



Come Progettare una CER e Ottimizzare l'Energia Condivisa

Prof. Simone Paoletti
Università di Siena

21/03/2024



SMART GRIDS GROUP @ UNISI

- Temi principali di ricerca
 - Previsione del carico e della generazione da fonti rinnovabili
 - Pianificazione e controllo di sistemi di accumulo nelle reti di distribuzione
 - Controllo ottimo di sistemi HVAC negli edifici
 - Mercati dell'energia e Comunità energetiche
 - Politiche ottime di carica per i veicoli elettrici
- Pagina web: <http://control.dii.unisi.it/SmartGrids/>

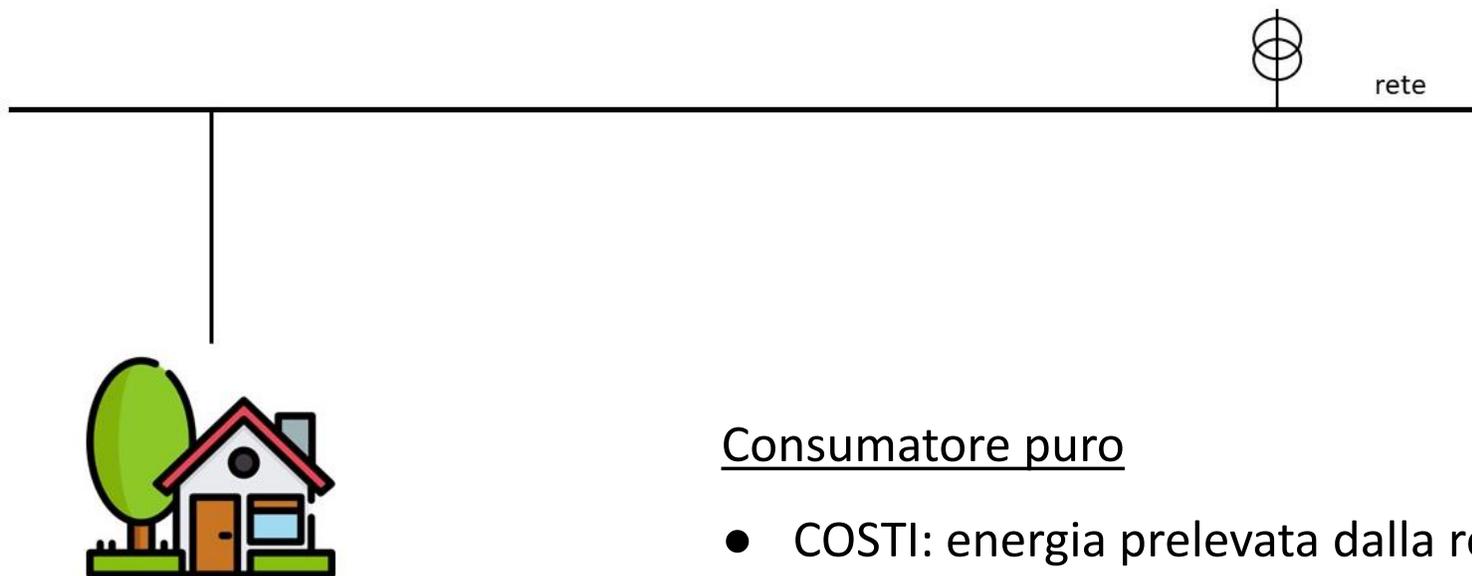




SOMMARIO

- Autoconsumo diffuso
- Incentivo per l'autoconsumo diffuso
- Modalità di gestione di una CER
 - Non coordinate
 - Coordinate
- Ridistribuzione dell'incentivo
- Casi di studio
 - *Toy example* con due utenti
 - Unico produttore, 50 consumatori
 - Mix di prosumer e consumatori

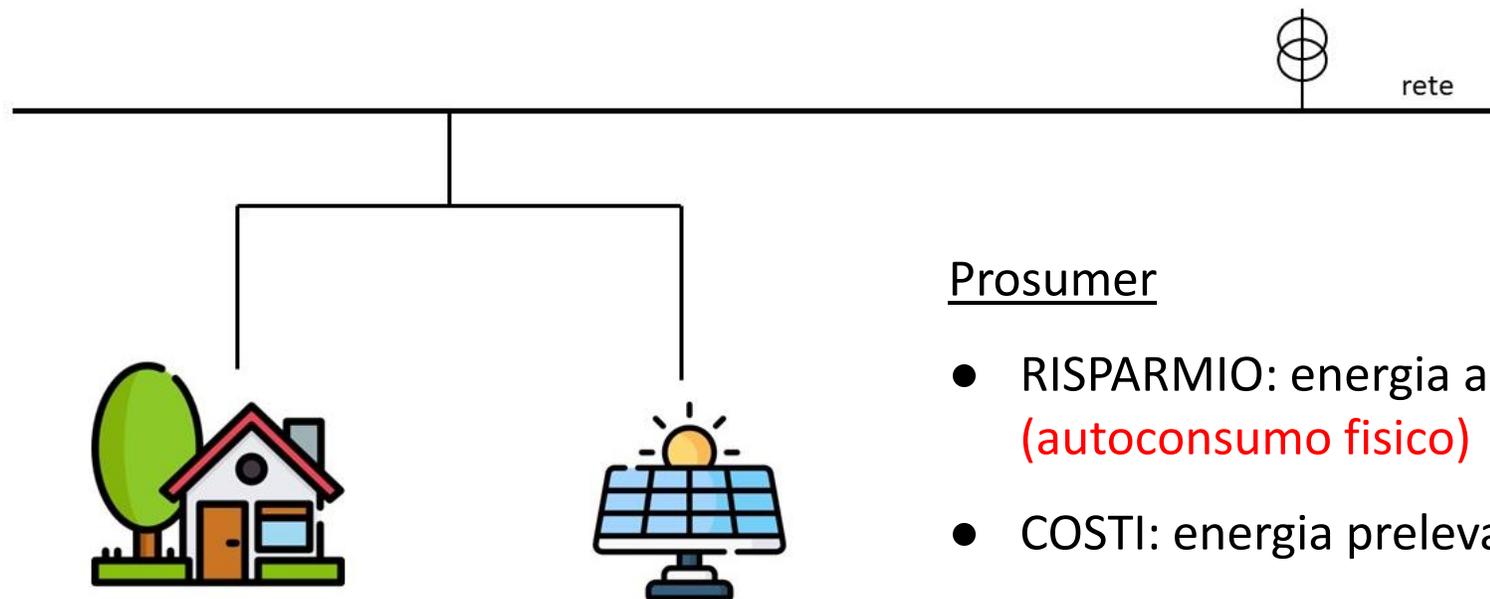
SCENARIO I: CONSUMATORE PURO



Consumatore puro

- COSTI: energia prelevata dalla rete

SCENARIO II: PROSUMER



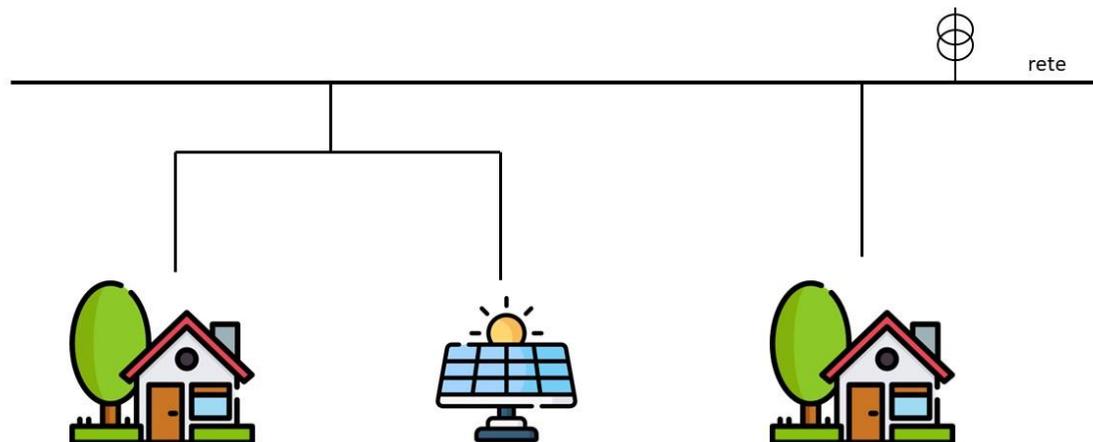
Prosumer

- RISPARMIO: energia autoconsumata (autoconsumo fisico)
- COSTI: energia prelevata dalla rete
- RICAVI: energia venduta alla rete

