Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

Ministero della Transizione Ecologica

Ricerca di Sistema elettrico

Analisi ed applicazione delle nuove tecnologie di gestione dei dati di misura nelle reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento

M. Dell'Isola, G. Ficco, L. Canale, M. De Monaco

RdS/PTR2021/129

ANALISI ED APPLICAZIONE DELLE TECNOLOGIE IOT PER LA CONSAPEVOLEZZA DEI CONSUMI NEGLI EDIFICI INTELLIGENTI

Marco Dell'Isola, Giorgio Ficco, Laura Canale, Marianna De Monaco
DICEM, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica
Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale

Con la collaborazione di: Buonanno Giorgio, Arpinio Fausto, Satbile Luca (DICEM Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità
Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*
Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*
Work package: *3 - Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici*
Linea di attività: *3.6 - Analisi ed applicazione delle nuove tecnologie di gestione dei dati di misura nelle reti di teleriscaldamento/teleraffrescamento*
Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Biagio Di Pietra, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Analisi delle tecnologie IoT abilitanti per la gestione dei consumi energetici"*

Responsabile scientifico ENEA: ing Biagio Di Pietra

Responsabile scientifico Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale: Prof. Marco Dell'Isola

Indice

Indice delle Tabelle

Indice delle Figure

Sommario

Il presente rapporto dal titolo "*Analisi ed applicazione delle nuove tecnologie di gestione dei dati di misura nelle reti di teleriscaldamento/teleraffrescamento*" descrive le attività di ricerca svolte ed i risultati ottenuti nell'ambito dall'accordo di collaborazione tra ENEA e DICEM (Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica) dell'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale.

In particolare:

- sono stati analizzati i metodi di previsione dei consumi di energia (termica o gas) nei tre paesi UE che presentano i maggiori consumi di gas naturale (i.e. Italia, Germania e Gran Bretagna) con l'obiettivo di valutare l'accuratezza della previsione dei consumi al fine di prevedere in modo efficace il consumo energetico di un parco immobiliare a scala urbana. A questo scopo: i) i metodi italiano, tedesco ed inglese sono stati sperimentati per la previsione dei consumi di gas naturale in una rete di distribuzione nel Sud Italia; ii) i metodi italiano e tedesco sono stati sperimentati per la previsione dei consumi di gas naturale per due edifici caso di studio di edilizia residenziale pubblica;
- è stato effettuato uno studio della tecnologia blockchain e delle esperienze condotte in ambito internazionale nel settore energetico al fine di valutare l'applicabilità della suddetta tecnologia nelle reti di teleriscaldamento;
- è stata progettata una piattaforma blockchain privata basata su Ethereum per il trading di energia termica in una micro-rete residenziale; mediante la blockchain progettata è stata simulata la compravendita di energia termica rinnovabile autoprodotta senza la necessità di intermediazione di una terza parte (e.g. il distributore o il rivenditore di energia termica) in un contesto residenziale.

1 Introduzione

Le tecnologie IoT consentono interessanti ed innovative applicazioni nella gestione dei dati di misura nelle reti energetiche ed in particolare: i) le tecnologie “data-driven” per la stima in tempo reale e la previsione dei consumi medi e di picco ai fini del bilanciamento energetico delle reti; ii) le tecnologie blockchain applicate alle transazioni energetiche dirette tra utenti.

La stima, la previsione e la profilazione della domanda e del consumo di energia sono strumenti fondamentali per la gestione ed il bilanciamento delle reti. Esse rappresentano infatti un problema chiave in numerosi contesti, come la pianificazione di strategie di retrofit e produzione di energia, la riduzione delle emissioni di CO2, l’allocazione della capacità, la stima dei prezzi, la continuità dell'offerta, la stima delle perdite. In molti paesi UE la maggioranza degli utenti finali è rappresentata da piccole utenze residenziali e commerciali. Ad eccezione dei consumi di energia elettrica, il loro consumo è solitamente misurato solo poche volte l'anno, nonostante il Terzo pacchetto energetico imponga agli Stati membri di garantire l'attuazione di sistemi di misurazione intelligenti per tutti gli utenti finali. Inoltre, i modelli per la previsione e la stima dei consumi energetici possono essere strumenti utili anche nel caso di guasti dei sistemi di misura e trasmissione.

La “blockchain” può essere definita come un database distribuito che sfrutta la tecnologia “peer-to-peer” consentendo a qualsiasi utente della rete di prelevare dati dal web, diventando così essi stessi nodi della rete. Il database diventa un libro contabile “aperto” e controllabile da tutti gli utenti eliminando, quindi, la necessità di costose intermediazioni centrali amministrative e finanziarie. L’identità digitale degli utenti viene generalmente garantita attraverso un software di crittografia. Il database si aggiorna automaticamente su ciascuno dei nodi che partecipano alla rete e tutte le transazioni sono confermate dai nodi stessi senza l’intervento di nessuna autorità centrale. Questi strumenti rendono quindi possibile non solo l’instaurazione di un rapporto contrattuale peer-to-peer (smart contract), ma anche la sua automatica esecuzione senza la necessità di un intermediario che convalidi le transazioni.

Attraverso le transazioni energetiche dirette tra utenti, le Blockchain offrono l'opportunità della fatturazione automatica dei servizi energetici, fornendo tracciabilità e trasparenza dell'energia prodotta e consumata e informazioni puntuali ai consumatori su origine e costo dell’approvvigionamento, incentivando i cambiamenti comportamentali. Le reti possono quindi evolvere verso un sistema di microreti interagenti tra loro per compensare in tempo reale la sovrabbondanza o l’eccessiva richiesta di energia. A differenza delle reti tradizionali (dove il privato compra da un operatore centrale di grandi dimensioni), tali reti funzionano in autonomia e il rapporto alla pari tra i nodi della rete consente di abbassare i costi e di ottimizzare la risorsa energia, ad esempio riducendo le perdite di trasporto e distribuzione. L’uso di “contratti intelligenti” e l'esecuzione automatizzata delle transazioni possono consentire, infine, pagamenti per acqua, gas ed energia elettrica e termica in tempo reale.

2 Studio di modelli per la previsione dei consumi di energia termica nel settore residenziale

In questo paragrafo viene affrontato il problema della misurazione e della profilazione dei consumi energetici delle utenze domestiche con particolare riferimento alle regole e agli strumenti di modellazione attualmente impiegati nelle reti di distribuzione del gas naturale, poiché questi hanno mostrato un elevato potenziale di accuratezza sebbene utilizzino semplici modelli "regression-based" basati su pochi dati in ingresso facilmente recuperabili.

In particolare, a valle dell'analisi dello stato dell'arte riguardante le tecniche di profilazione dei consumi di energia termica applicati a stock edilizi urbani, sono descritti i metodi di previsione del consumo di gas naturale attualmente utilizzati nei tre paesi in cui il consumo di gas naturale è maggiore in Europa (i.e. Italia, Germania, Inghilterra).

Le suddette metodologie sono state applicate a due diversi casi di studio al fine di determinare le prestazioni su due diverse scale: i) *scala urbana* (stock edilizio), in cui il caso di studio è rappresentato da una rete urbana di distribuzione del gas naturale situata nel sud Italia; ii) *scala edificio*, in cui il caso di studio è rappresentato da due edifici residenziali di edilizia sociale nel centro Italia.

2.1 Quadro regolatorio sulla previsione dei consumi nelle reti di gas naturale

Con la liberalizzazione del mercato europeo (UE) del Gas Naturale (GN) (prima Direttiva Gas [1]), l'organizzazione e la gestione del mercato del gas è radicalmente cambiata e la sua riforma è tutt'ora in corso (Figura 1).

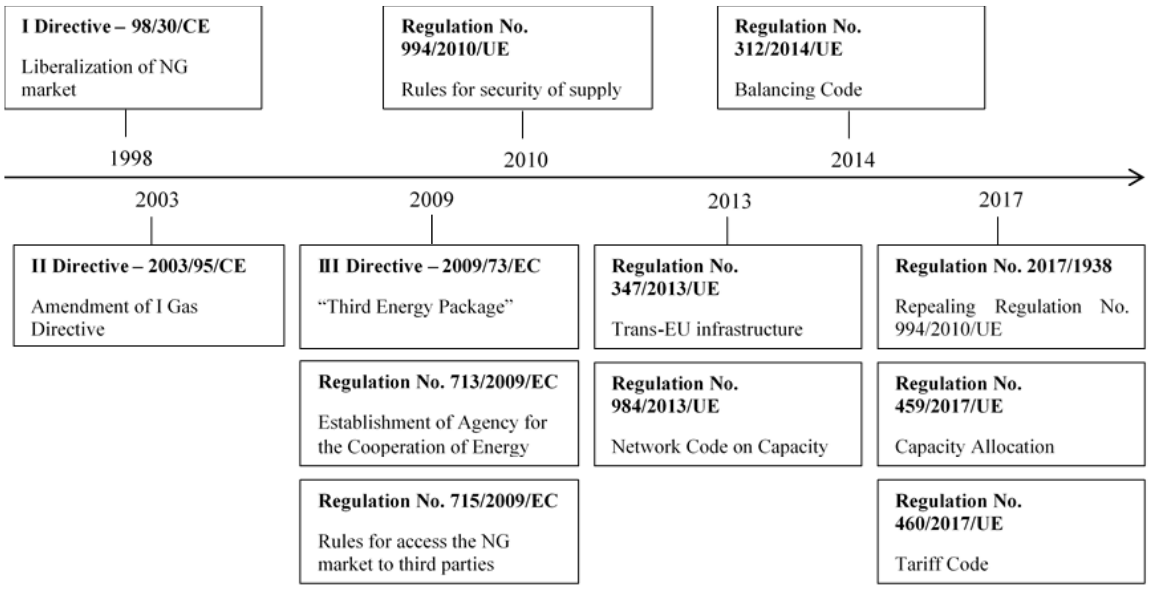


Figura 1 - Evoluzione normativa del mercato del gas naturale in Europa

Nel mercato competitivo del gas, molti attori diversi – come gli shipper, le compagnie di trasporto del gas (Transmission System Operators, TSO), le società di distribuzione (Distribution System Operators, DSO) – devono essere adeguatamente coordinati per garantire la sicurezza e l'efficienza della rete del gas naturale (NG). Nonostante l'obbiettivo comune fissato dagli Stati membri (SM) di realizzare un mercato unico comune, il mercato del gas dell'UE è infatti costituito ds un sistema di piccole reti nazionali o addirittura locali.

Muovendosi verso una maggiore integrazione del mercato, con il Regolamento della Commissione UE n. 312/2014 [2], sono state stabilite norme sul bilanciamento del gas nelle reti di trasporto, al fine di facilitare gli scambi di gas tra le zone di bilanciamento e garantire una corretta attività di bilanciamento oltre i confini dell'UE.

Il bilanciamento rappresenta, in particolare, lo strumento che il TSO utilizza per garantire il funzionamento della rete entro determinati limiti di pressione e per raggiungere una posizione di line pack di fine giornata che consenta alla rete di trasporto di operare in modo economico ed efficiente. Eseguendo il bilanciamento della rete, in particolare, i TSO garantiscono l'equilibrio nel tempo tra entrate e prelievi di NG. Ciò è essenziale per il funzionamento della rete e per garantire la sicurezza del sistema e la continuità degli approvvigionamenti.

Ogni utente della rete ha il proprio portafoglio di bilanciamento, ovvero un'equazione di bilanciamento il cui risultato è lo squilibrio dell'utente per un determinato giorno gas. Ogni giorno gas gli utenti della rete sono tenuti a effettuare una previsione dei prelievi per il giorno gas successivo al fine di garantire il raggiungimento di una posizione neutra (bilanciata) a fine giornata. Una posizione di sbilanciamento comporta anche un compenso economico da corrispondere. Tale obbligo richiede la definizione di adeguati modelli di stima della domanda per gli utenti finali.

Nei Paesi UE la stragrande maggioranza degli utenti finali è rappresentata da piccole utenze residenziali e commerciali in cui il gas naturale viene prevalentemente utilizzato per finalità di riscaldamento, cottura, produzione di acqua calda e raffrescamento [3]. Il loro consumo viene solitamente misurato solo poche volte l'anno e per questo sono identificati come consumatori Non Daily Metered (NDM). Infatti, nonostante il Terzo Pacchetto Energia [4,5] imponga agli Stati membri di garantire l'implementazione di sistemi di smart metering per tutti gli utenti finali, tale obbligo è subordinato a una valutazione economica positiva dell'analisi costi-benefici a lungo termine e non è ancora stato definito uno specifico programma di attuazione dello smart metering nel settore del gas in tutti i gli stati UE [6].

In questo contesto, solo cinque Stati membri UE (Irlanda, Italia, Lussemburgo, Paesi Bassi e Regno Unito), hanno deciso di realizzare il rollout dei contatori intelligenti nel settore del gas per consentire una misurazione giornaliera degli utenti finali, mentre dodici non procederanno con l'implementazione degli smart gas meter, in quanto i risultati dell'analisi costi-benefici sono stati negativi. In questo contesto, la stima, la previsione e la profilazione della domanda e dei consumi energetici sia a scala urbana che a scala più ampia (quartieri, città, reti energetiche ecc.) sono, innegabilmente, strumenti fondamentali per la gestione delle reti energetiche. Queste rappresentano infatti una tematica fondamentale in numerosi contesti, quali: la pianificazione di strategie di retrofit edilizio e della produzione di energia, la riduzione delle emissioni di CO_2, l'allocazione della capacità, la stima dei prezzi, la continuità dell'approvvigionamento, la stima del gas non contabilizzato etc.

La profilazione dei consumi rappresenta, tra l'altro, un problema non solo nelle reti di gas naturale, ma anche nelle reti di teleriscaldamento e teleraffrescamento, nei casi in cui il calore è misurato solo a livello di edificio e l'energia erogata deve poi essere suddivisa in riscaldamento e consumo di acqua calda, oppure ripartito tra i singoli inquilini. I modelli di previsione e stima dei consumi energetici trovano applicazione come strumenti utili anche per negli stock edilizi in cui siano installati sistemi di metering delle utenze (incluse le piccole utenze NDM), nel caso in cui occorra ricostruire i carichi di consumo energetico a valle di guasti ai sistemi di misura o di trasmissione.

I metodi descritti nella letteratura scientifica per profilare il consumo energetico degli edifici a scala urbana appartengono a diverse categorie: i cosiddetti modelli ingegneristici "bottom-up", con i quali si ricostruisce il consumo energetico stimando i consumi energetici degli edifici di un'area selezionata attraverso equazioni

basate sulla termofisica dell'edificio e le caratteristiche dell'impianto, e modelli "top-down", che tipicamente stimano il consumo energetico aggregato di un patrimonio edilizio stabilendo una relazione tra l'uso di energia e diversi driver (parametri economici, climatici, sociali etc.) [7].

All'interno dei modelli top-down, gli approcci data-driven partono da dati di consumo energetico reale provenienti da distretti o città equipaggiate in una certa misura di smart meter, e mediante specifiche tecniche (algoritmi di machine learning, metodi di regressione ecc.) effettuano previsioni "apprendendo" dai dati storici [8,9]. Questi ultimi richiedono solitamente l'utilizzo di un'enorme quantità di dati (i.e. tipicamente dati provenienti dagli smart meter) durante la fase di "apprendimento" degli algoritmi, che ovviamente non sono sempre disponibili per i clienti NDM.

Nel prosieguo, saranno descritte le metodologie per la profilazione degli utenti residenziali applicate nelle reti di gas naturale ai fini del bilanciamento della rete, poiché queste mostrano un alto potenziale per la realizzazione di previsioni accurate utilizzando una modellistica semplificata e dati in ingresso (tipicamente climatici) di facile reperibilità.

2.2 Profilazione dei consumi nelle reti di Gas Naturale

Esistono diversi metodi per modellare il consumo di gas nelle reti di gas naturale con finalità di gestione generale della rete, tra i quali: i) modelli di regressione [10,11]; ii) modelli auto-regressivi integrati a media mobile o autoregressivi che includono variabili esogene [12,13]; iii) reti neurali [14,15]; e iv) modelli additivi generalizzati [16,17]. In [17] sono stati analizzati gli approcci utilizzati dai ricercatori sul tema della previsione dei consumi di gas naturale, con una classificazione in base a: i) l'area di previsione (mondiale, nazionale, consumatore individuale), ii) l'orizzonte di previsione (orario, giornaliero, mensile), iii) le misure dei dati gas utilizzati e iv) il modello applicato.

In merito alla stima e alla profilazione dei consumi degli utenti NDM (i.e., utenti i cui consumi non sono misurati giornalmente, ovvero non dotati di smart gas meter) i modelli basati sulle tecniche di regressione sono considerati maggiormente "trasparenti" rispetto alle altre metodologie. Questa considerazione assume maggiore rilievo considerando che l'interesse verso queste metodologie riguarda spesso enti regolatori e aziende che operano nel settore della fornitura di energia, per i quali la trasparenza del modello è una caratteristica imprescindibile [18]. Infatti, gli enti che si occupano della regolamentazione del settore, nonché i responsabili della gestione delle reti di distribuzione, sono tenuti a garantire la continuità del servizio agli utenti scongiurando il rischio di interruzioni non programmate, effettuando delle previsioni quanto più possibile accurate disponendo di un numero limitato di dati utili allo scopo.

In Europa vengono utilizzati modelli semplici a parametri concentrati per stimare i consumi di gas per la previsione dei consumi di gas naturale dei clienti NDM. Questi modelli rappresentano una sorta di ibridazione tra gli approcci modellativi precedentemente definiti "bottom-up" e "data-driven" (talvolta indicato in letteratura anche come "statistico bottom-up" [19]). Questi modelli sono generalmente utilizzati ai fini dell'allocazione dei consumi nel bilancio energetico della rete di gas naturale ed effettuano stime e previsioni dei consumi energetici in un determinato periodo (mese, anno ecc.) utilizzando tre semplici informazioni:

- il consumo di energia in un periodo casuale ricompreso tra due letture,
- le variabili climatiche (temperatura esterna, velocità del vento, temperatura dei giorni precedenti ecc.)
- profili di carico standard (Standard Load Profile, SLP) ottenuti da campioni di utenti letti di frequente (frequenza giornaliera/infragiornaliera) raggruppati per categoria di utilizzo finale.

Gli SLP sono costruiti in modo abbastanza diverso tra i vari Paesi europei, poiché la metodologia di calcolo deve adattarsi alle caratteristiche dei particolari parchi edilizi e alle peculiarità dei diversi consumatori, che dipendono tra l'altro da numerosi aspetti economici e culturali, oltre che dalle condizioni climatiche tipiche.

Nell'attuale contesto normativo europeo sono state individuate due metodologie principali per lo sviluppo di SPL:

- Regressioni lineari, esponenziali e polinomiali, che utilizzano variabili legate al clima e particolari variabili "dummy" per tenere conto degli effetti dei weekend, delle festività natalizie etc. (questi modelli sono ad esempio utilizzati per la stima del consumo di utenti NDM per i mercati del gas irlandese [10], inglese [11] e italiano [20]);
- Funzioni "sigmoidee", ovvero funzioni caratterizzate da una tipica forma simile ad una "S" che ben si adattano al comportamento dei consumi di gas naturale rispetto alle condizioni climatiche (i consumi sono maggiori in corrispondenza delle basse temperature e tendono a decrescere con l'aumentare di queste ultime fino a stabilizzarsi ad un valore pressoché costante in corrispondenza di una temperatura di soglia [21]).

In [21] gli autori, dopo aver realizzato un confronto tra i modelli lineare, parabolico esponenziale e sigmoideo applicati su un singolo utente, hanno osservato che il modello sigmoideo rappresenta la metodologia migliore per l'allocazione dei consumi sulla rete di distribuzione del gas Slovena. Tuttavia, gli autori sottolineano la necessità di intraprendere uno studio sistematico con l'obbiettivo di confrontare le prestazioni di diverse metodologie di previsione dei consumi degli utenti NDM in diversi paesi e condizioni climatiche.

Nei prossimi paragrafi, sono descritte e analizzate tre metodologie attualmente adottate in EU per l'allocazione dei consumi degli utenti NDM, in assenza di frequenti letture del contatore. In particolare, le metodologie analizzate sono quelle attualmente applicate in Germania, Regno Unito e Italia che sono i tre maggiori consumatori di gas naturale in Europa e che sono stati quindi ritenuti rappresentativi dello stato dell'arte tecnico e regolatorio di questa problematica.

Nei tre metodi viene sempre assegnata ad ognuno degli utenti per i quali è necessario procedere alla stima dei consumi (utente NDM) una categoria che identifica l'uso del gas naturale (e.g. riscaldamento, cottura, , acqua calda sanitaria, processo, etc.) o la fascia di consumo (in volumi o energia l'anno) [10,20,22–24]. La stima del consumo annuo (NDM_{AC}) e giornaliero (NDM_{DC}) di ciascun utente NDM viene quindi ottenuta attraverso le equazioni (1) e (2).

$$NDM_{DC} = CV \cdot SLP_k \cdot CF_k \tag{1}$$

$$NDM_{AC} = CV \cdot \sum_{k=1}^{365} SLP_k \cdot CF_k \tag{2}$$

dove CF_k è un fattore di correzione per le condizioni climatiche, giorno della settimana, festività etc., SLP_k è il profilo di prelievo standard associato al giorno k-esimo definito dalla regolamentazione nazionale, CV rappresenta il cosiddetto "Customer Value", che è una misura dell'"ampiezza" del profilo di carico dell'utente (è un parametro indicatore del prelievo annuo, maggiore è il CV, maggiore sarà il consumo medio annuo associato all'utente) che è a sua volta direttamente collegato alle letture del contatore dell'utente in un periodo di riferimento (lettura al giorno 1, L_1, e lettura al giorno n, L_n) , attraverso l'equazione (3).

$$CV = \frac{L_n - L_1}{\sum_{k=1}^{n} SLP_k} \tag{3}$$

I tre metodi analizzati, sebbene presentino evidenti analogie, differiscono nella definizione dei profili di prelievo, nonché nella scelta delle variabili climatiche di riferimento (Tabella 1).

Di seguito vengono forniti maggiori dettagli sulle singole metodologie. A causa di un accordo di non divulgazione tra l'ente che definisce i profili di prelievo e gli operatori di rete, non è stato possibile acquisire i coefficienti di regressione utilizzati per le stime nel Regno Unito. Pertanto, è stato sviluppato dagli autori un profilo specifico per il caso italiano dei clienti residenziali della rete sulla base della metodologia del Regno Unito.

Tabella 1 - Categorie d'uso dei metodi analizzati

Italia (IT)	**SLP**	I profili sono definiti attraverso un'equazione specifica, i cui parametri sono fissati dall'Autorità Nazionale in funzione del clima, della tipologia di cliente ecc.
	Clima	Non ci sono variabili climatiche in forma esplicita nell'equazione. Le condizioni climatiche sono tuttavia prese in considerazione nei parametri dell'equazione che sono definiti dalla zona climatica in cui la rete è collocata.
Gran Bretagna (UK)	**SLP**	I profili di prelievo sono definiti come percentuale della domanda normale stagionale media. La gestione delle condizioni stagionali viene realizzata attraverso l'introduzione di cut-off in corrispondenza dell'accensione e dello spegnimento degli impianti di riscaldamento. Gli SLP vengono definiti e aggiornati da un ente terzo sulla base di campionamenti effettuati su utenti dotati di smart meter.
	Clima	Viene definita una variabile climatica composta allo scopo di linearizzare i consumi giornalieri degli utenti NDM. I dati climatici a tale scopo sono la temperatura ambiente e la velocità del vento.
Germania (DE)	**SLP**	Sono disponibili due differenti tipi profili sigmoidei entrambi dipendenti dalla temperatura e da una serie di parametri additivi che consentono di tenere conto della produzione di acqua calda sanitaria.
	Clima	Viene definita una "temperatura di allocazione" calcolata come serie geometrica delle temperature del giorno a cui si riferiscono i consumi e dei due giorni precedenti. Ciò consente di tenere conto dell'inerzia termica degli edifici, nonché di un effetto comportamentale che determina un ritardo nella reazione degli utenti alle variazioni della temperatura.

2.2.1 Metodo italiano

In Italia, le modalità di profilazione applicate agli utenti non teleletti vengono stabilite da ARERA, in un apposito regolamento per condurre il bilanciamento delle reti di trasporto e distribuzione del gas naturale [20]. Per una prima categorizzazione degli utenti, la regolamentazione italiana applica una classificazione (basata sulla serie di Rénard) dei misuratori installati sulla base delle portate nominali che vanno da 1.6 m^3/h (G1.6) a 6500 m^3/h (G6500) [25]:

- I misuratori del gas tipicamente installati in corrispondenza dei piccoli utenti tecnologici e degli utenti residenziali (utenti NDM) appartengono alle categorie G4 e G6 (con portate nominali, rispettivamente, pari a 4 m^3/h e 6 m^3/h).
- Gli utenti industriali, in funzione dei consumi annui, rientrano principalmente in classi maggiori a partire dalla G10 (portata nominale 10 m^3/h) e sono tipicamente dotati di smart meter che consentono la telelettura. Allo scopo di differenziare i profili di prelievo degli utenti NDM, questi vengono categorizzati in funzione dell'utilizzo fatto del gas naturale (vedi Tabella **2**).

Tabella 2– Categorie d'uso definite nella metodologia italiana

Codice	Descrizione	Componente termica
C1	Riscaldamento	Si
C2	Uso cottura cibi e/o produzione di acqua calda sanitaria	No
C3	Riscaldamento, uso cottura e/o produzione di acqua calda sanitaria	Si
C4	Uso condizionamento	No
C5	Uso condizionamento e riscaldamento	Si
T1	Uso tecnologico (artigianale e industriale)	No
T2	Uso tecnologico e riscaldamento	Si

Inoltre, in funzione del numero di giorni settimanali in cui si richiede di disporre del servizio, (differenziazione necessaria principalmente per le attività commerciali e industriali che prevedono giorni di chiusura), gli utenti vengono ulteriormente suddivisi in classi di prelievo descritte in Tabella 3.

Tabella 3 – Classi di prelievo definite nella metodologia italiana

Codice	Giorni settimanali di prelievo
1	7 giorni
2	6 giorni (secluse domeniche e festività nazionali)
3	5 giorni (esclusi sabati, domeniche e festività nazionali)

Con riferimento agli utenti residenziali, le categorie d'uso vengono assegnate in base ai consumi presunti come di seguito riportato:

- consumi presunti inferiori a 500 Sm^3, categoria C2;
- consumi presunti compresi tra 500 e 5000 Sm^3, categoria C3;
- consumi presunti superiori a 5000 Sm^3, categoria C1.

Per ogni utente, il valore percentuale per il giorno k del profilo di prelievo standard SLP associato al PdR SLP_k viene calcolato attraverso la seguente equazione:

$$SLP_k = W_{kr}\,\beta 1_{prof}\,c1^{\%}_{i,j,k} + \beta 2_{prof}\,c1^{\%}_{k} + \beta 3_{prof}\,t1^{\%}_{j,k} + \beta 4_{prof}\,c4^{\%}_{k} \qquad (4)$$

$$\forall\, i \in \{A,B,C,D,E,F\}, \forall\, j \in \{1,2,3\}$$

dove:

- i (A, B, C, D, E, F) sono le zone climatiche;
- j (1, 2, 3) sono le classi di prelievo di cui alla Tabella 3;
- k è il giorno di prelievo;
- W_{kr} è un fattore di correzione climatica ed esprime il rapporto, relativo ad un giorno gas k-esimo e alla regione climatica r, fra la componente termica del consumo stimata per il medesimo giorno sulla base delle condizioni effettive e la componente termica del consumo attesa alle condizioni di riferimento; W_{kr} viene aggiornato dal responsabile del bilanciamento mediante una metodologia di calcolo definita [26];
- $c1^{\%}_{i,j,k}$ è il valore percentuale nel giorno k del prelievo standard associato all'uso del gas per il riscaldamento, alla zona climatica i e alla classe di prelievo j; tale valore percentuale si riferisce a condizioni statisticamente normali per il giorno k;
- $c2^{\%}_{k}$ è il valore percentuale nel giorno k del prelievo standard associato all'uso del gas per cottura cibi e/o produzione di acqua calda sanitaria;

- $t1^{\%}_{j,k}$ è il valore percentuale nel giorno k del prelievo standard associato all'uso tecnologico del gas e alla classe di prelievo j;
- $c4^{\%}_{k}$ è il valore percentuale nel giorno k del prelievo standard associato all'uso del gas per il condizionamento;
- $\beta 1_{PROF}$, $\beta 2_{PROF}$, $\beta 3_{PROF}$ e $\beta 4_{PROF}$ sono i coefficienti con cui è caratterizzato ciascun profilo in funzione della categoria d'uso della zona climatica e della classe di prelievo (Tabella 2);

A ciascun utente (o punto di riconsegna, PdR) viene associato dunque un parametro CV determinato secondo la seguente formula:

$$CV = \sum_{z \in Z} \left[\frac{L_{z+1} - L_z}{\sum_{k=d_z}^{d_{z+1}} SLP_k} \cdot \sum_{k=a_z}^{a_{z+1}} SLP_{nk} \right]$$

dove:

- L_z è la lettura relativa al PdR appartenente all'insieme Z;
- L_{z+1} è la lettura successiva a Lz in ordine temporale;
- Z è l'insieme che comprende la prima misura utile, l'ultima misura utile e tutte le misure tra queste comprese in ordine temporale, dove la prima misura utile è la prima misura relativa ad un giorno precedente l'inizio del periodo di calcolo[1], mentre l'ultima misura utile è il più recente dato di misura disponibile;
- d_z e d_{z+1} sono le date in cui sono state effettuate le letture Lz e Lz+1;
- a_z è la data più recente fra d_z e la data del primo giorno del periodo di calcolo;
- a_{z+1} è la data meno recente fra d_{z+1} e la data dell'ultimo giorno del periodo di calcolo;
- SLP_{nk} è il valore percentuale per il giorno k del profilo di prelievo standard SLP associato al PdR corrispondente ad un valore di W_{kr}pari a 1;
- SLP_k è il valore percentuale per il giorno k del profilo di prelievo standard SLP associato al PdR aggiornato sulla base del termine W_{kr}.

2.2.2 Metodo tedesco

Nell'attuale regime di profilazione adottato in Germania, è previsto l'utilizzo di curve sigmoidee per la definizione dei profili di prelievo standard utilizzati per l'allocazione dei consumi degli utenti NDM [27].

Secondo la Federal Network Agency tedesca, è necessario definire almeno tre tipi di profilo per tre differenti categorie di utenti finali: utenze commerciali, utenti che utilizzano il gas nella cottura dei cibi e utenti che utilizzano il gas nel riscaldamento degli ambienti. Le compagnie di distribuzione possono scegliere tra due differenti modalità di calcolo del profilo di prelievo standard: i) modalità sintetica; ii) modalità analitica.

La modalità sintetica adotta un approccio bottom-up in cui il profilo di prelievo rappresentativo viene calcolato sulla base di un fattore calcolato ad hoc per l'utente specifico in funzione di una serie di parametri di influenza (i.e. temperatura, giorno della settimana, ecc.) e il cui risultato è un consumo di gas previsto per il giorno successivo. Nel caso della modalità analitica, invece, il modello di previsione si avvale dei profili di carico calcolati con il metodo sintetico e tiene conto di un residuo del giorno precedente, calcolato sulla base della differenza tra le entrate totali nel sistema di distribuzione e tutti i consumi misurati in uscita. Tale residuo viene in questo caso ripartito sui singoli fornitori utilizzando opportuni fattori di ripartizione [28]. Allo

[1] Per periodo di calcolo s'intende un periodo di 365 giorni (366 se include il 29 febbraio), che termina con la data dell'ultima misura utile

scopo di ridurre gli errori di previsione che possono determinare uno sbilanciamento della rete, l'Associazione tedesca delle industrie energetiche e idriche (BDEW) ha redatto una serie di linee guida specifiche [23].

Le linee guida attualmente in vigore fanno riferimento a due tipologie di profilo di prelievo: i primi sviluppati dal *Technical University on Munich (TUM)* e i secondi, denominati profili SigLinDe, sviluppati dal *Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE)* come ulteriore ottimizzazione dei precedenti all'interno di un progetto commissionato dalla BDEW [24].

In particolare, questi ultimi sono profili ottenuti dalla combinazione di una funzione sigmoidea, che tiene conto della dipendenza dei consumi di gas dalla temperatura, e di una funzione lineare che ha lo scopo di correggere il profilo in corrispondenza degli estremi del dominio della temperatura. La funzione lineare consente di scongiurare fenomeni di sovrastime in regime di funzionamento estivo o sottostime in regime di funzionamento invernale.

Una rappresentazione qualitativa di un profilo *SigLinDe* è riportata in Figura **2**.

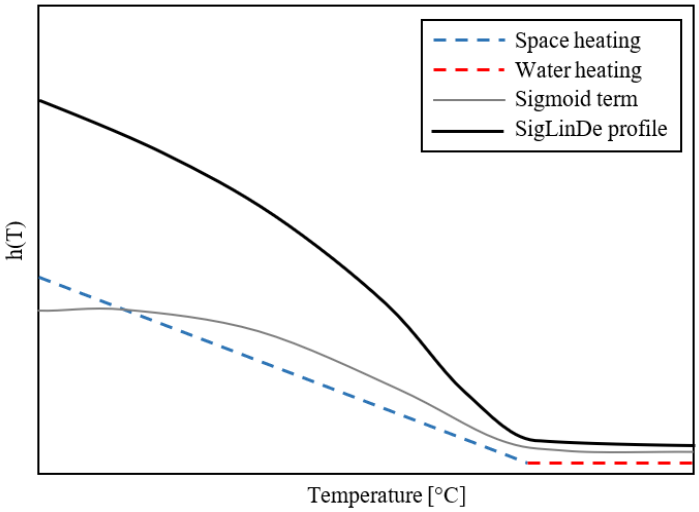


Figura 2 - Rappresentazione qualitativa di un profilo di prelievo standard sigmoideo

In Figura **3** è invece presentata schematicamente la peculiarità della procedura di profilazione messa a punto dalla BDEW, ovvero il vasto numero di profili specifici messi a disposizione per la previsione dei consumi. In particolare sono disponibili tre differenti profili per la caratterizzazione dei consumi residenziali e un gran numero di profili differenti per la caratterizzazione dei consumi associati alle diverse attività commerciali/industriali/servizi. Allo scopo di tenere conto della diversa sensibilità dei consumi rispetto alla temperatura, sono inoltre disponibili ulteriori varianti degli stessi profili sia per il settore commerciale che per quello residenziale.

Residenziali	
Tipologia utente	**codice**
Famiglia singola	EF
Multifamiliare	MF
Uso cottura	KO

Commerciali	
Tipologia utente	**codice**
Uffici pubblici, banche, ecc.	KO
Settore automotive	MK
Commerciale ingrosso e dettaglio	HA
Ristorazione	GA
Hotel, B&B e simili	BH
Panetterie	BA
Lavanderie	WA
Settore ortofrutticolo	GB
Copisterie	PD
Simil residenziale	MF
Commerciale	HD

Tipologia utente	**codice**
Tum Sigmoid	0
SigLinDe FfE	3

Rilevanza riscaldamento	**Codice**
Rilevanza riscaldamento alta	5
Rilevanza riscaldamento media	3
Rilevanza uso in processo alta	1
Rilevanza uso in processo media	2

Figura 3 - Classificazione degli utenti finali in Germania

I profili di prelievo standard nel giorno k-esimo vengono calcolati in funzione della temperatura del giorno k attraverso l'equazione (5).

$$SLP(\overline{T_k}) = \left[\frac{A}{1+\left(\frac{B}{\overline{T_k}-40}\right)^C} + D\right] + \left[max\begin{Bmatrix} m_H \cdot \overline{T_k} + b_H \\ m_W \cdot \overline{T_k} + b_W \end{Bmatrix}\right] \quad (5)$$

dove:

- A , B , C , D sono i coefficienti della sigmoide, e sono forniti, per ciascuna categoria utente, dall'autorità tedesca nel documento [23] aggiornato con frequenza annuale; questi coefficienti sono ricavati dall'analisi dei consumi aggregati di un set di utenti teleletti appartenenti a determinate categorie utente e zona climatica;
- Il secondo termine della somma, contenente i coefficienti m_H e b_H, m_W e b_W, modifica la sigmoide in funzione della temperatura esterna aggiungendo un'aliquota correttiva che tiene conto del riscaldamento degli ambienti e della produzione di acqua calda sanitaria (i coefficienti m e b rappresentano, rispettivamente, la pendenza della componente lineare e la sua intercetta a 0°C, mentre i pedici H e W stanno, rispettivamente per "heating" e "water");
- $\overline{T_k}$ è la temperatura calcolata come serie geometrica delle temperature del k-esimo giorno a cui si riferiscono i consumi e dei due giorni precedenti (equazione 6). Ciò consente di tenere conto dell'inerzia termica degli edifici, nonché di un effetto comportamentale che determina un ritardo nella reazione degli utenti alle variazioni della temperatura esterna:

$$\overline{T_k} = \frac{T_k + 0.5\,T_{k-1} + 0.25\,T_{k-2} + 0.125\,T_{k-3}}{1 + 0.5 + 0.25 + 0.125} \quad (6)$$

Il metodo del profilo di carico sviluppato dall'Università Tecnica di Monaco e dall'Istituto di Ricerca per l'Economia Energetica di Monaco (FfE) si basa sulla definizione del Customer Value (CV), ovvero il consumo medio giornaliero dell'utente quando la temperatura esterna è pari a 8°C. Il consumo nei giorni con temperature più calde o più fredde viene scalato utilizzando i valori del profilo di prelievo standard $SLP(\overline{T_k})$ dipendenti dalla temperatura. È possibile calcolare il CV a partire dalla conoscenza della previsione del consumo annuo JVP, che rappresenta il consumo medio del sistema in un anno normale (specifico per punto di prelievo e indipendente dal tipo SLP). La previsione del consumo annuo è sempre riferita a 365 giorni. Questo può essere calcolato con l'equazione (7).

$$JVP = M_{SLP} \cdot CV \quad (7)$$

dove il moltiplicatore M_{SLP} converte il valore del cliente (CV) nella relativa previsione di consumo annuale (JVP) e si ottiene sommando, ad esempio, 365 valori del profilo di prelievo standard $SLP(T)$ come nell'equazione (8).

$$M_{SLP} = \sum_{k=1}^{365} SLP(\overline{T_k}) \quad (8)$$

La somma dei valori di $SLP(\overline{T_k})$ è quindi un valore fisso e può essere applicato uniformemente a tutti i punti di misurazione che godono delle stesse proprietà (i.e., profilo e temperatura).

La quantità di energia prelevata in un giorno k-esimo Q_k può quindi essere calcolata come:

$$Q_k = \frac{JVP}{M_{SLP}} \cdot SLP(\overline{T_k}) \cdot F_{WT} = CV \cdot SLP(\overline{T_k}) \cdot F_{WT} \quad (9)$$

in cui F_{WT}è un fattore di correzione per giorno della settimana (pari a 1 per gli utenti di tipo residenziale).

2.2.3 Metodo inglese

Nel Regno Unito (UK) il Codice di rete unificato rappresenta il riferimento per la filiera del gas naturale e contiene un quadro giuridico e contrattuale per il servizio di fornitura ed il trasporto del gas naturale. Negli ultimi anni, il Codice ha subito una serie di modifiche dovute all'implementazione del progetto Nexus, il quale ha come obiettivo quello di modificare l'approccio adottato fino ad ora e che prevede di stimare annualmente un quantitativo di gas allo scopo di far fronte all'errata allocazione del gas nel precedente anno [29]. In tal senso, la stima dei consumi degli utenti con letture sporadiche rappresenta lo strumento chiave per far fronte, in fase di bilanciamento della rete, alla stima di tali quantitativi.

