

Household Energy Consumption Optimization: The Energy Box

Agnetis A., Detti P., Murgia G.*, Vicino A.

Torino - 14 Aprile 2015

address
interactive
energy



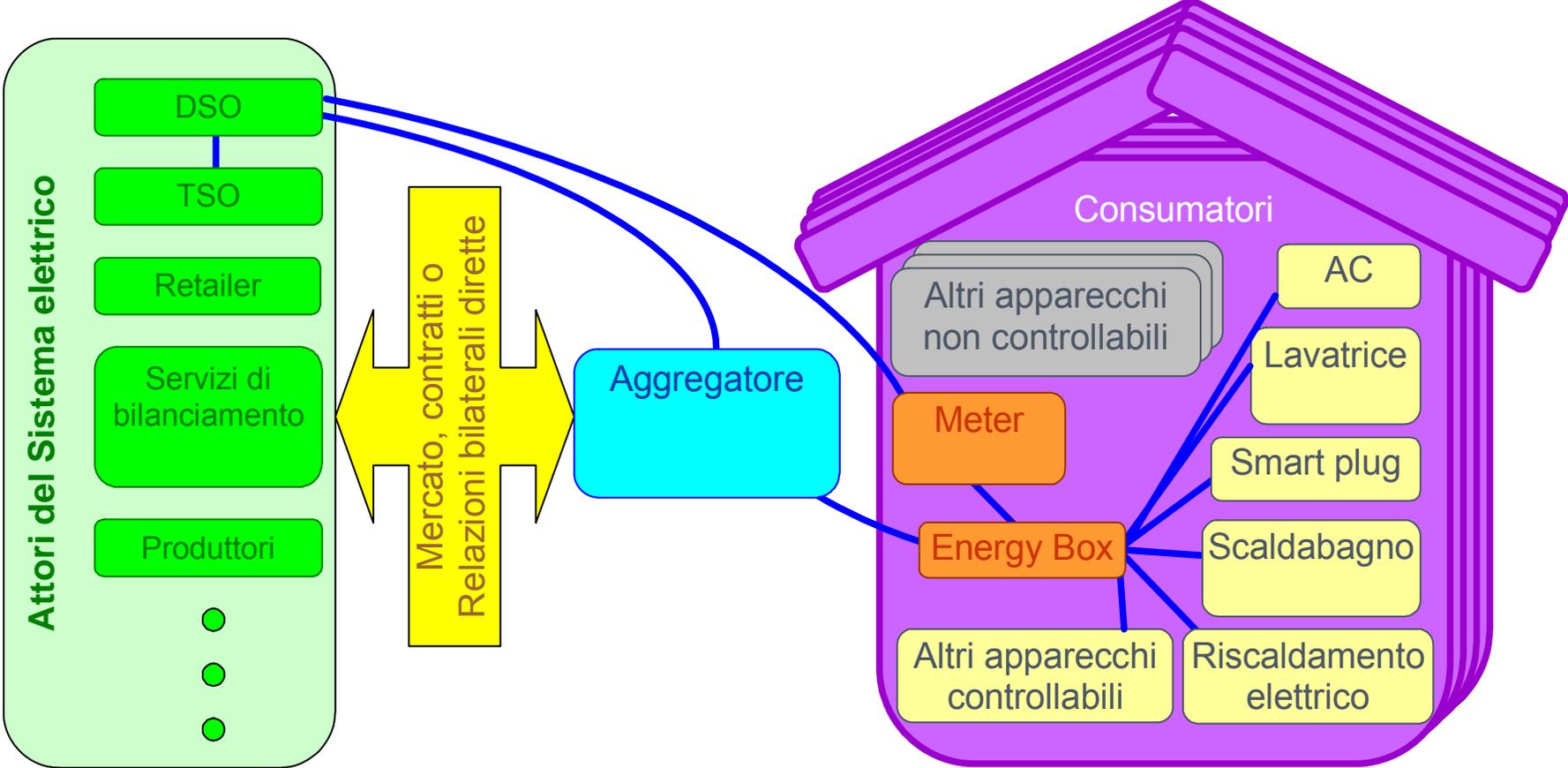
UNIVERSITÀ DI SIENA 1240

ADDRESS- FP7

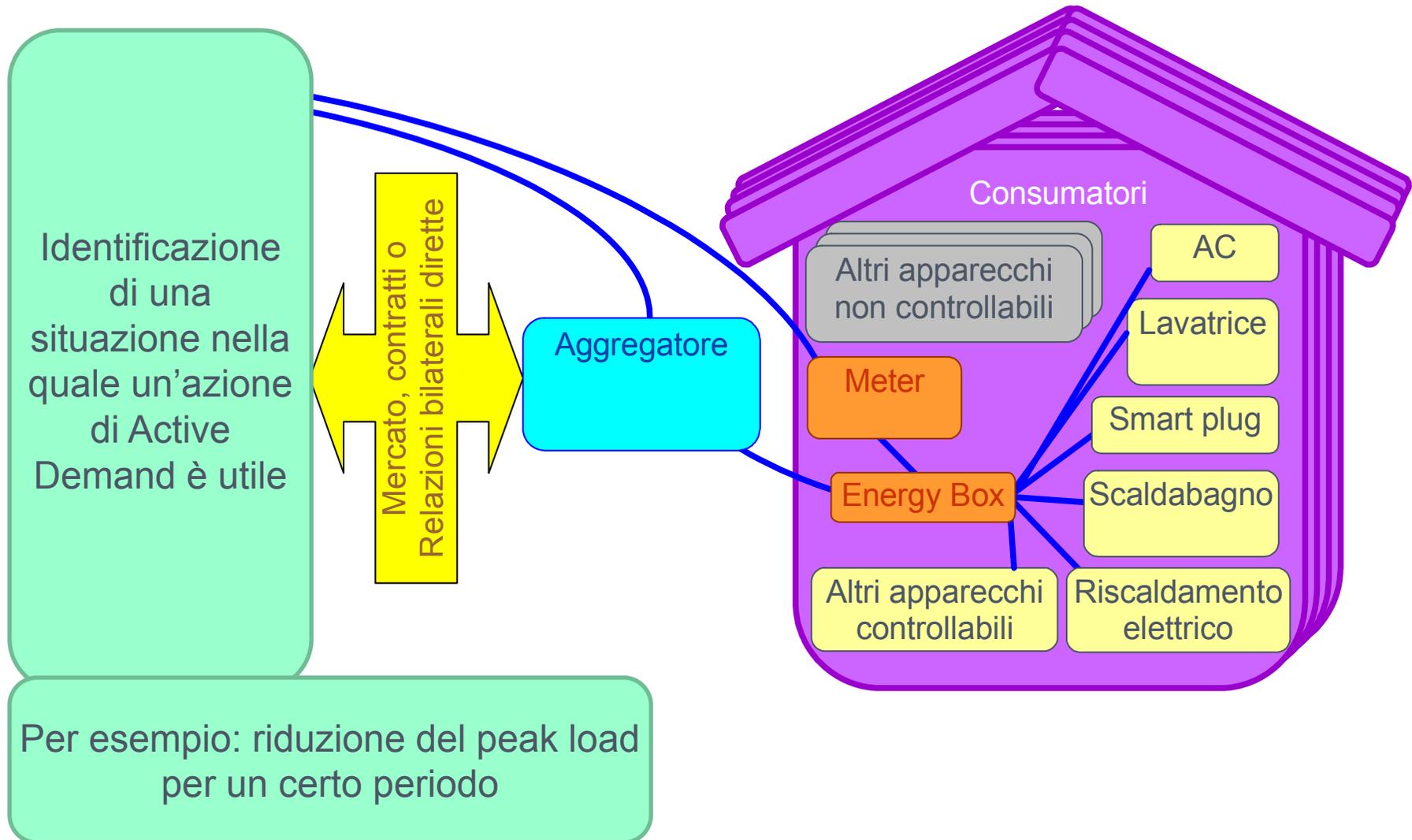
Lo scopo del progetto ADDRESS era quello di favorire la partecipazione attiva dei consumatori residenziali e dei piccoli consumatori commerciali nel mercato elettrico:

- Generalmente, i consumatori residenziali e i piccoli consumatori commerciali sono parzialmente flessibili in termini di quantità e di tempistica di consumo elettrico
- I consumatori possono controllare e gestire il funzionamento di elettrodomestici bianchi, degli apparecchi AC, dei sistemi di riscaldamento di acqua e ambienti, dei sistemi di storage e di generazione dell'energia, etc. → Necessità dell'**Energy Box**
- Per aumentare la flessibilità dei consumatori, e i vantaggi ottenibili dal Sistema elettrico, è necessario un sistema di coordinamento che segnali ai consumatori quando e quanto è utile che riducano il loro consumo elettrico → Necessità dell'**Aggregatore**