SCENARIO III: COMUNITA' ENERGETICA RINNOVABILE

Prosumer

- RISPARMIO: energia autoconsumata
(autoconsumo fisico)
- COSTI: energia prelevata dalla rete
- RICAVI: energia venduta alla rete + (eventuale) ripartizione dell'incentivo per l'autoconsumo diffuso



Consumatore puro

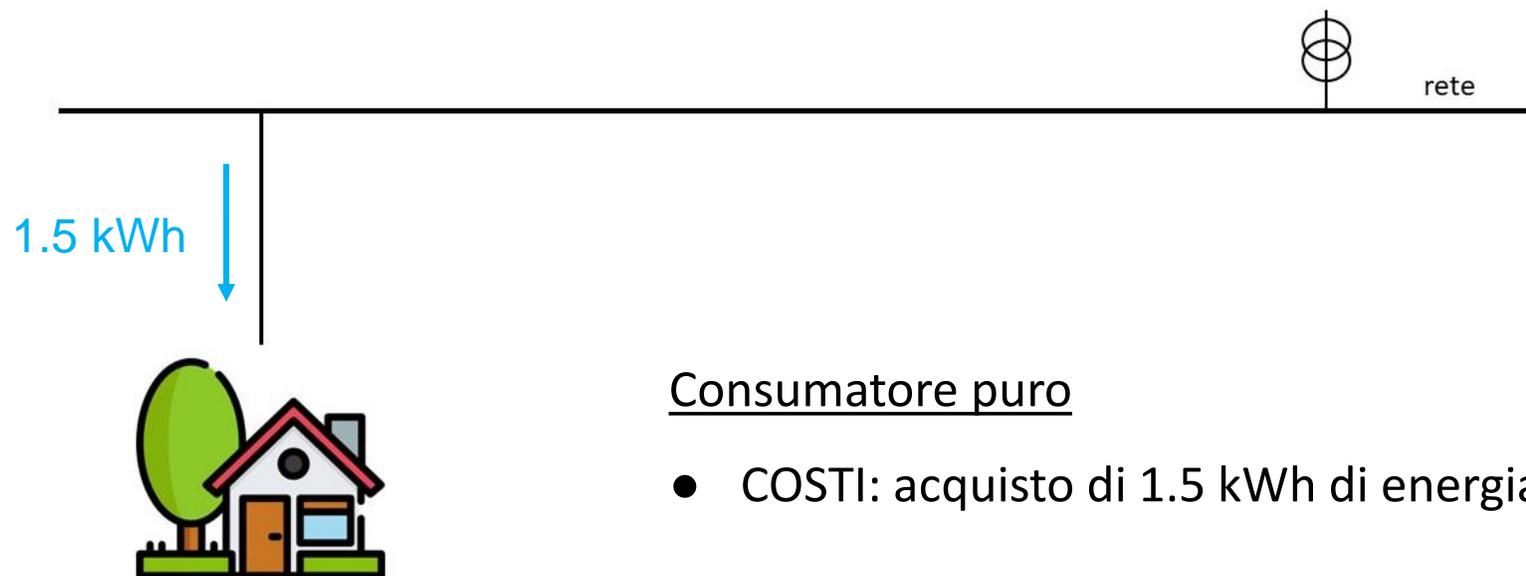
- COSTI: energia prelevata dalla rete
- RICAVI: (eventuale) ripartizione dell'incentivo per l'autoconsumo diffuso



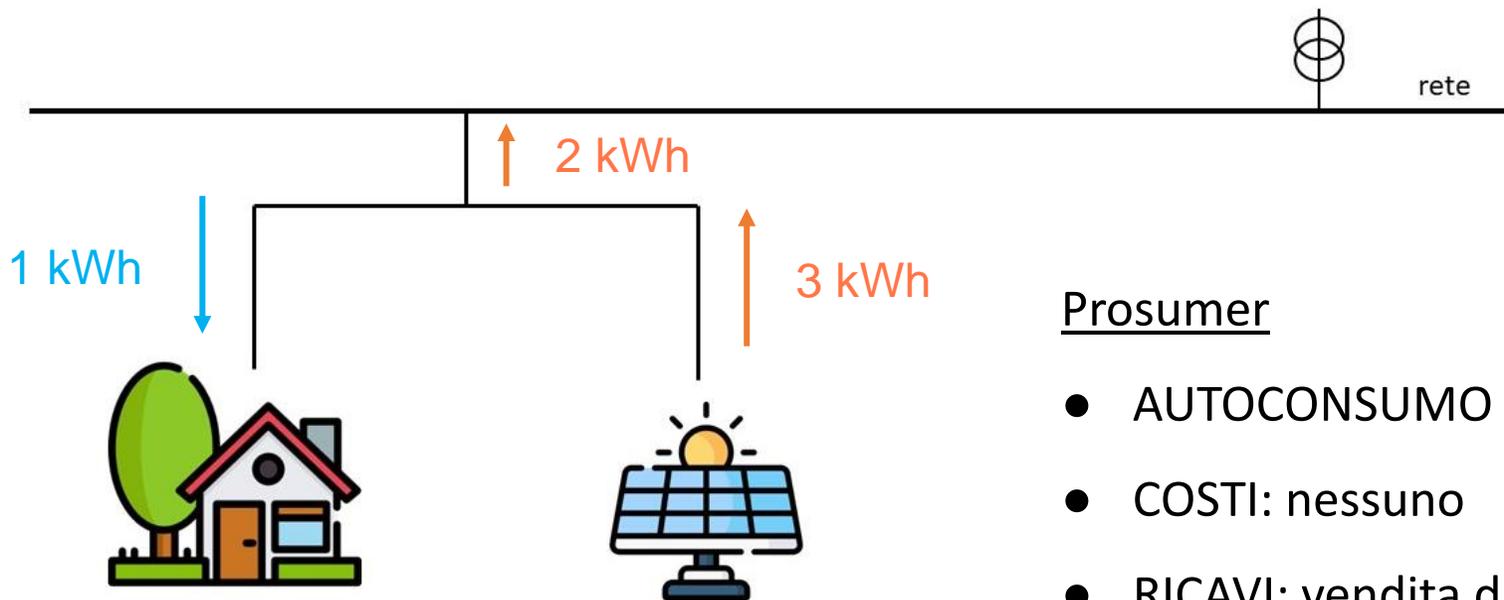
DEFINIZIONE DI AUTOCONSUMO DIFFUSO

“Il minimo, su base oraria, tra l'energia elettrica immessa in rete dagli impianti di produzione e l'energia elettrica prelevata dai consumatori che afferiscono alla Comunità Energetica Rinnovabile (CER)”

