inspire

Intelligenza Artificiale per una rete elettrica flessibile, affidabile e sostenibile

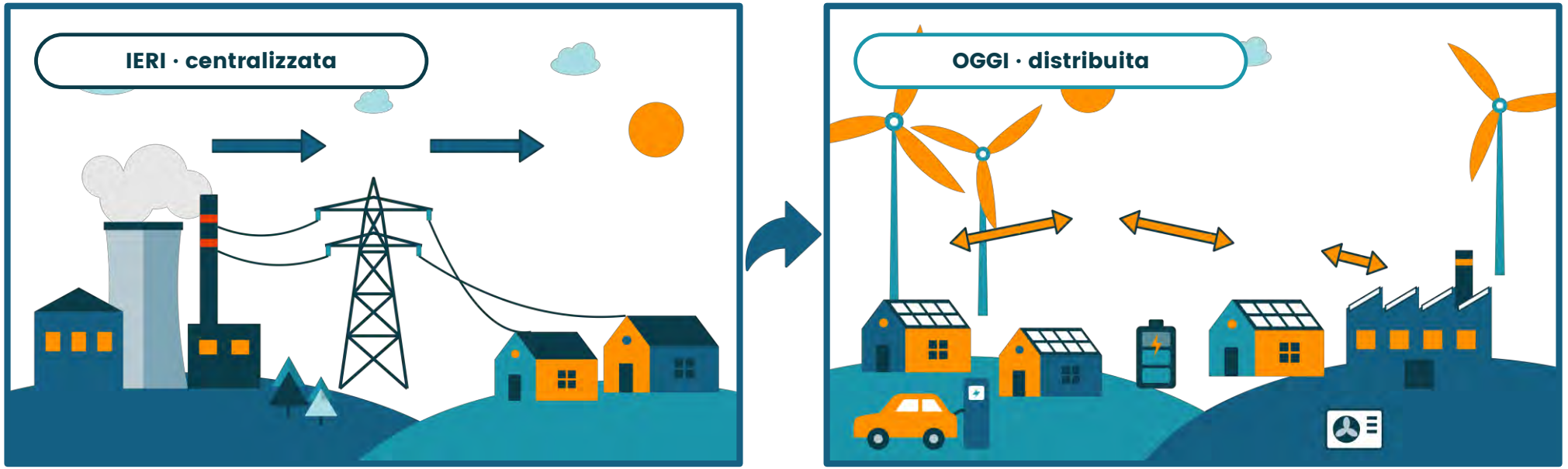
Giulia Tanoni

INSPIRE (Inspiring Signal Intelligence with AI) Research Group – Dipartimento Ingegneria dell'Informazione

Università Politecnica delle Marche

LA TRANSIZIONE ENERGETICA

Centro del Green Deal europeo, per ridurre le emissioni a zero nel 2050 e ridurle drasticamente entro il 2030



Rinnovabili distribuite
fotovoltaico ed eolico

Elettrificazione
auto elettriche, pompe di calore, piani ad induzione

Prosumer e comunità
produrre, consumare, scambiare

inspire

LA RETE ELETTRICA

Dalla generazione all'utente finale: cosa possiamo fare?



GENERAZIONE | **TRASMISSIONE** | **DISTRIBUZIONE** | **UTENTI FINALI**

singolo edificio · microgrid

OSSERVABILITÀ
Osservare la rete in tempo reale, fino al singolo carico

GESTIONE
Esercizio affidabile: prevenire e diagnosticare i guasti, ottimizzare l'uso delle risorse disponibili

FLESSIBILITÀ
Adattare produzione, consumi e accumuli alle esigenze della rete

inspire

L'UTENTE DIVENTA ATTIVO

L'utente diventa parte attiva per la gestione delle sue risorse energetiche e per rispondere alle esigenze della rete

