Ricarica intelligente di veicoli elettrici

Indice

Motivazione gestionale

Costruzione guidata del modello

Esempio svolto a mano

Caso di studio

Risultati

Analisi di sensitività

Esercizi

Obiettivi (1/2)

Alla fine di questo capitolo sarai in grado di:

- modellare decisioni su un orizzonte orario con finestre di disponibilità;
- leggere i duali come prezzi delle ore marginali;

Obiettivi (2/2)

Alla fine di questo capitolo sarai in grado di:

- gestire il compromesso costo-picco con un obiettivo pesato;
- diagnosticare una vera insidia dell'analisi di sensitività: il termine noto con le costanti.

Prerequisiti

- Da questo modulo, Capitolo 2 «Richiami: programmazione lineare e analisi di sensitività»: i prezzi ombra e il protocollo di sensitività
- Da questo modulo, Capitolo 3 «Il solver: costruire, risolvere, interpretare»: i bound delle variabili in `gurobipy` e il termine noto memorizzato dal solver

Motivazione gestionale

Introduzione: Motivazione gestionale

- **Classe del problema:** LP
- Vediamo un problema operativo nuovo, nato dalla transizione energetica
- Capiremo perché una decisione che *sembra* di tipo acceso/spento si modella in realtà con variabili continue

Il problema della flotta

- Una flotta aziendale deve arrivare carica al mattino sfruttando le ore notturne a prezzo basso
- Ma se tutti i veicoli caricano insieme nelle ore economiche, il **prelievo di punta** esplode
- Con esso esplodono i costi di potenza e il rischio di superare la capacità del contatore
- Il modello decide *quanta potenza* dare a ciascun veicolo in ciascuna ora: una decisione naturalmente **continua**

Smart charging

- La ricarica intelligente (*smart charging*) è uno dei problemi operativi nuovi creati dalla transizione energetica
- Ingredienti: flotte elettriche, prezzi orari dell'energia, limiti di potenza dei contatori
- Esempio perfetto di problema che *sembra* richiedere variabili di accensione/spegnimento e invece è un **LP puro**
- Il motivo: la decisione vera — quanta potenza — è continua

Riepilogo

- Obiettivo: caricare la flotta di notte al minimo costo
- Rischio: concentrare tutta la ricarica nelle ore economiche crea un picco di prelievo
- La decisione è **quanta potenza** per veicolo e per ora: variabili continue, nessuna variabile binaria

Costruzione guidata del modello

Introduzione: Costruzione guidata del modello

- Descriviamo il problema a parole, poi fissiamo dati e variabili
- Scriviamo il modello LP di ricarica a costo minimo e spieghiamo ogni famiglia di vincoli
- Vediamo infine le varianti: peak shaving e multiobiettivo

Il problema a parole

- *Decidiamo* quanta potenza erogare a ogni veicolo in ogni ora
- *L'obiettivo* è minimizzare la spesa energetica della notte
- *I vincoli*:
  - ogni veicolo deve ricevere tutta l'energia che gli serve entro la partenza
  - può caricare solo quando è collegato e mai oltre la potenza del suo caricatore
  - il prelievo complessivo (ricarica più edificio) non può mai superare la potenza del contatore

Dati (input del modello) (1/2)

Simbolo	Tipo	Significato
n	$\in \mathbb{Z}_{\geq 1}$	numero di veicoli, indicizzati da $v \in \{1, 2, \ldots, n\}$
m	$\in \mathbb{Z}_{\geq 1}$	numero di intervalli orari, indicizzati da $t \in \{1, 2, \ldots, m\}$, di durata Δt (qui $\Delta t = 1$ h)
π_t	$\in \mathbb{Q}_{\geq 0}$	prezzo dell'energia nell'ora t (€/kWh)
a_{vt}	$\in \{0, 1\}$	*dato* osservato: 1 se il veicolo v è collegato nell'ora t, 0 altrimenti
e_v	$\in \mathbb{Q}_{>0}$	energia richiesta dal veicolo v entro la partenza (kWh)

Dati (input del modello) (2/2)

