei meccanismi della domanda attiva e in particolare delle tecniche di Domanda e Risposta (Capitolo 2), il sistema può fungere da valido supporto all'utente guidandolo nei programmi di riduzione proposti dall'Aggregatore. Ricevendo una proposta di riduzione energetica infatti, è possibile simulare il comportamento energetico della rete per il periodo di tempo nel quale avrà luogo la riduzione, verificando se i consumi totali si mantengono al di sotto del valore di soglia proposto dall'Aggregatore.

Per effettuare tale operazione di verifica si è scelto di introdurre il valore di soglia dei consumi come ulteriore input allo script generale di sistema. In questo modo il sistema stesso può verificare, ad esempio attraverso il componente di controllo Energy Box, se i consumi della rete si mantengono effettivamente inferiori al valore di soglia ed eventualmente inviare un messaggio di controllo per notificare l'utente del risultato.

Inoltre poichè le richieste di partecipazione ai programmi di riduzione possono essere notificate all'utente dall'Aggregatore in un tempo variabile, dalla mezz'ora a ventiquattro ore prima [15], dipendentemente dallo stato della rete e dal prezzo dell'energia sul mercato, emerge la necessità di utilizzare dei file di configurazione per la piattaforma di simulazione EA-SIM che rispecchino l'utilizzo effettivo che l'utente farà della propria rete domestica per quel determinato periodo. Questo per evitare la simulazione di *scenari* d'uso della rete che risultino improbabili per un dato utente e che quindi non siano attendibili al fine di

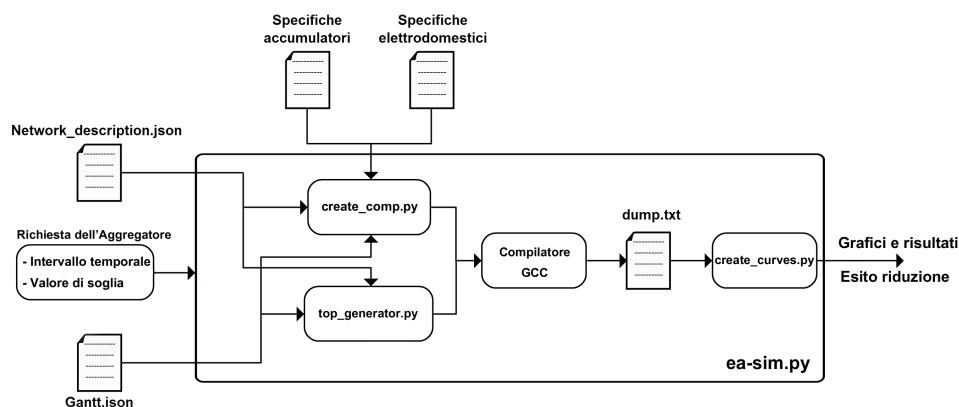


Figura 4.11: Schema logico dello script Python `ea-sim.py` considerando l'input dell'Aggregatore

valutare i consumi totali della rete e il rispetto del valore di soglia richiesto.

Per ottenere dunque una rete che risulti in linea con il suo utilizzo futuro, si è sviluppato un algoritmo di apprendimento e previsione del comportamento energetico dell'utente che, partendo dal profilo dell'utente stesso e dalla sua *storia passata* sia in grado di prevedere come quest'ultimo utilizzerà la propria rete nei giorni successivi. Il risultato dell'esecuzione di tale algoritmo è la creazione dei due file di configurazione (`gantt.json` e `network-description.json`) che permetteranno alla piattaforma EA-SIM di simulare il comportamento energetico di una rete che risulta più attendibile e in linea con un suo possibile utilizzo. L'algoritmo, descritto in dettaglio nella sezione successiva, risulta dunque esterno alla piattaforma di simulazione proposta, l'intento è infatti quello di utilizzare EA-SIM come semplice strumento di simulazione di una rete predefinita, lasciando la logica che regola la creazione di tale rete esterna alla piattaforma creata.



## 4.4 Algoritmo di apprendimento per la previsione del comportamento energetico dell'utente

In questa sezione si discute nel dettaglio la definizione e l'implementazione di un algoritmo di apprendimento e previsione (*forecasting*) dell'utilizzo della rete da parte dell'utente che consenta a quest'ultimo, anche attraverso la piattaforma di simulazione EA-SIM, di sottoscrivere in maniera proficua alle richieste di riduzione energetica pervenute da un servizio aggregato nel contesto dei meccanismi di Domanda e Risposta. Una richiesta di riduzione energetica da parte dell'Aggregatore del modello Domanda e Riposta, consiste generalmente in un valore soglia (generalmente espressa in kW) e da un intervallo temporale relativo ad un giorno della settimana [3] entro il quale è richiesto che l'utente, se accetta di prenderne parte, mantenga i propri consumi inferiori al valore di soglia indicato.

Ricevuta tale richiesta di riduzione energetica l'obiettivo dell'algoritmo proposto è quello di *predire* quali elettrodomestici saranno attivi nella rete per il giorno della settimana richiesto e in quale fascia oraria, basandosi sulla storia passata di utilizzo della rete e sul profilo dell'utente.

Successivamente, utilizzando la piattaforma EA-SIM, è possibile simulare lo *scenario* previsto dall'algoritmo e verificare se i consumi si mantengano o meno inferiori al valore di soglia richiesto.

In questo modo possono venire presentati all'utente uno o più scenari d'uso della rete, predetti basandosi sulle sue abitudini quotidiane, che suggeriscono quali elettrodomestici egli può utilizzare in quella fascia oraria e quali è preferibile che vengano attivati precedentemente o successivamente all'orario richiesto. Grazie a tali scenari l'utente può sottoscrivere in maniera consapevole al programma di riduzione energetica proposto e, seguendo le indicazioni d'uso fornite dal sistema, conseguire gli obiettivi proposti beneficiando degli incentivi economici che ne conseguono.

Per la creazione di tali scenari, l'algoritmo, dato un giorno della settimana, deve essere quindi in grado di prevedere non solo quali elettrodomestici sono generalmente utilizzati dall'utente in quel giorno, ma anche in che fascia oraria di quel giorno specifico l'utente è solito attivarli.

Nel fare questo, oltre a registrare giorni e orari di attivazioni dei singoli elettrodomestici per un dato utente, è fondamentale che l'algoritmo in questione dia un peso maggiore alla *storia recente* dell'utente, ad esempio le ultime due settimane, mentre vada via via perdendo considerazione la sua storia meno recente, a meno che ovviamente essa non continui ad essere riconfermata dai dati raccolti (ad esempio quando l'utente considerato è fortemente metodico e le sue abitudini si ripetono di settimana in settimana).

Ciò è dovuto al fatto che in una *serie storica* che descrive l'andamento dell'utilizzo di un elettrodomestico risulta più incisivo l'uso che l'utente ne ha fatto nelle ultime settimane rispetto, ad esempio, all'utilizzo relativo ad una mensilità passata, poichè in tale frangente possono essere intervenuti diversi fattori, come il tempo atmosferico o la presenza nell'ambiente domestico di più o meno individui, che possono causare brusche variazioni di tendenza dei dati. Per questo motivo si è scelto di utilizzare un tipo di calcolo conosciuto in statistica e nelle analisi tecnica dei mercati finanziari e delle serie storiche come *Media Mobile Esponenziale* o *EMA* (dall'inglese Exponential Moving Average). Mentre nella media mobile semplice viene attribuito un peso univoco ai dati ed è calcolata sommando fra loro dati relativi ad un intervallo temporale e dividendoli per il loro numero totale, in questo tipo di calcolo viene attribuito un peso differente ai valori considerati, maggiore ai dati più attuali e minore a quelli meno recenti nella serie storica.

È dunque necessario definire un parametro, chiamato *fattore di decadimento*, generalmente compreso tra i valori 0 e 1, il quale consente di attribuire, esponenzialmente e non più linearmente, un peso maggiore ai valori più recenti, senza però annullare del tutto il peso dei valori meno recenti. Dunque per ogni nuovo dato aggiunto alla serie storica, l'algoritmo andrà a scalare tramite il fattore di decadimento i valori salvati (ovvero la storia passata), aggiornando successivamente con un peso maggiore il valore relativo al nuovo dato (ovvero la storia recente). Nonostante dia un'importanza minore ai dati passati, questa tecnica li include ugualmente nel suo calcolo prendendo in esame quindi molti più valori di quelli definiti dal periodo della media mobile semplice, presentando un più alto grado di precisione e maggiore stabilità a fronte di forti inversioni di tendenza nella serie storica di dati.

Nel caso specifico, con serie storica si intende l'insieme dei tempi di attivazione degli elettrodomestici per ogni giorno della settimana. L'al-

goritmo, man mano che tale serie si va definendo, salverà in variabili distinte per ogni elettrodomestico definito, per ogni giorno e per ogni intervallo orario (*slot*) i dati rilevati dalla serie, scalandone il valore come precedentemente descritto. In questo modo l'algoritmo è in grado di costruire due insiemi di valori sulla base dei quali effettuare, una volta ricevuta una richiesta di riduzione, le predizioni di utilizzo: uno relativo ai giorni della settimana e un altro relativo ai tempi di attivazione degli elettrodomestici.

Uno passo fondamentale nella costituzione dell'algoritmo proposto, descritto nei dettagli all'interno della sottosezione 4.4.2, è stata proprio la creazione della serie storica da utilizzare come base per l'ottenimento delle predizioni future.

Per creare una serie che sia quanto più aderente a dei dati reali, cioè a un insieme di misurazioni di consumi all'interno di una abitazione residenziale, è necessario creare un modello dell'utenza considerata che ne emuli l'utilizzo della rete domestica principalmente in termini di frequenza settimanale d'uso degli elettrodomestici e tempi di attivazione di questi nell'arco di una giornata feriale o festiva.

Nelle prossime sottosezioni si andranno a descrivere i processi per la creazione di tali modelli e i dettagli tecnici e implementativi dell'algoritmo di predizione.

#### 4.4.1 I modelli delle utenze domestiche

Il modello dell'utenza è stato ideato per simulare l'utilizzo giornaliero degli elettrodomestici presenti nella rete domestica in modo da creare una serie storica di dati sulla base della quale è possibile effettuare delle previsioni di utilizzo nel breve periodo.

Essendo la frequenza di utilizzo degli elettrodomestici in ambito residenziale strettamente influenzata dal numero di persone presenti nell'unità abitativa, un primo passo è stato quello di selezionare cinque profili di interesse per ognuno dei quali è stato creato un modello distinto. I quattro profili in questione sono: Persona singola (Uomo/Donna), Coppia, Famiglia con un figlio, Famiglia con più di un figlio, Appartamento condiviso da più persone (studenti, lavoratori, etc ...).

Tali profili sono stati selezionati poichè rappresentativi di categorie di utenze distinte tra loro non solo per la frequenza di utilizzo degli elettrodomestici ma anche per numero e tipologia di dispositivi presenti nella rete domestica.

Ad esempio un nucleo familiare con più di un figlio presenterà una frequenza di utilizzo della propria lavastoviglie maggiore di quella di un uomo single, è inoltre possibile che quest'ultimo non presenti tale elettrodomestico nella propria abitazione.

Per raccogliere il maggior numero possibile di dati sulle abitudini domestiche di tali profili, è stato creato un questionario online, totalmente anonimo, divulgato attraverso Internet e che ha coinvolto in totale più di 110 utenti.

Nel questionario si chiedeva all'utente di selezionare il proprio profilo familiare, scelto tra i cinque profili sopra indicati, e di indicare, per alcune classi di elettrodomestici, se ne fossero in possesso e in caso positivo di indicare la loro frequenza di utilizzo nell'arco della settimana e il periodo della settimana nel quale l'elettrodomestico in questione viene generalmente utilizzato (da lunedì al venerdì o nel fine settimana). Le tipologie di elettrodomestici presenti all'interno del questionario, rappresentano i dispositivi che influiscono maggiormente i consumi di una utenza per via dell'onerosità delle loro richieste energetiche. Nell'ottica di sottostare ad una richiesta di riduzione energetica per un intervallo definito di tempo, le nostre ricerche si sono focalizzate maggiormente su una sottocategoria di tali elettrodomestici, ovverosia quei dispositivi che si presentano un ciclo di funzionamento caratterizzato da elevate richieste di energia ma il cui tempo di attivazione può essere modificato, dunque ritardato o anticipato, senza influire in maniera significativa sul comfort dell'utente. A tale categoria appartengono elettrodomestici quali la lavatrice, la lavastoviglie e l'asciugatrice. Infatti altri elettrodomestici di uso comune, pur presentando un ciclo di funzionamento oneroso dal punto di vista energetico, sono generalmente attivati dall'utente poichè il loro utilizzo è specificatamente richiesto in quel preciso momento. Ritardare ad esempio l'accensione di un forno a microonde per il riscaldamento delle vivande o di un impianto di condizionamento dell'aria, può influire notevolmente sulle abitudini e il comfort dell'utente, mentre modificare il tempo di accensione ad esempio della lavatrice, purchè non eccessivamente dilazionato, presenta un impatto minore in questo senso.

Nell'Appendice A della tesi sono riportati in forma grafica i risultati del sondaggio che mostrano per ogni profilo le frequenze di utilizzo settimanale degli elettrodomestici appartenenti alla categoria precedentemente descritta. I risultati mostrano come la maggior parte degli utenti coin-

volti possieda una lavatrice e la utilizzi in media dalle due alle tre volte a settimana soprattutto infrasettimanalmente. I dati mostrano inoltre come la lavastoviglie e la asciugabiancheria, e in particolare quest'ultima, non siano molto utilizzati o addirittura assenti all'interno dell'unità abitativa.

Ragionando però in un contesto europeo sappiamo che l'asciugabiancheria presenta un tasso medio di penetrazione nel mercato, ovverosia le percentuali di vendita, pari a circa il 34,4% mostrando grandi variazioni fra i diversi paesi, specialmente dell'Europa occidentale, passando dal 2% nel mercato italiano al 52% nel mercato inglese [16]. Sempre in ambito europeo, la percentuale di penetrazione nel mercato delle lavastoviglie risulta più elevato, con un valore medio del 42% mentre quello inerente alle percentuali di vendite delle lavatrici si attesta intorno al 95% [16]. I tassi di penetrazione di mercato sopraindicati suggeriscono che, non limitando la nostra visione al solo mercato dell'energia italiano, elettrodomestici come la lavastoviglie e in particolare l'asciugabiancheria devono essere tenuti in considerazione.

Ottenute delle referenze significative inerenti le percentuali di utilizzo settimanale degli elettrodomestici, l'ultimo passo per ottenere dei modelli delle singole utenze è stato quello di quantificare, attraverso un modello probabilistico, le fasce orarie nelle quali le utenze utilizzano i propri elettrodomestici con maggiore probabilità nell'arco di una singola giornata.

Nel rapporto *"Synergy Potential of Smart Appliances"* stilato dal Professor Rainer Stamminger dell'Università di Bonn in Germania si espone uno studio sui benefici, espressi in termini di risparmio economico ed energetico, derivanti dalla partecipazione dell'utente ai meccanismi della domanda attiva. Attraverso dei casi di studio si mostra infatti come semplici cambiamenti nelle abitudini quotidiane degli utenti nell'utilizzare i propri elettrodomestici, come ritardarne l'attivazione o utilizzare dei sistemi di accumulo distribuiti per assorbirne il carico elettrico, possano effettivamente giovare sia al gestore della distribuzione elettrica sia all'utente stesso [16].

Nello studio vengono inoltre presentate per diverse tipologie di elettrodomestici diverse informazioni di interesse quali il loro tasso di penetrazione nel mercato europeo, il loro consumo energetico durante un ciclo di attivazione e una funzione densità di probabilità di attivazione del dispositivo nell'arco di una giornata.

Si riportano qui le funzioni di probabilità relative all'utilizzo di una lavatrice (Figura 4.12), di una lavastoviglie (Figura 4.13) e di un'asciugabiancheria (Figura 4.14), dove sull'asse delle ascisse sono indicate le ore relative ad una giornata mentre sull'asse delle ordinate sono riportati dei valori di probabilità di attivazione nell'intervallo orario specifico. L'andamento mostra chiaramente come l'utilizzo di tali elettrodomestici avvenga specialmente durante le ore serali e occasionalmente durante le ore diurne. Tali curve sono state prodotte a partire dai dati raccolti nello studio [16] sulle fasce orarie di utilizzo degli elettrodomestici di oltre 2500 utenze in 10 diversi paesi europei. Visto l'alto numero di utenze sottoposte al sondaggio, si è dunque scelto di avvalerci di tali funzioni in maniera univoca per ogni profilo di utenza di interesse, giacchè esse riassumono efficacemente le abitudini quotidiane di un vasto bacino di utenti.

Nella prossima sezione sarà dunque illustrato in dettaglio come, ispirandosi da tali dati, si abbia creato un modello di utenza domestica attraverso il quale è possibile produrre un'insieme di dati, o serie storica, che rappresenti l'utilizzo della rete elettrica domestica da parte dell'utente in termini di tempi di attivazione giornalieri degli elettrodomestici e come, a partire da tale insieme di dati, l'algoritmo proposto si prefigga l'obiettivo di apprendere e prevedere l'utilizzo futuro che l'utente farà della propria rete nell'arco di tempo d'interesse.

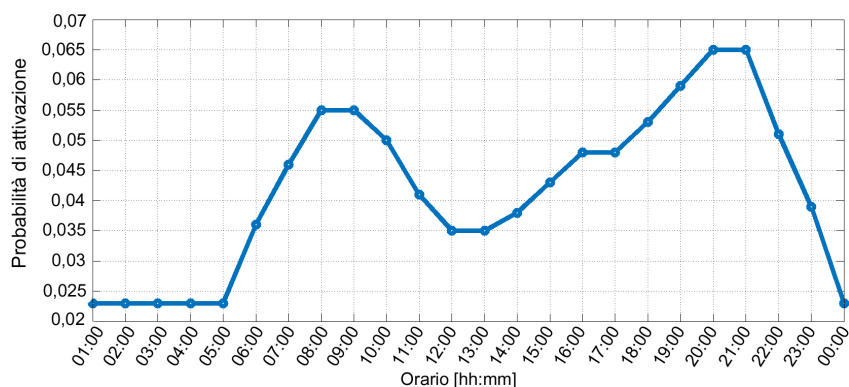


Figura 4.12: Funzione densità di probabilità di attivazione nell'arco di una giornata di una lavatrice

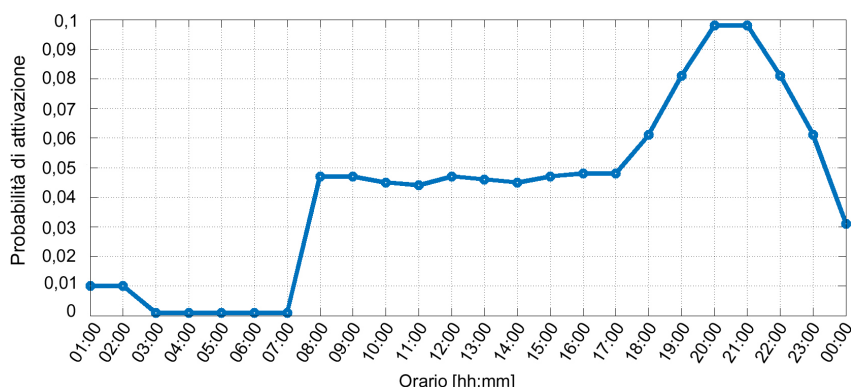


Figura 4.13: Funzione densità di probabilità di attivazione nell'arco di una giornata di una lavastoviglie

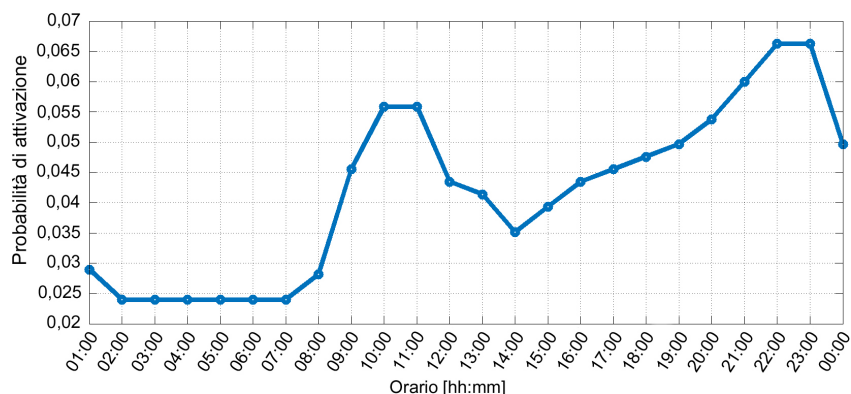


Figura 4.14: Funzione densità di probabilità di attivazione nell'arco di una giornata di una asciugabiancheria

#### 4.4.2 Struttura dell'algoritmo di apprendimento e di predizione dell'utilizzo della rete domestica

In questa sezione si illustra nel dettaglio l'implementazione dell'algoritmo di apprendimento e di predizione sviluppato durante l'elaborato di tesi.

L'algoritmo proposto, attraverso la creazione di una serie storica di dati che modellano l'utilizzo della rete, è in grado sia di apprendere le abitudini dell'utente sia, una volta pervenuta una richiesta di riduzione energetica per un intervallo di tempo specifico, di prevedere quale sarà l'utilizzo effettivo della rete per quell'arco temporale, proponendo all'utente diversi casi d'uso attraverso i quali egli potrà partecipare con successo al programma di riduzione richiesto dal servizio aggregato.

In particolare l'algoritmo proposto è implementato attraverso un programma scritto in Python e il cui output consiste in un file di tipo JSON che codifica un diagramma di Gantt che rappresenta gli elettrodomestici attivi e i tempi di utilizzo di questi, predetti dall'algoritmo per l'arco della giornata di interesse.

### Creazione della serie storica dei dati di test

Attraverso i dati raccolti sulle frequenze settimanali di utilizzo degli elettrodomestici e le loro funzioni di probabilità di attivazione nell'arco di una singola giornata, in questa sezione si mostra come sia possibile creare una serie storica di dati che modelli il *comportamento energetico* di un utente giorno per giorno. La creazione di tale *cronologia di utilizzo della rete* da parte dell'algoritmo è resa necessaria anche dalla mancata disponibilità di misurazioni reali per le diverse tipologie di utenze, che mostrino giornalmente gli orari di attivazione dei singoli elettrodomestici. Nell'ottica di integrare il sistema proposto all'interno di un dispositivo di controllo energetico residenziale, attraverso l'uso di sensori e unità di controllo, sarà possibile monitorare e registrare l'uso effettivo della rete da parte dell'utenza creando la cronologia sulla base della quale effettuare le predizioni.

Per la creazione della serie storica dei dati, l'algoritmo, ovvero il programma che lo implementa, riceve come dati di ingresso:

- I dati ricavati dal sondaggio per ogni elettrodomestico, trasposti in termini di *frequenza di utilizzo infrasettimanale* e *frequenza di utilizzo nel fine settimana*.
- Per ogni elettrodomestico considerato, un file di tipo CSV contenente i valori della sua funzione densità di probabilità associata ad un singolo intervallo temporale della giornata.

Questi dati sono fondamentali per modellare, per ogni elettrodomestico considerato, in quali giorni della settimana l'utente andrà a utilizzarlo e in quale fascia oraria sarà attivato, inserendo successivamente tale dato nella serie storica.

Dunque per ogni settimana che va a costituire la nostra serie di dati e per ogni elettrodomestico, è necessario *estrarre* uno o più giorni della settimana, basandosi sulle frequenze di utilizzo presenti nei dati iniziali, e utilizzare, per ogni giorno risultante, le funzioni di probabilità corrispondenti per selezionare la fascia oraria di accensione.



Per scegliere i giorni della settimana nel quale un dato elettrodomestico verrà utilizzato dall'utente, l'algoritmo si avvale di due vettori:

- *week\_day* : questo vettore di cinque elementi codifica la maggiore o minore probabilità di selezionare un giorno infrasettimanale, dove il Lunedì corrisponde all'indice 0 del vettore fino all'indice 4 corrispondente al Venerdì. Poichè dal questionario proposto alle utenze non si possono evincere le preferenze dei vari profili di utenza sui giorni esatti nel quale uno specifico elettrodomestico è utilizzato, ogni giorno infrasettimanale ha uguale probabilità di essere scelto, probabilità che corrisponde dunque al 20%.
- *week\_end\_day* : questo vettore di due elementi codifica la maggiore o minore probabilità di selezionare il giorno di Sabato (indice 0 del vettore) o la Domenica (indice 1 del vettore). Il valore di tale probabilità dipenderà dalla risposta indicata nel questionario dall'utente sul giorno del fine settimana nel quale utilizza maggiormente un dato elettrodomestico.

In base alle frequenze indicate dall'utente all'interno del questionario proposto, l'algoritmo estrarrà da un minimo di zero ad un massimo di cinque giorni infrasettimanali e da zero a un massimo di 2 giorni corrispondenti al fine settimana. Per fare in modo che tale scelte tengano conto delle probabilità assegnate ai giorni settimanali, in particolare per i giorni di Sabato e Domenica, si è implementata una funzione all'interno dell'algoritmo, il cui pseudocodice è illustrato in riquadro, che permette appunto di estrarre da un qualsiasi vettore di ingresso un indice casuale, corrispondente ad un giorno della settimana, la cui scelta è guidata dai valori di probabilità presenti nel vettore stesso.

Per ogni giorno estratto in questo modo, l'algoritmo dovrà infine calcolare una fascia oraria all'interno della quale l'elettrodomestico sarà attivato. Per ogni elettrodomestico, si è dunque creato un vettore che rappresenti la sua funzione densità di probabilità, dove l'indice del vettore rappresenta un'intervallo temporale tra due ore del giorno (l'indice zero rappresenterà l'intervallo che va da mezzanotte all'una, l'indice uno rappresenterà l'intervallo che va dall'una alle due di notte e così via) e il cui valore esprime la maggiore o minore probabilità che l'intervallo corrispondente venga selezionato.

Dunque come fase ultima nella creazione della serie storica che modelli l'utilizzo degli elettrodomestici da parte di una utenza, per ogni giorno precedentemente scelto verrà selezionato dal vettore sopracitato il valore di un intervallo temporale, selezione che viene effettuata attraverso la stessa funzione utilizzata per estrarre i giorni settimanali.

---

**Algorithm 1** Funzione di estrazione pesata

---

```
1: function weighted_choice(weights)
2:    $rnd \leftarrow random([0, 1]) * sum(weights)$ 
3:   for  $i \leftarrow 1, length(weights)$  do
4:      $rnd \leftarrow rnd - w[i]$ 
5:     if  $rnd < 0$  then
6:       return  $i$ 
7:     end if
8:   end for
9: end function
```

---

In questo modo è possibile creare una sequenza cronologica che mostri giorno per giorno quali elettrodomestici sono stati utilizzati dall'utente e il loro orario di attivazione. Tale sequenza viene salvata all'interno di un file di sistema, o file di *log*, e verrà utilizzata dall'algoritmo per effettuare una fase iniziale di apprendimento (*training*) delle abitudini dell'utente sulla base della quale, come vedremo nella prossima sezione, il sistema sarà in grado di effettuare delle previsioni di utilizzo della rete elettrica domestica.

### Analisi della serie storica dell'utilizzo della rete

Ottenuta la serie di dati corrispondente alla cronologia dell'utilizzo della rete, questa sarà utilizzata dall'algoritmo come *insieme di addestramento* (*training set*) che gli consenta di apprendere le abitudini dell'utente elaborando due *predittori*: uno per predire i giorni delle settimane nel quale l'elettrodomestico verrà attivato e un altro per lo slot orario nel quale l'elettrodomestico potrà essere attivato in un giorno specifico.

Il principio di base è di analizzare la cronologia dei tempi di attivazione degli elettrodomestici (Tabella 4.2) e assegnare un *peso*, nella struttura dati corrispondente, al giorno e all'ora di attivazione di un determinato elettrodomestico.

Nell'assegnare tali valori, come accennato nell'introduzione a questa sezione, ci si avvale di un metodo di *Media Mobile Esponenziale* attraverso il quale è possibile tener maggiormente in considerazione la cronologia più recente, mentre la storia passata dell'utente perde sempre più significato per il sistema.

Giorno	Elettrodomestico	Orario
Lunedì	Lavatrice	08:30
	Asciugatrice	13:00
Martedì	Lavastoviglie	19:30
Venerdì	Lavatrice	15:30
Domenica	Lavastoviglie	21:45

Tabella 4.2: Esempio di cronologia di attivazione dei dispositivi

L'algoritmo si avvale principalmente di due strutture dati:

- $hours\_score[i, j]$ : per ogni elettrodomestico presente ( $k$ ) questa matrice contiene i punteggi assegnati ad uno specifico slot orario di attivazione ( $j$ ) per ogni giorno della settimana ( $i$ ).

I punteggi verranno aggiornati ogni qual volta l'elettrodomestico risulterà attivato nella serie storica e che verranno utilizzati per addestrare il sistema esclusivamente sugli slot orari di attivazione.

$$hours\_score[i, j] = \begin{pmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \cdots & a_{0,23} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \cdots & a_{1,23} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{6,0} & a_{6,1} & \cdots & a_{6,23} \end{pmatrix} \quad \text{Per ogni dispositivo } k$$

- $days\_score[i, j]$ : questa matrice contiene i punteggi assegnati ad uno specifico elettrodomestico ( $i$ ) quando viene attivato in un determinato giorno ( $j$ ). Tramite questa matrice e l'analisi dei dati, il sistema verrà addestrato sui singoli giorni in cui ogni dispositivo viene attivato dall'utente durante la settimana.

$$days\_score[i, j] = \begin{pmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & \cdots & a_{0,6} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & \cdots & a_{1,6} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i,0} & a_{i,1} & \cdots & a_{i,6} \end{pmatrix}$$

Considerando, ad esempio, la matrice che tiene conto dei punteggi da assegnare ai giorni della settimana di ogni singolo elettrodomestico, ogni riga della matrice rappresenterà l'evoluzione dei pesi assegnati ai distinti giorni.

