

# Ricerca di Sistema elettrico



Sviluppo di sottostazioni bidirezionali e di reti complesse di trasporto dell'energia per l'incremento dello sfruttamento delle risorse rinnovabili e lo sviluppo di reti termiche smart (LA3.16)

Maria Alessandra Ancona, Michele Bianchi, Lisa Branchini, Luca Cerami,  
Anna Dattilo, Andrea De Pascale, Francesco Melino



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SVILUPPO DI SOTTOSTAZIONI BIDIREZIONALI E DI RETI COMPLESSE DI TRASPORTO DELL'ENERGIA PER L'INCREMENTO DELLO SFRUTTAMENTO DELLE RISORSE RINNOVABILI E LO SVILUPPO DI RETI TERMICHE SMART (LA3.16)

M. A. Ancona, M. Bianchi, L. Branchini, L. Cerami, A. Dattilo, A. De Pascale, F. Melino – Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *1.5 Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: *3.16*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Paolo Sdringola, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Industriale UNIBO\_DIN\_1

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Sviluppo di sottostazioni bidirezionali e di reti complesse di trasporto dell'energia per l'incremento dello sfruttamento delle risorse rinnovabili e lo sviluppo di reti termiche smart*".

Responsabile scientifico ENEA: Biagio Di Pietra

Responsabile scientifico Co-beneficiario: Francesco Melino

## Indice

1	Risultati attesi.....	5
2	Risultati ottenuti.....	6
2.1	Progettazione di una sottostazione di scambio termico bidirezionale pre-commerciale per l'integrazione con una rete di teleriscaldamento reale .....	6
2.2	Sviluppo di un modello di calcolo di design e off design di una sottostazione bidirezionale	6
2.3	Definizione delle strategie ottimali per la gestione di una rete di teleriscaldamento smart condotta con simulazioni statiche.....	6
2.4	Definizione delle architetture ottimizzate di reti complesse per la produzione, trasporto e impiego dell'energia elettrica, termica e frigorifera .....	7
2.5	Definizione dell'architettura ottimizzata di una rete complessa per la produzione, trasporto e impiego dell'energia elettrica, termica e frigorifera integrata con una rete di produzione, trasporto e conversione di idrogeno.....	7
2.6	Sviluppo di un modello di calcolo per la simulazione del funzionamento di reti complesse di trasporto dell'energia elettrica, termica, frigorifera e del combustibile (idrogeno incluso) .....	8
3	Prodotti attesi.....	9
4	Prodotti sviluppati .....	10
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati .....	11
6	Sintesi delle attività svolte.....	12
7	Dettaglio delle attività svolte.....	13
7.1	Analisi di una rete termica reale e progettazione di una nuova sottostazione termica bidirezionale a servizio di una utenza condominiale .....	13
7.2	Studio e analisi comparativa di architetture di reti complesse dotate di utenti prosumer	24
7.3	Studio di una rete integrata con la produzione, trasporto e riconversione di idrogeno ...	27
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	30
9	Pubblicazioni scientifiche .....	31
10	Eventi di disseminazione .....	32

## Indice delle figure

Figura 1 – Tracciato della rete di teleriscaldamento .....	13
Figura 2 – Schema semplificato della rete di teleriscaldamento .....	14
Figura 3 – Schema funzionale delle sottostazioni di scambio per le utenze di tipo 1 .....	16
Figura 4 – Schema funzionale della sottostazione di scambio bidirezionale per l'utenza attiva .....	16
Figura 5 – Screenshot della sezione del modello di calcolo per il design dello scambiatore HX-TP..	17
Figura 6 – Screenshot della sezione del modello di calcolo per il calcolo dei flussi energetici della sottostazione attiva presso l'utenza ID #12 .....	18
Figura 7 – Bilancio dell'energia termica in ingresso e in uscita dall'utenza ID #12 nel giorno tipo invernale (a), di mezza stagione (b) ed estivo (c) .....	19
Figura 8 – Layout completo della sottostazione attiva.....	20
Figura 9 – Logica di controllo della sottostazione attiva .....	21
Figura 10 – Diagramma di scambio termico in condizioni di design del nuovo scambiatore della sottostazione attiva .....	21
Figura 11 – Vista d'insieme dello scambiatore della nuova sottostazione di scambio termico .....	22
Figura 12 — Energia termica disponibile all'accumulo dell'utenza ID #12 nel giorno tipo di mezza stagione (a) ed estivo (b).....	23
Figura 13 – Variazione della spesa annua per l'utenza ID #12 attiva al variare del rapporto tra il valore dell'energia termica immessa e prelevata .....	24
Figura 14 - Configurazioni analizzate .....	26
Figura 15 — Confronto tra le configurazioni analizzate in termini di KPI valutati su un anno di esercizio .....	27
Figura 16 - Schema di riferimento di una rete complessa integrata con una rete di trasporto e riconversione di idrogeno blended .....	28
Figura 17 — Caratteristiche dei motori a combustione interna cogenerativi installati presso le utenze attive.....	28
Figura 18 — Andamento degli indici di prestazione ambientale al variare della concentrazione volumetrica di idrogeno in miscela .....	29
Figura 19 — Confronto delle prestazioni ambientali durante la stagione invernale per diverse configurazioni.....	29

## Indice delle tabelle

Tabella 1 – Risultati principali della simulazione della rete in condizioni di design.....	15
Tabella 2 – Punto di design dello scambiatore bidirezionale .....	17
Tabella 3 – Caratteristiche dello scambiatore per la sottostazione attiva .....	21

## 1 Risultati attesi

I risultati attesi per la LA3.16, come da capitolato vigente, sono:

- progettazione di una sottostazione di scambio termico bidirezionale pre-commerciale per l'integrazione con una rete di teleriscaldamento reale;
- sviluppo di un modello di calcolo di design e off design di una sottostazione bidirezionale;
- definizione delle strategie ottimali per la gestione di una rete di teleriscaldamento smart condotta con simulazioni statiche;
- definizione delle architetture ottimizzate di reti complesse per la produzione, trasporto e impiego dell'energia elettrica, termica e frigorifera;
- definizione dell'architettura ottimizzata di una rete complessa per la produzione, trasporto e impiego dell'energia elettrica, termica e frigorifera integrata con una rete di produzione, trasporto e conversione di idrogeno;
- sviluppo di un modello di calcolo per la simulazione del funzionamento di reti complesse di trasporto dell'energia elettrica, termica, frigorifera e del combustibile (idrogeno incluso).

## 2 Risultati ottenuti

L'attività di ricerca del gruppo di Sistemi e Macchine per l'Energia e l'Ambiente del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Alma Mater Studiorum – Università di Bologna ha permesso di ottenere i risultati di seguito descritti, coerentemente con quelli attesi per la LA3.16.

### 2.1 Progettazione di una sottostazione di scambio termico bidirezionale pre-commerciale per l'integrazione con una rete di teleriscaldamento reale

Partendo da una rete di teleriscaldamento reale – situata nella città di Torino – è stata progettata una sottostazione di scambio termico bidirezionale in grado di trasformare una delle utenze da tradizionale a smart.

In dettaglio, dopo aver acquisito tutte le informazioni disponibili sulla rete di teleriscaldamento e sulle utenze da esse servite è stato possibile – in base alle analisi svolte – individuare: (i) l'utenza più adatta alla conversione in attiva, (ii) lo schema di scambio termico bidirezionale più opportuno in base alle condizioni al contorno, (iii) progettare tutti i componenti necessari alla conversione della sottostazione da tradizionale a bidirezionale quali, ad esempio, il circuito terziario e lo scambiatore di calore (denominato HX-TP) tra circuito terziario e circuito primario che consente l'immissione di energia termica, generata dai pannelli solari termici dell'utenza, nella rete di teleriscaldamento.

### 2.2 Sviluppo di un modello di calcolo di design e off design di una sottostazione bidirezionale

Le prestazioni di design e off design della sottostazione bidirezionale sono state valutate sviluppando un modello di calcolo in grado di svolgere il dimensionamento preliminare dei componenti necessari (con particolare riferimento allo scambiatore HX-TP) e valutare inoltre il comportamento della sottostazione bidirezionale al variare delle condizioni al contorno.

Il modello di calcolo di funzionamento in off design dello scambiatore di calore è stato validato mediante confronto con un software commerciale nelle disponibilità del gruppo di ricerca ed inserito in un modello di calcolo e gestione di tutta la sottostazione bidirezionale. Il modello sviluppato è basato – per il calcolo di off design degli scambiatori di calore previsti nella sottostazione – sul metodo del *Thermal Resistance Scaling* ed è in grado di analizzare diverse strategie di regolazione quali ad esempio quella a temperatura uscita terziario costante (T-UT COST) o a temperatura uscita primario costante (T-UP COST).

L'applicazione del modello basata sul mantenimento della temperatura uscita terziario costante si è dimostrata più vantaggiosa rispetto agli altri criteri ipotizzati e studiati.

### 2.3 Definizione delle strategie ottimali per la gestione di una rete di teleriscaldamento smart condotta con simulazioni statiche

La valutazione del comportamento della sottostazione attiva all'interno della rete di teleriscaldamento in esame è stata svolta considerando le reali condizioni al contorno in cui opera l'utenza smart in termini di producibilità del sistema solare termico, della logica implementata per l'autoconsumo dell'energia termica prodotta, dell'accumulo e/o dell'immissione in rete della stessa. Il modello di gestione ottimizzata individuato è basato sull'immissione da parte delle utenze attive esclusivamente del surplus di produzione (rispetto al proprio fabbisogno) senza avvalersi di serbatoi di accumulo (che di fatto è rappresentato dalla rete stessa) decentralizzati. La strategia di regolazione

è stata completata sviluppando un modello di interazione anche economica tra le utenze attive e la centrale/gestore della rete, basato sui criteri di bilanciamento e compensazione paritaria dell'energia termica scambiata tra utenza attiva e rete di teleriscaldamento. Dal punto di vista della rete di teleriscaldamento invece si è definito – come criterio di gestione – una regolazione a portata variabile e salto di temperatura costante sui primari delle sottostazioni, con blocco della portata al 20% del valore di design.

Tutte le analisi svolte e i risultati conseguiti sono stati ottenuti utilizzando il software IHENA 9.3 (sviluppato dall'Università di Bologna), implementato con il modello di gestione della sottostazione attiva prima descritto.

## 2.4 Definizione delle architetture ottimizzate di reti complesse per la produzione, trasporto e impiego dell'energia elettrica, termica e frigorifera

Partendo dal tracciato della rete di teleriscaldamento precedentemente illustrata è stata definita una rete complessa per la produzione, il trasporto e impiego di energia elettrica, termica e frigorifera. Le prestazioni della rete complessa sono state studiate mediante il software ESATTO (sviluppato dall'Università di Bologna e illustrato nel paragrafo 2.6 di questa relazione).

Per il giorno tipo invernale, di mezza stagione ed estivo, sono state analizzate numerose configurazioni e/o architetture denominate (i) *di riferimento*, (ii) *standard*, (iii) *attuale*, (iv) e (v) *attiva* (con e senza scambio sul posto), (vi) *tutto termico* e (vii) *tutto elettrico*, valutando ognuna di esse sulla base di parametri energetici, ambientali ed economici (definiti come KPI calcolati dal software ESATTO).