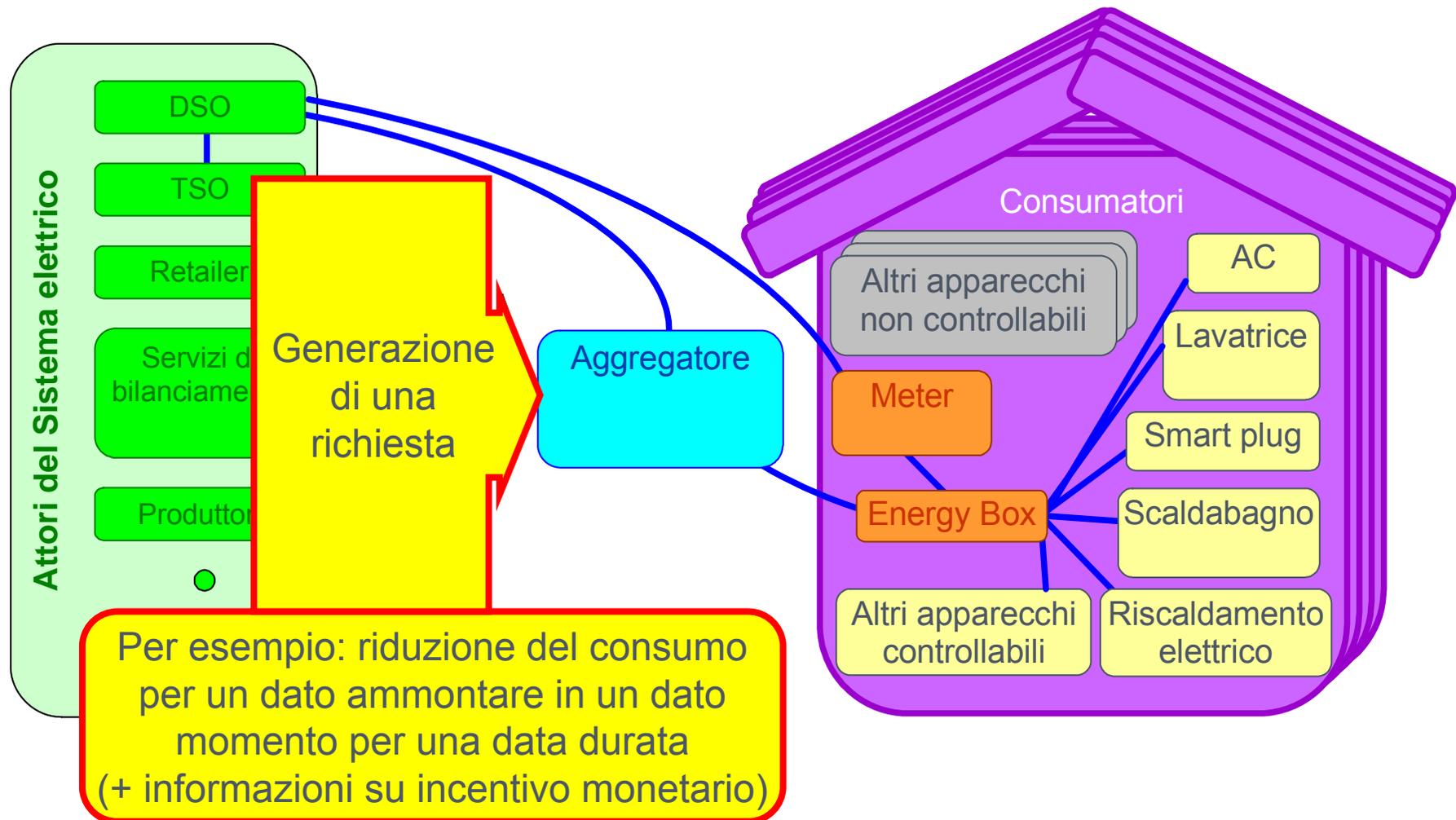
The ADDRESS chain



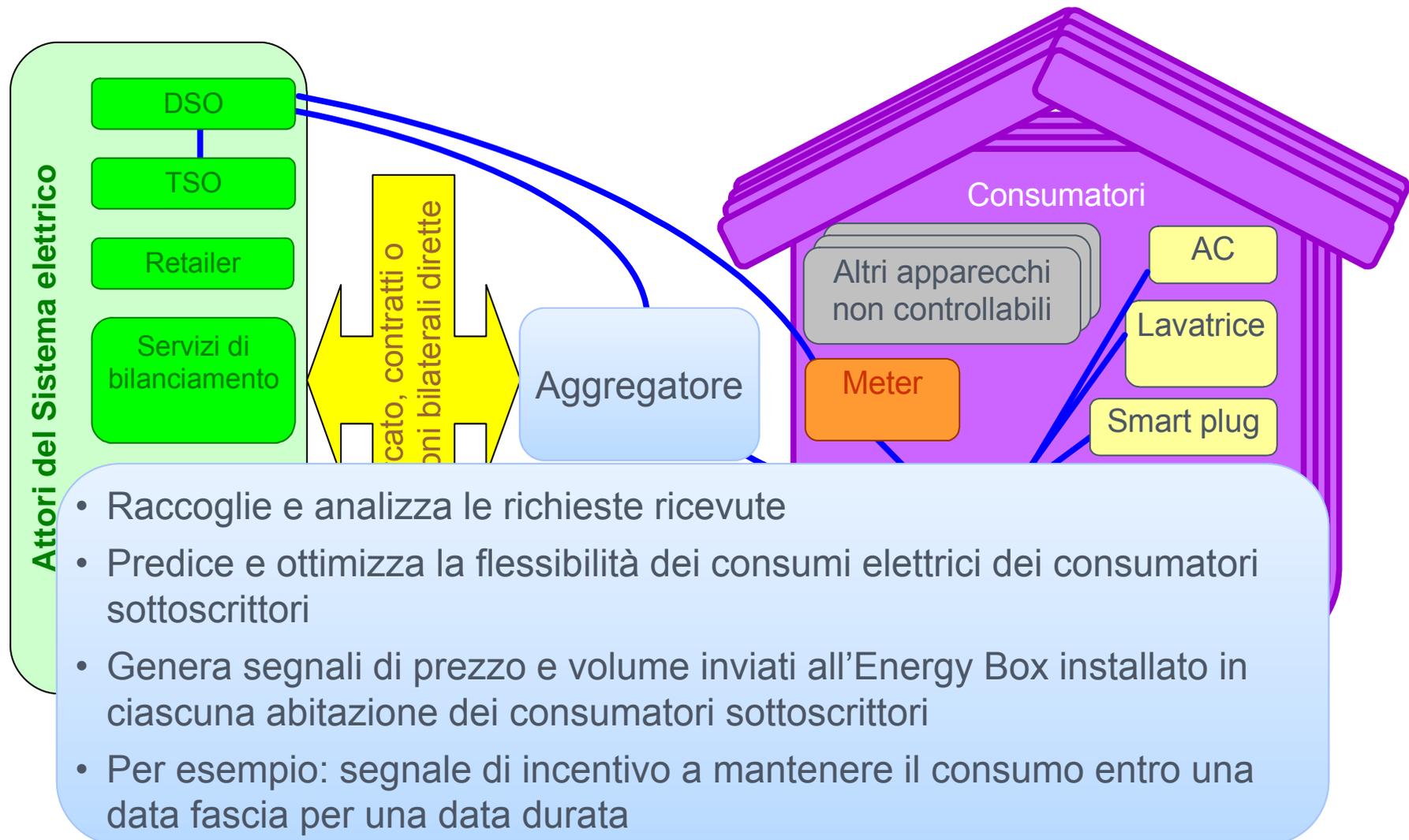
Come opera la ADDRESS chain? (1/5)



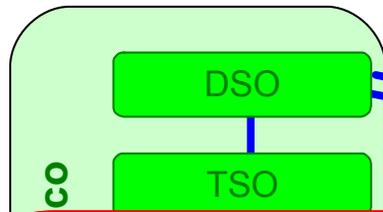
Come opera la ADDRESS chain? (2/5)