Tale evoluzione può essere descritta attraverso la seguente formula:

$$S_t = \alpha * y_t + \delta * S_{t-1}$$

dove:

- $\alpha$  : rappresenta il grado di incremento del peso di un determinato dato della serie.
- $\delta = (1 - \alpha)$ : rappresenta il grado di decremento dei pesi passati della serie considerata.
- $S_t$ : tale vettore rappresenta l'insieme dei pesi dei dati considerati al tempo  $t$ . Ad esempio considerando la matrice contenente le evoluzioni dei pesi assegnati ai giorni della settimana, ogni riga della matrice è rappresentata tramite un vettore di questo tipo. Il termine espresso come  $S_{t-1}$  rappresenta il valore del vettore al passo precedente, in particolare esso rappresenta l'insieme dei pesi passati relativi ad un giorno o un intervallo temporale specifico.
- $y_t$ : tale elemento corrisponde al valore del vettore  $S_t$  il cui peso deve essere incrementato poichè corrispondente ad un dato attuale riscontato nella serie di dati.

Il valore del parametro  $\alpha$ , compreso tra zero e uno, determina quanto sia influente la storia più recente dell'utente nell'utilizzo della rete e al contempo, attraverso il *fattore di decadimento*  $\delta$ , quantifica quanto rapidamente la storia passata dell'utenza perda di significato per l'algoritmo.

L'algoritmo dunque per ogni giorno della settimana analizza la cronologia esistente e per ogni elettrodomestico:

- Decrementa per il fattore di decadimento  $\delta$  i valori dei pesi relativi ai giorni di funzionamento dell'elettrodomestico e successivamente incrementa del fattore  $\alpha$  il peso del giorno in cui si è riscontrata un'attivazione per il dispositivo
  
- Decrementa per il fattore di decadimento  $\delta$  i valori dei pesi relativi agli intervalli orari di funzionamento dell'elettrodomestico per un determinato giorno e successivamente incrementa del fattore  $\alpha$  il peso dell'intervallo temporale in cui si è riscontrata un'attivazione per il dispositivo.

In particolare, per quanto riguarda gli intervalli orari, supponendo che un utente attivi un elettrodomestico all'interno dell'intervallo orario  $\varphi$ , oltre ad incrementare il peso relativo a quell'intervallo si andranno a modificare i pesi relativi all'intervallo immediatamente successivo ( $\varphi + 1$ ) e precedente ( $\varphi - 1$ ) a quello considerato, incrementandoli del valore  $\alpha$  moltiplicato (*scalato*) per il cosiddetto *fattore di bordo*  $\beta$ . Questo per considerare i casi in cui i tempi di attivazione si trovino all'interno di un determinato intervallo ma molto vicino al successivo o al precedente, i quali devono essere presi, seppur in misura minima, in considerazione dal sistema.

Alla fine della fase di addestramento l'algoritmo avrà dunque creato per ogni elettrodomestico le strutture dati contenenti i pesi relativi ai giorni e gli orari di attivazione che rappresentano la maggiore o minor probabilità che essi vengano scelti in fase di previsione.

Completata questa fase, l'algoritmo continua a simulare l'utilizzo della rete da parte dell'utente aggiungendo sempre nuovi dati alla cronologia e addestrando le strutture dati in base ad essi.

---

**Algorithm 2** Pseudocodice algoritmo di apprendimento

---

```
1: procedure apprendimento
2:   for  $i \leftarrow 0, n^o - settimane\_addestramento$  do
3:     for  $j \leftarrow 0, numero\_dispositivi$  do
4:       Estrai giorni attivazione del  $j$ -esimo dispositivo
5:       per la  $i$ -esima settimana
6:       Estrai intervallo orario  $h$  per ognuno dei giorni estratti
7:       for  $k \leftarrow 0, 6$  do
8:         if  $k$ -esimo giorno estratto per il  $j$ -esimo dispositivo then
9:           chiama aggiorna_giorni( $j, k$ )
10:          chiama aggiorna_ore( $j, k, h$ )
11:         end if
12:       end for
13:     end for
14:   end for
15: end procedure
```

---

---

**Algorithm 3** Procedura aggiornamento dei punteggi relativi ai giorni di attivazione

---

```
1: procedure aggiorna_giorni(dispositivo ( $i$ ), giorno ( $j$ ))
2:   for  $d \leftarrow 0, 6$  do
3:      $day\_score[i][d]* = \delta$  ▷  $\delta$  fattore decadimento
4:   end for
5:    $day\_score[i][j]+ = \alpha$ 
6: end procedure
```

---

---

**Algorithm 4** Procedura aggiornamento dei punteggi relativi agli orari di attivazione

---

```
1: procedure aggiorna_ore(dispositivo ( $i$ ), giorno ( $j$ ), intervallo ( $h$ ))
2:   for  $k \leftarrow 0, 23$  do
3:      $hours\_score[i][j][k]* = \delta$ 
4:   end for
5:    $previousIndex = (h - 1)\%24$  ▷ indice intervallo precedente
6:    $nextIndex = (h + 1)\%24$  ▷ indice intervallo successivo
7:    $hours\_score[i][j][h]+ = \alpha$ 
8:    $hours\_score[i][j][previousIndex]+ = \alpha * \beta$  ▷  $\beta$  fattore di bordo
9:    $hours\_score[i][j][nextIndex]+ = \alpha * \beta$ 
10: end procedure
```

---

### Richiesta di riduzione energetica e previsione di utilizzo della rete

La fase di apprendimento da parte dell'algoritmo dell'utilizzo della rete si protrae fintantoché non perviene una richiesta di partecipazione ad un programma di riduzione energetica, ovvero, fino a quando non è necessaria una predizione dei consumi dell'utenza per un giorno specifico da parte del sistema. Secondo i meccanismi di Domanda e Risposta, l'entità e la tipologia della richiesta di riduzione dipende dal tipo di *programma* al quale l'utente ha scelto di partecipare, ovvero dal tipo di contratto di interazione l'utenza ha stipulato con il gestore della distribuzione dell'energia [5, 6].

Tra le varie tipologie di contratto, ci si è maggiormente focalizzati sui cosiddetti programmi di tipo *Incentive-Based*, dove le utenze sono remunerate economicamente qualora riescano a mantenere i propri consumi limitati al di sotto di una soglia per un determinato periodo di tempo.

La frequenza e l'entità delle richieste da parte del servizio aggregato dipendono principalmente dal livello di congestione di rete locale o regionale, dal prezzo dell'energia nel mercato e da fattori di tipo strutturale e di sicurezza di rete [14].

Da tale quadro emerge dunque che sia il livello di soglia dei consumi richiesto sia la remunerazione economica offerta all'utente sono estremamente variabili essendo quantificati sulla base di caratteristiche strutturali di rete ma anche su tendenze economiche reali e in ultima analisi sulla politica del gestore della distribuzione nazionale dell'energia.

Richiesta di riduzione energetica	
ID utente	Codice identificativo dell'utenza
ID messaggio	Codice identificativo della richiesta
Tempo di attivazione	hh:mm - giorno/mese/anno
Durata	Durata della riduzione (minuti)
Livello di soglia	Potenza (kW)
Remunerazione	Incentivo economico (€/kWh)

Tabella 4.3: Esempio di richiesta di riduzione energetica

Per formulare un modello di richiesta da parte del servizio aggregato ci si è dunque ispirati ai casi di studio presentati dal consorzio Energy@Home [3], dove si mostra un modello di interazione tra il servizio aggregato e il dispositivo di gestione dell'energia presente nella rete dell'utenza, in questo caso l'*Home Gateway* proposto dal consorzio (Tabella 4.3).

Secondo tale modello, al sopraggiungere della richiesta il software di gestione energetica della rete avverte l'utente della possibilità di partecipare al programma di riduzione e, se l'utente accetta di aderirvi, implementa decisioni logistiche sull'utilizzo dei dispositivi di rete nel cercare di ottimizzare i consumi dell'utente per il periodo di tempo indicato.

Una volta che il periodo di riduzione inizia, spetta poi all'utente limitare i propri consumi seguendo le indicazioni del software di gestione. Come accennato anche nei precedenti capitoli della tesi, può infatti accadere che l'utente abbia necessità di utilizzare un determinato elettrodomestico all'interno di tale periodo, la cui attivazione potrebbe portare ad elevare i consumi oltre il valore di soglia e di fatto a perdere diritto alla remunerazione economica prevista e, in alcuni casi, andando incontro ad una penale.

L'algoritmo proposto vuole integrarsi all'interno del software di gestione energetica, operando nella fase che intercorre tra la ricezione della richiesta di riduzione e l'inizio del periodo indicato dall'Aggregatore, effettuando delle previsioni di utilizzo degli elettrodomestici tempore-controllabili e mostrando all'utente diversi scenari d'uso nei quali l'attivazione di tali elettrodomestici non comprometta la sua partecipazione al programma di riduzione.

Al sopraggiungere della richiesta, l'algoritmo procede dunque nel modo seguente:

1. Estrae, per ogni elettrodomestico, uno o più valori dalla struttura dati contenente i punteggi relativi ai giorni settimanali e verifica che almeno uno dei valori estratti corrisponda al giorno indicato nella richiesta.
2. Se il giorno estratto corrisponde a quello indicato nella richiesta di riduzione, allora seleziona, per ogni elettrodomestico, uno o più valori dalla struttura dati contenente i punteggi degli orari di attivazione dei dispositivi relativi al giorno estratto al punto 1.



Per effettuare tali selezioni di giorni e intervalli orari, l'algoritmo si avvale di due funzioni distinte delle quali si mostra lo pseudo codice.

---

**Algorithm 5** Estrazione del giorno settimanale

---

```
1: function predici_verifica_giorno(dispositivo (i), giorno_richiesto (j))
2:   max_value = max(day_score[i])
3:   threshold = max_value *  $\tau_d$ 
4:   for  $k \leftarrow 0, 6$  do
5:     if day_score[k]  $\geq$  threshold and  $k == j$  then
6:       Il dispositivo i è utilizzato nel giorno j
7:     end if
8:   end for
9: end function
```

---

---

**Algorithm 6** Estrazione dell'intervallo orario per il giorno predetto

---

```
1: function predici_ora(dispositivo (i), giorno_predetto (j))
2:   max_value = max(hour_score[i][j])
3:   threshold = max_value *  $\tau_h$ 
4:   for  $k \leftarrow 0, 23$  do
5:     if hour_score[i][j][k]  $\geq$  threshold then
6:       Il dispositivo i è utilizzato il giorno j nello slot orario k
7:     end if
8:   end for
9: end function
```

---

Come illustrato, le estrazioni sia dei giorni settimanali che degli intervalli temporali si basano su dei valori di soglia, *threshold*, ottenuti moltiplicando il massimo punteggio presente nelle strutture dati corrispondenti per dei fattori di scala,  $\tau_d, \tau_h \in (0, 1]$  riferiti rispettivamente ai giorni settimanali e agli intervalli orari.

L'utilizzo del massimo punteggio all'interno della definizione del valore di soglia permette di ottenere un fattore di sbarramento non assoluto, bensì coerente con i punteggi presenti nella struttura dati al momento della previsione. Inoltre i fattori  $\tau_d$  e  $\tau_h$  consentono di definire un livello di soglia più o meno selettivo al variare dei due parametri all'interno del loro intervallo di definizione.

Verranno dunque scelti i valori corrispondenti ai punteggi che risultino maggiori o uguali ai valori di soglia, con un controllo ulteriore per quanto riguarda i giorni settimanali, dove l'algoritmo verificherà se il

valore estratto in una determinata iterazione corrisponda effettivamente al giorno indicato nella richiesta pervenuta dall'Aggregatore.

I dispositivi e i loro intervalli di funzionamento previsti per il giorno richiesto sono infine memorizzati all'interno di un file di tipo JSON strutturato come un rappresentazione di un diagramma di Gantt (Figura 4.7(a)) e nel file di definizione della rete che verranno successivamente utilizzati dalla piattaforma di simulazione EA-SIM come files di configurazione per simulare il comportamento energetico della rete prevista dall'algoritmo.

A fronte di una richiesta di riduzione energetica, l'algoritmo è dunque in grado di predire due tipologie di informazioni: se un elettrodomestico sarà possibilmente attivato dall'utente in un determinato giorno e in quale intervallo temporale sarà attivo all'interno di quella giornata. Per lo stesso elettrodomestico possono essere predetti più giorni all'interno di una stessa settimana, anche se la frequenza di utilizzo che l'utente aveva inizialmente selezionato risulta inferiore. L'algoritmo infatti fornisce indicazioni, in base all'utilizzo passato della rete, su quelli che potrebbero essere i giorni della settimana nei quali l'utente utilizzerà un determinato elettrodomestico. Se l'utente, ad esempio, aveva indicato come frequenza di utilizzo per un certo tipo di elettrodomestico una volta a settimana, e lo utilizza sempre in giorni diversi è dunque probabile che l'algoritmo proporrà diversi giorni come possibili.

Allo stesso modo, l'algoritmo potrebbe predire più intervalli orari per lo stesso giorno che potrebbero differire da quelli indicati dall'utenza per ogni elettrodomestico; questo perchè gli utenti tendono a variare le proprie abitudini e non sempre sono regolari nell'utilizzo dei dispositivi.

In base alla storia passata dell'utente possono dunque presentarsi diversi casi:

- Un primo caso è quello in cui l'utente si è mostrato abbastanza regolare da permettere all'algoritmo di predire un singolo intervallo orario all'interno dello stesso giorno
- Un secondo caso è quello in cui l'irregolarità dell'utente porta l'algoritmo a predire due o più intervalli temporali disgiunti all'interno dello stesso giorno
- Un terzo caso è quello in cui la storia passata di utilizzo della rete porta l'algoritmo a predire due o più intervalli temporali che si so-

vrappengono. In questo caso l'algoritmo unificherà tali intervalli in un singolo arco di tempo.

L'algoritmo dunque quando dovrà creare il file di configurazione da inoltrare successivamente alla piattaforma di simulazione, per lo stesso elettrodomestico potrà riportare uno o più intervalli temporali.

#### 4.4.3 Presentazione dei casi d'uso all'utente

Nell'ottica di presentare degli scenari consistenti all'utente, tra i quali egli potrà scegliere quello che meglio si adatta ai suoi bisogni, la piattaforma di simulazione, a partire dal file di configurazione inoltrato dall'algoritmo, dovrà essere in grado di simulare il comportamento energetico della rete e di determinare all'interno di ogni intervallo temporale quando un certo dispositivo dovrà essere attivato.

Come accennato nella sezione precedente, la piattaforma EA-SIM è uno strumento di simulazione per una rete predefinita, mentre si è lasciata la logica che regola la creazione di tale rete esterna alla piattaforma proposta.

Si è dunque creato un programma intermedio che si frappone tra l'algoritmo di predizione e la fase di simulazione, in grado di fornire alla piattaforma EA-SIM diversi file di configurazione a partire dal singolo file prodotto dall'algoritmo (Figura 4.15).

A partire dai vari intervalli generici predetti dall'algoritmo, il sotto-

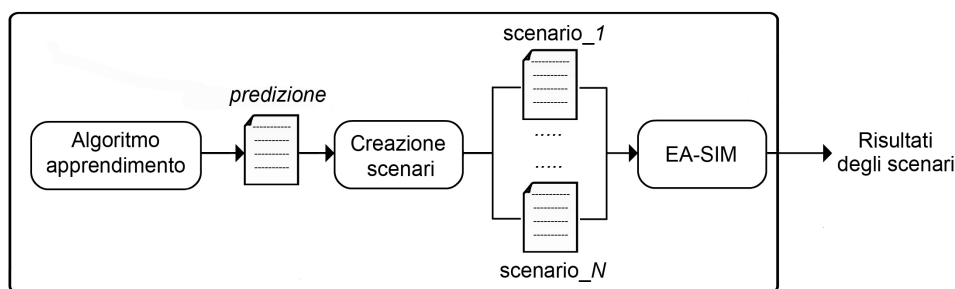


Figura 4.15: Flusso di esecuzione complessivo del sistema

programma è in grado di creare diversi scenari d'uso che possono essere inoltrati singolarmente alla piattaforma EA-SIM la quale ne simulerà il comportamento energetico e ne quantificherà i consumi per verificare se essi permangono al di sotto della soglia richiesta dal servizio aggregato.

Ciascuno degli scenari d'uso creati dal sottoprogramma è diverso dagli altri per i tempi di attivazione creati per i diversi dispositivi, in modo da poter valutare ogni possibile configurazione della rete.

Ad un primo passo il sottoprogramma, a partire dal file JSON prodotto dall'algoritmo, creerà un diverso file di configurazione gantt.json dove il tempo di attivazione di un singolo dispositivo, appartenente alla categoria degli elettrodomestici spostabili nel tempo, verrà ritardato di un tempo predefinito mentre tutti gli altri dispositivi manterranno i tempi di attivazione originali. Il programma utilizzerà ricorsivamente ognuno dei file così prodotti per creare ulteriori file contenenti tutte le configurazioni possibili di ritardi dei dispositivi.

Il risultato sarà un insieme di file rappresentanti ogni possibile configurazione di rete dove il tempo di attivazione di ogni singolo dispositivo varierà da un minimo corrispondente all'inizio del suo intervallo ad un massimo corrispondente alle fine dell'intervallo previsto.

Ognuno dei file creati dal sottoprogramma verrà successivamente inoltrato alla piattaforma EA-SIM che, come mostrato nella Sezione 4.2, creerà automaticamente i moduli SystemC e TLM 2.0 necessari a simulare il comportamento energetico della rete definita. EA-SIM inoltre verificherà se i consumi della rete si mantengano al di sotto del valore di soglia richiesto. Infatti solo gli scenari d'uso che corrispondano ad una rete adempiente alla richiesta di riduzione sono di interesse.

Tali scenari possono essere presentati all'utente sotto forma grafica tramite diagrammi di Gantt, rappresentanti l'insieme degli eventi di accensione degli elettrodomestici che si susseguono nell'arco della una giornata.

In questo modo l'utente può scegliere facilmente lo scenario d'uso la cui *combinazione* dei vari tempi di attivazione si adatta meglio ai suoi bisogni e che al contempo gli permetta di mantenere i propri consumi al di sotto della soglia richiesta.

La scelta dello scenario non è vincolante per l'utente il quale, dopo aver accettato di partecipare al programma di riduzione energetica, può scegliere di ignorare i *consigli* fornitigli dal sistema. Questo ovviamente può comportare il mancato adempimento alle richieste del servizio aggregato, si presume però che se un utente dia la sua disponibilità a rispettare una richiesta di riduzione energetica per un dato periodo, a fronte di benefici economici, egli si impegni nel cercare di limitare i

propri consumi. Vi è anche la possibilità che nessuno scenario riesca a soddisfare i requisiti della richiesta di riduzione energetica. Siccome gli scenari si basano su predizioni dell'utilizzo degli elettrodomestici da parte dell'utente, non è certo che tali previsioni rispecchino l'utilizzo effettivo della rete nell'intervallo di tempo previsto dalla richiesta.

Dato che la creazione degli scenari d'uso si focalizza maggiormente sugli elettrodomestici che presentano un ciclo di funzionamento caratterizzato da elevate richieste di energia ma il cui tempo di attivazione può essere modificato, nel caso in cui l'utente non ne abbia programmato l'utilizzo nel prossimo futuro egli può comunque osservare come l'attivazione di alcuni elettrodomestici sia oneroso dal punto di vista energetico e nel caso decida di utilizzarli nell'arco della giornata avrà a disposizione gli scenari d'uso a mostrargli entro quali *limiti* essi possano essere attivati nel rispetto della soglia di consumi richiesta.

Per mostrare all'utente i risultati dell'algoritmo e delle simulazioni dei singoli scenari si è creato un database MySQL online dove le configurazioni di rete che rispettano i requisiti delle richieste possono essere salvate. Il salvataggio di tali informazioni è stato implementato tramite l'utilizzo del linguaggio di programmazione Python che grazie alla libreria *MySQLdb* permette di interrogare la base di dati in maniera efficiente e sicura [79].

Al termine di ogni simulazione, il sistema si avvarrà infatti di tale libreria per poter salvare i risultati delle simulazioni, quali i file di configurazione della rete e grafici di interesse, nella base di dati qualora i consumi risultino al di sotto del valore di soglia richiesto. Le informazioni permarranno dunque nella base di dati venendo a formare un *archivio* di casi d'uso che l'utente può facilmente consultare, ad esempio, tramite una semplice interfaccia web.

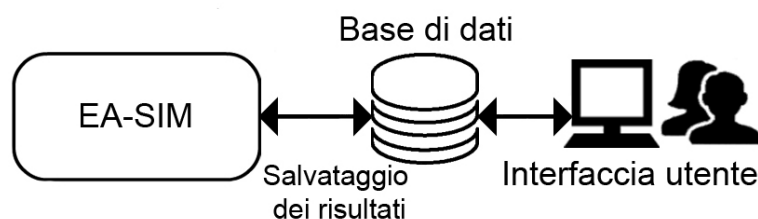


Figura 4.16: Utilizzo del database come archivio delle simulazioni

Tale interfaccia può essere implementata facilmente tramite software di gestione dell'energia, quale il software JEMMA proposto dal consorzio Energy@Home [24], il cui compito sarebbe quello di interrogare una base di dati via rete, mostrare i grafici dei consumi per ogni scenario e trasporre il file JSON di configurazione in un diagramma di Gantt in forma grafica in modo da illustrare all'utente i tempi di attivazione dei singoli dispositivi nell'arco della giornata in maniera intuitiva e immediata.

## Capitolo 5

# Realizzazioni sperimentali e valutazione

*“Tutta la vita consiste nel risolvere problemi”*

- Karl Popper -

Al fine di mostrare la metodologia descritta nel precedente capitolo vengono presentati due casi di studio che consistono nell'utilizzo delle funzionalità del sistema da parte di due tipologie di utenze distinte fra loro.

In particolare si illustrerà come, a partire dalla definizione dei profili delle utenze e delle proprie rete domestiche, l'algoritmo proposto sia in grado di apprendere l'utilizzo della rete e di prevedere, a fronte di una richiesta di riduzione energetica, l'attivazione degli elettrodomestici per un giorno specifico creando uno scenario generico. Verranno poi prodotti diversi possibili scenari d'uso della rete, creati variando gli istanti di attivazione di tutti quegli elettrodomestici il cui periodo di funzionamento può essere modificato senza inficiare in maniera significativa sul comfort dell'utente.

Infine tramite l'uso della piattaforma EA-SIM si andranno a simulare gli scenari d'uso precedentemente creati, selezionando tutti quelli che presentino dei livelli di consumo al di sotto della soglia prevista dalla richiesta di riduzione e salvandoli una base di dati online consultabile facilmente dall'utente.

## 5.1 Illustrazione dei casi di studio

Per illustrare come il sistema descritto nel precedente capitolo, formato dall'algoritmo di apprendimento e la piattaforma di simulazione EA-SIM, funzioni nel suo complesso sono proposti due casi di studio. Al fine di evidenziare il comportamento del sistema a fronte di scenari distinti, si è scelto di selezionare due tipologie di utenze significativamente differenti l'una dall'altra in termini di topologia della rete di elettrodomestici e delle loro frequenze di utilizzo, ovverosia una *persona singola* e una *famiglia con più figli*.

Ognuno dei casi di studio è presentato in una apposita sottosezione del capitolo contenenti:

- *profilo dell'utenza e definizione della rete*: ovverosia da quali elettrodomestici è costituita la rete dell'utente considerato insieme alla loro frequenza di utilizzo e la probabilità di attivazione nell'arco di una giornata. Tali informazioni saranno utilizzate per stilare la cronologia di utilizzo degli elettrodomestici della rete e successivamente per creare i moduli SystemC utilizzati per simularne il comportamento energetico.
- *apprendimento*: si mostrerà come l'algoritmo di apprendimento incrementi la sua consapevolezza sull'utilizzo della rete da parte dell'utente a partire dalla cronologia di utilizzo degli elettrodomestici.
- *richiesta di riduzione energetica*: si illustrerà come si comporti il sistema all'arrivo di una richiesta di partecipazione ad un programma di riduzione energetica da parte della figura dell'Aggregatore di un servizio di Domanda e Risposta.
- *previsione*: si mostrerà come, al sopraggiungere della richiesta di riduzione energetica, il sistema effettui una previsione di utilizzo della rete per il giorno indicato nella richiesta e crei uno scenario d'uso generico per l'utente.
- *casi d'uso*: a partire dal caso d'uso generico si illustrerà la generazione di tutti i possibili casi di utilizzo della rete da parte dall'utente, creati modificando i tempi di attivazione di alcuni degli elettrodomestici presenti.



- *simulazioni*: gli scenari creati verranno inoltrati alla piattaforma di simulazione EA-SIM, la quale ne valuterà i consumi energetici e verificherà che essi rispettino il livello di soglia richiesta dall'Aggregatore.
- *risultati*: si mostrerà infine come i risultati degli scenari che rispettino la soglia di consumo prevista vengano presentati all'utente in una forma grafica intuitiva.

Per la definizione degli elettrodomestici utilizzati e per la creazione dei modelli di utenza ci si è avvalsi dei dati raccolti tramite il questionario proposto e illustrato nel capitolo 4 della tesi, e delle informazioni disponibili in due rapporti tecnici presenti in bibliografia inerenti due progetti di carattere europeo, rispettivamente il progetto Smart-A [16] e il progetto Micene [80], concernenti il monitoraggio nel tempo delle dotazioni, del consumo di energia delle famiglie e dell'utilizzo (frequenza, durata e orari) delle principali apparecchiature domestiche. Sulla base di questi dati, si è quindi progettato un modello di utenza caratterizzato dal profilo di potenza del ciclo di funzionamento di ogni elettrodomestico, dal numero di utilizzi medi settimanali, dalla percentuale di diffusione di ogni singolo apparecchio elettrico, e dalla distribuzione di probabilità dell'ora di utilizzo.

In particolare, secondo quanto affermato in [81], gli elettrodomestici presenti nella rete sono stati suddivisi in base alle loro caratteristiche e alla loro flessibilità di utilizzo nelle seguenti categorie:

- *Carichi non controllabili*: sono carichi che non offrono un livello automatico di controllo se non a scapito di una forte riduzione del comfort dell'utente. Rientrano in questa categoria carichi elettrici quali l'illuminazione, il forno elettrico, il microonde, le televisioni, i computer ecc.
- *Carichi controllabili*: sono carichi che offrono flessibilità energetica e possibilità di automatizzazione del controllo senza influenzare negativamente comfort dell'utente.

A loro volta tali elettrodomestici sono divisi in due categorie:

1. *carichi spostabili nel tempo*: sono carichi contraddistinti da un ciclo di funzionamento di durata temporale finita e per i quali l'istante di attivazione/terminazione del ciclo può essere anticipato o posticipato senza una sostanziale riduzione

del comfort utente. In questa categoria rientrano elettrodomestici quali lavatrice, asciugatrice e lavastoviglie [3].

2. *carichi modulabili*: sono carichi caratterizzati da un ciclo di funzionamento continuo, di durata temporale infinita, le cui richieste energetiche possono essere modificate in modo da mantenere i consumi contenuti. Fanno parte di questa categoria elettrodomestici quali frigorifero e congelatore che presentano un ciclo di funzionamento continuo nell'arco della giornata e la cui temperatura può essere aumentata/ridotta influenzando in questo modo i loro consumi.

Nell'elaborare i casi di studio ci si focalizzerà maggiormente nel modificare le attivazioni degli elettrodomestici spostabili nel tempo, poichè presentano un ciclo di funzionamento caratterizzato da un consumo energetico elevato rispetto ad altri elettrodomestici e perchè il loro tempo di attivazione può essere modificato senza influire negativamente sulle abitudini delle utenze.

### 5.1.1 Primo caso di studio: Persona Singola

Il primo caso di studio presentato illustra un possibile utilizzo del sistema da parte di un modello di utenza rappresentante un uomo che vive da solo in un appartamento. Nelle prossime sezioni si mostra come, a partire dalla tipologia degli elettrodomestici che andranno a formare la rete domestica, vengano creati i file di configurazione di sistema e come questi vengano utilizzati dall’algoritmo di predizione per apprendere le abitudini dell’utente, prevedere l’utilizzo futuro della rete e successivamente simularne le richieste energetiche, selezionando gli scenari d’uso che sottostanno ad una richiesta di riduzione energetica.

#### Definizione della rete e delle caratteristiche dei dispositivi

La rete domestica dell’utenza considerata è caratterizzata dalla presenza di un modesto numero di elettrodomestici, appartenenti ad entrambe le categorie di dispositivi sopracitate.

Per quanto riguarda la categoria dei carichi controllabili nel tempo, sulla base dei risultati ottenuti dal sondaggio proposto alle utenze (Figura 5.1), si evince che tra gli elettrodomestici appartenenti a tale categoria, per la tipologia di utenza di interesse, i più comuni risultano essere la lavatrice (90% circa) e la lavastoviglie (50% circa) mentre l’asciugatrice si attesta al 5% per il campione di utenza considerato.