Sulla base delle condizioni al contorno ipotizzate e dei KPI elaborati, emerge che la configurazione *tutto elettrico* è la più vantaggiosa dal punto di vista delle prestazioni puramente economiche. Anche dal punto di vista dell'integrazione di sorgenti rinnovabili nel soddisfacimento dei fabbisogni della rete complessa, la configurazione tutto elettrico, emerge rispetto alle altre configurazioni. In questo caso, occorre però considerare che l'ipotesi *tutto termico* potrebbe risultare particolarmente vantaggiosa nel caso fosse disponibile calore di scarto e/o cascame termico industriale da poter recuperare e integrare nel mix produttivo.

## 2.5 Definizione dell'architettura ottimizzata di una rete complessa per la produzione, trasporto e impiego dell'energia elettrica, termica e frigorifera integrata con una rete di produzione, trasporto e conversione di idrogeno

La rete complessa per la produzione, il trasporto e impiego di energia elettrica, termica e frigorifera sviluppata e descritta al punto precedente è stata completata aggiungendo anche l'idrogeno come ulteriore vettore energetico. La valutazione delle prestazioni di tale caso è stata possibile impiegando il software ESATTO integrato con IHENA G (sviluppato dall'Università di Bologna e illustrato nel paragrafo 2.6 di questa relazione), software specifico per studiare le reti di trasporto dell'idrogeno.

In questo caso, l'architettura di rete complessa ottimale è risultata essere quella in cui tre utenze della rete complessa sono state rese smart (bidirezionali), inserendo tre motori a combustione interna in assetto cogenerativo alimentati a idrogeno (puro o blended con gas naturale). La soluzione individuata, in ragione delle condizioni al contorno definite, ha permesso di conseguire i massimi valori di integrazione delle sorgenti rinnovabili nel mix produttivo destinato al soddisfacimento dei fabbisogni elettrici, termici e frigoriferi delle utenze della rete complessa.

## 2.6 Sviluppo di un modello di calcolo per la simulazione del funzionamento di reti complesse di trasporto dell'energia elettrica, termica, frigorifera e del combustibile (idrogeno incluso)

Al fine di studiare l'architettura di reti complesse caratterizzate dalla connessione di prosumer è stato realizzato un nuovo modello di calcolo chiamato Energy Sharing Application Tool for True Optimization (ESATTO).

Il software è in grado di studiare il comportamento di un massimo di 50 utenze connesse contemporaneamente alle reti di distribuzione elettrica, termica, frigorifera e del combustibile. Per ognuna delle 50 utenze è possibile definire a quale delle quattro reti in oggetto è connessa. In aggiunta, ognuna delle 50 utenze può essere implementata sia come passiva (ovvero solo in grado di ricevere energia dalle quattro reti a cui è connessa) che come attiva (ovvero anche in grado di immettere energia in solo alcune o in tutte delle quattro reti di distribuzione). Il software realizza contemporaneamente il bilancio energetico ed economico di ogni singola utenza e delle quattro reti di distribuzione in riferimento a 24 slot temporali (abituamente impostati con riferimento alla durata di 3600 secondi l'uno).

Lo sviluppo di un modello di calcolo in grado di simulare le prestazioni di una rete di trasporto e distribuzione di idrogeno (o di qualunque altro gas combustibile) è stato fatto partendo dal core di calcolo già utilizzato per il software IHENA 9.3. In dettaglio, da IHENA 9.3 è stato derivato IHENA G attualmente implementato per gestire il trasporto e la distribuzione di idrogeno e/o metano. Tale software è stato implementato e integrato con ESATTO.

### 3 Prodotti attesi

Come da capitolato vigente, il deliverable della ricerca consiste in un report contenente una descrizione di tutte le attività svolte, dei modelli di calcolo sviluppati, delle simulazioni e dei risultati raggiunti.

## 4 Prodotti sviluppati

Come previsto, nel corso della LA3.16 è stato sviluppato il presente report tecnico, contenente la descrizione delle attività svolte, dei modelli di calcolo sviluppati, delle simulazioni e dei risultati raggiunti.

È stato inoltre sviluppato un allegato al report tecnico (*inserito come allegato aggiuntivo*), che illustra in modo approfondito e completo tutti i modelli di calcolo sviluppati e impiegati, le ipotesi fatte, le strategie sviluppate e i risultati conseguiti durante l'attività di ricerca svolta.

All'interno del report e del relativo allegato sono descritti anche i software sviluppati e utilizzati dagli Autori, tra i quali ESATTO (Energy Sharing Application Tool for True Optimization, specificatamente sviluppato in questo triennio di attività), il modello di design e gestione ottimizzata di off design della sottostazione attiva, IHENA (Intelligent Heat Energy Network Analysis, sviluppato nei trascorsi trienni di attività) e IHENA G, specifico per le reti di trasporto e distribuzione di combustibili. Tali software non sono parte dei deliverable previsti nella suddetta linea di attività.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per la LA3.16 non vi sono stati scostamenti tecnici/economici rispetto al capitolato vigente.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Lo studio ha permesso di individuare l'architettura ottimale per una sottostazione di scambio termico bidirezionale da integrare in una rete di teleriscaldamento reale, sviluppando un modello di calcolo funzionale al dimensionamento dei componenti. Attraverso delle simulazioni statiche, sono state implementate diverse strategie di gestione e regolazione della rete, valutando le prestazioni energetiche ed economiche della sottostazione attiva in condizioni off design.

La rete termica smart è stata integrata con i flussi elettrici e frigoriferi al fine di definire una rete complessa; si è proceduto con lo studiare e confrontare diverse architetture di reti complesse per la produzione, il trasporto e l'uso di energia elettrica, termica e frigorifera. Una delle reti complesse definite è stata integrata con la rete del combustibile, ipotizzando diverse miscele idrogeno/metano per alimentare le utenze, anche attive.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

Si riporta la descrizione delle principali attività svolte, rimandando all'Allegato al presente report tecnico (*inserito come allegato aggiuntivo*) per ulteriori approfondimenti sul raggiungimento dei risultati esposti, sulle metodologie applicate e sui modelli sviluppati.

### 7.1 Analisi di una rete termica reale e progettazione di una nuova sottostazione termica bidirezionale a servizio di una utenza condominiale

Tale attività è integrata, collegata e completata da quanto svolto dall'ENEA nella LA3.15 con l'obiettivo di progettare una sottostazione pre-commerciale per scambio termico bidirezionale, di taglia compatibile con una reale utenza di una rete di teleriscaldamento. È stato scelto un caso studio a Torino: si tratta di una rete al servizio di un quartiere, i cui parametri operativi e costruttivi, necessari a ricostruirne in apposito ambiente di simulazione il funzionamento, sono stati forniti da ENEA.

La rete di teleriscaldamento oggetto del presente studio è situata nella zona nord della città di Torino nell'area attraversata da Corso Taranto, così come illustrato nella planimetria generale in **Figura 1**.

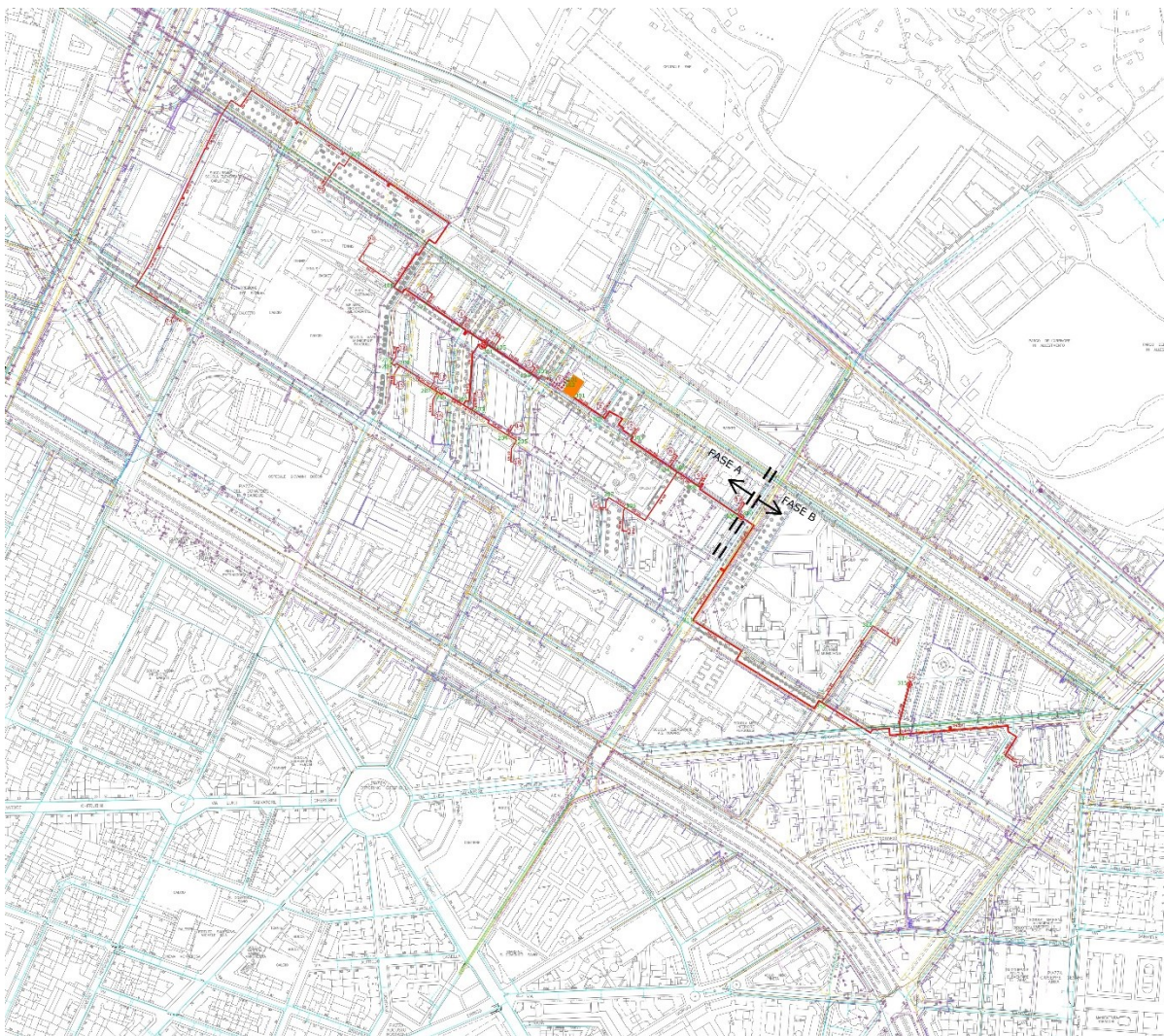


Figura 1 – Tracciato della rete di teleriscaldamento

Lo schema semplificato in **Figura 2** illustra, rispetto alla centrale di produzione (PPP in **Figura 2**), la posizione relativa di tutte le 25 utenze servite dalla rete.