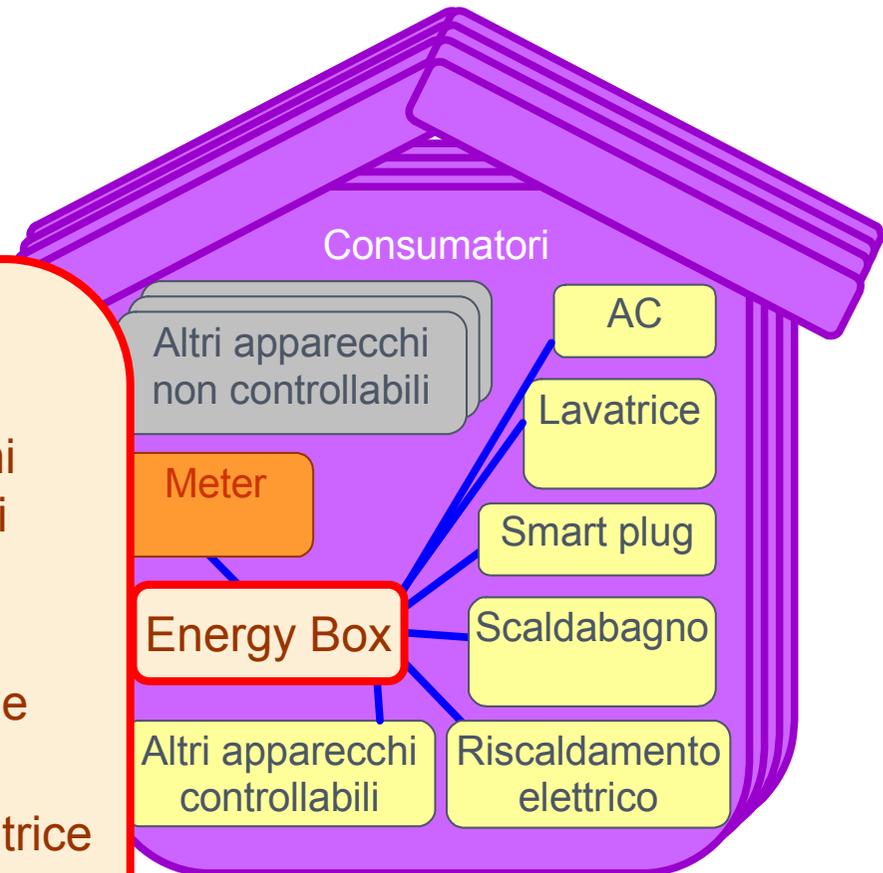
Come opera la ADDRESS chain? (3/5)



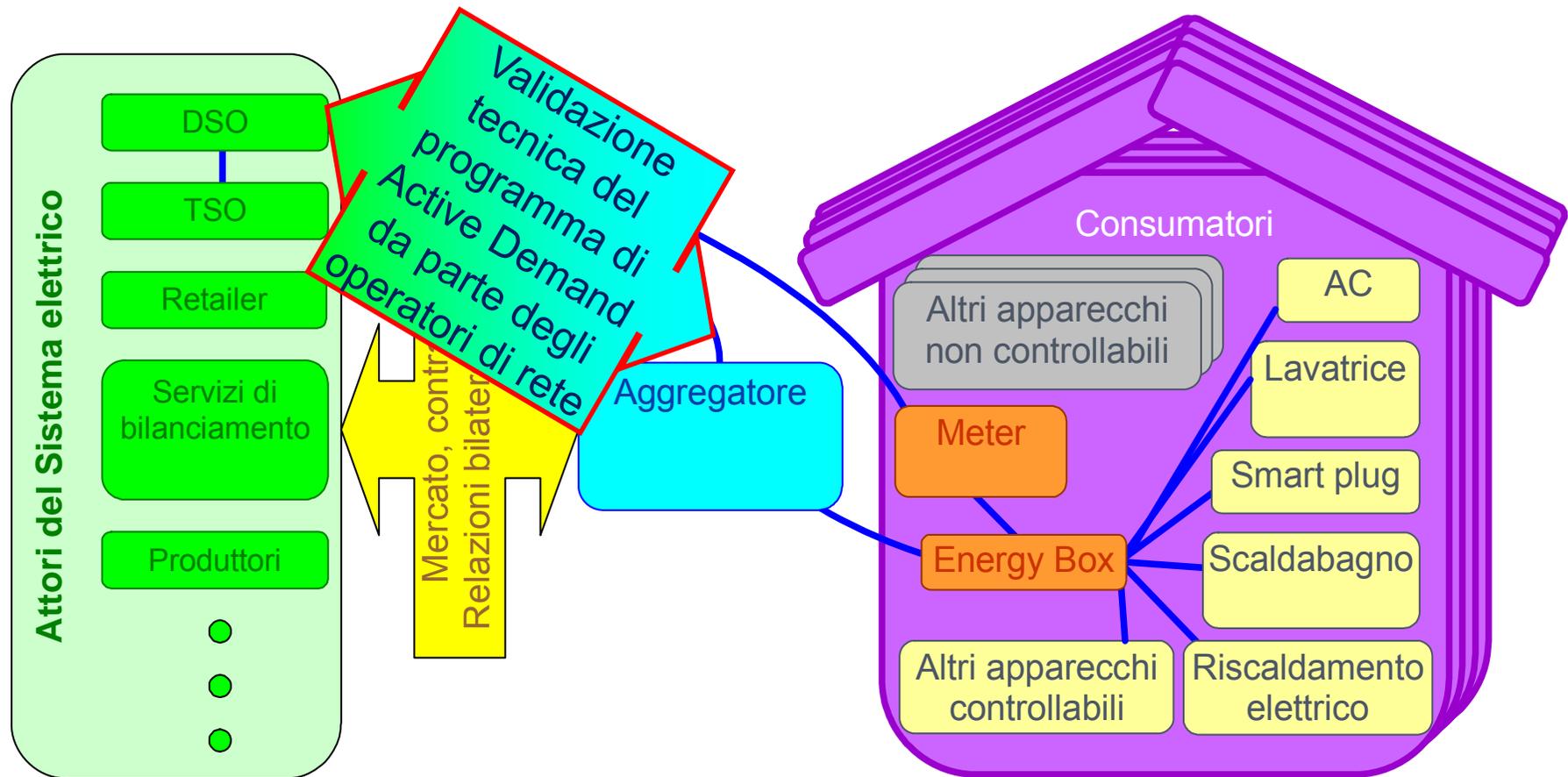
Come opera la ADDRESS chain? (4/5)