Nell'attuale scenario, ad ogni utente con letture sporadiche viene assegnata una categoria (End User Category, EUC) per la quale è stato definito uno specifico modello di domanda. Attualmente sono in uso 9 differenti categorie definite esclusivamente sulla base di bande di consumo. I piccoli utenti sono raggruppati nelle bande di consumo che vanno da 1 a 4 (fino a 2196 MWh/anno), mentre le bande da 5 a 9 si riferiscono ai grandi utenti. Ogni banda è inoltre caratterizzata per 13 zone di distribuzione locali inglesi. Una panoramica delle bande EUC definite è riportata in Tabella **4**.

Tabella 4 – Categorie d'uso metodo inglese

Range di consumi [kWh/anno]		Bande EUC
0	73200	1
73201	293000	2
293001	732000	3
732001	2196000	4
2196001	5860000	5
5860001	14650000	6
14650001	29300000	7
2930001	58600000	8
58600001		9

La domanda NDM è un calcolo bottom-up che utilizza i seguenti fattori: Quantità Annuale (AQ), i profili di carico annuale (SLP), i fattori di aggiustamento giornaliero (DAF) e i fattori di correzione meteorologica (WCF) secondo l'equazione (7):

$$NDM_{demand,k} = \left(\frac{AQ}{365}\right) \cdot SLP_k \cdot (1 + [DAF_k \cdot WCF_k]) \quad [2] \qquad (10)$$

Nello specifico:

- il termine AQ è la domanda stagionale annuale in kWh per un punto di fornitura al quale è assegnata una categoria EUC;
- il termine SLP_k è il prelievo standard giornaliero per la specifica categoria EUC (vedi equazione (9)) in proporzione alla domanda normale stagionale media giornaliera;
- il termine DAF_d è la sensibilità meteorologica della domanda giornaliera della specifica categoria EUC, in proporzione alla normale domanda stagionale media giornaliera.

La WCF è definita per mezzo dell'equazione:

$$WCF_k = CWV_k - SNCWV_k \qquad (11)$$

dove:

- CWV_k è la variabile meteorologica per la zona di distribuzione locale (LDZ) per il giorno k-esimo;
- $SNCWV_k$ è il valore normale stagionale della variabile meteorologica composita per il giorno k-esimo.

La stima dei consumi associati agli utenti NDM è data dalla seguente equazione:

$$SLP_k = \frac{SNDE_k}{\left(\frac{\sum_{k=1}^{n} SNDE_k}{n}\right)} \qquad (12)$$

dove $SNDE_k$ è la domanda stagionale normalizzata per la categoria per il generico giorno d, calcolata utilizzando i risultati dell'analisi di regressione lineare (pendenza della retta più costante) ai valori stagionali

[2] Si applica un vincolo minimo di 0,01 alla parte $(1 + [DAFt \cdot WCFt])$ della formula (per prevenire una domanda negativa)

della variabile climatica composta, combinata con altri parametri di aggiustamento quali il giorno della settimana, festività, riduzioni estive, ecc.

Il modello di domanda per la singola categoria viene sviluppato sulla base di relazioni statistiche tra i dati, raccolti per un periodo di almeno un anno, relativi alla domanda aggregata di un campione teleletto, ai dati climatici e ad altre variabili che possono influenzare i consumi di gas naturale. I dati climatici attualmente utilizzati per la definizione della variabile climatica composta sono la temperatura, a intervalli di due ore durante il giorno e la notte, e la velocità del vento, a intervalli di quattro ore durante il giorno e la notte. Una rappresentazione qualitativa del profilo di prelievo standard utilizzato in UK è riportata in Figura 4.

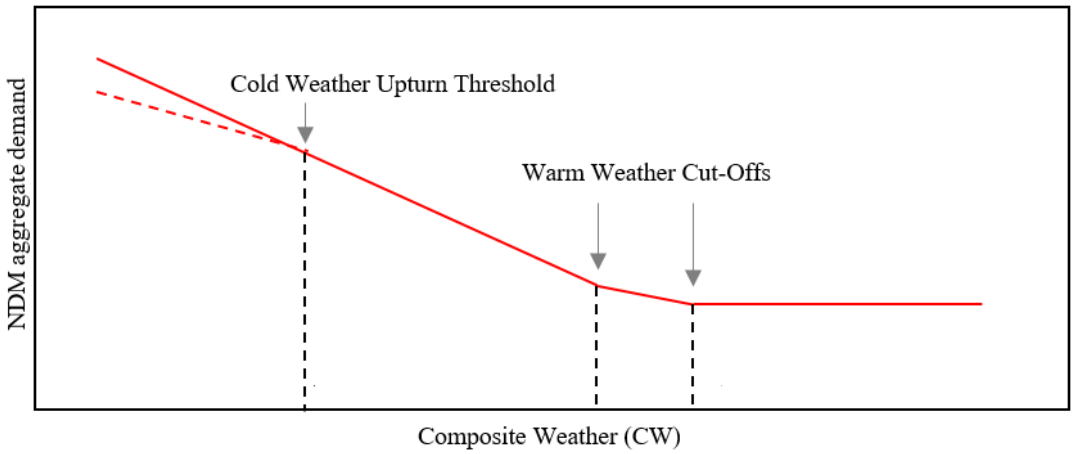


Figura 4 - Rappresentazione qualitativa di un profilo di prelievo adottato nel Regno Unito

2.3 *Caso di studio n.1: previsione dei consumi di una rete urbana*

I tre metodi di allocazione descritti nei precedenti paragrafi sono stati applicati al caso di studio di una rete urbana di distribuzione del gas naturale. A tale scopo sono stati valutati i dati di prelievo del biennio 2017-2018, ampliando l'analisi ed i risultati già in parte presentati in [30].

Il caso di studio consiste in una rete cittadina di distribuzione del gas naturale situata nel sud Italia (zona climatica C, 1134 gradi giorno). La rete investigata alimenta circa 50000 abitanti attraverso 15980 punti di riconsegna (PdR) NDM e 80 PdR DM dotati di smart meter teleletti. Per questi ultimi sono disponibili le teleletture nel biennio 2017-18. Nel dettaglio, 48 PDR DM sono rappresentati da piccoli e medi stabilimenti industriali, 20 da uffici pubblici e 12 da condomini dotati di riscaldamento centralizzato. Per semplicità, nella presente analisi, sono classificate "residenziali" tutte le utenze che utilizzano il gas con finalità di riscaldamento, cottura, produzione di acqua calda. Le performance dei tre metodi sono state valutate sulla base dei dati relativi ai volumi misurati in ingresso alla rete e ai volumi prelevati dalle utenze dotate di smart meter. La Figura **5** mostra una planimetria dell'area urbana alimentata dalla rete oggetto di studio.

Figura 5 – Planimetria della rete oggetto di studio

Per le finalità della presente ricerca sono stati utilizzati tre differenti set di dati:

- le letture effettuate dalla compagnia di distribuzione sui 15980 utenti NDM nel periodo compreso tra il 2015 e il 2018;
- le letture dei 76 utenti dotati di smart meters per gli anni 2017 e 2018;
- i volumi totali di gas naturale immessi nella rete nel biennio 2017-2018.

Per quanto riguarda le letture degli utenti NDM, la regolazione italiana prevede un minimo di due tentativi di lettura l'anno, quindi, la reale disponibilità di dati è subordinata all'accessibilità dei contatori da parte degli operatori che effettuano la lettura, in assenza degli utenti. Per quanto appena detto, all'interno dello stesso periodo, il numero di letture non è lo stesso per tutti gli utenti e può capitare che ci siano utenti che non hanno alcuna lettura all'interno del periodo considerato.

L'applicazione dei metodi descritti, naturalmente, ha richiesto di adattare le categorie d'uso, assegnate agli utenti della rete secondo la metodologia italiana, a quelle definite nelle metodologie adottate in Germania e Regno Unito. Ciò è stato possibile grazie a delle informazioni aggiuntive, rese disponibili dalla compagnia di distribuzione, che hanno permesso di identificare la specifica destinazione d'uso del gas per gli utenti tecnologici e commerciali.

I dati climatici (temperatura, velocità del vento, ecc.) utilizzati sono stati resi disponibili dal fornitore di servizi meteorologici svizzero meteoblue AG[3].

2.3.1 Stima dei consumi reali della rete e metodologia di confronto

Al fine di confrontare le prestazioni dei modelli italiano, tedesco e inglese su scala urbana, è stato necessario determinare il consumo reale di gas naturale degli utenti di tipo residenziale della rete analizzata. Il consumo

[3] www.meteoblue.com

di gas naturale degli utenti residenziali ($RGC_{misurato}$) per il riscaldamento degli ambienti, la cottura e la produzione di acqua calda sanitaria, nel biennio di riferimento, è stato quindi determinato come differenza tra i consumi totali dell'intera rete (TGC) e i consumi delle utenze industriali e degli uffici pubblici DM (IGC).

$$RGC_{misurato} = \sum_{k=1}^{365} TGC_k - \sum_{k=1}^{365} IGC_k \quad (13)$$

Una volta noto il consumo di riferimento $RGC_{misurato}$ (dato utile alla valutazione delle prestazioni dei modelli), le metodologie di stima italiana, tedesca e inglese descritte nei paragrafi precedenti sono state applicate al dataset di riferimento al fine di determinare il consumo totale degli utenti NDM ($\sum_{k=1}^{365}\sum_{i=1}^{15980} NDM_{DC\,i,d}$) in ciascun periodo di calcolo (i.e., anni 2017 e 2018). A quest'ultimo è stato poi sommato il contributo di consumo dei 12 utenti residenziali teleletti della rete ($\sum_{k=1}^{365}\sum_{i=1}^{12} DM_{i,d}$) per ottenere la stima del consumo totale di gas attribuibile alle utenze residenziali, $RGC_{stimato}$.

$$RGC_{stimato} = \sum_{k=1}^{365}\sum_{i=1}^{15980} NDM_{DC\,i,k} + \sum_{k=1}^{365}\sum_{i=1}^{12} DM_{i,k} \quad (14)$$

L'errore relativo associato alla stima realizzata attraverso il modello di stima italiano, tedesco o inglese ($\boldsymbol{e}$) è stato quindi calcolato, su base mensile, stagionale o annuale, rispettivamente.

$$e_{mese} = \frac{RGC_{stimato,mese} - RGC_{misurato,mese}}{RGC_{misurato,mese}} \quad (15)$$

$$e_{season} = \frac{RGC_{stimato,stagione} - RGC_{misurato,stagione}}{RGC_{misurato,stagione}} \quad (16)$$

$$e_{year} = \frac{RGC_{stimato,anno} - RGC_{misurato,anno}}{RGC_{misurato,anno}} \quad (17)$$

In Figura 6 è riportata in forma schematica la metodologia applicata per il calcolo dell'errore commesso utilizzando i diversi modelli di stima dei consumi NDM analizzati.

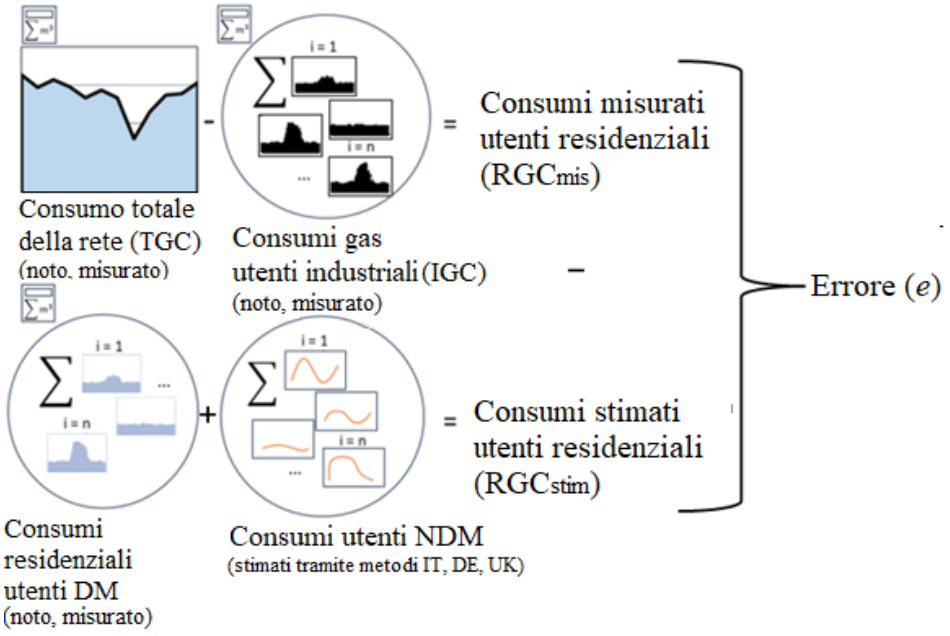
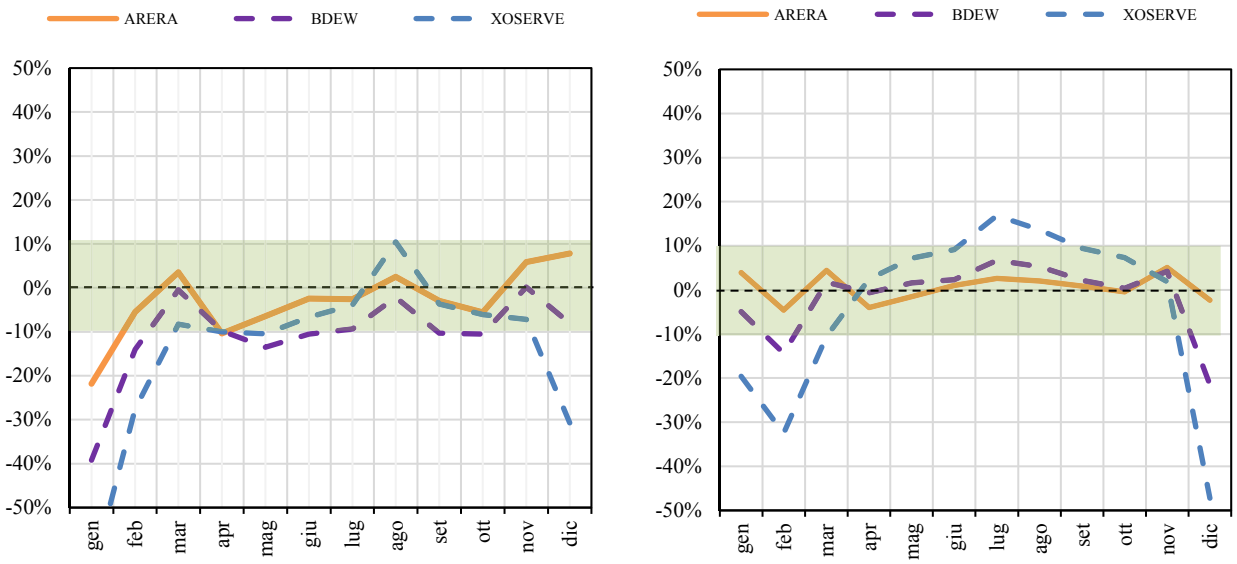


Figura 6 – Schema della metodologia applicata per determinare l'errore dei metodi analizzati [30]

I risultati dell'analisi effettuata sono riportati in Figura 7 e in Tabella 5, rispettivamente, su base mensile e annuale (la fascia verde identifica la zona di errore $\pm$ 10%). In Tabella 5, la stessa analisi mostra anche le aggregazioni dei risultati mensili relative alle stagioni di accensione e di spegnimento dei sistemi di riscaldamento.



a) b)

Figura 7 – Caso di Studio n.1, Errore relativo mensile: (a) anno 2017 [30], (b) anno 2018

Tabella 5 – Caso di Studio n.1, Errori stagionali e annuali

		RGC_{mis} $[Sm^3x10^6]$	*Metodo IT*		*Metodo UK*		*Metodo DE*	
			RGC_{stim} $[Sm^3x10^6]$	*Errore [%]*	RGC_{stim} $[Sm^3x10^6]$	*Errore [%]*	RGC_{stim} $[Sm^3x10^6]$	*Errore [%]*
Anno 2017	Stagione di riscaldamento	17.22	16.58	-3.72%	14.73	-14.46%	15.41	-10.51%
	Stagione di non riscaldamento	11.04	10.56	-4.35%	11.54	4.53%	10.44	-5.43%
	Totale anno	28.25	27.14	-3.93%	26.28	-6.97%	25.85	-8.50%
Anno 2018	Stagione di riscaldamento	14.91	15.05	0.94%	13.12	-12.01%	13.88	-6.91%
	Stagione di non riscaldamento	11.23	11.22	-0.09%	11.97	6.59%	11.53	2.67%
	Totale anno	26.13	26.27	0.54%	25.09	-3.98%	25.41	-2.76%
Totale periodo (2017-2018)		54.38	53.41	-1.78%	51.37	-5.54%	51.26	-5.74%

Come evidenziato in Figura 7 e in Tabella 5, i metodi analizzati presentano errori non trascurabili su base mensile che tendono a ridursi considerevolmente quando si allarga l'orizzonte temporale e si analizza l'errore annuale.

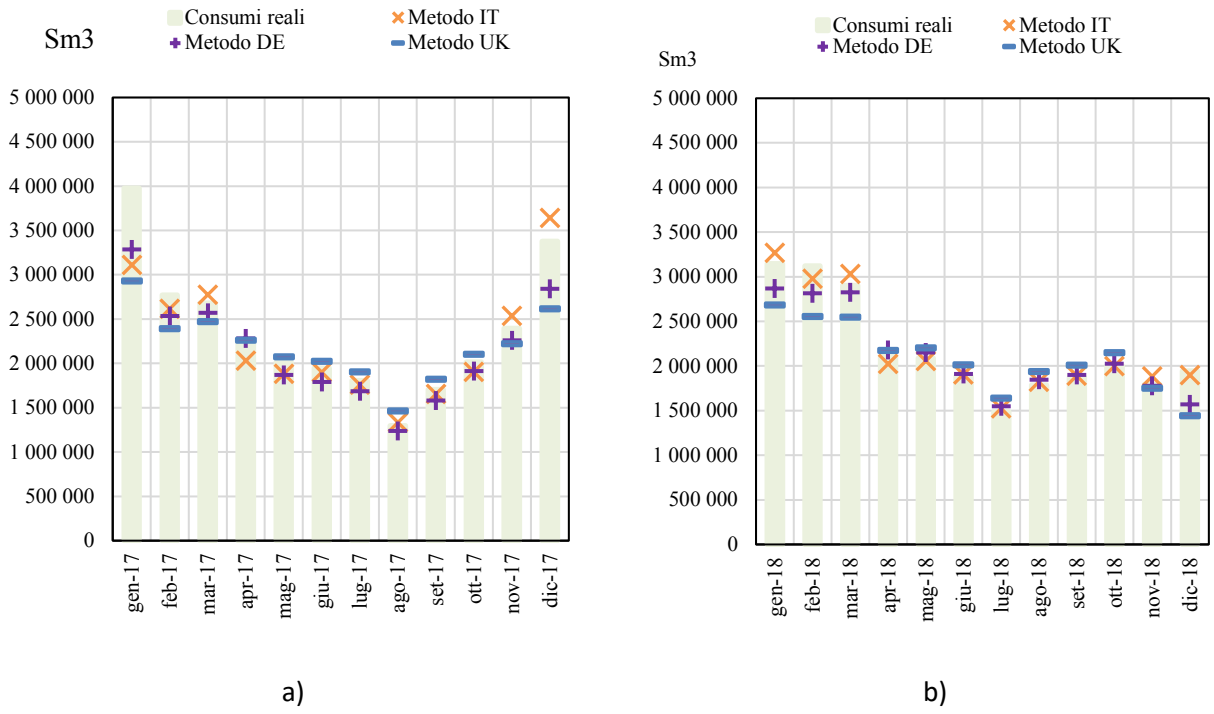
In merito all'errore relativo al mese di gennaio 2017 (vedi Figura 7), si può osservare che i metodi investigati sottostimano notevolmente i prelievi della rete. Questo risultato è imputabile ad un periodo di freddo intenso e al fatto che i modelli, essendo definiti sulla base dei consumi dell'anno precedente, non sono stati in grado di descrivere correttamente.

Come prevedibile, le migliori performance si registrano per il metodo italiano in virtù del fatto che il caso di studio è costituito proprio da una rete italiana. Infatti, l'applicazione dei profili di prelievo standard definiti sulla base delle abitudini, delle tipologie di edifici e delle condizioni climatiche tipiche di aree continentali (i.e. Germania) e Nord EU (i.e. Regno Unito) a utenti residenti nell'area mediterranea, può comportare una minore accuratezza dei risultati.

Tuttavia, è opportuno porre evidenza sui risultati ottenuti attraverso il metodo tedesco nei mesi invernali del biennio considerato (vedi Figura 7a e 7b). Questi, infatti, risultano essere comparabili con quelli ottenuti attraverso l'applicazione del metodo italiano, ottenendo anche errori più bassi in alcuni mesi (e.g. novembre 2017, marzo 2018, novembre 2018). Questo risultato potrebbe dipendere dal fatto che i profili standard definiti dall'autorità tedesca presentano una dipendenza esplicita dalla temperatura esterna, a differenza dei profili standard definiti da ARERA in Italia, che tengono conto delle condizioni climatiche esclusivamente attraverso la dipendenza dalla zona climatica, senza tuttavia considerare i dati di temperatura puntuali.

Per quanto riguarda il metodo inglese, si può osservare che questo sottostima sistematicamente i consumi nei mesi invernali (i.e. da gennaio a marzo, novembre e dicembre) e sovrastima sistematicamente i consumi nei mesi estivi (i.e. da aprile a settembre). Le performance peggiori registrate per il metodo inglese sono ascrivibili ai parametri scelti per la costruzione della variabile meteorologica composita (i.e. vento e temperatura) che, probabilmente, risultano maggiormente significativi per il clima tipico UK piuttosto che nel caratterizzare le peculiarità di un clima mediterraneo, per il quale potrebbero essere più rappresentativi altri parametri (e.g. la radiazione solare).

In Figura 8 sono riportati in forma aggregata i consumi stimati attraverso le tre metodologie, messi a confronto con il dato misurato in corrispondenza degli impianti attraverso cui il gas viene immesso nella rete.



a) b)

Figura 8– Caso di Studio n.1,Consumi mensili stimati: (a) anno 2017 [30], (b) anno 2018

L'applicazione delle metodologie analizzate alla previsione dei consumi di gas naturale di uno stock edilizio urbano, e in particolare dei metodi italiano e tedesco, ha consentito di ottenere stime di consumo con errori mensili quasi sempre ricompresi in un range $\pm$ 10%. Sebbene tali errori non siano trascurabili nell'ottica del bilanciamento della rete, è importante evidenziare che essi sono confrontabili con quelli dei modelli di previsione dei consumi di parchi edilizi studiati nella letteratura scientifica [31].

In riferimento specifico al periodo di calcolo, i modelli analizzati mantengono una buona accuratezza anche su base mensile o stagionale. Ciononostante, nel passaggio dalla stima annuale a quella mensile, l'errore dei modelli analizzati aumenta di circa un ordine di grandezza, congruentemente con quanto osservato in [31] per altri modelli di previsione su scala urbana. Ciò evidenzia il buon potenziale dell'applicazione di questi modelli in diversi ambiti di analisi (e.g., validazione di modelli in assenza di dati reali, previsione dei consumi di medio-lungo periodo, analisi di rete, previsione effetti di nuove politiche energetiche etc.). Occorre di contro evidenziare alcuni fattori critici che contribuiscono a determinare errori sistematici nella stima dei consumi degli utenti NDM, tra cui, ad esempio:

- la categorizzazione dell'utente, che spesso non rispecchia le reali abitudini e i reali usi del gas naturale;
- l'accuratezza dei dati climatici utilizzati;
- la frequenza di successo delle letture dei contatori riuscite e il periodo in cui queste vengono eseguite.

2.4 Caso di studio n.2: previsione dei consumi di edifici residenziali

I metodi di profilazione Italiano (IT) e tedesco (DE) sono stati applicati al caso di studio di due edifici residenziali di edilizia sociale in provincia di Frosinone (nei comuni di Ceprano e Anagni) denominati ATER Ceprano e ATER Anagni 18/C e descritti in [32].

Gli autori hanno ritenuto di non effettuare la sperimentazione del metodo inglese (UK) avendo riscontrato una sostanziale similitudine nelle modalità di definizione degli SLP rispetto al metodo italiano. Viene quindi privilegiato quest'ultimo dal momento che le ipotesi di base sono assunte rispetto alle effettive condizioni del caso italiano (come peraltro dimostrato dalla maggiore accuratezza del metodo italiano rispetto a quello inglese nel caso di studio n.1). Di contro, il confronto tra il metodo DE ed il metodo IT risulta significativo nell'ottica di evidenziare le performance di previsione a livello di edificio delle due differenti metodologie di profilazione attualmente più diffuse nei mercati del gas naturale europei (i.e., metodi statistici basati su regressioni lineari/polinomiali e firme energetiche basate su curve sigmoidee).

A questo scopo sono stati analizzati i consumi dei due edifici nelle stagioni di riscaldamento 2019-20 e 2020-21 per i quali, oltre ai consumi puntuali al generatore centralizzato ed ai singoli ambienti (ripartizione indiretta) erano disponibili i dati giornalieri di consumo al contatore gas, resi disponibili da ATER, ente proprietario degli edifici. I consumi reali della stagione 2018-19 sono stati utilizzati per il calcolo dei consumi annui di riferimento.

Nell'applicazione dei due metodi sono stati valutati:

- i consumi giornalieri stimati C_{mod} e misurati C_{mis};
- l'errore della stima del modello $e_{mod\%}$ sull'intero periodo di osservazione, attraverso l'eq. (18):

$$e_{mod\%} = \frac{\sum C_{mod,k} - \sum C_{mis,k}}{\sum C_{mis,k}} \tag{18}$$

- il coefficiente di variazione del modello $CVar_{mod,\%}$, attraverso l'eq. (14):

$$Cvar_{mod\%} = \frac{\sqrt{\frac{\sum\left(C_{mod,k} - C_{mis,k}\right)^2}{n-1}}}{\overline{C_{mis}}} \tag{19}$$

Il $Cvar_{mod\%}$ è un coefficiente definito nelle Linee Guida ASHRAE 14-2002 [33] ed è utilizzato per calibrare i modelli di simulazione dinamica dei consumi energetici degli edifici. Esso, pertanto, rappresenta un coefficiente che indica l'instabilità in una relazione osservata tra le variabili nel periodo di riferimento. Secondo la specifica di ASHRAE, il $Cvar_{mod\%}$ può essere utilizzato per confrontare la differenza tra il consumo di riscaldamento simulato e quello misurato su base oraria, giornaliera, mensile. Nello specifico, il modello, risulta accurato se il $CVar_{mod,\%}$ è nel range $\pm$15% (per alcuni studi anche $\pm$ 30% [31]).

Per ciascun edificio, sono stati simulati due scenari di applicazione dei modelli, sulla base dell'aggiornamento del valore di prelievo annuo associato all'utente (CV) come definito nell'equazione (1):

- scenario 0, nessun aggiornamento del CV associato al punto di prelievo nel periodo di calcolo; in questo caso il CV associato ad ogni edificio è quello calcolato per l'edificio nella stagione precedente a quella di riferimento precedente alla stagione di calcolo (i.e., stagione 2018-2019);
- scenario 1, il CV viene aggiornato una volta durante la stagione di riscaldamento; ciò prevede l'esecuzione di una lettura del consumo a metà della stagione di calcolo (i.e., 31 gennaio) con conseguente aggiornamento del CV associato al PdR;

Per l'applicazione del metodo italiano è stata assegnata ai due edifici la classe di prelievo C1C1, corrispondente ad un profilo di prelievo per solo riscaldamento (in entrambi gli edifici la produzione di acqua calda sanitaria e l'uso cottura sono garantiti in maniera diversa). I valori delle costanti utilizzati per il calcolo sono riportati in Tabella 6. Per la variabile climatica W_{kr} sono stati utilizzati i valori della zona climatica di Roma, resi disponibili dal responsabile del bilanciamento [26].

Tabella 6 - Coefficienti per la determinazione della percentuale giornaliera di prelievo pprof%

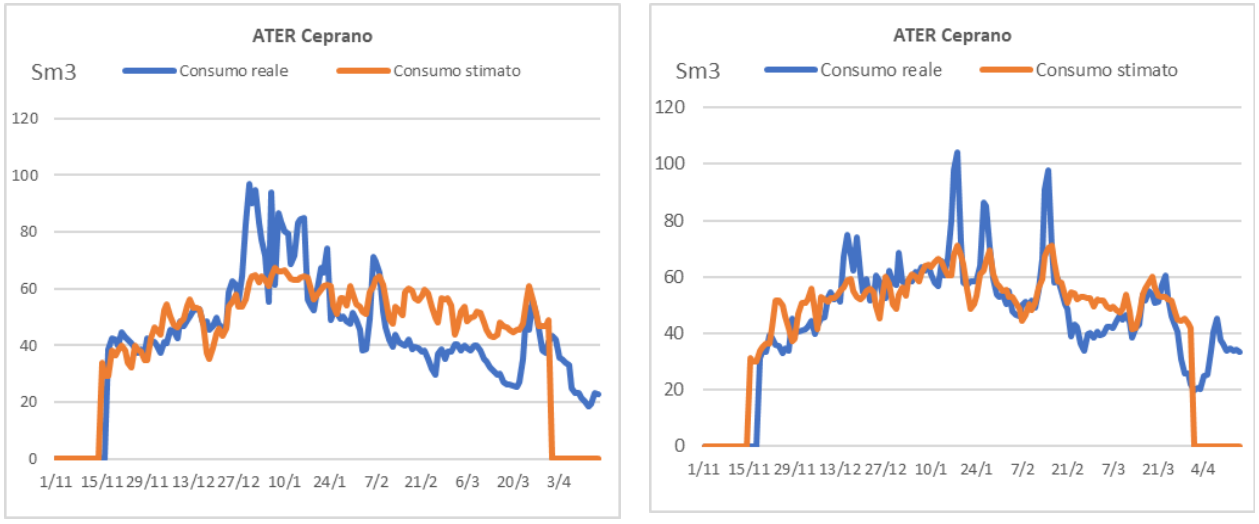
Coefficiente	*Valore*
$\beta_{1,PROF}$	1
$\beta_{2,PROF}$	0
$\beta_{3,PROF}$	0
$\beta_{4,PROF}$	0

2.4.1 Metodo italiano (IT)

I risultati dell'applicazione del metodo italiano sono riportati in Tabella 7, mentre In Figura 9 e Figura 10 sono riportati i consumi giornalieri misurati e stimati (scenario 0) per l'edificio di Ceprano e di Anagni 18C rispettivamente nelle due stagioni di riscaldamento analizzate.

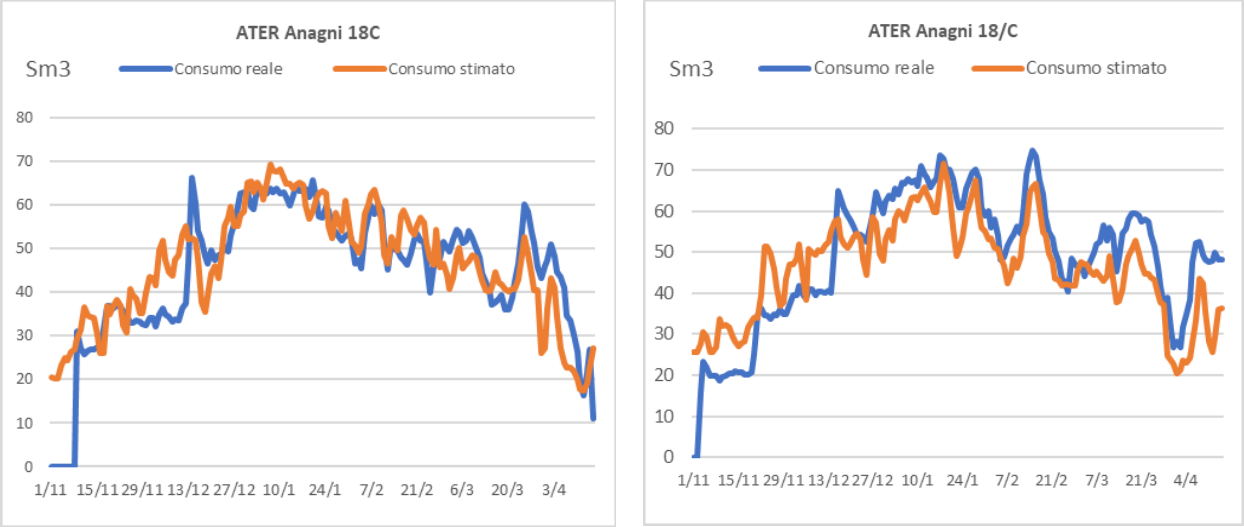
Tabella 7 – Caso di studio n.2, Risultati modello di previsione consumi Italiano (IT)

	Stagione 2019-20		*Stagione 2020-21*	
	ATER Ceprano	*ATER Anagni 18C*	*ATER Ceprano*	*ATER Anagni 18C*
Consumo reale (Sm^3)	7110.9	7430.0	7521.4	8094.3
Consumo stimato (Sm^3)	7151.8	7680.9	7261.1	7652.5
Errore modello (nessun agg.)	0.6%	3.4%	-3.5%	-5.5%
Errore modello (1 agg.)	-0.3%	0.5%	-4.5%	-5.4%
Coeff. di Var. Modello (nessun agg.)	35%	19%	30%	19%
Coeff. di Var. Modello (1 agg.)	34%	19%	30%	19%



a) b)

Figura 9 – ATER Ceprano, consumi giornalieri reali e stimati (IT): a) 2019-20, b) 2020/21



a) b)

Figura 10 - ATER Anagni 18/C, consumi giornalieri reali e stimati (IT): a) 2019-20, b) 2020/21

2.4.2 Metodo Tedesco (DE)

Per l'applicazione del metodo tedesco è stato associato un profilo di prelievo a ciascun edificio. Seguendo le indicazioni riportate in [23], è stato scelto il profilo HMF34, corrispondente al profilo di prelievo "multifamiliare" (MF) per riscaldamento con componente termica accentuata (34). A tale profilo, corrispondono i coefficienti riportati in Tabella 8. Al fine di confrontare dati congruenti, le stime di prelievo del metodo tedesco sono state limitate alla sola stagione di riscaldamento.

Tabella 8 – Coefficienti per la determinazione del prelievo giornaliero SLP($\overline{T_k}$) per profilo HMF34

Coefficiente	*Valore*
A	1.0443538
B	-35.0333754
C	6.2240634
D	0.0502917
mH	-0.0535830
bH	0.9995901
mw	-0.0021758
bw	0.1633299

Come detto, l'applicazione del metodo tedesco richiede la conoscenza della temperatura media esterna giornaliera in tutto il periodo di calcolo. A tale scopo, è stato utilizzato il database climatico reso disponibile dalla Regione Lazio[4].

I risultati dell'applicazione del metodo tedesco sono riportati in Tabella 9, mentre In Figura 11 e Figura 12 sono riportati i consumi giornalieri misurati e stimati (scenario 0) per l'edificio di Ceprano e Anagni 18/C rispettivamente nelle due stagioni di riscaldamento analizzate.

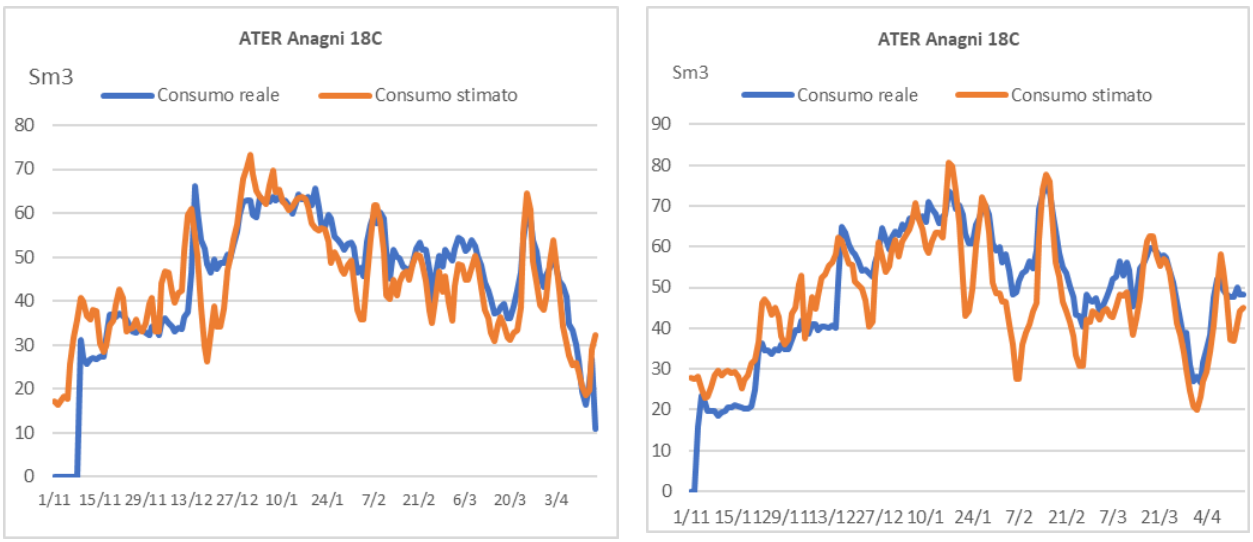
[4] Serie Storica Agrometeo - Dataset - CKAN - Open Data Lazio, https://dati.lazio.it

Tabella 9 – Caso di studio n.2, Risultati modello di previsione consumi tedesco (DE)

	Stagione 2019-20		*Stagione 2020-21*	
	ATER Ceprano	*ATER Anagni 18C*	*ATER Ceprano*	*ATER Anagni 18C*
Consumo reale (Sm^3)	7110.9	7430.0	7521.4	8094.3
Consumo stimato (Sm^3)	6853.5	7342.0	7003.7	7817.0
Errore modello (nessun agg.)	-3.6%	-1.2%	-6.9%	-3.4%
Errore modello (1 agg.)	-3.2%	-1.8%	-6.4%	-4.0%
Coeff. di Var. Modello (nessun agg.)	25%	20%	24%	18%
Coeff. di Var. Modello (1 agg.)	25%	20%	24%	18%

a) b)

Figura 11 – ATER Ceprano, consumi giornalieri reali e stimati (DE): a) 2019-20, b) 2020/21



a) b)

Figura 12 – ATER Anagni 18/C, consumi giornalieri reali e stimati (DE): a) 2019-20, b) 2020/21

Dall'analisi effettuata si evince che per il modello italiano:

- nella stagione 2019-20 l'accuratezza su base annua risulta particolarmente elevata per l'edificio ATER Ceprano (entro 0.6%), mentre per l'edificio Anagni 18C l'accuratezza è pari a 3.4%; il coefficiente di variazione stagionale è pari a circa il 30% ed il 20% per l'edificio di Ceprano e Anagni 18C, rispettivamente;
- l'accuratezza migliora se si effettua un aggiornamento del parametro CV durante l'anno (circa a metà della stagione di riscaldamento);
- nella stagione 2020-21, l'accuratezza peggiora per entrambi gli edifici passando da una sovrastima ad una sottostima (i.e. Ceprano -3.5% e Anagni -5.5%); inoltre, si riscontra un comportamento anomalo dell'accuratezza con l'aggiornamento del parametro CV (migliora di poco nell'edificio Anagni 18C e peggiora nell'edificio di Ceprano); il coefficiente di variazione stagionale migliora per l'edificio di Ceprano (pari a circa 30%) e rimane costante per quello di Anagni 18C.

Di contro, per il modello tedesco si evince che:

- nella stagione 2019-20 l'accuratezza su base annua è pari a -3.6% per l'edificio ATER Ceprano e -1.2% per l'edificio Anagni 18C; il coefficiente di variazione stagionale è pari a circa 25% per l'edificio di Ceprano e 20% per l'edificio Anagni 18/C;
- l'accuratezza migliora se si effettua un aggiornamento del parametro CV per l'edificio di Ceprano, ma peggiora per l'edificio Anagni 18C;
- nella stagione 2020-21, l'accuratezza peggiora per entrambi gli edifici confermando la tendenza a sottostimare i consumi (i.e. Ceprano -6.9% e Anagni -3.4%) e si conferma il comportamento diversificato nei due edifici con l'aggiornamento del parametro CV; il coefficiente di variazione stagionale migliora sia per l'edificio di Ceprano (pari a circa 24%) che per quello di Anagni 18C (pari a circa 18%).