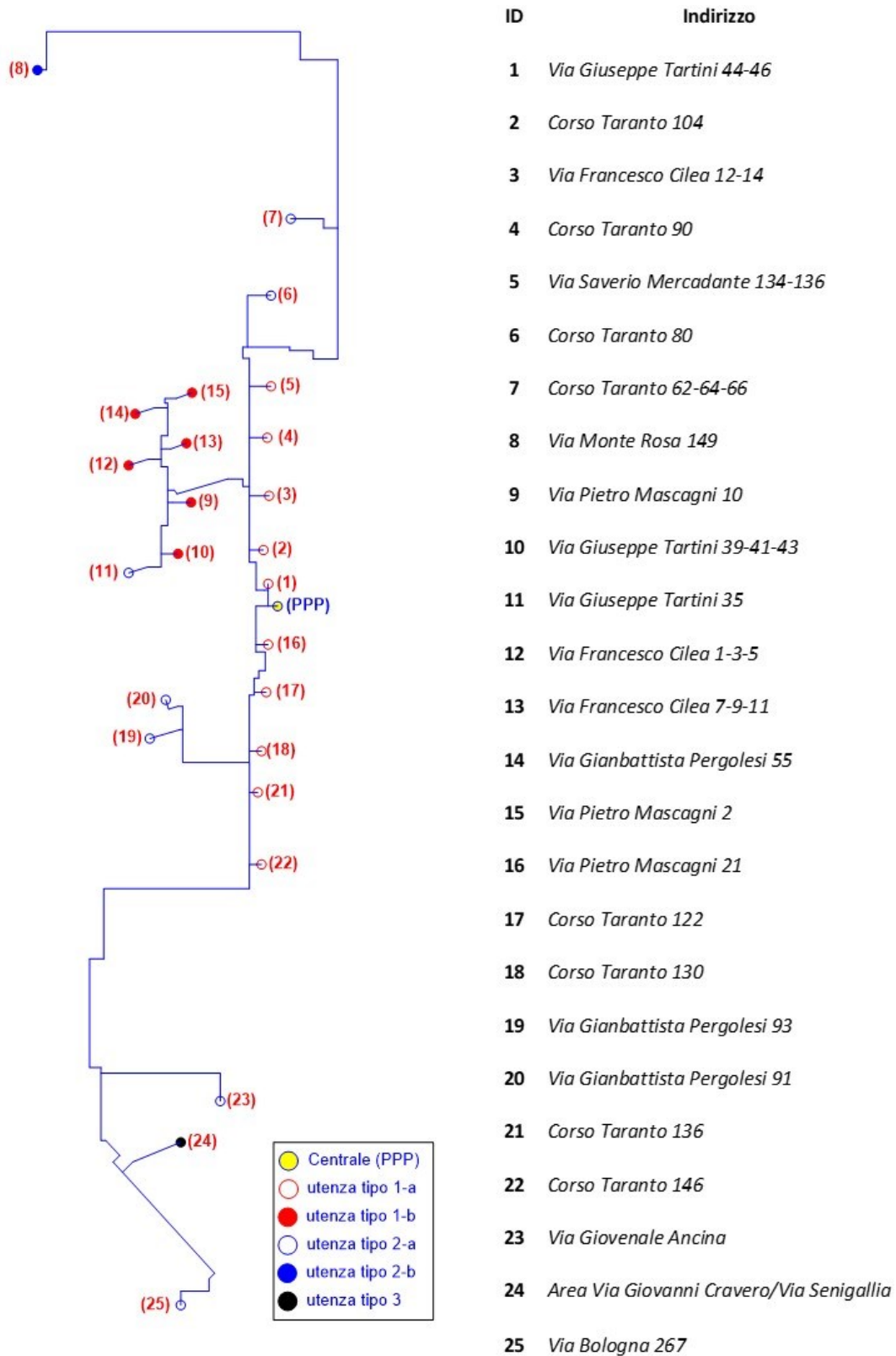


Figura 2 – Schema semplificato della rete di teleriscaldamento

I principali risultati della simulazione di design, sono riportati in **Tabella 1**; ulteriori parametri e dati di output sono presenti nell'allegato aggiuntivo al presente documento.

Tabella 1 – Risultati principali della simulazione della rete in condizioni di design

	Simbolo	valore
Portata in massa totale in ingresso alla rete [kg/s]	$\dot{m}_{DH,in}$	153
Temperatura di immissione in rete [°C]	$T_{DH,in}$	85
Temperatura di rientro in centrale [°C]	$T_{DH,out}$	60
Potenza termica totale richiesta dalle utenze [kW]	$Q_{TH,U}$	12'839
Potenza termica totale prodotta in centrale [kW]	$Q_{TH,PPP}$	15'805
Potenza elettrica spesa per il pompaggio [kW]	$P_{PMP,EL}$	59

Le analisi svolte hanno dimostrato che la configurazione ottimale è quella con sottostazione smart riconducibile allo *schema 4* (ritorno su mandata) installata in corrispondenza dell'utenza ID #25 (utenza critica nel caso in design) ed eventualmente a seguire in corrispondenza dell'utenza ID #8 e dell'utenza ID #15. In accordo con ENEA e con il gestore della rete di teleriscaldamento, si studierà l'assetto smart della rete ipotizzando lo *schema 1* (mandata su ritorno) applicato all'utenza ID #12. Il motivo risiede nella necessità di valutare la conversione della rete sfruttando una (o più) delle utenze già predisposte con sistemi di produzione termica rinnovabile e attualmente impiegati esclusivamente per l'autoconsumo, in relazione ai fabbisogni di sola acqua calda sanitaria. La scelta dello *schema 1* è motivata dalla sua peculiarità di non aver bisogno di operare scavi stradali. Come anche già messo in evidenza in precedenza, tale schema consente di apportare modifiche esclusivamente nella sottostazione dell'utenza selezionata e può essere sostenuto esclusivamente dal gruppo di pompaggio della centrale di produzione.

L'utenza in oggetto (ID #12) è caratterizzata da un fabbisogno per acqua calda sanitaria e riscaldamento invernale complessivamente pari a 366 kW con un salto termico sul primario dello scambiatore dell'utenza pari a 20 °C. Sulla base dei dati ricevuti e della lettura disponibile sull'argomento, sono stati ricostruiti gli andamenti del fabbisogno di potenza termica per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria oltre che quelli della potenza termica producibile dai generatori solari termici installati presso l'utenza.

In **Figura 3** si presenta lo schema funzionale della sottostazione di scambio termico in esame. La mandata del circuito secondario (fluido caldo della rete interna all'utenza) è connessa ad un collettore da cui partono la mandata del circuito per il riscaldamento invernale e quella per la produzione di acqua calda sanitaria. Quest'ultimo flusso – come mostrato in figura – rilascia energia termica ad un accumulo su cui intervengono anche i collettori solari termici.

Lo schema funzionale della sottostazione attiva progettata per l'utenza ID #12 è in **Figura 4**. A partire dallo schema in **Figura 3**, si aggiunge lo scambiatore HX-TP che consente la connessione termica tra il circuito primario (che bypassa lo scambiatore HX-PS) e terziario (che bypassa il serbatoio di accumulo). Lo schema realizzato presuppone pertanto l'immissione di potenza termica prodotta dai pannelli solari termici solo nel caso la produzione sia in parte o del tutto superiore al fabbisogno. In questo caso, infatti, non si avrebbe prelievo dalla rete e pertanto il circuito secondario non avrebbe fluido circolante. Si definiscono in **Tabella 2** le condizioni di design dello scambiatore HX-TP.

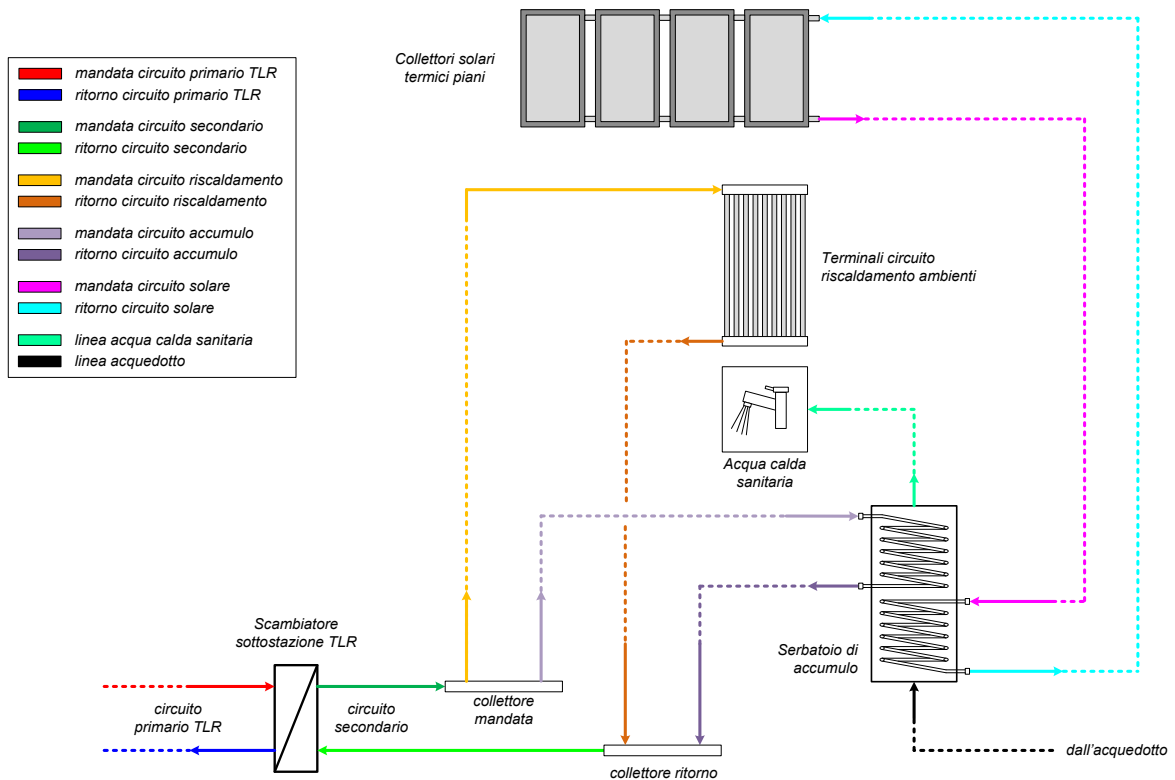


Figura 3 – Schema funzionale delle sottostazioni di scambio per le utenze di tipo 1