Si è scelto di introdurre nella rete dell’utenza considerata solo la lava-

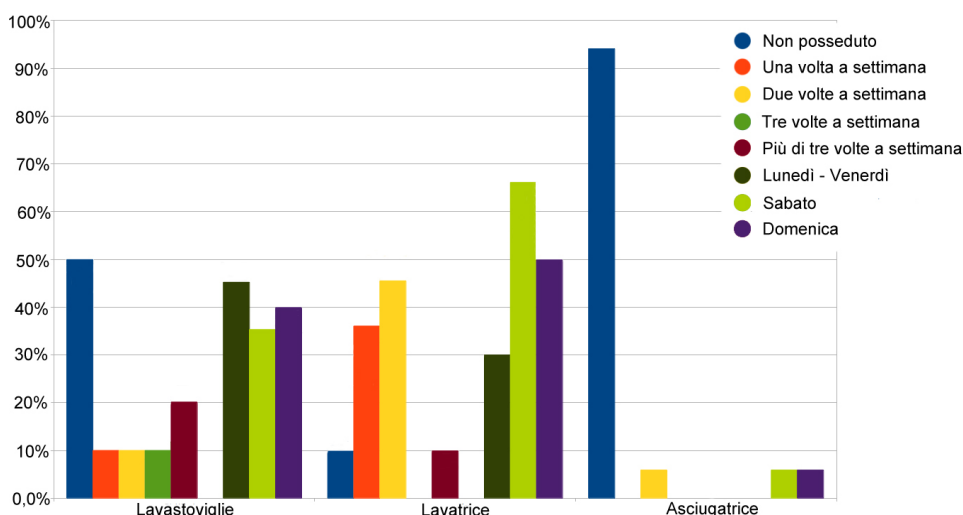


Figura 5.1: Risultati sondaggio per il profilo “Persona singola (Uomo)”

Elettrodomestico	Frequenza Settimanale	Energia [kWh]
Lavatrice	Due volte a settimana	0,89
Televisione	Più di tre volte a settimana	0,26
Computer portatile	Più di tre volte a settimana	0,1
Illuminazione	Ciclo continuo	1,03
Frigorifero	Ciclo continuo	0,79
Congelatore	Ciclo continuo	1,1

Tabella 5.1: Dispositivi della rete dell'utente

trice, con una frequenza di utilizzo pari a due volte a settimana, mentre gli altri elettrodomestici appartenenti alla medesima categoria non saranno presenti.

Nonostante i nostri studi si concentrino maggiormente su tale categoria di elettrodomestici (carichi spostabili nel tempo) si è scelto di aggiungere alla rete alcuni elettrodomestici di uso comune nelle varie utenze, dei quali sono noti i profili di potenza del loro ciclo di funzionamento [16, 80]. La Tabella 5.1 mostra l'insieme dei dispositivi che formano la rete dell'utente, indicando la frequenza settimanale di utilizzo e l'energia di richiesta per il loro ciclo di funzionamento medio.

È importante notare come l'illuminazione dell'ambiente domestico sia stato considerata come un singolo dispositivo a ciclo continuo piuttosto che la somma dei singoli contributi dei punti luce dell'abitazione. Tale approssimazione è stata ricavata dai dati raccolti tramite il progetto Micene del Politecnico di Milano [80], dove si indica un consumo annuale medio dovuto all'illuminazione pari a 375 kWh. Dato che le abitazioni sono state monitorate per un periodo di circa tre settimane, il consumo annuale è stato stimato a partire dai dati raccolti. In questo caso la stima è lineare, poichè consiste nel moltiplicare per 365 il consumo medio giornaliero per ogni abitazione. Chiaramente l'energia consumata dai sistemi per l'illuminazione dipende fortemente dalle stagioni dell'anno e dalle dimensioni dell'abitazione, ma il risultato della stima fornisce un valore realistico poiché per ogni mese dell'anno il numero dei punti luce monitorati rimaneva costante sulle 110 unità abitative coinvolte. I valori relativi al consumo di energia dei cicli di funzionamento degli altri elettrodomestici presenti, principalmente riportati nel progetto Smart-A [16], si riferiscono ad un profilo di carico medio rappresentativo per ogni categoria, i cui dettagli sono presentati nell'Appendice B della tesi.

Come mostrato in Figura 5.3, le informazioni sui cicli di funzionamento dei dispositivi e le loro richieste energetiche sono codificate all'interno dei file di configurazione degli elettrodomestici che verranno utilizzati successivamente dalla piattaforma EA-SIM per la creazione dei moduli SystemC necessari alla simulazione del comportamento energetico dell'intera rete domestica.

Le informazioni sulle frequenze di attivazioni settimanali, invece, sono utilizzate per la creazione della cronologia di utilizzo degli elettrodomestici che verrà elaborata dall'algoritmo di apprendimento per apprendere le abitudini dell'utente. In particolare, in base alle informazioni ricavate dal questionario proposto, è stato possibile specificare tale frequenza indicando se i dispositivi saranno attivati infrasettimanalmente o durante il fine settimana.

Per i dispositivi non coinvolti nel questionario e che non presentano un ciclo di funzionamento continuo, quali il televisore o il computer portatile, tali occorrenze sono state ipotizzate ragionevolmente in relazione al profilo di utenza.

Insieme alle frequenze settimanali di utilizzo degli elettrodomestici, sono state create delle funzioni di probabilità relative alla loro attivazione nell'arco di una giornata, il cui andamento mostra la maggiore o minore probabilità che un dispositivo sia utilizzato in una determinata ora [16]. Si riporta qui la funzione densità di probabilità relativa all'utilizzo di una lavatrice da parte dell'utenza considerata (Figura 5.2), dove sull'asse delle ascisse sono indicate le ore relative ad una giornata mentre sull'asse delle ordinate sono riportati i valori di probabilità di attivazione.

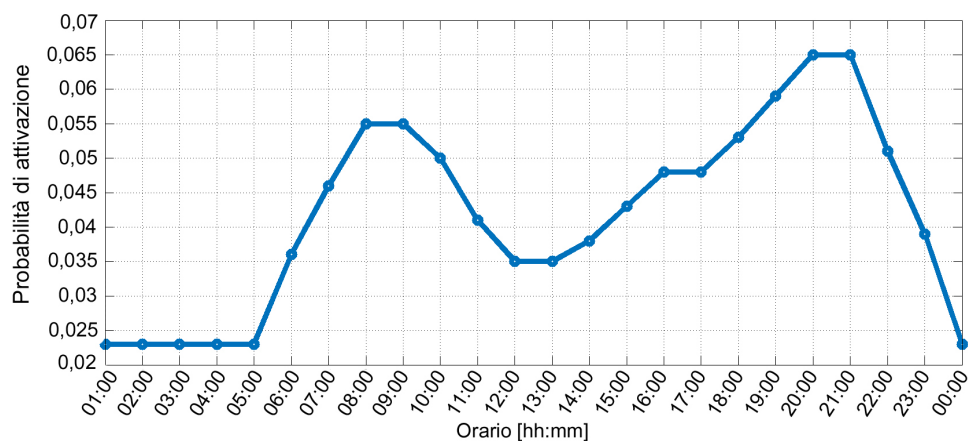


Figura 5.2: Funzione densità di probabilità di attivazione di una lavatrice

Tale curva e quelle relative agli altri elettrodomestici presenti sono codificate all'interno di file CSV che l'algoritmo utilizzerà per creare la cronologia di attivazione per l'utente insieme alle frequenze settimanali, le quali a loro volta sono codificate nel file di configurazione di sistema *network-description.json* utilizzato sia dall'algoritmo di predizione sia dalla piattaforma di simulazione EA-SIM (Figura 5.3). Il file di configurazione per il profilo di utenza considerato è mostrato in Figura 5.4, insieme ad uno dei file CSV utilizzati per la codifica delle funzioni di probabilità di attivazione degli elettrodomestici.

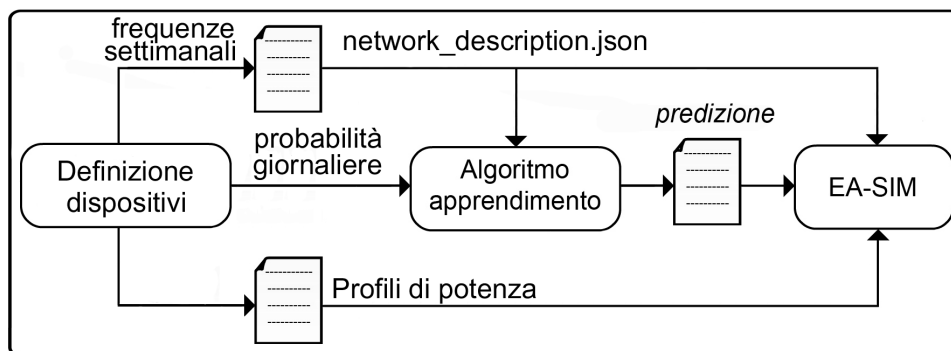


Figura 5.3: Flusso di dati dalla definizione della rete alla simulazione

Ore	Probabilità di attivazione
1	0.01
2	0.001
3	0.001
4	0.001
5	0.001
6	0.001
7	0.001
8	0.066
9	0.066
10	0.061
11	0.052
12	0.046
13	0.044
14	0.047
15	0.052
16	0.059
17	0.059
18	0.064
19	0.07
20	0.076
21	0.076
22	0.062
23	0.034
24	0.01

(a)

```
"appliances": [
  {
    "id": "appliance_0",
    "Name": "Lavatrice",
    "Cycle": "7200",
    "WeekFrequency": "1",
    "WeekEndFrequency": "1"
  },
  {
    "id": "appliance_1",
    "Name": "Televisione",
    "Cycle": "8100",
    "WeekFrequency": "3",
    "WeekEndFrequency": "2"
  },
  {
    "id": "appliance_2",
    "Name": "Computer",
    "Cycle": "9000",
    "WeekFrequency": "3",
    "WeekEndFrequency": "2"
  },
  .....
]
```

(b)

Figura 5.4: Esempi di file CSV di codifica della probabilità di attivazione (a) e di file di configurazione della rete *network-description.json* (b)

### Apprendimento dell'utilizzo della rete

A partire dalle informazioni relative alle frequenze settimanali e alle probabilità giornaliere di attivazione, il sistema è in grado dunque di creare la cronologia di utilizzo della rete per l'utente considerato.

A titolo illustrativo si è simulato l'utilizzo della rete riportata nella precedente sezione per un periodo di tre settimane.

In Tabella 5.2 si mostrano i tempi di attivazione degli elettrodomestici per la prima settimana di utilizzo della rete. Non si riportano i tempi degli elettrodomestici a ciclo continuo poichè essi sono attivi nell'arco dell'intera giornata e saranno sempre presenti all'interno delle previsioni future.

Gli orari di attivazione riportati in figura non si riferiscono ad orari specificati in ore e minuti, bensì ad intervalli di tempo della giornata. Si è scelto infatti di preferire una *granularità oraria* rispetto ad una precisione espressa in minuti poichè ritenuta più significativa nell'ottica di effettuare delle previsioni di attivazione.

È infatti poco probabile che l'utente attivi un elettrodomestico esattamente allo stesso orario in diversi giorni quando è più probabile che tale tempo di attivazione cada all'interno dello stesso intervallo orario.

Giorni	Intervalli di attivazione		
	Lavatrice	Computer	Televisione
Lunedì	20-21	22-23	23-24
Martedì	Non attivo	Non attivo	Non attivo
Mercoledì	Non attivo	16-17	22-23
Giovedì	Non attivo	Non attivo	08-09
Venerdì	Non attivo	23-24	Non attivo
Sabato	Non attivo	13-14	Non attivo
Domenica	21-22	Non attivo	16-17

Tabella 5.2: Dati della cronologia di utilizzo della rete per la prima settimana

Nelle Tabelle 5.3 e 5.4 si riportano i risultati per la seconda e terza settimana di utilizzo, rispettivamente. A partire da tale cronologia di utilizzo, l'algoritmo di apprendimento andrà ad incrementare, per ogni dispositivo considerato, i punteggi (*scores*) relativi sia ai giorni della settimana nei quali il dispositivo è stato utilizzato sia agli intervalli di tempo di attivazione per quello specifico giorno.

Giorni	Intervalli di attivazione		
	Lavatrice	Computer	Televisione
Lunedì	Non attivo	18-19	Non attivo
Martedì	Non attivo	19-20	24-01
Mercoledì	Non attivo	22-23	Non attivo
Giovedì	18-19	Non attivo	22-23
Venerdì	Non attivo	22-23	14-15
Sabato	19-20	Non attivo	24-01
Domenica	Non attivo	09-10	23-24

Tabella 5.3: Dati della cronologia di utilizzo della rete per la seconda settimana



Giorni	Intervalli di attivazione		
	Lavatrice	Computer	Televisione
Lunedì	08-09	10-11	15-16
Martedì	Non attivo	20-21	20-21
Mercoledì	Non attivo	21-22	Non attivo
Giovedì	Non attivo	22-23	Non attivo
Venerdì	Non attivo	Non attivo	17-18
Sabato	Non attivo	Non attivo	21-22
Domenica	08-09	Non attivo	13-14

Tabella 5.4: Dati della cronologia di utilizzo della rete per la terza settimana

In particolare, secondo le modalità descritte nel capitolo 4, la cronologia è analizzata gradualmente giorno per giorno, e per ogni elettrodomestico l'algoritmo:

- Decrementa per il fattore di decadimento  $\delta$  i valori dei pesi relativi ai giorni di funzionamento dell'elettrodomestico e successivamente incrementa del fattore  $\alpha$  il peso del giorno in cui si è riscontrata un'attivazione per il dispositivo.
- Decrementa per il fattore di decadimento  $\delta$  i valori dei pesi relativi agli intervalli orari di funzionamento dell'elettrodomestico per un determinato giorno e successivamente incrementa del fattore  $\alpha$  il peso dell'intervallo temporale in cui si è riscontrata un'attivazione per il dispositivo.

Il valore del parametro  $\alpha$ , compreso tra zero e uno, determina quanto sia influente la storia più recente dell'utente nell'utilizzo della rete e al contempo, attraverso il *fattore di decadimento*  $\delta = (1 - \alpha)$ , quantifica quanto rapidamente la storia passata dell'utenza perda di significato per l'algoritmo.

Per il caso di studio si è selezionato  $\alpha = 0,2$  con un conseguente valore del fattore di decadimento  $\delta = 0,8$ . Considerando infatti un periodo di tre settimane, si è ritenuto opportuno dare un peso mediamente alto ai dati passati dell'utente facendo in modo che essi decadano lentamente durante l'analisi dei dati, tenendo al contempo maggiormente in considerazione i nuovi valori analizzati.

Nelle Figure 5.5, 5.6 e 5.7 si riportano i valori dei punteggi relativi ai giorni della settimana alla fine dell'analisi della cronologia creata per il periodo di interesse.

Prendendo in considerazione l'utilizzo della lavatrice da parte dell'u-

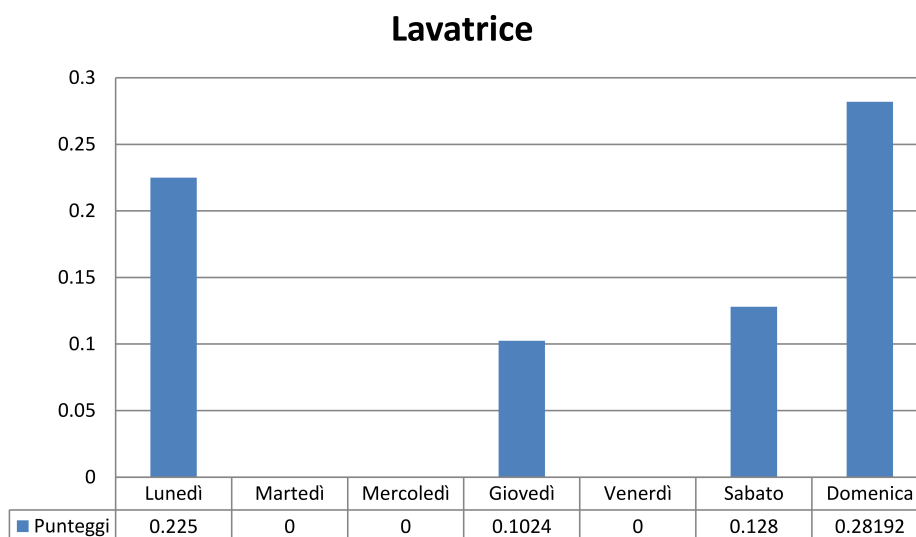


Figura 5.5: Punteggi relativi ai giorni di attivazione della lavatrice dell'utente

tente, dalla Figura 5.5 risulta che il giorno della Domenica presenta il punteggio maggiore rispetto agli altri giorni della settimana. Questo dato trova riscontro nella cronologia di utilizzo, dove la Domenica non solo è stato uno dei giorni più frequenti ma è anche l'ultimo giorno di attivazione rilevato per l'elettrodomestico in questione e dunque con maggior rilevanza.

La Domenica risulta il giorno con il maggior punteggio anche per la televisione. Ciò è dovuto al fatto che l'algoritmo analizza la cronologia di utilizzo giorno per giorno e in questo caso termina la sua analisi con l'ultimo giorno della terza settimana, appunto la Domenica, dove questo elettrodomestico risulta attivo. Se l'analisi dei dati fosse stata interrotta in corrispondenza di un giorno precedente alla Domenica, ad esempio per il sopraggiungere della richiesta di riduzione energetica da parte dell'Aggregatore, si sarebbero ottenuti punteggi differenti da quelli attuali. Questo sottolinea ulteriormente come, nell'analisi dell'utilizzo degli elettrodomestici da parte di un'utenza, il suo comportamento più recente sia ritenuto maggiormente in considerazione rispetto alla sua storia passata.

Parallelamente all'aggiornamento dei punteggi relativi ai giorni set-

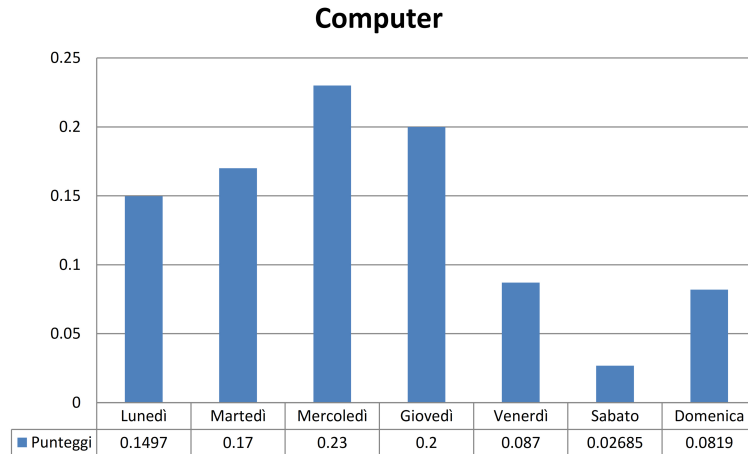


Figura 5.6: Punteggi relativi ai giorni di attivazione del computer dell'utente

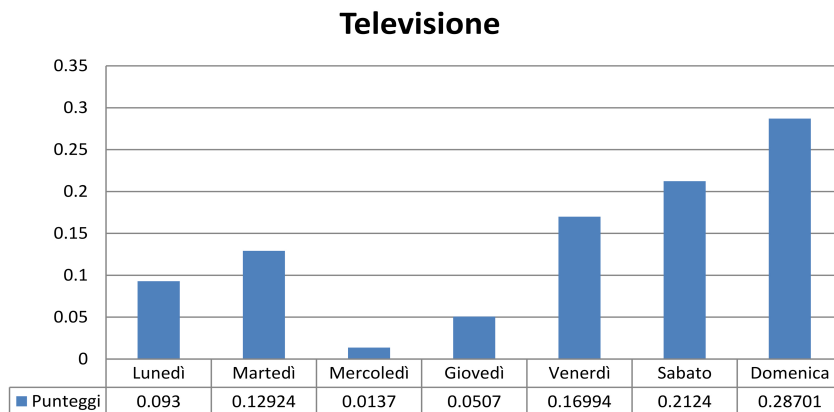


Figura 5.7: Punteggi relativi ai giorni di attivazione della televisione dell'utente

timanali di attivazione dei dispositivi, l'algoritmo incrementerà, per ogni giorno riscontrato nella cronologia, i punteggi relativi agli intervalli orari di utilizzo. Analogamente alla procedura effettuata per i giorni l'algoritmo moltiplicherà per il fattore di decadimento  $\delta$  i valori passati degli intervalli orari di un giorno specifico, andando ad incrementare del valore  $\alpha$  il punteggio dell'intervallo orario riscontrato nella cronologia di utilizzo. Inoltre, per tenere in considerazione anche i casi in cui i tempi di attivazione si trovino all'interno di un determinato intervallo ma molto vicino al successivo o al precedente, supponendo che un utente attivi un elettrodomestico all'interno dell'intervallo orario  $\varphi$ ,

oltre ad incrementare il peso relativo a quell'intervallo si andranno a modificare i pesi relativi all'intervallo immediatamente successivo ( $\varphi + 1$ ) e precedente ( $\varphi - 1$ ) a quello considerato, incrementandoli del valore  $\alpha$  moltiplicato per il cosiddetto *fattore di bordo*  $\beta$ .

I valori dei fattori  $\alpha$  e  $\delta$  sono uguali ai valori scelti per incrementare i punteggi dei giorni settimanali, mentre per il fattore di bordo si è scelto il valore  $\beta = 0,7$ .

Nelle Figure 5.8 e 5.9 si riportano i punteggi relativi alle ore di attivazione rispettivamente della lavatrice e del computer dell'utente riscontrati nei giorni settimanali presenti nella cronologia di utilizzo.

Focalizzandoci sulla lavatrice, i periodi di attivazione di tale elettrodomestico si concentrano maggiormente nelle del ore tardo pomeriggio e nelle ore serali, coerentemente con la distribuzione di probabilità mostrata precedentemente in Figura 5.2. Si può notare come i valori assegnati ai giorni di Giovedì e Sabato risultino uguali tra loro, questo perchè in ognuno di tali giorni della settimana la lavatrice è stata utilizzata dall'utente soltanto una volta e dunque l'algoritmo ha provveduto ad incrementare i punteggi, secondo le modalità sopra descritte, soltanto per il singolo intervallo di attivazione e per gli intervalli ad esso adiacenti.

Nei giorni di Lunedì e Domenica invece, l'utente ha attivato la lavatrice rispettivamente due volte in due intervalli di tempo differenti. Coerentemente con quanto sin ora affermato, i valori corrispondenti agli ultimi intervalli selezionati (08:00-09:00 per entrambi i giorni) risultano maggiori dei punteggi assegnati ai primi intervalli registrati dalla cronologia (20:00-21:00 per il Lunedì e 21:00-22:00 per la Domenica), essendo i valori di quest'ultimi *scalati* tramite il fattore di decadimento  $\delta$  al momento in cui il sistema ha acquisito i dati relativi all'intervallo più recente.

Infine per i giorni di Martedì, Mercoledì e Venerdì non vi sono punteggi assegnati poichè dalla cronologia di utilizzo della rete risulta che in tali giorni l'elettrodomestico non è stato utilizzato dall'utenza.

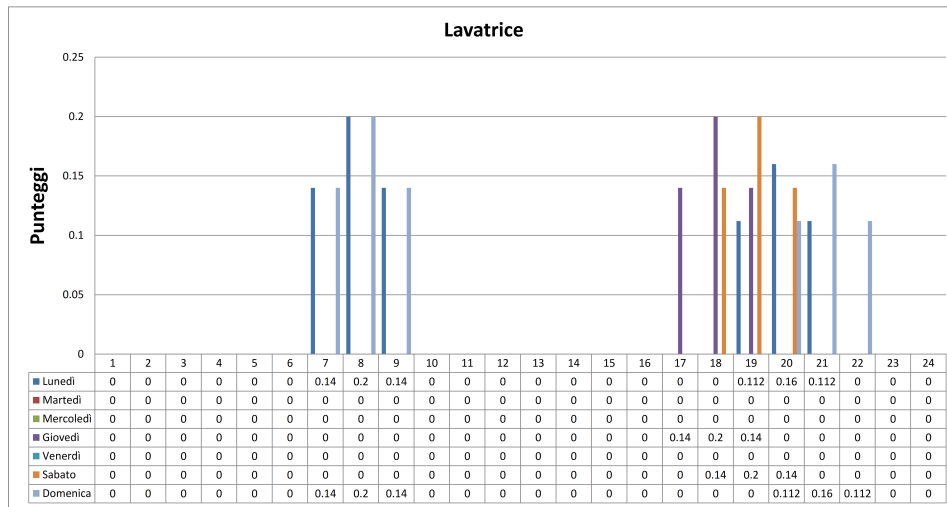


Figura 5.8: Punteggi relativi alle ore di attivazione della lavatrice dell'utente

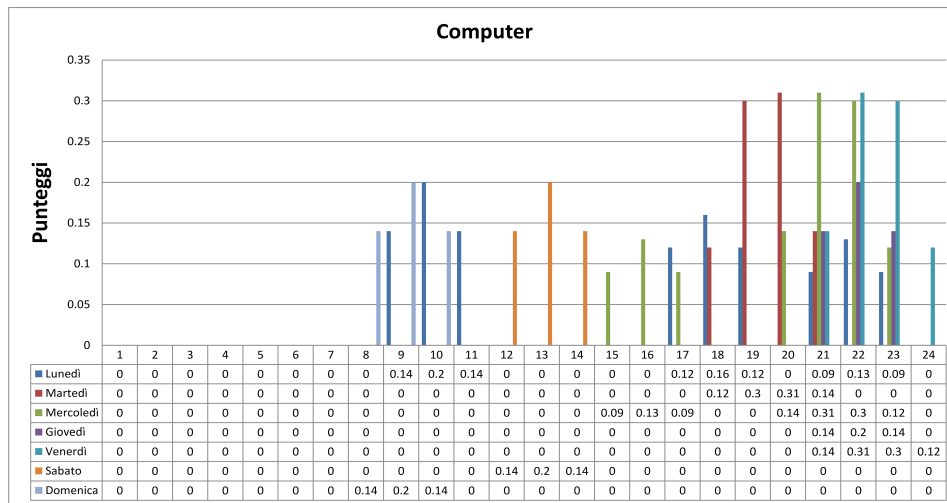


Figura 5.9: Punteggi relativi alle ore di attivazione del computer dell'utente

### Richiesta di riduzione da parte dell'Aggregatore

Per il caso di studio proposto, ipotizziamo l'invio da parte del servizio aggregato di Domanda e Risposta della richiesta di riduzione energetica mostrata in Tabella 5.5, dove si chiede dunque all'utente di mantenere i propri consumi al di sotto della soglia di 1,5 kW per un periodo che va dalle ore 08:00 alle ore 09:00 di Lunedì 6 Ottobre 2014. Se durante il periodo richiesto l'utente dovesse riuscire a rispettare la soglia indicata, verrà rimborsato dal gestore della distribuzione di 0,2 € per ogni kWh di l'energia effettivamente consumata durante l'intervallo di tempo designato.

La scelta del periodo di attivazione della richiesta e dell'ammontare della remunerazione è stata effettuata in base alla tariffa bioraria dell'energia imposta dal maggior gestore della distribuzione energetica italiana, Enel Energia [33]. In particolare il prezzo indicato si riferisce al massimo prezzo fisso per l'energia, applicato alla cosiddetta *fascia oraria arancione (o F1)* che comprende un periodo che va dal Lunedì al Venerdì con inizio appunto alle ore 08:00 terminando alle ore 19:00.

È ragionevole pensare che tali richieste di limitazione dei consumi pervengano nella maggior parte in periodi di tempo compresi in tale fascia oraria che di fatto corrisponde al periodo della settimana in cui la domanda energetica da parte delle utenze risulta maggiormente elevata.

Richiesta di riduzione energetica	
ID utente	01
ID messaggio	42
Tempo di attivazione	08:00 - 03/11/2014
Durata	60 minuti
Livello di soglia	1,5 kW
Remunerazione	0,2 € /kWh

Tabella 5.5: Richiesta di riduzione energetica pervenuta all'utenza considerata

### Previsione di utilizzo della rete

Supponendo che l'utente riceva la richiesta di riduzione energetica mostrata nella Tabella 5.5 il giorno precedente, il sistema procede dunque ad effettuare una previsione dei tempi di attivazione dei dispositivi della rete per il giorno designato.

Come illustrato nel precedente Capitolo, per effettuare la previsione l'algoritmo, avvalendosi di due funzioni distinte una per i giorni settimanali e una per gli intervalli di tempo, procede nel modo seguente:

1. Estrae, per ogni elettrodomestico, uno o più valori dalla struttura dati contenente i punteggi relativi ai giorni settimanali e verifica che almeno uno dei valori estratti corrisponda al giorno indicato nella richiesta.
2. Se il giorno estratto corrisponde a quello indicato nella richiesta di riduzione, allora seleziona, per ogni elettrodomestico, uno o più valori dalla struttura dati contenente i punteggi degli orari di attivazione dei dispositivi relativi al giorno estratto al punto 1.

Sempre con riferimento al capitolo precedente e in particolare allo pseudocodice relativo alle funzioni di *estrazione* dei giorni settimanali e degli intervalli orari, per la determinazione dei valori di soglia sono stati selezionati i seguenti valori di scala:  $\tau_d = 0,5$  e  $\tau_h = 0,6$ . A tali valori corrispondono dei livelli soglia pari o poco superiori alla metà dei massimi punteggi contenuti nelle rispettive strutture dati, risultando dunque poco selettivi per il caso di studio scelto. In generale la scelta dei valori di scala deve essere posta in relazione alla durata della fase di addestramento del sistema e alla frequenza di utilizzo media dei dispositivi presenti, preferendo dei valori di  $\tau_d$  e  $\tau_h$  maggiori per periodi di addestramento più lunghi e con alte frequenze di utilizzo degli elettrodomestici, e valori minori per periodi più contenuti e con basse frequenze settimanali.