Simbolo	Tipo	Significato
$\bar{p}_v$	$\in \mathbb{Q}_{>0}$	potenza massima di ricarica del veicolo v (kW)
b_t	$\in \mathbb{Q}_{\geq 0}$	carico di base dell'edificio nell'ora t (kW)
k	$\in \mathbb{Q}_{>0}$	potenza massima prelevabile dal contatore (kW)
η	$\in \mathbb{Q},\ 0 < \eta \leq 1$	rendimento di carica

Variabili decisionali

Introduciamo le seguenti $n\,m$ variabili non negative:

$$x_{vt} = \text{potenza assegnata al veicolo } v \text{ nell'ora } t \text{ (kW)},$$
$$\forall v \in \{1, 2, \ldots, n\},\ \forall t \in \{1, 2, \ldots, m\}.$$

Usando queste variabili, scriviamo ora un modello LP per il problema.

Modello LP di ricarica a costo minimo

Modello LP di ricarica a costo minimo

$$\min \quad \sum_{v=1}^{n} \sum_{t=1}^{m} \pi_t \, \Delta t \, x_{vt} \tag{5.1a}$$

$$\text{soggetto a} \quad \eta \sum_{t=1}^{m} \Delta t \, x_{vt} \geq e_v, \qquad \forall v \in \{1, 2, \ldots, n\}, \tag{5.1b}$$

$$\sum_{v=1}^{n} x_{vt} + b_t \leq k, \qquad \forall t \in \{1, 2, \ldots, m\}, \tag{5.1c}$$

$$x_{vt} \leq a_{vt} \, \bar{p}_v, \quad \forall v \in \{1, 2, \ldots, n\}, \ \forall t \in \{1, 2, \ldots, m\}, \tag{5.1d}$$

$$x_{vt} \geq 0, \qquad \forall v \in \{1, 2, \ldots, n\}, \ \forall t \in \{1, 2, \ldots, m\}. \tag{5.1e}$$

Funzione obiettivo e vincoli di energia

- La funzione obiettivo lineare minimizza la spesa energetica della notte: la potenza x_{vt} erogata per la durata Δt costa $\pi_t \, \Delta t \, x_{vt}$ euro
- I vincoli di energia assicurano che ogni veicolo riceva tutta l'energia richiesta entro la partenza (n vincoli lineari)
- Il rendimento η sta a sinistra: dell'energia prelevata solo la frazione η finisce in batteria

Vincoli di rete, di potenza e dominio

- I vincoli di rete impongono che il prelievo complessivo (ricarica più carico di base) non superi mai la potenza del contatore: **accoppiano i veicoli** tra loro (m vincoli lineari)
- I vincoli di potenza limitano ogni veicolo al suo caricatore e azzerano la potenza nelle ore in cui il veicolo è assente ($a_{vt} = 0$) ($n\,m$ vincoli lineari)
- La disponibilità è un *dato*, non una decisione: per questo **non servono variabili binarie**
- I vincoli $x_{vt} \geq 0$ definiscono le variabili del modello

Varianti del modello

- **Peak shaving**: $\min z$ con

$$\sum_{v=1}^{n} x_{vt} + b_t \leq z, \qquad \forall t \in \{1, 2, \ldots, m\}$$

- **Multiobiettivo**: costo $+ \rho\, z$

Vincolo di energia scritto come $\geq$

- Caricare più del necessario è ammesso
- Ma non è mai conveniente: il prezzo è positivo
- Quindi all'ottimo il vincolo di energia vale **con uguaglianza**

Riepilogo

- Variabili continue x_{vt}: potenza per veicolo e per ora
- Obiettivo: spesa energetica $\sum_v \sum_t \pi_t \, \Delta t \, x_{vt}$
- Vincoli: energia per veicolo, capacità del contatore per ora, potenza del caricatore e disponibilità
- La disponibilità a_{vt} è un dato: il modello resta un LP puro

Esempio svolto a mano

Introduzione: Esempio svolto a mano

- Risolviamo a mano un caso minimo: un veicolo, due ore
- Calcoliamo soluzione ottima e prezzi ombra
- Ne ricaviamo la chiave di lettura di tutto il capitolo: il duale è il prezzo dell'ora marginale

Esempio: un veicolo, due ore (1/3)

- Servono $e = 10$ kWh ($\eta = 1$)
- Prezzi: $\pi_1 = 0{,}10$ e $\pi_2 = 0{,}20$ €/kWh
- Potenza massima: $\bar{p} = 8$ kW

Esempio: un veicolo, due ore (2/3)

Caso $\bar{p} = 8$.