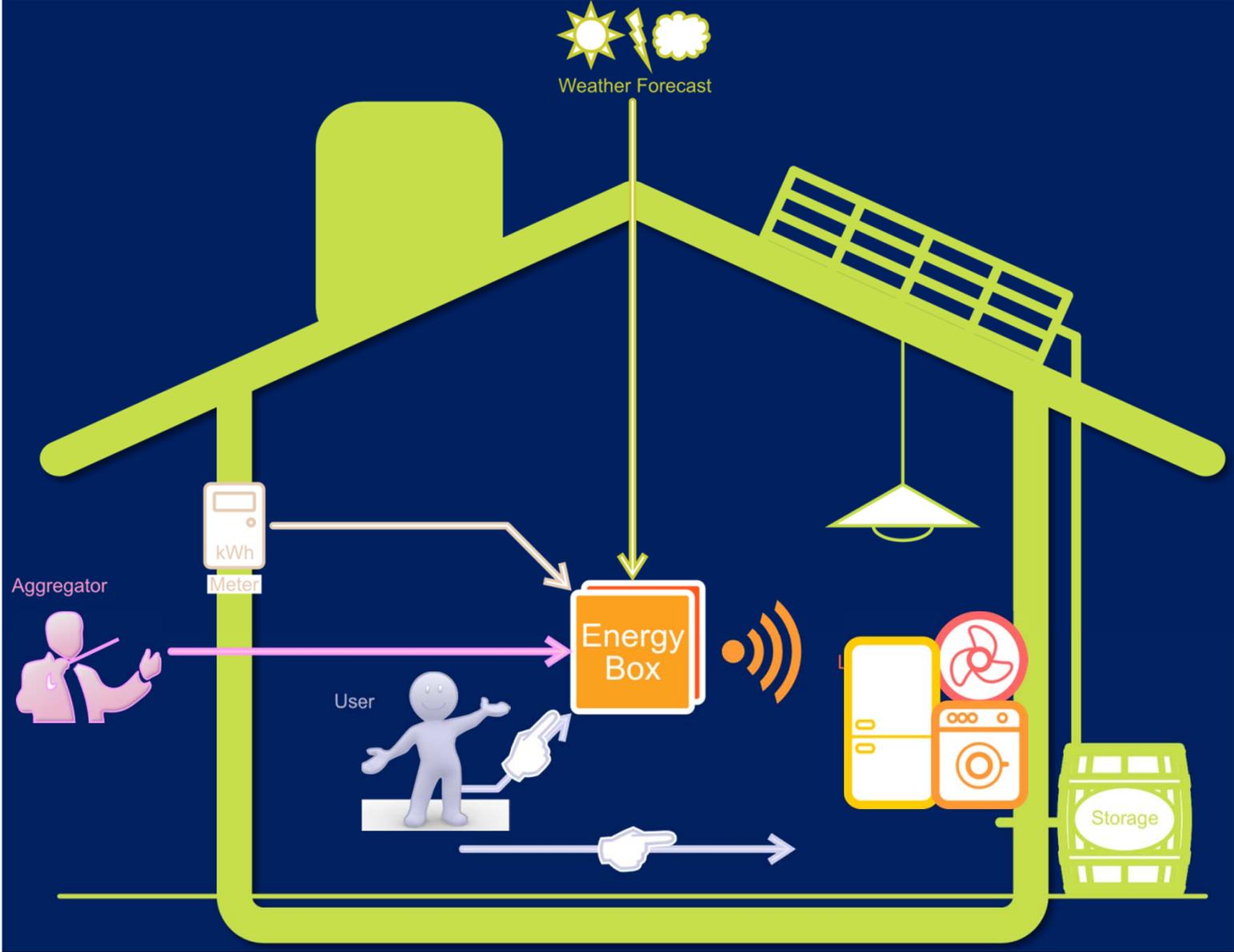
- Interfaccia con l'aggregatore e con il consumatore
- Controllo e ottimizzazione degli apparecchi controllabili del consumatore, in risposta ai segnali ricevuti dall'aggregatore
- Mantenimento del funzionamento corretto degli apparecchi, dei requisiti di sicurezza e delle preferenze del consumatore
- Per esempio: ritarda la partenza della lavatrice e/o ferma il riscaldamento per un periodo specificato



Come opera la ADDRESS chain? (5/5)



ADDRESsed Home



Classificazione degli apparecchi domestici



THERMAL

Caratterizzati da un profilo di carico elettrico modulabile: Condizionatori, Stufe elettriche, etc. → EB può inviare segnali di riduzione o di aumento del carico elettrico

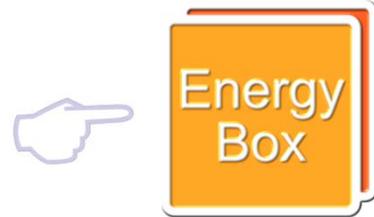
SHIFTABLE

Caratterizzati dalla presenza di diversi cicli di lavoro, e quindi profili di carico elettrico, predefiniti e non-interrompibili: Lavatrice, Lavastoviglie, Forno, Macchina del pane, etc. → EB può inviare segnali per la selezione del ciclo di lavoro e per il suo avvio ritardato