Infatti ad un maggiore periodo di addestramento corrisponde una maggiore *esperienza* del sistema sulle abitudini dell'utente e, se gli elettrodomestici sono caratterizzati mediamente da un'elevata frequenza di utilizzo, i punteggi generati dall'algoritmo risulteranno genericamente elevati permettendo di poter selezionare dei valori di scala più restrittivi e specifici.

Elettrodomestico	Soglia giorni	Soglia intervalli
Lavatrice	0,14096	0,12
Televisione	0,143505	0,12
Computer	0,115	0,12

Tabella 5.6: Valori di soglia per i giorni settimanali e per gli intervalli temporali relativi relativi al giorno di Lunedì ( $\tau_d = 0,5$  e  $\tau_h = 0,6$ )

Selezionati dunque i valori dei fattori di scala e con riferimento alle figure inerenti ai punteggi specifici per ogni elettrodomestico presente, si ottengono i valori di soglia per la selezione dei giorni e degli intervalli di tempo di attivazione relativi al giorno di Lunedì presenti in Tabella 5.6. Si può notare come per i tre elettrodomestici si ottengano uguali valori di soglia per gli intervalli di tempo. Ciò è dovuto al fatto che per il giorno di Lunedì nessun intervallo presente è stato selezionato più volte durante la fase di apprendimento, dunque il massimo valore presente all'interno delle rispettive strutture dati sarà pari al valore di  $\alpha$ , ovvero 0,2, il quale scalato per il fattore  $\tau_h = 0,6$  restituisce il livello di soglia indicato.

In base a tali valori di soglia, l'algoritmo produrrà le predizioni mostrate nella Tabella 5.7, dove la televisione non è prevista per il giorno Lunedì. Per tale giorno l'elettrodomestico presenta infatti un punteggio di 0,093 inferiore al livello di soglia per i giorni della settimana, mentre sia la lavatrice che il computer sono presenti insieme anche a tutti gli altri elettrodomestici che presentano un ciclo di funzionamento continuativo nell'arco della giornata, ovverosia il frigorifero, il congelatore, il componente rappresentante l'illuminazione dell'ambiente domestico.

Elettrodomestico	Intervallo orario
Lavatrice	07:00 - 10:00
	20:00 - 21:00
Computer	09:00 - 12:00
	17:00 - 20:00
	22:00 - 23:00
Televisione	Non attiva nel giorno selezionato

Tabella 5.7: Predizione dell'utilizzo degli elettrodomestici



Con riferimento alla Figura 5.9, per il computer l'algoritmo ha previsto tre intervalli di funzionamento corrispondenti essendo i valori contenuti negli indici corrispondenti maggiori o uguali al valore di soglia calcolato per la specifica giornata.

Infine per la lavatrice, notiamo che per il giorno di Lunedì sono stati predetti dal sistema due distinti intervalli di funzionamento, uno con inizio alle 20:00 della durata di un'ora e un altro più ampio con inizio alle 07:00 e con termine alle ore 10:00. Analizzando infatti i punteggi relativi ai tempi di attivazione dell'elettrodomestico in questione, mostrati in Figura 5.8, si vede come i punteggi che superano il valore di soglia si riferiscano agli intervalli identificati con 7, 8 e 9 e successivamente il singolo intervallo 20. Il primo intervallo in particolare include al suo interno il periodo che interessa la richiesta di riduzione, e avendo un ciclo di funzionamento caratterizzato da alte richieste energetiche, il sistema sfrutterà *l'elasticità* che caratterizza il tempo di attivazione della lavatrice per ritardarne il funzionamento tentando di mantenere i consumi al di sotto della soglia richiesta.

L'algoritmo infine memorizza i dispositivi e i loro intervalli di funzionamento previsti per il giorno richiesto all'interno di un file di tipo JSON strutturato come un rappresentazione di un diagramma di Gantt (Figura 5.10(a)) e nel file di definizione della rete (Figura 5.10(b)) che verranno successivamente utilizzati dalla piattaforma EA-SIM come files di configurazione per simulare il comportamento energetico della rete prevista dall'algoritmo.

```

"appliance_0": [
  {
    "continuous": "FALSE",
    "elastic": "TRUE",
    "from": "07:00",
    "to": "10:00"
  },
  {
    "continuous": "FALSE",
    "elastic": "TRUE",
    "from": "20:00",
    "to": "21:00"
  } ],
"appliance_1": [
  {
    "continuous": "FALSE",
    "elastic": "FALSE",
    "from": "09:00",
    "to": "12:00"
  },
  {
    "continuous": "FALSE",
    "elastic": "FALSE",
    "from": "17:00",
    "to": "20:00"
  },
  .....
]

"appliances": [
  {
    "id": "appliance_0",
    "Name": "Lavatrice",
    "Cycle": "7200",
  },
  {
    "id": "appliance_1",
    "Name": "Computer",
    "Cycle": "9000",
  },
  {
    "id": "appliance_2",
    "Name": "Illuminazione",
    "Cycle": "86400",
  },
  {
    "id": "appliance_3",
    "Name": "Frigorifer",
    "Cycle": "86400",
  },
  {
    "id": "appliance_4",
    "Name": "Congelatore",
    "Cycle": "86400",
  }
]

```

(a) gantt.json                      (b) network-description.json

Figura 5.10: Esempi dei due file di configurazione della rete

### Creazione degli scenari d'uso

A partire dalla previsione effettuata dall'algoritmo, seguendo il flusso di esecuzione indicato in Figura 4.15, il sistema è in grado di creare diversi scenari d'uso che possono essere inoltrati singolarmente alla piattaforma EA-SIM la quale ne simulerà il comportamento energetico e ne quantificherà i consumi per verificare se essi permangono al di sotto della soglia richiesta dal servizio aggregato.

Utilizzando i file JSON prodotti dall'algoritmo, si creerà dunque un diverso file di configurazione gantt.json (Figura 5.10(a)) dove il tempo di attivazione di un singolo dispositivo, appartenente alla categoria degli elettrodomestici spostabili nel tempo, verrà ritardato di un tempo predefinito mentre tutti gli altri dispositivi manterranno i tempi di attivazione originali. Nel caso specifico, l'unico elettrodomestico presente nella rete dell'utenza che appartiene alla categoria dei carichi il

cui istante di attivazione può essere modificato nel tempo è la lavatrice. Focalizzandosi sull'intervallo di tempo di utilizzo interessato dalla richiesta (07:00-10:00) e selezionando un ritardo di attivazione crescente in multipli 15 minuti, il sistema creerà un totale di tredici scenari d'utilizzo della rete, riassunti nella Tabella 5.8. Ad ognuno degli sce-

Scenario d'uso	Inizio ciclo
Scenario 1	07:00
Scenario 2	07:15
Scenario 3	07:30
Scenario 4	07:45
Scenario 5	08:00
Scenario 6	08:15
Scenario 7	08:30
Scenario 8	08:45
Scenario 9	09:00
Scenario 10	09:15
Scenario 11	09:30
Scenario 12	09:45
Scenario 13	10:00

Tabella 5.8: Scenari d'uso ottenuti ritardando l'attivazione del ciclo di funzionamento della lavatrice di multipli di 15 minuti

nari illustrati corrisponderà dunque un unico file di configurazione del tipo illustrato in Figura 5.10(a) contenente un tempo di attivazione specifico, mentre il file di descrizione della topologia di rete, prodotto dall'algoritmo al passo precedente a valle della predizione, è comune a tutti gli scenari d'uso creati.

### **Simulazioni energetiche dei casi d'uso generati**

Secondo le modalità illustrate nel precedente capitolo alle sezioni 4.2, 4.3 e 4.3.1, a partire dai file di configurazione e di definizione delle caratteristiche energetiche degli elettrodomestici coinvolti e attraverso l'uso di sottoprogrammi scritti in linguaggio Python, il sistema creerà i file necessari alla piattaforma EA-SIM per modellare la rete definita ed effettuare una simulazione del comportamento energetico.

Con riferimento alla libreria dei componenti utilizzati dal simulatore (sezione 4.2) e al caso di studio specifico, l'architettura della rete, comune ad ogni scenario d'uso, sarà così composta:

- Per ogni elettrodomestico sarà creato un modulo gerarchico del tipo *Smart Appliance* che ne simulerà l'evoluzione delle sue richieste energetiche nel tempo e l'interazione con le altre componenti della rete.
- Un modulo di tipo *Power Generator* sarà presente per simulare la fornitura di energia elettrica da parte della rete verso tutti i dispositivi presenti.
- Un modulo di tipo *Energy Box* avrà il compito di monitorare e gestire i componenti presenti, controllare lo stato della rete e verificare se i consumi dell'utenza risultino effettivamente al di sotto della soglia prevista dalla richiesta di riduzione energetica.

In Figura 5.11 si mostra il consumo di potenza medio di una lavatrice durante il suo ciclo di funzionamento [16]. Come descritto nella sezione 4.2, tale curva insieme a quelle relative agli altri elettrodomestici presenti, sono codificate all'interno di file di tipo CSV che vengono interpretati dalla piattaforma di simulazione per scrivere il codice sorgente del modulo SystemC corrispondente e dunque per descriverne il comportamento energetico per la durata della simulazione. Si noti come il grafico presenti, dopo il primo quarto di funzionamento, un picco di potenza pari a circa 2,0 kW che, nel caso di studio specifico, se dovesse ricadere all'interno dell'intervallo richiesto dal servizio aggregato, porterebbe l'utente ad elevare i propri consumi al di sopra della soglia di 1,5 kW proposta.

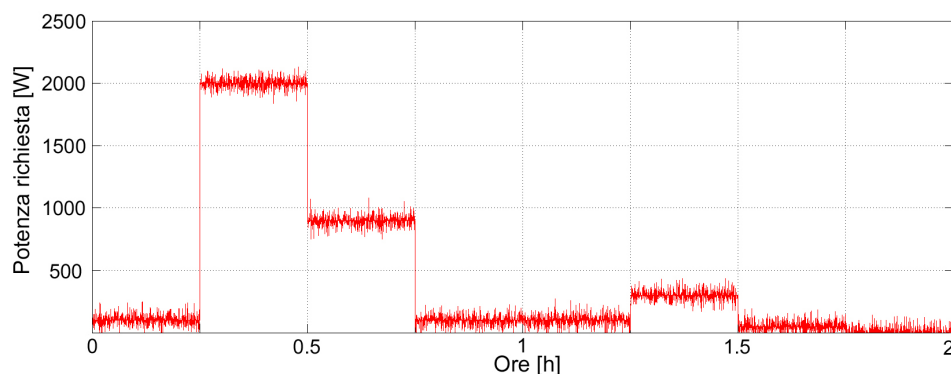


Figura 5.11: Profilo di potenza medio di una lavatrice

Il sistema procede dunque effettuando le simulazioni di ogni scenario d'uso previsto per il giorno di Lunedì, inviando alla piattaforma di simulazione, oltre ai file di configurazione necessari, informazioni sull'intervallo temporale e sul livello di soglia presenti all'interno della richiesta di riduzione energetica. In questo modo non si rende necessario simulare il comportamento energetico della rete nell'arco dell'intera giornata, ma soltanto per la fascia oraria relativa alla richiesta, minimizzando il tempo di esecuzione delle simulazioni. Per completezza e chiarezza di esposizione, nella prossima sezione si riportano comunque i grafici relativi ai risultati delle simulazioni in una scala temporale più ampia per mostrare come si comporti la rete ai *limiti* della finestra temporale interessata dalla riduzione.

Per il caso di studio proposto, il flusso di esecuzione del sistema illustrato in Figura 4.15 nel precedente capitolo, comprendente dunque sia la fase di apprendimento e previsione sia la simulazione degli scenari d'uso creati e l'interazione con la base di dati, ha mostrato un tempo di esecuzione complessivo di circa 2 minuti su un calcolatore che utilizza un processore single-core AMD Sempron 3800+ a 64 bit (2,2 GHz di frequenza di clock, 128 KB di memoria cache L1 e 256 KB di memoria cache L2 [82]) e che presenta 2 GB di memoria RAM DDR2 dei quali ne sono stati utilizzati approssimativamente 600 MB durante l'esecuzione del processo.

Il tempo di risposta del sistema è infatti di fondamentale importanza al fine di presentare i risultati prima del periodo interessato dalla richiesta, in modo tale da permettere all'utente di pianificare i propri consumi con un certo anticipo. Nella parte superiore della Tabella 5.9 sono evidenziati gli scenari d'uso la cui simulazione ha dato un esito positivo, ovvero tutti quegli scenari dove i consumi risultanti si sono mantenuti al di sotto della soglia richiesta, mentre nella parte inferiore sono presenti tutti gli scenari dove il livello di soglia non è stato rispettato durante il tempo di simulazione.

Per il primo gruppo, gli scenari che vanno dal 9 al 13 rispettano la soglia poichè banalmente la lavatrice inizia il suo ciclo di funzionamento dopo lo scadere del periodo di riduzione previsto, così come gli scenari 1, 2 e 3 dove la lavatrice viene attivata molto in anticipo rispetto all'inizio dell'intervallo critico.

Un caso interessante è rappresentato dallo scenario 8 dove la lavatrice inizia il suo ciclo all'interno dell'intervallo di riduzione.

Scenario	Inizio ciclo
Scenario 1	07:00
Scenario 2	07:15
Scenario 3	07:30
Scenario 8	08:45
Scenario 9	09:00
Scenario 10	09:15
Scenario 11	09:30
Scenario 12	09:45
Scenario 13	10:00

Scenario	Inizio ciclo
Scenario 4	07:45
Scenario 5	08:00
Scenario 6	08:15
Scenario 7	08:30

*Tabella 5.9: Divisione degli scenari d'uso in base ai loro risultati: in alto si mostrano gli scenari dove i consumi risultanti rispettano la soglia richiesta, in basso quelli in cui i consumi superano tale soglia*

Come mostrato in Figura 5.13, pur essendo attivata durante il periodo di riduzione, il massimo picco energetico del ciclo di funzionamento della lavatrice ricade pochi minuti dopo la fine dell'intervallo rispettando dunque la soglia richiesta dal servizio aggregato.

Si tratta di un caso limite, infatti negli scenari appartenenti al secondo gruppo nei quali la lavatrice è attivata durante l'intervallo di riduzione (Scenari 5-7) la soglia non risulta rispettata poichè il picco massimo di richiesta energetica cade all'interno il periodo critico.

Nello scenario 4, infine, nonostante l'attivazione della lavatrice abbia luogo un quarto d'ora prima dell'inizio dell'intervallo causerà ugualmente il superamento della soglia dei consumi (Figura 5.12).

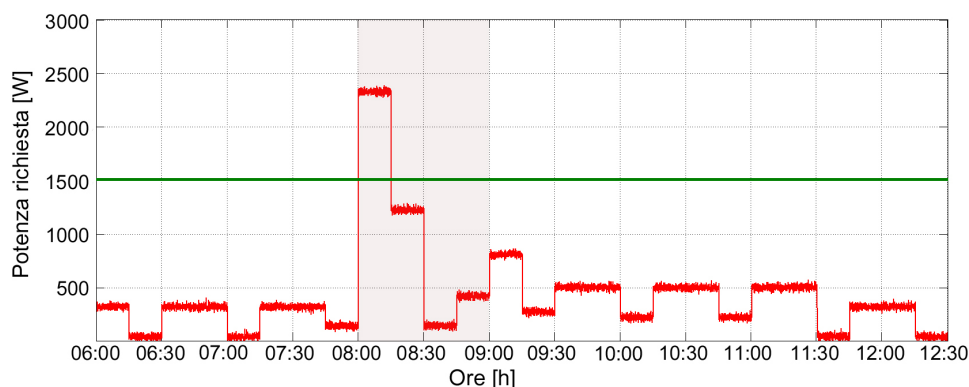


Figura 5.12: Risultato simulazione dello Scenario 4: lavatrice attivata alle 07:45 e soglia non rispettata

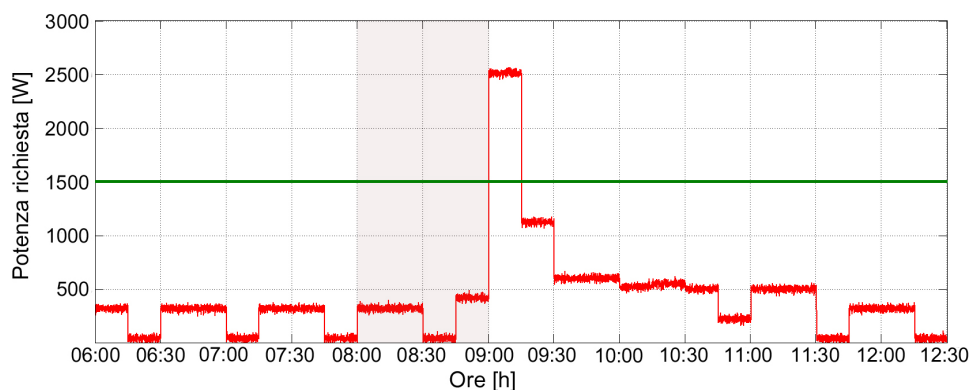


Figura 5.13: Risultato simulazione dello Scenario 8: lavatrice attivata alle 08:45 e soglia rispettata

### Presentazione dei risultati all'utente

Come indicato all'interno della sezione 4.4 della tesi, al termine della simulazione di ciascuno scenario, il sistema si avvale di un database MySQL online per poter salvare i risultati delle simulazioni, quali i file di configurazione della rete e i grafici di interesse, per tutti quegli scenari dove i consumi risultino al di sotto del valore di soglia indicato nella richiesta di riduzione energetica. Le informazioni permarranno dunque nella base di dati venendo a formare un *archivio* di casi d'uso che l'utente può facilmente consultare, ad esempio tramite una semplice interfaccia web, prima dell'inizio del periodo di riduzione. L'intento è infatti quello di fornire all'utente uno strumento per poter partecipare in maniera coscienziosa al programma di riduzione proposto dal servizio aggregato di Domanda e Risposta, pianificando i propri consu-

mi con un certo anticipo rispetto all'attivazione del programma stesso. Il sistema dunque presenta all'utente i grafici dei consumi per ogni scenario e la trasposizione del file JSON di configurazione in un diagramma di Gantt in forma grafica in modo da illustrare all'utente i tempi di attivazione dei singoli dispositivi in maniera intuitiva (Figura 5.14).

Come detto in precedenza, gli scenari proposti sono basati sulla storia di utilizzo e sulle caratteristiche della sua rete domestica e rappresentano delle indicazioni d'uso facoltative. L'utente infatti può liberamente scegliere se partecipare o meno al programma di riduzione proposto dall'Aggregatore e successivamente se seguire o meno uno degli scenari creati dal sistema.

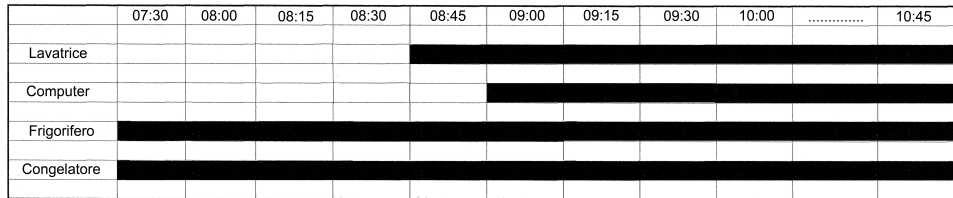


Figura 5.14: Diagramma di Gantt relativo allo scenario 8



### 5.1.2 Secondo caso di studio: Famiglia

Il secondo caso di studio presentato illustra un possibile utilizzo del sistema da parte di un modello di utenza che rappresenta una famiglia con più di un figlio presente nell'unità abitativa. Si è scelto dunque un profilo di utenza diametralmente opposto rispetto a quello considerato nel caso di studio precedente sia per mostrare il funzionamento del sistema in un caso più completo sia perchè questa particolare tipologia di utenza presenta dei consumi energetici generalmente molto elevati e una complessa rete di elettrodomestici, rendendola di fatto uno dei principali soggetti che potrebbero maggiormente beneficiare dei meccanismi della domanda attiva e dell'utilizzo di un software di gestione dell'energia in ambito residenziale.

#### Definizione della rete e caratteristiche dei dispositivi

La rete domestica dell'utenza considerata è caratterizzata dalla presenza di un elevato numero di elettrodomestici appartenenti ad entrambe le categorie dei carichi non controllabili e controllabili. Per quanto riguarda quest'ultima categoria e in particolare quella dei dispositivi controllabili nel tempo, si riportano i risultati ottenuti dal sondaggio proposto per la tipologia di utenza considerata (Figura 5.15).

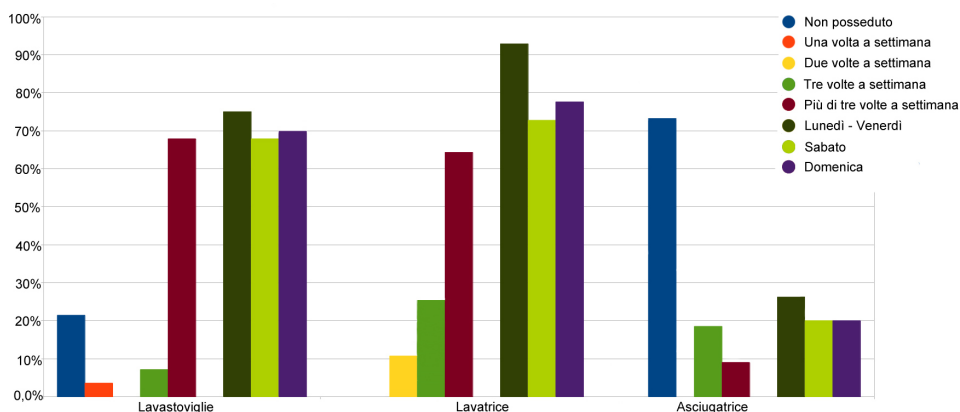


Figura 5.15: Risultati sondaggio per il profilo "Famiglia con più di un figlio"

Dal grafico si evince che, anche in questo caso, gli elettrodomestici più diffusi risultano essere la lavatrice, posseduta dalla totalità degli utenti coinvolti, e la lavastoviglie (circa l'80% delle utenze) mentre l'asciugatrice presenta una percentuale maggiore rispetto al caso

Elettrodomestico	Frequenza Settimanale	Energia [kWh]
Lavatrice	Più di tre volte a settimana	0,89
Lavastoviglie	Più di tre volte a settimana	1,19
Asciugatrice	Tre volte a settimana	2,46
Televisione	Più di tre volte a settimana	0,26
Computer portatile (2)	Più di tre volte a settimana	0,104
Forno elettrico	Tre volte a settimana	0,45
Condizionatore d'aria	Più di tre volte a settimana	1,37
Illuminazione	Ciclo continuo	2,04
Frigorifero	Ciclo continuo	0,79
Congelatore	Ciclo continuo	1,1

Tabella 5.10: Dispositivi della rete dell'utente

precedente essendo posseduta dal 25% delle utenze interrogate. Si è scelto dunque di introdurre nella rete tutti e tre i dispositivi suddetti, con frequenze di utilizzo di oltre tre volte a settimana per i primi due casi e di tre volte a settimana per l'asciugatrice, la quale, pur essendo presente in minori percentuali, permette di presentare un caso di studio più completo. La rete, oltre ai tre elettrodomestici sopraccitati, presenterà inoltre elettrodomestici di uso comune dei quali sono noti i profili di potenza del loro ciclo di funzionamento [16, 80]. La Tabella 5.10 mostra l'insieme dei dispositivi che formano la rete dell'utente, indicando la frequenza settimanale di utilizzo e l'energia di richiesta per il loro ciclo di funzionamento, i cui valori si riferiscono ad un profilo di carico medio rappresentativo per ogni tipologia di elettrodomestico principalmente riportati nel progetto Smart-A [16] e i cui dettagli sono presentati nell'Appendice B della tesi.

Tali informazioni sui cicli di funzionamento dei dispositivi e sulle loro richieste energetiche sono codificate all'interno dei file di configurazione degli elettrodomestici che verranno utilizzati successivamente dalla piattaforma EA-SIM per la creazione dei moduli SystemC necessari alla simulazione del comportamento energetico dell'intera rete domestica. Le informazioni sulle frequenze di attivazioni settimanali, invece, sono utilizzate per la creazione della cronologia di utilizzo degli elettrodomestici che verrà elaborata dall'algoritmo di apprendimento per apprendere le abitudini dell'utente. Come per il caso di studio precedente, in base alle informazioni ricavate dal questionario proposto è stato possibile specificare tale frequenza indicando se i dispositivi saranno attivati

infrasettimanalmente o durante il fine settimana. Per i dispositivi non coinvolti nel questionario e che non presentano un ciclo di funzionamento continuo, quali il televisore, il computer portatile o il forno elettrico, tali occorrenze sono state ipotizzate ragionevolmente in relazione al profilo di utenza considerato.

Per la creazione della cronologia dell'utilizzo di rete, oltre alle frequenze settimanali, ci si è avvalsi delle funzioni di probabilità di attivazione degli elettrodomestici durante l'arco della giornata, il cui andamento mostra la maggiore o minore probabilità che un dispositivo sia utilizzato in un'ora specifica [16].

Si riportano le funzioni di probabilità relative all'utilizzo di una lavastoviglie (Figura 5.16) e di un'asciugatrice (Figura 5.17) dove sull'asse delle ascisse sono indicate le ore relative ad una giornata mentre sull'asse delle ordinate sono riportati i valori di probabilità di attivazione dell'elettrodomestico considerato del caso di studio precedente).

Come descritto precedentemente, tali curve insieme a quelle relative

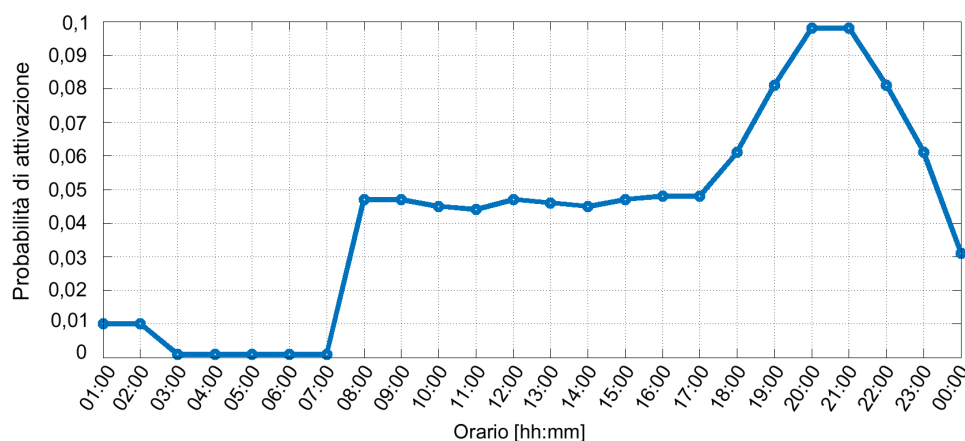


Figura 5.16: Funzione densità di probabilità di attivazione di una lavastoviglie

agli altri elettrodomestici presenti e alle loro frequenze di utilizzo settimanali sono codificate nei file CSV di configurazioni necessari all'algoritmo di apprendimento per creare la cronologia di utilizzo di rete e alla piattaforma EA-SIM per creare i moduli necessari alla simulazione. In Figura 5.18 si mostra il file di configurazione *network-description.json* contenente le definizioni di rete per l'utenza proposta e in particolare le voci relative alle caratteristiche degli elettrodomestici lavatrice, lavastoviglie e asciugatrice.

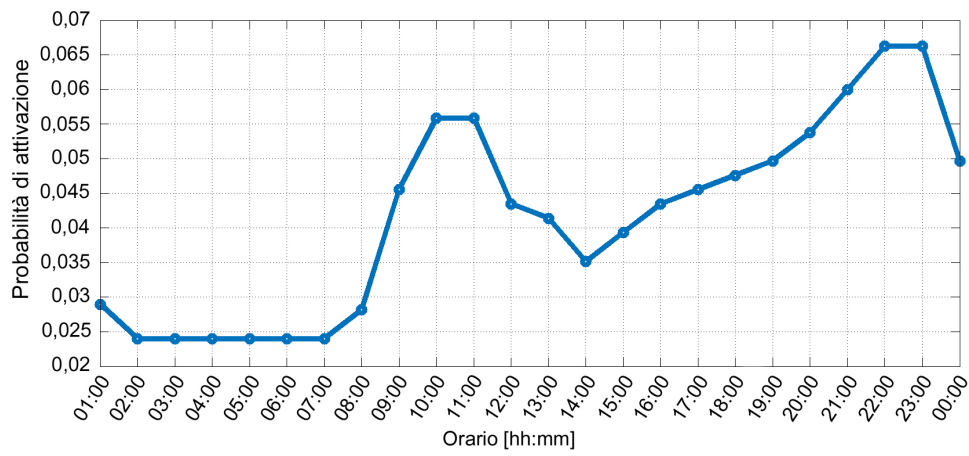


Figura 5.17: Funzione densità di probabilità di attivazione di un'asciugatrice

```

"appliances" : [
  {
    "id" : "appliance_0",
    "Name" : "Lavatrice",
    "Cycle" : "7200",
    "WeekFrequency" : "2",
    "WeekEndFrequency" : "2"
  },
  {
    "id" : "appliance_1",
    "Name" : "Lavastoviglie",
    "Cycle" : "7200",
    "WeekFrequency" : "2",
    "WeekEndFrequency" : "2"
  },
  {
    "id" : "appliance_2",
    "Name" : "Asciugatrice",
    "Cycle" : "7200",
    "WeekFrequency" : "2",
    "WeekEndFrequency" : "1"
  },
  .....