DEMAND RESPONSE

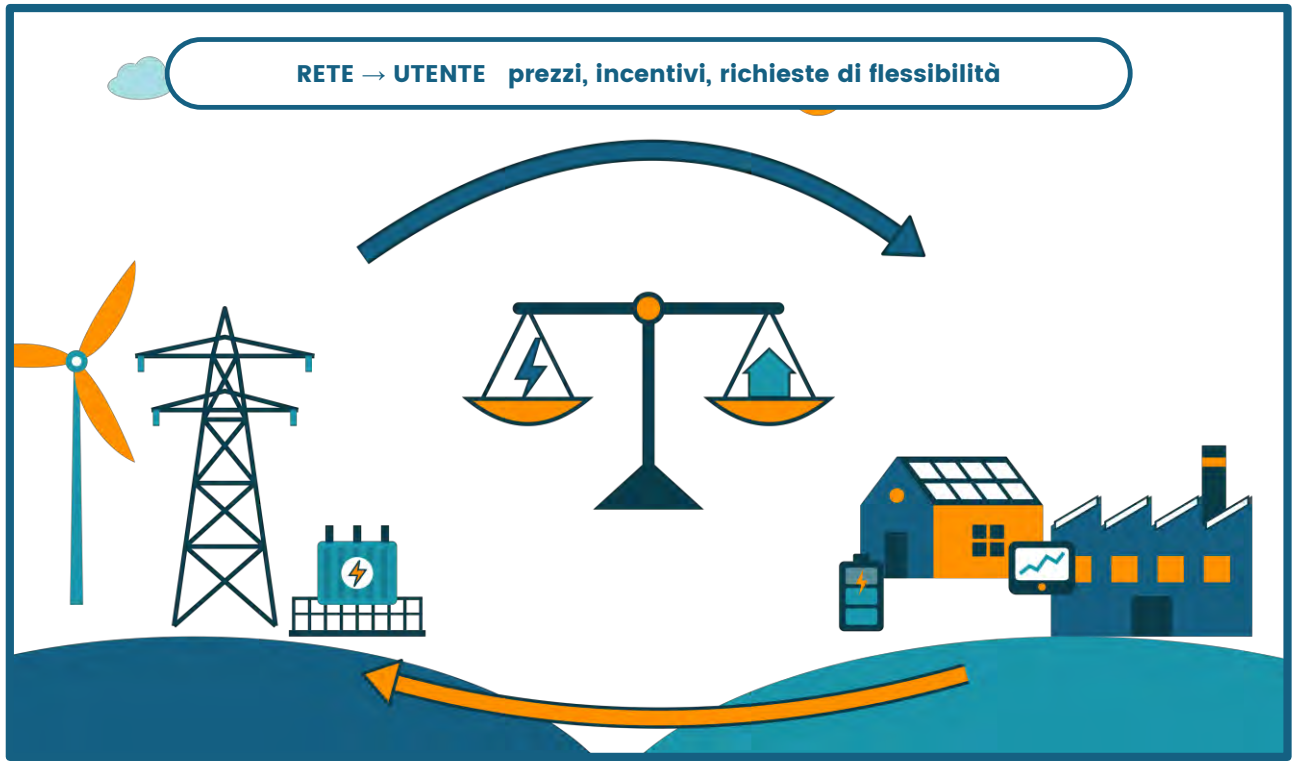
Ridurre, anticipare o posticipare i consumi quando la rete è sotto stress, in cambio di un beneficio

ENERGY MANAGEMENT

Coordina fotovoltaico, accumulo, pompe di calore e ricarica (HEMS / BEMS)

EFFETTO SUL CARICO DI RETE

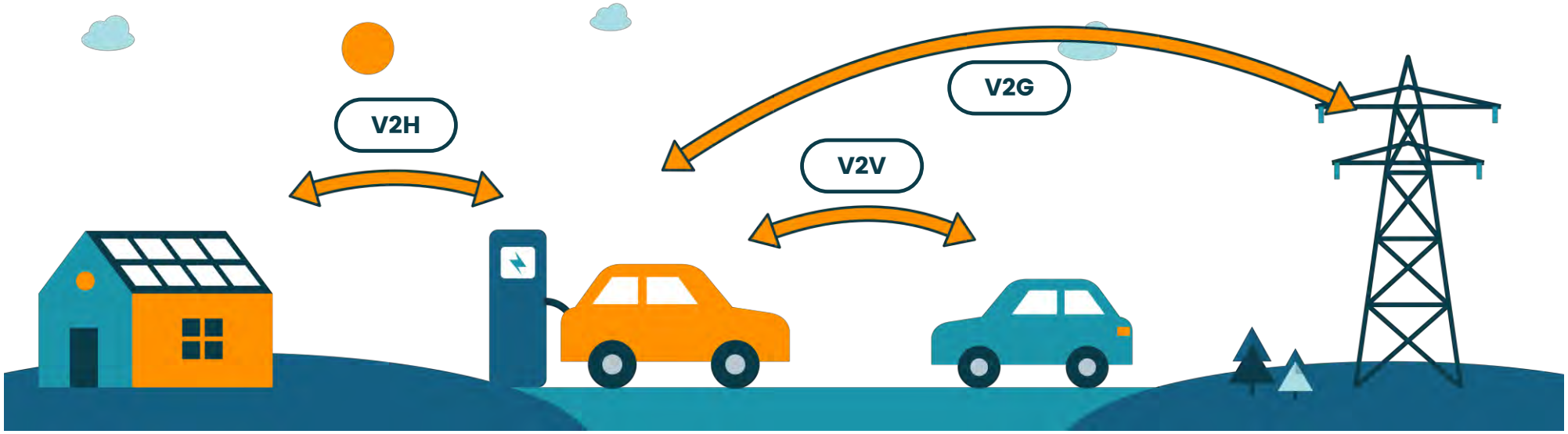




inspire

IL VEICOLO ELETTRICO COME RISORSA

Una batteria su ruote a disposizione



V1G **Ricarica intelligente**

Si ricarica quando conviene alla rete: surplus rinnovabile, prezzi bassi

V2H **Vehicle-to-Home**

L'auto alimenta la casa: più autoconsumo e backup in caso di blackout

V2G **Vehicle-to-Grid**

L'auto restituisce energia alla rete e offre servizi di regolazione

V2V **Vehicle-to-Vehicle**

Energia trasferita tra veicoli: flotte, soccorso, ricarica in mobilità

inspire

LE SFIDE

L'attuale rete elettrica è stata progettata seguendo un modello che non esiste più

EUROPA

584 mld €

di investimenti necessari nelle reti elettriche UE in questo decennio

40%

delle reti di distribuzione europee ha più di 40 anni

ITALIA

› 23 mld €

di investimenti previsti da Terna sulla rete di trasmissione nazionale (2025-2034)

Fonti: Commissione Europea, EU Action Plan for Grids, 2023; Terna, Piano di Sviluppo 2025