ESEMPIO: SCENARIO I



ESEMPIO: SCENARIO II



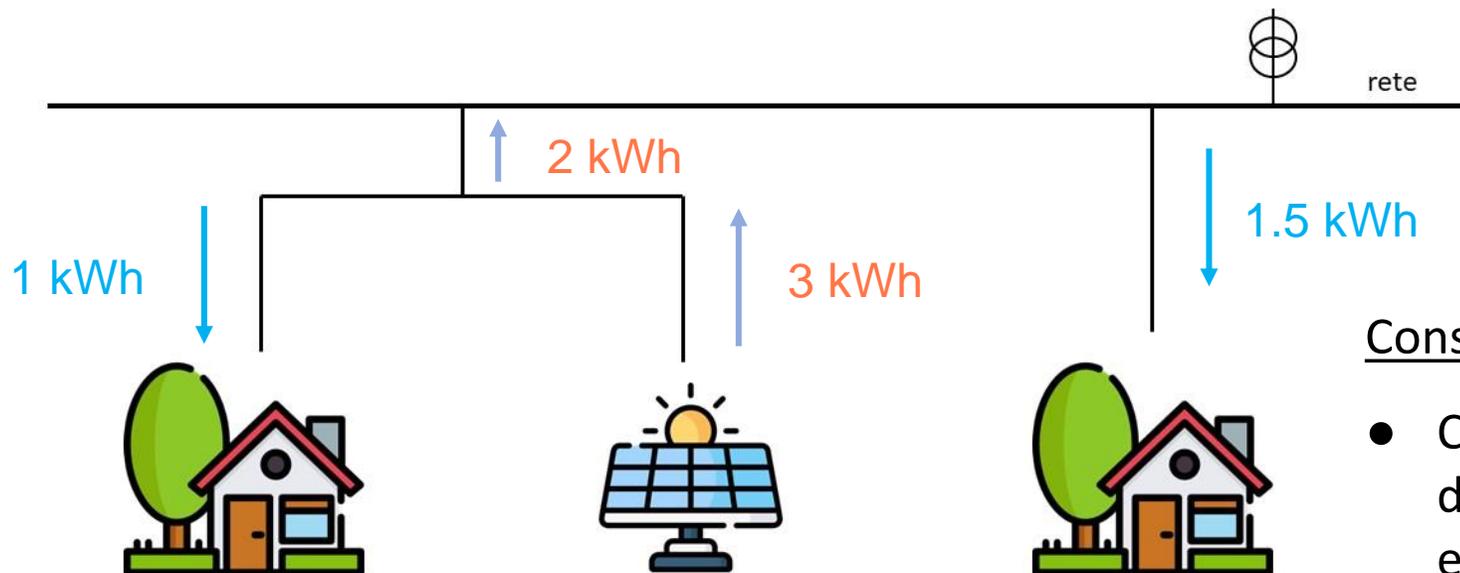
Prosumer

- AUTOCONSUMO FISICO: 1 kWh
- COSTI: nessuno
- RICAVI: vendita di 2 kWh

ESEMPIO: SCENARIO III

Prosumer

- AUTOCONSUMO FISICO: 1 kWh
- COSTI: nessuno
- RICAVI: vendita di 2 kWh

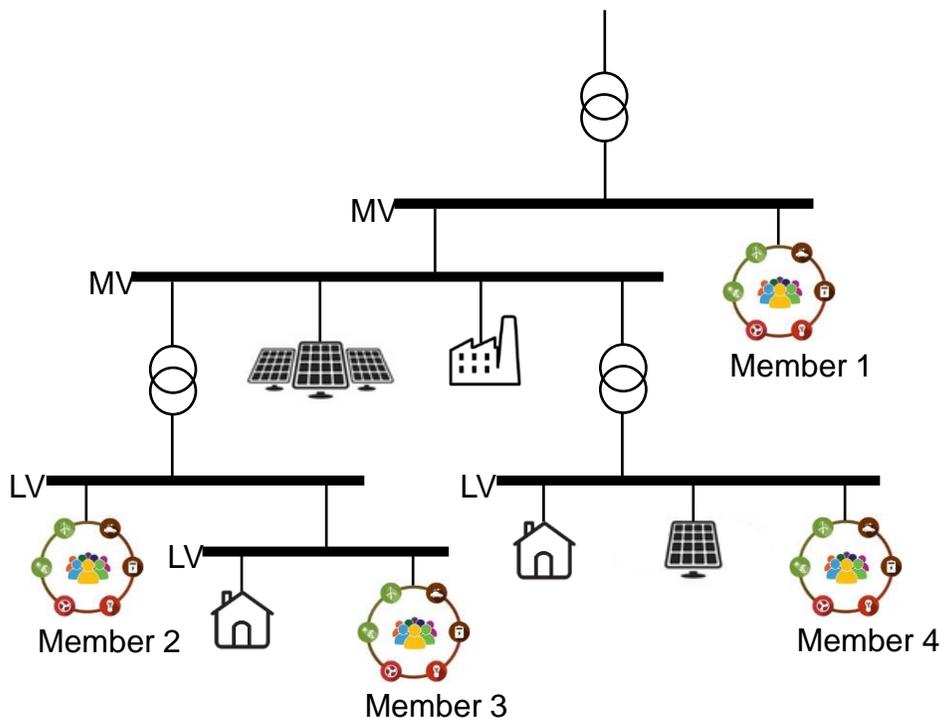


Consumatore puro

- COSTI: acquisto di 1.5 kWh di energia

LA COMUNITÀ RICEVE UN INCENTIVO PER L'AUTOCONSUMO DIFFUSO DI 1.5 kWh

ESEMPIO DI AUTOCONSUMO DIFFUSO



- Periodo di tempo di un'ora
- Utente 1 esporta 5 kWh
- Utente 2 importa 2 kWh
- Utente 3 importa 1.5 kWh
- Utente 4 importa 2.5 kWh
- Energia immessa 5 kWh
- Energia prelevata 6 kWh
- **Autoconsumo diffuso 5 kWh**



INCENTIVO PER L'AUTOCONSUMO DIFFUSO

- All'autoconsumo diffuso si applica la **Tariffa Incentivante Premiale (TIP)** in forma di tariffa premio
- Il periodo di diritto alla tariffa è pari a **20 anni**
- Erogata congiuntamente al **contributo ARERA** per la valorizzazione dell'energia elettrica autoconsumata (per il 2024 e per le CER, pari a 10.57 €/MWh)
- La **TIP** è composta da:
 - una **parte fissa**, che diminuisce al crescere della potenza dell'impianto di produzione
 - una **parte variabile**, che si riduce al crescere del prezzo zonale dell'energia