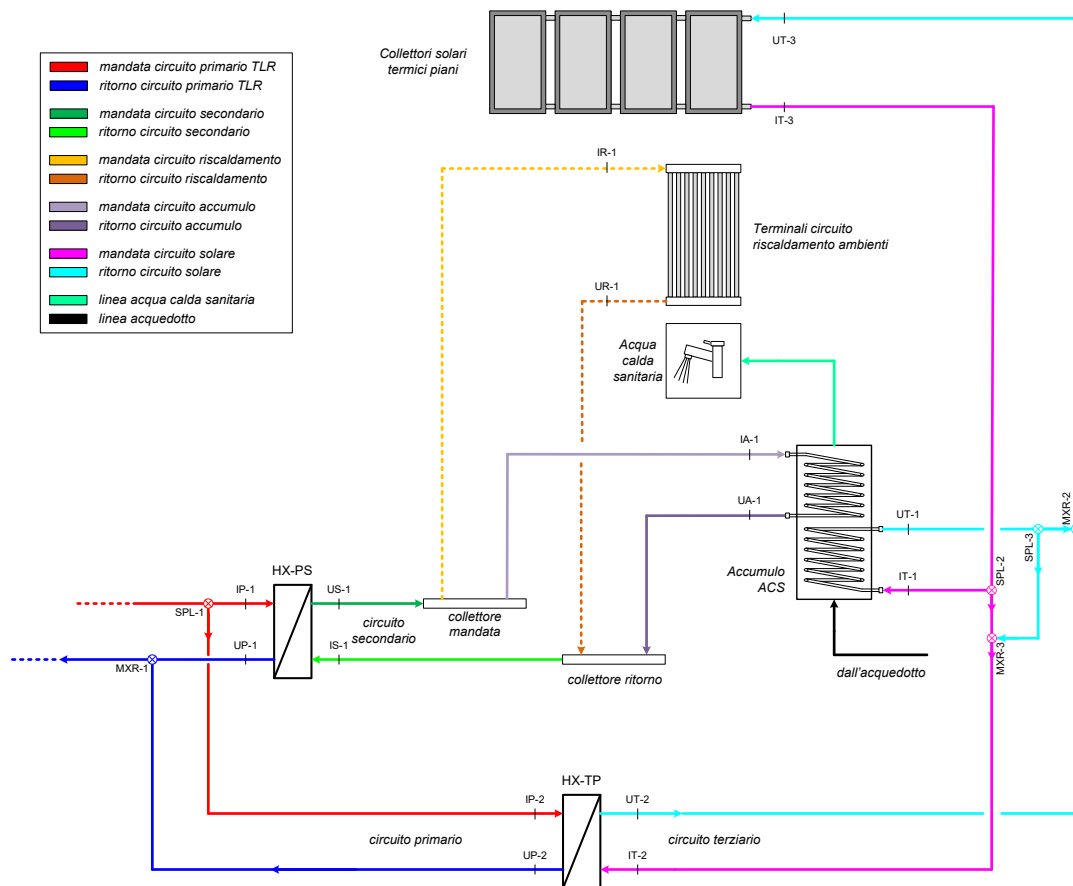


Figura 4 – Schema funzionale della sottostazione di scambio bidirezionale per l'utenza attiva

Tabella 2 – Punto di design dello scambiatore bidirezionale

Variabile	udm	sezione	valore
Temperatura ingresso primario	[°C]	sez. IP-2	70
Temperatura ingresso terziario	[°C]	sez. IT-2	90
Temperatura uscita primario	[°C]	sez. UP-2	80
Temperatura uscita terziario	[°C]	sez. UT-2	75
Portata primario	[kg/s]	sez. IP-2/UP-2	1.55
Portata terziario	[kg/s]	sez. IT-2/UT-2	1.03

Al fine di valutare le prestazioni della sottostazione attiva presso l'utenza ID #12 è stato predisposto un modello di calcolo in grado di realizzare il design dello scambiatore di calore HX-TP e valutare, inoltre, le prestazioni complessive di tutti i sistemi coinvolti al variare delle condizioni al contorno.

In **Figura 5** è presentata la schermata di interfaccia del modello di calcolo dedicata al design dello scambiatore. In base ai livelli di temperatura inseriti per le sezioni di ingresso e uscita del circuito primario e terziario e alla potenza termica in design prodotta dal solare termico è possibile determinare, tra gli altri parametri, le portate circolanti nello scambiatore di calore e il diagramma di scambio termico di design.

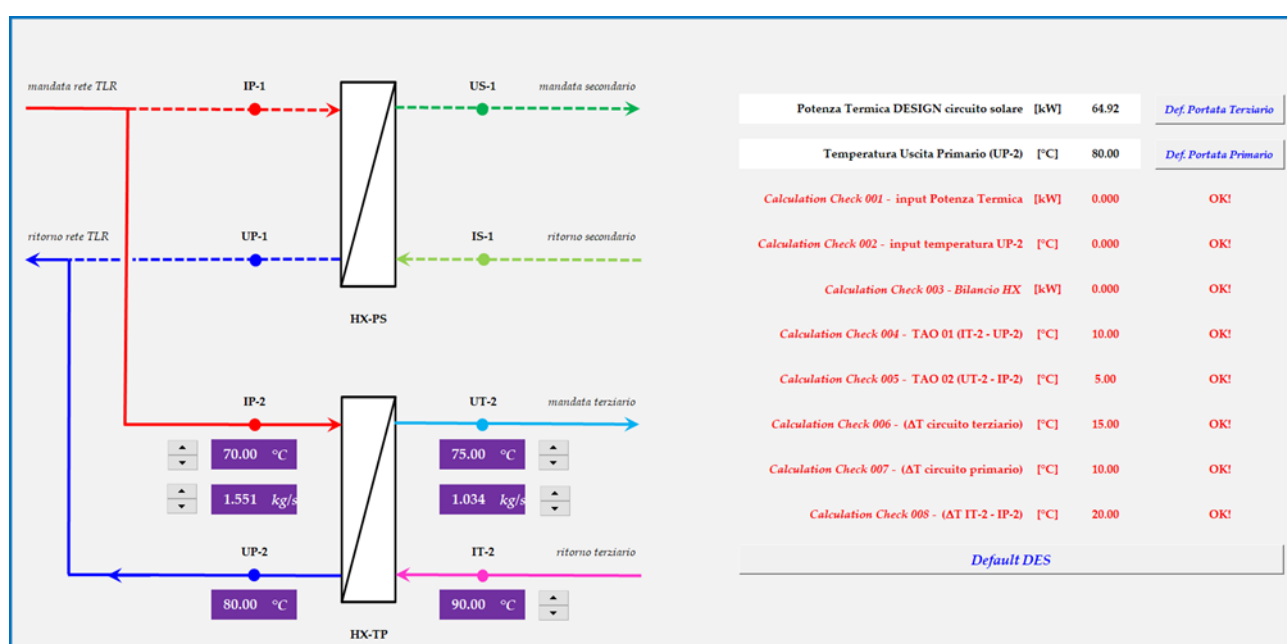


Figura 5 – Screenshot della sezione del modello di calcolo per il design dello scambiatore HX-TP

Il design dello scambiatore HX-TP è quindi importato nella sezione del modello sviluppata per la valutazione delle prestazioni di tutta la sottostazione (**Figura 6**) al variare delle condizioni al contorno. Il modello di calcolo – sulla base delle logiche di gestione della sottostazione definite e implementate – determina portate e temperature in ogni sezione considerata valutando, tra le altre cose, i flussi di energia termica prelevati dalla rete di teleriscaldamento, quelli immessi nella stessa o l'energia termica accumulata nel serbatoio.

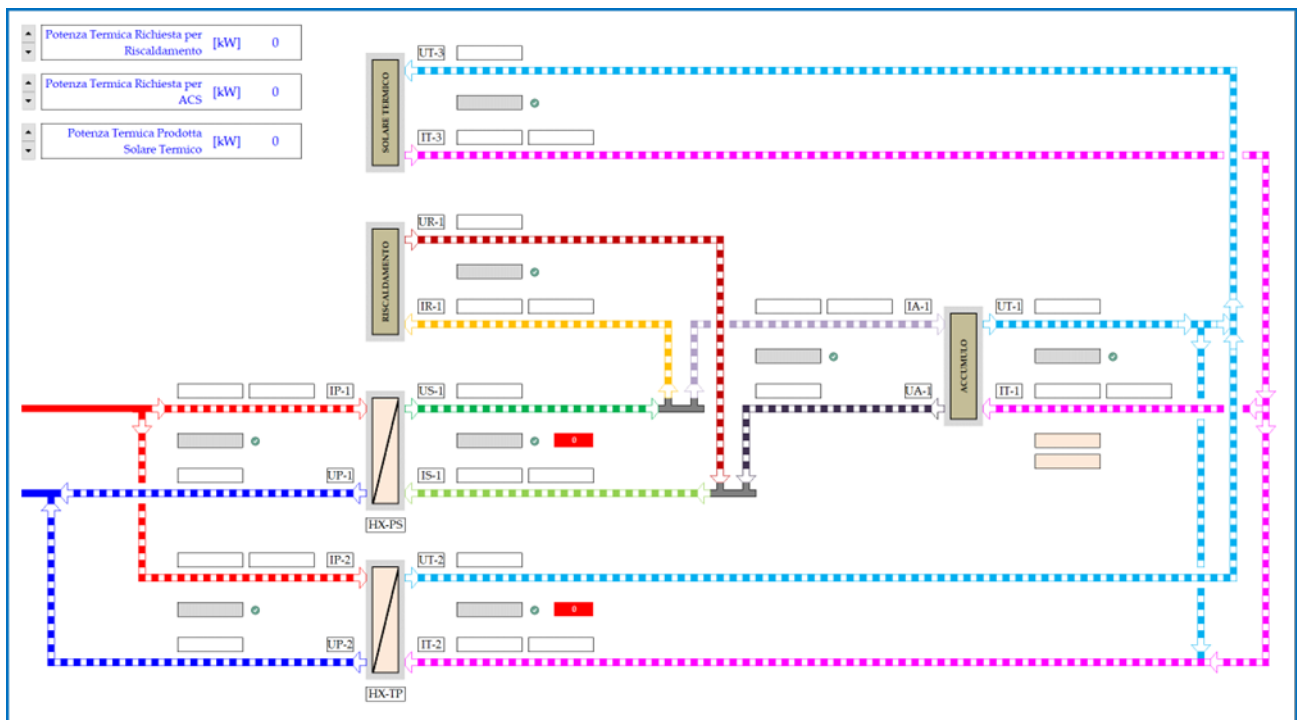


Figura 6 – Screenshot della sezione del modello di calcolo per il calcolo dei flussi energetici della sottostazione attiva presso l’utenza ID #12

Per lo studio del comportamento di off design dello scambiatore HX-TP, a partire dal punto di progetto definito in **Tabella 2**, sono state svolte le seguenti ipotesi di regolazione/controllo del sistema:

- regolazione a temperatura uscita terziario costante (T-UT COST)
- regolazione a temperatura uscita primario costante (T-UP COST)

Per quanto visto in questa analisi, la regolazione dello scambio mantenendo la temperatura uscita terziario costante è da ritenersi più vantaggiosa rispetto al secondo criterio ipotizzato ed analizzato in questa fase della ricerca.

Valutando i flussi di energia termica prelevata dalla rete di teleriscaldamento, immessa nella stessa ed accumulata nel serbatoio, si ottiene il bilancio globale del fabbisogno giornaliero nel giorno tipo invernale, di mezza stagione ed estivo (**Figura 7**).

In **Figura 8** è presentato il layout dell’utenza attiva, con i componenti e circuiti principali<sup>1</sup> necessari alla conversione in assetto smart.

La logica di controllo della nuova sottostazione attiva è sintetizzata nello schema di **Figura 9** che sottolinea la priorità del soddisfacimento del fabbisogno di acqua calda sanitaria, permettendo l’immissione nella rete di teleriscaldamento della sola quota parte in surplus.

Lo scambiatore di calore HX-TP consiste in uno scambiatore acqua/acqua con le caratteristiche descritte in **Tabella 3**.

Il diagramma di scambio termico in condizioni di design è presentato in **Figura 10**, mentre in **Figura 11** è presentata una vista d’insieme dello scambiatore aggiuntivo della nuova sottostazione.