Variabilità

Produzione rinnovabile intermittente e difficile da prevedere



Flussi bidirezionali

Gli utenti immettono energia: la rete non è più a senso unico



Scarsa osservabilità

Bassa tensione e consumi "dietro al contatore" poco visibili



Nuovi carichi

Auto elettriche e pompe di calore creano nuovi picchi



Guasti e anomalie

Componenti sotto stress: guasti da intercettare prima che si propaghino

inspire

DOVE L'IA FA LA DIFFERENZA

Dai dati alle decisioni, dal singolo carico all'intera rete





Previsione

Produzione e domanda, per governare la variabilità



Osservabilità

Da un solo contatore, i consumi e le produzioni di ogni apparecchio

il nostro focus



Rilevamento guasti

Anomalie riconosciute in tempi brevi per sostituzioni, riparazioni

il nostro focus



Energy management

Coordinare fotovoltaico, accumulo e carichi per più autoconsumo e meno costi

il nostro focus



Valutazione e gestione della flessibilità

Quanta flessibilità può offrire ogni utente, e come usarla per accumuli, carichi e scambi

lavori in corso

inspire

LA NOSTRA RICERCA

Processamento di segnali elettrici con tecniche di AI in diversi scenari applicativi

MONITORAGGIO RESIDENZIALE

VANTAGGI

- ✓ Consapevolezza dei consumi e risparmio energetico
- ✓ Un solo contatore, nessun sensore invasivo
- ✓ Base per demand response ed energy management

MONITORAGGIO INDUSTRIALE

Grandi consumatori

VANTAGGI

- ✓ Carichi pianificati sulla produzione rinnovabile
- ✓ Efficienza energetica e costi ridotti
- ✓ Gestione della domanda dei grandi consumatori

PROSUMER

Fotovoltaico domestico

VANTAGGI

- ✓ Produzione e autoconsumo stimati senza sotto-contatori
- ✓ Più osservabilità per TSO e DSO
- ✓ Supporto a tariffe e comunità energetiche

MICROGRID

Cold Ironing (Shore Connection)

VANTAGGI

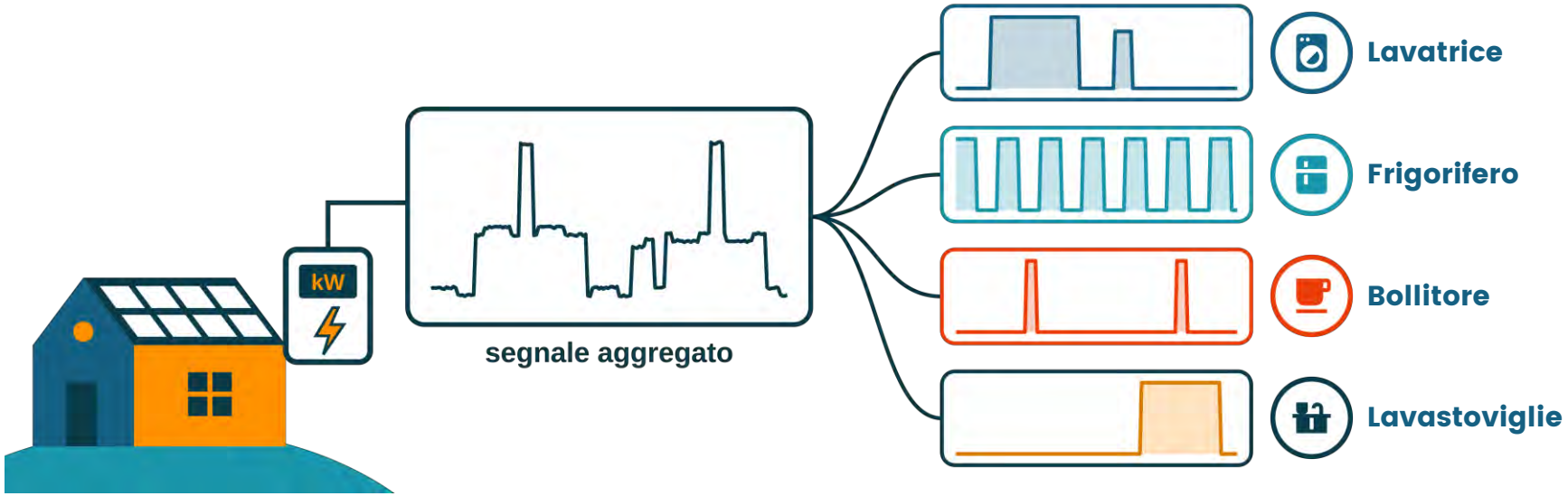
- ✓ Guasti nascosti rilevati
- ✓ Cold ironing più sicuro e affidabile
- ✓ Manutenzione mirata e meno interruzioni del servizio



inspire

NILM: UN CONTATORE, TANTI CARICHI

Non-Intrusive Load Monitoring: dal segnale aggregato ai consumi di ogni apparecchio