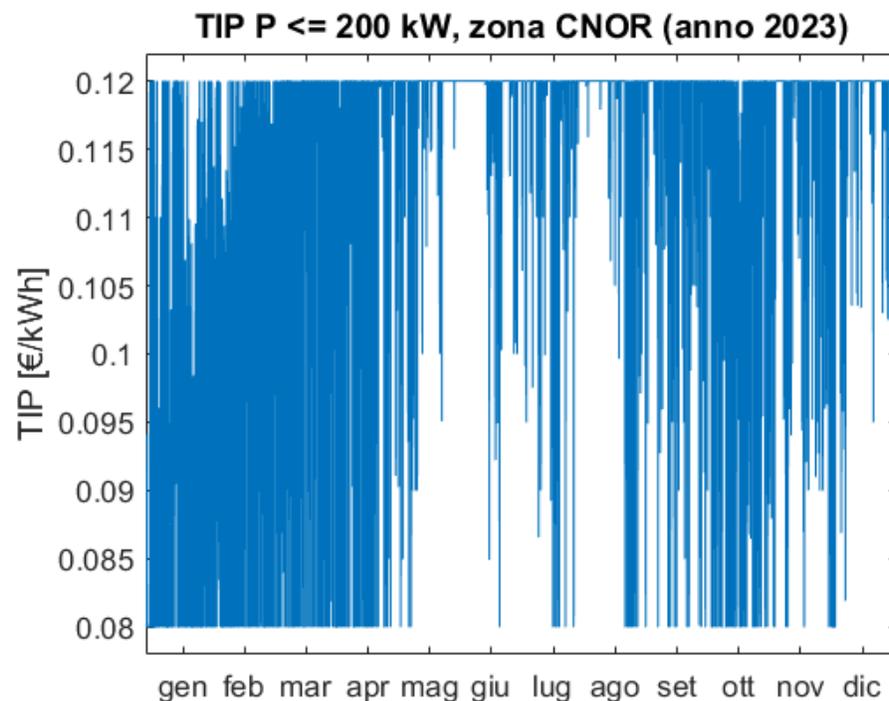
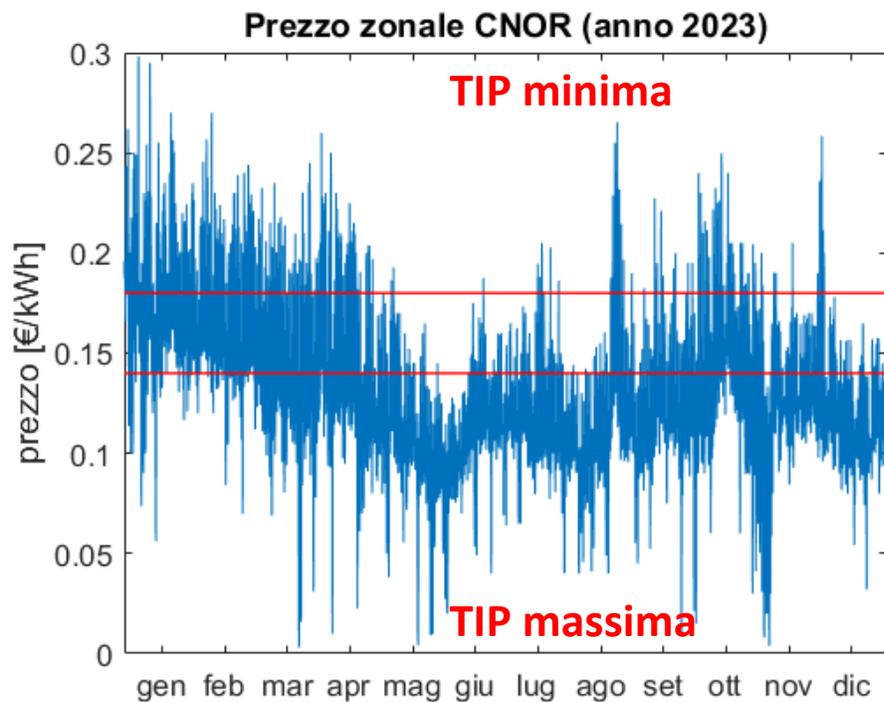


INCENTIVO PER L'AUTOCONSUMO DIFFUSO

$P \leq 200$	$TIP = 80 + \max(0; 180 - Pz)$	TIP MAX = 120 €/MWh
$200 < P \leq 600$	$TIP = 70 + \max(0; 180 - Pz)$	TIP MAX = 110 €/MWh
$600 < P \leq 1000$	$TIP = 60 + \max(0; 180 - Pz)$	TIP MAX = 100 €/MWh

- **P:** potenza in kW dell'impianto di produzione al quale viene imputata la frazione di autoconsumo diffuso secondo un ordine di merito stabilito da regole del GSE
- **Pz:** prezzo zonale orario
- **IMPORTANTE:** questa non è la TIP che riceve l'impianto di produzione; la TIP totale va sempre alla CER nel suo complesso, che la ridistribuirà secondo i criteri che si è data

INCENTIVO PER L'AUTOCONSUMO DIFFUSO





GESTIONE DI UNA CER

- **Obiettivo:** Ottimizzare l'autoconsumo diffuso
 - Beneficio economico attraverso la TIP
 - Contributo indiretto al sistema elettrico: energia prodotta e consumata localmente
- **Come si realizza?**
 - Gestione non coordinata
 - Gestione coordinata



GESTIONE NON COORDINATA

- Non c'è condivisione di informazione tra i membri
- Differenti modalità
 - ☹️ Ognuno può continuare a comportarsi secondo le proprie abitudini
 - 😊 Ci si può impegnare a modificare le proprie abitudini sulla base di opportune indicazioni o regole, per esempio:
 - Consumare preferibilmente durante le ore diurne in presenza di generazione FV
- L'autoconsumo diffuso risultante è «incidentale», non è il risultato di alcun coordinamento tra i membri



GESTIONE COORDINATA

- Basata sulla condivisione (parziale o totale) di informazione tra i membri
- Richiede un *community manager* che:
 - Raccoglie le informazioni (previsioni meteo, preferenze degli utenti, ecc.)
 - Coordina i membri al fine di ottimizzare l'autoconsumo diffuso
- **ESEMPIO:** Il community manager "vede" la produzione degli impianti FV e invia richieste di aumentare/diminuire i consumi ai consumatori attraverso un'app sul cellulare
 - Può sfruttare eventuali preferenze espresse dagli utenti
 - L'ottimizzazione dell'autoconsumo diffuso non è garantita (reattività degli utenti)

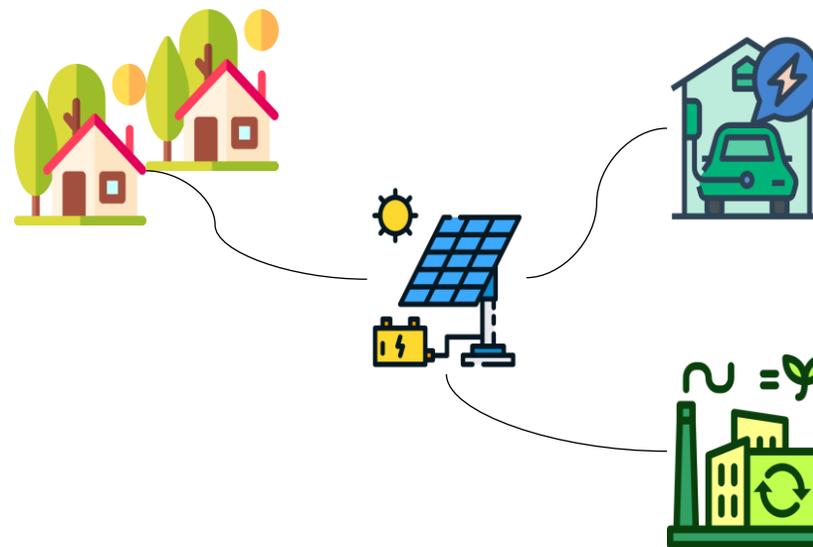


GESTIONE COORDINATA

- Migliori prestazioni si possono raggiungere se il community manager può sfruttare:
 - La flessibilità dei consumi (elettrodomestici intelligenti, carichi programmabili nelle aziende, ecc.)
 - La disponibilità di sistemi di accumulo
- **ESEMPIO:** Il community manager utilizza un agente (addestrato, per esempio, mediante tecniche di *reinforcement learning*) che, dato lo stato della CER (immissioni, prelievi, stato delle batterie), determina le azioni da realizzare (carica/scarica delle batterie, attivazione/disattivazione dei carichi flessibili, ecc.)

GESTIONE COORDINATA: OTTIMIZZAZIONE

- **Modello di ottimizzazione per le CER**
- Caratteristiche
 - Gestione ottima dei sistemi di accumulo
 - Gestione ottima della flessibilità degli utenti
 - Utilizzo di profili temporali di consumo e generazione
 - Profili reali
 - Generazione stocastica di profili
 - Tre modalità di utilizzo:
 - Progettazione e dimensionamento (analisi As-Is e What-If)
 - Gestione di esercizio
 - Validazione a posteriori





GESTIONE COORDINATA: OTTIMIZZAZIONE

- Modello basato sulla formulazione di un problema matematico di ottimizzazione:

$$\max \underbrace{\sum_u \text{Profitto}_u + \text{Incentivo}}_{\text{``Social welfare''}}$$

dove il **profitto** del membro u è definito come $\text{Profitto}_u = \text{Ricavi}_u - \text{Costi}_u$

- Ricavi_u : ricavi del membro u (vendita dell'energia)
- Costi_u : costi del membro u (acquisto dell'energia, utilizzo della batteria, ecc.)