- Nell'ora economica si carica al massimo (8 kWh); i restanti 2 kWh vanno nell'ora cara
- Costo: $8 \cdot 0{,}10 + 2 \cdot 0{,}20 = 1{,}20$ €
- *Prezzo ombra del fabbisogno*: l'undicesimo kWh finirebbe nell'ora cara $\Rightarrow$ 0,20 €/kWh
- *Prezzo ombra del limite di potenza* nell'ora 1: un kW in più permetterebbe di spostare un kWh dall'ora cara a quella economica $\Rightarrow$ 0,10 €/kW

Esempio: un veicolo, due ore (3/3)

Caso $\bar{p} = 12$.

- Tutto nell'ora economica: costo 1,00 €
- Duale del fabbisogno: 0,10
- Duale della potenza: 0 (vincolo non attivo)

Il pattern "**il duale è il prezzo dell'ora marginale**" è la chiave di lettura di tutto il capitolo.

Riepilogo

- Si riempiono prima le ore economiche, fino al limite di potenza
- Il prezzo ombra del fabbisogno è il prezzo dell'ora marginale
- Il prezzo ombra del limite di potenza è il risparmio che si otterrebbe spostando energia dall'ora cara a quella economica; è zero se il vincolo non è attivo

Caso di studio

Introduzione: Caso di studio

- Applichiamo il modello a una flotta realistica
- Vediamo come si scrive il modello in Python con Gurobi
- Ci prepariamo a leggere risultati e prezzi ombra

I dati del caso di studio

- Sei furgoni con finestre di ricarica notturne diverse (dati in `dati/ev_flotta.csv`)
- Prezzi orari stilizzati con picco serale
- Carico di base dell'edificio
- Contatore da $k = 120$ kW, rendimento $\eta = 0{,}95$

Il modello in Gurobi (1/2)

Variabili, con il limite di potenza e la disponibilità come upper bound:

```
x = m.addVars(veicoli, ore, name="x")
for v in veicoli:
    for t in ore:
        # 0 se non collegato
        x[v, t].UB = P[v] * disp[v, t]
```

Il modello in Gurobi (2/2)

Vincoli di energia e di rete, funzione obiettivo:

```
v_ene  = m.addConstrs((eta * gp.quicksum(x[v, t]
                          for t in ore)
                          >= E[v] for v in veicoli),
                         name="energia")
v_rete = m.addConstrs((gp.quicksum(x[v, t]
                          for v in veicoli)
                          + base[t] <= C for t in ore),
                         name="rete")
m.setObjective(gp.quicksum(prezzo[t] * x[v, t]
                for v in veicoli for t in ore),
                GRB.MINIMIZE)
```

Riepilogo

- Sei furgoni, finestre diverse, contatore da 120 kW, $\eta = 0{,}95$
- Il vincolo di potenza diventa semplicemente l'upper bound della variabile (0 se il veicolo non è collegato)
- Energia e rete sono due famiglie di vincoli con `addConstrs`