Consapevolezza

Feedback per apparecchio: risparmi fino al 12-15% riportati in letteratura

Un solo sensore

Niente sotto-contatori: economico e poco invasivo

Vantaggio per la rete elettrica

Abitudini e carichi noti: base per demand response e flessibilità

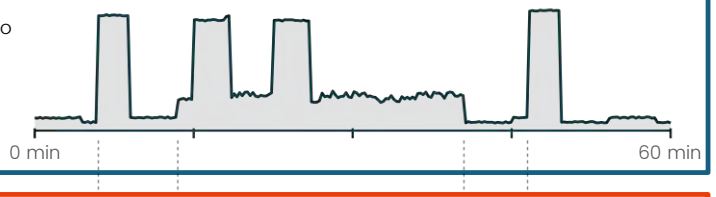
Rif.: Tanoni et al., IEEE Trans. Smart Grid, 2023; Serafini, Tanoni et al., EUSIPCO 2022

inspire

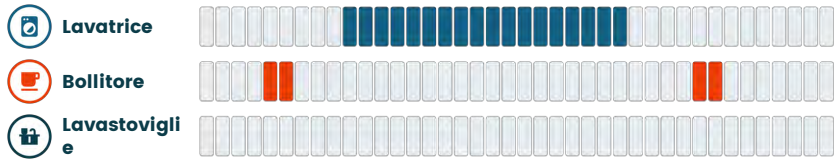
VISIONE HUMAN-CENTRIC: LABELS «WEAK»

Fornire feedback puntuali è costoso: chiediamo all'utente solo ciò che sa dire facilmente

COSA VEDE IL CONTATORE
un'ora di consumo totale della casa

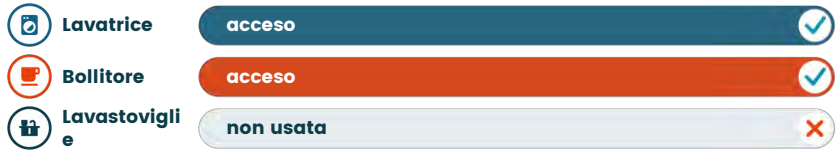


STRONG LABELS stato a ogni istante — servono sensori dedicati



WEAK LABELS — basta chiedere all'utente

"Durante l'ultima ora ho usato la lavatrice e il bollitore"



MIL

Classificazione multi-label
CRNN con Multiple-Instance Learning: le weak labels migliorano i risultati quando le informazioni puntuali sono poche

+29,09%

Ricostruzione profilo di consumo di potenza
Rispetto al benchmark, con Multiple Instance Regression

+20,3%

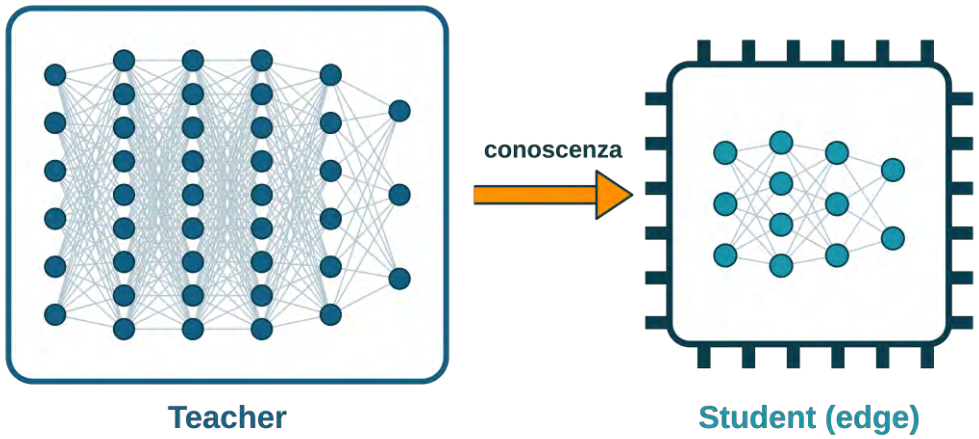
Transfer learning
Fine-tuning sulla nuova casa usando solo weak labels

Rif.: Tanoni et al., IEEE Trans. Smart Grid 14(1), 2023; Serafini, Tanoni et al., EUSIPCO 2022; Tanoni et al., Weakly Supervised Transfer Learning, 2022

inspire

NILM SULL'EDGE

Knowledge distillation per comprimere la rete e permettere la computazione locale (architettura CRNN)

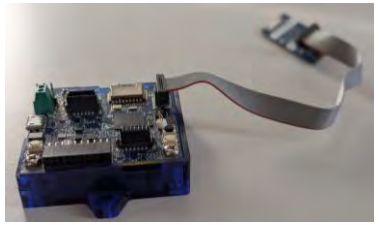


DISPOSITIVI TARGET

ESP32



STM32



10× — **Meno parametri della rete**
A parità di prestazioni

+32,55% — **F1 su scenario unseen**
Rispetto a un modello 74x più complesso, con sole weak labels