<sup>1</sup> Si omette tutta la componentistica idraulica (filtri, valvole, vasi di espansione, ecc.) che sarà definita nel progetto esecutivo non obiettivo della presente attività di ricerca

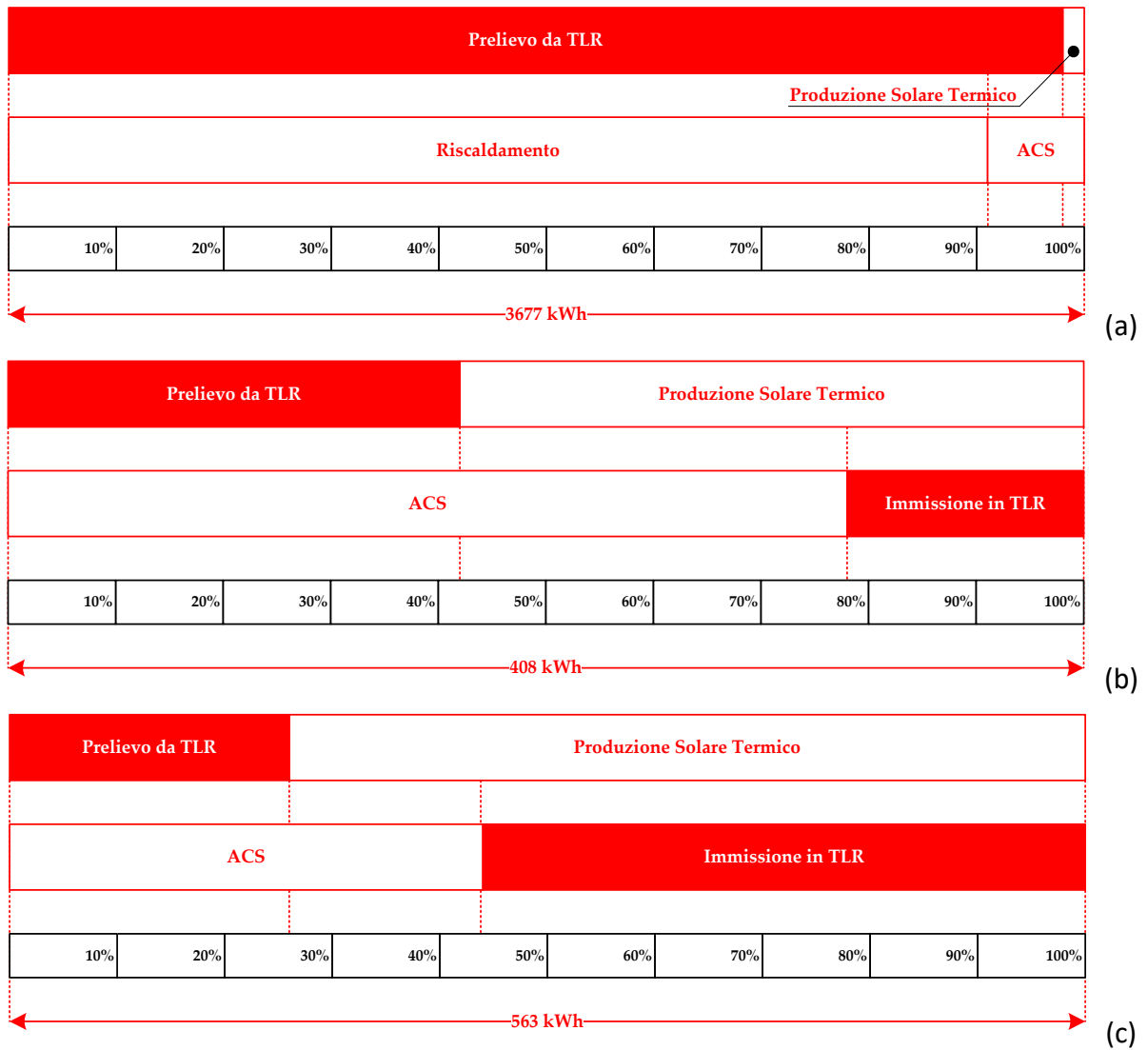


Figura 7 – Bilancio dell'energia termica in ingresso e in uscita dall'utenza ID #12 nel giorno tipo invernale (a), di mezza stagione (b) ed estivo (c)

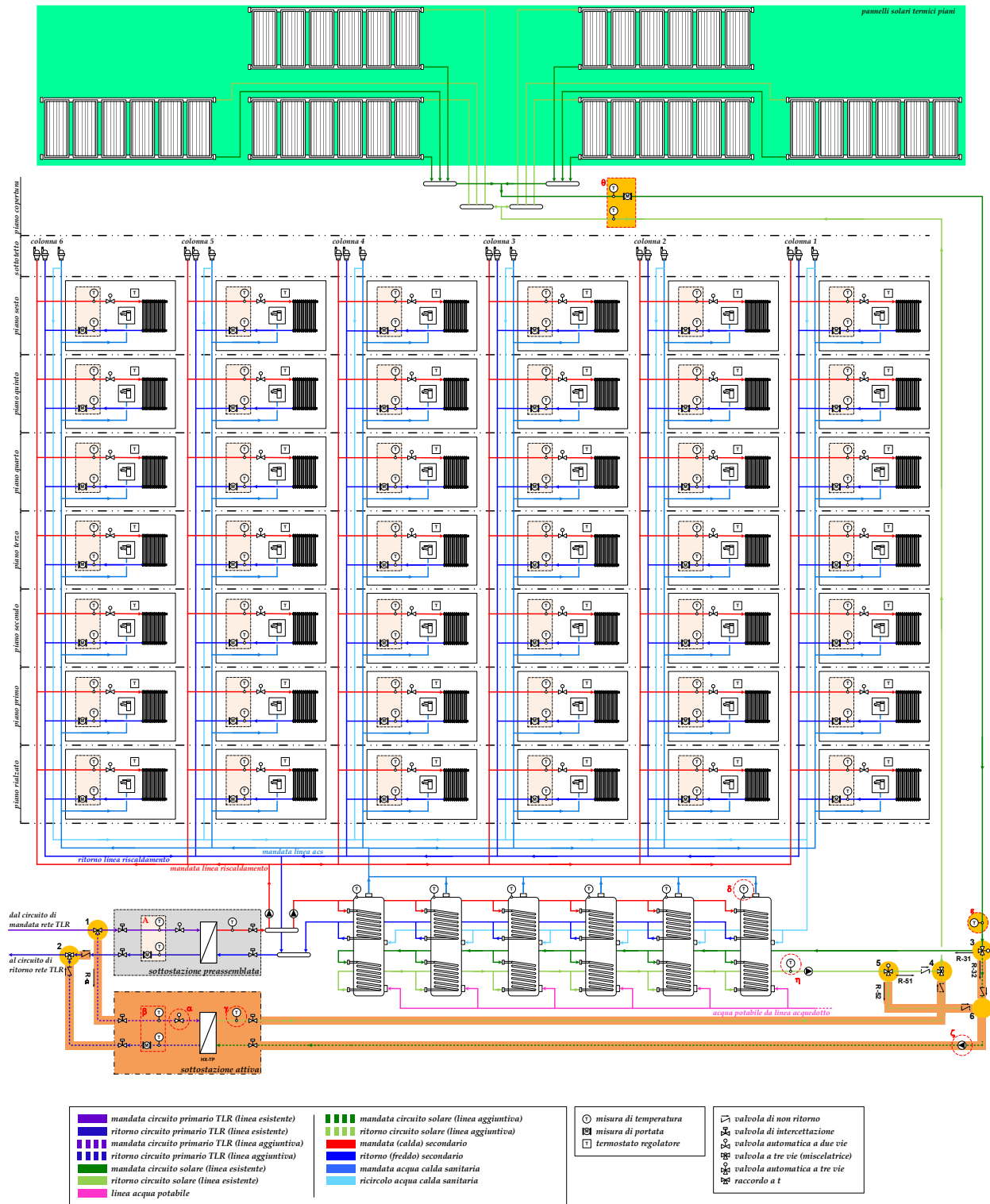


Figura 8 – Layout completo della sottostazione attiva

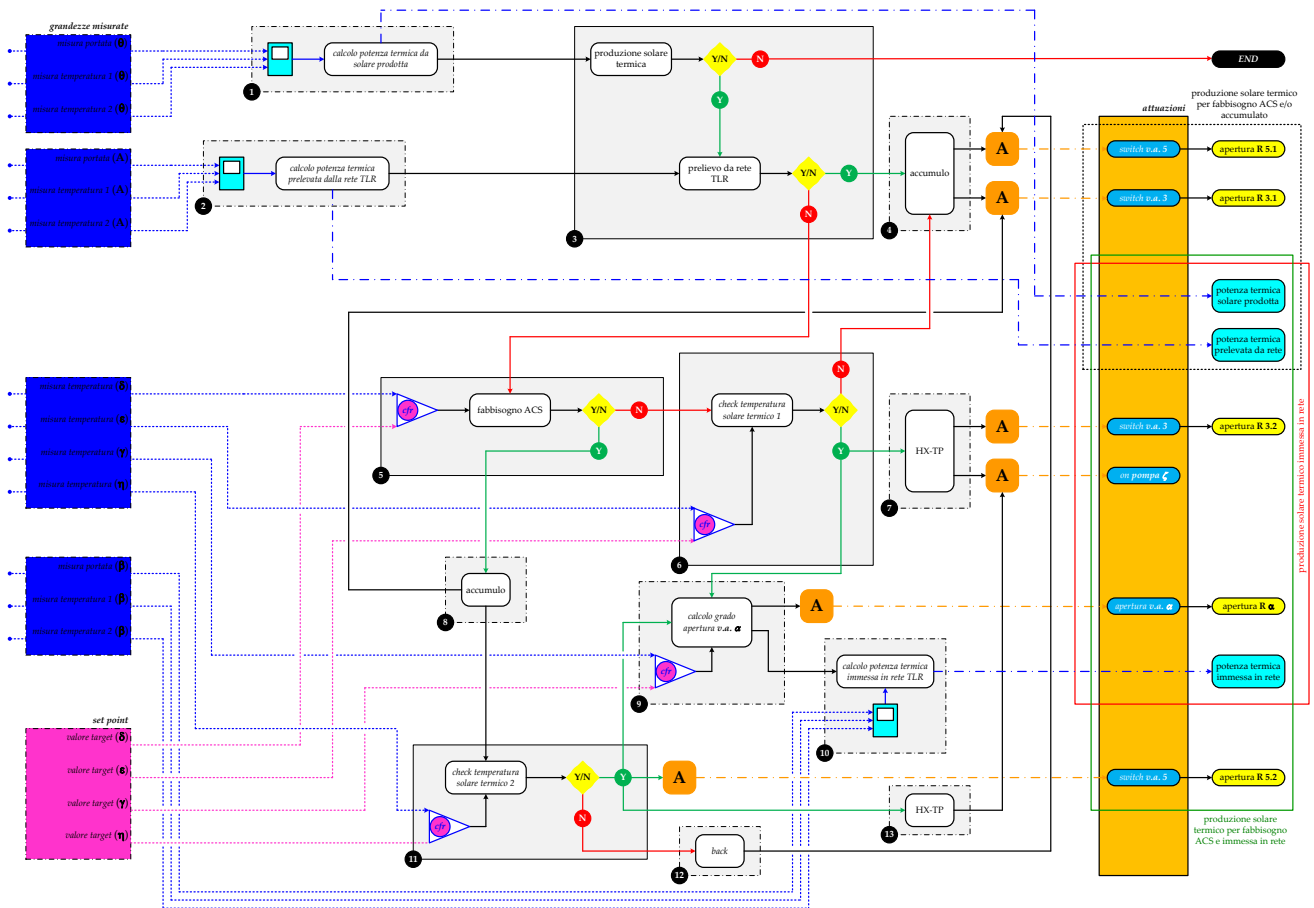


Figura 9 – Logica di controllo della sottostazione attiva

Tabella 3 – Caratteristiche dello scambiatore per la sottostazione attiva

	udm	valore
Potenza termica scambiata	[kW]	65
UA	[kW/K]	9.0
Portata in massa fluido freddo (circuito primario)	[kg/s]	1.55
Portata in massa fluido caldo (circuito terziario)	[kg/s]	1.03