```

Figura 5.18: File di configurazione della rete network-description.json

### Apprendimento dell'utilizzo della rete

A partire dalle informazioni relative alle frequenze settimanali e alle probabilità giornaliere di attivazione, il sistema è in grado dunque di creare la cronologia di utilizzo della rete per l'utente considerato.

Nel caso di studio specifico, al fine effettuare una comparazione effettiva tra i due esempi di utilizzo proposti, si è scelto un uguale periodo, pari a tre settimane, per la creazione delle cronologia e per l'apprendimento da parte dell'algoritmo delle abitudini dell'utenza. Nelle Tabelle 5.11, 5.12 e 5.13 si mostrano i tempi di attivazione riscontrati nella cronologia rispettivamente durante la prima, la seconda e la terza settimana di utilizzo. Esse fanno riferimento agli elettrodomestici di maggiore interesse presenti nella rete dell'utente, quali la lavastoviglie, la lavatrice e l'asciugatrice, appartenenti alla categoria dei carichi il cui istante di attivazione può essere modificato nel tempo. Non si riportano i tempi degli elettrodomestici a ciclo continuo poichè essi sono attivi nell'arco dell'intera giornata e saranno sempre presenti all'interno delle previsioni future.

A partire dalla cronologia di utilizzo dunque, l'algoritmo di ap-

Giorni	Intervalli di attivazione		
	Lavastoviglie	Lavatrice	Asciugatrice
Lunedì	09-10	20-21	22-23
Martedì	Non attivo	18-19	Non attivo
Mercoledì	Non attivo	Non attivo	11-12
Giovedì	19-20	15-16	Non attivo
Venerdì	12-13	Non attivo	Non attivo
Sabato	Non attivo	Non attivo	Non attivo
Domenica	20-21	08-09	21-22

Tabella 5.11: Dati della cronologia di utilizzo della rete per le prime tre settimane

prendimento andrà ad incrementare, secondo le modalità descritte nel capitolo precedente considerato, i punteggi (*scores*) per ogni dispositivo presente, relativi sia ai giorni della settimana nei quali il dispositivo è stato utilizzato sia agli intervalli di tempo di attivazione per quello specifico giorno.

In particolare nell'elaborazione dei punteggi relativi ai giorni settimanali, essendo il periodo di addestramento uguale all'esempio precedente,

Giorni	Intervalli di attivazione		
	Lavastoviglie	Lavatrice	Asciugatrice
Lunedì	08-09	12-13	12-13
Martedì	17-18	08-09	Non attivo
Mercoledì	Non attivo	Non attivo	Non attivo
Giovedì	20-21	Non attivo	17-18
Venerdì	Non attivo	18-19	Non attivo
Sabato	Non attivo	Non attivo	20-21
Domenica	09-10	21-22	Non attivo

Tabella 5.12: Dati della cronologia di utilizzo della rete per le prime tre settimane

Giorni	Intervalli di attivazione		
	Lavastoviglie	Lavatrice	Asciugatrice
Lunedì	09-10	20-21	08-09
Martedì	Non attivo	Non attivo	Non attivo
Mercoledì	20-21	14-15	21-22
Giovedì	Non attivo	Non attivo	Non attivo
Venerdì	08-09	08-09	Non attivo
Sabato	12-13	19-20	Non attivo
Domenica	Non attivo	Non attivo	10-11

Tabella 5.13: Dati della cronologia di utilizzo della rete per le prime tre settimane

anche per il caso di studio in esame si è selezionato il valore  $\alpha = 0,2$  con un conseguente fattore di decadimento  $\delta = 0,8$ .

Nelle Figure 5.19, 5.21 e 5.20 si riportano i valori dei punteggi relativi ai giorni della settimana alla fine dell'analisi della cronologia creata per il periodo di interesse.

Per quanto concerne la lavatrice, si nota come nel caso di studio in esame, i punteggi risultino maggiormente distribuiti rispetto all'esempio precedente, dove si riscontravano tre giorni settimanali nei quali il dispositivo non risultava attivo (Figura 5.5). Ciò è dovuto al fatto che l'elettrodomestico in questione possiede una maggiore frequenza di utilizzo rispetto al suo modello per l'utenza del caso di studio passato, aumentando dunque la sua probabilità di attivazione nei diversi giorni della settimana.

Per la lavatrice, il punteggio maggiore viene riscontrato per il giorno di Venerdì dove è stata attivata due volte dall'utenza. Il Lunedì risulta essere invece il giorno con maggiore frequenza di utilizzo, ovverosia dove l'elettrodomestico è stato sempre attivato durante il periodo considerato, presentando però un punteggio finale inferiore al Venerdì. Infatti dall'analisi della cronologia si nota come i dati dell'attivazione della lavatrice nel Venerdì sono tra gli ultimi dati ad essere riscontrati dall'algoritmo, e dunque tra i più recenti nella cronologia, mentre i dati del Lunedì sono andati lentamente decadendo nel tempo risultando dunque in un punteggio finale minore. L'ultimo dato relativo all'attivazione dell'elettrodomestico è riscontrato nel Sabato dell'ultima settimana e, non essendo mai stato selezionato precedentemente come giorno di attivazione, il suo punteggio finale risulta pari al valore di  $\alpha$  e dunque piuttosto elevato.

Analizzando la cronologia e i punteggi relativi alle attivazioni della

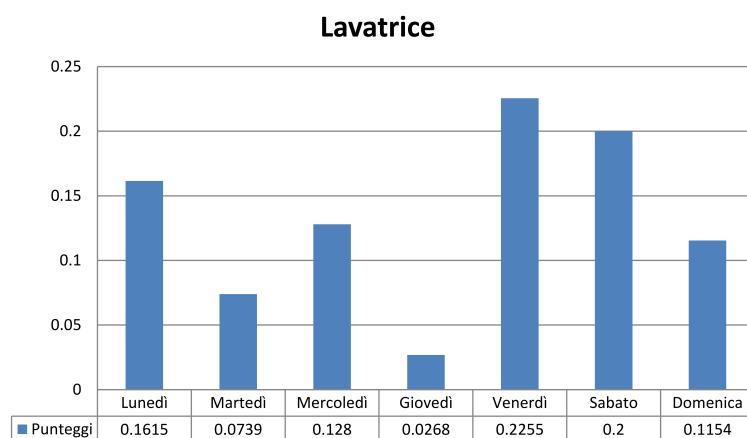


Figura 5.19: Punteggi relativi ai giorni di attivazione della lavatrice

lavastoviglie, il di Lunedì risulta essere il giorno con la maggior frequenza di utilizzo nell'arco del periodo di apprendimento, ma presenta un punteggio minore rispetto ai giorni di Venerdì e Sabato, essendo questi gli l'ultimi due dati registrati dall'algoritmo durante l'analisi della cronologia e dunque con una rilevanza maggiore.

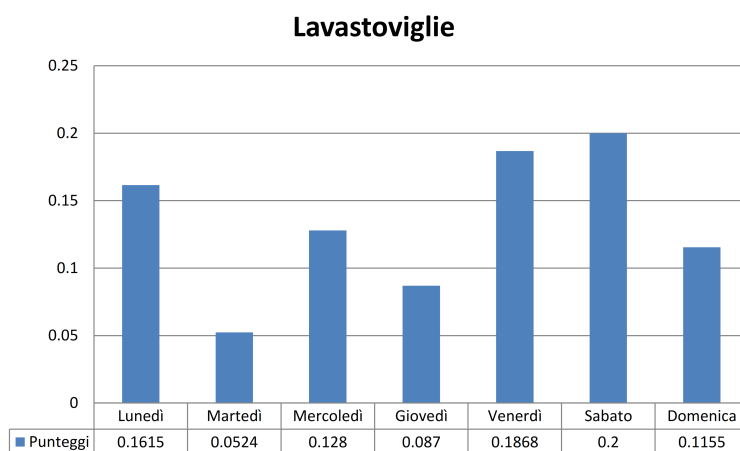


Figura 5.20: Punteggi relativi ai giorni di attivazione della lavastoviglie

Infine per quanto riguarda l'asciugabiancheria, essa è stata utilizzata maggiormente il Lunedì, ma, come nel caso della lavatrice, tale giorno presenta un punteggio inferiore al giorno della Domenica poiché quest'ultimo, oltre a ricorrere con una certa frequenza nella cronologia, risulta essere il dato più recente acquisito dall'algoritmo e presenterà il punteggio finale più elevato. Il dispositivo non risulta inoltre essere stato utilizzato nei giorni di Martedì e Venerdì che presentano dunque un punteggio nullo.

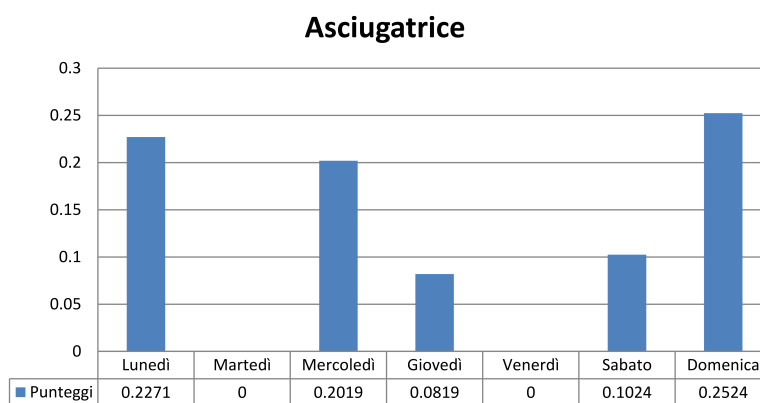


Figura 5.21: Punteggi relativi ai giorni di attivazione dell'asciugatrice

Come descritto nel capitolo precedente, parallelamente all'aggiornamento dei punteggi relativi ai giorni settimanali di attivazione dei dispositivi, l'algoritmo incrementerà, per ogni giorno riscontrato nella



cronologia, i punteggi relativi agli intervalli orari di utilizzo. Analogamente alla procedura effettuata per i giorni l'algoritmo moltiplicherà per il fattore di decadimento  $\delta$  i valori passati degli intervalli orari di un giorno specifico, andando ad incrementare: del valore  $\alpha$  il punteggio dell'intervallo orario riscontrato nella cronologia di utilizzo e del valore del *fattore di bordo*  $\beta$  i punteggi relativi all'intervallo precedente e successivo a quello selezionato. I valori dei fattori  $\alpha$  e  $\delta$  sono uguali ai valori scelti per incrementare i punteggi dei giorni settimanali, mentre per il fattore di bordo, come nel caso di studio precedente, si è scelto il valore  $\beta = 0,7$ .

In Figura 5.22 si riportano i punteggi relativi alle ore di attivazione della lavatrice riscontrati durante l'analisi della cronologia di utilizzo della rete. Coerentemente con i risultati derivanti dell'analisi dei giorni di utilizzo dell'elettrodomestico e con la sua funzione densità di probabilità (Figura 5.2) i periodi di attivazione si concentrano maggiormente durante le ore serali dove il massimo punteggio è relativo agli intervalli orari del Lunedì, essendo questo il giorno con maggiori ricorrenze nella cronologia di utilizzo per l'elettrodomestico in questione. In particolare l'intervallo che va dalle ore 20:00 alle ore 21:00 presenta un punteggio maggiore rispetto all'altro intervallo selezionato per il medesimo giorno (12:00-13:00) essendo quest'ultimo meno recente e frequente del primo nella serie storica e dunque maggiormente soggetto al fattore di decadimento  $\delta$ .

Analogamente, i punteggi relativi alla lavastoviglie (Figura 5.23) risultano anch'essi maggiori nella giornata di Lunedì dove l'elettrodomestico è stato attivato in ogni ricorrenza di tale giorno negli intervalli orari 09:00-10:00 e 08:00-09:00. Il maggior punteggio è dunque riscontrabile in corrispondenza del primo dei due intervalli il quale, oltre ad essere il più frequente e l'ultimo ad essere selezionato, giova di un ulteriore incremento, pari al fattore di bordo  $\beta$ , dovuto alla selezione del secondo intervallo temporale nell'analisi della cronologia di attivazione riferita al Lunedì.

I valori dei punteggi risultanti per gli intervalli orari di attivazione dell'asciugatrice (Figura 5.24) si presentano invece piuttosto uniformi. Ciò è dovuto al fatto che, sebbene lo stesso giorno ricorra più volte all'interno della cronologia, tale elettrodomestico è stato attivato in orari distinti nell'arco della medesima giornata.

I punteggi maggiori sono dunque riscontrabili in corrispondenza degli ultimi intervalli orari selezionati per uno specifico giorno e che dunque non sono stato soggetti al fattore decadimento dei dati.

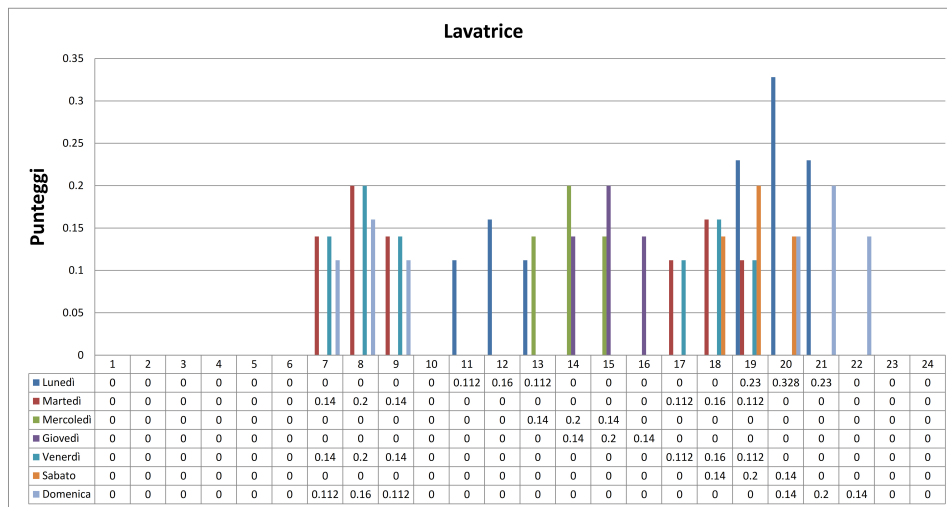


Figura 5.22: Punteggi relativi alle ore di attivazione della lavatrice dell'utente

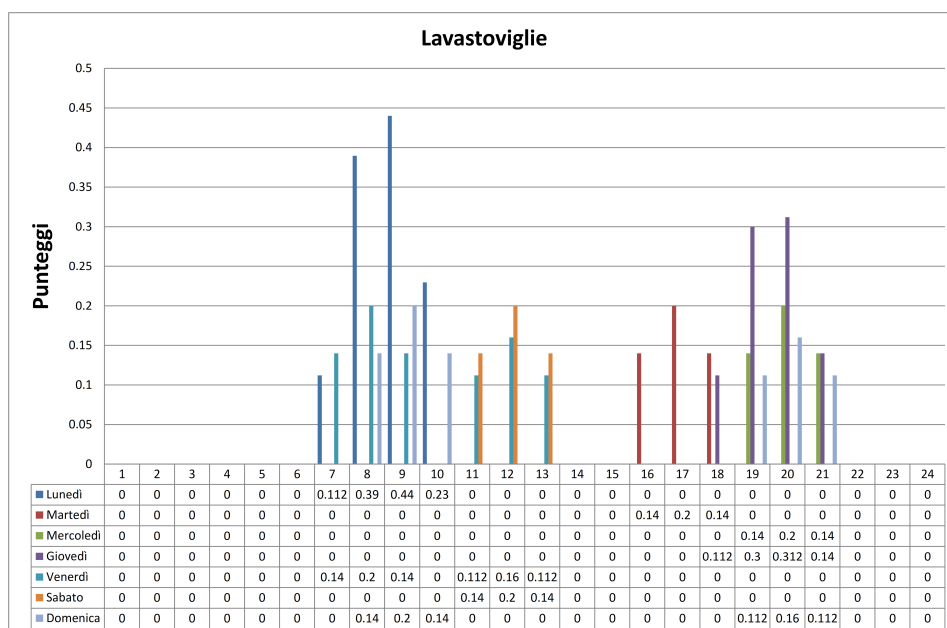


Figura 5.23: Punteggi relativi alle ore di attivazione della lavastoviglie dell'utente

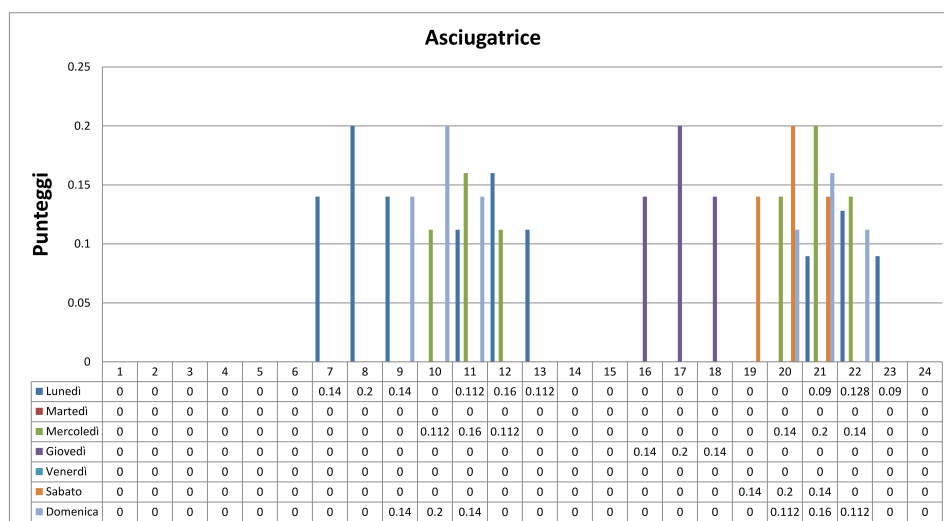


Figura 5.24: Punteggi relativi alle ore di attivazione dell'asciugatrice dell'utente

### Richiesta di riduzione da parte dell'Aggregatore

Per il caso di studio in esame, ipotizziamo l'invio da parte del servizio aggregato di Domanda e Risposta della richiesta di riduzione energetica mostrata in Tabella 5.14, dove si chiede dunque all'utente di mantenere i propri consumi al di sotto della soglia di 2,5 kW per il medesimo periodo selezionato precedentemente, che va dalle ore 08:00 alle ore 09:00 di Lunedì 6 Ottobre 2014 e che verrà ricevuta il giorno precedente. Se durante il periodo richiesto l'utente dovesse riuscire a rispettare la soglia indicata, verrà rimborsato dal gestore della distribuzione di 0,2 € per ogni kWh di l'energia effettivamente consumata durante l'intervallo di tempo designato.

A differenza del caso di studio precedente, si è scelto di aumentare il livello di soglia richiesto dal servizio aggregato di 1 kW. Risulta infatti ragionevole supporre che le entità delle riduzioni richieste siano dimensionate in base all'uso effettivo della rete e dunque ai consumi dell'utenza, dove a consumi generalmente contenuti corrisponderanno valori di soglia minori e, viceversa, alle utenze che presentano dei consumi usualmente elevati corrisponderanno dei valori di soglia maggiori.

Richiesta di riduzione energetica	
ID utente	02
ID messaggio	42
Tempo di attivazione	08:00 - 03/11/2014
Durata	60 minuti
Livello di soglia	2,5 kW
Remunerazione	0,2 € /kWh

Tabella 5.14: Richiesta di riduzione energetica pervenuta all'utenza considerata

### Previsione di utilizzo della rete

Ricevendo la richiesta di riduzione contenente i parametri illustrati nella Tabella 5.14, il sistema procede dunque ad effettuare la previsione dell'utilizzo degli elettrodomestici dell'utente per il giorno designato attraverso l'uso dei fattori di scala  $\tau_d$  e  $\tau_h$ .

Come affermato nella precedente sezione la scelta dei valori di scala deve essere posta in relazione alla durata della fase di addestramento del sistema e alla frequenza di utilizzo media dei dispositivi presenti, preferendo dei valori di  $\tau_d$  e  $\tau_h$  maggiori per periodi di addestramento più lunghi e con alte frequenze di utilizzo degli elettrodomestici, e valori minori per periodi più contenuti e con basse frequenze settimanali. Per la determinazione dei valori di soglia utilizzati nella selezione dei giorni settimanali e degli intervalli di attivazione, essendo il periodo di addestramento selezionato uguale nei due casi di studio ma riscontrando una frequenza settimanale dei dispositivi significativamente maggiore, sono stati selezionati, per il caso corrente, i seguenti valori  $\tau_d = 0,7$  e  $\tau_h = 0,8$ , i quali moltiplicati per i massimi valori contenuti nelle rispettive strutture dati, forniscono, per ogni elettrodomestico, i valori di soglia di interesse.

Valori di soglia ( $\tau_d = 0,5$ e $\tau_h = 0,6$ )		
Elettrodomestico	Soglia giorni	Soglia intervalli
Lavastoviglie	0,1	0,264
Lavatrice	0,1127	0,197
Asciugatrice	0,1262	0,12
Valori di soglia ( $\tau_d = 0,7$ e $\tau_h = 0,8$ )		
Elettrodomestico	Soglia giorni	Soglia intervalli
Lavastoviglie	0,14	0,352
Lavatrice	0,1578	0,2624
Asciugatrice	0,1767	0,16

Tabella 5.15: Confronto valori di soglia per i giorni settimanali e per gli intervalli temporali relativi al giorno di Lunedì

In Tabella 5.15 si mostra il confronto tra i valori delle soglie relative ai giorni settimanali e agli intervalli di attivazione per il giorno di Lunedì, in base ai valori attribuiti ai fattori  $\tau_d$  e  $\tau_h$ . Come previsto, per il caso di studio in esame, si ottengono dei livelli di soglia più restrittivi

Previsioni per il Lunedì( $\tau_d = 0,5$ e $\tau_h = 0,6$ )	
Elettrodomestico	Intervallo orario
Lavastoviglie	08:00 - 10:00
Lavatrice	19:00 - 22:00
Asciugatrice	07:00 - 10:00
	12:00 - 13:00
	22:00 - 23:00

Previsioni per il Lunedì( $\tau_d = 0,7$ e $\tau_h = 0,8$ )	
Elettrodomestico	Intervallo orario
Lavastoviglie	08:00 - 10:00
Lavatrice	20:00 - 21:00
Asciugatrice	08:00 - 09:00
	12:00 - 13:00

Tabella 5.16: Confronto delle previsioni effettuate

rispetto all'esempio precedente, risultando quindi in una previsione più specifica da parte dell'algoritmo per il giorno del Lunedì.

In Tabella 5.16 si mostrano gli intervalli di attivazione relativi agli elettrodomestici di maggior interesse per il caso di studio in esame, appartenenti alla categoria dei carichi controllabili nei tempi di attivazione. Tale previsione è confrontata con quella ottenibile selezionando i fattori di scala del caso di studio precedente e utilizzando i valori di soglia che ne conseguono. Dalla tabella si evince che tutti e tre gli elettrodomestici in esame saranno attivi nell'arco della giornata insieme ad altri dispositivi ugualmente previsti e a tutti gli elettrodomestici che presentano un ciclo di funzionamento continuativo, ovvero sia il frigorifero, il congelatore, il componente rappresentante l'illuminazione dell'ambiente domestico.

Si noti come l'intervallo predetto per la lavatrice, in entrambe le previsioni, non ricada all'interno dell'intervallo di tempo esplicitato nella richiesta e dunque non sarà considerato, in questo contesto, durante la creazione degli scenari di utilizzo della rete. Inoltre, trovandosi al di fuori della cosiddetta *fascia oraria arancione* (o *F1*) caratterizzata dal massimo costo dell'energia e che comprende un periodo che va dal Lunedì al Venerdì dalle 08:00 alle 19:00, tale intervallo risulta conveniente per l'attivazione della lavatrice durante l'arco giornata.

Nelle due previsioni gli intervalli previsti per la lavastoviglie e l'asciugatrice invece, ricadono ambedue all'interno dell'intervallo critico. Mentre in entrambi i casi l'intervallo predetto per la lavastoviglie rimane immutato, per l'asciugabiancheria si può notare come, utilizzando i valori di  $\tau_d = 0,5$  e  $\tau_h = 0,6$  relativi al caso di studio precedente, il sistema abbia predetto tre intervalli di utilizzo per il giorno di Lunedì (Tabella 5.16). Utilizzando dei valori di soglia più restrittivi sono stati invece selezionati due intervalli di tempo distinti e della durata di un'ora ciascuno. Analizzando infatti i punteggi relativi ai tempi di attivazione dell'elettrodomestico in questione, mostrati in Figura 5.24, si vede come i punteggi che superano il valore di soglia si riferiscano ai singoli intervalli identificati con 8 e 12, dove quest'ultimo pur venendo incluso nella predizione non sarà considerato al fine della creazione degli scenari d'uso in questo contesto, poichè l'attivazione del dispositivo ricade al di fuori dell'intervallo di interesse.

Data la predizione dunque, l'algoritmo memorizza i dispositivi e i loro intervalli di funzionamento all'interno di un file di tipo JSON strutturato come un rappresentazione di un diagramma di Gantt (Figura 5.25(a)) e nel file di definizione della rete (Figura 5.25(b)) i quali verranno utilizzati dalla piattaforma EA-SIM per simulare il comportamento energetico della rete prevista.

Per completezza in Tabella 5.17 si mostrano i risultati delle previsioni effettuate per il Lunedì dall'algoritmo per gli altri elettrodomestici presenti all'interno della rete domestica e che non posseggono un ciclo di funzionamento continuo nell'arco della giornata.

Elettrodomestico	Intervallo orario
Televisione	13:00 - 14:00
Computer_1	Non attivo
Computer_2	17:00 - 18:00
Condizionatore d'aria	Non attivo
Forno elettrico	19:00 - 20:00

Tabella 5.17: Confronto delle previsioni effettuate

```

"appliance_0": [
  {
    "continuous": "FALSE",
    "elastic": "TRUE",
    "from": "20:00",
    "to": "21:00"
  }
],
"appliance_1": [
  {
    "continuous": "FALSE",
    "elastic": "TRUE",
    "from": "08:00",
    "to": "10:00"
  }
],
"appliance_2": [
  {
    "continuous": "FALSE",
    "elastic": "TRUE",
    "from": "08:00",
    "to": "09:00"
  }
],
"appliance_3": [
  {
    "continuous": "FALSE",
    "elastic": "TRUE",
    "from": "12:00",
    "to": "13:00"
  }
]
}

"appliances": [
  {
    "id": "appliance_0",
    "Name": "Lavatrice",
    "Cycle": "7200",
  },
  {
    "id": "appliance_1",
    "Name": "Lavastoviglie",
    "Cycle": "7200",
  },
  {
    "id": "appliance_2",
    "Name": "Asciugatrice",
    "Cycle": "7200",
  },
  .....
  {
    "id": "appliance_n-1",
    "Name": "Frigorifero",
    "Cycle": "86400",
  },
  {
    "id": "appliance_n",
    "Name": "Congelatore",
    "Cycle": "86400",
  }
]

```

(a) gantt.json                      (b) network-description.json

Figura 5.25: Esempi dei due file di configurazione della rete

### Creazione degli scenari d'uso

Utilizzando i file JSON prodotti dall'algoritmo, il sistema creerà dunque diversi file di configurazione gantt.json (Figura 5.25(a)) contenenti tutte le possibili configurazioni dei tempi di attivazione dei dispositivi appartenenti alla categoria degli elettrodomestici spostabili nel tempo, dilazionati all'interno dell'intervallo predetto precedentemente. Nel caso specifico gli unici elettrodomestici appartenenti a tale categoria e il cui intervallo di attivazione ricade all'interno del periodo critico sono la lavastoviglie e l'asciugatrice, la prima prevista per l'intervallo 08:00-10:00 mentre la seconda per l'intervallo 08:00-09:00 coincidente dunque con il periodo di riduzione.

Selezionando un ritardo di attivazione crescente in multipli 15 minuti, il sistema creerà un totale di quarantacinque scenari d'utilizzo della rete, dei quali venticinque interessano l'intervallo di riduzione e sono



riportati nella Tabella 5.18, e ulteriori venti scenari si riferiscono al sottointervallo 09:15-10:00 del tempo di attivazione della lavastoviglie i quali, ricadendo al di fuori del periodo critico, non sono d'interesse all'analisi del caso d'uso in esame. Ad ognuno degli scenari illustrati corrisponderà dunque un unico file di configurazione del tipo illustrato in Figura 5.25(a) contenente i dati attivazione specifici per gli elettrodomestici, mentre il file di descrizione della topologia di rete, prodotto dall'algoritmo al passo precedente a valle della predizione, è comune a tutti gli scenari d'uso creati.

Scenario d'uso	Inizio ciclo lavastoviglie	Inizio ciclo asciugatrice
Scenari 1-5	08:00	8:00
		8:15
		8:30
		8:45
		9:00
Scenari 6-10	08:15	8:00
		8:15
		8:30
		8:45
		9:00
Scenari 11-15	08:30	8:00
		8:15
		8:30
		8:45
		9:00
Scenari 16-20	08:45	8:00
		8:15
		8:30
		8:45
		9:00
Scenari 21-25	09:00	8:00
		8:15
		8:30
		8:45
		9:00

Tabella 5.18: Scenari d'uso ottenuti ritardando l'attivazione del ciclo di funzionamento degli elettrodomestici all'interno dell'intervallo critico

### Simulazioni energetiche dei casi d'uso generati

Nelle Figure 5.26 e 5.27 si mostrano i consumi di potenza medi rispettivamente di una lavastoviglie e di un'asciugatrice durante il loro ciclo di funzionamento [16]. Come descritto nella sezione 4.2 della tesi, tali curve insieme a quelle relative agli altri elettrodomestici presenti, sono codificate all'interno di file di tipo CSV che vengono interpretati dalla piattaforma di simulazione per scrivere il codice sorgente del modulo SystemC corrispondente e dunque per descriverne il comportamento energetico per la durata della simulazione.