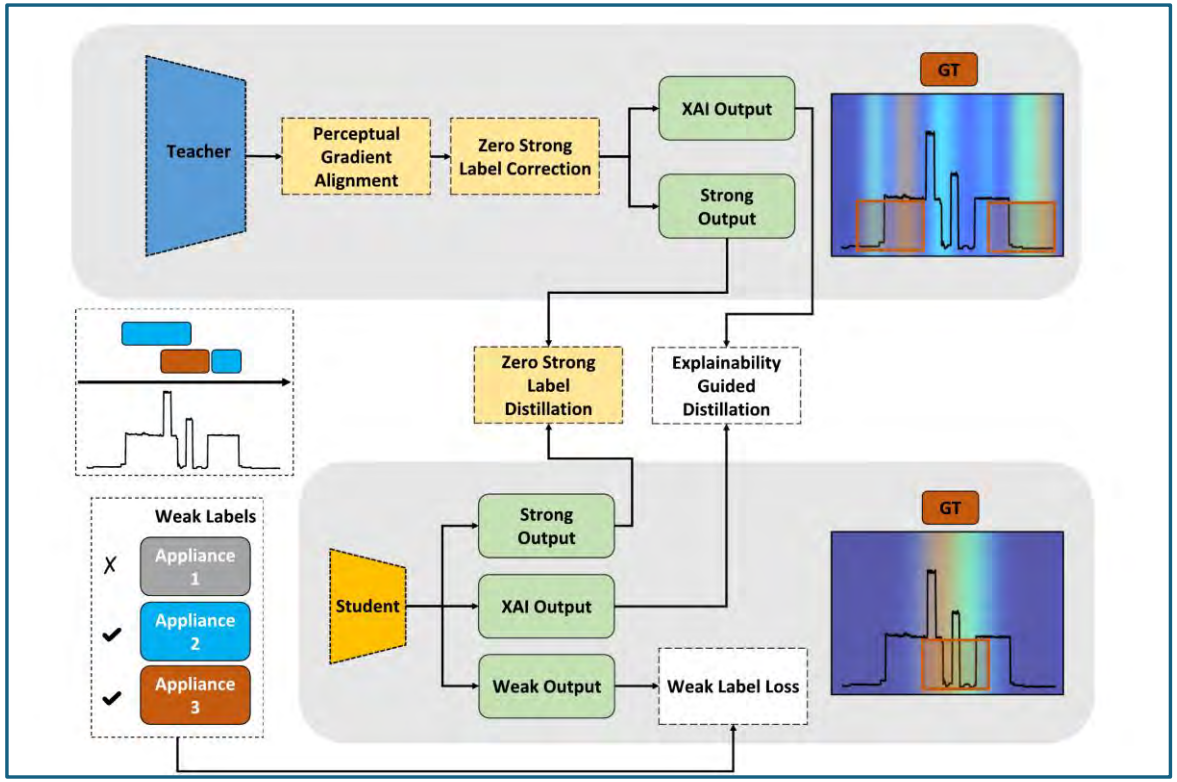
440 KB — **Modello IR-KD**
adatto a microcontrollori

Rif.: Tanoni et al., Knowledge Distillation for Scalable NILM, IEEE Trans. Ind. Informatics; Batic, Tanoni et al., Expert Systems with Applications 294, 2025

inspire

INTEPRETABILITÀ

Per garantire l'affidabilità del modello di monitoraggio è necessario che esso sia anche intepretabile



Framework IR-KD: teacher e student con mappe di attribuzione (XAI) e weak labels

1 · Spiegare

Mappe di attivazione: quali campioni del segnale hanno guidato la decisione

2 · Confrontare

Teacher e student non sempre "guardano" le stesse parti: la conoscenza si trasferisce in modo incoerente

3 · Correggere

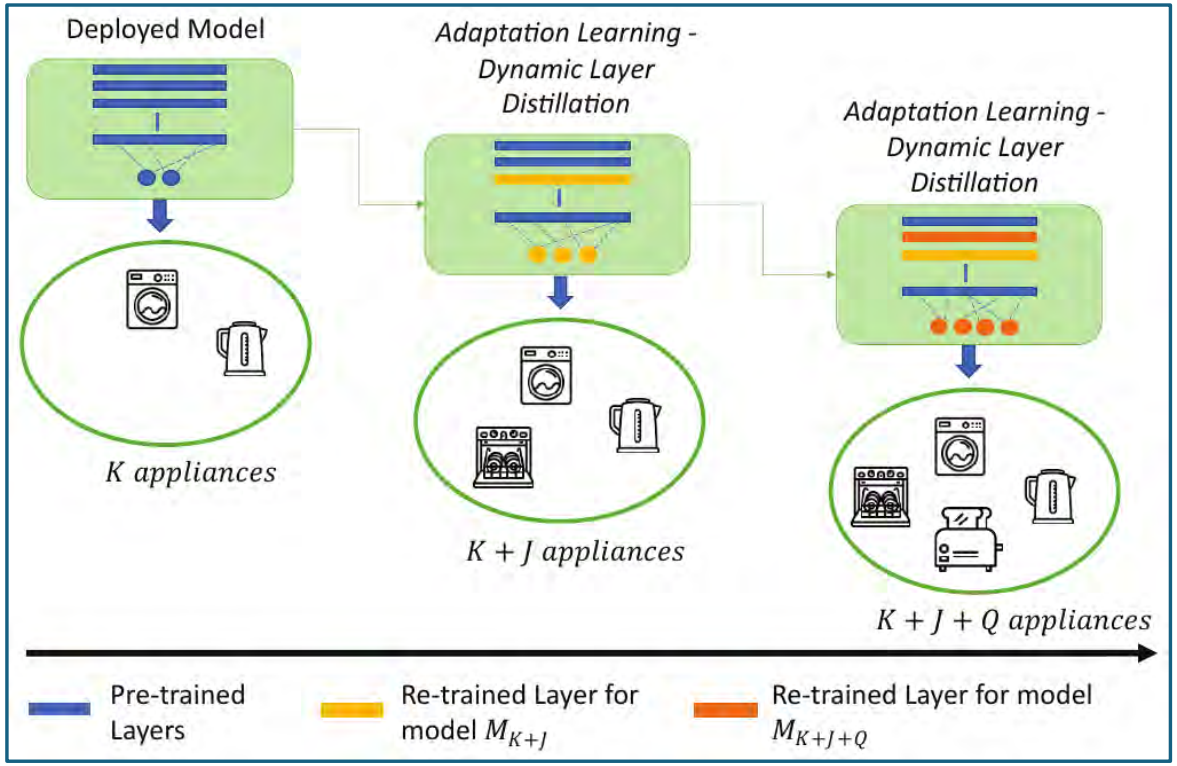
Migliorare l'interpretabilità del Teacher, forzare l'allineamento delle mappe, correzione della predizione con weak labels: meno falsi positivi, spiegazioni più fedeli