GESTIONE COORDINATA: OTTIMIZZAZIONE

- Modello basato sulla formulazione di un problema matematico di ottimizzazione:

$$\max \sum_u \text{Profitto}_u + \text{Incentivo}$$

- NOTA: se $\text{Profitto}_u < 0$, rappresenta una **perdita**
- **Cosa fa il problema di ottimizzazione?**
 - Noti i profili (reali o previsti) di generazione e la flessibilità degli utenti, determina l'allocazione temporale dei carichi e la politica di carica/scarica delle batterie al fine di massimizzare il *social welfare* della CER



CASI DI STUDIO REALI: DATI DI CONSUMO

Fonte dei dati di consumo: *Portale Consumi*

<https://www.consumienergia.it/portaleConsumi/>

ARERA
Autorità di Regolazione
per Energia Reti e Ambiente

AU
Acquirente
Unico

ilportaleconsumi

Accedi

Seleziona l'opzione in caso di identità Persona Giuridica

SCOPRI ▾ I MIEI CONSUMI ▾ CHI SIAMO ▾ 🔍

I dati ufficiali dei tuoi consumi di elettricità e gas

Il Portale Consumi è un servizio gratuito previsto dalla legge per permettere a tutti i consumatori di accedere alle informazioni sulle proprie utenze: anagrafiche, contratti e misure

PER SAPERNE DI PIÙ →



CASI DI STUDIO REALI: DATI DI GENERAZIONE

Fonte dei dati di generazione: *Portale PVGIS*

https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html

PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM

European Commission

European Commission > EU Science Hub > PVGIS > Interactive tools

Home Tools Downloads Documentation Contact us

Cursor: **Select location!** Use terrain shadows: Calculated horizon Upload horizon file

Elevation (m): Nessun file selezionato

PVGIS ver. 5.2

GRID CONNECTED **PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV**

TRACKING PV OFF-GRID MONTHLY DATA DAILY DATA HOURLY DATA TMY

Solar radiation database*

PV technology*

Installed peak PV power [kWp]*

System loss [%]*

Fixed mounting options

Mounting position*

Slope [°]* Optimize slope

Azimuth [°]* Optimize slope and azimuth

PV electricity price

PV system cost (your currency)

Interest [%/year]

Lifetime [years]



CASI DI STUDIO REALI: PREZZI

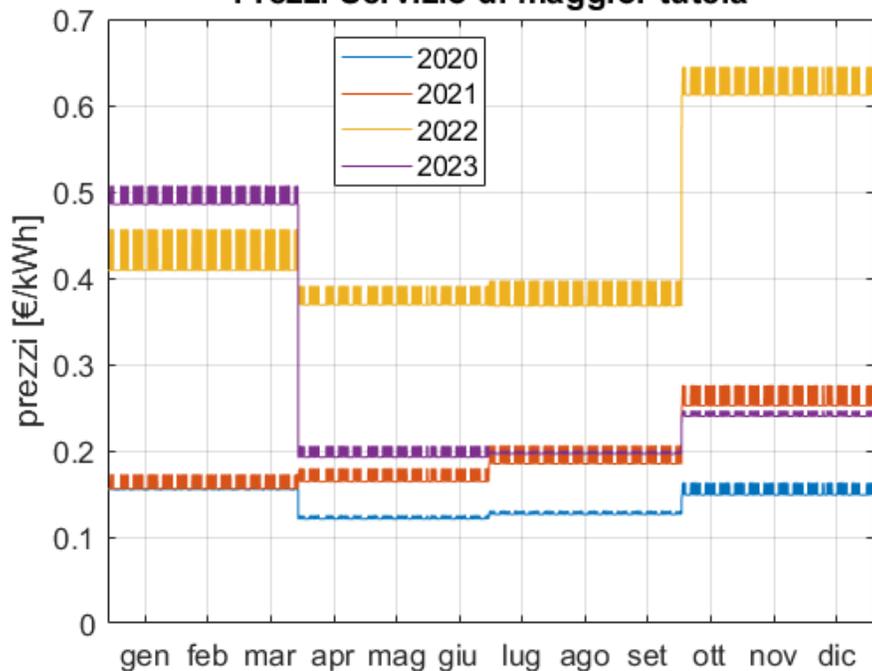
Fonti dei dati dei prezzi

- Prezzi di acquisto: *Servizio di Maggior Tutela*
<https://www.arera.it/area-operatori/prezzi-e-tariffe>
- Prezzi di vendita: prezzi medi *Ritiro Dedicato*
<https://www.gse.it/servizi-per-te/fotovoltaico/ritiro-dedicato/documenti>
- Prezzi zonali: *Mercato Elettrico*
<https://www.mercatoelettrico.org/It/>

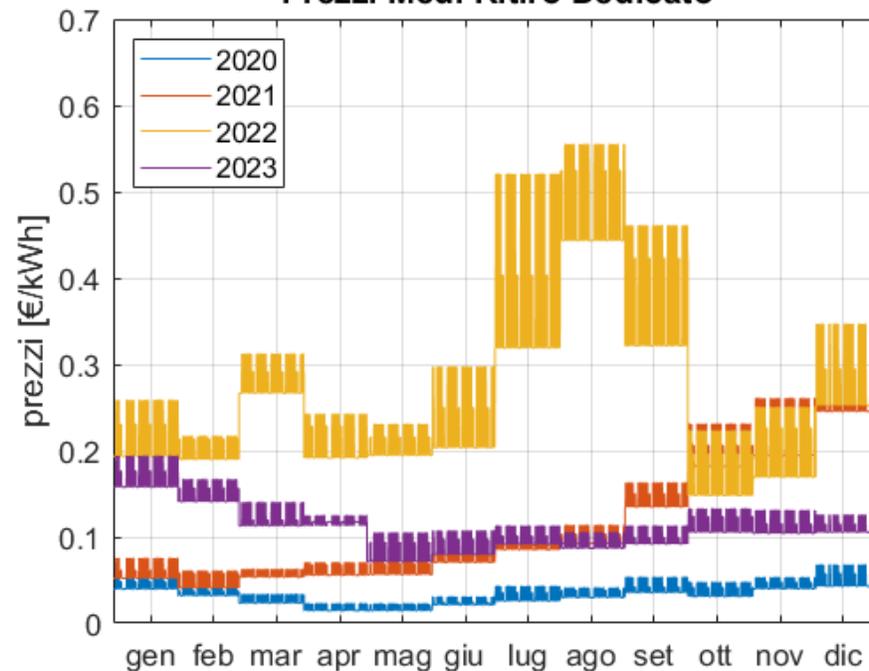


CASI DI STUDIO REALI: PREZZI

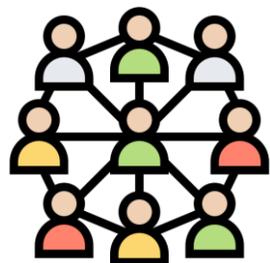
Prezzi Servizio di maggior tutela



Prezzi Medi Ritiro Dedicato



CASI DI STUDIO REALI: SCENARI



INDIVIDUALE

- Massimizza il proprio profitto
- Nessun incentivo (non è in comunità)