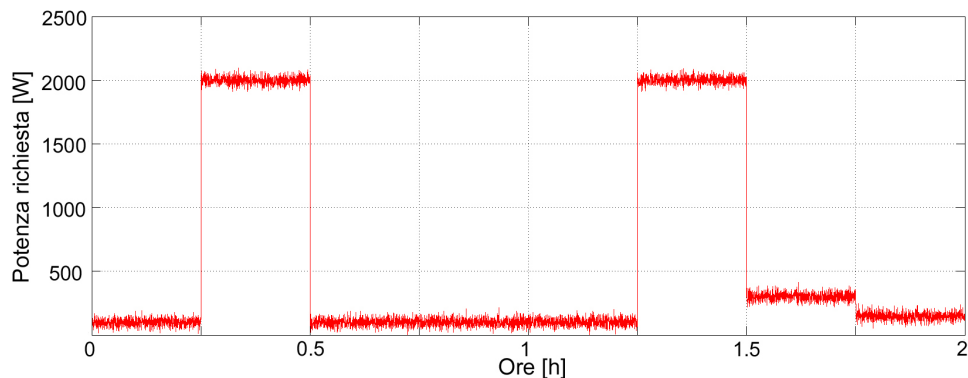


Figura 5.26: Profilo di potenza medio di una lavastoviglie

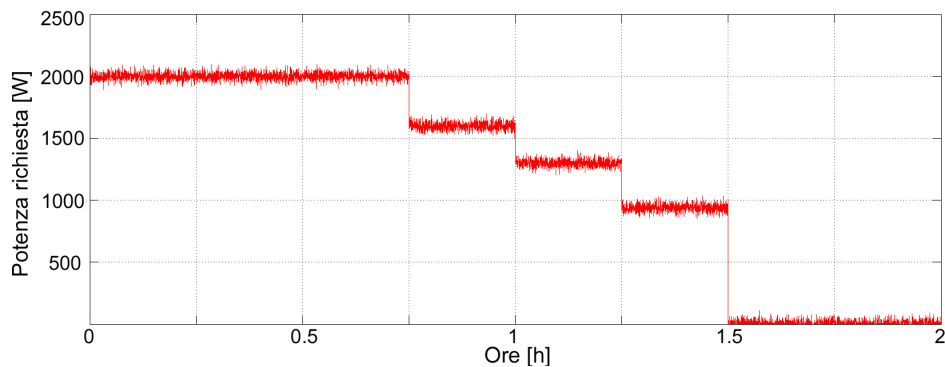


Figura 5.27: Profilo di potenza medio di un'asciugatrice

Si noti come il grafico relativo al funzionamento della lavastoviglie siano presenti due picchi di potenza pari a circa 2,0 kW che, nel caso di studio specifico, se dovessero ricadere all'interno dell'intervallo richiesto dal servizio aggregato, porterebbero l'utente ad elevare i propri consumi vicino al livello di soglia compromettendo il soddisfacimento

della richiesta.

Analogamente l'asciugatrice presenta un ciclo di funzionamento molto oneroso dal punto di vista energetico, circa 2,46 kWh [16], presentando elevate richieste per i primi tre quarti d'ora di utilizzo che vanno decrescendo a intervalli di circa quindici minuti fino alla fine del ciclo. Risulta evidente che, se combinati, i due cicli di funzionamento potrebbero portare il livello di consumo energetico non solo oltre la soglia di 2.5 kW prevista dalla richiesta dell'Aggregatore, ma anche al di sopra della potenza contrattuale di 3,3 kW che caratterizza le tipologie di contratti più diffusi nel contesto residenziale, causando un'interruzione del servizio da parte del gestore della distribuzione energetica [33].

Il sistema procede dunque effettuando le simulazioni di ogni scenario d'uso previsto per il giorno di Lunedì, inviando alla piattaforma di simulazione EA-SIM i file di configurazione generati e informazioni sull'intervallo temporale e sul livello di soglia presenti all'interno della richiesta di riduzione energetica. Per il caso di studio proposto, il flusso di esecuzione complessivo, comprendente sia la fase di apprendimento e previsione sia la simulazione degli scenari d'uso creati e l'interazione con la base di dati, ha mostrato un tempo di esecuzione di circa 15 minuti su un calcolatore che utilizza un processore single-core AMD Sempron 3800+ a 64 bit (2.2 GHz di frequenza di clock, 128 KB di memoria cache L1 e 256 KB di memoria cache L2 [82]) e che presenta 2 GB di memoria RAM DDR2 con un utilizzo approssimativamente del 48% durante l'esecuzione del processo.

Nella parte superiore della Tabella 5.19 sono evidenziati gli scenari d'uso la cui simulazione ha dato un esito positivo, ovvero tutti quegli scenari dove i consumi risultanti si sono mantenuti al di sotto della soglia richiesta, mentre nella parte inferiore sono presenti tutti gli scenari dove il livello di soglia non è stato rispettato durante il tempo di simulazione.

Con riferimento agli scenari con esito positivo, pur nonostante rispettino il livello di soglia richiesto dal servizio aggregato, la maggior parte di essi sono da considerare come scenari *a rischio*. Dopo il periodo interessato dalla riduzione infatti, accade che i due cicli si sovrapporranno nel loro momento di massima richiesta energetica, superando così la potenza contrattuale di 3,3 kW e portando ad un distacco dalla rete imposto dal gestore della distribuzione.

Scenario	Inizio lavastoviglie	Inizio asciugatrice
Scenario 3	08:00	08:30
Scenario 4	08:00	08:45
Scenario 5	08:00	09:00
Scenario 9	08:15	08:45
Scenario 10	08:15	09:00
Scenario 15	08:30	09:45
Scenari 16-20	08:45	8:00
		8:15
		8:30
		8:45
		9:00
Scenari 21-25	09:00	8:00
		8:15
		8:30
		8:45
		9:00

Scenario	Inizio lavastoviglie	Inizio asciugatrice
Scenario 1	08:00	08:00
Scenario 2	08:00	08:15
Scenario 6	08:15	08:00
Scenario 7	08:15	08:15
Scenario 8	08:15	08:30
Scenario 11	08:30	08:00
Scenario 12	08:30	08:15
Scenario 13	08:30	08:30
Scenario 14	08:30	08:45

Tabella 5.19: Divisione degli scenari d'uso in base ai loro risultati: in alto si mostrano gli scenari dove i consumi risultanti rispettano la soglia richiesta, in basso quelli in cui i consumi superano tale soglia

Analizzando i grafici del profilo di potenza dei due elettrodomestici (Figure 5.27 e 5.26) si nota infatti come la lavastoviglie abbia un ciclo di funzionamento medio della durata di due ore, presentando un picco di richiesta energetica dopo il primo quarto d'ora, seguito da *plateau* di circa quarantacinque minuti dove i consumi del suo ciclo sono notevolmente ridotti e dopo il quale troviamo un secondo picco della durata di un quarto d'ora.

L'asciugabiancheria presenta anch'essa un ciclo di funzionamento della durata di due ore, caratterizzato da alte richieste energetiche nei primi quarantacinque minuti, che andranno diminuendo nella mezz'ora successiva fino alla fine del suo ciclo. Negli scenari d'uso presenti in Tabella 5.19 che hanno dato esito positivo, accade infatti che per determinate configurazioni di tempi attivazioni, le alte richieste energetiche dell'asciugabiancheria corrispondano a dei periodi di basso consumo della lavastoviglie permettendo di rimanere limitati entro la soglia richiesta dal servizio aggregato ma non rispettando la potenza contrattuale nel periodo successivo (Figure 5.28 e 5.29).

Aggiungendo tale vincolo, l'unica configurazione inerente l'intervallo di interesse e i cui consumi risultanti si mantengono al di sotto sia della soglia richiesta dal servizio aggregato sia della potenza contrattuale è lo Scenario 21 i cui risultati di simulazione sono rappresentati in Figura 5.31. La particolare conformazione dei profili di potenza e la differenza di un'ora tra i tempi di attivazione dei due elettrodomestici fa sì che i loro periodi di massimo consumo non vengano mai a sovrapporsi durante il loro funzionamento. Si noti come nel caso diametralmente opposto, ovvero lo Scenario 5, ciò non risulta verificato (Figura 5.30).

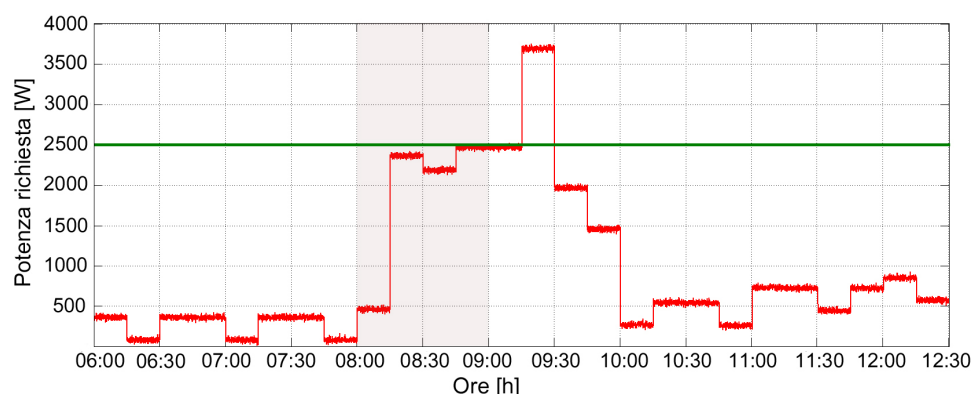


Figura 5.28: Risultato simulazione dello Scenario 3

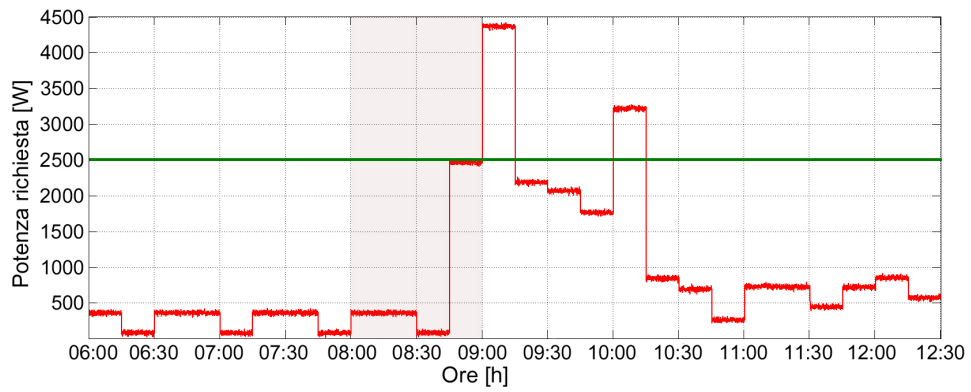


Figura 5.29: Risultato simulazione dello Scenario 19

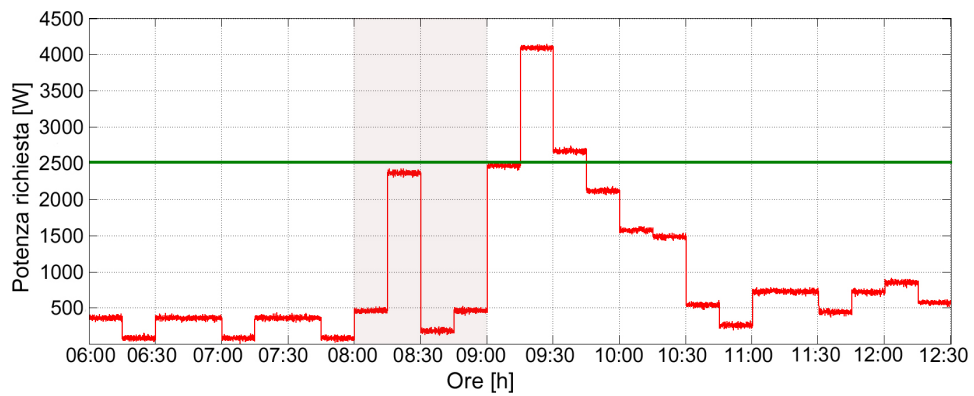


Figura 5.30: Risultato simulazione dello Scenario 5

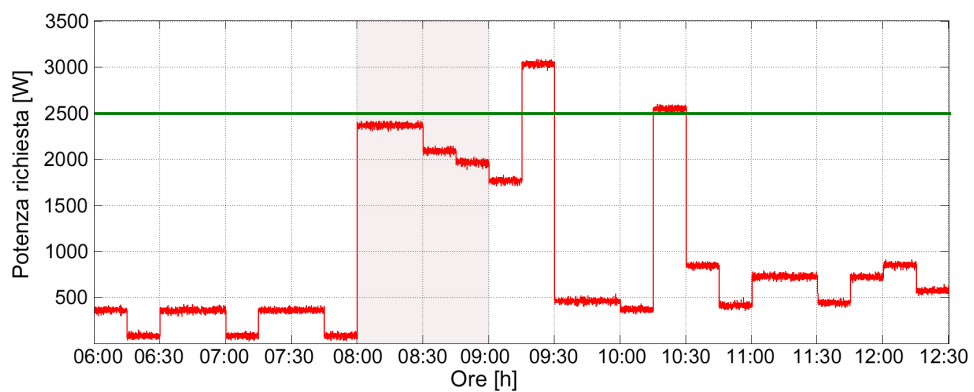


Figura 5.31: Risultato simulazione dello Scenario 21

### Presentazione dei risultati all'utente

Come indicato all'interno della sezione 4.4 della tesi, i risultati delle simulazioni degli scenari vengono dunque salvati all'interno della base di dati che l'utente potrà consultare per pianificare i propri consumi con un certo anticipo rispetto all'attivazione del programma di limitazione dei consumi proposto dal servizio aggregato di Domanda e Risposta. Nel caso d'uso specifico, giacchè la maggiorparte degli scenari relativi all'intervallo interessato dalla riduzione possono portare ad un'interruzione del servizio di rete da parte del gestore della distribuzione energetica, questi, con la sola eccezione dello Scenario 21, verranno sconsigliati all'utente.

Con riferimento alla previsione prodotta dall'algoritmo (Tabella 5.16), vediamo come per l'asciugabiancheria sia stato predetto un secondo intervallo di attivazione per la giornata di Lunedì dove il tempo di inizio del suo ciclo di funzionamento può essere modificato tra le ore 12:00 e le ore 13:00.

Poichè la durata del ciclo della lavastoviglie è di circa due ore e che l'ultima attivazione può avere luogo alle ore 10:00, selezionando il secondo intervallo predetto per l'utilizzo dell'asciugabiancheria i cicli dei due elettrodomestici non si sovrapporranno nell'arco della giornata, eliminando dunque il rischio di interruzioni del servizio e mantenendo i consumi più uniformi senza eccessivi picchi di potenza.

Il sistema dunque consiglierà all'utente, sotto forma di diagrammi di Gantt, un'insieme di scenari d'uso ottenibili variando il tempo di attivazione dei tre elettrodomestici di interesse all'interno degli intervalli mostrati in Tabella 5.20, seguendo i quali l'utente non solo potrà aderire al programma di riduzione proposto ma anche mantenere i propri consumi ben al di sotto dei limiti imposti dal suo contratto per la fornitura energetica (Figura 5.32).

Elettrodomestico	Intervallo orario
Lavastoviglie	08:00 - 10:00
Lavatrice	20:00 - 21:00
Asciugatrice	12:00 - 13:00

Tabella 5.20: Intervalli di attivazione consigliati all'utenza

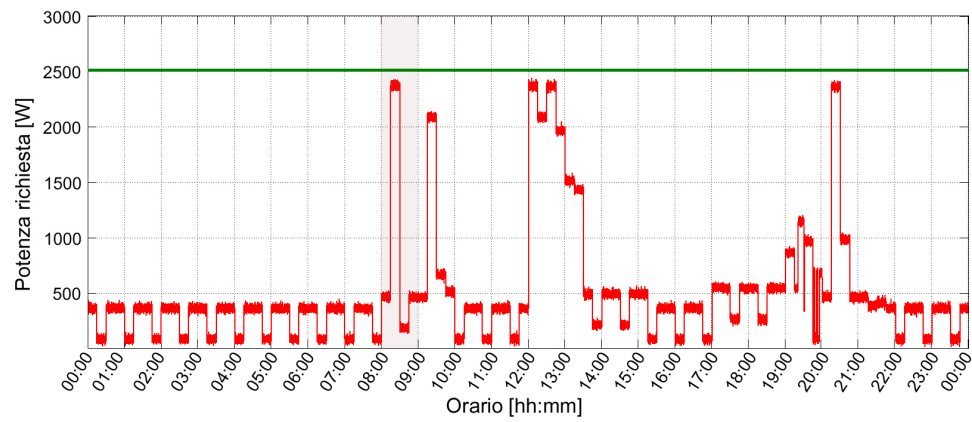


Figura 5.32: Risultato simulazione dove gli elettrodomestici vengono attivati all'istante di inizio del proprio intervallo



## Capitolo 6

# Conclusioni e sviluppi futuri

*“Continua a piantare i tuoi semi perchè non saprai mai quali cresceranno”*

- Albert Einstein -

Allo stato attuale di implementazione, la piattaforma di simulazione EA-SIM insieme all’algoritmo di apprendimento e previsione dei consumi risultano estremamente efficaci per le funzioni e gli obiettivi prefissati nel lavoro di tesi presentato. Nell’ottica di utilizzare il sistema in un ambiente domestico reale al fine di apprendere, prevedere e simulare i livelli di consumo delle utenze specifiche sono però necessarie alcune estensioni e modifiche che ne amplino l’architettura e le funzionalità.

In questo capitolo vengono dunque presentate le conclusioni sul lavoro di tesi svolto e considerazioni sui possibili sviluppi futuri.

### 6.1 Direzioni future di ricerca

#### 6.1.1 Ampliamento della rete di dispositivi della piattaforma di simulazione

In questa sezione si illustrano un insieme di estensioni previste per la piattaforma di simulazione EA-SIM proposta nel lavoro di tesi, che andranno a completarne l’architettura e ad ampliarne le funzionalità.

#### **Nuovi modelli per la simulazione gli elettrodomestici**

Come discusso nel capitolo 5, per la definizione dei modelli degli elettrodomestici ci si è avvalsi delle informazioni disponibili in due rapporti

tecniche inerenti il progetto europeo Smart-A [16] e il progetto Micene [80] concernenti il monitoraggio nel tempo delle principali categorie di apparecchiature domestiche.

Utilizzando tali informazioni si è creato, per ogni tipologia di elettrodomestico, un modello energetico del suo ciclo di funzionamento utilizzato dalla piattaforma EA-SIM per simularne i consumi all'interno della rete.

L'obiettivo futuro è quello di estendere i modelli degli elettrodomestici attualmente presenti per creare un ampio *archivio* che contenga informazioni dettagliate su un maggior numero di dispositivi e di configurazioni di utilizzo di questi ultimi, differenziati non solo per categoria di appartenenza ma anche per modelli specifici all'interno delle categorie stesse. Avendo a disposizione le caratteristiche di una vasta gamma di elettrodomestici, il sistema può dunque aumentare il suo grado di realismo, simulando il comportamento energetico di un modello di rete domestica quanto più aderente a quella realmente presente nell'unità abitativa dell'utenza.

Con lo sviluppo sempre crescente di nuove tecnologie e soluzioni da parte delle aziende del settore degli elettrodomestici, volte a realizzare dispositivi con un maggior grado di automazione e interoperabilità, è possibile che tali informazioni sui consumi dei cicli di funzionamento possano essere fornite direttamente dagli stessi elettrodomestici una volta connessi all'interno della rete domestica, facilitando dunque il sistema nell'elaborarne il profilo di potenza e modellarne il comportamento energetico in fase di simulazione.

### **Fonti energetiche rinnovabili**

Uno dei fattori che negli ultimi anni ha inciso maggiormente nei sistemi elettrici, specialmente a livello nazionale, è costituito dalla diffusione della produzione energetica da parte delle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER) installate presso le utenze o integrate nelle reti di distribuzione dell'energia. Al fine di assicurarne un adeguato sviluppo in Italia, come in molti altri paesi europei, sono stati introdotti numerosi sistemi di incentivazioni e normative che ne hanno rappresentato il principale meccanismo di diffusione. In Figura Accanto ad una forte crescita della distribuzione di tali impianti esistono però diverse problematiche

legate alla loro gestione, attribuibili soprattutto all'aleatorietà della loro produzione energetica. I loro profili di produzione infatti, risultano fortemente influenzati dalle caratteristiche strutturali e ambientali delle aree in cui tali fonti energetiche sono localizzate. Tale imprevedibilità di produzione comporta una maggiore complessità della nella gestione delle infrastrutture e delle risorse di rete per il fabbisogno della domanda energetica e può comportare il manifestarsi di una serie di criticità nella rete come ad esempio fenomeni di sovratensione, ovverosia quando la produzione di tali impianti supera la capacità di accettazione della rete.

In questo contesto, lo sviluppo di reti di distribuzione *intelligenti* (*Smart Grid*), attraverso innovativi sistemi di gestione e controllo dei carichi, sono in grado di far fronte alle problematiche legate all'utilizzo delle fonti energetiche rinnovabili, facilitandone la gestione e l'integrazione nella rete mantenendo al contempo un elevato livello di sicurezza e efficienza energetica del sistema [29, 10].

Per quanto concerne il lavoro proposto, una delle possibili estensioni della libreria dei componenti della piattaforma di simulazione EA-SIM potrebbe dunque prevedere l'integrazione di modelli per le fonti energetiche rinnovabili e in particolare gli impianti fotovoltaici, per permettere di simularne l'interazione con la rete di distribuzione.

6.1 si mostra come gli impianti eolici e fotovoltaici coprano ormai una parte molto significativa della domanda elettrica nel nostro paese [4].

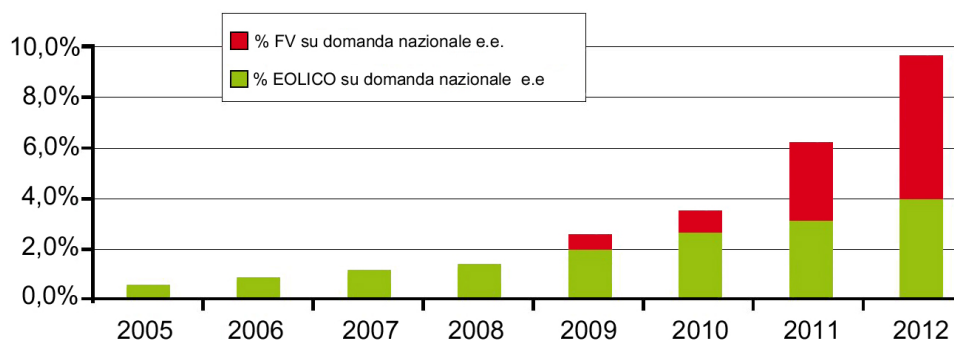


Figura 6.1: Energia elettrica prodotta da impianti eolici e fotovoltaici rispetto alla domanda nazionale (Fonte [4])

### **I sistemi di accumulo**

Come indicato nei capitoli 2 e 4, i sistemi di accumulo controllabili, in grado di erogare ed assorbire energia per un determinato periodo di tempo, possono fornire molteplici funzionalità orientate all'efficienza energetica della rete nella quale sono installati [28, 10].

In ambito residenziale in particolare, possono essere utilizzati per ridurre drasticamente il carico elettrico delle utenze durante i periodi in cui la domanda e il costo dell'energia risultano generalmente elevati o durante un intervallo di tempo interessato da una richiesta di riduzione da parte del servizio aggregato di Domanda e Risposta.

Essendo le reti domestiche molto distinte tra loro in relazione alle categorie delle utenze, ne consegue la necessità di selezionare la giusta tipologia e capacità dei sistemi di accumulo in funzione dei servizi cui si intende destinarli.

Con l'obiettivo di supportare in maniera efficace tale fase di dimensionamento per un utenza specifica, un possibile lavoro futuro consiste nell'estendere le funzionalità della piattaforma di simulazione EA-SIM e di integrare, all'interno del modulo *Batteria* presente nella libreria dei componenti, un maggior numero di modelli per i sistemi di accumulo che comprendano le diverse tipologie di accumulatori attualmente esistenti, quali elettrochimico, meccanico, elettrico, chimico e termico [4].

L'estensione permetterebbe dunque di simulare e valutare in fase di progettazione l'efficienza energetica di diversi scenari d'uso, ottenuti utilizzando differenti tecnologie di batterie al fine di individuare la corrispondenza ottima tra la capacità e la tecnologia del sistema di accumulo e la specifica funzionalità richiesta per utenza considerata. Tale corrispondenza porterebbe ad uno sfruttamento efficace delle batterie, riducendo i fattori di rischio legati ad un loro utilizzo improprio all'interno di una rete elettrica che potrebbero comprometterne l'integrità e la durabilità.

### **Integrazione con un reale sistema di gestione dell'energia in ambito residenziale**

Come introdotto nel capitolo 1, l'obiettivo futuro per il lavoro di tesi è quello di riuscire ad integrarsi con i moderni gestori dell'energia in ambito residenziale presenti nel mercato tecnologico ed energetico italiano, come il progetto Java Energy Management Application (JEMMA, [24]) proposto da Energy@Home [21].

Tale software utilizza come supporto hardware il FlexGateway creato dall'azienda FlexGrid S.r.l [83], un gateway Ethernet che consente il collegamento tra la rete Internet e la rete di dispositivi presenti nell'ambiente domestico (*Home Area Network*) implementandone l'interoperabilità e le comunicazioni attraverso il protocollo Zigbee Home Automation 1.2.

Come mostrato nel capitolo 5, il sistema proposto nel lavoro di tesi mostra un tempo di esecuzione totale molto contenuto, offrendo all'utente una risposta reattiva al sopraggiungere delle richieste di riduzione energetiche senza l'utilizzo di un supporto fisico ad elevate prestazioni e dunque facilmente integrabile sui dispositivi hardware per il controllo domotico attuali. Inoltre il software di previsione e simulazione dell'utilizzo della rete potrebbe essere ottimizzato per una piattaforma hardware specifica in modo tale da ottenere migliori prestazioni e tempi di risposta minori.

In un sistema reale dove la quantità di informazioni e dati elaborati dal software sia in fase di apprendimento e previsione sia nella successiva fase di simulazione della rete è auspicabilmente ampia, si potrebbero ottenere delle prestazioni più elevate tramite l'utilizzo di un Web Server accessibile tramite Internet. In questo modo il sistema potrebbe usufruire di un supporto hardware con prestazioni maggiori e in grado di interagire facilmente con il software di gestione energetica presente, ottenendo informazioni sulle attivazioni dei dispositivi e l'utilizzo della rete da parte dell'utente e fornendo i risultati delle previsioni e delle simulazioni dei consumi di rete al pervenire della richiesta di partecipazione ad un programma di riduzione energetica.

### 6.1.2 I modelli delle utenze

All'interno dei capitoli 4 e 5 della tesi, si è mostrato come attraverso le informazioni contenute in [16] e [80] e i dati raccolti tramite un sondaggio riguardante la frequenza di attivazione settimanale degli elettrodomestici, siano stati creati dei modelli di diverse tipologie di utenze che hanno permesso di simularne giorno per giorno l'utilizzo della rete andando così a creare una cronologia analizzata dall'algoritmo proposto per apprendere le abitudini dell'utente ed effettuare delle previsioni di attivazioni degli elettrodomestici.

Nel prossimo futuro è auspicabile disporre di un insieme di dati *reali*, ovvero ottenuti tramite misurazioni dirette e il monitoraggio dell'utilizzo delle principali categorie di elettrodomestici per le diverse tipologie di utenze, attraverso i quali sarà possibile formularne un modello più verosimile dei profili di consumo ottenendo di conseguenza delle previsioni maggiormente accurate.

Infine nell'ottica di integrare il sistema all'interno di una rete domotica per la gestione dell'energia, sarà possibile registrare giornalmente le singole attivazioni degli elettrodomestici creando dunque una cronologia *reale* per l'utenza considerata senza l'utilizzo di un modello generico, che permetterà di effettuare delle previsioni realistiche e affidabili a supporto dell'interazione con i servizi offerti dai sistemi di Domanda e Risposta.

## 6.2 Conclusioni

Negli ultimi anni la crescente domanda di energia e la necessità di ridurre le emissioni di gas climalteranti hanno portato in primo piano i temi riguardanti l'efficienza energetica. Questi temi, legati anche ad una sempre crescente produzione di energia da fonti rinnovabili, stanno rivoluzionando l'idea del sistema di produzione e distribuzione dell'energia elettrica attuale che si sta evolvendo verso il moderno concetto di rete attiva o *Smart Grid* [8, 9, 10]. Tale rete consentirà di soddisfare i bisogni sempre crescenti di energia dei consumatori in termini di flessibilità, economicità ed affidabilità, tramite un miglior sfruttamento delle risorse energetiche, l'integrazione di fonti energetiche alternative e consentendo alle utenze di usufruire in tempo reale di nuovi servizi offerti dal gestore della distribuzione dell'energia.