I dati di accuratezza sopra descritti, risultano congruenti con i dati di letteratura disponibili per l'applicazione dei modelli di previsione dei consumi su singoli edifici (i.e. tra 2.5% e 262% [31])

Si consideri che le caratteristiche degli edifici e degli occupanti investigati (i.e., edifici di edilizia sociale, maggioranza degli occupanti rappresentati da pensionati a reddito medio-basso) possono avere influenzato l'accuratezza dei modelli (specialmente quello tedesco). Inoltre, nella stagione 2020-21 l'effetto del lockdown prolungato nei mesi da dicembre a febbraio a causa della pandemia Covid-19 può avere influenzato i consumi per riscaldamento molto più che nella stagione precedente, quando il lockdown era stato limitato sostanzialmente ai mesi di marzo e aprile (i.e., fine stagione di riscaldamento).

Il modello tedesco, infine, pur presentando un livello di accuratezza inferiore a quello italiano, sembra utilizzare in maniera efficace la variabile climatica. Questo sembra, in parte, bilanciare il fatto che la curva di prelievo è costruita su coefficienti che risentono della fisiologica differenza dagli effettivi stili di consumo della popolazione tedesca rispetto a quella italiana, perdipiù in un contesto di edilizia sociale.

3 Analisi delle blockchain nelle reti di teleriscaldamento

Una rete Blockchain può essere definita come un registro (ledger) condiviso tra pari (peer-to-peer) crittograficamente sicuro, immutabile e aggiornabile solo con il consenso tra i pari che vi partecipano [34]. È quindi una piattaforma nella quale i partecipanti che hanno tutti lo stesso livello ed autorità possono scambiare valori attraverso transazioni che non necessitano di un'autorità fiduciaria centrale.

La blockchain è costituita di blocchi successivi che contengono le transazioni e che includono anche un riferimento a un blocco precedente. Analogamente, in [35] le reti blockchain sono definite come strutture di dati o registri condivisi e distribuiti che possono archiviare in modo sicuro le transazioni digitali senza utilizzare un'autorità centrale di fiducia. Ogni transazione è collegata alla precedenti tramite crittografia rendendo le reti blockchain resilienti e sicure. Ogni utente della rete può infatti verificare autonomamente se le transazioni sono valide, il che fornisce trasparenza e registrazioni affidabili e a prova di manomissione. Ogni membro della rete detiene una copia della catena dei record e raggiunge un accordo sullo stato valido del libro mastro tramite consenso.

In un sistema distribuito (Figura **13**) ogni nodo ha le stesse capacità/autorità di accesso alle informazioni, fornendo quindi la fiducia. Di contro, in un sistema centralizzato (database), ogni nodo interagisce con l'autorità centrale che garantisce la transazione. In linea di principio, poiché nella blockchain i dati sono archiviati su tutti i nodi del sistema, in caso di attacco informatico non esiste un singolo punto di guasto, quindi il sistema può garantire la continuità. Dal punto di vista operativo, l'intero processo blockchain può essere semplificato in sei fasi elementari [36]:

1. Un nodo attiva una richiesta di transazione;
2. La richiesta di transazione è inviata alla rete;
3. La transazione è inviata ai nodi con autorità di validazione;
4. Se la transazione è validata, il nodo validatore inserisce la nuova transazione in un nuovo blocco contenente altre transazioni valide (processo di consenso);
5. Dopo la validazione del nuovo blocco, il nodo validatore inserisce il blocco nella rete;
6. Il blocco con la transazione aggiornata è ora visibile a tutti i nodi della rete

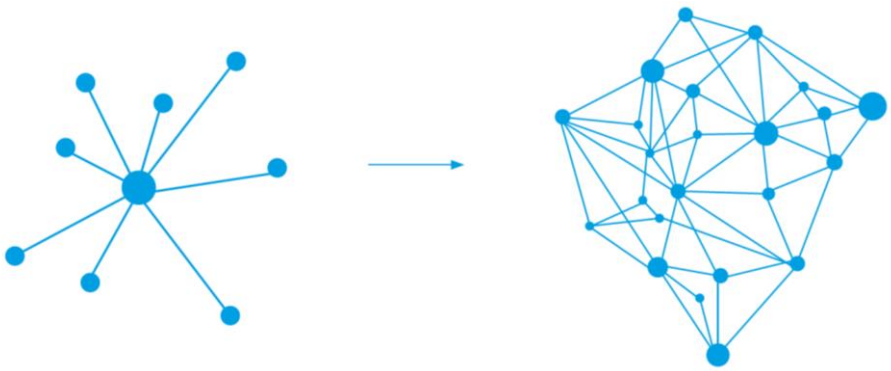


Figura 13 – Sistema centralizzato e distribuito [37]

Nel documento ritenuto il manifesto fondativo/white paper del sistema delle monete elettroniche [38] si propone di effettuare transazioni economiche tra pari senza coinvolgimento di "terze parti" (o intermediari finanziari, e.g. banche) per elaborare e garantire la transazione. In questo schema, la moneta elettronica è una catena di firme digitali. Ogni proprietario trasferisce la moneta al successivo firmando digitalmente un "hash" della transazione precedente e la chiave pubblica del proprietario successivo e aggiungendoli alla fine

della moneta. Un beneficiario può verificare le firme per verificare la catena di proprietà, come mostrato schematicamente in Figura **14**.

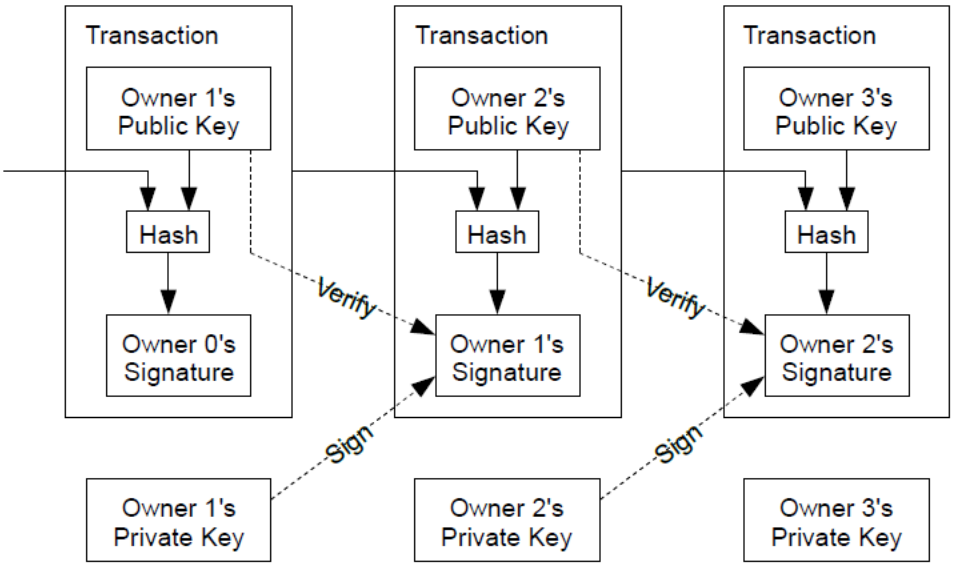


Figura 14 – Schema delle transazioni tra pari [38]

Il sistema ha bisogno di verificare che uno dei proprietari non abbia speso due volte la moneta e questo può essere ottenuto dall'intervento di un'autorità terza centrale fidata che controlli ogni transazione per doppia spesa. In questo caso, dopo ogni transazione, la moneta viene restituita all'autorità centrale che ne emette una nuova per la quale garantisce direttamente. Il modo alternativo di garantire ai beneficiari che i precedenti proprietari non abbiano firmato prima altre transazioni, si basa sulla certezza della prima transazione e sulla conoscenza da parte del sistema di tutte le transazioni effettuate. Per ottenere questo risultato senza una parte terza di fiducia, le transazioni devono essere annunciate pubblicamente e condivise attraverso un sistema che consenta ai partecipanti di concordare un'unica storia dell'ordine con cui le transazioni sono state ricevute. La Blockchain è quindi una catena di blocchi, ciascuno dei quali contiene diverse transazioni. Ogni nodo (e.g. consumatori residenziali, utenti industriali e commerciali, autorità di certificazione, operatori, etc.) può vedere tutte le transazioni, creando così una rete che permette la tracciabilità di tutte le transazioni. In questo modo, qualunque sia il loro ruolo, i partecipanti alla rete sono pienamente responsabili delle loro azioni e dei contratti reciproci.

Tutto ciò risulta tecnicamente possibile attraverso un sistema crittograficamente sicuro, ovvero la tecnologia blockchain, che va a sostituirsi al tradizionale rapporto di fiducia con un intermediario finanziario o banca.

La Blockchain è una struttura informatica che consente la trasmissione, condivisione e archiviazione di informazioni sicure e trasparenti e che funziona senza alcuna entità centrale. È una serie di record di dati immutabili con data e ora gestiti da un cluster di computer non di proprietà di una singola entità. Ciascuno di questi aggregati di dati (cioè il blocco) è protetto e vincolato con gli altri utilizzando principi crittografici.

La transazione, infatti, una volta avvenuta, è protetta tramite la crittografia in maniera permanente, e si caratterizza come un registro contabile condiviso, inalterabile, che favorisce agevolmente il processo di registrazione delle transazioni e la loro tracciabilità. La blockchain si basa quindi su informazioni esatte, immutabili e condivise in maniera simultanea ed archiviate in un registro permanente a cui possono accedere solo i membri autorizzati della rete. La rete blockchain è in grado di tracciare ordini, pagamenti, produzione, account e altro ancora. Questo tipo di innovazione interessa principalmente le transazioni collegate a beni

fisici (e.g. auto, casa, denaro, terreno) o intangibili (e.g. proprietà intellettuale, brevetti, copyright). In una rete blockchain si può trovare qualsiasi cosa che possieda un valore, che può essere rintracciata e scambiata su questa rete, riducendo i rischi e i costi per gli utilizzatori.

I partecipanti alla blockchain accedono al registro contabile (ledger) e alle transazioni che lo contengono. Il registro condiviso consente di annotare una sola volta le transazioni, in questo modo viene eliminata la duplicazione. La transazione, una volta annotata sul registro condiviso della rete, non può essere alterata o manomessa da nessun partecipante della rete. Nel caso in cui la transazione contenga un errore, dovrà essere inserita nuovamente per correggere l'errore e, a garanzia del sistema, le due transazioni saranno visibili poi successivamente.

Quando la transazione avviene, viene registrata come un blocco di dati che contiene informazioni come: chi, cosa, e quanto. Ogni blocco è connesso a quelli che lo precedono e lo seguono, formando una successione di dati. Nei blocchi si può trovare l'ora e la sequenza precisa delle transazioni che si collegano in modo sicuro tra loro, per evitare che uno di loro sia inserito in un blocco esistente oppure subisca un'alterazione. La caratteristica principale della blockchain è quella di bloccare le transazioni in una catena immutabile, ciascun blocco rafforza la verifica del blocco precedente e dell'intera blockchain. Questa struttura consente di evitare la possibilità di una manipolazione da parte di soggetti terzi (hacker) con lo scopo di sabotare il sistema ed il registro delle transizioni che si viene a formare, e permette ai membri della rete di operare in un ambiente protetto e sicuro.

Tra i diversi meccanismi utilizzati per garantire la sicurezza di una blockchain vi sono le funzioni hash crittografiche, ovvero degli algoritmi matematici in grado di mappare dei dati di dimensione arbitraria in una stringa di bit di dimensione prefissata (hash), e progettati per essere funzioni unidirezionali, cioè impossibili da invertire, e sistemi di crittografia asimmetrica. Il sistema di crittografia asimmetrica è caratterizzato da una coppia di chiavi: la prima è detta chiave pubblica e può essere condivisa, la seconda è detta chiave privata e deve rimanere segreta. La chiave pubblica viene impiegata per la codifica dei messaggi ma non è utilizzabile per la decodifica ed è per questo che può essere resa pubblica. Per la decodifica del messaggio è invece necessario usare la chiave privata.

Una volta che i dati sono stati registrati all'interno della blockchain diventa praticamente impossibile modificarli retroattivamente; ogni blocco infatti oltre a memorizzare i dati mantiene anche un timestamp e l'hash del blocco precedente. L'hash, calcolato alla creazione di ogni blocco, rende estremamente semplice rilevare se c'è stato un tentativo di alterazione del passato, in quanto una qualunque modifica al contenuto di un blocco provocherebbe anche una modifica del suo hash value e quindi l'invalidamento dell'intera blockchain dal momento che il blocco successivo non conterrebbe più un riferimento valido al blocco precedente (vedi Figura **15**).

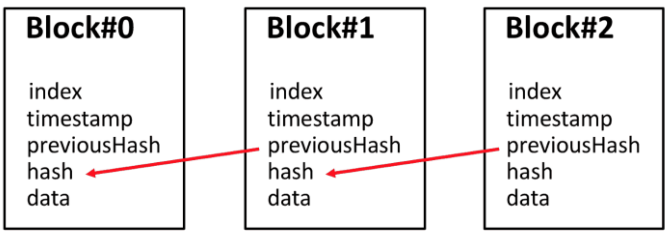


Figura 15 – Sequenza di blocchi

Una delle modalità con cui la blockchain garantisce la sua sicurezza è attraverso la ridondanza e distribuzione: anziché utilizzare un'entità centrale per la gestione della catena, la blockchain utilizza un sistema distribuito e decentralizzato, costituito da una rete di nodi peer-to-peer ognuno dei quali possiede una copia privata

dell'intera blockchain. Per garantire la coerenza tra le varie copie, l'aggiunta di un blocco è globalmente regolata da un protocollo condiviso che realizza il consenso tra i nodi per i quali vale che:

- le basi crittografiche delle blockchain sono: i) la crittografia asimmetrica; ii) le funzioni "hash"
- le basi informatiche delle blockchain sono: i) la rete Internet; ii) l'architettura peer-to-peer

3.1 Classificazione delle blockchain

Possiamo suddividere le blockchain in generazioni, in base alle caratteristiche e funzionalità offerte dalla blockchain stessa, e tipologie utilizzate in particolari ambiti e per determinate esigenze.

Rispetto alle generazioni, le blockchain si possono classificare:

- di *prima generazione* (criptovalute): nate dal modello finanziario di Bitcoin e che operano scambi di moneta virtuale; la velocità di esecuzione delle transazioni è molto lenta (per Bitcoin l'ordine di esecuzione delle transazioni per blocco è ogni 10 minuti), il che lo rende poco utilizzabile in un contesto di utilizzo massivo, così come gli algoritmi di consenso sono esclusivamente di tipo Proof of Work (PoW)
- di *seconda generazione* (digital assets, smart contract e dApp): Nella seconda generazione fanno parte le blockchain nate dal 2013 in poi sotto la spinta di NXT, la prima blockchain pubblica che ha realizzato ed agganciato al PoW un nuovo sistema di consenso chiamato Proof of Stake (PoS). I nodi sono scelti e "premiati" su un'elezione probabilistica da parte della rete. Le velocità delle transazioni e la conferma dei blocchi in rete sono adesso di pochi secondi rispetto ai minuti delle PoW. Nascono digital asset e monete che si appoggiano sul registro della blockchain principale (anticipando il concetto di sidechain) ma non programmabili.
- di *terza generazione* (scalabilità, interoperabilità e IOT o Internet of value, IOV): nella terza generazione nascono blockchain più complesse che cercano di affrontare questioni molto più tecniche legate soprattutto alla scalabilità, alla sicurezza, all'interoperabilità tra le diverse strutture, con costi di mantenimento e di transazione sempre più bassi. Nascono blockchain come Polkadot, Cardano ed Ethereum 2.0 e nuove blockchain pensate per arrivare al milione di transazioni al secondo (TPS) per sostituire i modelli convenzionali di pagamento di circuiti di credito e per immagazzinare molte informazioni immutabili che possano essere poi analizzate da sistemi di intelligenza artificiale. Cambia anche il sistema strutturale della blockchain, si passa dalla catena a blocchi concepita per Bitcoin a sistemi alternativi come Hashgraph tecnology e Dag tecnology
  La tecnologia Hashgraph (Figura **16**) utilizza un sistema di "interrogazioni random" chiamato "Gossip" nel quale qualsiasi nodo può distribuire eventi su nuove transazioni ad altri nodi peer selezionati casualmente i quali a loro volta inviano nuovi eventi ad altri nodi peers casuali. Il processo continua finché tutti i nodi non sono a conoscenza di ciò che è stato generato inizialmente. Questa tipologia di blockchain valida le transazioni molto velocemente, il registro occupa meno spazio, ed il potere computazionale PoW richiesto è decisamente basso.

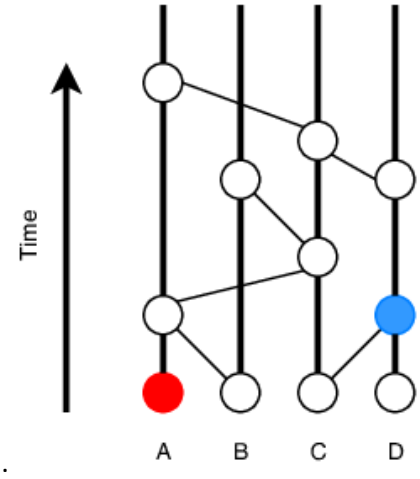


Figura 16 – Tecnologia Hashgraph

La tecnologia Directed Acyclic Graph (DAG, Figura **17**) è una blockchain in cui i nodi sono rappresentati da sfere, e le linee che le collegano, sono dirette nella stessa direzione. Sono aciclici, cioè non si può tornare al punto di partenza se inizi e segui il grafico in un dato momento. Uno dei vantaggi della tecnologia è che non ci sono blocchi quindi, a differenza delle criptovalute su blockchain come Bitcoin o Ethereum, non c'è problema di dimensione del blocco. La tecnologia DAG viene anche utilizzato per applicazioni che richiedono migliaia di transazioni al secondo e scalabilità.

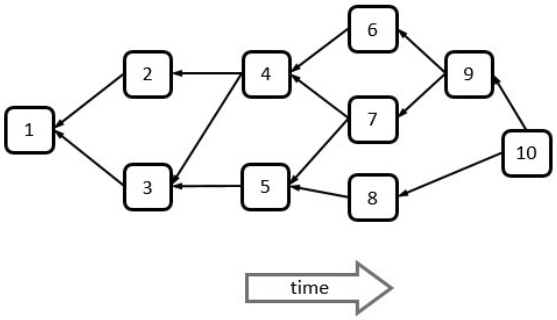


Figura 17 – Tecnologia DAG

Le blockchain si possono classificare inoltre come:

- *blockchain pubbliche*: si tratta di reti open-source in cui chiunque può avere la possibilità di accedere e prenderne parte. I più noti esempi di blockchain pubbliche sono Bitcoin, Ethereum, Monero, Dash, Litecoin, Zcash e altre. Non richiedono nessuna autorizzazione da terze parti, sono aperte e trasparenti e questo permette a qualunque utente di scaricare la blockchain entrando nel circuito. Essendo un ambiente aperto, potrebbero esserci degli inconvenienti dovuti alla necessità di una notevole potenza di calcolo e nessuna privacy per proteggere le transazioni. Il codice per operare in una blockchain pubblica è visibile a tutti, in questo modo tutti possono scaricare il codice ed effettuare la transazione nel network. Questo permette ai partecipanti di determinare quale blocco aggiungere alla catena e la forma della blockchain. Attraverso il block explorer, registro pubblico delle transazioni, tutti possono accedere e visualizzare le transazioni anonime. Essendo una rete libera, non esiste un responsabile per la conferma delle transazioni, per questo motivo ogni partecipante

del gruppo può controllare tutto. Quest'attività si svolge con l'aiuto del consenso decentralizzato tramite meccanismi chiamati Proof of work (PoW), Proof of stake (PoS). Che partecipano nell'esecuzione del consenso.

- *blockchain private*: per l'accesso in queste blockchain è obbligatorio essere autenticati da terze parti centralizzate o decentralizzate, l'accesso pertanto può essere limitato esclusivamente ai membri della stessa rete che possono limitare chi può effettuare le transizioni e verificarle. L'utente deve ottenere l'autorizzazione da parte dell'amministratore, prima di entrare nel network. L'amministratore del network ha il compito di gestire le autorizzazioni ad accedere dei nuovi utenti e anche di revocarle. Le blockchain private sono utilizzate principalmente nella gestione dei database, nell'ambito della revisione contabile e altri campi. Una singola azienda può usufruire della blockchain privata per evitare di rendere pubblici i propri dati. Sarà cura dell'autorità centrale occuparsi di garantire l'entrata agli utenti autorizzati
- *blockchain consorzio*: nelle blockchain consorzio, alcuni nodi controllano il processo del consenso e altri nodi possono partecipare nelle transazioni[5]. Il ricorso alla blockchain consorzio avviene nel momento in cui le organizzazioni sono pronte per condividere la blockchain, limitando l'accesso e mantenendo sicuri i dati dagli utenti esterni. Le reti consorzio sono in parte pubbliche e in parte private. Un consorzio di blockchain si articola in due tipi di utilizzatori: i) gli utilizzatori che controllano la blockchain e decidono chi ha il permesso di entrare nella blockchain, ii) gli utilizzatori che possono accedere alla blockchain. In questo caso le decisioni non sono prese solo da un singolo amministratore, ma anche da altre parti coinvolte, per il beneficio dell'intera rete. I membri del consorzio possono eseguire un nodo, prendere decisioni, eseguire transazioni sulla catena, controllare e revisionare la blockchain.
- *blockchain ibride*: la blockchain ibrida è una combinazione di blockchain pubblica e privata. Attraverso questo tipo di blockchain si è in grado di decidere quali informazioni rendere pubbliche e quali mantenere private.

3.2 Elementi di una Blockchain

Una blockchain è composta da vari elementi e componenti logici:

- *Nodo*: utente o computer all'interno dell'architettura della blockchain, ognuno ha una copia indipendente dell'intera catena della blockchain;
- *Transazione*: la parte più piccola del blocco del sistema della blockchain (record, informazioni) che servono come finalità della blockchain;
- *Blocco*: struttura utilizzata per contenere un set di transazioni distribuito in tutti i nodi del network;
- *Catena*: una sequenza di blocchi in un ordine specifico;
- *Miners*: nodi specifici che sono eseguiti nel processo di verifica prima di aggiungere qualcosa alla struttura della blockchain;
- *Consenso*: una serie di regole per eseguire le operazioni;
- *Nodo applicativo*: Ciascun computer connesso attraverso Internet necessita di installare un software per entrare a farne parte; prendendo in esame il caso di Bitcoin, ogni computer deve scaricare ed utilizzare l'applicazione Bitcoin[6] diventando un nodo del sistema ed entrare nella blockchain;
- *Registro condiviso*: il registro condiviso è una struttura gestita all'interno del nodo, una volta che il nodo applicativo è in funzione, si può visualizzare il registro.

[5] https://www.r3.com
[6] https://github.com/bitcoin/bitcoin

3.3 Algoritmo di consenso

L'algoritmo di consenso è una "procedura" che permette a utenti o dispositivi che partecipano attivamente al sistema, di coordinarsi e prendere decisioni in modo distribuito verso una sola fonte. In un sistema tradizionale il "margine di errore" è raggiunto distribuendo varie repliche nel network. L'algoritmo di consenso aggiorna le repliche condivise e verifica che si riferiscano allo stesso dispositivo. Le repliche sono importanti perché se uno o più nodi dovesse rompersi i dati non saranno dispersi.

Il principale compito dell'algoritmo è di fare in modo che i nodi con gli stessi input produrranno gli stessi output. Le repliche sono in comunicazione per costruire il consenso. Dopo aver verificato la sua validità, il blocco contenente la transizione si aggiunge alla catena che viene identificata da tutti gli altri nodi. A un nodo si può aggiungere un blocco con diverse transazioni distribuendo ad un altro nodo che richiede di aggiungere un nodo alla catena. Questo meccanismo presenta però un limite: se ogni nodo richiede un nodo specifico, si verifica una situazione caotica. Per questo motivo, si ricorre all'algoritmo del consenso, che tiene un accordo tra tutti i nodi che dovrebbero essere aggiunti nei vari blocchi.

Esistono diverse tipologie di algoritmo di consenso. Di seguito se ne descrivono alcune:

- *Proof of Work (PoW)*: è il primo protocollo usato per le criptovalute che permette agli utilizzatori di blockchain di ottenere il consenso attraverso la soluzione ad un problema matematico che richiede un'elaborazione computazionale molto grande. Questo protocollo riguarda l'algoritmo SHA-256, Merkle tree e peer to peer (P2P) network per creare e verificare i blocchi nel network blockchain. PoW è sviluppata per blockchain pubbliche e per il processo mining: i) per costruire un nuovo blocco, un puzzle crittografico deve essere risolto dal miner e gli utilizzatori che riescono a risolvere il puzzle si avvalgono di una ricompensa dal network; ii) il protocollo conserva le transazioni ed in ogni blocco consiste nel set di transazioni precedenti; iii) le transazioni saranno accettate se la firma è valida nel network. Il protocollo PoW sostanzialmente previene il meccanismo del double spending ed è un protocollo "power consuming" che necessita di una quantità elevata di energia, per questo motivo rimane accessibile solo ai miners che partecipano attivamente al network.
- *Proof of Stake (PoS)*: è un protocollo che seleziona il validatore e la ricompensa in base a diversi sistemi "variabili" come, ad esempio, la quantità di coins bloccate in un wallet in un arco temporale lungo, che ne attesta l'affidabilità e quindi la non volontà di attaccare la rete. Per poter attaccare la rete è necessario infatti detenere il 51% del valore totale, procedimento privo di senso logico per l'attaccante perché sarebbe troppo costoso e l'effetto produrrebbe meno del valore investito. La PoS ha molte peculiarità e richiede un minore utilizzo di energia del PoW Originariamente era impiegato per le blockchain private e in ambito finanziario. La rete è equilibrata in quanto anche chi detiene un numero basso di coins può ottenere ricompense. Nel PoS i validatori saranno scelti casualmente e la catena di blocco tiene traccia dei validatori. Il protocollo Pos, risulta efficiente e vantaggioso per molti soggetti interessati. Per difendersi dagli attacchi informatici, viene applicata una penalità ad eventuali partecipanti. Infatti, proprio i soggetti interessati possono influenzare il network evitando penalità.
- *Byzantine Fault Tolerance (PBFT)*: si basa sulla piattaforma open Hyperledger, supportata dalla fondazione Linux e Tendermint. L'algoritmo PFBT è costruito sulle moderne tipologie di blockchain che utilizzano l'approccio denominato consensus voting-based che sostanzialmente risolve il problema dei cosiddetti "Generali Bizantini" [39], un problema informatico che viene fuori quando bisogna trovare un accordo comune su un obiettivo comune, anche quando in rete esistono nodi che falliscono o che agiscono in modo "disonesto". Il modo per raggiungere il consenso in questi tipi di sistemi distribuiti BFT è quello di avere almeno ⅔ o più nodi affidabili e onesti; i nodi sono ordinati in sequenza con un nodo primario (leader) e tutti gli altri secondari (backup), in qualsiasi momento un nodo secondario può diventare primario qualora il primario abbia un guasto. I messaggi di risposta scambiati tra i nodi devono avvenire in un certo periodo di tempo altrimenti diventa "difettoso" e se

più nodi assegnano la stessa risposta nello stesso arco temporale, significa che il valore è "corretto". Più il numero di nodi aumenta, più il sistema diventa sicuro.

- *Proof of Activity (PoAc)*: si tratta di un protocollo di natura ibrida che unisce sia il PoW che PoS. Le transazioni sono prodotte dai miners utilizzando un Proof of Activity. Il suo compito non riguarda solo di assicurarsi che le transazioni siano autentiche ma anche di raggiungere il consenso da parte dei miners. Un nuovo blocco è validato da un gruppo causale presente nel sistemae la validazione del blocco è completata quando le firme sono state raccolte da tutti i validatori del gruppo. Qualora non fossero disponibili tutte le firme, si procede a selezionare un altro gruppo casuale.
- *Proof of Capacity (PoC)*: questo protocollo produce un insieme di dati chiamati plots che occupano lo spazio di archiviazione. I dispositivi mining collegati alla rete si servono dello spazio sul disco rigido per decidere lo spazio di mining ed effettuare in seguito la convalida delle transazioni.
- *Proof of Authority (PoAu)*: in questo protocollo i blocchi richiedono un "permesso" speciale ai membri che possono effettuare delle modifiche nella blockchain. All'interno dell'algoritmo, i validatori partecipano con la propria identità. I membri del network si affidano ai nodi autorizzati, infatti i nodi e i blocchi sono accettati se la maggior parte dei nodi autorizzati firma il blocco. Il numero limitato di validatori è la caratteristica principale che rende il sistema scalabile.

3.4 Blockchain e Internet delle Cose

L'Internet of Things (IoT) rappresenta l'insieme di connessioni internet operate in modo automatico da oggetti collegati alla rete e capaci di comunicare il proprio status e dati, accedendo ad informazioni utili per il proprio funzionamento. Gli oggetti (e.g. macchinari industriali, luoghi fisici, elettrodomestici etc.) possono collegarsi autonomamente alla rete interconnettendosi e diventando più intelligenti ed efficienti scambiandosi informazioni fra loro.

Il concetto di cloud computing fornisce varie funzionalità all'IoT come l'analisi dei dati e l'elaborazione dei dati. Infatti, questo sviluppo ha contribuito a preparare nuovi meccanismi per accedere e condividere le informazioni. Nell'IoT è utilizzata un'architettura centrale ed il network è di natura trasparente, per questo i fruitori del sistema non si affidano al sistema IoT per condividere dati sensibili. A causa della natura condivisa, ogni nodo potrebbe dividersi e subire attacchi informatici. I nodi aggrediti lavorando simultaneamente potrebbero condurre al collasso del sistema. Uno dei punti maggiormente critici riguarda anche l'autenticazione dei dati e la riservatezza che diventa fondamentale quando il sistema può condividere o scambiare i dati.

La Blockchain può rappresentare una tecnologia complementare all'IoT, capace di aumentarne la sicurezza, aggiungendo immutabilità e integrità alle transazioni basate su IoT. La tecnologia Blockchain consente di proteggere il protocollo di comunicazione, autenticare le apparecchiature che inviano informazioni e automatizzare azioni e processi. Inoltre, un aspetto importante della blockchain è la sua scalabilità, il che significa che più dispositivi sono collegati alla blockchain, più diventa sicura [40].

Infatti, un approccio decentralizzato eliminerebbe i singoli punti di errore, creando una struttura resiliente su cui i dispositivi IoT possono funzionare. Come detto, le strutture decentralizzate, autonome e trustless della blockchain ne fanno un componente ideale per diventare un elemento fondamentale delle soluzioni IoT, incrementandone la sicurezza. Infatti, in una rete IoT, la blockchain può conservare un registro immutabile della cronologia dei dispositivi senza la necessità di un'autorità centralizzata. Di contro, i dispositivi IoT hackerati possono trasmettere le proprie informazioni alla rete anche se false.

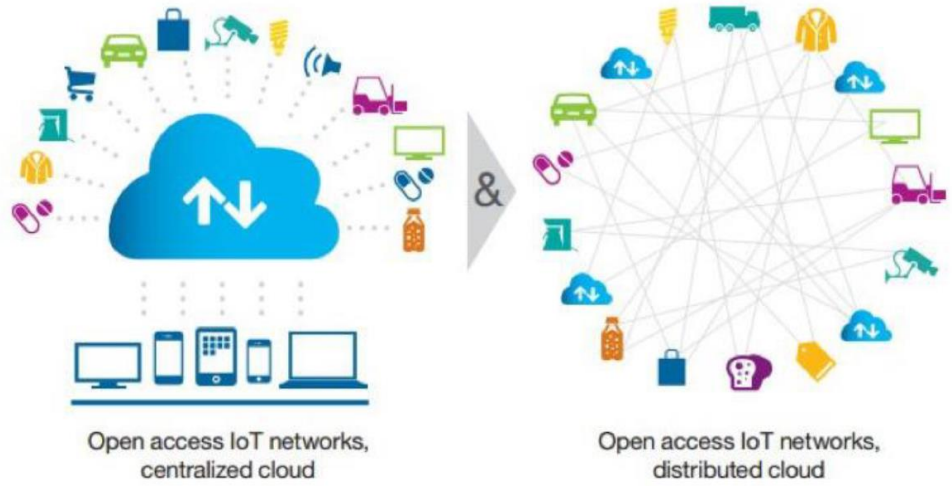


Figura 18 – a) Rete IoT centralizzata, b) Rete IoT decentralizzata [41]

3.5 La tecnologia Blockchain nel settore energia

L'autoconsumo di energia a livello residenziale è tradizionalmente possibile nella forma da un unico impianto ad un unico consumatore finale, con l'eccesso di produzione immesso in rete. Questo scenario è in via di evoluzione, grazie ai cambiamenti normativi in atto conseguenti all'emanazione della Direttiva europea 2018/2001 [42], che introduce la possibilità di autoconsumo collettivo e di associazioni e comunità energetiche, ovvero di utenti di un ambito geografico locale fra i quali è consentito lo scambio e la condivisione dell'energia prodotta da fonti rinnovabili. In particolare, l'art. Articolo 23 pone l'attenzione sull'utilizzo dell'energia rinnovabile negli impianti di riscaldamento e raffrescamento. Il successivo art.42 bis del Decreto 162 del 30/12/2019, nonché la deliberazione n.318/2020 del 4 agosto 2020 di ARERA, dettano la linea a livello nazionale anche per la regolazione delle partite economiche all'interno delle Comunità Energetiche, prospettando l'introduzione di un sistema di tariffe incentivate per l'energia prodotta e consumata all'interno di quest'ultime.

In questo scenario si apre la strada alla difusione di impianti decentralizzati di produzione ed autoconsumo finalizzati anche allo scambio dell'energia in eccesso, con riduzione di dispersioni e costi di trasporto e distribuzione. La tecnologia blockchain, di conseguenza, rappresenta uno strumento ideale per supportare questo processo di decentralizzazione, contribuendo anche a ridurre i sovraccarichi e gli sbilanciamenti derivanti dall'immissione in rete di energia non consumata localmente.

Primari enti internazionali (e.g. World Economic Forum WEF [43], Agenzia internazionale per le energie rinnovabili IRENA [37] e nazionali (e.g. Agenzia tedesca per l'energia DENA [44], Department of Industry, Science, Energy and Resources in Australia [45]) hanno evidenziato il ruolo chiave della tecnologia blockchain come fattore abilitante dell'energia rinnovabile, evidenziando il potenziale delle micro-grid emergenti supportate da sistemi informatici distribuiti, in cui consumatori e prosumer scambiano energia. Tuttavia, numerosi sono ancora gli ostacoli in termini di sviluppo tecnologico e scenario normativo-regolatorio che ancora devono essere affrontati.

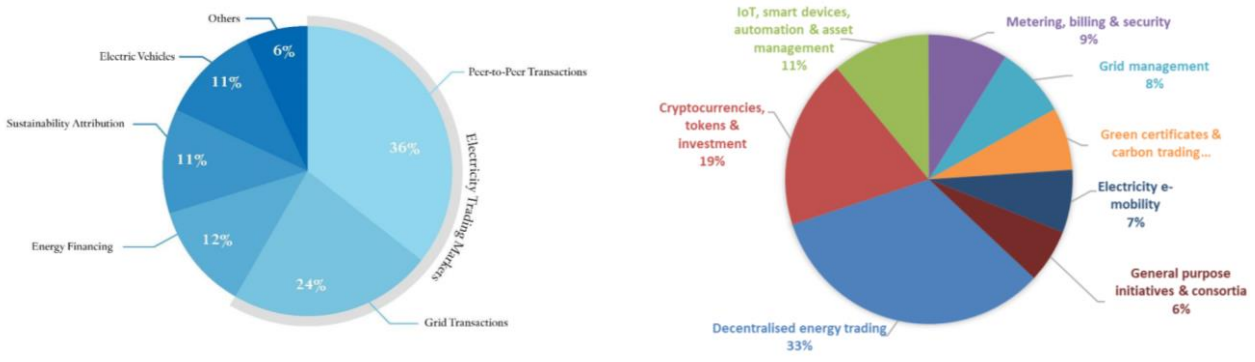
Nel mondo dell'energia (e in particolare dell'energia elettrica) si assiste alla rapida crescita delle risorse energetiche distribuite (DER). Una delle applicazioni più immediate della blockchain nel settore energetico è il suo potenziale impatto nel settore del *trading* di energia. Il processo di pagamento è infatti rimasto indietro rispetto alla consegna e per questo è necessario un vero e proprio settore commerciale nelle aziende di utility. In una logica di rete distribuita, il volume delle transazioni aumenterà man mano che aumenteranno i

produttori di energia e quindi la tecnologia Blockchain potrebbe velocizzare il pagamento consentendo che questo avvenga automaticamente non appena completata la transazione, ad esempio mediante *smart contract*. A riguardo, la tecnologia Blockchain consente di abbassare i costi della transazione, sia in relazione al processo di verifica ma, soprattutto, per il fatto che elimina la necessità di una terza parte fidata [46]. Un ulteriore obbiettivo che può essere raggiunto mediante la tecnologia blockchain per i mercati *peer-to-peer* è quello di aumentare la partecipazione del cliente al mercato dell'energia e mettere i clienti al centro della transizione energetica, incentivando di fatto la penetrazione delle fonti di energia rinnovabile su piccola scala e aumentando la flessibilità della rete [35]. Oltre al *trading peer-to-peer* nelle micro-reti, la blockchain nel settore energetico può incentivare accordi diretti tra produttori e consumatori, il *demand-side-management*, la gestione della rete, la gestione dell'accumulo di energia, le energy-communities, la gestione di un portafoglio di centrali di produzione, etc.

Tuttavia, il settore dell'energia è in generale caratterizzato da una struttra centralizzata su larga scala. Di conseguenza, risulta difficile controllare e tracciare l'energia (elettrica o termica) dal fornitore al consumatore, a meno di non passare dal centro della rete. Di contro, le blockchain pubbliche e senza autorizzazione permetterebbero al maggior numero di persone di entrare a partecipare al sistema, a discapito però della velocità di transazione e con costi dei meccanismi di consenso più elevati. A riguardo si consideri il noto "*trilemma della blockchain*" che afferma che queste sono capaci di garantire solo due tra le caratteristiche di sicurezza, scalabilità e decentralizzazione [47].

Anche se la tecnologia Blockchain può dirsi ancora in fase di ricerca e sviluppo, ad essa viene attribuito un potenziale significativo nel settore dell'energia e, in particolare per gli aspetti legati alla sicurezza e scalabilità. Inoltre, i dispositivi IoT possono essere utilizzati per monitorare i dati (non solo quelli relativi ai consumi ma anche i dati di comfort e inquinamento) e interagire con i sistemi di controllo su una blockchain che, a sua volta, può utilizzare queste informazioni con specifici smart contract capaci di automatizzare e controllare i dispositivi IoT connessi, al fine di garantire efficienza energetica e comfort termico.

Ad oggi, nel campo dell'energia, numerose iniziative hanno utilizzato blockchain solo come database sicuri per tracciare la generazione e il consumo di energia, in genere sotto forma di token che rappresentano crediti di energia rinnovabile. Nel mondo sono numerosi i progetti aperti sull'applicazione della tecnologia Blockchain al settore energia, quasi tutti relativi all'energia elettrica (vedi Figura **19**a) e solo pochi di questi sono in una reale fase di sviluppo, a causa di numerosi aspetti che devono essere ancora chiariti e che riguardano l'ambito tecnologico, economico e regolatorio. A settembre 2019 si contavano 140 iniziative nel settore energia, distribuite come riportato in Figura **19**b.



a) b)

Figura 19 –a) Blockchain settore elettrico (lug-2018 [48]), b) Blockchain settore energia (set-2019 [41])

Un recente studio di IRENA [37] riporta che oltre 150 aziende stanno sviluppando progetti pilota che utilizzano blockchain per il settore energetico [49]. In particolare: i) più del 46% di queste start-up di

blockchain-energia (che per il 74% hanno avviato la loro attività tra il 2016 e 2018 e questo riflette lo stato di sviluppo iniziale di questa tecnologia) sono in Europa; ii) lo sviluppo maggiore si ha negli Stati Uniti, Germania e Paesi Bassi; iii) l'utilizzo più comune è il trading di energia tra pari; iv) circa il 50% dei progetti utilizza la blockchain Ethereum.