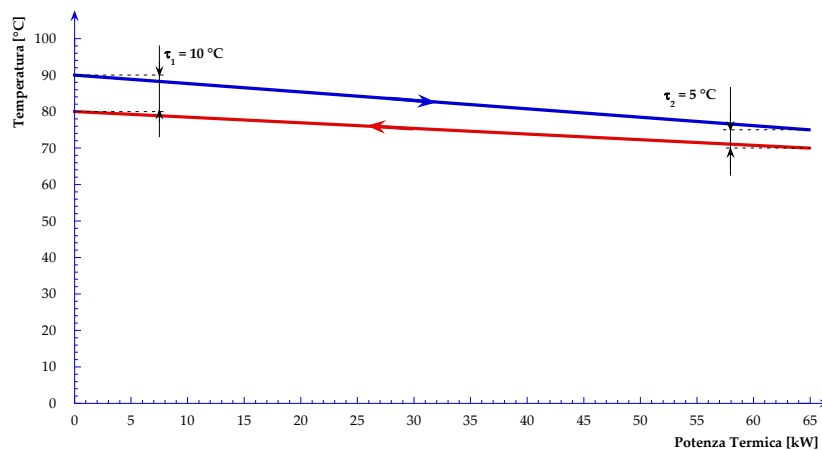


Figura 10 – Diagramma di scambio termico in condizioni di design del nuovo scambiatore della sottostazione attiva

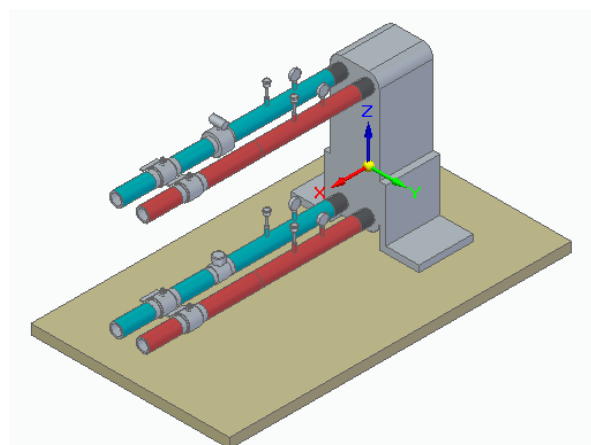
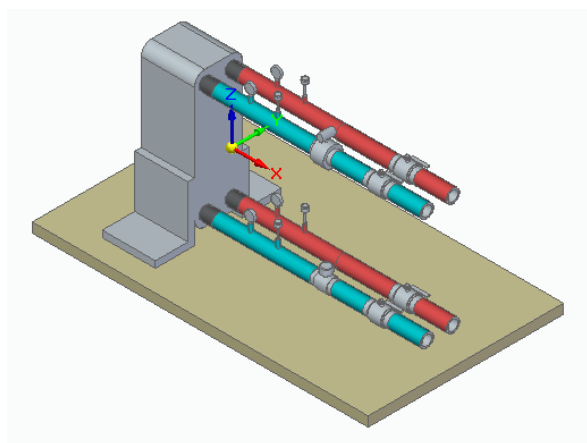
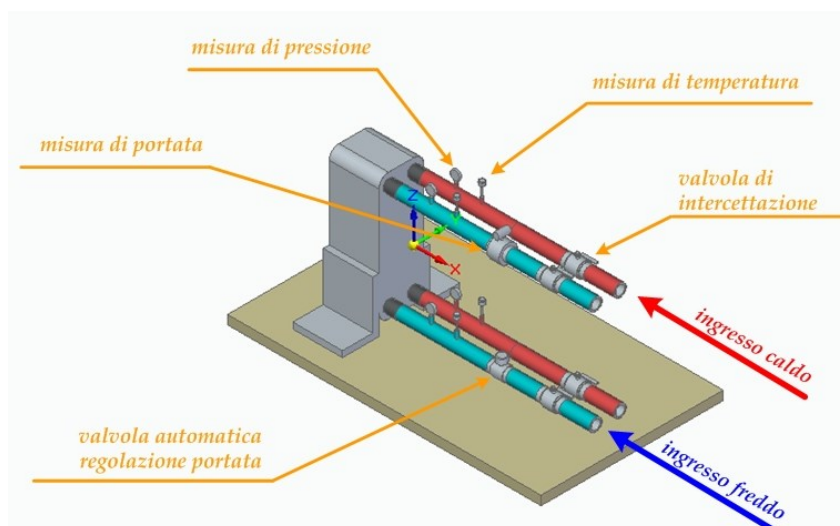


Figura 11 – Vista d'insieme dello scambiatore della nuova sottostazione di scambio termico

La conversione dell'utenza ID #12 da tradizionale ad attiva comporta una differente gestione dell'accumulo termico: se nell'assetto tradizionale il surplus di produzione termica dei pannelli solari può essere accumulato e sfruttato durante le ore di minor produzione e/o di maggior richiesta, con l'assetto smart il surplus di produzione può essere immesso direttamente nella rete di teleriscaldamento. Questo genera da parte dell'utenza in assetto smart la necessità di prelevare calore dalla rete di teleriscaldamento, non essendo più disponibile sufficiente energia termica nell'accumulo. A conferma di quanto appena affermato, è possibile osservare la [Figura 12](#) che riporta l'energia termica disponibile nell'accumulo nel caso di utenza tradizionale e smart rispettivamente per il giorno tipo di mezza stagione ed estivo.

L'assetto smart consente l'immissione in rete nell'arco di un anno di circa 30'000 kWh di energia termica (circa il 74% dei quali concentrati nel periodo estivo) a fronte di un incremento del prelievo dalla rete di poco meno di 21'000 kWh all'anno (circa il 70% nel periodo estivo).

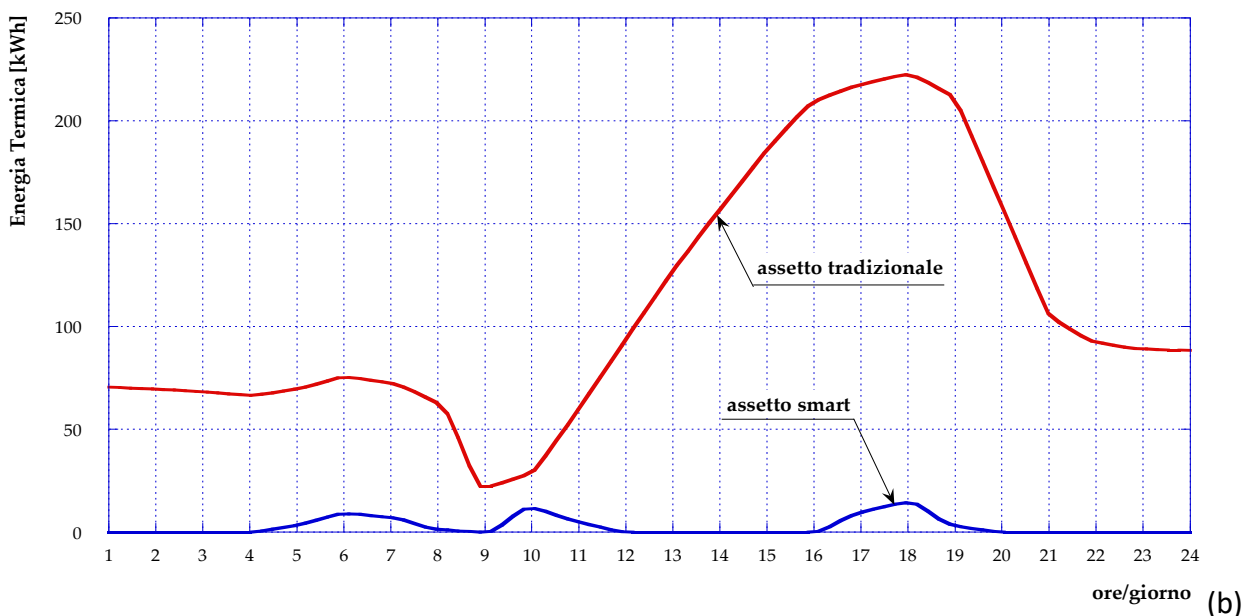
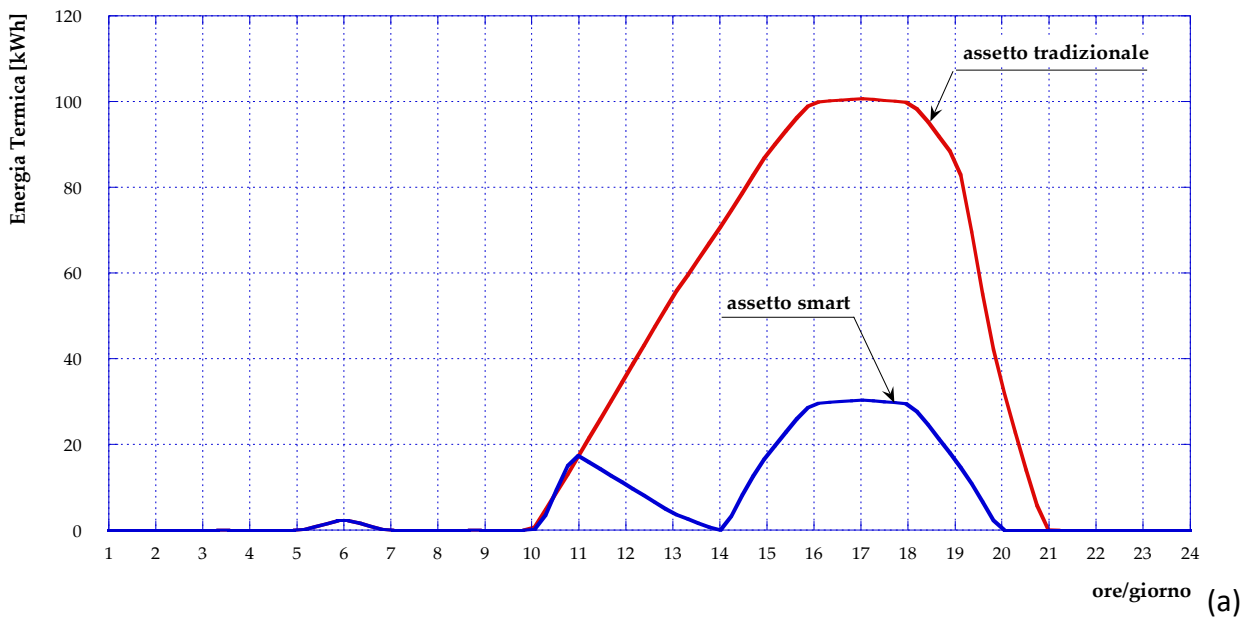


Figura 12 — Energia termica disponibile all'accumulo dell'utenza ID #12 nel giorno tipo di mezza stagione (a) ed estivo (b)

È stato tracciato uno scenario economico relativo al comportamento dell'utenza in assetto attivo al variare del rapporto tra il valore dell'energia termica venduta alla rete e il prezzo corrisposto per il prelievo dalla stessa.