Risultati

Introduzione: Risultati

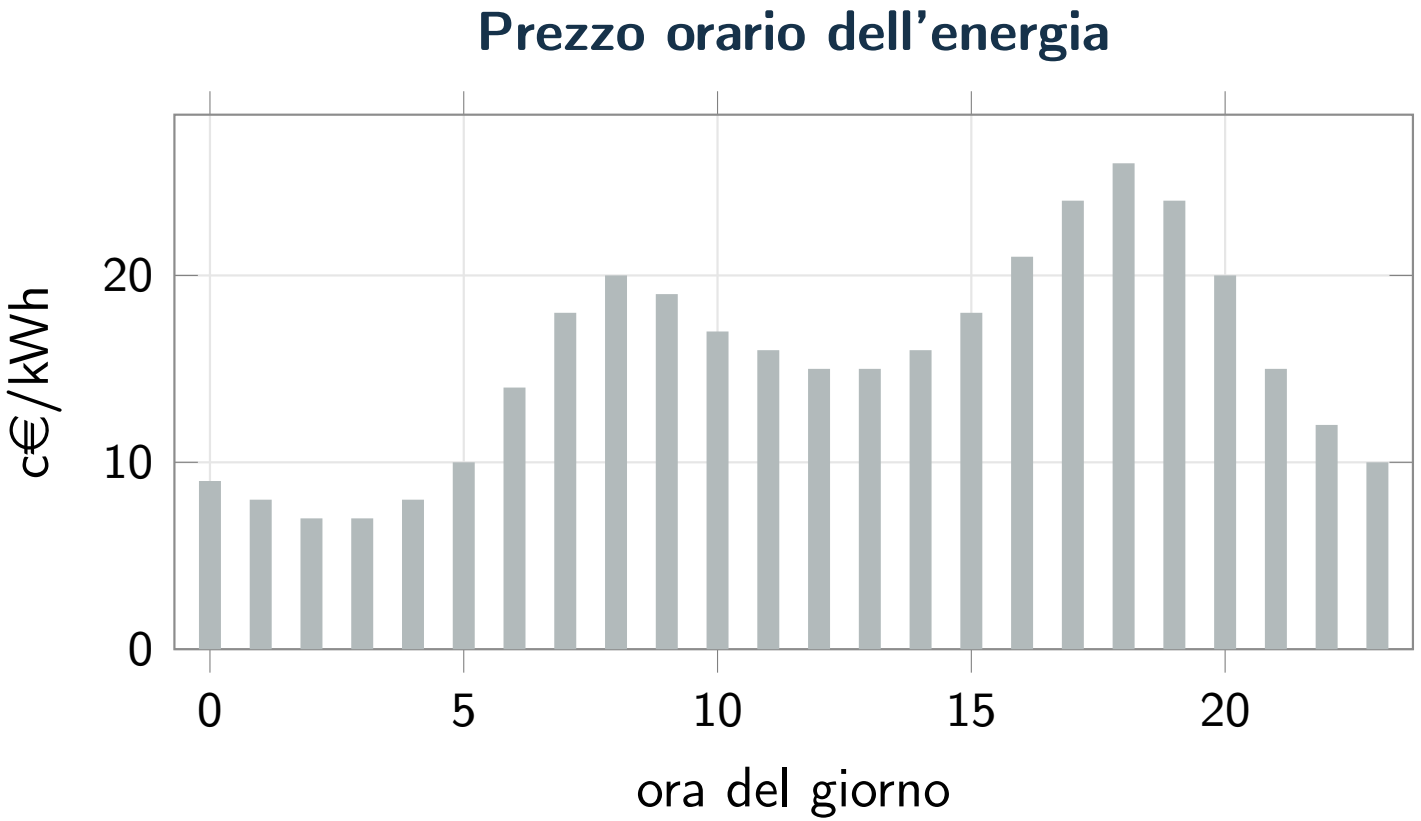
- Confrontiamo la strategia a costo minimo con il peak shaving
- Guardiamo i profili di prelievo ora per ora
- Interpretiamo i prezzi ombra del fabbisogno come prezzi delle ore marginali