Nel campo dell'energia, gli smart contract consentono ai consumatori ed ai prosumer di partecipare attivamente al mercato, acquistando e vendendo energia elettrica in tempo reale (i.e. seguendo i principi della domanda e dell'offerta) senza il coinvolgimento di un'autorità o di un intermediario di fiducia (e.g. banca, azienda di utility). Il presupposto per questo tipo di scenario è rappresentato dalla disponibilità di smart meter, che consentono la gestione in tempo reale dei dati di produzione e consumo, con la possibilità anche di generare in maniera contestuale i correlati certificati di origine, abilitando di fatto sistemi energetici basati sulle transazioni tramite blockchain [50]. Inoltre, l'enorme numero di utenti potenzialmente connessi alla rete attraverso un software e smart meter può determinare lo sbilanciamento della rete e questo aspetto deve essere efficacemente governato.

La trasformazione del sistema da centralizzato a decentralizzato, con un mercato dell'energia diffusamente bidirezionale (nel settore elettrico) o anche solo potenzialmente bidirezionale (nel settore dell'energia termica), richiede un forte supporto tecnologico per il coordinamento degli attori tradizionali (e.g. aziende di trasporto e distribuzione, venditori, consumatori, produttori e prosumer) che può essere garantito da sistemi blockchain. La tecnologia blockchain può infatti supportare in maniera a costi contenuti e in maniera rapida ed efficace:

- transazioni di energia tra pari, ovvero la possibilità di vendere liberamente l'energia prodotta localmente a prezzi di mercato in una transazione tra pari; questo porterà presumibilmente ad una maggiore diffusione delle rinnovabili distribuite, a condizione che questo venga opportunamente normato e regolato;
- gestione della rete, attraverso la condivisione di regole specifiche create dalla piattaforma e progettate per garantire che tutti i flussi di alimentazione e accumulo siano controllati automaticamente ed effettuati nel rispetto del bilanciamento continuo tra domanda e offerta. Questo può avvenire, ad esempio, mediante una blockchain autorizzata (privata) supervisionata da un DSO/TSO consentendo il tracciamento delle transazioni e l'intervento in caso di sbilanciamento.
- gestione dei certificati di origine dell'energia rinnovabile, basati sulla misurazione dell'energia prodotta. Dal momento che questi certificati possono essere scambiati all'interno dell'Unione Europea e possono essere utilizzati per fornire la prova che l'elettricità consumata era effettivamente rinnovabile e che utilizzi fraudolenti (e.g. vendita doppia o plurima) siano impediti attraverso un sistema basato sulla crittografia e il consenso decentralizzato, come richiesto dalla normativa stessa [51] senza necessità di un'autorità centrale di verifica;

I mercati dell'energia possono essere classificati come [52]:

- espliciti, in cui i DSO e gli utenti possono negoziare la flessibilità attraverso scambi bilaterali (attraverso un meccanismo iterativo di scoperta dei prezzi in cui Il DSO aumenta progressivamente la compensazione per la flessibilità fino al soddisfacimento dei suoi fabbisogni basandosi sulla dichiarazione iniziale della produzione/consumo di energia da parte dei partecipanti) o a doppia asta (che richiede la raccolta della richiesta di flessibilità e disponibilità e il calcolo del costo di equilibrio per la flessibilità negoziata)
- impliciti, in cui i DSO o gli aggregatori possono influenzare indirettamente i prezzi locali; in questo caso la remunerazione per la flessibilità è fissata dal DSO senza richiedere l'interazione di altri partecipanti al mercato che quindi non influenzano il prezzo della remunerazione finale per la flessibilità.

Nella realtà, la stessa definizione di flessibilità è critica, in quanto si basa sull'utilizzo di previsori per valutare l'evoluzione della domanda degli utenti finali. Nel caso in cui i partecipanti al mercato devono fornire le proprie previsioni energetiche (in questo caso possono utilizzare informazioni locali private aumentando

l'accuratezza delle previsioni), il calcolo della flessibilità può essere soggetto a sfruttamenti da parte dei partecipanti al mercato, e quindi a comportamenti fraudolenti.

L'obiettivo del mercato energetico locale è massimizzare il proprio benessere, riducendo i costi per i consumatori e aumentando i ricavi dei produttori/fornitori. Allo stesso tempo, devono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

- deve essere garantita un'equa redistribuzione del denaro tra gli attori del mercato, in funzione del loro contributo al risultato atteso del mercato;
- il mercato deve indurre una riduzione della varianza nel profilo di potenza aggregato;
- il mercato deve essere compatibile con l'attuale quadro legale di fatturazione dell'energia, considerando sia l'energia prodotta che quella consumata in una determinata fascia oraria;
- il mercato deve incentivare l'autoconsumo a livello locale.

Strepparava et al. [52] propongono un meccanismo di mercato basato su prezzi dinamici con dipendenza funzionale dall'energia istantaneamente prodotta o consumata all'interno della rete locale, meccanismo noto come Automated Market Making (AMM), che sta recentemente guadagnando popolarità nelle applicazioni di finanza decentralizzata, in particolare per i contratti intelligenti e le criptovalute. Un esempio di formazione dei prezzi può tenere conto dei seguenti aspetti:

- l'energia consumata/immessa dalla/nella rete esterna viene remunerata come se il consumatore/produttore non facesse parte della comunità energetica;
- l'energia consumata/prodotta internamente alla comunità energetica è pagata/remunerata ad un prezzo complessivo inferiore/superiore alla tariffa standard del fornitore di energia e DSO, con uno sconto proporzionale al rapporto tra l'energia totale prodotta e quella consumata;
- l'energia autoconsumata è equamente ripartita tra i Partecipanti alla comunità energetica proporzionalmente al loro consumo e alla loro produzione;
- I prezzi di acquisto e vendita istantanei sono dinamici, ma per una determinata fascia oraria sono gli stessi per tutti.

Uno smart contract applicato al trading di energia P2P può essere descritto sinteticamente come segue [53]:

1. all'inizio del processo è richiesto di comunicare la produzione e il prezzo offerti dai produttori;
2. l'offerta viene quindi comunicata ai consumatori e inizia l'asta (c'è una varietà di possibili tecniche per cancellare il prezzo, quella più comunemente usata è la Doppia Asta che classifica le offerte e le richieste in ordine crescente e decrescente e valuta un prezzo di compensazione);
3. viene valutata la fattibilità fisica delle assegnazioni attraverso la verifica dei flussi della rete;
4. lo smart contract viene aggiornato con l'esito dell'asta;
5. la transazione energetica viene verificata utilizzando la misura dello smart meter del produttore;
6. si controllano le quantità effettivamente scambiate applicando eventuali compensazioni;
7. viene autorizzato il pagamento ai produttori e la transazione diviene irreversibile e viene archiviata.

La *Smart grid* è un'infrastruttura critica che può essere notevolmente migliorata con la tecnologia blockchain [54]. Le smart grid utilizzano le tecnologie di comunicazione e controllo nelle reti elettriche, al fine di massimizzare l'efficienza energetica e la sicurezza della rete nei processi di generazione, trasporto, distribuzione e consumo e micro-produzione di energia. L'attuale struttura delle smart grid e la corrente modalità di gestione centralizzata presenta evidenti limiti per la gestione delle fonti di energia rinnovabile distribuita e degli accumuli.

Il governo centrale della rete non è capace di assumere decisioni di programmazione e bilanciamento tempestive sia per l'immissione di energia rinnovabile prodotta che per la gestione degli accumuli distribuiti. Inoltre, l'aumento del numero di prosumer ha determinato un aggravio gestionale per il sistema di governo della rete, rendendo impossibile in molti casi un'efficace risposta alla domanda. In alcuni casi sarebbe infatti più conveniente per alcuni consumatori acquistare elettricità dai prosumer limitrofi, rendendo la gestione dell'energia ancora più impegnativa. Ciò di fatto spinge l'organizzazione della rete a trasformarsi da un modello centralizzato ad uno decentralizzato.

D'altra parte, esistono crescenti problemi di sicurezza sulle reti intelligenti centralizzate. Attacchi dannosi esterni, affidamento a terze parti e perdita di privacy hanno causato enormi danni economici delle reti elettriche, la cui gestione e controllo è spesso affidata alla supervisione umana. L'aumento dei consumatori e dei prosumer e dei punti di accumulo e di scambio (si pensi anche ai punti cosiddetti V2G, vheicle-to-grid per la mobilità elettrica) nella rete determina il proliferare di sensori intelligenti, capaci di generare enormi quantità di dati difficilmente gestibili da un unico server centralizzato. Inoltre, è anche inefficiente per il centro di controllo mantenere la sicurezza per così tanti dispositivi intelligenti in caso di intrusioni dannose.

In particolare, la combinazione di veicoli energetici e rete elettrica aggiunge una grande flessibilità alla rete, in quanto ogni veicolo rappresenta di fatto una unità di accumulo di energia indipendente. Tutto questo, di fatto apre lo scenario alla tecnologia blockchain a supporto e integrazione delle smart grid. In primo luogo, una Blockchain può trasformare la gestione centralizzata della rete in una gestione intelligente distribuita, fornendo una supervisione decentralizzata, un'accurata risposta alla domanda, un equilibrio tra domanda e offerta e una distribuzione ottimizzata dell'energia elettrica. Ciò consente alla rete intelligente di soddisfare la tendenza in crescita dei prosumer. In secondo luogo, gli utenti possono unirsi alla blockchain come nodi per la verifica, la supervisione dei dati energetici e persino la formulazione di regole corrispondenti secondo i loro desideri attraverso contratti intelligenti. Infine, la natura decentralizzata di una blockchain può trasformare una smart grid da gestione centralizzata dello storage a gestione distribuita multipunto. La rete intelligente abilitata dalla tecnologia blockchain può realizzare un'efficace programmazione dell'accumulo di elettricità per ridurre al minimo la perdita di energia.

La natura finanziaria della blockchain la rende una piattaforma ideale per il commercio di elettricità nelle reti intelligenti, attraverso flussi di dati, di energia e di denaro ottimizzati nel processo di scambio di energia. Da un lato, il commercio di energia in una rete tradizionale è solitamente centralizzato e quindi a rischio di monopolio. La natura decentralizzata della blockchain può consentire ai prosumer di unirsi alla rete e scambiare elettricità in modo P2P. Nel frattempo, la trasparenza della blockchain consente agli utenti di verificare i dati della rete, il che rende le transazioni e i dati relativi all'energia della rete aperti e affidabili. D'altra parte, la blockchain può fornire un flusso di cassa sicuro per il trading di energia. La criptovaluta ha dimostrato la sua sicurezza, credibilità e convenienza nell'elaborazione dei pagamenti. Il meccanismo di incentivazione della blockchain e dei contratti intelligenti può realizzare prezzi dinamici e aste flessibili tra consumatori e produttori.

Anche la sicurezza e la privacy della rete elettrica possono aumentare con un sistema basato su Blockchain: l'algoritmo di consenso può migliorare efficacemente la robustezza del sistema e resistere ad attacchi dannosi. Vale la pena ricordare che la blockchain non fa affidamento su terze parti, il che impedisce efficacemente la fuga di informazioni private a terzi. Considerando il gran numero di utenti, l'anonimato della blockchain può proteggere le informazioni sull'identità.

Infine, una Blockchain è adatta per la gestione dei punti V2G. Ogni veicolo è responsabile dell'accumulo e della trasmissione di energia e può essere utilizzato come nodo blockchain per il mining e il raggiungimento del consenso. Gli algoritmi di consenso leggero richiedono una bassa potenza di calcolo e sono adatti per veicoli energetici.

Di seguito si riportano sinteticamente le fasi tipiche di produzione-richiesta-asta:

- Produzione di energia: Il prosumer produce energia e la scambia con i rivenditori o direttamente con un consumatore attraverso uno smart meter, fondamentale per collegare il prosumer ed il consumatore all'intera infrastruttura energetica. Per poter operare con questa funzionalità, lo smart meter deve avere la possibilità di connettersi alla blockchain attraverso un indirizzo Internet e riconoscendo un trasferimento di energia in ingresso e in uscita in termini di token tramite Smart Contract verso il prosumer.
- Richiesta di energia: Il consumatore (o un prosumer che agisce come consumatore) richiede energia (cioè token) costruendo una richiesta contenente la quantità di energia necessaria fornendo come parametri di input la quantità di energia richiesta e due timestamp d1 e d2, che servono come scadenze dell'asta. Una blockchain pubblica permette a tutti i partecipanti di ricostruire il grafico

delle interazioni e delle transazioni tra gli utenti. A questo punto si avvia un'asta con una scadenza fissa d1.
- Asta: Qualsiasi prosumer può partecipare all'asta offrendo un prezzo per questa fornitura e una funzione di hash crittograficanasconde il prezzo offerto agli altri concorrenti.

Ning et al. [55] propongono un algoritmo di scambio di energia elettrica P2P che seleziona le migliori corrispondenze tra domanda e offerta in un arco temporale di 24 ore per ridurre al minimo gli squilibri della rete. Sembra tuttavia irrealistico che tutti i nodi abbiano accesso alle letture di tutti i contatori e quindi il ruolo del DSO resta di fatto centrale.

Yu et al. hanno elaborato una soluzione energetica *decentralizzata* in cui la tecnologia blockchain viene utilizzata per una regolazione istantanea e trasparente tra due sistemi connessi: un MES (Multy-carrier Energy Systems) distribuito [56–58] a livello distrettuale che include sottosistemi di riscaldamento ed elettricità (come il teleriscaldamento) e i metodi utilizzati nel TES (Transactive Energy Systems) [59,60]. Gli obiettivi di tale soluzione sono:

- incrementare l'utilizzo di energie rinnovabili;
- minimizzare i consumi energetici ottimizzando i costi in bolletta;
- garantire trasparenza e immediatezza nella presentazione dei costi relativi ai consumi per gli utilizzatori;
- aumentare la consapevolezza del concetto di comunità energetica negli utilizzatori [61];

Secondo Di Silvestre et al. [36] a blockchain rappresenta una soluzione interessante per la transizione del sistema energetico (elettrico) verso una struttura decentralizzata efficiente che incentivi l'implementazione di FER (e.g. impianti fotovoltaici), altri generatori distribuiti e dispositivi ICT nei sistemi energetici. Infatti, la tecnologia blockchain offre nuove opportunità legate alla certificazione della produzione da FER, alla sua tracciabilità, al controllo della rete, al coordinamento delle risorse distribuite (generatori, batterie, carichi flessibili, ecc.), alla protezione del sistema (contro sovracorrenti, fenomeni di reverse power flow, eccessiva sovratensione, distacco di generatori e mancanza di produzione, ecc.) e la partecipazione dei prosumer al mercato. Molti dei problemi che i gestori di rete (DSO e TSO) stanno attualmente affrontando sono infatti legati a: i) partecipazione dei piccoli prosumer ai programmi di Demand Response (DR); ii) aggregazione di risorse locali per la partecipazione ai Mercati della Capacità e del Bilanciamento; iii) necessità di nuovi servizi accessori da unità distribuite; iv) supervisione e coordinamento dei suddetti processi.

In Tabella **10** si riporta in forma schematica una sintesi delle potenzialità della tecnologia blockchain nel settore energetico [35].

Tabella 10 – Potenzialità delle Blockchain nel settore energetico

Servizio	*Descrizione*
Billing	La tecnologia Blockchain consente alle società di Utility di gestire in maniera efficiente ed innovativa la fatturazione automatizzata per consumi e produzioni distribuite, anche di importi contenuti; questo potrebbe consentire anche l'introduzione di servizi innovativi di pagamento soluzioni *pay-as-you-go* o prepagato
Vendite e Marketing	Le società di Utility possono adattare le politiche commerciali al profilo energetico dei consumatori/produttori; le blockchain, in combinazione con IoT, intelligenza artificiale (AI) e machine-learning sono in grado di identificare i modelli energetici di consumo e consentire la fornitura di prodotti energetici su misura.
Trading	I sistemi blockchain possono automatizzare l'emissione di certificati verdi (anche per bassi volumi di energia), ridurre i costi di transazione, creare un mercato globale per tali asset, aumentare la trasparenza del mercato e prevenire la doppia spesa. Diversi sviluppatori stanno lavorando all'uso delle tecnologie blockchain per il trading di certificati rinnovabili o di CO2, alla loro emissione e negoziazione automatica.

Automazione	Maggiore controllo dei sistemi energetici decentralizzati e delle microgrid. Lo sviluppo di mercati energetici locali P2P o di piattaforme distribuite può incentivare l'autoproduzione e l'autoconsumo di energia.
Smart grid	Le blockchain possono essere utilizzate per la comunicazione di dispositivi intelligenti IoT (e.g. smart meters, sensori comfort e qualità aria, apparecchiature di monitoraggio della rete, sistemi di controllo e gestione dell'energia, smart home, smart buildings). Oltre a fornire un trasferimento dati sicuro, le applicazioni smart grid possono beneficiare ulteriormente della standardizzazione dei dati consentita dalla tecnologia blockchain.
Gestione Rete	Gestione della rete di reti decentralizzate, servizi di flessibilità e gestione delle risorse. Piattaforme di trading flessibile integrate.
Sicurezza	Protezione delle transazioni e sicurezza attraverso tecniche crittografiche privacy, riservatezza dei dati, gestione dell'identità.
Condivisione	Di risorse tra più utenti (e.g. ricarica dei veicoli elettrici), dei dati o dell'archiviazione centralizzata comune della comunità
Concorrenza	Semplificazione delle procedure di cambioo gestore (in uno scenario di mercato libero) e conseguente maggiore concorrenza al fine di ridurre le tariffe energetiche
Trasparenza	Fatturazione automatizzata dei servizi energetici per consumatori e generatori distribuiti, con il potenziale di riduzione dei costi amministrativi. Le blockchain consentono la tracciabilità dell'energia prodotta e consumata a ciascun punto finale informando i consumatori sulle origini e sui costi della loro fornitura di energia, rendendo più trasparenti le tariffe energetiche.

3.5.1 Esempi di applicazione nel settore elettrico

Una delle prime applicazioni blockchain nel settore energetico è stata l'accettazione di criptovalute per i pagamenti di energia ed elettricità. Oggi, un numero crescente di aziende del settore energia accetta pagamenti con criptovalute come ad esempio BAS (NL), Enercity (DE), Elegant (BE). Marubeni (JP) offre uno sconto dal 4% al 6% se sceglie di pagare la bolletta dell'elettricità con Bitcoin anziché con valute correnti.

In [62] progetti di applicazione della tecnologia blockchain nel settore elettrico sono classificabili in tre blocchi, come mostrato in Figura **20**: i) trading di energia, ii) consenso e iii) ottimizzazione del sistema. Il trading di energia è a sua volta classificabile in tre sotto-blocchi (comunicazione pre-transazione, abbinamento acquirente-venditore e regolazione della transazione). Ad esempio, la "comunicazione pre-negoziazione" si concentra principalmente su come ottenere la protezione della privacy nelle interazioni in condizioni di divulgazione del libro mastro blockchain.

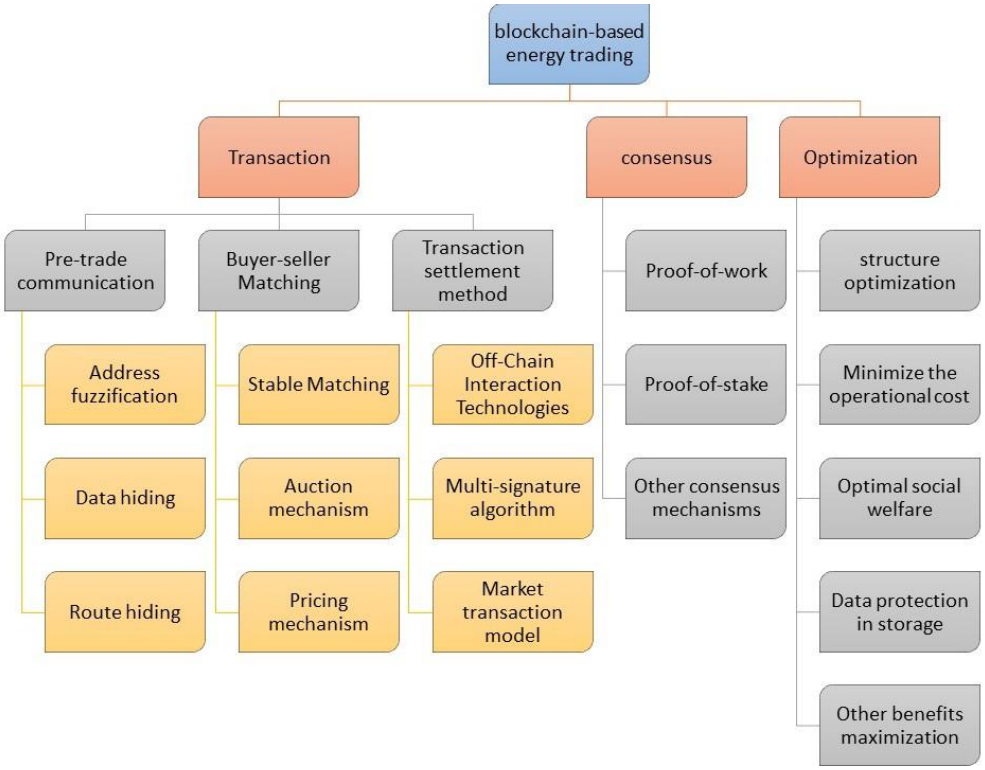


Figura 20 – Classificazione delle iniziative di blockchain nel settore elettrico [62]

Uno studio di GTM Research/Wood Mackenzie Power and Renewables [63] ha censito 189 progetti di start-up e consorzi focalizzati sull'applicazione della blockchain nel settore energetico (per lo più negli Stati Uniti, Germania ed Australia). Questi progetti utilizzano per la maggior parte applicazioni di secondo livello sulla piattaforma Ethereum, grazie alle dimensioni, capacità di gestire contratti intelligenti, stabilità e scalabilità e velocità con un passaggio dal modello di consenso POS. Le principali aree di interesse ruotano attorno all'ottimizzazione dei processi di gestione della rete e al P2P, peer-to-business e business-to-business senza intermediazione [64].

Nel 2018 [65] 22 paesi europei hanno istituito un partenariato europeo come strumento di cooperazione tra Stati membri UE per lo scambio di esperienze e competenze nel settore blockchain, con l'obiettivo di garantirne la diffusione, anche nel settore energetico. A questo riguardo le sfide da affrontare includono:

- fiducia e convalida delle transazioni effettuate nelle reti energetiche distribuite;
- come promuovere un maggiore coinvolgimento dei consumatori all'interno di quel mercato;
- come liberare le normative commerciali all'interno delle reti locali man mano che vengono implementate tecnologie come i sistemi di stoccaggio dell'elettricità, i veicoli elettrici e i dispositivi per la casa intelligente.

Oggi esistono progetti attivi ed interessanti in diversi settori che vanno dalle semplici criptovalute token, agli investimenti in energia rinnovabile con certificazione di energia pulita, allo sviluppo di DEX (ossia piattaforme decentralizzate di scambio energia), a sistemi di salvataggio e fatturazione su blockchain.

Bitwatt [66], con sede in Romania, ha sviluppato un proprio token su smart contract ethereum chiamato BWT ed una piattaforma decentralizzata per il trading di energia, dove è possibile acquistare pacchetti energetici, venderli o trasferirli ad altri consumatori e fornitori.

La start-up britannica **4NEW** [67] ha sviluppato un token chiamato KWATT attraverso un processo ICO (initial coin offer). Coloro che possiedono le monete KWATT possono evitare di pagare il costo dell'elettricità per minare le criptovalute.

Prosume [68] ha sviluppato una piattaforma basata su blockchain per la gestione dei dati energetici; la piattaforma permette la gestione ottimale e il tracciamento dei flussi di energia all'interno di una comunità o di un mercato energetico locale. I consumatori e i prosumer utilizzano i loro ID unici per acquistare automaticamente l'elettricità prodotta localmente o condividere/vendere il surplus di energia generato dal loro impianto fotovoltaico.

La start-up tedesca **Green Energy Wallet** [69] attraverso la blockchain migliora i dispositivi di memorizzazione per home battery o batterie EV e lo fa attraverso l'app Green Energy Wallet che fornisce la connessione software tra il veicolo elettrico, la stazione di ricarica e la rete elettrica fornendo anche altre utili funzioni, come l'accesso alle impostazioni dell'auto, le statistiche sul chilometraggio, i consumi, lo stile di guida, il livello di carica attuale del veicolo e la posizione GPS. I dati statistici raccolti dall'app GEW vengono "premiati" con un token denominato NRG che può essere utilizzato per acquistare energia nelle stazioni di ricarica GEW o altri asset sulla blockchain

L'israeliana **Greeneum** [70] ha sviluppato una suite di prodotti per il mercato energetico. Esso comprende uno smart contract su ethereum chiamato GREEN [71] che può essere utilizzato per acquistare prodotti del loro mercato online [72], un sistema di trading di energia, ed un protocollo chiamato PET - proof of transaction - un protocollo avanzato di gestione ed elaborazione dei dati che profila e convalida la produzione di energia per i sistemi di produzione sostenibile esistenti.

Un'iniziativa particolarmente interessante è rappresentata dal progetto **Brooklyn Microgrid** [73] che si pone l'obiettivo di sperimentare la tecnologia Blockchain di Ethereum per effettuare vendite dirette di energia rinnovabile da PV direttamente da un produttore al consumatore. Gli impianti PV installati su cinque degli edifici che partecipano al progetto di quartiere generano energia solare e l'energia non utilizzata dagli edifici stessi viene venduta a cinque famiglie vicine. Gli edifici sono interconnessi attraverso la rete elettrica tradizionale e le transazioni sono gestite e archiviate tramite una blockchain centrale. Questa configurazione dimostra come potrebbe essere una futura rete elettrica distribuita gestita in modo autonomo da una comunità locale. Ovviamente, il progetto si basa sulla presenza di smart meter e utilizza la tecnologia blockchain con funzionalità smart contract integrate. Le transazioni effettuate nell'ambito del progetto pilota sono al momento eseguite manualmente, ma per il futuro è previsto che il sistema possa essere controllato tramite un'app che potrebbe essere utilizzata per specificare alcuni parametri, ad esempio a quali prezzi si può acquistare l'elettricità dai vicini. Con questa nuova tecnologia, il mercato può raggiungere un punto in cui una sola persona con un unico pannello solare può partecipare al mercato dell'utente finale. Si tratta di un'opportunità per i prosumer che consente loro non più di immettere in rete l'energia in eccesso dietro pagamento di un canone fisso, ma di commercializzarla individualmente. In futuro, il progetto dovrebbe essere gestito nell'ambito di una comunità energetica, con i partecipanti azionisti della società. In questo scenario, le risorse di energia rinnovabile sono di proprietà della comunità stessa, con i membri che decidono collettivamente come utilizzare i ricavi. Ciò consentirà alle persone di possedere parte di un pannello solare, ad esempio nelle aree urbane dove non tutti hanno accesso a un tetto.

3.5.2 Esempi di applicazione nel settore teleriscaldamento

Come detto, la tecnologia Blockchain può garantire soluzioni attraverso piattaforme ICT innovative in cui consumatori e produttori possono vendere direttamente energia oppure acquistarla. Tutto questo può essere gestito e registrato in uno smart contract trasparente ed immutabile che consentirebbe di scambiare informazioni sui costi energetici (offerta/domanda) ai consumatori ed ai produttori.

Uno dei vantaggi della blockchain consiste nel sostenere e incentivare la produzione di energia a livello locale e distribuito che, attraverso lo scambio con consumatori vicini, può beneficiare della riduzione di perdite di trasmissione (aumento dell'efficienza) e degli stessi costi di rete (trasporto). Ad esempio, la diffusione di smart contract per teleriscaldamento potrebbe presentare i seguenti vantaggi: i) incremento dell'active

demand, ii) maggiore efficienza nell'uso della rete di teleriscaldamento, iii) maggiore consapevolezza dell'utente relativamente ai propri consumi termici (ed alle produzioni), iv) scambio di eccedenze termiche (e.g. da pannelli solari termici, recupero ACS). Di contro, uno svantaggio potrebbe essere rappresentato dalla trasmissione di energia attraverso microreti che sono più difficili da gestire centralmente e che possono subire danni tecnici alterando la stabilità del sistema.

Nel settore del teleriscaldamento la tecnologia Blockchain può portare benefici relativamente a diversi processi, quali ad esempio:

- automazione di produzione, trasporto e distribuzione;
- vendite e marketing;
- mercato e trading;
- sviluppo di smart grid;
- trasferimento dati;
- billing automatizzato.

Il teleriscaldamento è semplicisticamente costituito da una rete di tubazioni che distribuiscono acqua calda a edifici (residenziali e/o commerciali) e industrie utilizzando allo scopo fonti di calore centralizzate o decentralizzate. È opportuno che la produzione di calore sia disponibile nell'intorno dei punti di consegna ai clienti, poiché il trasporto di calore su lunghe distanze comporta fisiologiche e significative perdite di energia.

Attualmente, per la produzione di energia termica nelle reti di teleriscaldamento vengono utilizzate fonti di calore come caldaie a gas e impianti di cogenerazione (in gran parte basati su gas naturale), il che porta alla dipendenza dai combustibili fossili. Il calore sostenibile può essere derivato da molte fonti rinnovabili (e.g. geotermia, biomassa, incenerimento dei rifiuti, calore residuo dell'industria e data center). Quando si utilizza una fonte di energia rinnovabile, il teleriscaldamento potrebbe ridurre le emissioni di CO2 tra il 50 e il 70%. Anche grazie a questa spinta si ritiene che la quota del teleriscaldamento e della cogenerazione di calore ed elettricità (CHP) nella domanda finale di energia dovrebbe crescere in EU dell'11% entro il 2030 [74].

Una rete di teleriscaldamento può essere classificata come:

- convenzionale, ovvero con un punto di produzione centralizzato (o pochi punti in un'area limitata) alimentato da combustibili fossili o biomasse e con una rete di tubazioni che distribuiscono calore ai clienti a livelli di temperatura elevati, generalmente superiori a 65°C.
- decentralizzata, ovvero con più punti di produzione che tendono ad essere sostenibili e generalmente producono calore a bassa temperatura, generalmente tra 25°C e 65°C.

Le prime reti di teleriscaldamento (prima generazione) nascono negli US sul finire del XIX secolo ed erano alimentate a carbone e rifiuti e utilizzavano vapore ad alta temperatura. La produzione era fortemente centralizzata e le tubazioni erano realizzate in cemento. Successivamente, a cavallo della prima metà del secolo scorso (seconda generazione) veniva utilizzata acqua calda pressurizzata come vettore di calore con temperature superiori a 100°C e venne introdotta la tecnologia CHP (produzione combinata di calore ed energia elettrica). Successivamente al 1980 (terza generazione) inizia la produzione e diffusione delle attuali tubazioni prefabbricate e preisolate in cui viene distribuito fluido a temperature di esercizio inferiori a 100°C. Oggi (quarta generazione), le reti integrano quote elevate di energia rinnovabile, utilizzano fluido a media temperatura (inferiore a 70°C) e tubazioni con basse perdite di energia (vedi Figura **21**).

L'attuale evoluzione delle reti di teleriscaldamento si basa quindi sulla distribuzione di calore a temperature più basse (fino a circa 50°C o anche meno), riducendo al minimo le perdite di rete e, di conseguenza, le esigenze di isolamento. Il controllo è basato su algoritmi guidati dalla domanda che ottimizza i flussi di exergia.

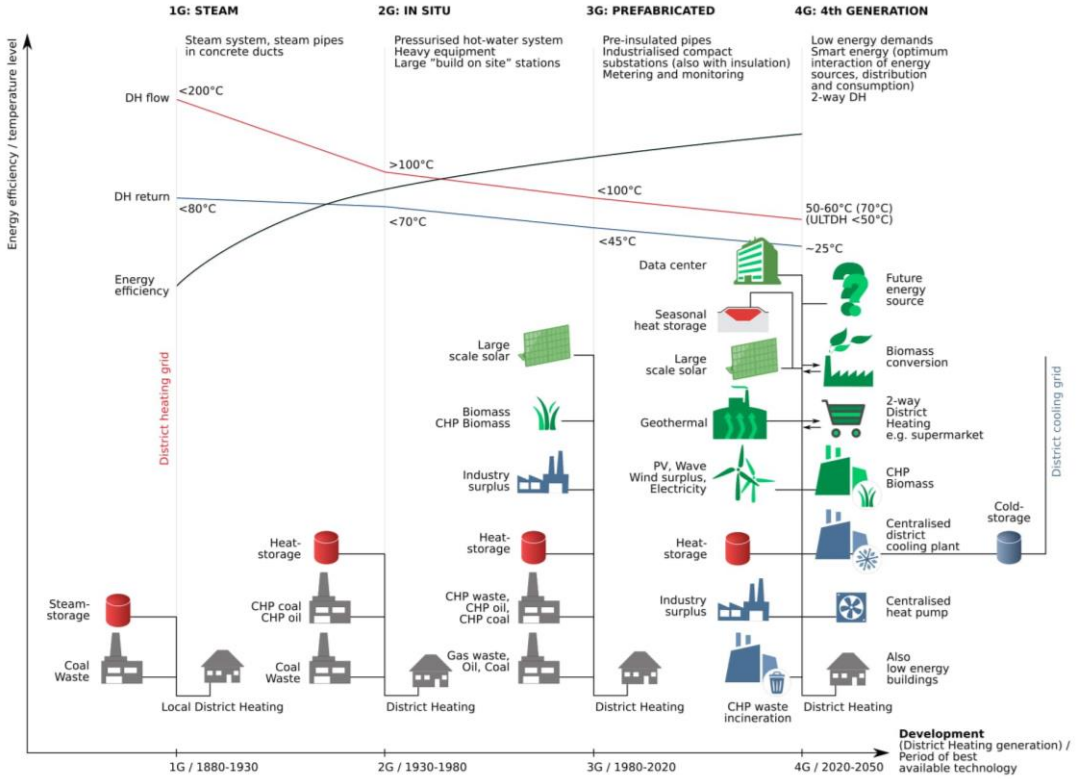


Figura 21 – Evoluzione delle reti di teleriscaldamento [75]

In futuro, la distribuzione di energia di alta qualità (i.e. alta exergia) dovrà essere limitata. Oltre a soddisfare la domanda locale con i flussi disponibili di energia a bassa temperatura (come la geotermia superficiale, calore residuo dei processi industriali, acque reflue ecc.), la quantità inevitabile di fornitura aggiuntiva (i.e. di alta qualità) dovrà provenire da fonti rinnovabili e non fossili come geotermia, solare, eolico, idroelettrico, biomassa, etc.

Come detto, gli attuali sistemi sono centralizzati e controllati dalla domanda e richiedono molta energia che non viene utilizzata. Il nuovo approccio quindi deve essere in grado di fornire servizi di riscaldamento e raffreddamento a temperature diverse in funzione della domanda di clienti diversi. Occorre quindi privilegiare le produzioni locali rispetto alle fonti più lontane, lilmitando le perdite di trasporto e distribuzione.

Oggi le reti di riscaldamento sono gestite principalmente da un unico operatore (azienda di utility) che agisce da nodo centrale della rete. Il nuovo modello di teleriscaldamento e teleraffrescamento di quinta generazione (5GDHC) [75] apre la strada verso la decentralizzazione, e, in questo contesto, la tecnologia Blockchain può essere una risposta efficace per garantire la sicurezza e trasparenza delle transazioni. L'uso delle tecnologie Blockchain, facilitando di per sé il decentramento, potrebbe essere un vantaggio per questo tipo di rete.

Una moderna rete di teleriscaldamento e raffrescamento deve poter utilizzare anche lo scambio di energia termica tra edifici con esigenze diverse e deve quindi essere capace di massimizzare la quota di fonti di energia rinnovabile e di scarto di bassa qualità: i) la rete principale trasporta calore a bassa temperatura alle sottostazioni attive e distribuite (che portano la temperatura al livello richiesto); ii) sistemi distribuiti di accumulo termico rispondono alle fluttuazioni della domanda e dell'offerta di calore e freddo.

In questa configurazione, il fattore chiave è il recupero di energia e, in particolare, il riutilizzo ottimale dei flussi di ritorno. Il recupero di energia termica è un tema molto discusso in ambito energetico sul quale sono stati condotti numerosi studi, in particolare riguardanti il riutilizzo del calore in eccesso derivante dai processi industriali [76,77]. Su questo tema, Cioccolanti et al. hanno elaborato un metodo di recupero dell'energia

termica di scarto dagli impianti di cogenerazione del settore industriale della cellulosa e della carta, finalizzato all'utilizzo per il teleriscaldamento, valutandone i benefici in termini energetici e ambientali [78]. Huang et al. hanno analizzato il recupero e il riutilizzo dell'energia termica di scarto dei data center per il teleriscaldamento, nonché una revisione dei data center dal punto di vista dei prosumer energetici che tenga in conto sia l'integrazione dell'approvvigionamento dell'energia a monte, che il riutilizzo del calore in eccedenza a valle al fine di migliorarne le prestazioni e la sostenibilità [79].

I sistemi di cogenerazione per la produzione combinata di energia elettrica e termica (CHP) sono l'elemento chiave per il recupero di energia termica con il teleriscaldamento e rappresentano punti distribuiti all'interno delle smart grid. Pertanto, anche i sistemi di generazione distribuita di energia termica o i micro-CHP favoriscono l'integrazione tra reti e sistemi di generazione distribuita ampliando il concetto di smart grid anche al settore termico. Denarie et al. hanno presentato una metodologia per stimare il potenziale di energia recuperabile da un impianto CHP attualmente caratterizzato da un'aliquota di calore in eccesso pari all'80% da destinare al teleriscaldamento [80]. Più recentemente, Pipiciello et al. [81] hanno studiato una sottostazione di scambio termico innovativa per lo scambio bidirezionale di energia termica presso un'utenza di teleriscaldamento, introducendo quindi il concetto di "prosumer" nelle reti di teleriscaldamento. Il sistema studiato in primo luogo soddisfa con la produzione locale la domanda di energia dell'utente e fornisce il calore in eccesso alla rete di teleriscaldamento solo se è garantita la temperatura minima concordata con il gestore della rete.

Un prerequisito essenziale per l'applicazione della tecnologia blockchain è rappresentato dalla disponibilità di smart meter adeguati e predisposti per l'infrastruttura informatica. Attualmente, lo smart metering non risulta particolarmente diffuso nel settore del teleriscaldamento e, quindi, a livello normativo e regolatorio può essere rilevante proporre sistemi pronti per l'interazione con questa tipologia di infrastrutture informatiche e di telecomunicazione (i.e. interoperabilità dei sistemi). In questo scenario, la tecnologia blockchain promette di garantire un'effettiva decentralizzazione della gestione dei dati provenienti dagli smart meter. Questo evita la presenza di un unico punto centrale vulnerabile che potrebbe compromettere l'efficienza della rete (e.g. mediante un guasto o attacco informatico). Di contro, la diffusione di sistemi blockchain per la gestione dei dati degli smart meter solleva anche una serie di problemi di sicurezza e privacy. Se, infatti, la blockchain è di tipo pubblico tutte le parti possono accedere ai dati delle transazioni chiuse.