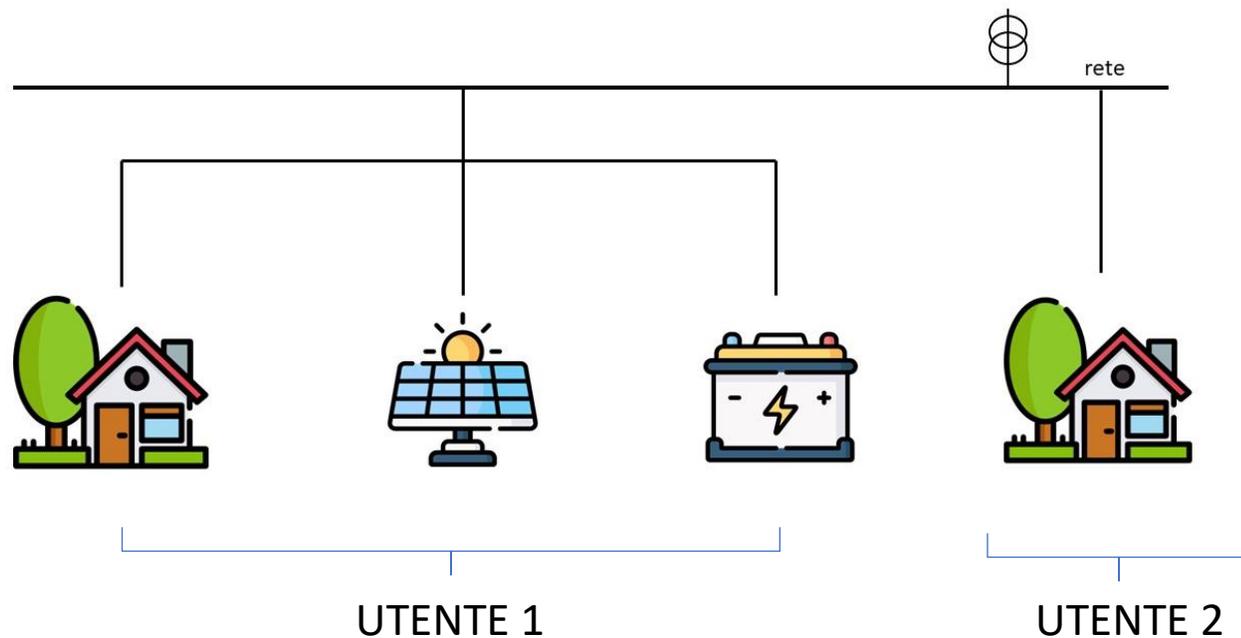
COMUNITA' NON COORDINATA

- Nessuna condivisione di informazioni
- Ciascuno si comporta indipendentemente
- Incentivo "incidentale"

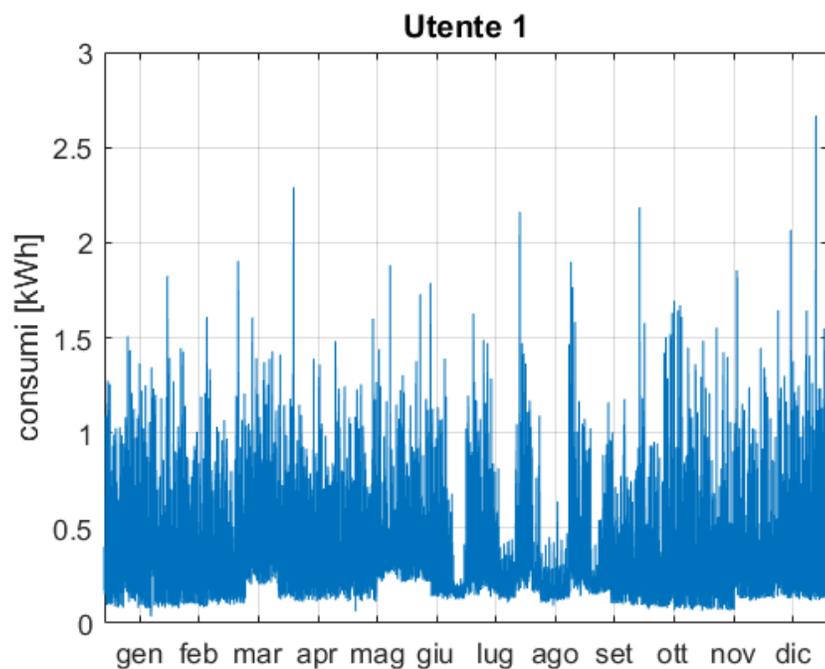
COMUNITA' COORDINATA

- Completa condivisione di informazioni
- Massimizza il social welfare della comunità
- Incentivo incluso nell'ottimizzazione

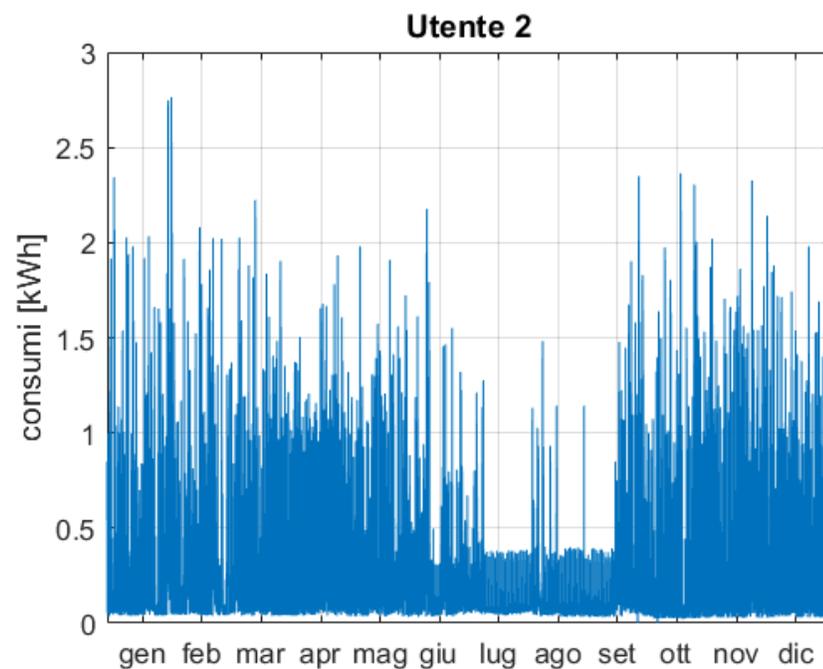
TOY EXAMPLE: COMUNITA' DI DUE UTENTI



TOY EXAMPLE: DATI CONSUMI

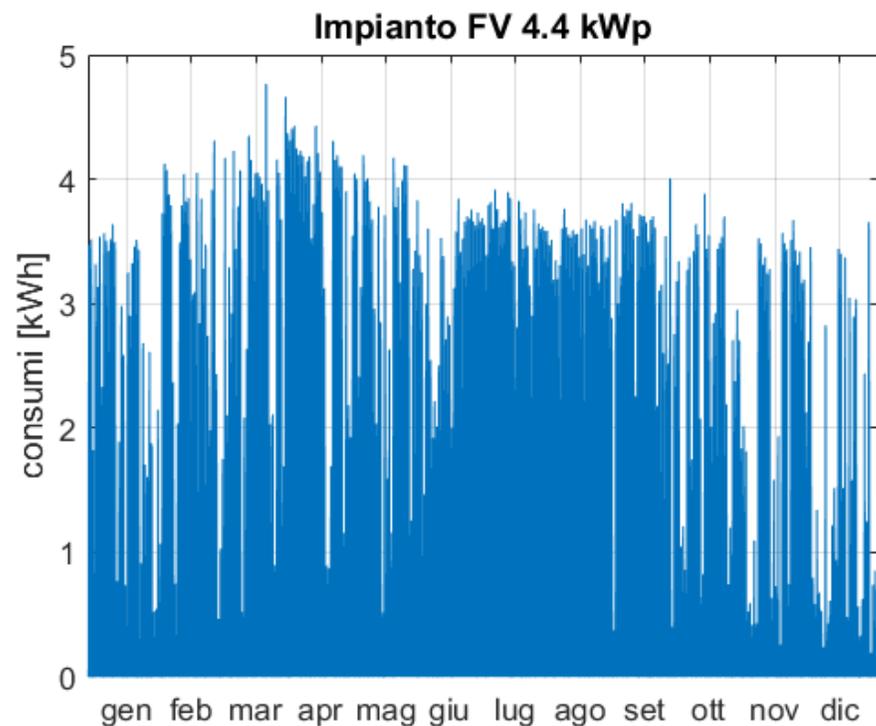


- Consumo 3327 kWh/anno



- Consumo 2401 kWh/anno

TOY EXAMPLE: DATI GENERAZIONE



- Produzione 7111 kWh/anno



TOY EXAMPLE: MODALITA' DI GESTIONE

- Modalità di gestione
 - NC1: modalità non coordinata, comportamento abituale per entrambi gli utenti
 - NC2: modalità non coordinata, comportamento abituale per l'Utente 2, comportamento modificato per l'Utente 1 (massimizza l'autoconsumo fisico)
 - NC3: modalità non coordinata, comportamento modificato per l'Utente 1 (massimizza l'autoconsumo fisico), comportamento modificato per l'Utente 2 (prova a massimizzare l'autoconsumo diffuso)
 - CC: modalità coordinata, comportamento ottimizzato