Dalla **Figura 13** si osserva che, per rendere conveniente l'immissione in rete rispetto all'autoconsumo, occorre valorizzare l'energia termica ceduta alla rete almeno per un valore pari a circa il 70% del prezzo di acquisto. Si ottiene un bilanciamento economico per cui il ricavo per la vendita di energia termica alla rete compensa l'extra costo di acquisto causato dalla mancata disponibilità dell'accumulo: il guadagno dell'utenza nel diventare attiva sarebbe nullo.

Si prende in considerazione un'ulteriore condizione, denominata compensazione paritaria.

Indicando con  $E_{TH,TTN}$  e  $E_{TH,FTN}$  rispettivamente l'energia termica totale immessa e prelevata dalla rete da parte dell'utenza:

- se  $E_{TH,FTN} > E_{TH,TTN}$ , il costo sostenuto dall'utenza è pari a  $(E_{TH,FTN} - E_{TH,TTN}) \cdot \xi_{FTN}$ , con  $\xi_{FTN}$  [€/kWh] il costo dell'energia termica acquistata dalla rete;
- se  $E_{TH,TTN} > E_{TH,FTN}$ , il ricavo dell'utenza può essere calcolato come  $(E_{TH,TTN} - E_{TH,FTN}) \cdot \xi_{TTN}$ , con  $\xi_{TTN}$  il prezzo di vendita alla rete dell'energia termica immessa.

La compensazione paritaria attribuisce un valore economico specifico al termine minore tra l'energia termica immessa in rete e quella prelevata, ovvero all'energia termica scambiata (compensata) paritariamente ( $E_{TH,SP}$ ):

$$E_{TH,SP} = \min(E_{TH,TTN}; E_{TH,FTN})$$

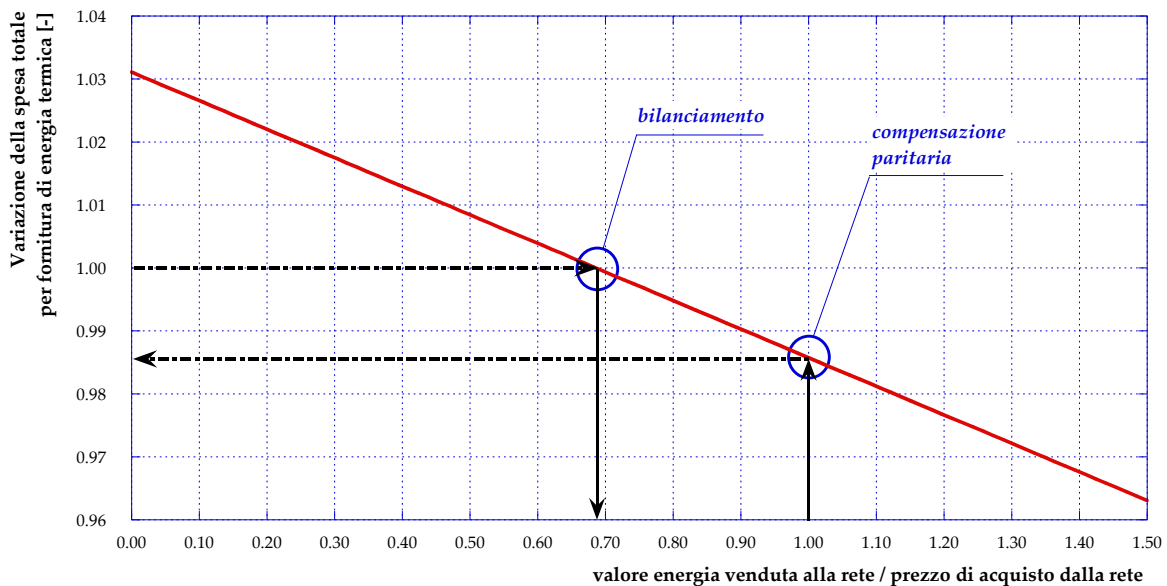


Figura 13 – Variazione della spesa annua per l'utenza ID #12 attiva al variare del rapporto tra il valore dell'energia termica immessa e prelevata

Il vantaggio fondamentale del modello tecnico economico implementato è quello di individuare un punto di trade-off che comporta la convenienza economica sia per l'utenza attiva (che in questo modo è favorita nell'immettere in rete il surplus di produzione) sia la centrale/gestore, che mantenendo il ruolo di interfaccia con le altre utenze (anche dal punto di vista della vendita di energia termica) non ha particolari svantaggi economici nel permettere la conversione in attiva di utenze servite dalla rete.

## 7.2 Studio e analisi comparativa di architetture di reti complesse dotate di utenti prosumer

Tale fase della ricerca è stata svolta definendo diverse configurazioni di reti complesse e valutandone comparativamente le prestazioni attraverso 3 KPI, così come di seguito definiti:

- a) l'indice di autoproduzione (AP): che rappresenta la percentuale del fabbisogno energetico (elettrico, termico, frigorifero o del combustibile) di un'utenza soddisfatto mediante sistemi di produzione decentralizzati presso l'utenza stessa;
- b) la quota rinnovabile (QR): ovvero la percentuale di fabbisogno energetico di un'utenza specifica soddisfatta mediante vettori energetici provenienti da fonte rinnovabile;

- c) l'Extra-Costo (EC): che esprime il rapporto tra il costo giornaliero sostenuto per il soddisfacimento del fabbisogno energetico e quello corrispondente di una configurazione della rete complessa assunta come riferimento.

I tre indici suddetti – calcolati automaticamente dal software ESATTO – sono esprimibili sia per ogni singola utenza che complessivamente per la rete complessa. Ovviamente AP e QR possono essere calcolati anche per un singolo vettore energetico, mentre EC viene valutato per la totalità dei fabbisogni.

In **Figura 14** sono riportati gli schemi di riferimento di tutte le configurazioni analizzate, che nel dettaglio sono:

- a) configurazione di riferimento: ogni utenza è connessa alla rete elettrica, termica, frigorifera e del combustibile per il soddisfacimento dei fabbisogni energetici; non sono previsti sistemi di produzione decentralizzati;
- b) configurazione standard: tutte le utenze sono connesse alla rete termica, del combustibile e a quella elettrica; non sono previsti sistemi di autoproduzione decentralizzati a meno dei sistemi frigoriferi a compressione per la copertura dei fabbisogni di energia frigorifera;
- c) configurazione attuale: è la configurazione attualmente rappresentata dalla rete di Torino; rispetto al caso precedente, alcune tra le utenze sono provviste di sistemi solari termici e accumulo senza possibilità di immissione in rete;
- d) configurazione U12 attiva: rispetto alla configurazione precedente è possibile – limitatamente all'utenza 12 – l'immissione di energia elettrica in rete;
- e) configurazione U12 attiva in regime di scambio sul posto (SSP): rispetto alla configurazione precedente cambia il regime tariffario per quanto riguarda lo scambio di energia con la rete termica, in analogia a quanto precedentemente visto per la compensazione paritaria;
- f) configurazione U12 attiva con potenza termica installata pari a 448 kW e 1275 kW: rispetto al caso precedente la potenza installata con solare termico è tale da consentire un QR termico del 100% solo durante l'estate (nel caso di 448 kW installati) o anche durante il periodo di mezza stagione (nel caso siano installati 1275 kW);
- g) tutto termico: in questo caso tutte le utenze sono connesse esclusivamente alla rete termica; presso ogni utenza è previsto un frigorifero ad assorbimento ed un generatore ORC per il soddisfacimento dei fabbisogni frigoriferi ed elettrici;
- h) tutto elettrico: in analogia al caso precedente, ogni utenza è connessa esclusivamente alla rete elettrica e provvede mediante sistemi frigoriferi a compressione e pompe di calore alla copertura dei fabbisogni frigoriferi e termici.

In **Figura 15** sono riportati i KPI per le configurazioni in oggetto; la configurazione tutto elettrico appare come la più vantaggiosa sotto tutti i punti di vista. Come già osservato, occorre però considerare che l'ipotesi tutto termico potrebbe risultare particolarmente vantaggiosa nel caso fosse disponibile calore di scarto e/o cascame termico industriale da poter recuperare e integrare nel mix produttivo.



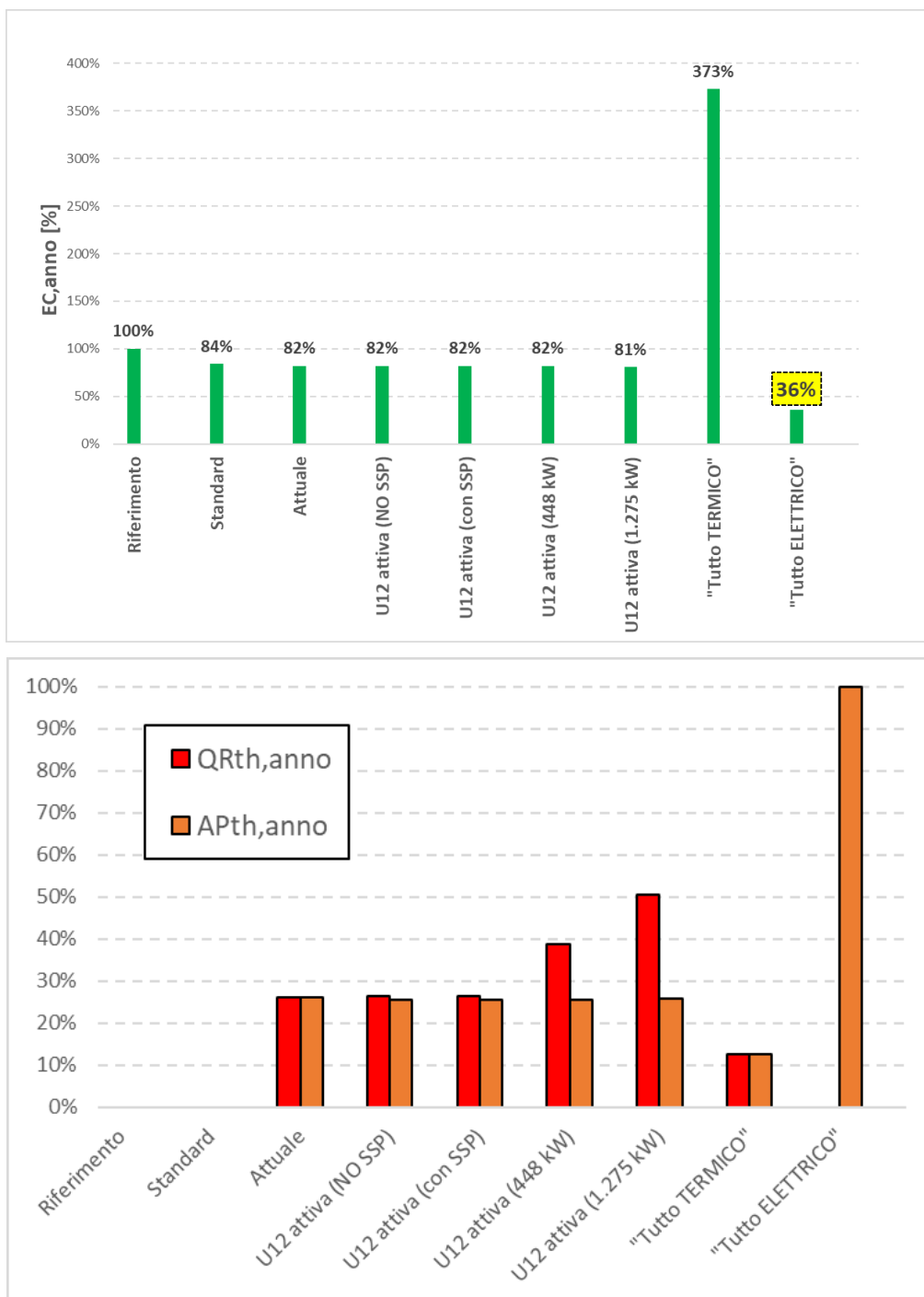


Figura 15 — Confronto tra le configurazioni analizzate in termini di KPI valutati su un anno di esercizio