Diversi operatori hanno avviato progetti di blockchain nel settore del trasporto e distribuzione di acqua ed energia termica [35]. In [82] sono state censite 32 applicazioni della tecnologia blockchain nel settore del teleriscaldamento e di queste le principali sono:

- tracciabilità della fonte di energia e della catena di approvvigionamento;
- possibilità di programmare l'approvvigionamento di energia in maniera condivisa con altre società di teleriscaldamento;
- condivisione del sistema comune di produzione di calore tra le società di teleriscaldamento al fine di ottimizzarne la gestione e aumentare l'efficienza del sistema;
- migliorare il processo di monitoraggio, controllo e manutenzione degli impianti e della rete;
- digitalizzazione del sistema e adozione di processi machine-to-machine (M2M) tra produzione, distribuzione e clienti;
- realizzazione di un mercato aperto in cui viene scambiata energia termica.

CGI ed Eneco stanno sperimentando la tecnologia blockchain per la raccolta e la fatturazione dei dati dei contatori di calore. Un progetto pilota è stato sviluppato a Rotterdam, una delle più grandi reti di teleriscaldamento dei Paesi Bassi. Il progetto è stato sostenuto dall'iniziativa BlockLab. I dati raccolti dai contatori di calore sono archiviati in un registro condiviso nel cloud e resi accessibili a diverse parti (quattro fornitori di energia termica coinvolti nella prima fase del progetto pilota) e eliminando quindi la necessità di convalida incrociata. Secondo CGI, ciò potrebbe determinare fino al 50% di risparmio nella gestione amministrativa e costituire la tecnologia di base per uno scambio affidabile di energia termica. In futuro, i partner del progetto prevedono di applicare questo scenario ad una rete più ampia che fornisce riscaldamento a mezzo milione di edifici nei Paesi Bassi.

Il progetto D2GRIDS [41] dedicato allo studio e all'implementazione di reti di riscaldamento e raffreddamento di 5a generazione sta analizzando appunto le possibilità offerte dalla blockchain. L'applicazione dell'approccio MAS (Multy-Agent System) [83] ai sistemi 5GDHC si è dimostrato vantaggioso in termini di stabilizzazione della temperatura di setpoint rispetto ad un impianto tradizionale di teleriscaldamento alimentato a gas e per il raffrescamento degli ambienti [84,85]. In questo ambito, un modello di implementazione di smart contract è attualmente in fase di sperimentazione da parte di **GreenFlex** sulla rete di teleriscaldamento e raffrescamento di Parigi-Saclay [86]. Il progetto presuppone la definizione di due categorie di contributori: a) positivi che forniscono (nella modalità riscaldamento) o prelevano (nella modalità raffrescamento) energia dalla rete; ii) negativi che evitano consumi di calore o freddo allo stesso modo del meccanismo di cancellazione nelle reti elettriche (questo può avvenire specialmente nelle reti 5GDHC).

3.6 Limiti della tecnologia Blockchain

Come visto, le opportunità offerte dall'applicazione della tecnologia blockchain nel settore dell'energia sono di ampia portata, tuttavia, ci sono anche limiti e problematiche aperte che devono essere considerati attentamente quando si implementano soluzioni di smart contract nel settore dell'energia [53,87], come ad esempio elevati rischi per la sicurezza/privacy, elevato consumo di energia e elevata complessità di attuazione. A questi si aggiungono limiti nell'efficienza in termini di scalabilità e interoperabilità. Infine, deve considerarsi che l'utilizzo di smart contract in una piattaforma energetica non renderà di per sé il progetto "intelligente". Sarà in ogni caso necessario che la rete sviluppi al suo interno le tecniche di machine learning, il bilanciamento, le escursioni di tensione, i problemi di qualità dell'energia.

Relativamente alla sicurezza informatica, una volta implementato, uno smart contract è autoeseguibile e a prova di manomissione, il che rende difficile la corruzione da parte di qualsiasi partecipante al sistema o soggetto esterno. Di contro, qualsiasi parte del codice può essere per defiizione vulnerabile. Una soluzione potrebbe essere rappresentata dalla certificazione del codice da parte di un'azienda esterna, come è prassi standard negli smart contract per la finanza decentralizzata.

I costi di implementazione finanziari, ambientali ed energetici dello smart contract devono essere tenuti attentamente in considerazione. Finora, molti progetti di smart contract nel settore dell'energia sono stati a livello di proof-of-concept o progetti dimostrativi ed eseguiti perlopiù su blockchain private. Lo scenario futuro prevede il passaggio alle blockchain pubbliche per le quali i costi di implementazione possono diventare considerevoli anche in relazione ai benefici attesi da confrontare con l'energia aggiuntiva necessaria per eseguire lo stesso protocollo, nell'ottica dell'efficienza energetica e della sostenibilità. Le Blockchain, infatti, basandosi sul mining (i.e. il processo mediante il quale le transazioni vengono convalidate digitalmente e aggiunte al registro blockchain) per convalidare le transazioni e proteggere la rete risolvendo complessi enigmi crittografici (i.e. hash) richiedono ingenti consumi di energia elettrica [88]. In [89] si stima che ciascuna transazione Bitcoin è responsabile di un consumo di energia elettrica pari a circa 300 kWh, corrispondenti, oggi all'attuale stadio di sviluppo della tecnologia, a circa 30 TWh/anno, superiore al consumo dell'Austria.

Oltre alle barriere tecnologiche sopra evidenziate, alcuni ricercatori [90,91] hanno espresso preoccupazione per le barriere normative e di mercato alle soluzioni basate su blockchain per la generazione distribuita. Si consideri a riguardo che in molti paesi la tassazione sui consumi energetici (elettricità, gas, energia termica) è una parte essenziale delle entrate statali ed è quindi necessario definire uno scenario sostenibile che contempli leggi e regolamenti adeguati.

A questo proposito, Küfeoğlu et al. [92] raccomandano alle autorità di regolamentazione: i) consapevolezza sui modelli di business che sfruttano le scappatoie dell'attuale normativa obsoleta che non prevede l'aumento della generazione distribuita; ii) la necessità di modificare le regole attuali.

Wang et al. [62] sottolineano l'importanza di quadri normativi flessibili, in assenza dei quali la tecnologia blockchain troverà ostacoli per la diffusione, specialmente dalle grandi aziende. Allo stesso modo, Wu e Tran rilevando l'assenza di leggi e misure regolamentari pertinenti, affermano che devono essere migliorati i meccanismi di standardizzazione e supervisione della tecnologia blockchain [93]. Coprendo il caso di studio della Cina, Zhu et al. [94] riscontrano contraddizioni tra la regolamentazione dell'energia e l'innovazione abilitata alla blockchain, suggerendo la modifica delle leggi pertinenti per bilanciare il conflitto tra gestione e innovazione.

Andoni et al. [35], nell'attuale quadro normativo e regolatorio che mira a ridurre i costi dei consumatori incentivando l'uso delle FER, affermano che la blockchain può supportare o accelerare questo obiettivo. Tuttavia, si ritiene che saranno necessari nuovi tipi di contratto per descrivere gli accordi tra prosumer e consumatori, nonché lo sviluppo di un nuovo quadro per tariffe energetiche potenzialmente più flessibili, e che invece attualmente sono fortemente regolamentate.

4 Progettazione e simulazione di una piattaforma blockchain in una rete di teleriscaldamento

La Commissione Europea con il Clean Energy Package for all Europeans [95] ha emanato un insieme di atti legislativi volti a riprogettare il settore energetico con una serie di misure riguardanti: i) l'efficienza energetica, ii) le fonti rinnovabili, iii) il riassetto del mercato dell'energia elettrica, iv) la sicurezza dell'approvvigionamento energetico e v) le norme sulla governance per l'Unione dell'energia. Nel Clean Energy Package viene introdotto il concetto di Comunità Energetica (CE) prevedendo due diversi modelli: la Citizen Energy Community (CEC) e la Renewable Energy Community (REC), le 'comunità rinnovabili'. In entrambi i modelli gli attori della comunità sono abilitati a svolgere collettivamente attività di produzione, distribuzione, fornitura, consumo, condivisione, accumulo e vendita di energia autoprodotta. A differenza della CEC, la REC prevede la produzione di sola energia rinnovabile, con possibilità di convertire quest'ultima in diversi vettori energetici (i.e., energia elettrica, energia termica etc.). In tali contesti, gli smart meter svolgono un ruolo fondamentale nell'intero processo di comunicazione. Uno smart meter, infatti, è un componente hardware in grado, tra l'altro, di eseguire un software che lo rende in grado di gestire (anche inviando) l'energia generata da un prosumer e di rispondere a richieste esterne [96,97].

Nel contesto nazionale, il Piano Nazionale Energia e Clima (PNIEC) recepisce le indicazioni del Clean Energy Package focalizzando l'attenzione, tra l'altro, sui temi dell'autoconsumo e delle CE. A livello legislativo, l'introduzione delle CE è avvenuta con il decreto-legge c.d. Milleproroghe 2020, che definisce le basi per la creazione delle 'comunità rinnovabili' e dei sistemi collettivi di autoconsumo. In particolare, all'art.42-bis "Autoconsumo da Rinnovabili", il decreto concede la possibilità di realizzare in un periodo di tempo limitato (dal 29 febbraio 2020, data di pubblicazione della Legge di conversione, ai 60 giorni successivi alla pubblicazione del Decreto Legislativo di recepimento della Direttiva FER 2001/2018, previsto al più entro il 30.6.2021) l'autoconsumo collettivo e la comunità energetica rinnovabile, intendendo con tale termine un'associazione tra cittadini, attività commerciali, autorità locali o imprese che decidono di dotarsi di impianti per la produzione e l'autoconsumo di energia da fonti rinnovabili.

Secondo il decreto, i soggetti partecipanti alla comunità energetica possono produrre energia elettrica con impianti FER dalla potenza complessiva minore o pari a 200 kW. I partecipanti alla CE rinnovabile devono utilizzare la rete di distribuzione esistente e l'autoconsumo istantaneo può avvenire anche mediante l'utilizzo di sistemi di accumulo realizzati nel perimetro della CE o nell'edificio per l'autoconsumo collettivo. Sull'energia prelevata dalla rete, ivi inclusa quella condivisa all'interno del perimetro, si applicano gli oneri generali di sistema. L'articolo 42-bis prevede che:

- nel caso della Comunità energetica rinnovabile, i punti di prelievo dei consumatori debbano essere tutti ubicati su reti di BT sottesi alla stessa cabina di trasformazione MT/BT, che corrisponde al perimetro della Comunità energetica rinnovabile, alla data di creazione di quest'ultima;
- nel caso di autoconsumatori che agiscono collettivamente questi devono trovarsi nello stesso edificio/condominio.

Le CE possono pertanto essere viste come un sistema integrato produzione-reti-accumulo dove i fabbisogni degli attori della comunità vengono coperti dall'energia autoprodotta e distribuita all'interno della comunità stessa. In questa prospettiva, le CE rappresentano un contesto interessante per l'applicazione della blockchain. L'obiettivo principale di una CE, infatti, è quello di consentire ai prosumer di produrre, consumare e scambiare energia senza alcuna barriera; attualmente, tuttavia, tale sistema non è ampiamente accettato in quanto richiede l'accettazione e la collaborazione dei distributori centrali di energia. In tal senso, la possibilità di decentralizzazione, offerta dai sistemi basati su blockchain e su smart contract, risulta essere uno strumento abilitante per lo scambio autonomo e decentralizzato di energia termica rinnovabile.

In particolar modo, il *trading di energia* è una delle componenti più importanti nella gestione dell'energia delle CE così anche come nelle Smart-Grid e nel mercato energetico più classico, in cui rappresenta l'ultima

fase del ciclo. In particolare, in via del tutto generalistica, il mercato energetico può essere schematizzato in 4 fasi, ad ognuna delle quali corrisponde un attore principale del mercato: i) generazione dell'energia (attore: *produttori*); ii) trasmissione dell'energia alla rete di distribuzione (attore: *distributore*); iii) compravendita (trading) dell'energia (attore: *rivenditori*, incaricati di collegare i distributori ai consumatori); iv) consumo dell'energia (attore: *consumatori*). Nelle attuali reti di energia (gas, energia termica, energia elettrica) questi passaggi sono per lo più separati.

Se già la semplice introduzione della figura del prosumer renderebbe necessaria una maggiore flessibilità (poiché l'immissione di energia in rete non è più deputata ai soli produttori centrali ma anche agli stessi prosumer), in uno scenario "smart" la stessa fase 4 (trading) rappresenta un collo di bottiglia perché perché ancora soggetta a criteri tradizionali che non sono particolarmente adatti alle dinamiche di una rete intelligente. Lo sviluppo quindi di nuovi approcci è di fondamentale importanza.

In questo capitolo sono illustrate le fasi della progettazione di una blockchain privata basata su Ethereum per il trading di energia termica P2P in una micro-rete residenziale. La blockchain è stata progettata per simulare lo scambio di energia termica rinnovabile autoprodotta tra le parti coinvolte (prosumer e consumer) senza intermediazione di una terza parte (e.g., il distributore o il rivenditore di energia termica).

È possibile schematizzare concettualmente l'approccio adottato come composto da più "strati": i) un layer digitale, rappresentato dalla piattaforma blockchain sviluppata nell'ambito del presente progetto, ii) un layer fisico, costituito dalla rete termica (consumatori, produttori, prosumer, reti di distribuzione, serbatoi di accumulo, reti di misuratori intelligenti etc.) e iii) un layer di comunicazione, preposto a mettere in connessione i layer fisico e digitale. Nel prosieguo verranno dettagliati i componenti di tale schema e descritto l'ambiente utilizzato per lo sviluppo dell'applicativo blockchain.

4.1 Tecnologia e ambiente di sviluppo della blockchain

La tecnologia di sviluppo scelta per lo sviluppo della blockchain nel presente lavoro è Ethereum.

La piattaforma Ethereum è stata introdotta nel 2014 ed è una piattaforma decentralizzata che gestisce Smart Contract, i.e., applicazioni che funzionano esattamente come programmate senza alcuna possibilità di downtime, censura, frode o interferenza di terze parti. Si basa sull'esecuzione di applicazioni decentralizzate dette DApps scritte utilizzando gli Smart Contract. Ethereum si serve della struttura dei dati della blockchain e del protocollo PoW, anche se nel 2022, con Ethereum 2.0, è previsto il passaggio verso il PoS.

Ethereum rappresenta una delle tecnologie più rilevanti della Blockchain 2.0, non essendo più una blockchain per criptovalute ma una piattaforma blockchain pubblica, programmabile e senza autorizzazione, la cui funzione principale è fornire un protocollo alternativo per la creazione, in modo rapido, sicuro e interoperabile, di applicazioni decentralizzate (DApp) [96,98]. Ethereum si basa sui nodi di una macchina virtuale decentralizzata e distribuita (Ethereum Virtual Machine, EVM) [99] che possono eseguire Smart Contract (SC) scritti nel linguaggio "Turing-complete Solidity" [100] che implementa il bytecode dell'EVM. Ricordiamo che lo SC è un contratto ad esecuzione automatica che ha al suo interno i termini dell'accordo tra due parti senza la necessità di un'autorità centrale.

L'*ether* è la criptovaluta generata dalla piattaforma Ethereum e utilizzata anche per pagare le commissioni di transazione. A differenza della blockchain di Bitcoin [38], Ethereum prevede due diversi tipi di account:

- Externally Owned Accounts (EOA), ai quali si accede con chiavi private e controllati dalle persone fisiche che le possiedono;
- Contract Account (CA), che sono controllati dal codice contrattuale.

Ad ogni account è associato un indirizzo di 20 byte ed un saldo *ether*. Un EOA può: i) inviare transazioni che sono archiviate all'interno della blockchain per creare uno SC; ii) chiamare una funzione all'interno dello SC, iii) trasferire *ether* su un altro account. Invece, la CA può essere attivata solo da un EOA.

Le transazioni sono a loro volta classificare in External Transactions (ET), generate dagli utenti e registrate pubblicamente nella blockchain, ed Internal Transactions (IT), note anche come Contract Transactions, che avvengono tra contratti e non vengono registrati sulla blockchain e non influiscono sugli stati degli altri account.

In Ethereum ci sono due tipi di nodi: i) regolari e ii) miners. I nodi regolari possiedono solo una copia della blockchain, i miners costruiscono la blockchain con i blocchi mining.

Come tutte le blockchain, Ethereum richiede che le transazioni e i blocchi siano convalidati dai miner attraverso un "algoritmo di consenso" ed ogni passaggio computazionale effettuato richiede un "costo" supplementare a carico degli utenti. Il costo di ogni transazione è chiamato "gas", che rappresenta un'unità di misura del lavoro di calcolo per eseguire delle transazioni o uno SC nella rete Ethereum. Ogni utente può specificare, attraverso il campo *gas price*, quanto è disposto a pagare per ogni passaggio computazionale. Ovviamente, più alto è questo campo, prima la transazione verrà scelta dai miner.

Ci sono due tipi di nodi: i) regolari e ii) miners. I nodi regolari possiedono solo una copia della blockchain, i miners costruiscono la blockchain con i blocchi mining. La community di Ethereum è la più grande e più attiva del mondo infatti include alla base sviluppatori, ricercatori, mining, sviluppatori ed è sempre in continuo miglioramento. Ci sono alcuni vantaggi legati all'utilizzo di Ethereum:

- terze parti non possono aggiornare o cambiare dati;
- le transazioni sono protette da attacchi hacker o attività fraudolente;
- non ci sono tempi di inattività.

4.1.1 Gli Smart Contract

Uno Smart Contract (SC) è una porzione di codice che codifica la logica del business, rappresentando un protocollo di transazione computerizzato auto-applicante che contiene i termini di un accordo tra le parti coinvolte [101,102]. È uno strumento progettato per eseguire automaticamente, controllare e documentare i servizi stabiliti nei termini dell'accordo, eseguendo transazioni tra parti anonime che rispettano le leggi dell'organizzazione o generano token [103] senza coinvolgere un intermediario.

Una caratteristica importante degli SC eseguiti sulla blockchain è quella di rendere le transazioni tracciabili, trasparenti e irreversibili, implicando accordi tra più utenti per archiviare ed eseguire dati [103].

Gli smart contracts svolgono tre funzioni fondamentali:

- registrazione delle regole: programma del codice è registrato e verificato dalla blockchain rendendolo non manomettibile;
- verifica delle regole;
- esecuzione delle regole: gli smart contracts possono avere le proprie criptovalute, digital assets e trasferirli, quando sono attivate le condizioni predefinite.

L'esecuzione dello SC è rafforzata attraverso nodi affidabili, anonimi senza coinvolgere terze parti.
Anche se la computazione di uno SC avviene per lo più digitalmente, alcune parti dello SC possono essere programmate per avere input e controllo umani. Il ciclo di vita di uno SC è riassumibile in quattro fasi [53]:

1) accordo tra le parti: in questa fase avviene la negoziazione tra le parti che discutono sulle obbligazioni, sulla progettazione e sulla verifica dello SC;
2) costituzione dello SC: in questa fase, i contratti vengono memorizzati sulla blockchain e avviene il congelamento di digital asset che coinvolgono terze parti;

3) verifica del soddisfacimento dei criteri: in questa fase avviene la valutazione delle clausole sui contratti e l'auto esecuzione del contratto una volta attivate;
4) esecuzione del trasferimento di valore (e. g., scambio di moneta o energia): in cui avviene lo sblocco dei digital assets assegnati.

La fase (3), rappresenta la parte più interessante per i sistemi energetici e soprattutto per i mercati locali, abilitando di il commercio di energia peer-to-peer automatizzato: i dati degli smart meter possono essere utilizzati per verificare le transazioni energetiche e attivare il processo di fatturazione di uno SC.

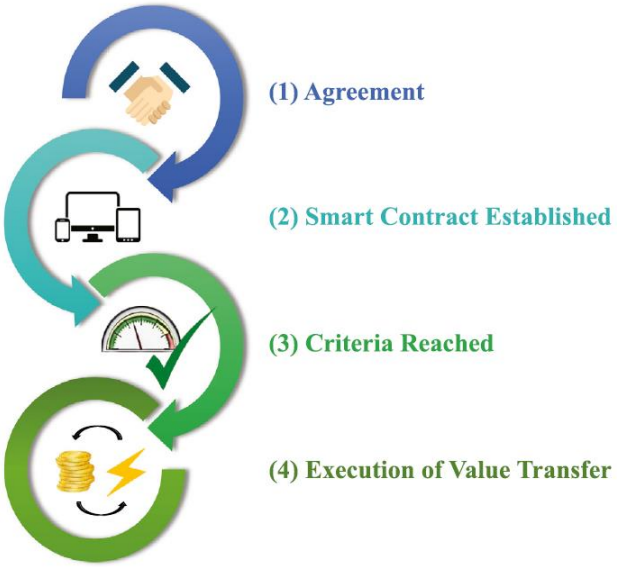


Figura 22 – Schema di Smart Contract [53]

Ci sono alcune condizioni che permettono il funzionamento degli SC:

- durante la procedura, gli sviluppatori della blockchain scrivono lo SC come uno script utilizzando un linguaggio di programmazione e implementando anche la logica dietro il contratto in modo che quando la transazione avviene lo script permetta di compiere il passaggio successivo;
- completato il codice, lo script è inviato all'esterno della blockchain;
- verificate le condizioni, gli utilizzatori dello smart contract possono scegliere le condizioni necessarie per i loro smart contract

Gli smart contracts, producono diversi benefici: i) velocità e accuratezza: sono digitali e automatici, in questo modo non si perde tempo nella correzione di eventuali errori presenti nei documenti e il codice assicura una maggiore esattezza; ii) fiducia: sono eseguiti automaticamente secondo regole predeterminate, i record criptati di queste transazioni sono condivise tra i partecipanti; iii) risparmio: eliminano il bisogno degli intermediari perché i partecipanti possono confidare sui dati visibili e sulla tecnologia per eseguire le transazioni; non sono coinvolte terze parti per verificare i termini dell'accordo perché costruiti nell'accordo; iv) sicurezza: le transazioni sono criptate per cui è impossibile che subiscano attacchi hacker.

Gli SC di Ethereum sono scritti con i cosiddetti Specialized Contract Specification Languages. Sono attualmente disponibili tre alternative: i) LLL (simile a LIPS), ii) Serpent (simile a Python) e iii) Solidity. Quest'ultimo è il linguaggio ufficiale di Ethereum, che lo rende di fatto il più diffuso. Si tratta di un linguaggio Object-Oriented nel quale la definizione del concetto astratto di contratto è molto simile a quello di classe, supporta tipi statici, integrazione e librerie e può essere compilato in assembly EVM e quindi può essere eseguito su tutti i nodi Ethereum.

4.1.2 Le dApp

Le applicazioni decentralizzate o dApps sono applicazioni che operano su una rete distribuita o una rete Peer to Peer di computer. Esse sono simili alle tradizionali App (e.g. Youtube, Facebook, Twitter etc.) con la differenza che al posto di appoggiarsi su server centralizzati, sfruttano le piattaforme blockchain e il loro network distribuito. (Figura **23**).

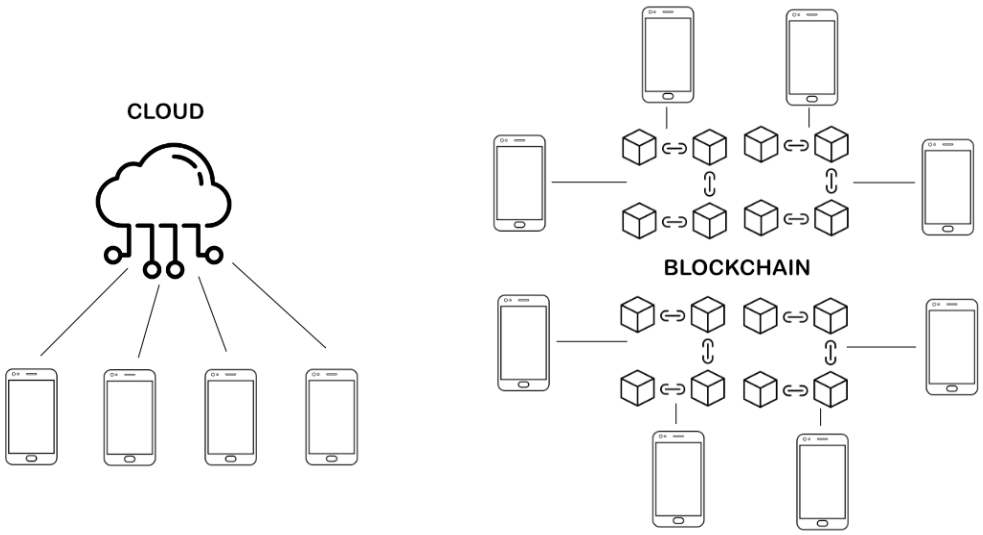


Figura 23 – Schema di dApp

Le dApp, come le App tradizionali, sono composte da tre parti:

1. **Front-end**: è la parte visiva dell'applicazione (i.e. l'interfaccia grafica) dove gli utenti interagiscono con le funzionalità inviando e ricevendo informazioni;
2. **Back-end**: è la parte di "gestione" dell'applicazione, la parte più importante, che elabora le richieste dell'utente per poi comunicare un output al front (questa la prima differenza tra un'App da una dApp, poichè nella dApp il backend è lo smart contract che viene eseguito sulla blockchain, a differenza della App che è pubblica e visibile agli utenti, quindi molto più sicuro e trasparente.
3. **Livello dati**: i dati non vengono salvati localmente o su un cloud centralizzato, ma vengono criptati, salvati e replicati nei blocchi della catena blockchain.

4.1.3 L'ambiente di sviluppo

Eseguire uno SC su una blockchain richiede di caricarlo sulla macchina virtuale di Ethereum tramite un account. Pertanto, i passaggi per configurare e distribuire uno SC sono i seguenti [53]:

1. Configurazione di una blockchain locale con nodi (macchine virtuali) e account, tramite Ganache;
2. Sviluppo dello SC nel linguaggio Solidity;
3. Compilazione del codice dello SC utilizzando il compilatore;
4. Distribuzione del codice compilato nella blockchain utilizzando le librerie Javascript Web3;
5. Interazione con il contratto (e la blockchain) tramite comandi javascript che vengono inviati all'indirizzo dello SC tramite un nodo della blockchain locale.

Per lo sviluppo dell'applicazione sono stati impiegati gli ambienti di sviluppo MacOS e Ubuntu 20.04. Per l'implementazione dello SC ci si è avvalsi dei seguenti strumenti:

- Go Ethereum, o Geth, è un client CLI (command-line interface) che consente agli sviluppatori di contratti intelligenti di interagire con una blockchain e quindi di distribuire contratti intelligenti. È l'implementazione Golang del protocollo Ethereum, ma esistono altre implementazioni (C++, Python).
- Suite Truffle, che è un framework per lo sviluppo e la distribuzione di applicazioni basate su Ethereum. Include molti altri strumenti el per creare, compilare, testare, distribuire e interagire con contratti intelligenti;
- Ganache, è uno strumento che consente agli utenti di creare un DLT Ethereum locale con 10 account in cui è possibile implementare uno SC.

4.1.3.1 Geth

Tra i diversi client che consentono di collegarsi ad Ethereum e creare una rete privata, è stato scelto **geth** (Go Ethereum)[7], che rappresenta un'interfaccia a riga di comando per l'esecuzione del nodo Ethereum implementato in "Go Language". Per avviare una blockchain privata è necessario creare un **genesis block** (Figura **24**) richiamando il file "genesis.json" (Figura **25**).

```
geth --datadir ./data init genesis.json
```

Figura 24 - Comando per la generazione di un file genesis

```
{
"config":                                                                    {
"chainId":                                                                 5777,
"homesteadBlock":                                                             0,
"eip155Block":                                                                0,
"eip158Block":                                                                0
},
"alloc"                                                                    :  {
      "BeD813a62779142A570701f30a4eD83F015B869":                              {"balance":
"99999999999999999999999"}
},
"coinbase"                    :       "0x0000000000000000000000000000000000000000",
"difficulty"                                :                                  "10",
"extraData"                                                :                    "",
"gasLimit"                                                 :                 "0x2fefd8",
"nonce"                                                              :       "0x0000000000000042",
"mixhash"     :  "0x0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000",
"parentHash"  :  "0x0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000",
"timestamp"                                                          :          "0x00"
}
```

Figura 25 – File genesis.json

Con riferimento alla Figura **25**, il file "genesis.json" contiene le seguenti informazioni:

- `config`: definisce la configurazione della blockchain, determinando come funzionerà la rete;

[7] https://geth.ethereum.org/downloads/

- `chainId`: definisce l'id della blockchain da creare, è possibile specificare un numero casuale a condizione che non corrisponda già ai numeri di altre blockchain. Una lista di possibili identificatori di rete è riportata in Figura 26. Nel caso in esame, il codice 5777 identifica la chain default di "ganache".

  - **0**: Olympic, Ethereum public pre-release PoW testnet
  - **1**: Frontier, Homestead, Metropolis, the Ethereum public PoW main network
  - **1**: Classic, the (un)forked public Ethereum Classic PoW main network, chain ID 61
  - **1**: Expanse, an alternative Ethereum implementation, chain ID 2
  - **2**: Morden Classic, the public Ethereum Classic PoW testnet
  - **3**: Ropsten, the public cross-client Ethereum PoW testnet
  - **4**: Rinkeby, the public Geth-only PoA testnet
  - **5**: Goerli, the public cross-client PoA testnet
  - **6**: Kotti Classic, the public cross-client PoA testnet for Classic
  - **8**: Ubiq, the public Gubiq main network with flux difficulty chain ID 8
  - **42**: Kovan, the public Parity-only PoA testnet
  - **60**: GoChain, the GoChain networks mainnet
  - **77**: Sokol, the public POA Network testnet
  - **99**: Core, the public POA Network main network
  - **100**: xDai, the public MakerDAO/POA Network main network
  - **31337**: GoChain testnet, the GoChain networks public testnet
  - **401697**: Tobalaba, the public Energy Web Foundation testnet
  - **7762959**: Musicoin, the music blockchain
  - **61717561**: Aquachain, ASIC resistant chain
  - [**Other**]: Could indicate that your connected to a local development test network.

Figura 26 – Possibili identificatori di rete

- `homesteadBlock`: Homestead è la prima versione stabile ufficiale del protocollo Ethereum, l'attributo deve essere impostato su "0";
- `EIP`: sta per "Ethereum Improvement Proposal" e consente agli utenti e alla comunità di sviluppo di avanzare proposte sotto forma di discussioni e codice per apportare modiche o migliorie ad Ethereum[8]; nel caso in esame sono stati aggiunti i seguenti blocchi:
  - `EIP155Block` funzionale alla prevenzione di attacchi di replay;
  - `EIP158Block` funzionale alla gestione della memoria di calcolo; secondo lo schema definito da questo blocco, i clienti Ethereum con conti vuoti vengono trattati come inesistenti, risparmiando spazio sulla blockchain.
- `Difficulty`: determina la difficoltà di generare blocchi; maggiore è la complessità, più risorse saranno necessarie per l'estrazione;
- `gasLimit`: Indica l'attuale limite di consumo di gas a livello di rete per unità. Il gas è il "carburante" utilizzato per pagare le commissioni di transazione sulla rete Ethereum: più gas un utente è disposto a spendere, maggiore è la priorità della sua transazione in coda; tale valore è stato impostato su un livello sufficientemente alto per evitare limitazioni durante i test;
- `alloc`: consente di creare un "wallet" per la blockchain privata e riempirlo di *ether* di test; nel caso in esame, il valore è stato impostato su un numero molto alto (e.g., 9999999999999) tenendo presente le finalità della progettazione, ovvero la creazione di una blockchain privata per il testing di SC e DApp.

Dopo aver lanciato correttamente il comando, la rete privata è pronta per testare la blockchain.

[8] https://eips.ethereum.org/all

4.1.3.2 *Truffle Suite*

Per compilare gli SC in Ethereum lo sviluppo necessita di un compilatore che converta lo SC in codice leggibile dalla macchina. In tal senso, Truffle Suite è una raccolta di strumenti realizzati appositamente per lo sviluppo di blockchain su Ethereum ed è per questo stata utilizzata per le attività di sviluppo del presente progetto[9]. La suite include tre software:

1. **Truffle**, un ambiente per lo sviluppo di SC su Ethereum;
2. **Ganache**, che consente di impostare una blockchain Ethereum personale sulla rete locale per test e sviluppo; è una versione semplificata di geth che utilizza un GUI per accedere velocemente ai dati;
3. **Drizzle**: che viene utilizzato per creare interfacce utente DApp e include una raccolta di componenti di sviluppo pronti per l'uso.

In Figura 27 vengono mostrati i codici necessari per inizializzare in Truffle in Ubuntu 20.04, rispettivamente: i) l'update dei pacchetti e librerie necessarie; ii) l'installazione di node.js e npm; iii) l'installazione di Truffle. Node.js è un ambiente di esecuzione che permette di eseguire codice Javascript come un qualsiasi linguaggio di programmazione mentre npm - Node Package Manager - è il gestore di pacchetti ufficiale che viene installato con la piattaforma Node.js.

```
sudo apt-get update && sudo apt-get -y upgrade
sudo apt-get -y install curl git vim build-essential software-properties-common
```

a)

```
curl -sL https://deb.nodesource.com/setup_10.x | sudo bash -
sudo apt-get install npm && sudo apt-get install nodejs
```

b)

```
sudo npm install -g truffle
```

c)

Figura 27 – Ubuntu 20.04: a) update dei pacchetti e librerie necessarie, b) installazione di node.js e npm, c) Installazione di Truffle

In Figura 28 vengono mostrati i codici per inizializzare Truffle in MacOS, rispettivamente: i) l'installazione di homebrew, ovvero un sistema di gestione dei pacchetti software open source che semplifica l'installazione del SW sul sistema operativo Apple, macOS e Linux; ii) l'installazione di nodejs; ii) l'installazione truffle.

```
/bin/bash -c "$(curl -fsSL https://raw.githubusercontent.com/Homebrew/install/HEAD/install.sh)"
brew update
brew doctor
```

a)

```
brew install node
```

b)

```
brew install truffle
```

c)

Figura 28 – MacOS: a) installazione di homebrew, b) installazione di nodejs, c) installazione di Truffle

[9] https://trufflesuite.com

Ganache ha 2 componenti: i) Ganache CLI; ii) Ganache GUI. Ganache CLI, già compreso in Truffle (n.d., non è necessaria installazione), consente di eseguire una blockchain Ethereum locale su un personal computer, rappresentando un ottimo ambiente di sviluppo perché consente allo sviluppatore di avere il pieno controllo della blockchain. Essendo locale, questa blockchain non è collegata a un testnet pubblico, né al mainet. Ganache GUI è un'interfaccia visiva per Ganache CLI e può essere eseguito come un'App desktop autonoma. In Figura 29 è riportata l'interfaccia grafica Ganache GUI con estensione Appx per Windows, AppImage per Linux e dmg per MacOS.

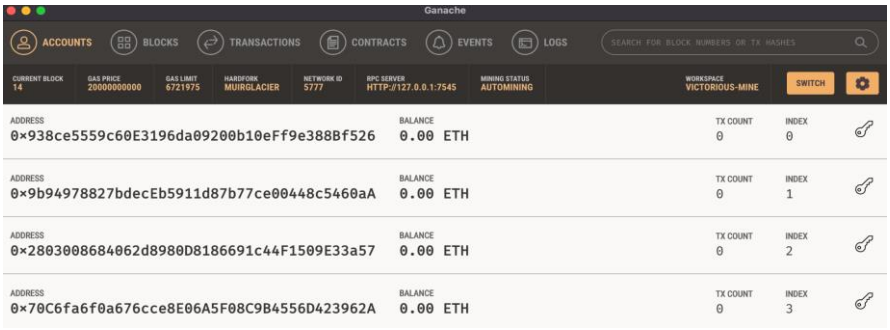


Figura 29 – Ganache GUI

4.2 Caso di studio n.3: simulazione di uno Smart Contract di energia termica

Per la progettazione e la definizione delle specifiche dello SC sono stati utilizzati i dati di consumo di un caso di studio reale rappresentato dall'edificio di edilizia popolare ATER Anagni 18C costituito da 9 appartamenti in due blocchi collegati, in zona climatica D e alimentato da un impianto centralizzato con caldaia a gas naturale. L'edificio è descritto in dettaglio in [104].

Allo stato di fatto, il sistema di monitoraggio installato presenta una frequenza di lettura giornaliera e nessuno degli utenti è dotato di un impianto di produzione di energia termica rinnovabile. Recentemente (i.e., nel marzo 2020) è stata installata una centralina climatica, a circa 10 km di distanza dal caso di studio, per consentire il monitoraggio quartorario delle principali variabili climatiche (i.e., temperatura media, massima e minima esterna, velocità del vento, radiazione solare, precipitazioni, umidità relativa esterna).

Per le finalità della presente ricerca, è stato necessario simulare alcune ipotesi di modifica dell'assetto impiantistico dell'edificio per abilitare uno scenario di trading dell'energia termica in un contesto di comunità energetica.

L'ipotesi di presenza di contatori di energia termica e di un impianto di distribuzione orizzontale si è resa necessaria in quanto i ripartitori non sono strumenti metrico-legali (non essendo regolati dalla direttiva MID), e pertanto non è ipotizzabile un loro utilizzo in un contesto di compravendita dell'energia termica. D'altro canto, la presenza di un sistema di emissione a bassa temperatura (e.g., termoconvettori, pannelli radianti) rende applicabile l'ipotesi di soddisfare parte della domanda di energia termica con la generazione rinnovabile autoprodotta da collettore solare termico.

La simulazione condotta si basa, in particolare, sulle seguenti ipotesi applicate al caso studio di base sopra descritto:

Lato utenza:

- 7 consumatori, ovvero utenti abilitati al solo prelievo di energia termica da rete (interni da 1 a 7);
- 2 prosumer, ovvero utenti in grado di immettere energia rinnovabile autoprodotta in rete o prelevare energia termica per soddisfare la domanda, a seconda delle condizioni (interni 8 e 9).

Lato impianto:

- rete di distribuzione isolata a configurazione orizzontale;
- contatore di energia termica smart per ogni utente della rete;
- sistema centralizzato di generazione energia termica alimentato a gas naturale;
- sistema di emissione a bassa temperatura (e.g., termoconvettori, pannelli radianti con temperatura di mandata compresa tra 40 °C e 50 °C);
- due distinti sistemi di produzione di energia termica rinnovabile del tipo collettore solare termico a lastra piana da 6 kW asserviti ai due prosumer del condominio.

Nello schema di simulazione ipotizzato, ogni utente della rete è dotato di uno o più smart meter termici a seconda della tipologia di utente analizzata. Nel caso dei semplici consumatori di energia termica, è necessario un solo contatore di energia termica smart per la misura del consumo mentre, nel caso del prosumer, due diversi contatori di energia termica smart devono essere destinati, rispettivamente, alla misura dell'energia consumata e di quella prodotta. Ciascun meter è identificato sul livello digitale con un indirizzo unico ed invia con frequenza oraria un messaggio al network che viene crittografato e memorizzato nella rete blockchain. Il sistema così descritto è schematicamente formato da quattro livelli: i) sensore; ii) comunicazione; iii) elaborazione dati; iv) storage.

Sulla base delle caratteristiche fisiche del sistema, schematizzato qualitativamente in Figura 30, è stato pertanto ipotizzato uno scenario di applicazione dello SC al trading di energia termica P2P basato sullo schema di flusso descritto in Figura 31.