Nell'ambito residenziale, tale approccio necessita di un efficiente integrazione tra le tecnologie dell'informazione e le telecomunicazioni, in grado di creare un ambiente dove i dispositivi installati presentino un alto grado di automazione e di interoperabilità e possano essere gestiti sia localmente che in remoto al fine di aumentare il benessere dell'utente e al contempo di incrementare l'efficienza energetica della casa [12, 13].

Mentre la realizzazione di tali ambienti domestici intelligenti contribuirà a rendere le utenze maggiormente consapevoli e responsabili dei propri consumi energetici, servizi quali quelli di Domanda-Risposta [14, 15] si profilano come standard futuri al fine di ottenere una forte interazione con gli enti responsabili della trasmissione e distribuzione dell'energia.

Tali servizi avvalendosi di un insieme di programmi [5, 6] e strategie di aggregazione, permettono ai gestori di dialogare con le utenze proponendo di ridurre o regolare i consumi per un determinato intervallo di tempo in cambio di retribuzioni di carattere economico, basante sul costo della produzione energetica e sullo stato della rete previsto per quel dato periodo.

In questo contesto, il lavoro proposto è stato sviluppato con l'obiettivo di supportare le utenze in tale interazione con il gestore della distribuzione dell'energia, utilizzando le informazioni sui dispositivi presenti e sul profilo dell'utente per predirne l'utilizzo futuro e stimarne i consumi energetici nel periodo interessato dalla riduzione energetica proposta.

È stato mostrato come tecniche e metodologie volte alla progettazione hardware siano state utilizzate per la creazione di una piattaforma di simulazione in grado di emulare l'interazione, la gestione e il controllo dei dispositivi presenti in una rete domotica a partire dalla definizione della sua topologia. Utilizzando informazioni sul profilo di carico di diverse categorie di elettrodomestici e sulle preferenze dell'utente in termini di tempi di attivazione di quest'ultimi, si è in grado di definire dei moduli SystemC che simulino la loro presenza nella rete emulandone l'attivazione e i livelli di consumo durante il loro ciclo di funzionamento. Attraverso l'uso di modelli di sensori, attuatori, accumulatori ed unità di controllo di rete presenti nella libreria dei componenti del sistema, è possibile attuare delle politiche di risparmio energetico interagendo con i modelli di dispositivi presenti, modificandone i tempi di attivazione e reindirizzandone le richieste energetiche.

Inoltre si è illustrato come attraverso l'aggiunta di alcuni moduli Python si sia incrementato il livello di automatismo e dinamicità del flusso di esecuzione del simulatore, il quale è in grado di importare ed interpretare le informazioni relative agli elettrodomestici, interconnetterli con le componenti di sistema ed eseguire una simulazione del funzionamento della rete automaticamente a partire dalla definizione della sua topologia, mostrando infine i livelli di consumo ottenuti attraverso una rappresentazione grafica.

Il sistema può dunque considerarsi come un utile strumento, utilizzabile anche da programmi esterni ad esso il cui unico onere consiste nel creare i file di configurazione che codificano le informazioni sulla rete e sui dispositivi dei quali si desidera emulare il comportamento energetico.

Nel contesto dei meccanismi della domanda attiva e in particolare delle tecniche di Domanda e Risposta, si è mostrato come il sistema possa fungere da valido supporto all'utente guidandolo nei programmi di riduzione proposti dall'Aggregatore. Emulando il sopraggiungere di proposta di riduzione energetica infatti, è stato illustrato come l'andamento dei consumi energetici della rete venga automaticamente generato dal sistema per il periodo di tempo nel quale avrà luogo la riduzione, verificando se i consumi totali si mantengano al di sotto del valore di soglia proposto dal servizio aggregato.



Al sopraggiungere di una richiesta di riduzione energetica, per agevolare le utenze e guidarle alla programmazione dell'utilizzo dei propri elettrodomestici e dunque propri consumi con anticipo rispetto al periodo richiesto, è stato sviluppato un algoritmo di apprendimento e previsione del comportamento energetico dell'utente.

Attraverso le informazioni sulla frequenza di utilizzo settimanale e sulla probabilità di attivazione giornaliera di determinate categorie di elettrodomestici di interesse, si è stati in grado di creare dei modelli per diverse tipologie di utenze che ne emulino lo sfruttamento delle risorse di rete durante un periodo predefinito, salvando le informazioni sui tempi di utilizzo dei singoli dispositivi in una cronologia.

Si è mostrato come l'algoritmo, attraverso l'analisi di tale cronologia di attivazione dei dispositivi generata per due distinte categorie di utenze, utilizzando delle metodologie mutuata dall'analisi statistica delle serie storiche e dall'intelligenza artificiale è stato in grado di prevedere quali elettrodomestici saranno attivi nella rete per il giorno della settimana interessato dalla proposta di riduzione energetica e in quale fascia oraria specifica.

A partire dalla predizione prodotta e focalizzandosi sulla categoria di elettrodomestici contraddistinti da un ciclo di funzionamento ad alte richieste energetiche e per i quali l'istante di attivazione del ciclo può essere anticipato o posticipato senza una riduzione del comfort utente, si è illustrato come il sistema sia automaticamente in grado di creare diversi scenari di utilizzo della rete dove il tempo di attivazione dei soli dispositivi appartenenti a tale categoria è ritardato di un tempo predefinito all'interno del loro intervallo di funzionamento predetto dall'algoritmo.

È stato mostrato come gli scenari di utilizzo dove i tempi di attivazione degli elettrodomestici di interesse ricadono all'interno dell'intervallo di riduzione vengano inoltrati alla piattaforma EA-SIM la quale è in grado di simularne il comportamento energetico quantificandone i consumi per verificare se essi permangono al di sotto della soglia richiesta dal servizio aggregato.

Infine tutti gli scenari d'uso della rete che rispettino la soglia richiesta sono rappresentati in forma grafica, predetti basandosi sulle abitudini quotidiane dell'utenza considerata. Questi grafici suggeriscono quali elettrodomestici l'utenza può utilizzare all'interno della fascia oraria di interesse e quali è preferibile che vengano attivati precedentemente o

successivamente all'orario richiesto.

Grazie a tale sinergia tra l'algoritmo di apprendimento e previsione e la piattaforma di simulazione, un ipotetico utente è dunque in grado di valutare in maniera consapevole la sua partecipazione ad un programma di riduzione energetica proposto dal servizio aggregato di Domanda e Risposta e, seguendo le indicazioni d'uso fornite dal sistema, conseguire gli obiettivi proposti beneficiando degli incentivi economici derivanti dall'adempimento dei livelli di soglia e dei requisiti richiesti.

In conclusione, in previsione dell'evoluzione futura dell'attuale rete di trasmissione e distribuzione dell'energia e dell'introduzione dei servizi di domanda attiva di Domanda e Risposta nei meccanismi di gestione delle risorse di rete tramite il coinvolgimento attivo delle utenze residenziali, si è mostrato come il sistema creato ed analizzato nella tesi proposta, qualora utilizzato all'interno di una rete domotica, possa essere utilizzato efficacemente e in maniera intuitiva dall'utente per elevare il suo ruolo da unità passiva della rete a componente attiva di essa, tramite un'interazione costruttiva con il gestore della rete di distribuzione e i servizi da esso proposti.

# Bibliografia

- [1] NIST, “National institute of standards and technology, smart grid,” 2013. [Online]. Available: <http://www.nist.gov/smartgrid/>
- [2] Smart Energy Demand Coalition, “Mapping demand response in europe today,” 2014. [Online]. Available: <http://sedc-coalition.eu/>
- [3] Energy@Home, “Energy@home use cases version 2.0,” Tech. Rep.
- [4] Energy and P. d. M. Strategy Group, “Smart Ggrid Report, sistemi di storage e auto elettriche,” Tech. Rep., 2013.
- [5] H. Aalami, M. P. Moghaddam, and G. Yousefi, “Demand response modeling considering interruptible/curtailable loads and capacity market programs,” *Applied Energy*, vol. 87, no. 1, pp. 243–250, 2010.
- [6] V. M. Balijepalli, V. Pradhan, S. Khaparde, and R. Shereef, “Review of demand response under smart grid paradigm,” in *Innovative Smart Grid Technologies-India (ISGT India), 2011 IEEE PES*. IEEE, 2011, pp. 236–243.
- [7] Enel Energia, “La rete di trasmissione e distribuzione di energia elettrica.” [Online]. Available: <http://energyviews.enel.it/?p=386>
- [8] H. Farhangi, “A road map to integration: Perspectives on smart grid development,” *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 12, no. 3, pp. 52–66, 2014.
- [9] S. M. Amin and B. F. Wollenberg, “Toward a smart grid: power delivery for the 21st century,” *Power and Energy Magazine, IEEE*, vol. 3, no. 5, pp. 34–41, 2005.

- 
- [10] S.-y. Chen, S.-f. Song, L. Li, and J. Shen, "Survey on smart grid technology," *Power System Technology*, vol. 33, no. 8, pp. 1–7, 2009.
- [11] European Commission, "European commission research and innovation - horizon 2020," 2013. [Online]. Available: <http://ec.europa.eu/research/horizon2020>
- [12] K. Kok, S. Karnouskos, D. Nestle, A. Dimeas, A. Weidlich, C. Warmer, P. Strauss, B. Buchholz, S. Drenkard, N. Hatziaargyriou *et al.*, "Smart houses for a smart grid," 2009.
- [13] Y. Agarwal, T. Weng, and R. K. Gupta, "Understanding the role of buildings in a smart microgrid," in *Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2011*. IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [14] P. Siano, "Demand response and smart grids-a survey," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 461–478, 2014.
- [15] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand side management: Demand response, intelligent energy systems, and smart loads," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 3, pp. 381–388, 2011.
- [16] R. Stamminger, G. Broil, C. Pakula, H. Jungbecker, M. Braun, I. Rüdener, and C. Wendker, "Synergy potential of smart appliances," *Report D2*, vol. 3, 2008.
- [17] U.S Department of Energy, "Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them," Tech. Rep., 2006.
- [18] N. Gudi, L. Wang, V. Devabhaktuni, and S. S. S. R. Depuru, "Demand response simulation implementing heuristic optimization for home energy management," in *North American Power Symposium (NAPS), 2010*. IEEE, 2010, pp. 1–6.
- [19] C. Roe, S. Meliopoulos, R. Entriken, and S. Chhaya, "Simulated demand response of a residential energy management system," in *Energytech, 2011 IEEE*. IEEE, 2011, pp. 1–6.

- 
- [20] S. Park, H. Kim, H. Moon, J. Heo, and S. Yoon, “Concurrent simulation platform for energy-aware smart metering systems,” *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 3, pp. 1918–1926, 2010.
- [21] “Energy@home project.” [Online]. Available: <http://www.energy-home.it/SitePages/Home.aspx>
- [22] Enel, “Enel energia, iniziative e progetti nell’ambito delle smart grid,” 2013. [Online]. Available: [http://www.enel.com/it-IT/innovation/smart\\_grids/projects.aspx](http://www.enel.com/it-IT/innovation/smart_grids/projects.aspx)
- [23] i. g. e. i. s. i. Autorità per l’energia elettrica, “Progetti pilota smart grid.” [Online]. Available: <http://www.autorita.energia.it/it/operatori/smartgrid.htm>
- [24] “Java Energy ManageMent Application (JEMMA).” [Online]. Available: <http://www.energy-home.it/SitePages/Activities/JEMMA.aspx>
- [25] A. Nacci, G. Bettinazzi, C. Pilato, V. Rana, M. Santambrogio, and D. Sciuto, “A systemc-based framework for the simulation of appliances networks in energy-aware smart spaces,” in *Internet of Things (WF-IoT), 2014 IEEE World Forum on*. IEEE, 2014, pp. 485–490.
- [26] V. Pothamsetty and S. Malik, “Smart grid: Leveraging intelligent communications to transform the power infrastructure,” *CISCO Systems, white paper*, 2009.
- [27] 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*, vol. 1, no. 2, pp. 120–133, 2010.
- [28] N. S. Wade, P. Taylor, P. Lang, and P. Jones, “Evaluating the benefits of an electrical energy storage system in a future smart grid,” *Energy policy*, vol. 38, no. 11, pp. 7180–7188, 2010.
- [29] Y. Zhang and G. B. Giannakis, “Robust optimal power flow with wind integration using conditional value-at-risk,” in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2013 IEEE International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 654–659.

- 
- [30] IEEE, “IEEE smart grid, standards and research,” 2013. [Online]. Available: <http://smartgrid.ieee.org/>
- [31] S. Grid, C.-P. S. P. Office, Energy, and E. L. Environment Division, “NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 3.0,” 2014.
- [32] “Gruppo Terna S.p.a.” [Online]. Available: <http://www.terna.it/>
- [33] “Gruppo Enel Energia.” [Online]. Available: <http://www.enel.it/it-IT/>
- [34] “Ricerca Sistema Energetico RSE.” [Online]. Available: <http://www.rse-web.it/home.page>
- [35] “Selta S.p.a.” [Online]. Available: <http://www.selta.it/>
- [36] “Gruppo Siemens Italia.” [Online]. Available: <https://www.swe.siemens.com/italy/web/GruppoSiemensItalia/Pages/Default.aspx>
- [37] “Cisco System Inc.” [Online]. Available: <http://www.cisco.com/>
- [38] V. Haines, V. Mitchell, C. Cooper, and M. Maguire, “Probing user values in the home environment within a technology driven smart home project,” *Personal and Ubiquitous Computing*, vol. 11, no. 5, pp. 349–359, 2007.
- [39] J. F. Coughlin, L. A. D’Ambrosio, B. Reimer, and M. R. Pratt, “Older adult perceptions of smart home technologies: implications for research, policy & market innovations in healthcare,” in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE*. IEEE, 2007, pp. 1810–1815.
- [40] B. Zhang, P.-L. P. Rau, and G. Salvendy, “Design and evaluation of smart home user interface: effects of age, tasks and intelligence level,” *Behaviour & Information Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 239–249, 2009.
- [41] C. Röcker, M. D. Janse, N. Portolan, and N. Streitz, “User requirements for intelligent home environments: a scenario-driven approach and empirical cross-cultural study,” in *Proceedings of*

- the 2005 joint conference on Smart objects and ambient intelligence: innovative context-aware services: usages and technologies.* ACM, 2005, pp. 111–116.
- [42] J. Li, J. Y. Chung, J. Xiao, J. Hong, and R. Boutaba, “On the design and implementation of a home energy management system,” in *Wireless and Pervasive Computing (ISWPC), 2011 6th International Symposium on.* IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [43] E. Treccani, “Definizione della parola domotica.” [Online]. Available: [http://www.treccani.it/enciclopedia/domotica\\_\(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica\)/](http://www.treccani.it/enciclopedia/domotica_(Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica)/)
- [44] J. Han, C.-S. Choi, W.-K. Park, and I. Lee, “Green home energy management system through comparison of energy usage between the same kinds of home appliances,” in *Consumer Electronics (ISCE), 2011 IEEE 15th International Symposium on.* IEEE, 2011, pp. 1–4.
- [45] G. Graditi, M. Atrigna, A. Piccolo, and P. Siano, “Energy management system for smart homes: testing methodology and test-case generation,” in *Clean Electrical Power (ICCEP), 2013 International Conference on.* IEEE, 2013, pp. 766–771.
- [46] Zigbee Alliance, “Zigbee Home Automation version 1.2.” [Online]. Available: <https://www.swe.siemens.com/italy/web/GruppoSiemensItalia/Pages/Default.aspx>
- [47] K. C. Lee and H.-H. Lee, “Network-based fire-detection system via controller area network for smart home automation,” *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 4, pp. 1093–1100, 2004.
- [48] C. Thomas, A. Star, and J. Kim, “An assessment of business models for demand response,” *Grid-Interop Proceedings*, pp. 17–19, 2009.
- [49] L. Gkatzikis, I. Koutsopoulos, and T. Salonidis, “The role of aggregators in smart grid demand response markets,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 31, no. 7, pp. 1247–1257, 2013.

- 
- [50] F. Javed, N. Arshad, F. Wallin, I. Vassileva, and E. Dahlquist, "Forecasting for demand response in smart grids: An analysis on use of anthropologic and structural data and short term multiple loads forecasting," *Applied Energy*, vol. 96, pp. 150–160, 2012.
- [51] J. Schachter and P. Mancarella, "A short-term load forecasting model for demand response applications," in *European Energy Market (EEM), 2014 11th International Conference on the*. IEEE, 2014, pp. 1–5.
- [52] K.-L. Ho, Y.-Y. Hsu, and C.-C. Yang, "Short term load forecasting using a multilayer neural network with an adaptive learning algorithm," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 1, pp. 141–149, 1992.
- [53] F. Javed, N. Arshad, F. Wallin, I. Vassileva, and E. Dahlquist, "Forecasting for demand response in smart grids: An analysis on use of anthropologic and structural data and short term multiple loads forecasting," *Applied Energy*, vol. 96, pp. 150–160, 2012.
- [54] V. V. Singh and A. Srivastava, "An introduction to load forecasting: Conventional and modern technologies," *Engineering Science and Technology: An International Journal*, 2014.
- [55] "Google PowerMeter." [Online]. Available: <http://www.google.com/powermeter/about/index.html>
- [56] C. Dixon, R. Mahajan, S. Agarwal, A. B. Brush, B. Lee, S. Saroiu, and P. Bahl, "An operating system for the home." in *NSDI*, vol. 12, 2012, pp. 337–352.
- [57] A. Brush, J. Jung, R. Mahajan, and J. Scott, "Homelab: shared infrastructure for home technology field studies," in *Proceedings of the 2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing*. ACM, 2012, pp. 1108–1113.
- [58] I. H. Networking, "Service gateway architecture for a smart home," *IEEE Communications Magazine*, p. 126, 2002.
- [59] "Bidgely Technology." [Online]. Available: <https://www.bidgely.com/technology>



- [60] M. Zeifman and K. Roth, "Nonintrusive appliance load monitoring: Review and outlook," *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 1, pp. 76–84, 2011.
- [61] O. Parson, S. Ghosh, M. Weal, and A. Rogers, "Non-intrusive load monitoring using prior models of general appliance types." in *AAAI*, 2012.
- [62] P. Chakravarty and A. Gupta, "Impact of energy disaggregation on consumer behavior," 2013.
- [63] Bidgely, "Bidgely Consumer Engagement." [Online]. Available: [https://www.bidgely.com/resource-files/Customer\\_Engagement\\_Success\\_Story\\_Bidgely.pdf](https://www.bidgely.com/resource-files/Customer_Engagement_Success_Story_Bidgely.pdf)
- [64] "Opower5: Flex." [Online]. Available: <http://opower.com/>
- [65] "Baltimore Gas and Electric." [Online]. Available: <http://www.bge.com/pages/default.aspx>
- [66] "Shneider Electric." [Online]. Available: <http://www.schneider-electric.com/site/home/index.cfm/it/>
- [67] "KNX Standard Association." [Online]. Available: <http://www.knx.org/it/>
- [68] "Entelios Company." [Online]. Available: <http://entelios.com/>
- [69] "Energy Pool." [Online]. Available: <http://www.energy-pool.eu/>
- [70] "EnerNOC." [Online]. Available: <http://www.enernoc.com/>
- [71] "Kiwi Power demand management." [Online]. Available: <http://www.kiwipowered.com/index.html>
- [72] "Consorzio Homelab." [Online]. Available: <http://www.homelabitaly.com>
- [73] "Enel Smart Info." [Online]. Available: [http://www.enel.it/it-IT/reti/smart\\_info/](http://www.enel.it/it-IT/reti/smart_info/)
- [74] A. J. Roscoe and G. Ault, "Supporting high penetrations of renewable generation via implementation of real-time electricity pricing and demand response," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, no. 4, pp. 369–382, 2010.

- 
- [75] “SystemC, User’s Guide.” [Online]. Available: <http://www.cse.iitd.ac.in/~panda/SYSTEMC/LangDocs/UserGuide20.pdf>
- [76] E. V. T. Massachusetts Institute of Technology, “A guide to understanding battery specifications,” Tech. Rep., 2008.
- [77] Synopsys, “Synopsys Platform Architect.” [Online]. Available: <http://www.synopsys.com/Systems/ArchitectureDesign/Pages/PlatformArchitect.aspx>
- [78] “JSON (Javascript Object Notation).” [Online]. Available: <http://www.json.org/json-it.html>
- [79] “MySQLdb python library, user guide.” [Online]. Available: <http://mysql-python.sourceforge.net/MySQLdb.html>
- [80] D. d. E. P. d. M. eERG, end-use Efficiency Research Group, “MICENE, Misure dei consumi di energia elettrica,” Tech. Rep.
- [81] F. B. M. G. S. M. Luca Barbierato, Valter Bella, “Analisi della flessibilità della domanda di energia elettrica residenziale in Italia,” *L’Energia Elettrica*, 2014.
- [82] “AMD Sempron 3800+ , product details.” [Online]. Available: <http://products.amd.com/en-us/DesktopCPUDetail.aspx?id=139&f1=AMD+Sempron%E2%84%A2&f2=&f3=&f4=&f5=&f6=&f7=&f8=&f9=1600&f10=False&f11=False&f12=False>
- [83] “Flex Grid S.r.l.” [Online]. Available: [http://www.flexgrid.it/home\\_eng.html](http://www.flexgrid.it/home_eng.html)
- [84] G. Gross and F. D. Galiana, “Short-term load forecasting,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 75, no. 12, pp. 1558–1573, 1987.
- [85] Indeco Strategic Consulting Inc., “Demand side management and demand response in municipalities,” Tech. Rep., 2004.

## Appendice A

# Risultati del sondaggio sull'utilizzo degli elettrodomestici

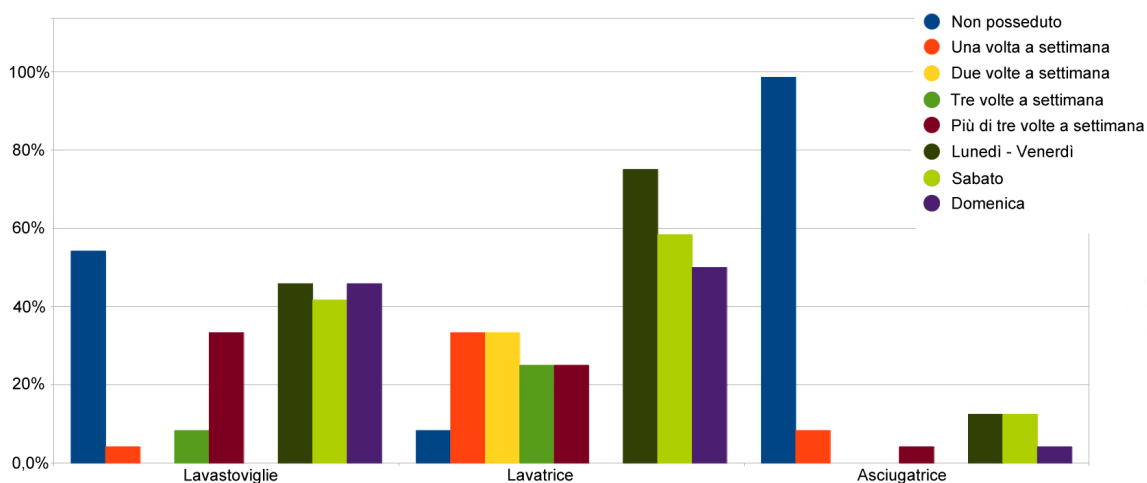
Per raccogliere il maggior numero possibile di dati sulle abitudini domestiche di diversi profili di utenza, è stato creato un questionario online, totalmente anonimo, divulgato attraverso Internet e che ha coinvolto in totale più di 110 utenti.

Nel questionario si chiedeva all'utente di selezionare il proprio profilo familiare, scelto tra i cinque profili differenti, e di indicare, per alcune classi di elettrodomestici, se ne fossero in possesso e in caso positivo di indicare la loro frequenza di utilizzo nell'arco della settimana e il periodo della settimana nel quale l'elettrodomestico in questione viene generalmente utilizzato (da lunedì al venerdì o nel fine settimana). Le tipologie di elettrodomestici presenti all'interno del questionario, rappresentano i dispositivi che influiscono maggiormente i consumi di una utenza per via dell'onerosità delle loro richieste energetiche. Nell'ottica di sottostare ad una richiesta di riduzione energetica per un intervallo definito di tempo, le nostre ricerche si sono focalizzate maggiormente sulla tipologia di elettrodomestici che presentano un ciclo di funzionamento caratterizzato da elevate richieste di energia e il cui tempo di attivazione può essere modificato, dunque ritardato o anticipato, senza influire in maniera significativa sul comfort dell'utente. Si riportano in forma grafica i risultati del sondaggio che mostrano per ogni profilo le frequenze di utilizzo settimanale degli elettrodomestici appartenenti alla categoria precedentemente descritta. I risultati mostrano come la

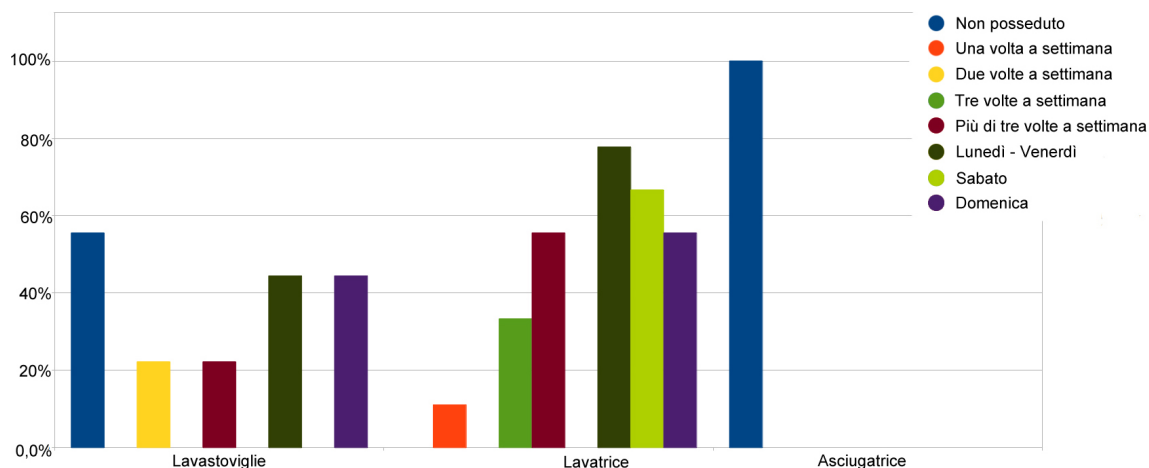
*Appendice A. Risultati del sondaggio sull'utilizzo degli elettrodomestici*

maggior parte degli utenti coinvolti possiede una lavatrice e la utilizza in media dalle due alle tre volte a settimana soprattutto infrasettimanalmente.

I dati mostrano inoltre come la lavastoviglie e la asciugabiancheria, e in particolare quest'ultima, non siano molto utilizzati o addirittura assenti all'interno dell'unità abitativa.