TOY EXAMPLE: USO DELLA FLESSIBILITA'

- Impianto FV 4.4 kWp, no accumululo
- Prezzi anno 2023
- Per l'Utente 2 la media del consumo giornaliero tra le 10 AM e le 6 PM è del 31.53%

	NC1	NC2	NC3	CC
Comunità	-527.17 €	-373.84 €	-357.00 €	-271.04 €
Utente 1	102.64 €	285.32 €	285.32 €	273.46 €
Utente 2	-711.30 €	-711.30 €	-715.48 €	-713.88 €
Incentivo	81.49 €	52.15 €	73.17 €	169.39 €

TOY EXAMPLE: USO DELLA BATTERIA

- Impianto FV 4.4 kWp, con e senza accumulo (BESS)
- Prezzi anno 2023
- Consumi dell'Utente 2 non flessibili

	NO FV NO BESS	FV 4.4 kWp NO BESS	FV 4.4 kWp BESS 5 kWh	FV 4.4 kWp BESS 10 kWh
Comunità	-1664.66 €	-527.17 €	-349.22 €	-274.68 €
Utente 1	-953.36 €	102.64 €	231.04 €	273.00 €
Utente 2	-711.30 €	-711.30 €	-711.30 €	-711.30 €
Incentivo	0.00 €	81.49 €	131.05 €	163.63 €



RIDISTRIBUZIONE DELL'INCENTIVO

- Strategia di redistribuzione
 1. Se un utente ha un profitto nella CER peggiore rispetto ad agire individualmente, riceve una compensazione iniziale che copre la differenza
 2. La porzione restante dell'incentivo viene divisa tra i membri proporzionalmente al contributo di ciascun membro all'autoconsumo diffuso
- **Caratteristica:** Ciascun membro ha la garanzia di non essere mai penalizzato agendo all'interno della REC rispetto ad agire individualmente
- Prova formale che questa strategia di redistribuzione è sempre possibile quando associata all'algoritmo di ottimizzazione

TOY EXAMPLE: RIDISTRIBUZIONE UTENTE 1

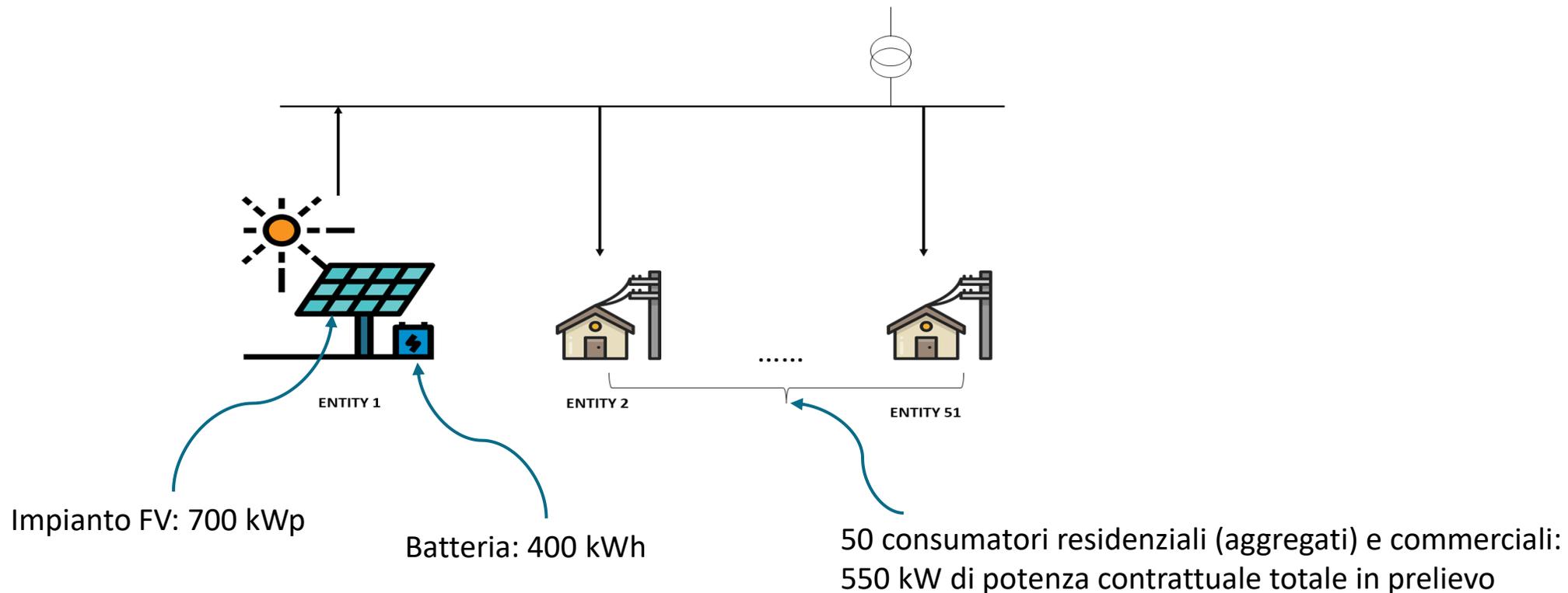
Caso FV 4.4 kWp BESS 5 kWh	Anno prezzi			
	2020	2021	2022	2023
Profitto caso individuale [A]	25.44 €	306.80 €	1122.49 €	267.64 €
Profitto caso coordinato prima della redistribuzione [B]	-28.40 €	252.69 €	1107.05 €	231.04 €
Incentivo comunità [C]	153.39 €	162.61 €	95.44 €	131.05 €
Compensazione [D = A-B]	53.84 €	54.11 €	15.44 €	36.60 €
Ridistribuzione [E = (C-D)/2]	49.78 €	54.25 €	40.00 €	47.22 €
Profitto caso coordinato dopo la redistribuzione [F = B+D+E]	75.22 €	361.05 €	1162.49 €	314.86 €



TOY EXAMPLE: RIDISTRIBUZIONE UTENTE 2

- L'Utente 2 è non flessibile: non modifica il suo comportamento rispetto al caso individuale
- L'Utente 2 non riceve compensazione
- L'Utente 2 riceve solo la redistribuzione