Rif.: Batic, Tanoni et al., ICASSP 2023; Batic, Tanoni et al., Expert Systems with Applications 294, 2025

inspire

MONITORAGGIO IN AMBIENTE DINAMICO

Installazione di nuovi apparecchi: il modello deve adattarsi mantenendo le prestazioni originali



Appliance-Incremental Learning: la stessa rete si estende da K a K+J+Q apparecchi

Il problema

I modelli NILM sono "statici": ogni nuovo apparecchio introdotto richiederebbe un nuovo addestramento completo

La nostra idea

Una sola rete multi-label che si evolve: distillazione e selezione dinamica dei layer contro il *catastrophic forgetting*

Il risultato

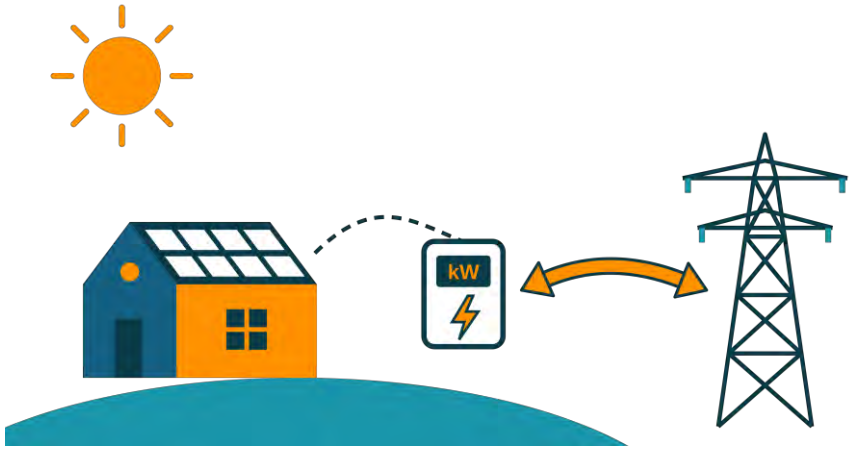
Adattamento migliore con un solo mese di dati rispetto ai benchmarks

Rif.: Tanoni, Principi, Mandolini, Squartini, Appliance-Incremental Learning for Non-Intrusive Load Monitoring, 2023

inspire

IL FOTOVOLTAICO

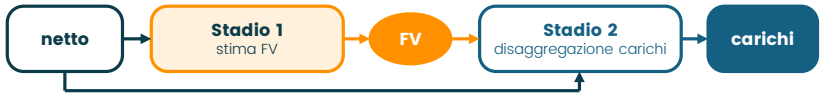
Il contatore legge un segnale di potenza in cui consumi e produzione si mescolano



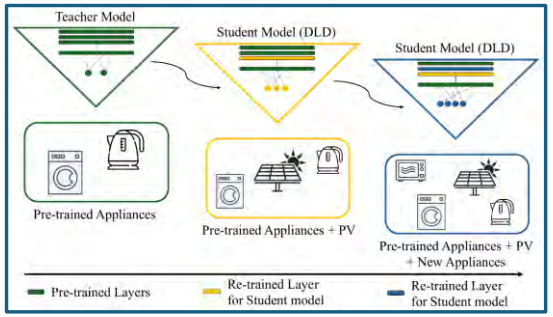
P netta = P consumi - P fotovoltaico

Approccio cascade

Prima si stima la produzione FV, poi la si usa per disaggregare i carichi: errore -21% e -9% rispetto al secondo miglior metodo



NILM CHE "VEDE" IL FV



Il FV è un segnale in più
si disaggrega come un elettrodomestico

Si aggiunge dopo l'installazione
incremental learning, senza dimenticare

Anche più segnali insieme
FV + nuovi apparecchi, con pochi dati locali

-31%

errore medio rispetto al benchmark
aggiungendo FV e lavastoviglie dopo l'installazione: meglio anche del modello statico (-13%)