Output del modello

```
Costo minimo : 20,36 EUR/notte
               picco di prelievo 103,4 kW (limite 120)
Peak shaving : picco minimo possibile 68,0 kW

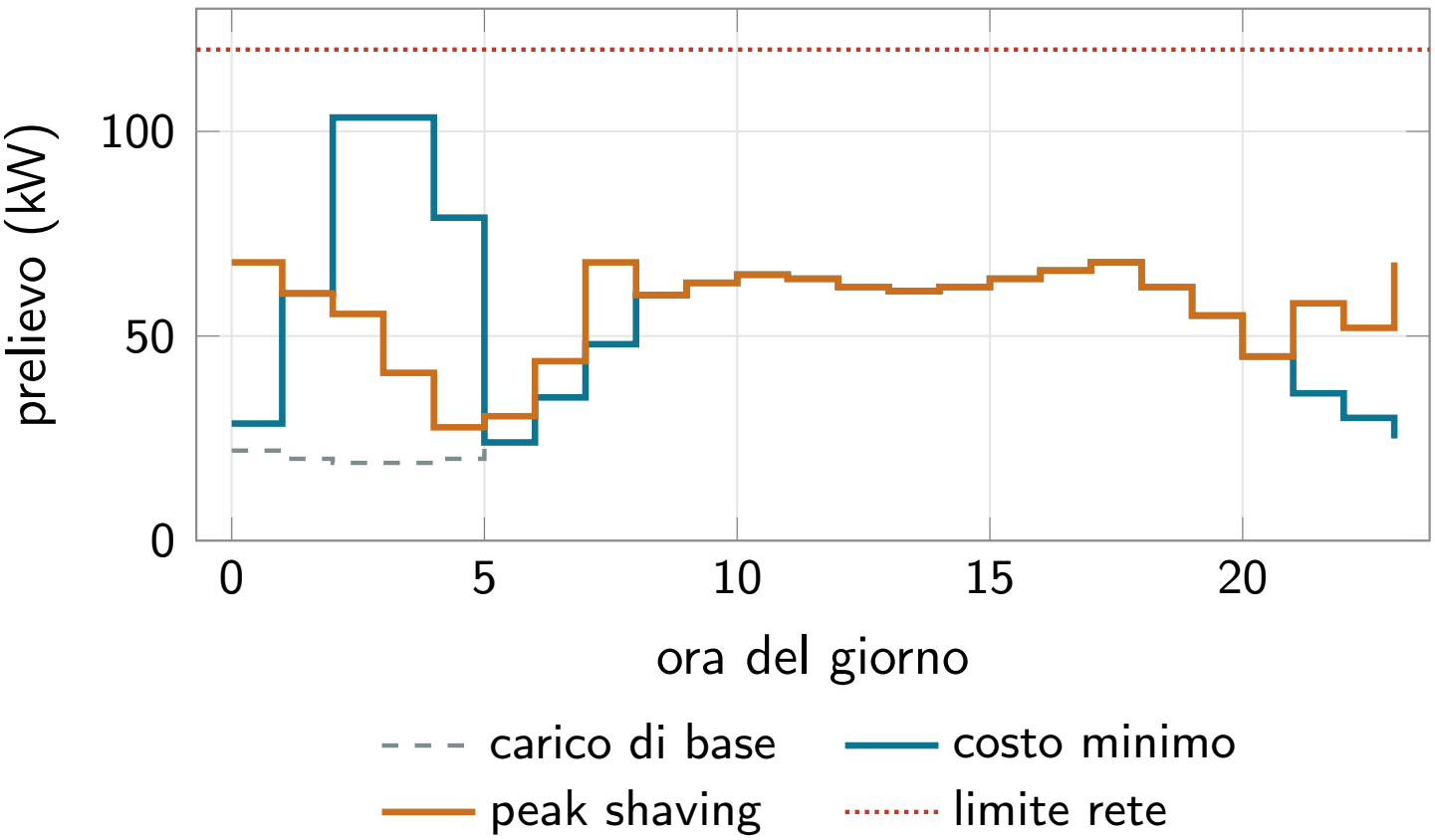
Prezzi ombra del fabbisogno (EUR/kWh):
  V1 0,0947   V2 0,0842   V3 0,0842
  V4 0,0947   V5 0,0947   V6 0,0842
```

Prezzo orario dell'energia



Il prezzo è basso di notte e ha un picco serale.

Prelievo totale: inseguire i prezzi crea un picco notturno



Lettura del grafico

- Il grafico mostra il prelievo totale (base + ricarica) ora per ora nelle due strategie
- Il costo minimo concentra la ricarica nelle ore economiche e crea un picco notturno di 103 kW
- Il peak shaving distribuisce la ricarica e tiene il prelievo a 68 kW
- Entrambe restano sotto il limite di rete di 120 kW

I duali raccontano le ore marginali (1/2)

- I prezzi ombra del fabbisogno valgono

$$0{,}0842 = 0{,}08/\eta \qquad \text{oppure} \qquad 0{,}0947 = 0{,}09/\eta$$

- Sono i prezzi delle *ore marginali* di ciascun veicolo (l'ora più economica ancora libera nella sua finestra), corretti per il rendimento

I duali raccontano le ore marginali (2/2)

- V2, V3 e V6 hanno finestre che coprono le ore a 0,08
- V1, V4 e V5 arrivano tardi o partono presto: la loro ora marginale costa 0,09
- Un kWh di fabbisogno in più costa quindi 8,4–9,5 centesimi a seconda del veicolo