### 7.3 Studio di una rete integrata con la produzione, trasporto e riconversione di idrogeno

L'integrazione di una rete complessa con una rete per la produzione, il trasporto e la riconversione di idrogeno è stata realizzata secondo lo schema in [Figura 16](#). In dettaglio, si è ipotizzato di installare tre cogeneratori ([Figura 17](#)), alimentati da idrogeno o da una miscela idrogeno/metano, rispettivamente nelle utenze #8, #15 e #25.

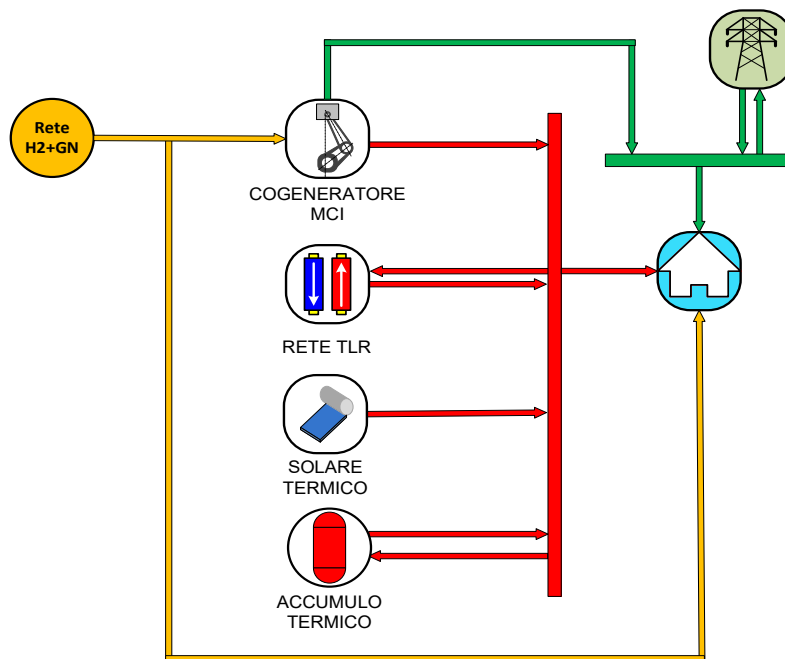


Figura 16 - Schema di riferimento di una rete complessa integrata con una rete di trasporto e riconversione di idrogeno blended

UTENZA	$P_{el,CG,max}$ [kW]	$ETA_{el,CG,max}$ [-]	$P_{th,CG,max}$ [kW]	$ETA_{th,CG,max}$ [-]
UTENZA #8	1.202	0,423	1.285	0,452
UTENZA #15	1.000	0,433	1.029	0,446
UTENZA #25	2.270	0,454	2.150	0,430

Figura 17 — Caratteristiche dei motori a combustione interna cogenerativi installati presso le utenze attive

I risultati, al variare della quantità di idrogeno miscelata con il gas naturale, sono riportati in **Figura 18** e in **Figura 19**. Nel caso, ad esempio, della configurazione 100% “green hydrogen”, la produzione dell’idrogeno immesso è ipotizzata fatta da un gruppo di elettrolizzatori all’interno della centrale termica. Per soddisfare la richiesta di combustibile della rete, necessitano un’alimentazione caratterizzata da una potenza elettrica di picco pari a circa 17 MW proveniente da fonti rinnovabili. Tuttavia, mettendo a confronto i risultati ottenuti con le configurazioni analizzate precedentemente, si può constatare che l’utilizzo dei cogeneratori alimentati da idrogeno (anche in miscela) permette di ottenere risultati migliori dal punto di vista della penetrazione di energia rinnovabile (**Figura 19**).

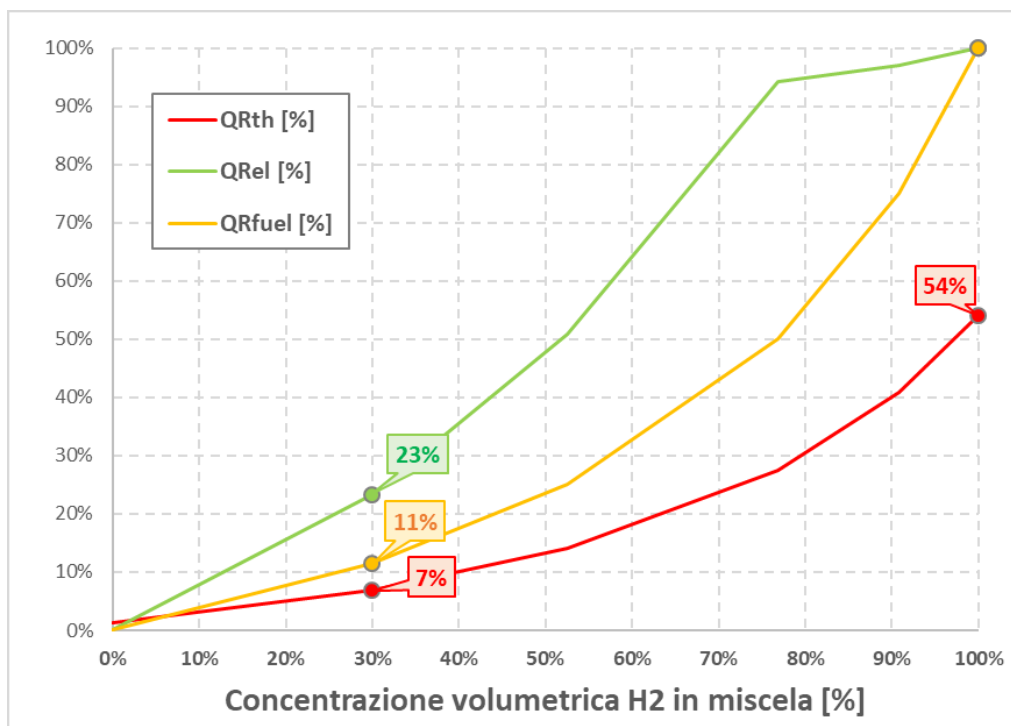


Figura 18 — Andamento degli indici di prestazione ambientale al variare della concentrazione volumetrica di idrogeno in miscela

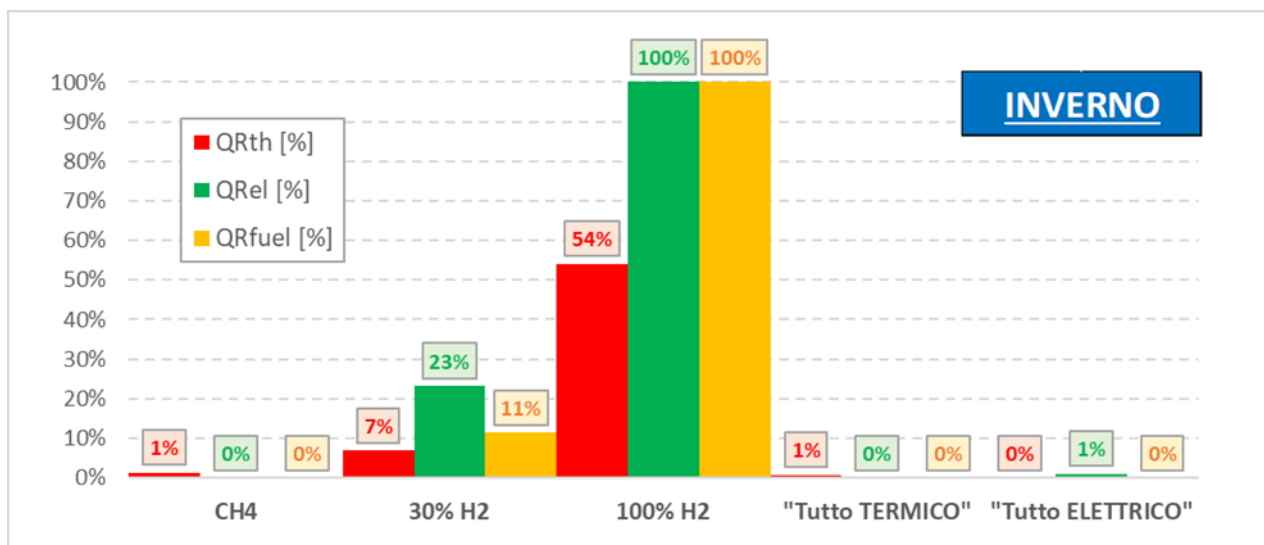


Figura 19 — Confronto delle prestazioni ambientali durante la stagione invernale per diverse configurazioni

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno della LA3.16 il capitolato vigente non prevede consulenze, né sono state utilizzate nel corso dello svolgimento della LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

Dattilo, A., Melino, F., Ricci, M., Sdringola, P., “Optimizing Thermal Energy Sharing in Smart District Heating Networks”, *Energies*, 2024, 17(12), 2936, <https://doi.org/10.3390/en17122936>

## 10 Eventi di disseminazione

- 21/11/2024. *Giornata di studio sugli SMART ENERGY SYSTEMS - La ricerca per Sistemi Energetici integrati, sostenibili, sicuri e resilienti promossa dall'AIMSEA*. Presentazione dei risultati conseguiti nell'ambito di una giornata studio promossa dall'associazione dei docenti di Macchine e Sistemi Energetici Italiani. Parma.
- 27/11/2024. *Convegno di presentazione dei risultati conseguiti, in collaborazione con vari partner universitari, nell'ambito del Work Package 3 del Progetto 1.5 Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica, Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema Elettrico Nazionale*. Roma. Intervento dal titolo "Sviluppo di sottostazioni bidirezionali e reti termiche smart", F. Melino.