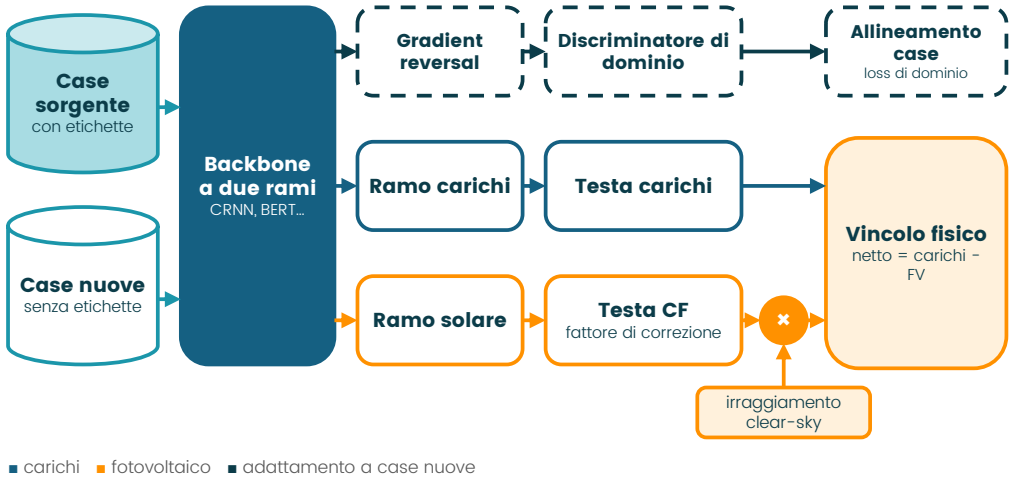
Rif.: Tanoni, Taloma, Principi, Comminiello, Squartini, ISCAS 2025; Khan, Tanoni, Iacono, Vitulli, Principi, Squartini, AIPLD, WIRN 2025

inspire

IL FOTOVOLTAICO: L'AUTOCONSUMO

Quanta energia prodotta viene consumata in casa? La stimiamo dal solo contatore, senza sotto-contatori

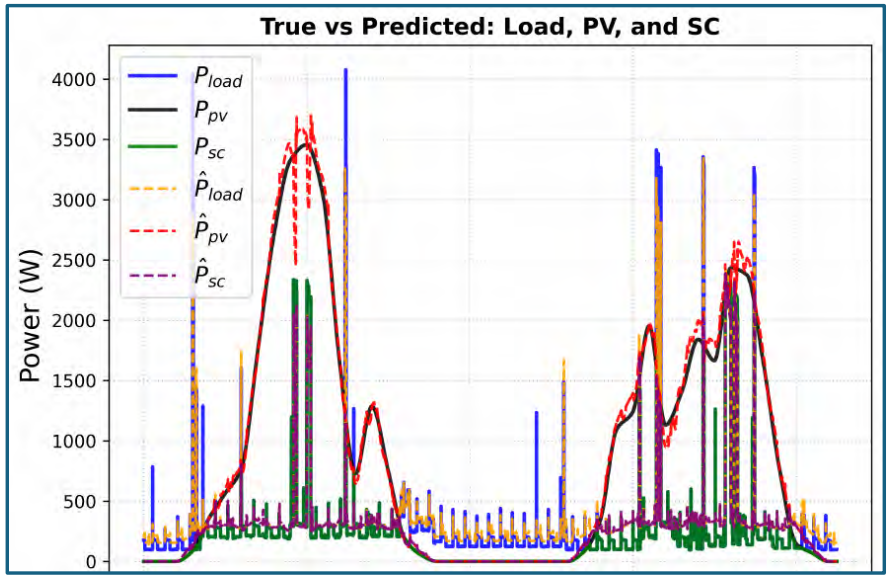
STIMA DELL'AUTOCONSUMO



Input
solo netto + irraggiamento clear-sky

La fisica come ancora
FV = fattore di correzione × clear-sky

Domain adaptation
nessuna etichetta nelle nuove case



-33%

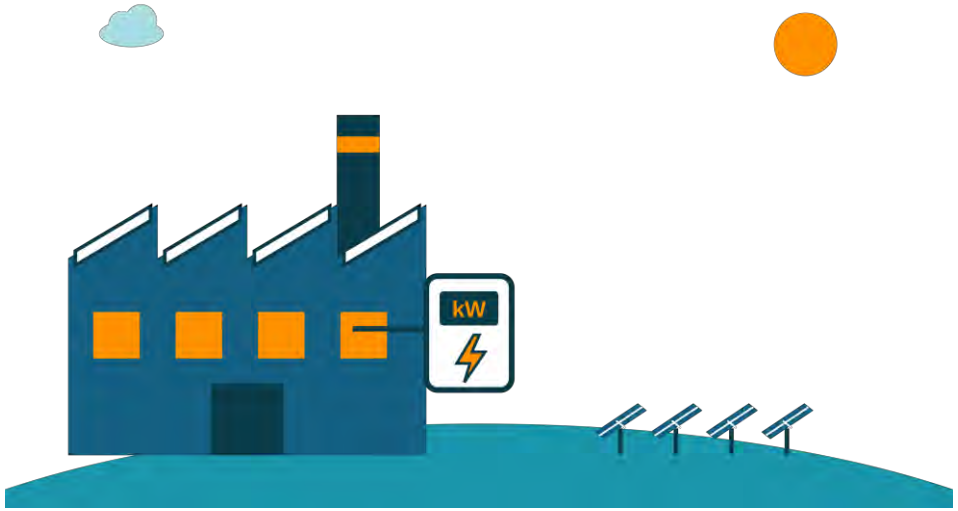
errore sul tasso di autoconsumo
es. CRNN: da 13,1 a 8,7 punti percentuali su case mai viste, meglio dei baseline supervisionati

Rif.: Khan, Tanoni, Xhani, Squartini, Mandolini, Principi, Estimating PV Self-Consumption from Net Load Data via Physics-Anchored Domain Adaptation, SEST 2026

inspire

NILM INDUSTRIALE

L'industria assorbe il 39% dell'elettricità mondiale: conoscere i carichi aiuta a usare meglio le rinnovabili