Riepilogo

- Costo minimo: 20,36 €/notte con picco di 103,4 kW
- Peak shaving: picco minimo possibile 68 kW
- Prezzi ombra del fabbisogno $=$ prezzo dell'ora marginale$/\eta$: 8,4 o 9,5 centesimi per kWh

Analisi di sensitività

Introduzione: Analisi di sensitività

- Studiamo il compromesso tra costo e picco variando il peso ρ del picco
- Variamo la capacità del contatore k
- Vediamo un bug istruttivo, capitato davvero, nella modifica del termine noto

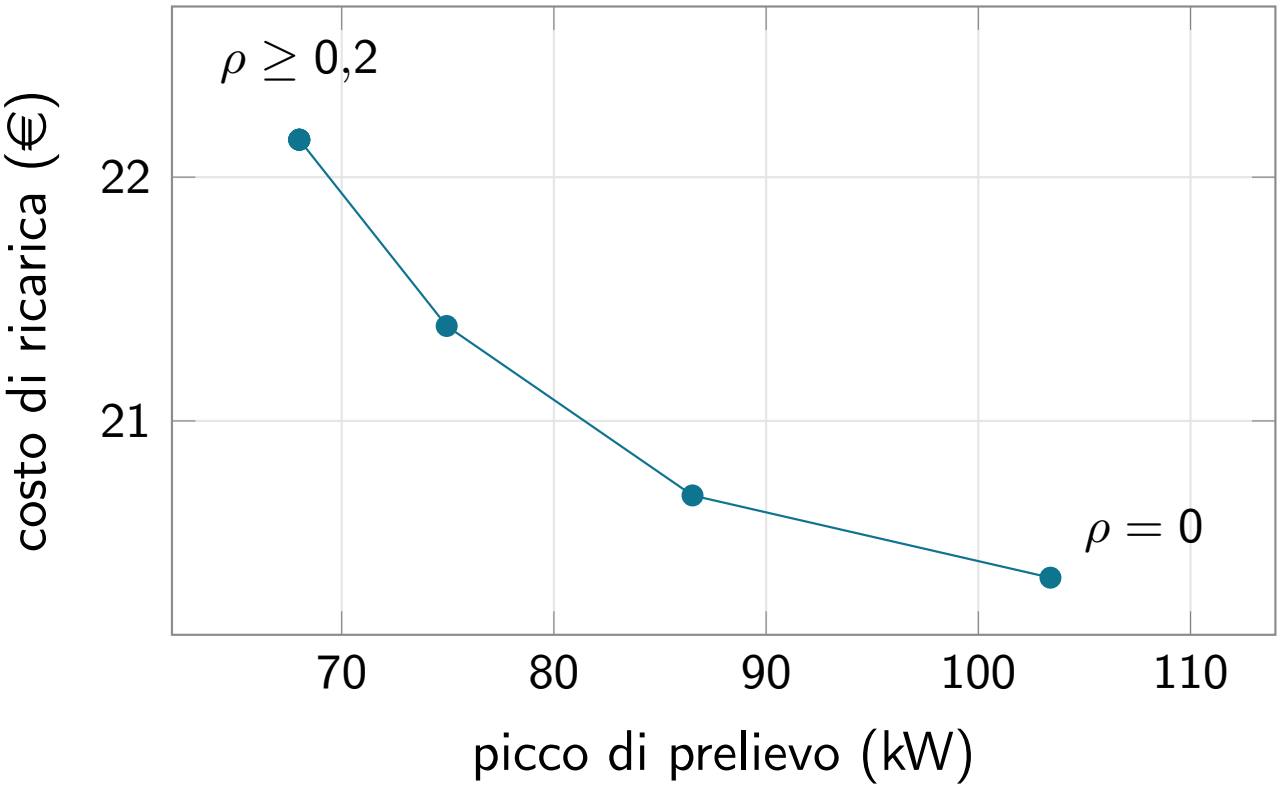
Compromesso costo + ρ·picco

```
Compromesso costo + rho*picco:
  rho = 0,00: costo 20,36  picco 103,4
  rho = 0,05: costo 20,69  picco  86,5
  rho = 0,10: costo 21,39  picco  74,9
  rho = 0,20: costo 22,15  picco  68,0
  rho = 0,50: costo 22,15  picco  68,0
```