CASO DI STUDIO #1: SINGOLA UNITA' PRODUTTIVA

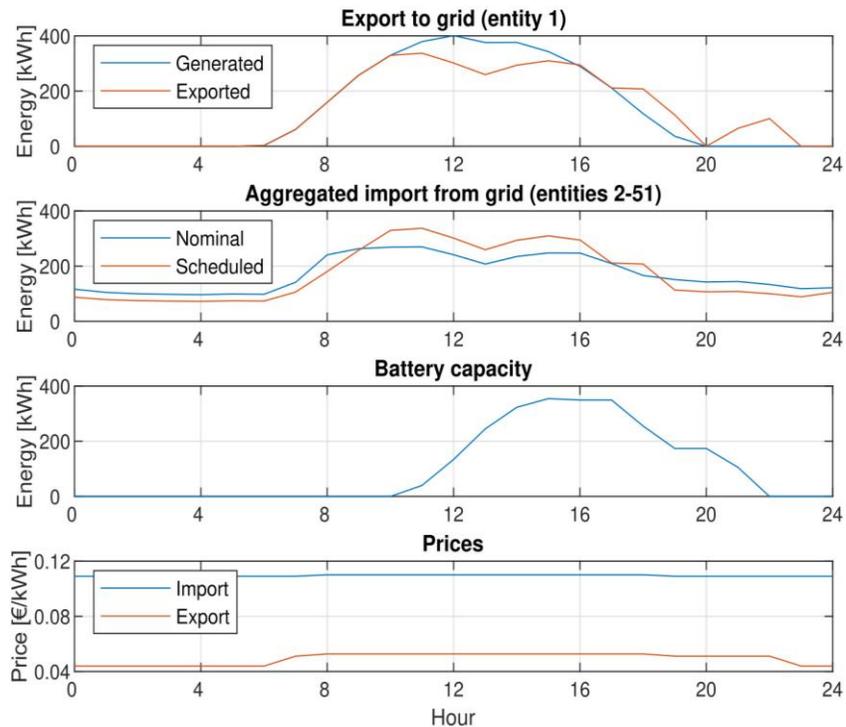




CASO DI STUDIO #1: DATI

- Profili reali di consumo e generazione (200 giorni)
- Incentive: 0.12 €/kWh
- Modello della flessibilità dei consumatori
 - Profilo nominale
 - Intervallo di flessibilità parametrizzato da $\alpha \in [0, 1]$
 - Consumo di energia giornaliero fissato

CASO DI STUDIO #1: RISULTATI



- Giorno 30 del dataset
- Livello di flessibilità $\alpha = 0.25$
- Flessibilità verso l'alto sfruttata pienamente quando la generazione FV è elevata
- Eccesso di generazione FV usata per caricare la batteria
- Batteria scaricata a partire dalle 5 PM per compensare la generazione FV bassa o assente



CASO DI STUDIO #1: PRODUTTORE

- Simulazione su 200 giorni
- Prezzi anno 2023
- Focus sul produttore
- Consumatori non flessibili ($\alpha = 0$)

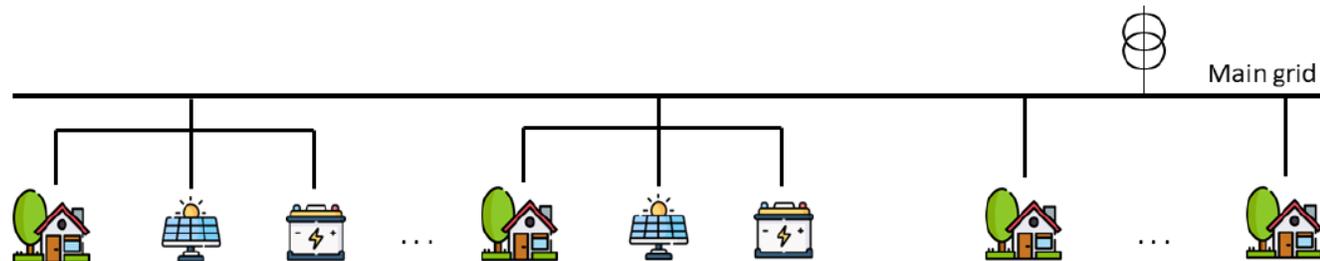
	Individuale	Comunità coordinata
Incentivo alla comunità	-	56574.12 €
Profitto produttore (prima della redistribuzione)	76328.64 €	74509.81 €
Compensazione al produttore	-	1818.83 €
Ridistribuzione al produttore	-	27377.65 €
Profitto produttore (dopo la redistribuzione)	76328.64 €	103706.29 €



CASO DI STUDIO #1: PRODUTTORE

- Conto approssimato del tempo di ritorno dall'investimento
- Profitto medio annuale del produttore (dalla simulazione)
 - Individuale: circa 140 k€/anno
 - In comunità: circa 190 k€/anno
- Costi unitari per gli impianti
 - Fotovoltaico: 1050 €/kWp
 - Accumulo fotovoltaico: 600 €/kWh
- Costo impianto: 975 k€
- Tempo di ritorno dall'investimento
 - Individuale: circa 7 anni
 - In comunità: circa 5 anni

CASO DI STUDIO #2: MOLTEPLICI PROSUMER



- CER di 50 utenti
- Profili reali di consumo e generazione (200 giorni)
- Prezzi anno 2020
- Incentivo unitario: 0.12 €/kWh
- CER simulata per diverse frazioni di prosumer rispetto al totale e dotazione di accumulo
- No flessibilità per i consumi

CASO DI STUDIO #2: RISULTATI

- Social welfare medio giornaliero della CER (include l'incentivo)
- Dimensionamento degli impianti
 - Fotovoltaico: 1.5 volte la potenza contrattualmente impegnata in prelievo
 - Accumulo: 1.3 volte la potenza fotovoltaica installata

% Prosumer	No BESS	Con BESS	
		Non coordinato	Coordinato
0%	-544.24 €	-	-
10%	-483.76 €	-487.50 €	-483.69 €
20%	-421.20 €	-430.39 €	-420.28 €
30%	-354.41 €	-364.94 €	-347.86 €
40%	-309.16 €	-318.99 €	-293.92 €
50%	-267.11 €	-261.45 €	-226.84 €



CONCLUSIONI

- Diverse modalità di gestione per una CER
 - Non coordinate
 - Coordinate
- Le modalità coordinate permettono di sincronizzare al meglio i consumi e la generazione ai fini della massimizzazione dell'autoconsumo diffuso
- L'approccio basato sull'ottimizzazione può essere utilizzato in diverse applicazioni
 - **Progettazione e dimensionamento:** utilizzando dati storici e/o simulati
 - **Gestione di esercizio:** utilizzando previsioni e preferenze degli utenti
 - **Validazione:** per valutare a posteriori le prestazioni di altri approcci rispetto all'ottimo
- Opportune tecniche di redistribuzione possono garantire l'equità tra i membri della CER



SVILUPPI FUTURI

- Diversi problemi aperti sollevati dal nuovo decreto e dai nuovi regolamenti
 - Calcolo dell'incentivo (differenziato per tipologia di impianto, ordine di merito, ...)
 - CER con diverse configurazioni basate su cluster di produttori omogenei
 - Vincoli sulla redistribuzione, ecc.
- Possibilità per la CER di fornire diversi servizi alla rete
 - Vendita di energia
 - Ricarica di veicoli elettrici
 - Demand response, ecc.
- Necessità di sviluppo e adeguamento delle modalità di gestione



BIBLIOGRAFIA

1. M. Stentati, S. Paoletti, A. Vicino, *“Optimization of energy communities in the Italian incentive system”*. 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), Novi Sad, Serbia, pp. 1-5, 2022
2. L. Guiducci, G. Palma, M. Stentati, A. Rizzo, S. Paoletti, *“A Reinforcement Learning approach to the management of Renewable Energy Communities”*. 12th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, pp. 1-8, 2023
3. M. Stentati, S. Paoletti, A. Vicino, *“Optimization and Redistribution Strategies for Italian Renewable Energy Communities”*, 20th IEEE International Conference on Smart Technologies (EUROCON), Torino, Italia, pp. 263-268, 2023
4. A. Nammouchi, M. Stentati, S. Paoletti, A. Kessler, A. Theocharis, *“Robust Operation of Energy Communities in the Italian Incentive System”*. 2023 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT EUROPE), Grenoble, France, pp. 1-5, 2023
5. G. Palma, L. Guiducci, M. Stentati, A. Rizzo, S. Paoletti, *“Reinforcement Learning for Energy Community Management: A European-Scale Study”*. Energies, n. 17, pp. 1-19, 2024