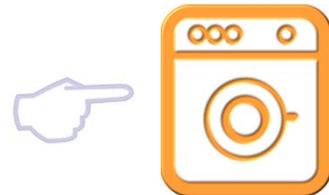
INTERRUPTIBLE

Caratterizzati da un profilo di carico elettrico fisso, possono essere spenti per periodi di tempo limitati tramite smart plug: Scaldabagno elettrici, Frigoriferi, etc. → EB può inviare segnali per l'accensione o lo spegnimento dell'apparecchio

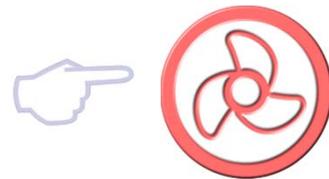
Possibili azioni del consumatore



- Risparmio economico
- Flessibilità nella tempistica di funzionamento degli apparecchi controllabili
- Flessibilità nel comfort ambientale



- Controllo locale o remoto (attraverso l'Energy Box) degli apparecchi

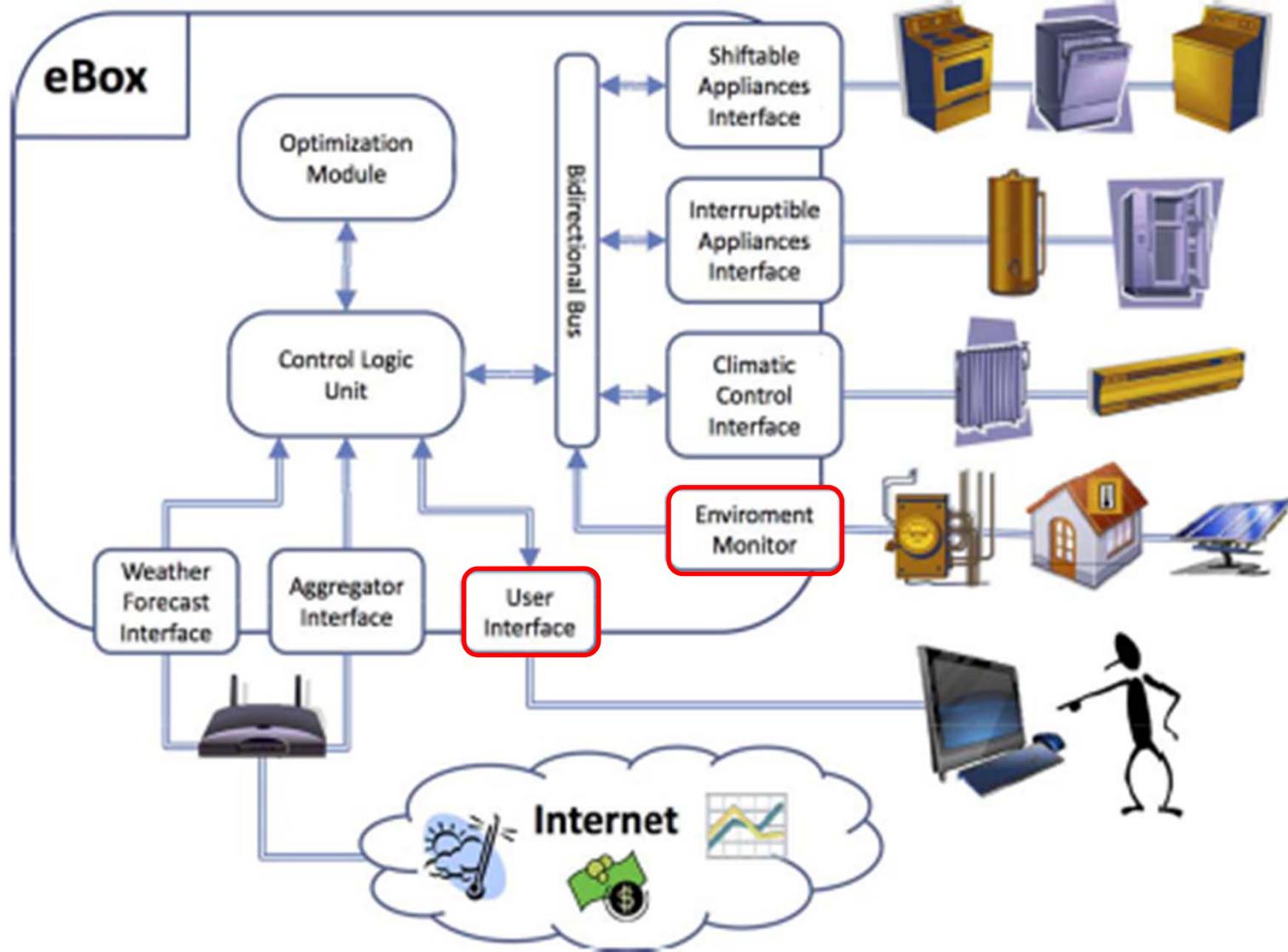


- Settaggio locale o remoto (attraverso l'Energy Box) della temperatura dell'ambiente

Setting

- L'Energy Box riceve informazioni e gestisce i consumi elettrici degli **apparecchi domestici controllabili**, in maniera specifica per ciascuna tipologia
- L'Energy Box stima una previsione del profilo di consumo degli **apparecchi domestici non controllabili** (illuminazione, TV, computer, etc.)
- L'Energy Box tiene conto della presenza di **fonti di autoproduzione di energia** (ad esempio, pannelli fotovoltaici o micro-CHP) e dei relativi **sistemi di storage** (ad esempio, batterie o veicoli elettrici)
- L'Energy Box, attraverso il meter o altri apparecchi, conosce il **consumo elettrico totale dell'abitazione**
- Il **processo di ottimizzazione dei consumi elettrici** è gestito esclusivamente dall'Energy Box, che si avvale degli altri apparecchi solo per il reperimento delle informazioni sui carichi
- Non è previsto alcun feedback dall'Energy Box all'Aggregatore