Capacità del contatore

```
Capacita' del contatore:
  k = 60, 65 kW: INAMMISSIBILE
  k = 70 kW    : 21,93
  k = 80 kW    : 21,09
  k = 90 kW    : 20,63
  k = 120 kW   : 20,36
```

Frontiera costo-picco



Lettura della frontiera

- La frontiera si ottiene variando il peso ρ del picco nell'obiettivo
- Ogni punto è una strategia di ricarica ottima
- Ridurre il picco da 103 a 75 kW costa circa un euro a notte
- Il punto $\rho \geq 0{,}2$ raggiunge il picco minimo possibile (68 kW) al costo più basso che lo consente

Il peak shaving si ripaga da solo

- Tagliare il picco da 103 a 75 kW (-28%) costa solo un euro a notte; arrivare a 68 kW ne costa meno di due
- Se la tariffa di potenza o l'upgrade del contatore costano più di così, il peak shaving si ripaga da solo
- Il minimax puro (picco 68) senza termine di costo spenderebbe 27,79 €
- Il compromesso con $\rho = 0{,}2$ ottiene *lo stesso picco* a 22,15 €: **mai ottimizzare un solo obiettivo quando ce ne sono due**

Un bug istruttivo, capitato davvero (1/2)

Osservazione 1: Un bug istruttivo, capitato davvero

Nel vincolo `quicksum(x) + base[t] <= C`*, Gurobi sposta la costante* `base[t]` *nel termine noto: il RHS memorizzato è* `C - base[t]`*.*

La prima versione della nostra analisi di sensitività scriveva `v.RHS = nuovaC` *e otteneva costi identici per ogni capacità.*

Un bug istruttivo, capitato davvero (2/2)

Osservazione 2: Un bug istruttivo, capitato davvero

In realtà stava allentando il vincolo di `base[t]`.

La forma corretta è `v.RHS = nuovaC - base[t]`.

Quando una sensitività non cambia nulla, sospettare prima del proprio codice che del modello.

Riepilogo

- Il peso ρ traccia la frontiera costo-picco: con circa un euro a notte il picco scende da 103 a 75 kW
- Sotto i 70 kW di contatore il problema diventa inammissibile
- Le costanti nei vincoli finiscono nel RHS: modificarlo tenendone conto

La variante quadratica

- Un profilo di prelievo **regolare** penalizza le variazioni del prelievo da un'ora all'altra
- Serve un termine quadratico nell'obiettivo: il modello **non è più un LP**
- È la variante quadratica di questo modello, nel modulo *Modellazione PNL*: «Ricarica di veicoli elettrici con profilo regolare»

Esercizi

Introduzione: Esercizi

- Quattro esercizi per mettere alla prova il modello
- Verifica dei duali, cambi nelle finestre, emissioni, capacità minima
- Si svolgono modificando lo script Python del capitolo

Esercizio: verifica

Verificare per perturbazione il prezzo ombra del fabbisogno di V1:

- portare e_1 da 46 a 47 kWh
- spiegare perché vale 0,09/0,95

Esercizio: arrivo in ritardo

V3 arriva alle 23 invece che alle 20:

- come cambiano costo e picco?
- quale prezzo ombra aumenta?

Esercizio: emissioni

- Con intensità carbonica oraria g_t (alta la sera, bassa di notte), tracciare la frontiera costo-emissioni
- Le ore economiche sono anche le più pulite in questo caso?

Esercizio: capacità minima

- Trovare per bisezione la capacità minima k che mantiene il problema ammissibile
- Spiegare quale combinazione di finestre e $\bar{p}_v$ la determina

Riepilogo (1/2)

Modello:

- La ricarica intelligente è un LP puro: la decisione è quanta potenza, la disponibilità è un dato
- Vincoli di energia, di rete (accoppiano i veicoli) e di potenza

Duali:

- Il prezzo ombra del fabbisogno è il prezzo dell'ora marginale, diviso per η

Riepilogo (2/2)

Multiobiettivo:

- Costo $+\,\rho$ picco traccia la frontiera; il compromesso raggiunge il picco minimo a un costo molto inferiore al minimax puro

Sensitività:

- Le costanti dei vincoli finiscono nel RHS: se una sensitività non cambia nulla, controllare prima il codice