*Figura A.1: Risultati sondaggio per il profilo "Appartamento Condiviso"*



*Figura A.2: Risultati sondaggio per il profilo "Famiglia con un figlio"*

Appendice A. Risultati del sondaggio sull'utilizzo degli elettrodomestici

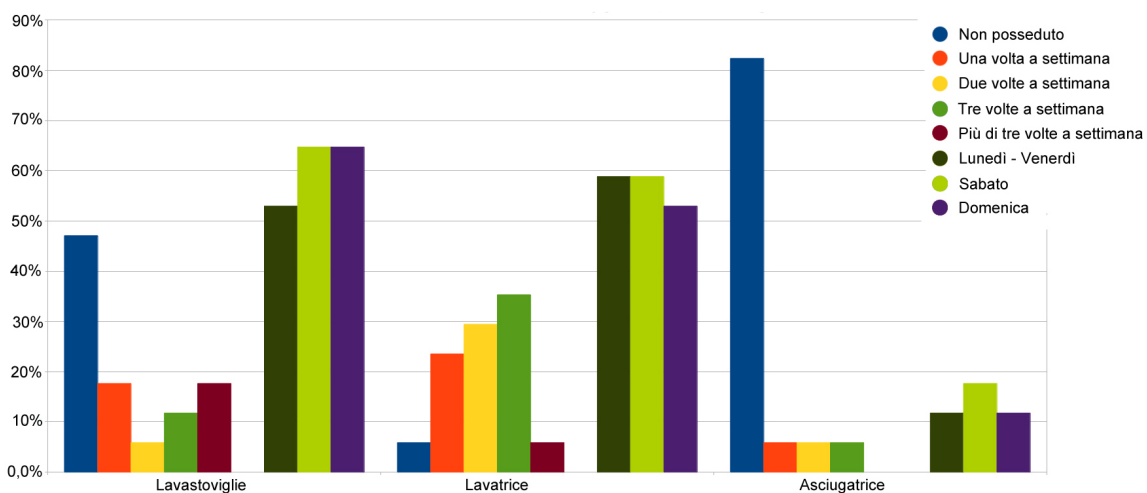


Figura A.3: Risultati sondaggio per il profilo "Coppia"

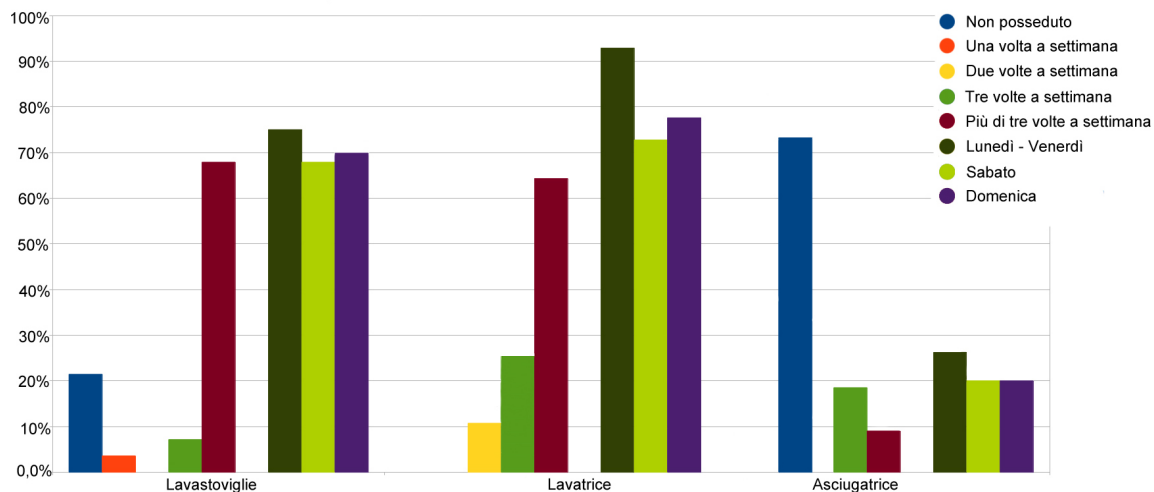


Figura A.4: Risultati sondaggio per il profilo "Famiglia con più di un figlio"

Appendice A. Risultati del sondaggio sull'utilizzo degli elettrodomestici

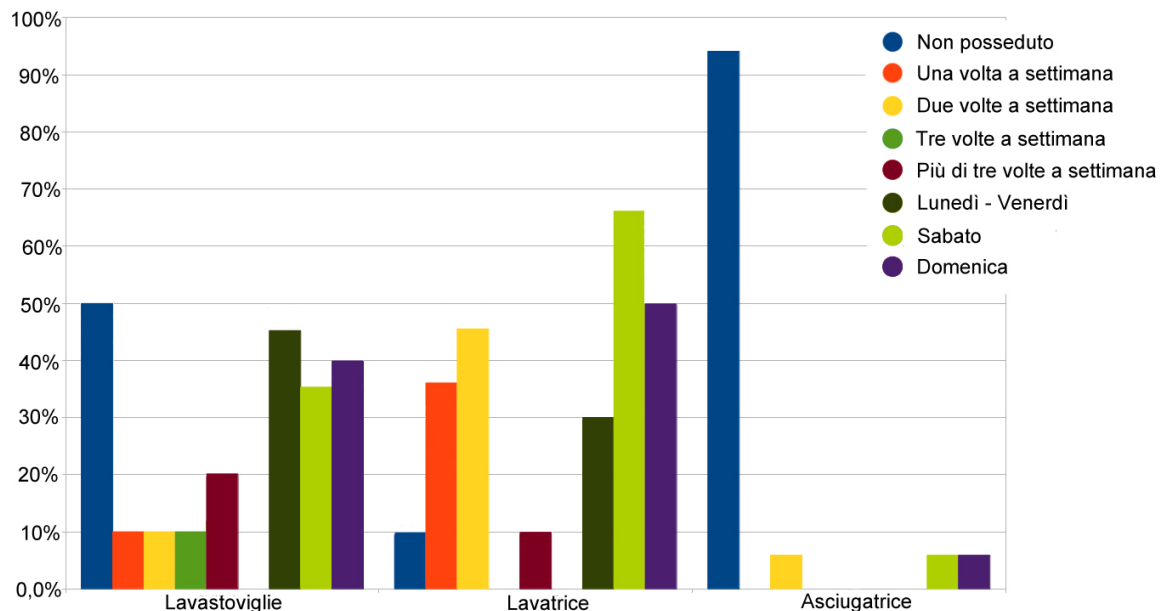


Figura A.5: Risultati sondaggio per il profilo "Persona singola (Uomo)"

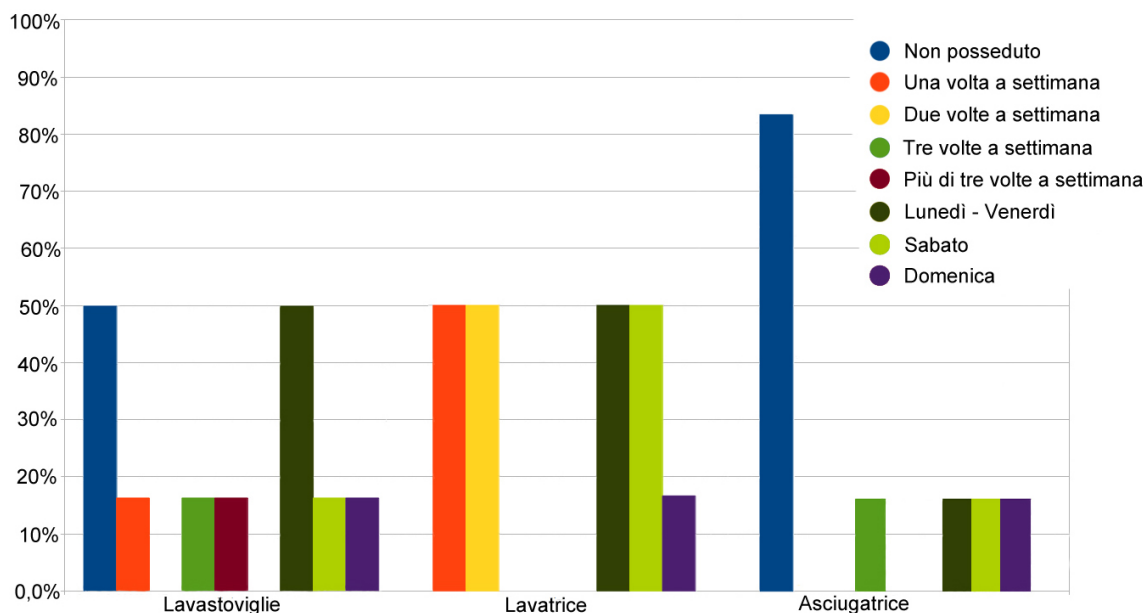


Figura A.6: Risultati sondaggio per il profilo "Persona singola (Donna)"

## Appendice B

# Caratteristiche degli elettrodomestici e dei dispositivi elettronici della rete

Si riportano in questa sezione le caratteristiche dei cicli di funzionamento degli elettrodomestici, utilizzate per caratterizzarne e modellarne il comportamento energetico all'interno della piattaforma di simulazione EA-SIM. I profili di potenza sono stati ricavati dalle informazioni contenute in due rapporti tecnici presenti in bibliografia inerenti due progetti di carattere europeo, rispettivamente il progetto Smart-A [16] e il progetto Micene [80], concernenti il monitoraggio nel tempo delle dotazioni, del consumo di energia delle famiglie e dell'utilizzo (frequenza, durata e orari) delle principali apparecchiature domestiche.

### B.1 Lavatrice

La lavatrice è senza dubbio uno degli elettrodomestici più diffusi all'interno degli ambienti domestici, sia in ambito europeo che internazionale.

Le richieste di energia che caratterizzano l'utilizzo della lavatrice durante il suo ciclo di funzionamento sono dovute principalmente alle operazioni di pompaggio dell'acqua, di attivazione del motore che movimentata il cestello e di riscaldamento dell'acqua fino alla temperatura desiderata dal programma. Il livello dei consumi di tale elettrodome-

stico può variare infatti non solo tra i diversi modelli disponibili sul mercato ma anche in base al tipo di programma scelto per effettuare il lavaggio, che determina principalmente la durata del ciclo e la temperatura dell'acqua.

Una funzione spesso utilizzata è la programmazione dell'inizio del suo ciclo di funzionamento da parte dell'utente, rendendo questo elettrodomestico molto flessibile in termini di tempi di utilizzo, che possono essere modificati senza una sostanziale riduzione del comfort dell'utenza.

Il profilo di potenza mostrato in Figura B.1, mostra il ciclo di funzionamento medio di una lavatrice che utilizza un programma per il cotone con una temperatura media di 45 °C [16], che presenta dei picchi di potenza di circa 2 kW e una durata di due ore per ciclo e un consumo energetico risultante di 0,89 kWh.

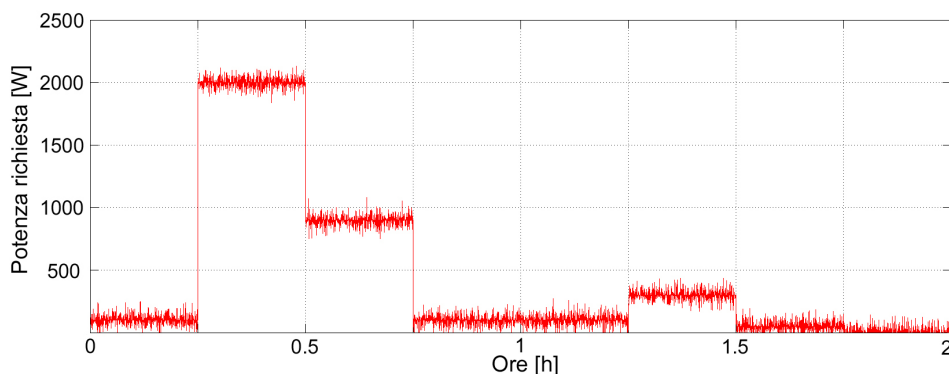


Figura B.1: Profilo di potenza medio di una lavatrice

## B.2 Lavastoviglie

L'utilizzo delle lavastoviglie da parte delle utenze domestiche è attualmente molto diffuso soprattutto nei paesi dell'Europa centrale e dell'ovest e la sua penetrazione nei restanti paesi europei è in costante crescita [16].

L'utilizzo della lavastoviglie è molto simile a quello della lavatrice: collegata all'impianto idraulico e a quello elettrico esegue i comandi impostati in maniera totalmente automatica una volta scelto il tempo di avviamento del ciclo di lavaggio, che può essere programmato dall'utente per un periodo specifico della giornata.

Il suo ciclo di funzionamento è generalmente caratterizzato da due fasi



distinte all'interno di un programma di lavaggio: la prima dove l'acqua viene pompata e portata alla temperatura desiderata per essere erogata ad alta pressione insieme al detersivo e una seconda fase dove l'acqua viene nuovamente erogata per eliminare le tracce di detersivo e infine, sotto forma di vapore, per asciugare le stoviglie.

Il profilo di potenza mostrato in Figura B.2, mostra il ciclo di funzionamento medio di una lavastoviglie che utilizza un normale programma di lavaggio della durata di due ore con una media di 60 °C di temperatura dell'acqua con un consumo energetico risultante di 1,91 kWh [16]. Si noti come il grafico relativo al funzionamento della lavastoviglie siano presenti due picchi di potenza pari a circa 2,0 kW che, corrispondono alle due fasi di funzionamento precedentemente descritte.

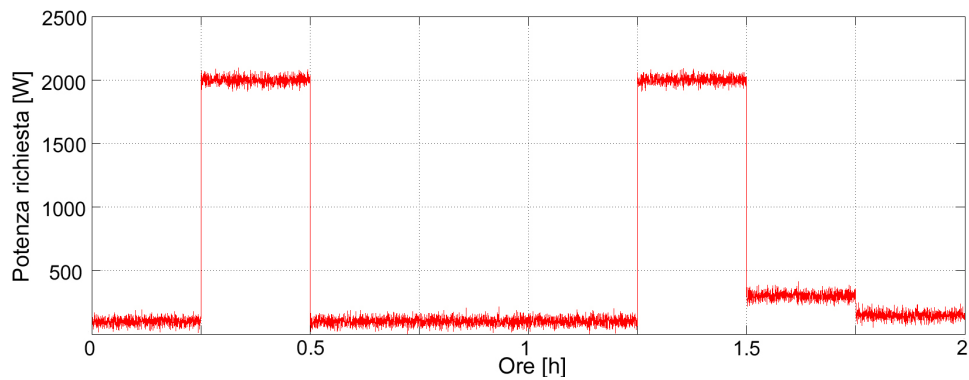


Figura B.2: Profilo di potenza medio di una lavastoviglie

### B.3 Asciugatrice

L'asciugatrice è un pratico elettrodomestico che permette di asciugare, grazie a programmi con varie funzionalità, grandi quantità di capi durante il suo funzionamento. Come la lavatrice o la lavastoviglie, il suo utilizzo può essere facilmente programmato dall'utente in base alle sue preferenze nell'arco della giornata.

Durante il ciclo di asciugatura, tramite una ventola l'aria viene aspirata dall'ambiente circostante, facendola passare per una resistenza in modo da riscaldarla e immettendola nel cestello girevole che contiene il bucato, con temperature mediamente elevate tra i 60 e i 70 °C.

La fase di riscaldamento dell'aria tramite resistenza termica corrisponde al periodo di massima potenza richiesta dal ciclo di funzionamento, mentre le operazioni di pompaggio e di rotazione del cestello sono meno onerose da un punto di vista energetico.

Il profilo di potenza mostrato in Figura B.3, mostra il ciclo di funzionamento medio di un'asciugatrice che utilizza un normale programma di asciugatura della durata di due ore con una media di 60 °C di temperatura dell'aria, con un consumo energetico risultante di 2,46 kWh [16].

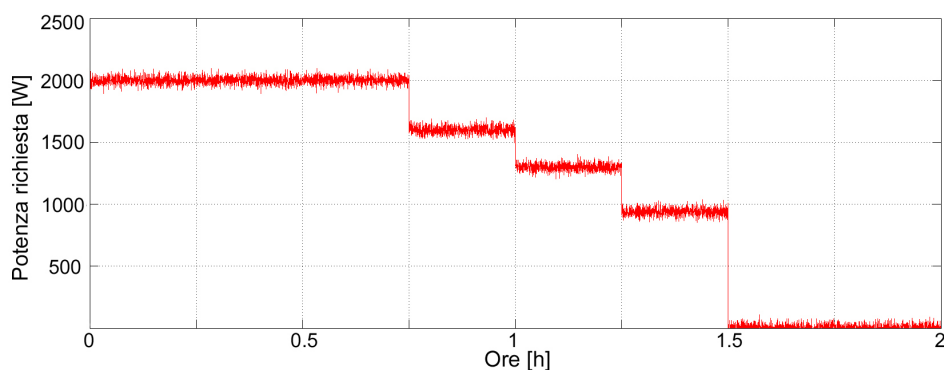


Figura B.3: Profilo di potenza medio di un'asciugatrice

## B.4 Televisore

Il televisore rappresenta uno dei dispositivi elettronici a maggiore diffusione nel settore residenziale. Dalle tecnologie a tubo catodico si è assistito negli ad una sempre maggiore diffusione di televisori a *schermo piatto* con tecnologie a cristalli liquidi (*LCD, liquid crystal display*) e al plasma (*PDP, plasma display panel*) che presentano una maggiore risoluzione, fluidità e nitidezza delle immagini ma con consumi energetici maggiori rispetto alle generazioni precedenti.

In generale, un ciclo medio di un televisore è caratterizzato da un picco di richieste iniziale all'accensione, che varia in durata e potenza in base al modello considerato, seguito da un *plateau* di consumi che si mantengono pressoché costanti durante l'utilizzo. In Figura B.4 è mostrato il profilo di potenza medio dell'utilizzo di un televisore LCD da 40" attivo per due ore, che presenta un picco di richieste di circa 150W seguito da un consumo di 130 W per il restante periodo di funzionamento, per un dispendio energetico complessivo di 0,26 kWh.

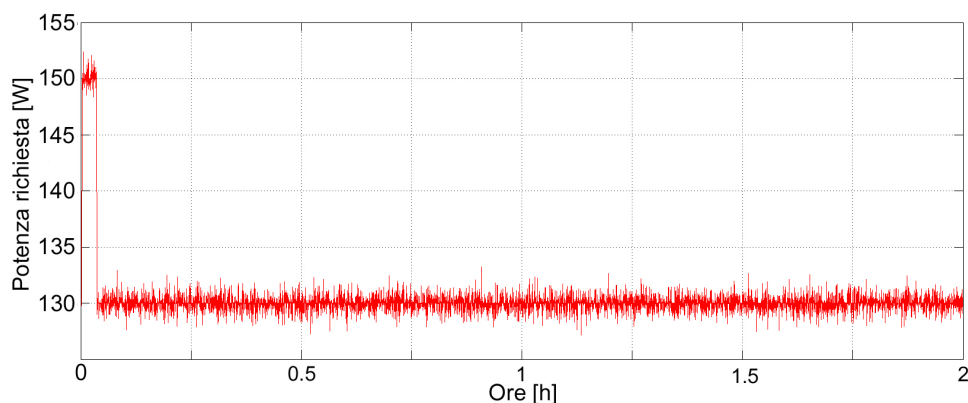


Figura B.4: Profilo di potenza medio di un televisore LCD

## B.5 Condizionatore d'aria

I condizionatori d'aria sono una categoria di elettrodomestici molto diffusa in ambito residenziale grazie al loro forte contributo nell'aumentare il comfort e l'abitabilità dell'ambiente domestico. La loro funzione può consistere sia nel raffreddare (condizionatori *solo freddo*) sia nel riscaldare (*pompe di calore*) uno o più ambienti fino al raggiungimento della temperatura desiderata. La tecnologia maggiormente diffusa è

quella dei condizionatori a compressione, dove un liquido refrigerante viene ciclicamente condensato, vaporizzato e compresso sottraendo o immettendo calore nell'ambiente esterno in base alla funzione selezionata. Questo ciclo di funzionamento è caratterizzato da alte richieste energetiche ed è fortemente influenzato non solo dalla temperatura e dal tasso di umidità dell'ambiente, ma anche da aspetti tecnici come il tipo di installazione e di isolamento dell'elettrodomestico. Le elevate richieste di energia e l'alto tasso di utilizzo soprattutto durante la stagione estiva sono spesso causa di sovraccarichi della rete elettrica con frequenti interruzioni del servizio da parte del gestore della distribuzione.

Sebbene anche questa tipologia di elettrodomestici presenti un tempo di attivazione programmabile, il ritardarne l'accensione, anticiparne lo spegnimento o modificarne la temperatura obiettivo per ridurre le sue richieste energetiche sono tutte azioni che possono essere intraprese da un software di gestione dell'energia in ambito residenziale, azioni che però possono influire in maniera significativa negativa sul comfort dell'utente.

Il Figura B.5 è mostrato il ciclo di funzionamento medio di un condizionatore d'aria con una temperatura dell'ambiente esterno di circa 23 °C e della durata di due ore e un quarto. Il ciclo mostra due picchi di richieste di circa 1,7 kW della durata di tre quarti d'ora corrispondenti all'azione del compressore durante il ciclo, con un consumo energetico medio stimato di 1,7 kWh [16].

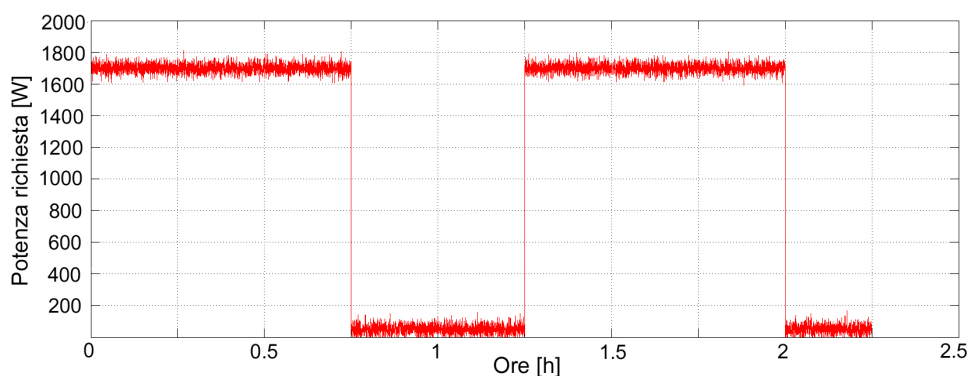


Figura B.5: Profilo di potenza medio di un condizionatore d'aria

## B.6 Forno elettrico

La categoria dei forni elettrici presenta un livello di diffusione in crescita negli ultimi anni, sostituendo in molti casi la categoria a gas metano maggiormente diffusa nei paesi del centro e nord Europa [16].

Il ciclo di funzionamento e le richieste energetiche di tali elettrodomestici sono influenzate oltre che dal tempo di cottura anche dalla temperatura desiderata per il processo, che può variare dai 50 a 300°C, e dal tipo di funzionalità e orientazione del calore (ad esempio la funzione *grill*).

In Figura B.6 si mostra un ciclo di cottura medio di un forno elettrico, dove notiamo una richiesta costante di circa 600 W per i primi quarantacinque minuti di funzionamento, fino al raggiungimento della temperatura di regime. Il consumo di energia di un ciclo di cottura, tenendo in conto in parametri di durata, temperatura e classe energetica dell'elettrodomestico varia generalmente tra gli 1,2 kWh agli 0,6 kWh del caso presentato [16].

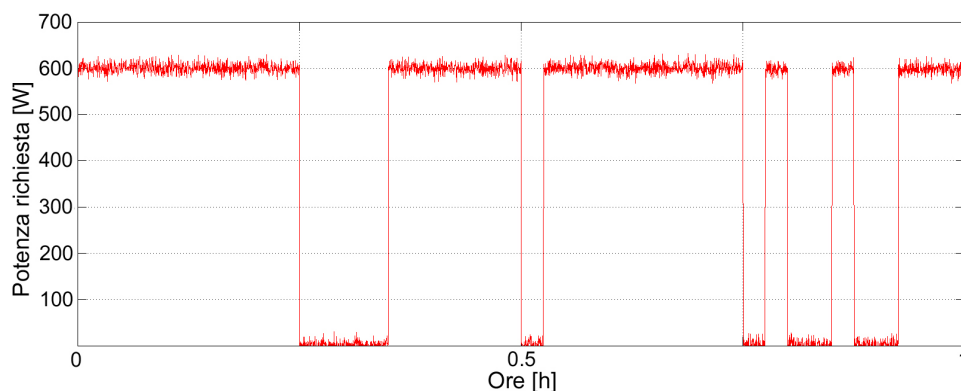


Figura B.6: Profilo di potenza medio di un forno elettrico

## B.7 Computer portatile

Questa categoria di dispositivi elettronici ha conosciuto una larghissima diffusione negli ultimi anni, spesso più frequenti rispetto ai corrispettivi modelli *fissi* (desktop), comportando un aumento non trascurabile del consumo di energia elettrica nel settore residenziale.

Il consumo complessivo di un computer portatile varia in base a quello specifico dei singoli componenti hardware, con consumi maggiori corrispondenti a maggiori prestazioni. In particolare i componenti che maggiormente influenzano i livelli di consumo di un computer sono il processore, la ventola di raffreddamento della scheda madre, l'hard disk e la scheda di rete Wi-Fi il cui contributo non va sottovalutato.

In Figura si mostra la curva di consumi media di un computer portatile a prestazioni elevate per un ciclo di funzionamento di circa tre ore collegato alla corrente elettrica. Si può notare un picco di richieste di circa 140 W dovuta all'accensione del dispositivo e alla ricarica della batteria, dopo il quale i consumi si mantengono pressoché costanti sui 40 W per un carico di lavoro medio con un consumo energetico totale di 0,104 kWh.

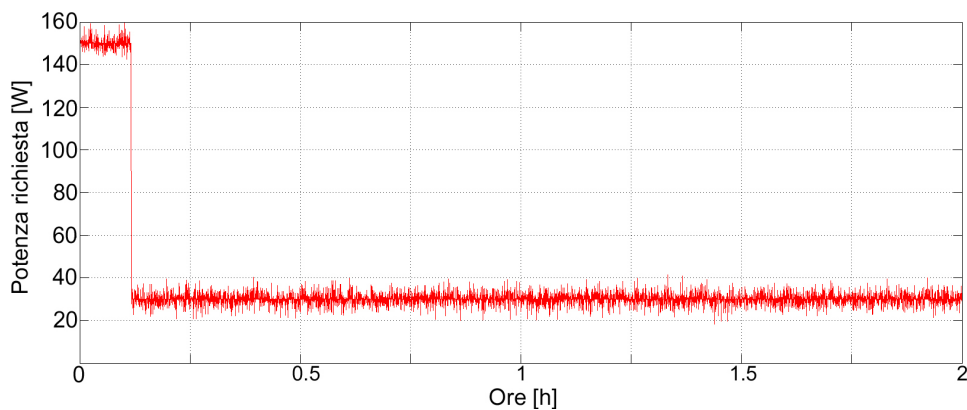


Figura B.7: Profilo di potenza medio di un computer portatile

## B.8 Frigorifero e congelatore

Gli elettrodomestici appartenenti a tale categoria sono senz'altro i più diffusi e utilizzati nel settore residenziale, essendo essi indispensabili per il raffreddamento e la conservazione delle vivande.

La tecnologia principalmente utilizzata e comune ad entrambi i dispositivi, è il raffreddamento tramite compressione ed evaporazione di un refrigerante, simile al processo utilizzato dai condizionatori d'aria. Nella parte interna dell'ambiente frigorifero è collocato un termostato, la cui temperatura può essere regolata dall'utente tramite una manopola graduata che riporta degli stadi di funzionamento. Quando la temperatura scende al di sotto di questa soglia si aziona il ciclo frigorifero, dove il refrigerante viene compresso e, passando attraverso un condensatore e una valvola di espansione, viene raffreddato e vaporizzato sottraendo dunque calore all'ambiente.

Tale ciclo di raffreddamento avviene in maniera ciclica e continuativa nell'arco dell'intera giornata ed è influenzato soprattutto dalla frequenza di apertura del comparto frigo che ne innalza la temperatura interna a causa dell'introduzione di nuove vivande da raffreddare e dello scambio di calore con l'ambiente esterno. Sebbene nella maggior parte dei casi, il frigorifero e il congelatore siano integrati all'interno di un unico elettrodomestico, il *frigocongelatore*, nel lavoro svolto si è scelto di modellarli come due dispositivi distinti in modo da permettere alla piattaforma di simulazione di attuare delle specifiche azioni per le due componenti. In [16] sono infatti mostrati diversi scenari dove il software di gestione dell'energia è in grado di ridurre i consumi dovuti al loro funzionamento modificando ad esempio i tempi dei cicli di raffreddamento o alterando la temperatura di regolazione del termostato, agendo separatamente per i due elettrodomestici.

Sebbene separati da un punto di vista logico, da un punto di vista energetico invece, essendo i loro cicli di funzionamento continuativi nell'arco di una giornata, i modelli dei due dispositivi opereranno in maniera sincrona dove le singole di potenza saranno sommate in ogni istante, simulando di fatto la presenza di un profilo di potenza unico assimilabile al funzionamento di un singolo dispositivo dove essi siano integrati.

Si mostrano i profili di potenza per due ore funzionamento di un frigorifero (Figura B.8) e di un congelatore (Figura B.9) a fronte di una variazione della temperatura interna di 2 °C ogni 5 minuti. Le mag-

giori richieste del ciclo sono dovute all'azione del compressore del gas refrigerante e, considerando un periodo di funzionamento per l'intera giornata, i due cicli presenta un consumo energeti di 0,79 kWh e 1,1 kWh rispettivamente [16].

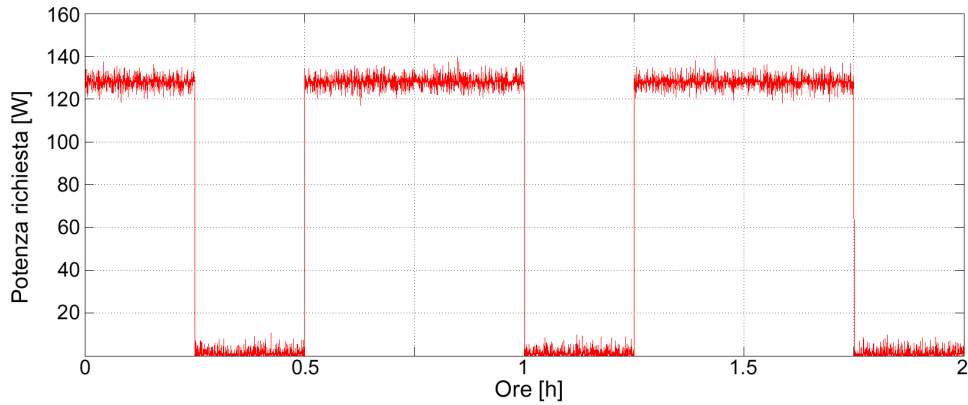


Figura B.8: Profilo di potenza medio di un frigorifero

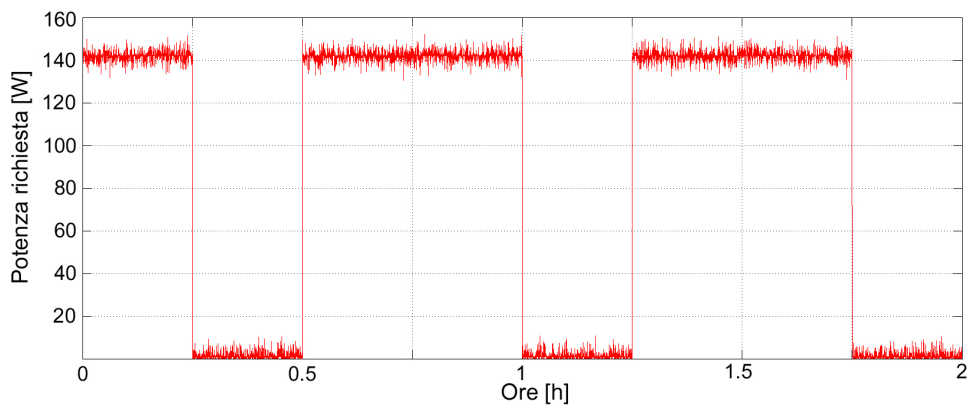


Figura B.9: Profilo di potenza medio di un congelatore