Architettura funzionale dell'Energy Box



Optimization Module

L'Optimization Module definisce lo scheduling degli apparecchi domestici controllabili e delle operazioni di carico/scarico del sistema di storage, in modo tale da massimizzare l'utilità del consumatore nei 96 slot temporali giornalieri

Necessità di modelli matematici e di dati in input per definire:

- **L'utilità dei consumatori**, data come combinazione di risparmio, di comfort ambientale e di tempistica di funzionamento degli apparecchi domestici
- **I profili di consumo e i vincoli di funzionamento** degli apparecchi domestici e dei sistemi di storage
- **I profili di produzione** delle fonti di autoproduzione e dei sistemi di storage
- **I segnali provenienti dall'Aggregatore e dalle previsioni meteorologiche**

Obiettivo 1

Minimizzazione dei costi dell'energia

Per il perseguimento di tale obiettivo bisogna tener conto di:

- Tipologia contrattuale che lega il consumatore al retailer, che può contenere un prezzo variabile nel corso della giornata e un limite massimo di consumo che il consumatore non può superare nel corso della giornata
- Incentivo ottenuto dal consumatore per essere venuto incontro ai segnali di Active Demand inviati dall'Aggregatore

$$C_{EC} = \sum_{t=1}^T EP_t p_t - \sum_{s=1}^{N_{AS}} REW_s x_s$$

Obiettivo 2

Desiderabilità dello scheduling

Il consumatore definisce un livello di desiderabilità connesso all'attivazione di un apparecchio Shiftable in ogni slot temporale.

Per il perseguimento di tale obiettivo bisogna tener conto che:

- Gli apparecchi Interruptible possono essere spenti per un numero massimo di slot consecutivi e, una volta riaccesi, devono essere tenuti accesi per un numero minimo di slot consecutivi. Infine, esiste anche un limite massimo sugli slot complessivi nei quali gli apparecchi Interruptible possono essere spenti

$$C_{PR} = \left[\sum_{a=1}^{N_{SH}} \sum_{t=1}^T PR_{a,t} ST_{a,t} \right] / N_{SH}$$

Obiettivo 3

Minimizzazione del discomfort del consumatore

Il consumatore definisce una fascia di temperatura ideale per ogni stanza dell'abitazione e per ogni slot temporale.

Lo sviluppo di una temperatura al di fuori di tale fascia, aumenta il discomfort del consumatore

Per il perseguimento di tale obiettivo bisogna tener conto che:

- La temperatura registrata in ciascuna stanza dipende dalla temperatura esterna, dal tasso di dispersione termica, dal rendimento degli apparecchi di riscaldamento e di condizionamento, oltre che dall'utilizzo degli apparecchi di riscaldamento e di condizionamento
- La temperatura in ogni stanza della casa non deve mai oltrepassare una data soglia massima e minima

$$C_{CC} = g^{\max} + \left[\sum_{r=1}^{N_R} \sum_{t=1}^T g_{r,t} \right] / (N_R T)$$

Formulazione (1)

$$\text{Min } J = \alpha_{\text{EC}} \bar{C}_{\text{EC}} + \alpha_{\text{PR}} \bar{C}_{\text{PR}} + \alpha_{\text{CC}} \bar{C}_{\text{CC}}, \quad (4)$$

$$\sum_{t=1}^T y_{a,t} = 1 \quad \forall a = 1 \dots N_{\text{SH}}, \quad (5)$$

$$y_{a,t} = 0 \quad \forall a = 1 \dots N_{\text{SH}}, \quad \forall t : t + \Delta_a^{\text{SH}} \geq T. \quad (6)$$

$$\sum_{t=1}^T (1 - z_{a,t}) \leq \text{OFF}_a^{\text{MAX}}, \quad (7)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+\text{OFF}_a^{\text{MAX}}-1} z_{a,\tau} \geq 1, \quad (8)$$

$$\sum_{\tau=t+1}^{t+\text{ON}_a^{\text{MIN}}} z_{a,\tau} \geq \text{ON}_a^{\text{MIN}} (z_{a,t+1} - z_{a,t}). \quad (9)$$

$$p_t^{\text{SH}} = \sum_{a=1}^{N_{\text{SH}}} \sum_{\tau=1}^{\Delta_a^{\text{SH}}} P_a^{\text{SH}}(\tau) y_{a,t-\tau+1} \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad (10)$$

$$p_t^{\text{IN}} = \sum_{a=1}^{N_{\text{IN}}} P_a^{\text{IN}} z_{a,t} \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad (11)$$

$$p_t^{\text{CC}} = \sum_{r=1}^{N_R} [p_{r,t}^{\text{H}} + p_{r,t}^{\text{C}}] \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad (12)$$

$$p_t^{\text{SH}} + p_t^{\text{IN}} + p_t^{\text{CC}} + P_t^{\text{NM}} = \text{bo}_t + p_t \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad (13)$$

$$p_t \leq P^{\text{MAX}} \quad \forall t = 1, \dots, T. \quad (14)$$

Garantiscono che tutti i carichi Shiftable siano completati

Garantiscono che i vincoli sui carichi Interruptible siano rispettati

Definiscono i carichi dovuti ad apparecchi Shiftable, Interruptible e Thermal. Garantiscono che siano rispettati i limiti contrattuali con il retailer, tenendo conto dei carichi dovuti ad apparecchi non controllabili e al netto dell'energia ricavata dal sistema di storage