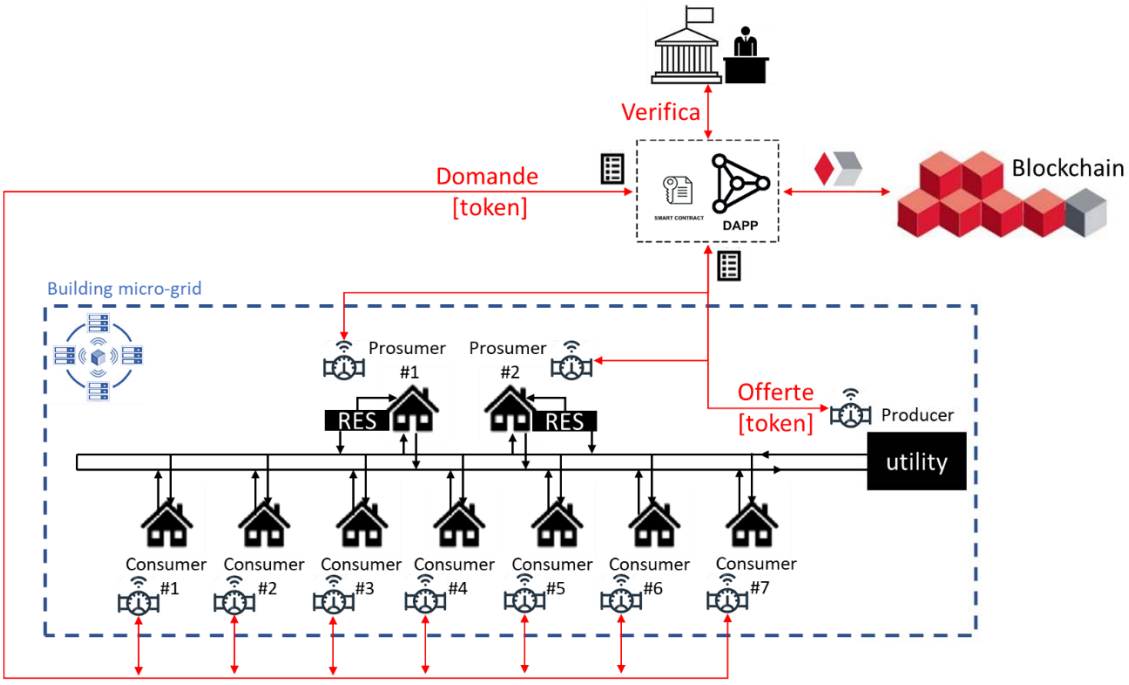


Figura 30 –Schema rete-Smart Contract-blockchain

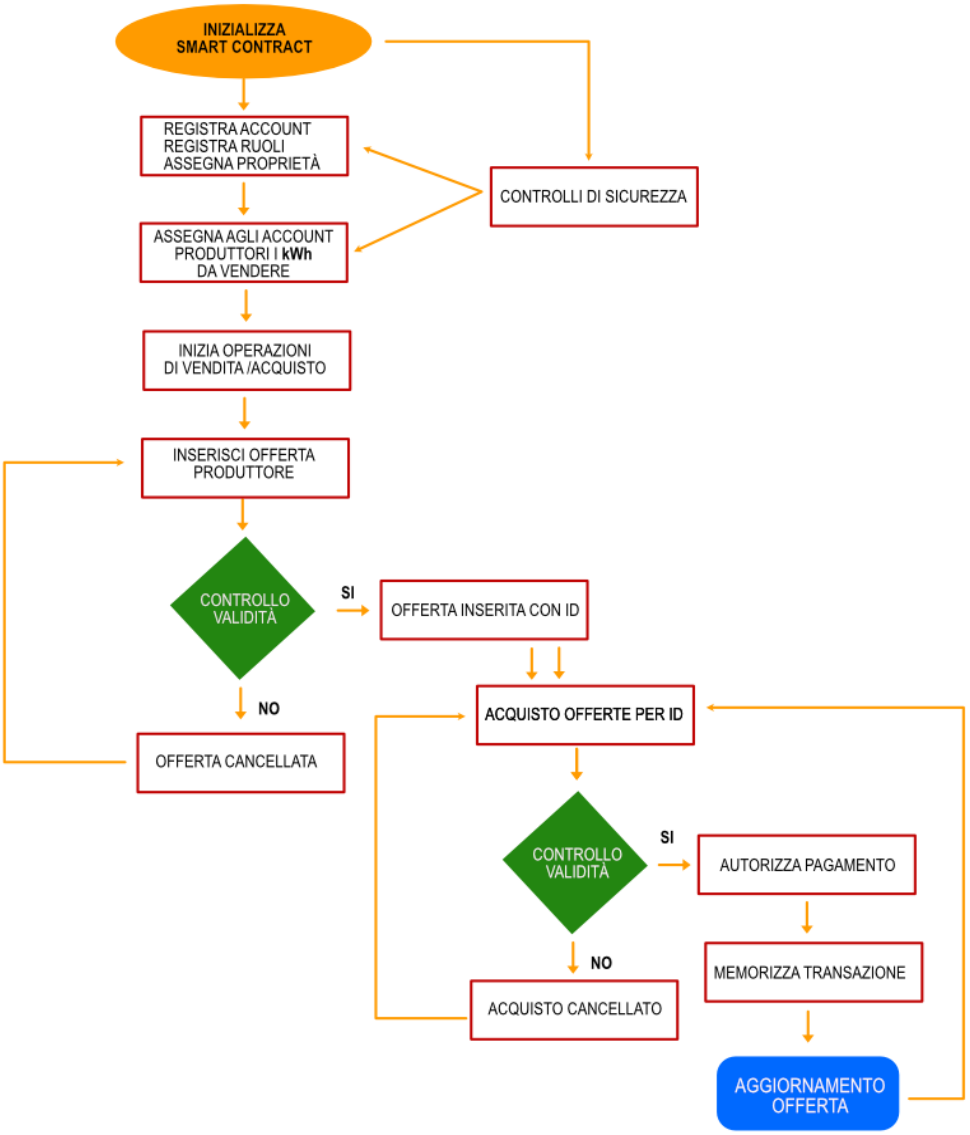


Figura 31 – Caso di studio n.3: schema a blocchi dello SC

I dati di misura dei contatori di energia termica sono inviati, attraverso protocollo TCP/IP, ad un nodo centrale gateway protetto da un firewall. Il firewall assicura che la connettività tra il dispositivo ed il nodo di comunicazione sia crittografato e che solo il dispositivo con il MAC (Media Access Control) Address abilitato possa comunicare i dati. I dati raccolti dal nodo gateway sono trasmessi ad una DApp che esegue le funzioni dello Smart Contract (SC) raccogliendo e criptando tali informazioni in un blocco di in una rete blockchain privata PoS. Le stesse informazioni successivamente potranno essere recuperate ed elaborate da ulteriori DApp per diverse finalità, tra le quali:

- tracciamento certificato dell'energia consumata, con la creazione di un token dedicato da riutilizzare nel circuito;
- certificazione dei dati immessi in rete con sviluppo di un sistema predittivo di analisi dei consumi utente;
- fatturazione intelligente, cashless e automatizzata.

La fase di inizializzazione richiama il comando di registrazione degli account dei consumatori e dei produttori, con relativa assegnazione di token. Nella seconda fase, avviene la lettura della capacità (energia termica prodotta) e del prezzo offerto dai generatori (inclusi i prosumer). A valle di un primo controllo di validità,

l'offerta viene quindi dichiarata agli acquirenti (consumatori) ed inserita con un determinato ID nella blockchain dando inizio alle operazioni di vendita. A questo punto, i consumatori (ovvero gli utenti interessati all'acquisto) possono inviare una richiesta di acquisto di una certa quantità di energia. Il passo successivo consiste nel valutare la fattibilità fisica degli scambi attraverso il controllo dei flussi di rete. Se tale verifica ha esito positivo, il pagamento viene autorizzato e lo SC viene aggiornato con l'esito e la transazione energetica utilizzando la registrazione dello smart meter del generatore. La transazione viene quindi archiviata, rendendola irreversibile. Una volta verificate, si controllano e aggiornano le unità totali di energia disponibile in rete.

4.2.1 Compilazione dello SC

Lo SC sviluppato è scritto nel linguaggio di programmazione *Solidity*. Nella scrittura dello SC, è stato utilizzato un framework opensource denominato **OpenZeppelin**[10]: un set di librerie che fornisce prodotti di sicurezza per creare, automatizzare e gestire applicazioni decentralizzate, rendendole più sicure alle vulnerabilità.

In Figura 32 sono riportate le informazioni relative alla licenza e alla versione di *Solidity* impiegata per lo sviluppo dello SC, insieme alla scelta del compilatore `pragma`. Il comando **import** è utile a richiamare le librerie OpenZeppelin:

- estensione ***ERC20:*** fornisce funzionalità di base per trasferire token, oltre a consentire l'approvazione dei token in modo che possano essere spesi da una terza parte on-chain;
- estensione ***ERC20Burnable***: consente a proprietario del contratto di distruggere sia i propri token che quelli per i quali hanno un importo del token registrato;
- estensione ***ERC20Snapshot:*** consente di effettuare uno snapshot dei bilanci dei token in qualsiasi momento;
- estensione ***AccessControl:*** fornisce un meccanismo generale di controllo degli accessi basato sul ruolo;
- estensione ***Pausable:*** offre un meccanismo di arresto di emergenza che può essere attivato da un account autorizzato, utile per bloccare tutte le transazioni in caso di problemi sullo SC.

Nel codice in Figura 32 sono inoltre definiti: i) il nome di tutti i contratti da compilare; ii) i ruoli definiti per le operazioni di sicurezza; iii) la definizione del nome del contratto, del token (SME) ed il costruttore che attribuisce al "deployer address" del contratto (i.e., **msg.sender)** i vari ruoli e permessi di esecuzione; iv) definizione delle funzioni delle librerie OpenZeppelin. La funzione **_mint()** attribuisce un valore iniziale di 100 token SME al deployer address per tutte le future operazioni "*payable*" - ossia spendibili - che richiederanno un costo di transazione sulla blockchain (i.e., "gas fee"). Le funzioni ***snapshot(), pause(), unpause(), _mint() e _beforeTokenTransfer()*** richiamano alcune delle funzioni principali delle librerie di OpenZeppelin.

```
// SPDX-License-Identifier: MIT
pragma solidity ^0.8.4;
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/ERC20.sol";
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/extensions/ERC20Burnable.sol";
import "@openzeppelin/contracts/token/ERC20/extensions/ERC20Snapshot.sol";
import "@openzeppelin/contracts/access/AccessControl.sol";
import "@openzeppelin/contracts/security/Pausable.sol";

contract SmartEnergy is ERC20, ERC20Burnable, ERC20Snapshot, AccessControl, Pausable,
ERC20Permit {
    bytes32 public constant SNAPSHOT_ROLE = keccak256("SNAPSHOT_ROLE");
    bytes32 public constant PAUSER_ROLE = keccak256("PAUSER_ROLE");
```

[10] https://docs.openzeppelin.com/contracts

```
    bytes32 public constant MINTER_ROLE = keccak256("MINTER_ROLE");
    bytes32 public constant REGISTER_ROLE = keccak256("REGISTER_ROLE");

    constructor() ERC20("SmartEnergy", "SME") ERC20Permit("SmartEnergy") {
        _grantRole(DEFAULT_ADMIN_ROLE, msg.sender);
        _grantRole(SNAPSHOT_ROLE, msg.sender);
        _grantRole(PAUSER_ROLE, msg.sender);
        _grantRole(MINTER_ROLE, msg.sender);
        _grantRole(REGISTER_ROLE, msg.sender);
        _mint(msg.sender,100); // Operazioni iniziali
 }
function snapshot() public onlyRole(SNAPSHOT_ROLE) {
        _snapshot();
    }
    function pause() public onlyRole(PAUSER_ROLE) {
        _pause();
    }
    function unpause() public onlyRole(PAUSER_ROLE) {
        _unpause();
    }
    function mint(address to, uint256 amount) public onlyRole(MINTER_ROLE) {
        _mint(to, amount);
    }
    function _beforeTokenTransfer(address from, address to, uint256 amount)
        internal
        whenNotPaused
        override(ERC20, ERC20Snapshot)
    {
        super._beforeTokenTransfer(from, to, amount);
    }
```

Figura 32 – Definizione licenza, compilatore, importazione librerie OpenZeppelin e caratteristiche del contratto e del costruttore

In Figura 33, è mostrato il codice utile alla definizione di: i) la struttura di un utente del tipo “consumatore” (i.e., User), ii) l’array di utenti; iii) il mapping degli utenti.

```
    struct User
    {
        address userAddress;
        string userRole;
    }
    User[] public Utenti;

    mapping(address => User) utenti; //
```

Figura 33 – Definizione struttura utente, array e mapping

A valle della definizione della struttura dell’utente, vengono definite tre nuove funzioni, come illiustrato nel codice in Figura 34: i) la funzione ***strcmp,*** che consente di confrontare il valore di due stringhe, ii) la funzione ***RuoloUtenteRegistrato*** che consente di conoscere il ruolo dell’indirizzo Ethereum registrato, e iii) la funzione ***ControllaUtente*** che consente di associare un valore booleano (i.e., TRUE/FALSE) a ciascun indirizzo Ethereum registrato, utile nei controlli delle funzioni successive dello SC.

```
// Funzione che confronta stringhe
    function memcmp(bytes memory a, bytes memory b) internal pure returns(bool){
        return (a.length == b.length) && (keccak256(a) == keccak256(b));
    }
    function strcmp(string memory a, string memory b) internal pure returns(bool){
        return memcmp(bytes(a), bytes(b));
    }
```

```
// controlla il ruolo dell'indirizzo registrato
   event ruoloUtente( address sender,string message);
   function RuoloUtenteRegistrato(address _indirizzo) public returns(string memory
_role){
       for(uint i =0; i < Utenti.length; i++)
       {
           if (Utenti[i].userAddress == _indirizzo)
           {
               _role = Utenti[i].userRole;
               emit ruoloUtente(_indirizzo,_role);
               return _role;
           }
       }
   }

// controlla se l'indirizzo è già presente e registrato
  function ControllaUtente(address _indirizzo) public view returns (bool) {
   for(uint i =0; i < Utenti.length; i++)
       {
            if (Utenti[i].userAddress == _indirizzo)
            {
                return true;
            }
       }
       return false;
       }
```

Figura 34 – Definizione delle funzioni di supporto allo SC

In Figura 35 è mostrato il codice di calcolo utile alla definizione della funzione **nuovoUtente**. Tale funzione è utile a: i) l'inserimento di un nuovo utente nella blockchain, attraverso l'immissione dell'indirizzo Ethereum corrispondente; ii) l'associazione di un ruolo all'utente; iii) l'attribuzione di un valore iniziale di token pari a 0 SMC. Il valore di 1 token SMC equivale ad un 1 kWh moltiplicato per il prezzo unitario del kWh, stabilito dal produttore stesso. Sono stati previsti due ruoli per gli utenti della rete: ***"produttore"***, per il quale è possibile solo la vendita di energia, e ***"consumatore"***, per il quale è possibile solo l'acquisto di energia. La funzione **nuovoUtente** può essere richiamata solo dal gestore del contratto oppure da un indirizzo "admin" definito attraverso la funzione ***"grantRole"*** della libreria OpenZeppelin Access ControlRole[11]. La funzione controllerà contestualmente che gli indirizzi registrati non siano duplicati nel sistema. Il gestore del contratto può "***mintare***" (ossia generare) ed inviare la quantità di token SMC necessaria al produttore dopo avere effettuato i controlli sulla reale quantità di energia generata dal produttore.

```
// Inserisci nuovo utente
   // solo il gestore del contratto può registrare un nuovo utente/indirizzo
   // ruoli possibili: "produttore" "consumatore"
   // attribuisco un valore 0 al portafoglio
   event nuovoUtente( address sender, bool, string message, string role);
   function   NuovoUtente   (   address   _indirizzo,   string   memory   _role)   public
onlyRole(DEFAULT_ADMIN_ROLE)
   {
   if (ControllaUtente(_indirizzo))
       {
           emit nuovoUtente(_indirizzo, false, "Errore: Indirizzo registrato!","");
           return;
       }
   else
       {
       utenti[_indirizzo].userAddress = _indirizzo;
       utenti[_indirizzo].userRole = _role;
       mint(_indirizzo,0);
```

[11] https://docs.openzeppelin.com/contracts/3.x/api/access#AccessControl-grantRole-bytes32-address-

```
        Utenti.push(User({userAddress: _indirizzo, userRole: _role}));
        emit nuovoUtente(_indirizzo, true, "Indirizzo inserito",_role);
        }
    }
```

Figura 35 – Registrazione Utente e Ruolo

È necessario a questo punto definire una funzione per abilitare i produttori alla vendita dell'energia termica. A tale scopo, viene definita la funzione ***VendiEnergia*** (Figura 36) che effettua un controllo preventivo per determinare se: i) l'indirizzo è registrato nel sistema e che il venditore di energia sia un **produttore** registrato; ii) il bilancio dei token SMC sia superiore al prezzo di vendita definito dalla quantità di kWh × prezzo di vendita; iii) l'ID (identificativo progressivo delle offerte) sia presente. A valle dei controlli, la funzione inserisce l'offerta del produttore nella blockchain assegnando un corretto ID vendita. Le offerte dei produttori popoleranno in tempo reale la lista di vendita dei produttori correttamente registrati i quali potranno offrire liberamente l'energia rinnovabile autoprodotta al prezzo di vendita desiderato.

```
// Vendo
 Vendo[] public Vendi;

 mapping(address => mapping(uint => uint)) public VendiIndex;

 event LogOfferta(address sender, uint idofferta, uint qty);
 event Errore(address sender, string messaggio );

 //Vendo energia solo se il mio credito lo permette
 function VendiEnergia(uint  idofferta, uint qty,  uint prezzo) public payable{
      if (ControllaUtente(msg.sender) != true )
       {
       emit Errore(msg.sender,"Indirizzo non registrato o non abilitato per la vendita");
       return;
       }

       // nessun ruolo o consumatore
       if                (strcmp(RuoloUtenteRegistrato(msg.sender),"")                ||
strcmp(RuoloUtenteRegistrato(msg.sender),"consumatore")   )
       {
       emit Errore(msg.sender,"Indirizzo inesistente o non registrato come produttore per
effettuare la vendita");
       return;
       }

       if (msg.sender.balance < qty*prezzo) {
       emit  Errore(msg.sender,"Errore!  Non  puoi  vendere  una  quantita'  superiore  al
bilancio");
       return;
       }
   uint id = VendiIndex[msg.sender][idofferta];

   //controllo se ID l'offerta è già presente
   for(uint i =0; i < Vendi.length; i++)
       {
            if (Vendi[i].idofferta == idofferta)
            {
            emit Errore(msg.sender,"Errore! ID offerta presente");
            return;
            //revert();
            }
       }
   id = Vendi.length;
   VendiIndex[msg.sender][idofferta] = id;
   Vendi.push(Vendo({
     _indirizzo: msg.sender,
     idofferta: idofferta,
     qty: qty,
```

```
      prezzo: prezzo
      }));
    emit      LogOfferta(Vendi[id]._indirizzo,      Vendi[id].idofferta,      Vendi[id].qty*
Vendi[id].prezzo);
  }
```

Figura 36 – Funzione di vendita dell'energia

La funzione ***CompraEnergia***, il cui codice è mostrato in Figura 36, può essere richiamata solo da un User che sia un "consumatore" registrato (msg.sender). Preliminarmente, la funzione è programmata per effettuare una serie di controlli atti a:

- verificare che l'ID dell'offerta richiamata sia presente;
- recuperare le informazioni di vendita dell'offerta in base all'ID;
- controllare che il bilancio dei token SMC del consumatore sia superiore al prezzo di vendita definito dalla quantità di kWh × prezzo di vendita.

Se le condizioni sono soddisfatte, la funzione procede ad acquistare l'offerta inviando i token SMC al produttore attraverso la funzione **_trasfer()** e, successivamente, procede a modificare la quantità di energia rimanente dell'offerta, cosi da renderla disponibile per nuovi acquisti da parte di altri consumatori.

```
//Compra energia solo se il credito lo permette
 function CompraEnergia(uint idofferta, uint qty) public payable{
   // recupero offerta dall'id
   for(uint i =0; i < Vendi.length; i++)
       {
            if (Vendi[i].idofferta == idofferta )
            {
                  // nessun ruolo produttore
                  if           (strcmp(RuoloUtenteRegistrato(msg.sender),"")           ||
strcmp(RuoloUtenteRegistrato(msg.sender),"produttore")   )
                  {
                  emit  Errore(msg.sender,"Indirizzo  inesistente  o  non  registrato  come
consumatore");
                  return;
                  }

                  if (msg.sender.balance < Vendi[i].qty*Vendi[i].prezzo)
                  {
                  emit  Errore(msg.sender,"Errore!  Non  puoi  acquistare  una  quantita'
superiore al tuo bilancio");
                     return;
                  }
                  // compra

_transfer(msg.sender,Vendi[i]._indirizzo,Vendi[i].qty*Vendi[i].prezzo);
                  // aggiornamento offerta
                  Vendi[i].qty -= qty;
                  emit        LogOfferta(Vendi[i]._indirizzo,        Vendi[i].idofferta,
Vendi[i].qty);
            }
       }
   }
}
```

Figura 37 – Funzione di Acquisto energia

4.2.2 Compilazione locale dello SC tramite Truffle Suite

Lo SC definito al precedente paragrafo è stato compilato in locale utilizzando la Suite Truffle precedentemente descritta. In particolare, in Figura 38 è mostrata l'inizializzazione del contratto (**truffle init**).

```
#truffle init

Starting init...
================
> Copying project files to Desktop/sme
Init successful, sweet!
```

Figura 38 – Inizializzazione della struttura del progetto

In Figura 39 è mostrata la truffle **"create contract SmartEnergy"** che ha la funzione di creare la struttura di base per la compilazione dello SC. Il codice "**npm install --save-exact openzeppelin-solidity"** installa la libreria openzeppelin Solidity. Le librerie Solidity installate su "/node_modules" sono prontamente disponibili senza alcuna configurazione.

```
#truffle create contract SmartEnergy
#npm init -y
Wrote to /Users/Desktop/sme/package.json:
{
 "name": "sme",
 "version": "1.0.0",
 "description": "",
 "main": "truffle-config.js",
 "directories": {
   "test": "test"
 },
 "scripts": {
   "test": "echo \"Error: no test specified\" && exit 1"
 },
 "keywords": [],
 "author": "",
 "license": "ISC"
}

#npm install --save-exact openzeppelin-solidity
added 1 package, and audited 2 packages in 2s
found 0 vulnerabilities
```

Figura 39 – Creazione dello SC e installazione delle librerie di supporto OpenZeppelin

In Figura 40 è descritto il deploy del contratto sulla rete di test disponibile sulla blockchain con ID di transazione `xd947d7a9f733070cf10051fbc95b49e19e07a761ec4d370417e353eef557a805` e avente come indirizzo `0x58dC0a6b8C9bdcAbdA3D0D50Bb6Db0c0a544F3bD`.

```
#truffle deploy

Compiling your contracts...
===========================
✔ Fetching solc version list from solc-bin. Attempt #1
> Compiling ./contracts/Migrations.sol
> Compiling ./contracts/SmartEnergy.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/access/AccessControl.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/access/IAccessControl.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/security/Pausable.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/token/ERC20/ERC20.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/token/ERC20/IERC20.sol
```

```
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/token/ERC20/extensions/ERC20Burnable.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/token/ERC20/extensions/ERC20Snapshot.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/token/ERC20/extensions/IERC20Metadata.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/token/ERC20/extensions/draft-ERC20Permit.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/token/ERC20/extensions/draft-IERC20Permit.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/utils/Arrays.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/utils/Context.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/utils/Counters.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/utils/Strings.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/utils/cryptography/ECDSA.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/utils/cryptography/draft-EIP712.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/utils/introspection/ERC165.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/utils/introspection/IERC165.sol
> Compiling openzeppelin-solidity/contracts/utils/math/Math.sol
✔ Fetching solc version list from solc-bin. Attempt #1
> Artifacts written to /Users/dago/Desktop/sme/build/contracts
> Compiled successfully using:
  - solc: 0.8.12+commit.f00d7308.Emscripten.clang


Starting migrations...
======================
> Network name:    'ganache'
> Network id:      5777
> Block gas limit: 6721975 (0x6691b7)


1_initial_migration.js
======================

  Deploying 'Migrations'
  ----------------------
  >                                   transaction                                   hash:
0xb002b3936942c5c122673861404eff8c47746e6ab3a7745c37198c92674fa0ab
  > Blocks: 0            Seconds: 0
  > contract address:    0x49b63B894071Dc17b76C7B3DAC63B0d8ed9DA39F
  > block number:        1
  > block timestamp:     1646146858
  > account:             0x1b5dB30dcB0D8D92CE8836d2Cd39C7b0B7F1d65a
  > balance:             99.99502316
  > gas used:            248842 (0x3cc0a)
  > gas price:           20 gwei
  > value sent:          0 ETH
  > total cost:          0.00497684 ETH


  > Saving migration to chain.
  > Saving artifacts
  -------------------------------------
  > Total cost:          0.00497684 ETH


2_deploy_contracts.js
=====================

  Deploying 'SmartEnergy'
  -----------------------
  >                                   transaction                                   hash:
0xd947d7a9f733070cf10051fbc95b49e19e07a761ec4d370417e353eef557a805
  > Blocks: 0            Seconds: 0
  > contract address:    0x58dC0a6b8C9bdcAbdA3D0D50Bb6Db0c0a544F3bD
  > block number:        3
  > block timestamp:     1646146858
  > account:             0x1b5dB30dcB0D8D92CE8836d2Cd39C7b0B7F1d65a
  > balance:             99.88968378
  > gas used:            5224456 (0x4fb808)
  > gas price:           20 gwei
```

```
   > value sent:           0 ETH
   > total cost:           0.10448912 ETH


   > Saving migration to chain.
   > Saving artifacts
   -------------------------------------
   > Total cost:           0.10448912 ETH


Summary
=======
> Total deployments:   2
> Final cost:          0.10946596 ETH
```

Figura 40 – Smart contract compilato e pubblicato sulla rete locale

Le transazioni eseguite dallo SC sono visualizzate utilizzando l'interfaccia grafica Ganache GUI (Figura 41 e Figura 42).

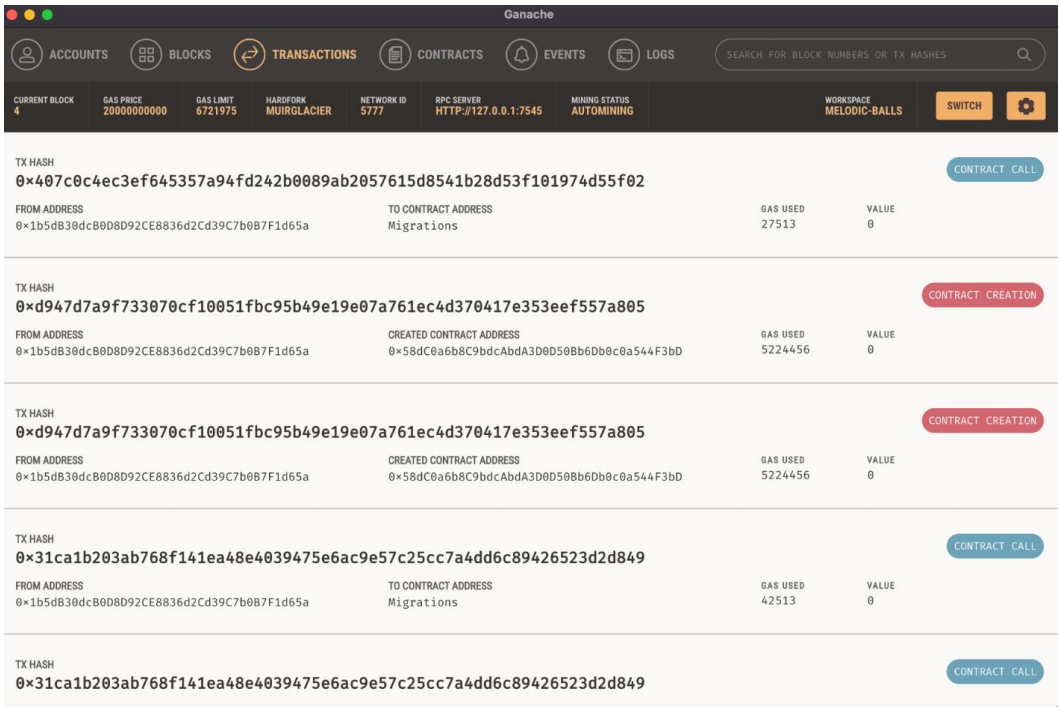


Figura 41 – Esempio di transazione eseguita

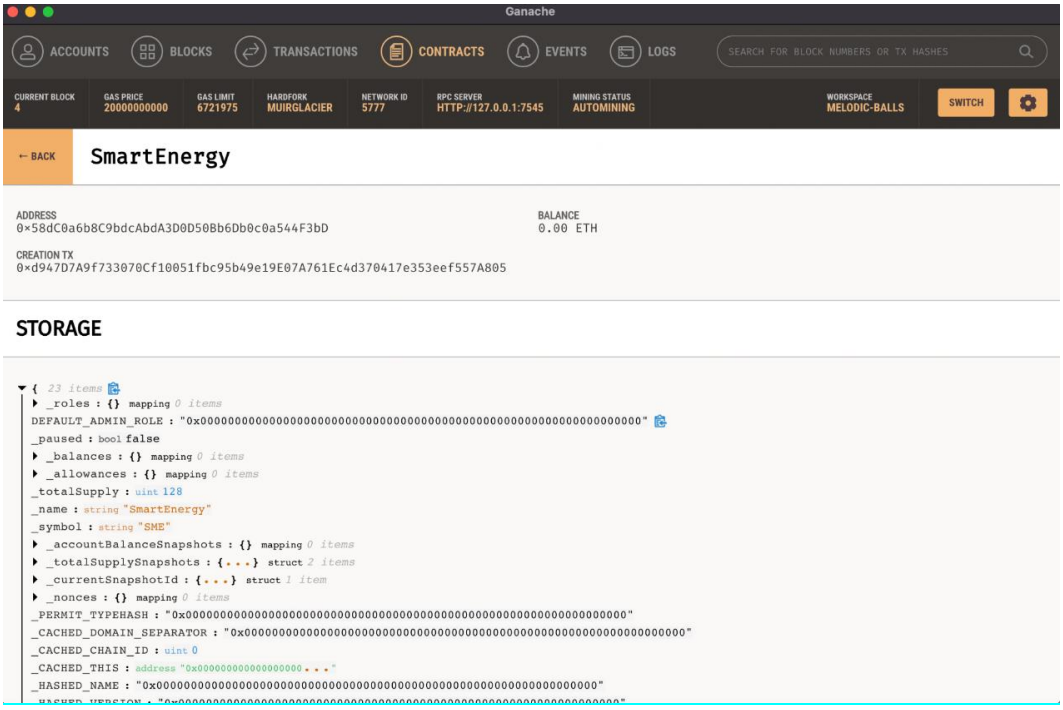


Figura 42 – Esempio di contratto

4.2.3 Simulazione degli scenari di trading

Al fine di analizzare le potenzialità dell'applicazione della blockchain al caso di studio utilizzato in fase di progettazione, è stata condotta una simulazione volta a caratterizzare due semplici scenari di compravendita dell'energia termica rinnovabile autoprodotta dai prosumer. A tale scopo, si è reso necessario ricostruire, per ciascun utente della rete, i profili di consumo e di produzione (n.b., per i soli due prosumer della rete) orari in un determinato intervallo temporale. Si osservi infatti che l'attuale sistema di monitoraggio installato nell'edificio, consente di misurare i consumi di energia termica a livello di edificio e di stimare i consumi di energia termica dei singoli utenti del condominio con una frequenza giornaliera. È verosimile tuttavia che il trading di energia termica tra gli utenti avvenga "in tempo reale", ovvero su scale temporali che richiedono una misura dell'energia consumata e prodotta con una risoluzione infragiornaliera (i.e., oraria, quartoraria). Nel presente lavoro, sono stati simulati i consumi e la produzione orari degli utenti della rete in un periodo di 15 giorni compreso tra il 01/03/2020 ed il 15/03/2020.

Per costruire il profilo orario di consumo dei 9 utenti della rete è stato adottato un approccio in due fasi successive: i) determinazione della domanda di energia termica; ii) determinazione dei profili orari di occupazione.

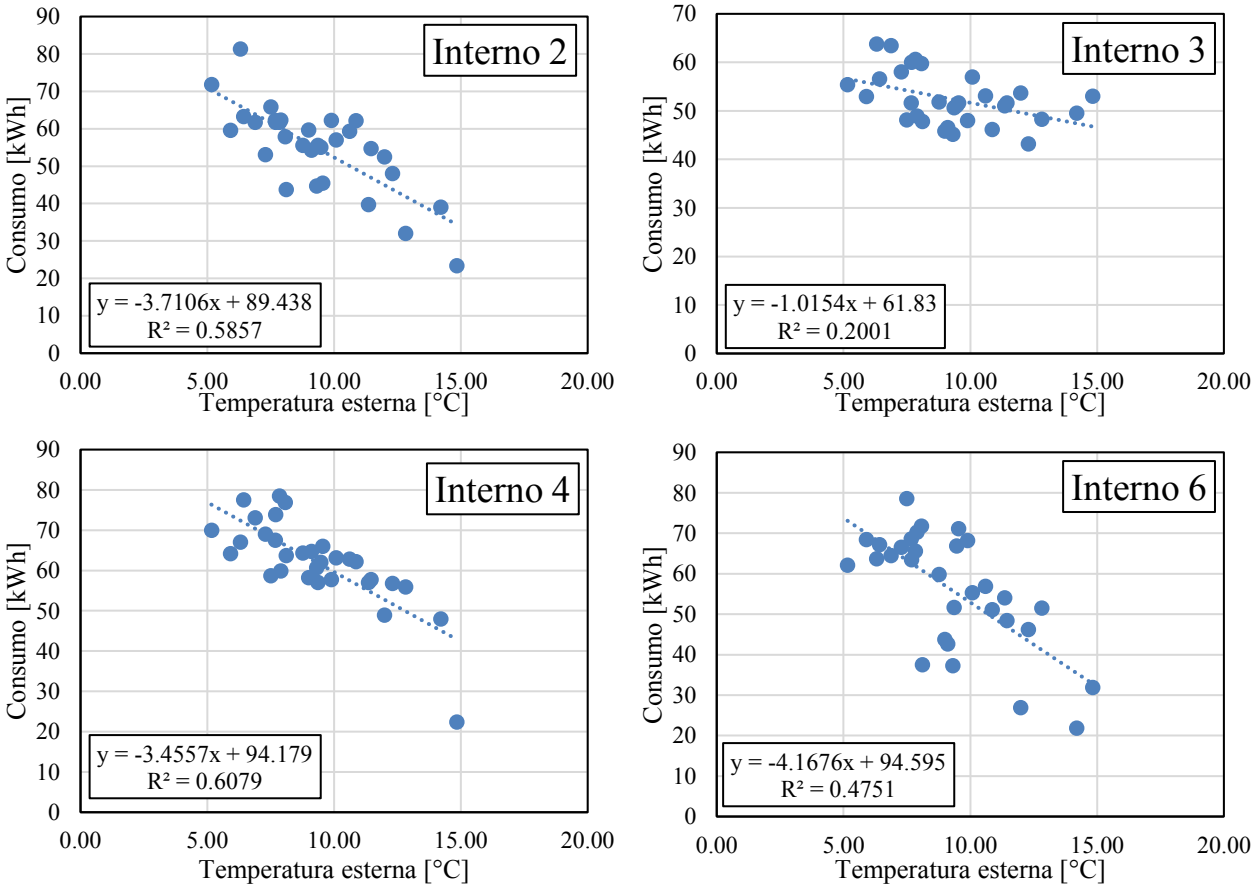
4.2.3.1 Determinazione della domanda di energia termica

La firma energetica è un noto strumento di diagnosi energetica che consente di mettere in relazione, attraverso un'analisi di regressione, il consumo energetico di un dato utente con la variazione della temperatura esterna. Nel caso in esame, sono stati utilizzati i dati storici di consumo giornaliero riferiti al mese di marzo 2020 e ricavati, per ogni singolo utente, dalla post-elaborazione dei dati grezzi restituiti dal sistema di conabilizzazione installato nell'edificio.

È stato possibile ottenere le firme energetiche soltanto di 7 dei 9 appartamenti dell'edificio ATER 18C in quanto due appartamenti risultano non occupati (Interni 1 e 5); in questo caso, i coefficienti di regressione sono stati ricavati come media dei coefficienti dei restanti appartamenti. I risultati di questa analisi sono illustrati in Figura 43 ed i coefficienti descrittivi delle rette di regressione sono riportati in Tabella 11. Nella tabella, i coefficienti m e q degli interni inoccupati (i.e., interni 1 e 5) sono stati ricavati come media aritmetica dei coefficienti degli altri utenti della rete.

Tabella 11 – Coefficienti delle rette di regressione

Utente	*m*	*q*	R^2
Interno 1	-3.9	99.1	n.a.
Interno 2	-3.7	89.4	0.59
Interno 3	-1.0	61.8	0.20
Interno 4	-3.5	94.2	0.61
Interno 5	-3.9	99.1	n.a.
Interno 6	-4.2	94.6	0.48
Interno 7	-6.2	99.5	0.61
Interno 8	-5.2	127.2	0.58
Interno 9	-3.6	126.9	0.38



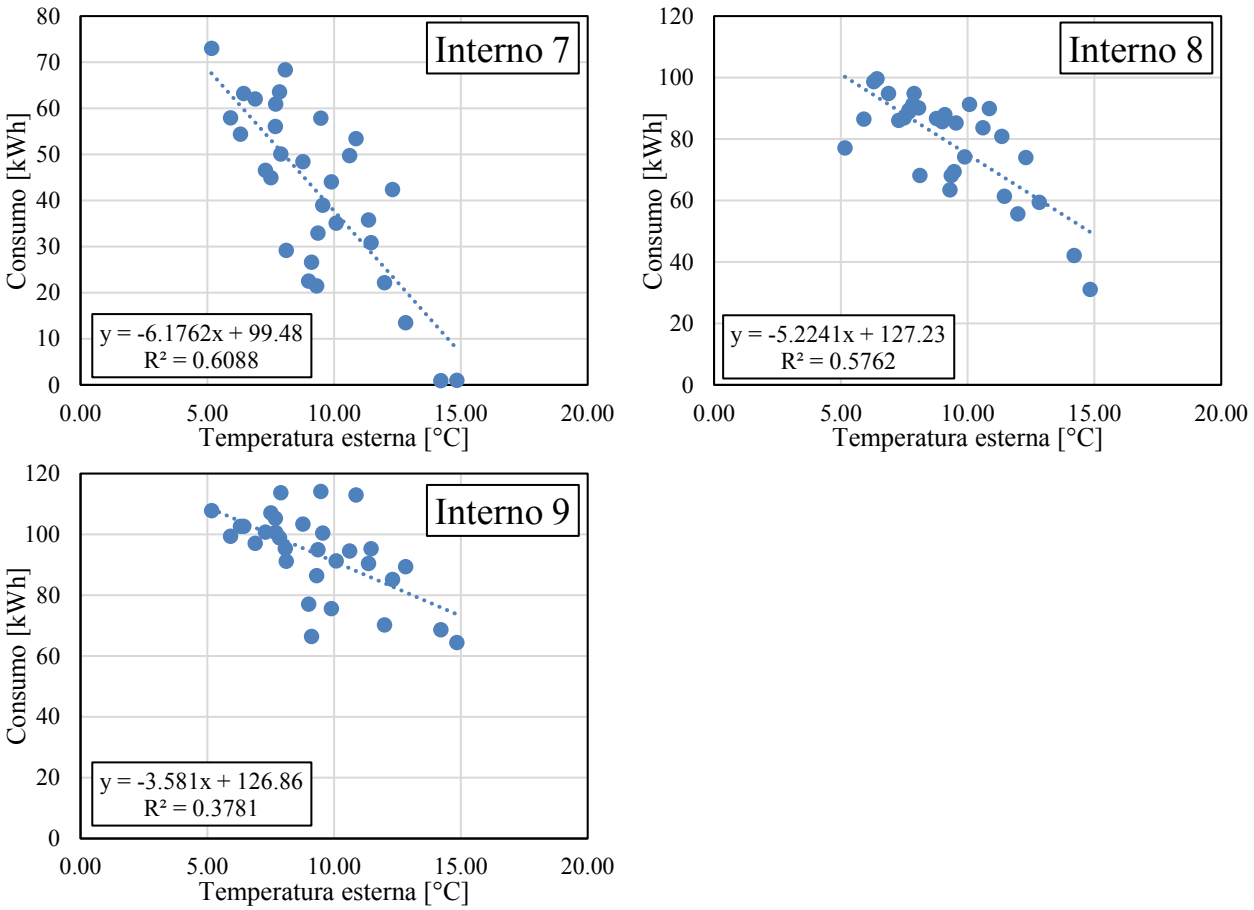


Figura 43 – Firme energetiche degli utenti

Si osservi che i consumi giornalieri utilizzati per ricavare le firme energetiche si riferiscono ad un numero di ore di accensione dell'impianto pari a 10 ore/giorno (i.e., dalle 6:00 alle 9:00 e dalle 15:00 alle 22:00). Per tenere conto, inoltre, delle differenze impiantistiche ipotizzate tra il caso di studio reale e quello simulato (i.e. impianto di emissione a ventilconvettori con $T_{mandata}$= 50 °C invece che con radiatori in ghisa con $T_{mandata}$= 80 °C, sistema di distribuzione isolato del tipo orizzontale invece che verticale non isolato) è stato considerato un minor consumo pari al 35% rispetto al consumo misurato. La domanda di energia termica associabile a ciascun utente i-esimo nell'ora h ($Q_{i,h}$) è pertanto data dall'equazione:

$$Q_{i,h} = 0.65 \cdot \frac{1}{10} \cdot (m_i \cdot T_h + q_i) \quad (20)$$

Dove $(m_i \cdot T_h + q_i)$ è la firma energetica dell'utente i-esimo ricavata con i coefficienti specifici in Tabella **11**, nota la variazione oraria della temperatura media esterna T_h nel periodo di riferimento e misurata mediante una centralina climatica.