Pianificare i carichi sulla produzione rinnovabile

7 — **Metodi NILM a confronto**
Il primo studio comparativo dello stato dell'arte in ambito industriale

2 — **Dataset pubblici**
IMDELD (impianto reale di produzione di mangime) e SIDED (digital twin, con produzione da rinnovabili, dell'edificio Honda Institue Research in tre posizioni geografiche diverse)

5+ — **Risoluzioni temporali**
Diversi periodi di campionamento e finestre di analisi

→ **Cosa emerge**
Strati ricorrenti e meccanismo dell'attenzione migliori rispetto a reti convoluzionali (best +60,06%): no picchi spuri che falserebbero l'allocazione dell'energia prodotta dal fotovoltaico

Rif.: Tanoni et al., Industrial Non-Intrusive Power Monitoring to Unlock the Usability of Renewable Energy Sources, ICRERA 2025 · IEA 2024

inspire

MICROGRID PORTUALI

Il cold ironing riduce le emissioni nei porti ma introduce sfide di protezione della microgrid



Guasti ad alta impedenza

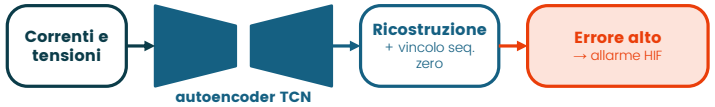
Correnti basse e irregolari: sembrano funzionamento normale e sfuggono alle protezioni

Perché non supervisionato

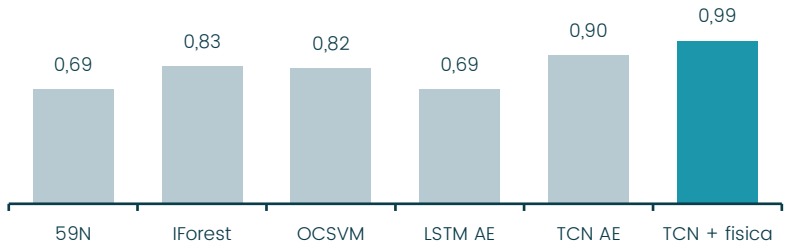
Pochissimi dati di guasto validati: si impara solo dal funzionamento sano

Il nostro metodo

Autoencoder TCN addestrato solo su dati sani + regolarizzazione fisica sulla sequenza zero (IEEE 9-bus, 6,6 kV, con FV ed eolico)



F1-score rilevamento HIF



AUC

0,9989

vs 0,58 dell'indicatore 59N

Rif.: Xhani, Khan, Tanoni, Comodi, Principi, Unsupervised HIF Detection in a Cold Ironing Microgrid via Zero-Sequence-Regularized TCN, SEST 2026

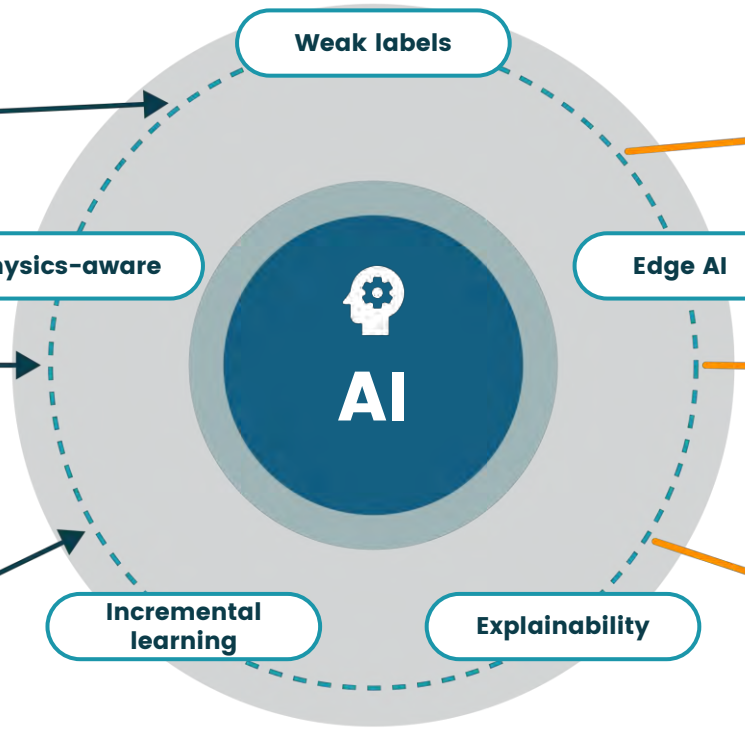
inspire

IN SINTESI

Dati, fisica e persone per una rete più osservabile, affidabile e flessibile

DATI

- Dati del contatore
- Fisica del sistema
- Utenti finali



PER UNA RETE MIGLIORE

OSSERVABILITÀ
NILM residenziale e industriale · stima dell'autoconsumo fotovoltaico

AFFIDABILITÀ
Rilevamento non supervisionato dei guasti · modelli spiegabili e coerenti

FLESSIBILITÀ
Conoscere carichi e produzione per demand response, autoconsumo e comunità energetiche

Grazie per l'attenzione

inspire

Contatti
Giulia Tanoni
g.tanoni@staff.univpm.it
https://dii.univpm.it/giulia-tanoni/

inspire