Formulazione (2)

$$p_t \leq P_s^{\text{MAX}} x_s + P^{\text{MAX}}(1 - x_s), \quad (15)$$

$$p_t \geq P_s^{\text{MIN}} x_s. \quad (16)$$

Definiscono le condizioni per ottenere l'incentivo dall'Aggregatore

$$\begin{aligned} \theta_{r,t} &= \theta_{r,t-1} \\ &+ [\delta_r^{-1} (\Theta_t^{\text{EXT}} - \theta_{r,t-1}) + \gamma^H p_{r,t}^H - \gamma^C p_{r,t}^C] \text{SD}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$p_{r,t}^H \leq PH_r^{\text{MAX}}, \quad (18)$$

$$p_{r,t}^C \leq PC_r^{\text{MAX}}, \quad (19)$$

$$\theta_{r,t} \leq \Theta^{\text{MAX}}, \quad (20)$$

$$\theta_{r,t} \geq \Theta^{\text{MIN}}, \quad (21)$$

$$\theta_{r,t} - \Theta_{r,t}^{\text{MAX}} \leq g_{r,t}, \quad (22)$$

$$\theta_{r,t} - \Theta_{r,t}^{\text{MIN}} \geq -g_{r,t}, \quad (23)$$

$$g_{r,t} \leq g^{\text{max}}. \quad (24)$$

Garantiscono il rispetto dei vincoli sulle temperature e sui carichi dovuti a condizionamento e riscaldamento nelle singole stanze

$$\text{bl}_t = \text{bl}_{t-1} + \text{SD}(\text{BI}_t - \text{bo}_t) \quad \forall t = 1, \dots, T, \quad (25)$$

$$\text{bl}_t \leq \text{BL}_{\text{MAX}} \quad \forall t = 1, \dots, T. \quad (26)$$

Garantiscono che il sistema di storage rispetti i vincoli fisici esistenti

Approccio risolutivo

Il problema affrontato dall'Optimization Module è **NP-Hard**

Algoritmo euristico che, per ogni segnale dell'Aggregatore, itera le seguenti sub-routine:

- **Initial Solution Subroutine:** costruisce una soluzione ammissibile di partenza da cui attivare la ricerca locale;
- **Current Neighborhood Subroutine:** costruisce i vicini della soluzione corrente;
- **Thermal Control Subroutine:** calcola il carico necessario per gli apparecchi di riscaldamento e condizionamento;
- **Battery Control Subroutine:** definisce l'utilizzo del sistema di storage;
- **Load Control Subroutine:** garantisce che il carico elettrico totale non superi i limiti previsti dal contratto con il retailer

Output dell'algoritmo

Euristica implementata in Java

- Utilità totale del consumatore, suddivisa per i tre obiettivi
- Slot di accensione di ciascun apparecchio Shiftable
- Slot di accensione/spegnimento di ciascun apparecchio Interruptible
- Carico richiesto da apparecchi di riscaldamento e condizionamento di ogni stanza in ogni slot
- Carico rilasciato/assorbito dal sistema di storage in ogni slot
- Carico totale assorbito dall'intera abitazione in ogni slot
- Temperatura registrata in ogni stanza in ogni slot
- Lista dei segnali inviati dall'Aggregatore che vengono recepiti dall'Energy Box

Simulazioni

Test a partire dal seguente scenario:

- 96 slot temporali (15 minuti)
- 2 stanze nell'abitazione
- 2 apparecchi Shiftable (Lavatrice e Lavastoviglie)
- 2 apparecchi Interruptible
- Tariffa bioraria
- Utilità con peso massimo a risparmio (1), peso minimo a desiderabilità scheduling (0.3), peso intermedio a comfort (0.5)
- 6 segnali inviati dall'Aggregatore. Ciascun segnale contiene:
 - la fascia di carico minimo e massimo necessari per venire incontro alla richiesta;
 - lo slot di inizio e di fine della richiesta;
 - l'incentivo monetario fornito ai consumatori che vengono incontro alla richiesta

Risultati

A parità delle altre condizioni, riducendo progressivamente gli incentivi connessi a tutti i segnali, non si ottengono modifiche sostanziali al comportamento del consumatore

A parità delle altre condizioni, variando il peso dei tre obiettivi, il comportamento del consumatore varia radicalmente. Per bassi pesi associati all'obiettivo "Risparmio" si registra un numero minore di richieste dell'Aggregatore accolte dal consumatore

alpha EC	alpha PR	alpha CC	costEC	costPR	costCC	cost	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	0.3	0.5	-3.372	3.000	0.024	0.206	√	√	√		√	
1	0.5	0.3	-1.951	1.500	0.030	0.296			√		√	√
0.5	1	0.3	-3.961	1.000	0.030	0.033	√	√	√		√	√
0.3	1	0.5	-0.560	1.000	0.024	0.121			√			
0.5	0.3	1	-3.352	1.000	0.009	0.063	√	√	√		√	
0.3	0.5	1	-1.353	1.000	0.009	0.097			√		√	

Sviluppi futuri

Estendere la campagna computazionale in modo da comprendere meglio la sensitività del comportamento del consumatore rispetto ai vari parametri

Valutare l'impatto dell'introduzione di scenari di uso più complessi (ad esempio, maggior numero di stanze e di elettrodomestici)

Valutare l'impatto di differenti forme di incentivo (ad esempio, incentivi a scaglioni all'aumentare delle riduzioni di carico)

Fornire un modello quanto più realistico, che consenta:

- Ai consumatori, un DSS che favorisca la partecipazione ai sistemi di Active Demand, anche attraverso una valutazione dei vantaggi connessi
- Agli operatori, la definizione di politiche più efficaci per favorire la partecipazione dei consumatori ai sistemi di Active Demand