Nota la domanda di energia di ogni singolo appartamento (attraverso la firma energetica), al fine di simulare l'effettivo prelievo orario di energia termica di ogni appartamento, sono state considerati 6 profili orari di occupazione [105], come illustrato in Tabella 12.

Tabella 12 – Profili di occupazione [105]

Profilo	*Descrizione*	*Periodo di non occupazione*
1	Lavoratore part-time (mattina) 1/2	9:00-13:00
2	Lavoratore full-time	9:00-18:00
3	Lavoratore part-time 2/3	9:00-16:00
4	Non lavoratore	-
5	Lavoratore part-time (pomeriggio) 1/2	13:00-18:00
6	Appartamento inoccupato	00:00 – 24:00

Ciascun profilo di occupazione assegna una variabile binaria ad ogni ora del periodo di riferimento (i.e. 1 per i periodi di occupazione e 0 per i periodi di non occupazione). Al fine di rendere la simulazione più fedele alla reale conduzione dell'impianto di riscaldamento, è stata ipotizzata l'attenuazione del 60% della potenza erogata dall'impianto durante le ore notturne (i.e., dalle 23:00 alle 5:00, estremi inclusi). In Figura 44, sono riportati due esempi rappresentativi dei profili di occupazione di un lavoratore full time (profilo 2, a destra) e di un non lavoratore (profilo 4, a sinistra).

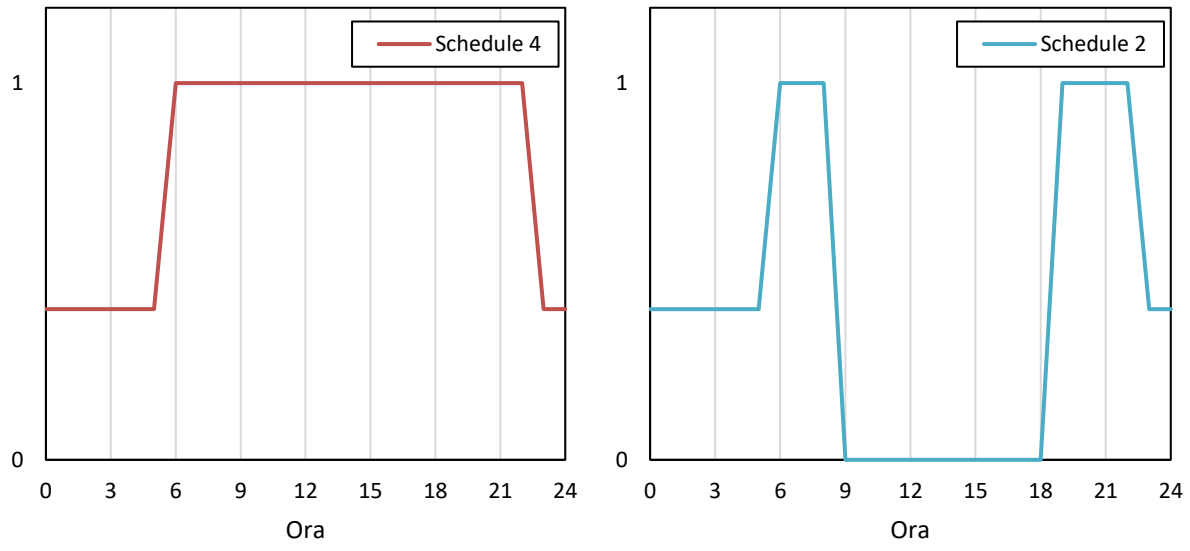


Figura 44 – Profili di occupazione: a) non lavoratore (occupazione continuativa) e b) lavoratore full time

Il consumo orario simulato di ciascun utente è stato quindi ricavato moltiplicando la domanda oraria di energia termica ($Q_{i,h}$) per il profilo orario di occupazione. In Figura 46 è riportato un esempio rappresentativo dei consumi di energia termica simulati nel giorno 01/03/2020 associando agli interni 1, 2 e 4 il profilo 4 (occupazione continuativa), agli interni 3, 5, 6, 8 e 9 il profilo 2 (lavoratore full-time 9:00-18:00) e all'interno 7 il profilo 3 (lavoratore part-time 9:00-16:00).

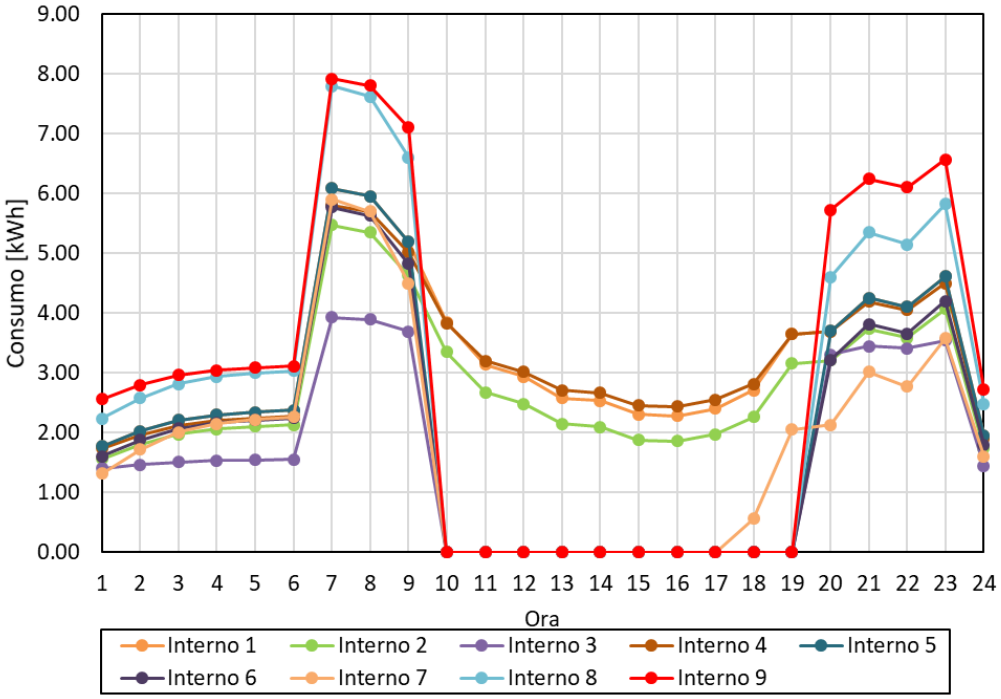


Figura 45 – Consumo orario di energia termica (01/03/2020)

4.2.4 Profili orari di produzione

Come precedentemente menzionato, è stata ipotizzata la presenza di due distinti sistemi di produzione di energia termica rinnovabile del tipo collettore solare termico a lastra piana da 6 kW asserviti ai due prosumer del condominio (interni 8 e 9). Il calcolo dell'energia termica oraria prodotta dai due sistemi è stato effettuato adottando la metodologia semplificata descritta in [106], che propone un metodo semplice, basato sull'utilizzo di pochi semplici parametri prestazionali sull'assunzione di una temperatura media costante nel collettore. I collettori solari sono descritti in tal senso mediante tre parametri di efficienza:

- efficienza a perdita nulla: n_0
- coefficiente di dispersione termica del 1° ordine: a_1
- coefficiente di dispersione termica del 2° ordine: a_2

Utilizzando questi parametri, l'efficienza del collettore può essere espressa come [106]:

$$n = n_0 - \frac{a_1(T_m - T_a)}{G} - \frac{a_2(T_m - T_a)^2}{G} \quad (21)$$

Da cui la potenza termica prodotta è ricavabile mediante l'equazione:

$$P = A\,(n_0\,G - a_1(T_m - T_a) - a_2(T_m - T_a)^2) \quad (22)$$

Dove:

- G è l'irradiazione solare espressa in W/m2;
- T_m è la temperatura media del collettore solare termico, espressa in K o in °C;
- T_a è la temperatura ambiente, espressa in K o in °C;
- A è l'area del collettore solare termico espressa in m^2.

Si osservi che G e T_a sono dati meteorologici definiti dalla località e misurati nel presente lavoro con una centralina climatica posta a 10 km dal sito di installazione con una frequenza quartoraria. Tm è stata assunta costante e pari a 60°C [106]. I parametri prestazionali utilizzati per il calcolo si riferiscono ad un sistema commerciale [107] sono riportati in Tabella 13.

Tabella 13 – Parametri prestazionali collettore solare termico

Parametro	*Valore*
a1	3.594
a2	0.014
n0	78.50%
A	1.84 m^2

In Figura 46 è riportato il profilo di produzione simulato nel periodo di riferimento di uno dei due collettori installati.

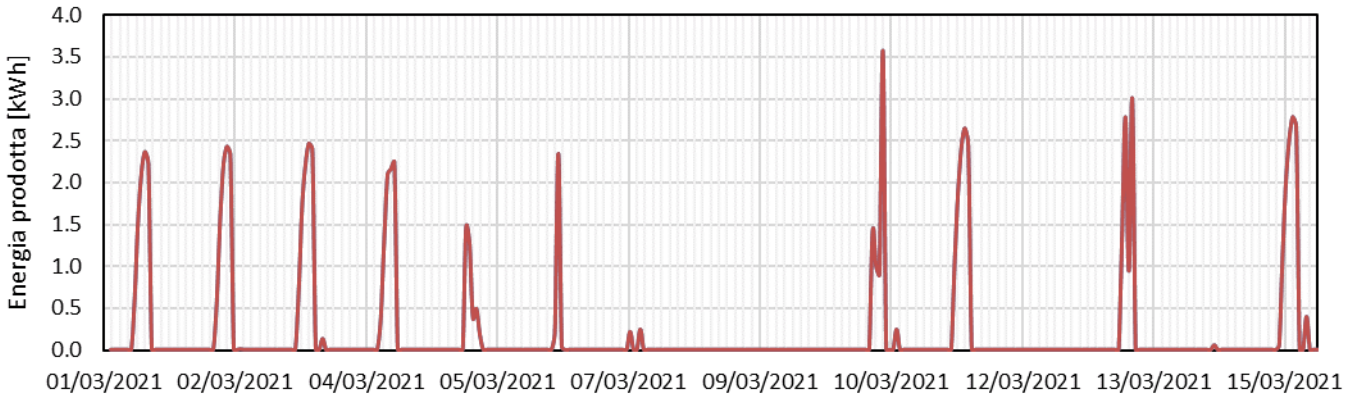


Figura 46 – Profilo di produzione simulato di un collettore solare termico composto da 4 pannelli piani, P_{max}=1507 W a 1000 W/m^2)

4.2.5 Descrizione degli scenari di simulazione

Al fine di realizzare uno scenario di compravendita dell'energia termica rinnovabile, è necessario che, in un dato periodo di tempo, la produzione rinnovabile del prosumer superi il suo consumo di energia termica. In tal caso, una certa quantità di energia termica prodotta in surplus rimarrà a disposizione dell'utente per due diverse finalità: i) accumulo e successivo autoconsumo (nel caso in cui l'utente disponga di un serbatoio di accumulo di energia termica); ii) vendita diretta verso i consumatori allacciati in rete ad un prezzo inferiore al prezzo di rete (nel caso invece in cui non sia possibile accumulare l'energia termica). Sono stati quindi ipotizzati e confrontati due scenari di occupazione:

- **Scenario A**: i prosumer della rete hanno profilo di occupazione n. 2 (lavoratore full-time 9:00-18:00);
- **Scenario B**: i prosumer della rete hanno profilo di occupazione n. 6 (appartamento non occupato).

I profili di occupazione associati agli altri utenti sono identici in entrambi gli scenari. Pertanto, la sola differenza tra i due scenari è rappresentata dai profili di occupazione degli interni 8 e 9 (prosumer nella rete), come riportato in Tabella 14. Non essendo gli interni 8 e 9 occupati, l'autoconsumo di energia termica rinnovabile nello Scenario B è nullo.

Tabella 14 – Profili di occupazione

Utente	Tipo	Scenario A	Scenario B
Interno 1	Consumatore	4 - Non lavoratore	4 - Non lavoratore
Interno 2	Consumatore	4 - Non lavoratore	4 - Non lavoratore
Interno 3	Consumatore	2 - Lavoratore full-time	2 - Lavoratore full-time
Interno 4	Consumatore	4 - Non lavoratore	4 - Non lavoratore
Interno 5	Consumatore	2 - Lavoratore full-time	2 - Lavoratore full-time
Interno 6	Consumatore	2 - Lavoratore full-time	2 - Lavoratore full-time
Interno 7	Consumatore	3 - Lavoratore part-time 2/3	3 - Lavoratore part-time 2/3
Interno 8	Prosumer	2 - Lavoratore full-time	6 – Non occupato
Interno 9	Prosumer	2 - Lavoratore full-time	6 – Non occupato

Si osservi che, in entrambi gli scenari di occupazione, i profili di occupazione dei consumer e dei prosumer sono stati assegnati per ottenere che nelle ore di produzione (i.e., le ore centrali della giornata) i prosumer non richiedano consumo di energia termica dalla rete, realizzando la condizione $\text{Surplus} = \text{Produzione} - \text{Consumo} > 0$ e, nel contempo, che almeno un altro utente della rete sia nello stesso momento disponibile a consumare l'energia prodotta in surplus. Sebbene questa condizione potrebbe non essere realizzata in ogni caso in una piccola rete come quella analizzata, è ipotizzabile che al crescere del numero di utenti essa sia sempre verificata.

Per entrambi gli scenari, è stata effettuata una valutazione preliminare dell'impatto dell'applicazione del trading dell'energia termica, confrontando, a parità di scenario di occupazione, i consumi e la spesa complessiva della rete in presenza ed in assenza di trading.

Riguardo alla prima alternativa (assenza di trading), è stato ipotizzato che l'energia prodotta nelle ore di assenza sia accumulata in un boiler[12] di proprietà esclusiva dell'utente e poi utilizzata successivamente (i.e., nelle ore di occupazione) dall'utente stesso, opportunamente decurtata delle perdite di accumulo, per ridurre il consumo di energia termica del prosumer. La seconda alternativa (presenza di trading) prevede la vendita diretta dell'energia termica prodotta e non immediatamente consumata dai prosumer nei periodi di inoccupazione ad altri utenti che, nello stesso momento, richiedono energia alla rete.

Per la simulazione, sono stati considerati i seguenti parametri:

- Potere calorifico inferiore (PCI) del gas naturale pari a 9.47 kWh/m^3;
- Costo del metro cubo di gas naturale (C_{GN}) prelevato al generatore costante nel periodo di riferimento e pari a 0.85 €/m^3;
- Costo dell'energia termica (C_{ET}) prelevata da rete costante nel periodo di riferimento e pari a C_{GN}/ PCI = 0.09 €/kWh;
- Costo dell'energia termica rinnovabile C_{ET} acquistata sul posto da prosumer scontato del 40% rispetto a C_{GN}.

In Figura 47 a titolo di esempio viene riportato l'andamento orario della domanda di energia termica, della produzione e dell'autoconsumo relativi al prosumer interno 9 per due giorni rappresentativi del periodo di analisi (Scenario A). In Figura 48, invece, è mostrato l'andamento orario della domanda aggregata degli interni 1, 2 e 4 e quello dell'energia totale prodotta e venduta in rete (Scenario B).

[12] In tale trattazione, si ipotizza che il boiler abbia sempre la capacità di accumulo richiesta dalla produzione.

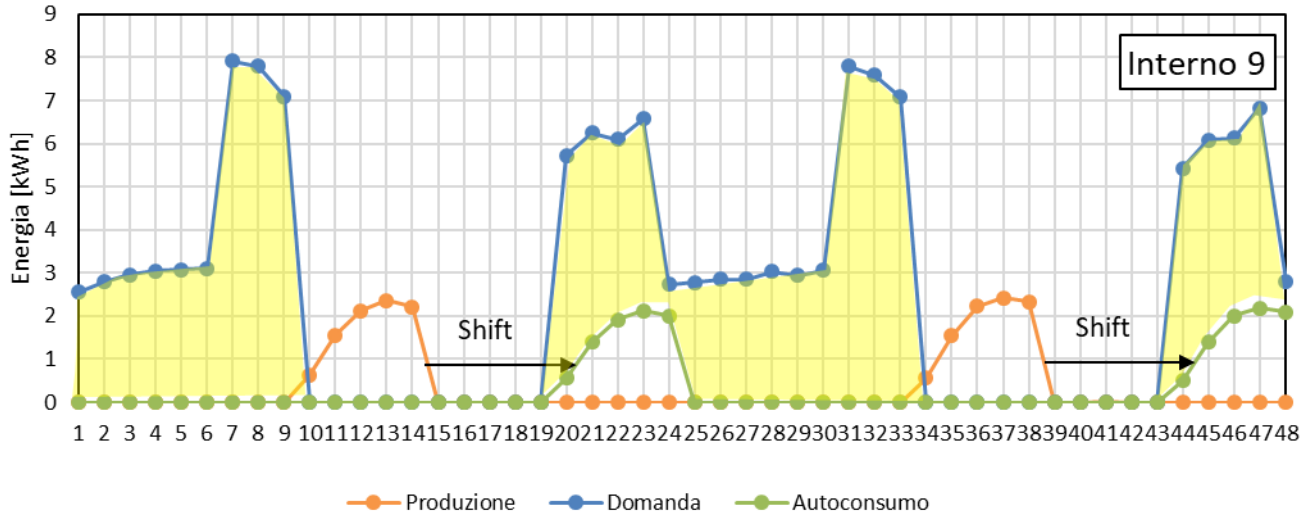


Figura 47 – Interno 9, Scenario A: Andamenti orari della domanda di energia termica, produzione e autoconsumo per due giorni rappresentativi (in giallo la domanda netta alla rete).

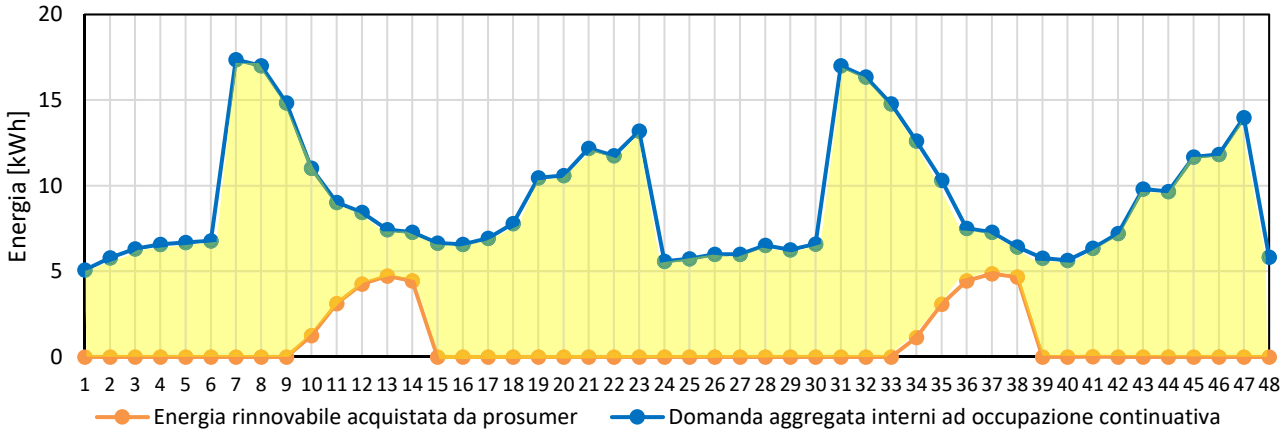


Figura 48 – Scenario B: Andamento orario della domanda aggregata di energia termica degli interni 1, 2 e 4 e della produzione aggregata in due giorni rappresentativi (in giallo la domanda netta alla rete).

Di seguito sono riportati i risultati della simulazione nei due scenari con il confronto rispetto alla condizione di riferimento rappresentata dalla classica ripartizione 70-30 delle quote variabile e fissa. In tabella sono riportati i dati di:

- Domanda di energia, ovvero l'energia termica richiesta dall'utente al sistema di generazione per mantenere i livelli di comfort ambientale, kWh;
- Autoconsumo al netto delle perdite del sistema di accumulo, ovvero l'energia rinnovabile prodotta ed autoconsumata dai prosumer dotati di impianto rinnovabile, kWh;
- Consumo al generatore, ovvero l'energia termica richiesta dall'utente al sistema di generazione per mantenere i livelli di comfort ambientale al netto dell'autoconsumo e dell'energia acquistata sul posto, kWh;
- Quota fissa, ovvero il 30% del costo energetico suddiviso in parti uguali tra i 9 condomini, €;

- Quota variabile, ovvero il il 70% del costo energetico ripartito proporzionalmente ai consumi individuali misurati dai 9 condomini, €;
- Spesa totale, come somma di quota fissa e variabile, €.

Per tenere conto delle inevitabili perdite di rete, di accumulo e di generazione si è considerato un livello di perdita di generazione del 10%, di perdita di distribuzione del 10% e di perdita di accumulo pari al 10%.

4.2.5.1 Risultati Scenario A (solo Autoconsumo, assenza di Trading)

In Tabella 16 sono mostrati i risultati della simulazione nel caso in cui tutta l'Energia Rinnovabile prodotta sul posto viene autoconsumata dagli stessi prosumer (Interni 8 e 9) dotati di sistema di generazione di energia termica rinnovabile (scenario A). I dati di ripartizione sono confrontati con lo Scenario base (ripartizione 70-30 senza autoconsumo) riportato in Tabella 15. Non è presente trading di energia tra gli utenti.

Tabella 15 – Caso di studio n.3, Scenario A, Ripartizione 70/30

Consumo di energia misurato agli appartamenti	7486 kWh
Consumo di energia misurato all'ingresso del generatore	9242 kWh
Costo energia	829.51 €

	Domanda energia [kWh]	*Autocons. [kWh]*	*Totale [kWh]*	*Quota fissa [€]*	*Quota Trading [€]*	*Quota variabile [€]*	*Spesa Totale [€]*
Interno 1	1158	-	1158	27.65 €	-	89.81 €	117.46 €
Interno 2	1008	-	1008	27.65 €	-	78.22 €	105.87 €
Interno 3	519	-	519	27.65 €	-	40.26 €	67.91 €
Interno 4	1150	-	1150	27.65 €	-	89.20 €	116.85 €
Interno 5	671	-	671	27.65 €	-	52.03 €	79.68 €
Interno 6	609	-	609	27.65 €	-	47.26 €	74.91 €
Interno 7	565	-	565	27.65 €	-	43.82 €	71.47 €
Interno 8 (prosumer)	846	-	846	27.65 €	-	65.66 €	93.31 €
Interno 9 (prosumer)	959	-	959	27.65 €	-	74.39 €	102.04 €

Tabella 16 – Caso di Studio n.3, Scenario A, Ripartizione 70/30 con Autoconsumo

Consumo di energia misurato agli appartamenti	7342 kWh
Consumo di energia misurato all'ingresso del generatore	9065 kWh
Costo energia	813.60 €

	Domanda energia [kWh]	*Autocons. [kWh]*	*Totale [kWh]*	*Quota fissa [€]*	*Quota Trading [€]*	*Quota variabile [€]*	*Spesa Totale [€]*	*Diff. [€]*
Interno 1	1158	-	1158	27.12 €	-	89.81 €	116.93 €	-0.53 €
Interno 2	1008	-	1008	27.12 €	-	78.22 €	105.34 €	-0.53 €
Interno 3	519	-	519	27.12 €	-	40.26 €	67.38 €	-0.53 €
Interno 4	1150	-	1150	27.12 €	-	89.20 €	116.32 €	-0.53 €
Interno 5	671	-	671	27.12 €	-	52.03 €	79.15 €	-0.53 €
Interno 6	609	-	609	27.12 €	-	47.26 €	74.38 €	-0.53 €
Interno 7	565	-	565	27.12 €	-	43.82 €	70.94 €	-0.53 €
Interno 8 (prosumer)	846	72	775	27.12 €	-	60.09 €	87.21 €	-6.10 €
Interno 9 (prosumer)	959	72	887	27.12 €	-	68.83 €	95.95 €	-6.10 €
							Risparmio rete	-15.90 €

4.2.5.2 Risultati Scenario B (solo Trading, assenza di Autoconsumo)

In Tabella 18 sono mostrati i risultati della simulazione nel caso in cui tutta l'Energia Rinnovabile prodotta sul posto viene venduta dai prosumer (Scenario B). I dati di ripartizione sono confrontati con lo Scenario base (ripartizione 70-30 senza trading) riportato in Tabella 17, in cui sono stati annullati i consumi degli utenti 8 e 9 (ipotesi di appartamenti non occupati). Per semplicità di trattazione, si è ipotizzato che tutta l'energia prodotta dai prosumer (Interno 8 e 9) viene venduta in parti uguali tra gli utenti con profilo di occupazione continuativa (i.e., Interni 1, 2 e 4). Non viene effettuato autoconsumo avendo ipotizzato che i due appartamenti non sono stati occupati per tutto il periodo di analisi.

Tabella 17 – Caso di studio n.3, Scenario B, Ripartizione 70/30

Consumo di energia misurato agli appartamenti	5680 kWh
Consumo di energia misurato all'ingresso del generatore	7013 kWh
Costo energia	629.44 €

	Domanda energia [kWh]	*Autocons. [kWh]*	*Totale [kWh]*	*Quota fissa [€]*	*Quota Trading [€]*	*Quota variabile [€]*	*Spesa Totale [€]*
Interno 1	1158	-	1158	20.98 €	-	89.81 €	110.79 €
Interno 2	1008	-	1008	20.98 €	-	78.22 €	99.20 €
Interno 3	519	-	519	20.98 €	-	40.26 €	61.24 €
Interno 4	1150	-	1150	20.98 €	-	89.20 €	110.18 €
Interno 5	671	-	671	20.98 €	-	52.03 €	73.01 €
Interno 6	609	-	609	20.98 €	-	47.26 €	68.24 €
Interno 7	565	-	565	20.98 €	-	43.82 €	64.80 €
Interno 8 (prosumer)	-	-	0	20.98 €	-	-	20.98 €
Interno 9 (prosumer)	-	-	0	20.98 €	-	-	20.98 €

Tabella 18 – Caso di studio n.3, Scenario B, Ripartizione 70/30 con Trading

Consumo di energia misurato agli appartamenti	5537 kWh
Consumo di energia misurato all'ingresso del generatore	6835 kWh
Costo energia	613.53 €

	Domanda energia [kWh]	*Acquisto ER [kWh]*	*Totale [kWh]*	*Quota fissa [€]*	*Quota Trading [€]*	*Quota variabile [€]*	*Spesa Totale [€]*	*Diff. [€]*
Interno 1	1158	48	1110	20.45 €	2.58 €	86.10 €	109.13 €	- 1.66 €
Interno 2	1008	48	961	20.45 €	2.58 €	74.51 €	97.54 €	- 1.66 €
Interno 3	519	-	519	20.45 €	-	40.26 €	60.71 €	- 0.53 €
Interno 4	1150	48	1102	20.45 €	2.58 €	85.49 €	108.52 €	- 1.66 €
Interno 5	671	-	671	20.45 €	-	52.03 €	72.48 €	- 0.53 €
Interno 6	609	-	609	20.45 €	-	47.26 €	67.71 €	- 0.53 €
Interno 7	565	-	565	20.45 €	-	43.82 €	64.27 €	- 0.53 €
Interno 8 (prosumer)	-	-	-	20.45 €	- 3.87 €	-	16.59 €	- 4.40 €
Interno 9 (prosumer)	-	-	-	20.45 €	- 3.87 €	-	16.59 €	- 4.40 €
							Risparmio rete	-15.90 €

Dai dati riportati in Tabella 16 e in Tabella 18 è evidente che la scelta dell'autoconsumo o del trading dell'energia rinnovabile (scenario A e B, rispettivamente) non comporta alcuna differenza in termini di risparmio energetico globale per la rete. In entrambi i casi infatti l'energia termica richiesta al generatore dalla rete, al netto dei consumi degli interni 8 e 9, è identica, dal momento che l'energia termica rinnovabile prodotta è tutta autoconsumata all'interno della rete stessa (scenario A) o tutta venduta ai consumer della rete (scenario B). Questo è anche una diretta conseguenza delle ipotesi adottate per il calcolo e, in particolare, che: i) sia sempre possibile accumulare ed autoconsumare tutta l'ER, ii) l'ER accumulata e scambiata sul posto sia soggetta alla stessa aliquota di perdite (perdite di accumulo ER = perdite di distribuzione ER = 10%). Al fine quindi di una valutazione più accurata della convenienza delle due strategie (i.e., Trading e Autoconsumo) sarebbe necessaria una valutazione dettagliata: i) delle perdite di accumulo (PA) e di quelle di distribuzione (PD) dell'ER (e.g. nella condizione PA > PD, il trading assumerebbe una maggiore convenienza rispetto al semplice autoconsumo; ii) dell'effettiva capacità di accumulo dell'ER autoprodotta (e.g nel caso in cui l'accumulo è saturo nelle ore di produzione, il trading P2P consentirebbe di utilizzare ER altrimenti persa).

D'altro canto, lo scenario B risulta particolarmente efficace nella dimostrazione delle potenzialità del trading P2P applicato alle piccole reti di energia termica. In questo scenario, infatti, gli utenti dotati di sistemi di generazione rinnovabile (interno 8 e interno 9) sono stati ipotizzati entrambi assenti nel periodo di riferimento. In questo caso, l'ER autoprodotta in loco andrebbe di fatto persa in assenza di trading, perché non autoconsumabile direttamente dai produttori.

Il confronto dei dati presentati in Tabella 18 (presenza di trading) con quelli riportati in Tabella 17 (ripartizione senza trading) mettono in evidenza come il trading generi un beneficio sia energetico (minori consumi di energia primaria nel periodo di calcolo) che economico. È opportuno inoltre evidenziare che il beneficio economico generato (pari complessivamente a circa 15.90 € corrispondenti a circa 2,5% della spesa nel periodo di calcolo e nelle ipotesi assunte) non riguarda i soli utenti coinvolti nella compravendita (i.e., il prosumer che risparmia vendendo energia inutilizzata, ed il consumatore che acquista energia ad un prezzo conveniente rispetto a quello di rete), ma anche gli altri utenti della rete (anche se in misura minore), dal momento che una riduzione dell'energia prelevata dalla rete principale corrisponde a minori perdite di rete, con conseguente riduzione della quota fissa.

5 Piattaforma monitoraggio consumi energetici dei condomini

Ad integrazione delle attività descritte nel Report di Ricerca RdS/PTR2020/130 [104], Linea di attività 3.5 "*Analisi ed applicazione delle tecnologie IoT per la consapevolezza dei consumi negli edifici intelligenti*", presso il condominio ATER Anagni 18/C è stata completata, in collaborazione con ENEA, l'installazione di:

- N. 14 sonde radio temperatura/umidità, costruttore Coster, modello THP 868;
- N. 1 quadro elettrico di monitoraggio in centrale termica completo di alimentazione elettrica e sonda di temperatura esterna.

L'installazione è stata effettuata in 7 dei 9 appartamenti. In particolare, sono state installate due sonde radio temperatura/umidità per ogni appartamento, collocate rispettivamente nel corridoio della zona giorno e nel disimpegno della zona notte, di modo da monitorare le due zone d'uso principali di ogni abitazione. Le sonde sono state collocate a parete, a distanza di sicurezza da possibili fonti di calore (e.g., radiatori) e di generazione di vapore. In Figura 49 sono riportate a titolo di esempio alcune immagini delle installazioni effettuate.

Figura 49 – (a) Sonda radio di temperatura/umidità COster THP 868; (b) Quadro elettrico installato nel locale caldaia; (c) Installazione sonda radio zona giorno; (d) Installazione sonda radio zona notte

Contestualmente all'installazione dei sensori, è stata eseguita una campagna di informazione utente, al fine di informare i condomini sull'utilizzo della piattaforma di monitoraggio descritta nel Report ENEA RdS/PTR2021/127. A tale scopo, sono state eseguite le seguenti attività:

- Consegna dei bollettini informativi (vedi fac-simile in Figura 50) contenenti gli indici di consumo della stagione precedente, secondo le modalità descritte in [108];
- Informazione agli utenti relativamente a: i) le modalità di accesso alla piattaforma; ii) le funzionalità della piattaforma di monitoraggio; iii) le potenzialità di risparmio energetico connesse all'uso della piattaforma;
- Consegna di una "Guida-utente" per l'accesso alla piattaforma, in formato cartaceo, con le credenziali di accesso (vedi Figura 51).

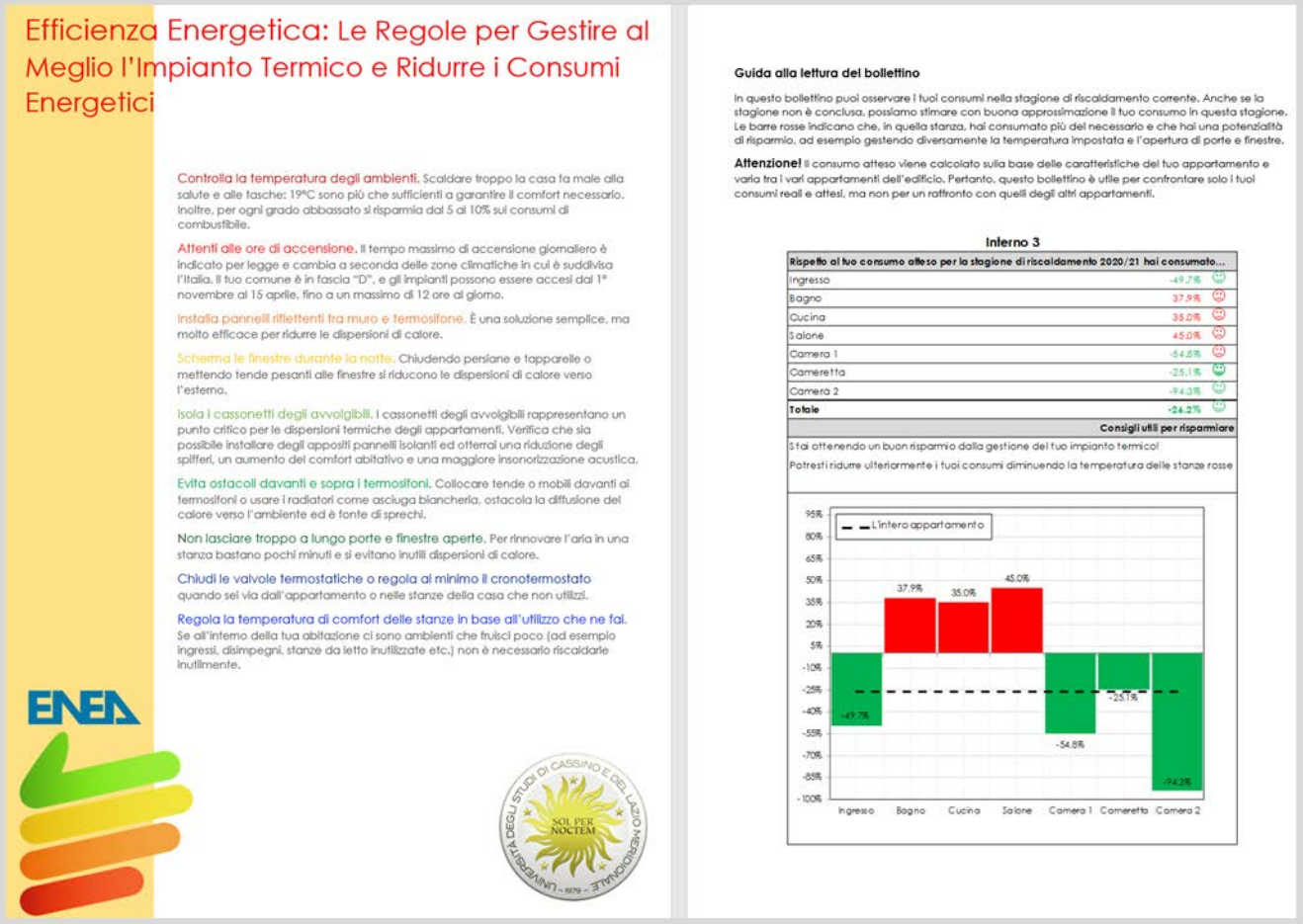
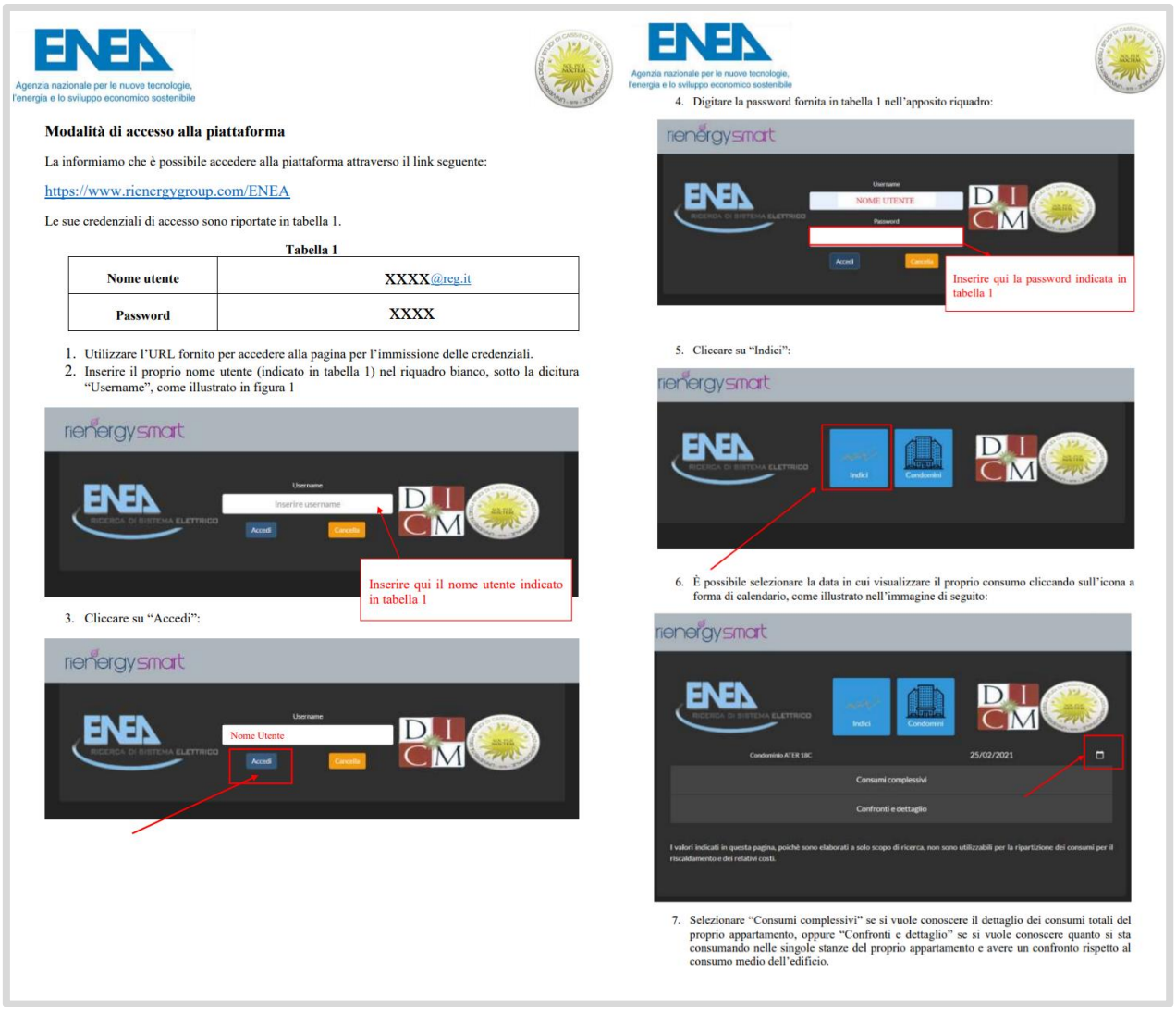


Figura 50 – Fac-simile Bollettino informativo stagione 2020/2021



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

Modalità di accesso alla piattaforma

La informiamo che è possibile accedere alla piattaforma attraverso il link seguente:

https://www.rienergygroup.com/ENEA

Le sue credenziali di accesso sono riportate in tabella 1.

Tabella 1

Nome utente	XXXX@reg.it
Password	XXXX

1. Utilizzare l'URL fornito per accedere alla pagina per l'immissione delle credenziali.
2. Inserire il proprio nome utente (indicato in tabella 1) nel riquadro bianco, sotto la dicitura "Username", come illustrato in figura 1

3. Cliccare su "Accedi":

4. Digitare la password fornita in tabella 1 nell'apposito riquadro:

5. Cliccare su "Indici":

6. È possibile selezionare la data in cui visualizzare il proprio consumo cliccando sull'icona a forma di calendario, come illustrato nell'immagine di seguito:

7. Selezionare "Consumi complessivi" se si vuole conoscere il dettaglio dei consumi totali del proprio appartamento, oppure "Confronti e dettaglio" se si vuole conoscere quanto si sta consumando nelle singole stanze del proprio appartamento e avere un confronto rispetto al consumo medio dell'edificio.

Figura 51 - Guida utente per l'accesso in piattaforma

6 Conclusioni

Nel presente rapporto sono descritte le attività di ricerca svolte ed i principali risultati ottenuti nell'ambito dall'accordo di collaborazione tra ENEA e DICEM (Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica) dell'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale con lo scopo di analizzare gli effetti dell'applicazione delle nuove tecnologie di gestione dei dati di misura nelle reti di teleriscaldamento /teleraffrescamento. Il lavoro ha riguardato principalmente due ambiti: la valutazione delle performance delle tecniche di profilazione attualmente impiegate nelle reti gas per la previsione dei consumi e l'utilizzo della tecnologia blockchain nelle reti energetiche, con particolare riferimento alle reti termiche.

L'analisi è stata sviluppata in tre distinte linee di ricerca, per le quali di seguito si riportano sinteticamente le principali conclusioni.

Con riferimento all'analisi dei metodi di previsione dei consumi di gas naturale, è stata condotta un'analisi delle metodologie impiegate dai tre paesi maggiori consumatori di gas naturale in Europa, ovvero Italia, Germania e Regno Unito. Si è proceduto poi ad applicare i modelli su due diverse scale al fine di valutarne l'accuratezza di previsione: i) la scala urbana (caso di studio n. 1) e ii) scala edificio (caso di studio n. 2). Relativamente alla previsione dei consumi di gas naturale di uno stock edilizio urbano (caso di studio n. 1) le metodologie analizzate sono state applicate ad una rete cittadina di distribuzione del gas presentando una buona accuratezza su un orizzonte temporale annuale (errore compreso tra -1.8 e -5.7%). L'accuratezza tende tuttavia a peggiorare quando l'analisi viene effettuata su base mensile. In quest'ultimo caso, il metodo italiano presenta la migliore accuratezza (errore tendenzialmente inferiore a ± 10%), mentre i metodi tedesco e inglese presentano errori mensili tendenzialmente maggiori. Questo risultato è ovviamente dovuto alle necessarie differenze esistenti tra i profili di consumo reali (rete gas italiana) e i parametri utilizzati per la profilazione, che sono basati sui rispettivi stili di consumo e sulle caratteristiche climatiche nazionali. Alcuni fattori contribuiscono a determinare errori sistematici nella stima dei consumi degli utenti NDM, quali ad esempio: i) la categorizzazione dell'utente, che spesso non ne rispecchia le reali abitudini e i reali utilizzi del gas naturale; ii) l'accuratezza degli SLP, definiti dalle normative nazionali e utilizzati per modellare il comportamento degli utenti finali; iii) l'accuratezza dei dati climatici utilizzati; iv) la frequenza reale di lettura dei contatori. In relazione alla previsione dei consumi dei singoli edifici (caso di studio n. 2), il modello italiano ha mostrato buona accuratezza su base annua (errore annuo compreso tra -3.6% e +3.4%), ma una limitata capacità di predire le variazioni giornaliere dei consumi (coefficiente di variazione stagionale nel range 20-30%) legati alle variazioni della temperatura esterna. Di contro, il metodo tedesco ha mostrato minore accuratezza e la tendenza a sottostimare i consumi (errore annuo compresa tra -6.9% e -3.6%) ed un coefficiente di variazione stagionale compreso tra 18-25%, dimostrando di utilizzare in maniera più efficace la variabile climatica della temperatura esterna. Si riscontra infine il tendenziale (anche se limitato) miglioramento dell'accuratezza della previsione in presenza di una seconda lettura dei consumi e conseguente aggiornamento del profilo nel periodo di calcolo.

Con riferimento allo studio delle esperienze condotte in ambito internazionale dell'applicazione della blockchain nel settore energetico, è stata effettuata un'analisi della letteratura scientifica sull'argomento. Una rete Blockchain può essere definita come un registro condiviso tra pari crittograficamente sicuro, immutabile e aggiornabile solo con il consenso dei pari che vi partecipano. È quindi una piattaforma nella quale i partecipanti che hanno tutti lo stesso livello ed autorità possono scambiare valori (i.e. energia) attraverso transazioni che non necessitano di un'autorità fiduciaria centrale. L'applicazione al settore energetico, in particolare, può consentire di incentivare l'active demanding, aumentare l'efficienza delle reti aumentando lo scambio tra pari e quindi limitando le perdite di rete, consentendo lo scambio delle eccedenze (in uno scenario di comunità energetica). Al momento le prime esperienze di applicazione delle Blockchain nel settore energetico possono essere definite ancora allo stadio di sperimentazione e sono sostanzialmente limitate al settore dell'energia elettrica, dove è maggiormente diffusa la produzione distribuita con fonti rinnovabili. Nel settore dell'energia termica (teleriscaldamento/raffrescamento), l'applicazione della

tecnologia Blockchain può portare benefici relativamente a diversi processi, quali: i) la produzione, il trasporto e la distribuzione dell'energia termica; ii) il trading e la fatturazione di energia; iii) il recupero di energia, iv) lo sviluppo di smart grid e micro-grid (e.g. in uno scenario comunità energetica). Di contro, la tecnologia Blockchain presenta ancora numerosi limiti ed aspetti da approfondire, soprattutto a livello normativo e regolatorio. In particolare, occorre valutare i possibili rischi per la sicurezza/privacy dei partecipanti, l'elevato consumo di energia necessario per garantire l'attuazione della rete (potenza di calcolo) e l'elevata complessità di attivazione e gestione. A questi si aggiungono limiti nell'efficienza in termini di scalabilità e nell'interoperabilità. Infine, deve considerarsi che l'utilizzo di smart contract in una piattaforma energetica non renderà di per sé il sistema "intelligente". Sarà in ogni caso necessario che la rete sviluppi al proprio interno le tecniche di machine learning, il bilanciamento, le escursioni di tensione, i problemi di qualità dell'energia. Non ultimo occorre valutare le modalità di comunicazione, interfacciamento ed interoperabilità degli smart meter energetici che rappresentano il supporto imprescindibile per l'attuazione della tecnologia.

Gli autori hanno infine progettato e sviluppato una piattaforma Blockchain con l'obbiettivo di simulare il trading P2P in una micro-rete di energia termica. In particolare, la blockchain è stata progettata per consentire alle parti coinvolte (prosumer e consumer) di scambiare energia termica rinnovabile autoprodotta senza la necessità di intermediazione di una terza parte (e.g., il distributore o il rivenditore di energia termica) archiviando le transazioni convalidate dalla rete senza il tradizionale controllo centralizzato. Lo Smart Contract sviluppato segue un diagramma di flusso in più fasi: i) inizializzazione (che richiama il comando di registrazione degli account dei consumatori e dei produttori, con relativa assegnazione di token); ii) lettura della capacità (i.e. dell'energia termica prodotta) e del prezzo offerto (dal sistema di generazione e dai prosumer); iii) controllo di validità delle offerte, iv) offerta (ai consumatori, con inserimento di un ID offerta nella blockchain); v) acquisto da parte dei consumatori; vi) valutazione della fattibilità fisica dello scambio (i.e. controllo dei flussi di rete); vii) autorizzazione della transazione (con trasferimento di token e contestuale aggiornamento dello SC); viii) archiviazione della transazione; xi) controllo e aggiornamento delle unità totali di energia disponibili in rete. È stata inoltre condotta una simulazione finalizzata a caratterizzare due semplici scenari di compravendita dell'energia termica rinnovabile autoprodotta dai prosumer in una micro-rete residenziale costituita da 10 partecipanti (i.e., 7 consumatori, 2 prosumer e 1 produttore) in un periodo di riferimento di 15 giorni. A questo scopo sono stati considerati due semplici scenari relativi all'uso dell'energia termica rinnovabile autoprodotta dai due prosumer (i.e. solo autoconsumo e solo trading). In particolare, il trading è risultato particolarmente efficace in presenza di profili di occupazione saltuaria, ove l'eccesso di energia termica rinnovabile prodotta non può essere autoconsumata né accumulata dal prosumer. Inoltre, il trading può generare un beneficio sia in termini di efficienza che direttamente economico e quest'ultimo non si limita ad impattare sui soli utenti coinvolti nella compravendita, ma, anche se in misura ridotta, sugli altri utenti, dal momento che una riduzione dell'energia prelevata dalla rete principale corrisponde a minori perdite di rete, con conseguente riduzione della quota fissa. Questo aspetto, integrato con opprtuni strumenti (e.g., meccanismo di asta, gamificazione per favorire la partecipazione degli utenti alla rete e l'interazione) potrebbe favorire la diffusione della tecnologia blockchain per il trading P2P di energia anche in piccoli contesti residenziali.

7 Riferimenti bibliografici

[1] European Commission, Directive 98/30/EC of the European Parliament and of the Council of 22 June 1998 concerning common rules for the internal market in natural gas, (1998).

[2] European Commission, EU Commission Regulation No. 312/2014 of 26 March 2014. Establishing a Network Code on Gas Balancing of Transmission Networks., Off. J. Eur. Union,. (2014).

[3] ACER, ACER Report on the implementation of the Balancing Network Code, Second Edi, ACER - Agency for the Cooperation of Energy Regulators, 2017.

[4] European Commission, DIRETTIVA 2009/72/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 13 luglio 2009 relativa a norme comuni per il mercato interno dell'energia elettrica e che abroga la direttiva 2003/54/CE (Testo rilevante ai fini del SEE), Gazz. Uff. Dell'Unione Eur. (2009).

[5] European Commission, DIRETTIVA 2009/73/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 13 luglio 2009 relativa a norme comuni per il mercato interno del gas naturale e che abroga la direttiva 2003/55/CE (Testo rilevante ai fini del SEE), Gazz. Uff. Dell'Unione Eur. (2009).

[6] European Commission, Benchmarking smart metering deployment in the EU-27 with a focus on electricity. (COM(2014) 356 final), Brussels, 2014.

[7] W.L. Li, Y.Y. Zhou, K. Cetin, J. Eom, Y. Wang, G. Chen, X.S. Zhang, Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures, Energy. 141 (2017) 2445–2457. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.071.

[8] C.E. Kontokosta, C. Tull, A data-driven predictive model of city-scale energy use in buildings, Appl. Energy. 197 (2017) 303–317. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.005.

[9] K. Amasyali, N.M. El-Gohary, A review of data-driven building energy consumption prediction studies, Renew. Sustain. Energy Rev. 81 (2018) 1192–1205. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.095.

[10] Gas Networks Ireland, Distribution LDM, DM and NDM Supply Point Capacity Setting Procedure - Draft for Approval. Available: https://www.gasnetworks.ie/corporate/gas-regulation/service-for-suppliers/capacity-register-and-far/Distribution-LDM-and-DM-Supply-Point-Capacity-Setting, (2007).

[11] Nationalgrid, Gas demand forecasting methodology, 2016.

[12] H. Aras, N. Aras, Forecasting Residential Natural Gas Demand, Energy Sources. 26 (2010) 463–472.

[13] M. Brabec, O. Konár, E. Pelikán, M. Malý, A nonlinear mixed effects model for the prediction of natural gas consumption by individual customers, Int. J. Forecast. 24 (2008) 659–678. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2008.08.005.

[14] R.H. Brown, P. Kharouf, X. Feng, L.P. Piessens, D. Nestor, Development of feed-forward network models to predict gas consumption, Proc. 1994 IEEE Int. Conf. Neural Networks (ICNN'94), Orlando, FL, USA. 2 (1994) 802–805. https://doi.org/10.1109/ICNN.1994.374281.

[15] J. Szoplik, Forecasting of natural gas consumption with artificial neural networks, Energy Build. 85 (2015) 208–220. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.084.

[16] M. Brabec, M. Malý, E. Pelikán, O. Konár, Statistical Model of Segment-Specific Relationship Between Natural Gas Consumption and Temperature in Daily and Hourly Resolution, (2010). https://doi.org/10.5772/9855.

[17] B. Soldo, Forecasting natural gas consumption, Appl. Energy. 92 (2012) 26–37.

[18] R. Oliver, A. Duffy, B. Enright, R. O'Connor, Forecasting peak-day consumption for year-ahead management of natural gas networks, Util. Policy. 44 (2017) 1–11.

https://doi.org/10.1016/j.jup.2016.10.006.

[19] M. Kavgic, A. Mavrogianni, D. Mumovic, A. Summerfield, Z. Stevanovic, M. Djurovic-Petrovic, A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector, Build. Environ. 45 (2010) 1683–1697. https://doi.org/doi:10.1016/j.buildenv.2010.01.021.

[20] ARERA, Testo integrato delle disposizioni per la regolazione delle partite fisiche ed economiche del servizio di bilanciamento del gas naturale, TISG - Allegato A (in Italian), (2016).

[21] J. Ravnik, M. Hriberšek, A method for natural gas forecasting and preliminary allocation based on unique standard natural gas consumption profiles, Energy. 180 (2019) 149–162. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.084.

[22] Joint Office of Gas Transporters, Uniform Network Code – Transportation principal document, Section H – Demand estimation and demand forecasting, (2017).

[23] BDEW/VKU/GEODE, Abwicklung von Standardlastprofilen Gas (in German), 2018.

[24] FfE, Weiterentwicklung des Standardlastprofilverfahrens Gas (in German), 2015.

[25] G. Ficco, L. Celenza, M. Dell'Isola, A. Frattolillo, P. Vigo, Experimental evaluation of thermal mass smart meters influence factors, J. Nat. Gas Sci. Eng. 32 (2016) 556–565. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.04.025.

[26] Snam, METODO DI CALCOLO DEI COEFFICIENTI DI CORREZIONE CLIMATICA ??r, Https://Www.Snam.It/Export/Sites/Snam-Rp/Repository-Srg/File/It/Business-Servizi/Adempimenti-Reporting-Autorita/Pubblicazioni/Wkr_DatiStorici/Algoritmo-Wkr.Pdf. (n.d.).

[27] M. Fallahnejad, B. Eberl, M. Günther, Long-Term Forecast of Residential & Commercial Gas Demand in Germany, (n.d.).

[28] B. Glander, NDM Forecast in the German Gas Balancing Model - The Market Area Mananger Perspective. NetConnect Germany GmbH & Co. KG, ACER-ENTSOG Jt. Work. NC BAL. (2018).

[29] Xoserve, Unidentified Gas - Executive Summary. Available at: https://www.xoserve.com/media/1344/uig-executive-summary.pdf (last accessed: September 2019), (n.d.).

[30] L. Canale, G. Cortellessa, M. Dell'Isola, G. Ficco, A. Frattolillo, F. Zuena, A. Castaldi, A comparative analysis among Standard Load Profiles for Natural Gas consumption simulation at urban scale, in: 16th IBPSA Int. Conf. Exhib., 2019.

[31] A. Oraiopoulos, B. Howard, On the accuracy of Urban Building Energy Modelling, Renew. Sustain. Energy Rev. 158 (2022) 111976. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.111976.

[32] M. Dell'Isola, G. Ficco, L. Canale, R. D'Alessio, G. Cortellessa, A. Massimo, P. Vigo, Report RdS/PAR2017/091. Ottimizzazione e miglioramento dei sistemi di contabilizzazione e dei metodi di ripartizione del calore, (2017).

[33] and A.C. American Society of Heating, Ventilating, E. (ASHRAE), Guideline 14-2002, measurement of energy and demand savings. Tech. rep., Atlanta, GA, 2002.

[34] I. Bashir, Mastering Blockchain: Distributed ledger technology, decentralization, and smart contracts explained, 2nd Edition, Packt Publishing Ltd., 2018.

[35] M. Andoni, V. Robu, D. Flynn, S. Abram, D. Geach, D. Jenkins, P. McCallum, A. Peacock, Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities, Renew. Sustain. Energy Rev. 100 (2019) 143–174. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.10.014.

[36] M.L. Di Silvestre, P. Gallo, J.M. Guerrero, R. Musca, E. Riva Sanseverino, G. Sciumè, J.C. Vásquez, G. Zizzo, Blockchain for power systems: Current trends and future applications, Renew. Sustain. Energy

Rev. 119 (2020) 109585. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109585.

[37] International Renewable Energy Agency (IRENA), Innovation landscape brief: Blockchain, Abu Dhabi, 2019.

[38] S. Nakamoto, 2Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System, (2008).

[39] LESLIE LAMPORT, R. SHOSTAK, M. PEASE, The Byzantine Generals Problem, ACM Trans. Program. Lang. Syst. 4 (1982).

[40] C. Crasta, H. Agabus, Data Analysis of Building Sensors for Efficient Energy Management and Future Trends in the EU, Electr. Power Qual. Supply Reliab. Conf. 2019 Symp. Electr. Eng. Mechatronics. (2019) 1–8.

[41] A. FAUGERAS, Blockchain & Smart contracts: State of the art on Energy market, D2Grids WP2, 2019.

[42] European Union, DIRETTIVA (UE) 2018/2001 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO dell'11 dicembre 2018 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili (rifusione), (2018).

[43] World Economic Forum, Redesigning Trust: Blockchain Deployment Toolkit - Supply Chain Focus., 2020. https://widgets.weforum.org/blockchain-toolkit/pdf/WEF_Redesigning_Trust_Blockchain_Deployment Toolkit.pdf.

[44] P. Richard, S. Mamel, L. Vogel, Blockchain in the integrated energy transition (Multi-Stakeholder study), (2019).

[45] Australian Government Department of Industry Science Technology and Resources, Australia's Technology Investment Roadmap: Discussion paper., 2020. https://australiainstitute.org.au/wp-content/uploads/2021/01/P937-Austarlia-Institute-Sub-Tech-Roadmap.pdf.

[46] J. Hwang, M.I. Choi, T. Lee, S. Jeon, S. Kim, S. Park, S. Park, Energy Prosumer Business Model Using Blockchain System to Ensure Transparency and Safety, Energy Procedia. 141 (2017) 194–198. https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.11.037.

[47] M. Luke, S. Lee, Z. Pekarek, A. Dimitrova, Blockchain in Electricity: A Critical Review of Progress to Date, 2018.

[48] D. Livingston, V. Sivaram, M. Freeman, M. Fiege, Applying Blockchain Technology to Electric Power Systems. Council on Foreign Relations, (2018). http://www.jstor.com/stable/resrep21340.

[49] B2B Blockchain2Business, Blockchain & Energy Company Guide, Blockchain2Business, (2018). www.blockchain2business.%0Aeu/request-blockchain-company-guide/.%0A.

[50] Energy Web Foundation (EWF), D3A: Decentralized Autonomous Area Agent, 2018. https://energyweb.org/d3a/.

[51] European Union, Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, Official Journal of the European, (2009).

[52] D. Strepparava, L. Nespoli, E. Kapassa, M. Touloupou, L. Katelaris, V. Medici, Deployment and analysis of a blockchain-based local energy market, Energy Reports. 8 (2022) 99–113. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.11.283.

[53] D. Kirli, B. Couraud, V. Robu, M. Salgado-Bravo, S. Norbu, M. Andoni, I. Antonopoulos, M. Negrete-Pincetic, D. Flynn, A. Kiprakis, Smart contracts in energy systems: A systematic review of fundamental approaches and implementations, Renew. Sustain. Energy Rev. 158 (2022) 112013. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2021.112013.

[54] Y. Guo, Z. Wan, X. Cheng, When Blockchain Meets Smart Grids: A Comprehensive Survey, n.d.

[55] N. Wang, W. Xu, Z. Xu, W. Shao, Peer-to-Peer Energy Trading among Microgrids with Multidimensional

Willingness, (n.d.). https://doi.org/10.3390/en11123312.

[56] H. Zafarani, S.A. Taher, M. Shahidehpour, Robust operation of a multicarrier energy system considering EVs and CHP units, Energy. 192 (2020) 116703. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.116703.

[57] N. Nasiri, A. Sadeghi Yazdankhah, M.A. Mirzaei, A. Loni, B. Mohammadi-Ivatloo, K. Zare, M. Marzband, A bi-level market-clearing for coordinated regional-local multi-carrier systems in presence of energy storage technologies, Sustain. Cities Soc. 63 (2020) 102439. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2020.102439.

[58] J. Wang, H. Zhong, Z. Ma, Q. Xia, C. Kang, Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system, Appl. Energy. (2017). https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.150.

[59] R. Ambrosio, V I E W P O I N T Transactive Energy Systems Definition of transactive energy Systems, (n.d.). https://doi.org/10.1109/MELE.2016.2614234.

[60] Q. Huang, W. Amin, K. Umer, H.B. Gooi, F.Y.S. Eddy, M. Afzal, M. Shahzadi, A.A. Khan, S.A. Ahmad, A review of transactive energy systems: Concept and implementation, Energy Reports. 7 (2021) 7804–7824. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2021.05.037.

[61] Q. Yu, A. Meeuw, F. Wortmann, Design and implementation of a blockchain multi-energy system, (2018) 11–12. https://doi.org/10.1186/s42162-018-0040-4.

[62] N. Wang, X. Zhou, X. Lu, Z. Guan, L. Wu, X. Du, M. Guizani, When Energy Trading Meets Blockchain in Electrical Power System: The State of the Art, (n.d.). https://doi.org/10.3390/app9081561.

[63] C. Metelitsa, State of the Market: A Snapshot into Blockchain Deployments and Investments in the Power Sector, in: IRENA Innov. Week, 5 Sept. 2018, Wood Mackenzie Power and Renewables, 2018. https://innovationweek.irena.org/-/media/Files/IRENA/Innovation-Week/SessionalDocuments/IRENA-IW18-Blockchain-03-Metelitsa-State-of-the-Market-05-Sept-18.pdf.

[64] E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, C. Weinhardt, Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid, Appl. Energy. 210 (2018) 870–880. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.06.054.

[65] GTM, 15 firms leading the way on energy blockchain, (2018). www.greentech-media.com/articles/read/leading-energy-block- chain-firms.

[66] Bittwatt Pte. Ltd., Biwatt. Blockchain platform for utility payments, virtual POS and markets, (n.d.). https://www.bittwatt.com/.

[67] Etherscan, Token 4New, Https://Etherscan.Io/Token/0x241ba672574a78a3a604cdd0a94429a73a84a324. (n.d.).

[68] Prosume S.r.l., Prosume, Https://Prosume.Io/It/. (n.d.).

[69] Green Energy Wallet, Green Energy Wallet, Http://Www.Greenenergywallet.Com/. (n.d.).

[70] Greeneum, Https://Www.Greeneum.Net/. (n.d.).

[71] Etherscan, Token Green Token, Https://Etherscan.Io/Token/0xe0a16435df493bd17a58cb2ee58675f5ea069517. (n.d.).

[72] Greeneum, Greeneum Marketplace, Https://Www.Greeneum-Market.Com/. (n.d.).

[73] Brooklyn Microgrid, Brooklyn Microgrid, Https://Brooklynmicrogrid.Com/. (2015).

[74] Accenture, Anticipating the future Dutch district heating system, 2020. (n.d.). https://www.accenture.com/nl-en/blogs/insights/anticipating-the-future-dutch-district-heating-system.

[75] Interreg North West Europe (NWE), 5th Generation District Heating and Cooling (5GDHC), Https://5gdhc.Eu/. (2018).

[76] K. Lygnerud, S. Werner, Risk assessment of industrial excess heat recovery in district heating systems, Energy. 151 (2018) 430–441. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.03.047.

[77] J. Fitó, S. Hodencq, J. Ramousse, F. Wurtz, B. Stutz, F. Debray, B. Vincent, Energy- and exergy-based optimal designs of a low-temperature industrial waste heat recovery system in district heating, Energy Convers. Manag. 211 (2020) 112753. https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2020.112753.

[78] L. Cioccolanti, M. Renzi, G. Comodi, M. Rossi, District heating potential in the case of low-grade waste heat recovery from energy intensive industries, Appl. Therm. Eng. 191 (2021) 116851. https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.116851.

[79] P. Huang, B. Copertaro, X. Zhang, J. Shen, I. Löfgren, M. Rönnelid, J. Fahlen, D. Andersson, M. Svanfeldt, A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating, Appl. Energy. 258 (2020) 114109. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.114109.

[80] A. Dénarié, M. Muscherà, M. Calderoni, M. Motta, Industrial excess heat recovery in district heating: Data assessment methodology and application to a real case study in Milano, Italy, Energy. 166 (2019) 170–182. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.09.153.

[81] M. Pipiciello, M. Caldera, M. Cozzini, M.A. Ancona, F. Melino, B. Di Pietra, Experimental characterization of a prototype of bidirectional substation for district heating with thermal prosumers, Energy. 223 (2021) 120036. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120036.

[82] H. Gunnarson, E.M. Hamber, The future of blockchain in district heating. An investigation of possible blockchain applications for a Swedish district heating Company., KTH School of Industrial Engineering and Management, 2018.

[83] B. Qiao, K. Liu, C. Guy, A Multi-Agent System for Building Control, 2006. https://doi.org/10.1109/IAT.2006.17.

[84] F. Bünning, M. Wetter, M. Fuchs, D. Müller, Bidirectional low temperature district energy systems with agent-based control: Performance comparison and operation optimization, Appl. Energy. 209 (2018) 502–515. https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2017.10.072.

[85] S. Buffa, M. Hossein Fouladfar, G. Franchini, I.L. Gabarre, M.A. Chicote, Advanced Control and Fault Detection Strategies for District Heating and Cooling Systems-A Review, (2021). https://doi.org/10.3390/app11010455.

[86] Construction21, A Demonstrator Project to Use of the Blockchain on a 5th Generation Heating Network., Https://Www.Construction21.Org/Articles/h/A-Demonstrator-Project-to-Use-of-the-Blockchain-on-a-5th-Generation-Heating-Network.Html. (n.d.).

[87] A.D. Valdivia, M.P. Balcell, Connecting the grids: A review of blockchain governance in distributed energy transitions, Energy Res. Soc. Sci. 84 (2022) 102383. https://doi.org/10.1016/J.ERSS.2021.102383.

[88] J. Deign, Bitcoin Mining Operations Now Use More Energy Than Ireland, (2017).

[89] M.J. Krause, T. Tolaymat, Quantification of energy and carbon costs for mining cryptocurrencies, Nat Sustain. 1 (2018) 711–717. https://doi.org/10.1038/s41893-018-0152-7.

[90] V. Brilliantova, T.W. Thurner, Blockchain and the future of energy, Technol. Soc. 57 (2019) 38–45. https://doi.org/10.1016/J.TECHSOC.2018.11.001.

[91] E. Mengelkamp, B. Notheisen, C. Beer, E. Al., A blockchain-based smart grid: towards sustainable local energy markets, Comput Sci Res Dev. 33 (2018) 207–214.

[92] S. Küfeoğlu, G. Liu, K. Anaya, M.G. Pollitt, Digitalisation and New Business Models in Energy Sector, Cambridge, 2019. https://www.eprg.group.cam.ac.uk/wp-content/uploads/2019/06/1920-Text.pdf.

[93] J. Wu, N.K. Tran, Application of Blockchain Technology in Sustainable Energy Systems: An Overview, (n.d.). https://doi.org/10.3390/su10093067.

[94] S. Zhu, M. Song, M.K. Lim, J. Wang, J. Zhao, The development of energy blockchain and its implications for China's energy sector, Resour. Policy. 66 (2020) 101595. https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2020.101595.

[95] European Commission, Clean energy for all Europeans, (2019). https://data.europa.eu/doi/10.2833/21366.

[96] F. Buccafurri, G. Lax, L. Musarella, A. Russo, An Ethereum-based solution for energy trading in smart grids, Digit. Commun. Networks. (2021). https://doi.org/10.1016/J.DCAN.2021.12.004.

[97] F. Lombardi, L. Aniello, S. De Angelis, A. Margheri, V. Sassone, A Blockchain-based Infrastructure for Reliable and Cost-effective IoT-aided Smart Grids, 2018.

[98] V. Buterin, A Next-Generation Smart Contract and Decentralized Application Platform, Https://Github.Com/Ethereum/Wiki/Wiki/White-Paper. (2015).

[99] G. Wood, ETHEREUM: A SECURE DECENTRALISED GENERALISED TRANSACTION LEDGER BERLIN VERSION b8ffc51 – 2022-02-21, 2014.

[100] Solidity, Solidity, Https://Solidity.Readthedocs.Io/En/v0.5.3/. (2019).

[101] N. Szabo, Formalizing and Securing Relationships on Public Networks, First Monday. 2 (1997). https://doi.org/10.5210/fm.v2i9.548.

[102] J. Matas, Y.T. Aklilu, J. Ding, Survey on Blockchain for Smart Grid Management, Control, and Operation, (2021). https://doi.org/10.3390/en15010193.

[103] C.D. Clack, Smart Contract Templates: foundations, design landscape and research directions, 2016. http://arxiv.org/abs/1608.00771.

[104] M. Dell'Isola, G. Ficco, L. Canale, M. De Monaco, Analisi ed applicazione delle tecnologie IoT per la consapevolezza dei consumi negli edifici intelligenti, 2020.

[105] A. Kolahan, S.R. Maadi, Z. Teymouri, C. Schenone, Blockchain-based solution for energy demand-side management of residential buildings, Sustain. Cities Soc. 75 (2021) 103316. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103316.

[106] SOLAR EUROPEAN THERMAL INDUSTRY FEDERATION, Simple calculation of energy delivery of (small) ST systems, 2007. http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/policies/downloads/Simple_Calculation.pdf.

[107] Klober Industries, COLLETTORE SOLARE PIANO FSK, n.d. http://www.kloben.it/uploads/files/ProductAttachment/850000335_scheda_tecnica_pannelli_piani_FSK.pdf.

[108] M. Dell'Isola, G. Ficco, L. Canale, R. D'Alessio, G. Cortellessa, A. Massimo, P. Vigo., OTTIMIZZAZIONE E MIGLIORAMENTO DEI SISTEMI DI CONTABILIZZAZIONE E DEI METODI DI RIPARTIZIONE DEL CALORE, 2017.

8 Abbreviazioni ed acronimi

A	area del collettore solare termico
a_z	data più recente fra d_z e la data del primo giorno del periodo di calcolo
a_{z+1}	data meno recente fra d_{z+1} e la data dell'ultimo giorno del periodo di calcolo
d_z	data della lettura z
d_{z+1}	data della lettura z+1
$\beta 1\text{-}4_{PROF}$	coefficienti del profilo per categoria d'uso, zona climatica e classe di prelievo
CF_k	fattore di correzione per le condizioni climatiche, giorno della settimana
CV	Customer Value
CWV_k	variabile meteorologica per la zona di distribuzione locale (LDZ) per il giorno k-esimo
C_{mis}	Consumi giornalieri misurati
C_{mod}	consumi giornalieri stimati
$Cvar_{mod,\%}$	coefficiente di variazione del modello
C_{ET}	Costo dell'energia termica
C_{GN}	Costo del metro cubo di gas naturale
$c1^{\%}_{i,jk}$	% nel giorno k del prelievo per riscaldamento (zona climatica i, classe di prelievo j)
$c2^{\%}_{k}$	% nel giorno k del prelievo per cottura/ACS (zona climatica i, classe di prelievo j)
$c4^{\%}_{k}$	% nel giorno k del prelievo per raffrescamento (zona climatica i, classe di prelievo j)
$e_{mod,\%}$	errore della stima del modello
G	irradiazione solare
M_{SLP}	Coefficiente moltiplicatore
$Q_{i,h}$	domanda di energia termica associabile a ciascun utente i-esimo nell'ora h
$RGC_{misurato}$	consumo di gas naturale degli utenti residenziali
SLP_k	profilo di prelievo standard associato al giorno k-esimo ed al valore effettivo di W_{kr}
SLP_{nk}	profilo di prelievo standard associato al giorno k-esimo con W_{kr} =1
$SNCWV_k$	valore normale stagionale della variabile meteorologica composita per il giorno k-esimo
$SNDE_k$	domanda stagionale normalizzata per la categoria per il generico giorno d
$t1^{\%}_{j,k}$	prelievo standard nel giorno k del per l'uso tecnologico del gas e classe di prelievo j;
T_a	temperatura ambiente
T_m	temperatura media del collettore solare termico
$\overline{T_k}$	temperatura calcolata come serie geometrica
W_{kr}	fattore di correzione climatica
5GDHC	Rete di teleriscaldamento/raffrescamento di 5' generazione
ACS	Acqua calda sanitaria
AMM	Automated Market Making
AQ	Quantità Annuale
CA	Contract Account
CE	Comunità Energetica
CEC	Citizen Energy Community
CHP	produzione combinata di energia elettrica e termica
DAF	fattori di aggiustamento giornaliero
DAF_d	sensibilità meteorologica della domanda giornaliera della specifica categoria
DAG	Directed Acyclic Graph
DER	risorse energetiche distribuite
DR	Demand Response
DSO	Distribution System Operator
EOA	Externally Owned Accounts
ET	External Transactions
EVM	Ethereum Virtual Machine
FER	Fonti energetiche rinnovabili

GN	Gas Naturale
IGC	consumi delle utenze industriali
IoT	L'Internet of Things
IT	Internal Transactions
JVP	consumo annuo
L_z	lettura del giorno d_z relativa al PdR appartenente all'insieme Z
L_{z+1}	lettura successiva a Lz in ordine temporale (giorno d_{z+1})
M2M	machine-to-machine
MAS	Multy-Agent System
MES	Multy-carrier Energy Systems
NDM	Non Daily Metered
NDM_{AC}	consumo annuo di NG
NDM_{DC}	consumo giornaliero di NG
P2P	Peer to Peer
PBFT	Byzantine Fault Tolerance
PoAc	Proof of Activity
PoAu	Proof of Authority
PoC	Proof of Capacity
PoS	Proof of stake
PoW	Proof of work
REC	Renewable Energy Community
SC	Smart Contract
TGC	consumi totali dell'intera rete
TSO	Transmission System Operator
V2G	vheicle-to-grid
WCF	fattori di correzione meteorologica
WEF	World Economic Forum

Appendice: Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Gli ambiti scientifici di riferimento del Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica (DICeM) sono quelli dell'ingegneria meccanica, gestionale, civile ed ambientale, nonché delle materie di base quali la fisica e la chimica. Il DICeM si occupa della didattica, della ricerca scientifica e dello sviluppo tecnologico nei seguenti settori: fisica di base; meccanica dei fluidi e dei solidi; meccanica dei materiali; salvaguardia, sviluppo e pianificazione del territorio (protezione e riqualificazione dell'ambiente); analisi e progettazione dei sistemi meccanici, degli impianti termici e delle strutture; fisica dei piccoli acceleratori per uso industriale e medicale.

Le attività di ricerca di ricerca del gruppo di lavoro di Fisica Tecnica (ING-IND/10 e ING-IND/11) e Misure Meccaniche e Termiche (ING-IND/12) sono supportate dal LAMI - Laboratorio di Misure Industriali. Il LAMI è laboratorio accreditato LAT n.105 dal 2000 nei settori umidità e pressione e poi esteso ai settori volume (di gas), velocità e misure di tempo e frequenza. Il Laboratorio è dotato delle competenze e delle attrezzature tecnico-scientifiche funzionali allo sviluppo dei progetti, anche nel quadro di collaborazioni nazionali ed internazionali, e al rilascio di qualificate consulenze a beneficio di istituzioni, enti ed industrie. Di seguito sono riportato i principali ambiti di ricerca del gruppo di lavoro:

- misura delle concentrazioni di inquinanti (polveri aero disperse),
- misure di umidità e temperatura di rugiada, pressione (relativa, assoluta e differenziale), temperatura (termometri a resistenza, termocoppie) e termografia IR;
- metrologia legale
- metrologia delle portate e termofluidodinamica
- analisi termofisica degli edifici e caratterizzazione degli impianti di condizionamento
- analisi sperimentale di problemi connessi al trasporto di energia termica e teleriscaldamento
- misura, monitoraggio e controllo nelle reti di trasporto e distribuzione del gas naturale
- modellazione numerica di problemi termofluidodinamici complessi mediante tecniche di fluidodinamica computazionale (CFD) e Particle Image Velocimetry (PIV).

Si riportano di seguito alcuni progetti di R&S sviluppati recentemente dal gruppo di lavoro:

- MISE Industria 2015 "Efficienza Energetica", progetto EE-065, Progetto per lo Sviluppo di Sistemi per la Gestione Efficiente dei consumi energetici;
- MIUR PRIN 2015 "Riqualificazione del Parco Edilizio esistente in ottica NZEB (Nearly Zero Energy Buildings): Costruzione di un network nazionale per la ricerca".
- Autorità per l'Energia Elettrica ed il Gas ed il Sistema Idrico (AEEGSI). Supporto tecnico in materia di misura e contabilizzazione individuale del calore/freddo/acqua calda sanitaria nei settori del teleriscaldamento e teleraffreddamento.
- ENEA "Advanced tools to assess and mitigate the criticalities of ICT components and their dependencies over critical infrastructures" (Horizon 2020, Progetto Atena).
- ENEA Accordo di Programma con il MiSE, Ricerca di Sistema: i) PAR2014. "Analisi e caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura delle reti termiche distribuite", ii) PAR2015. "Sperimentazione e caratterizzazione metrologica dei sistemi di misura per la contabilizzazione e ripartizione del calore", iii) PAR2016. "Analisi dei benefici energetici ottenibili attraverso l'utilizzo dei sistemi di contabilizzazione e ripartizione del calore sul territorio nazionale", iv) PAR2017. "Ottimizzazione e miglioramento dei sistemi di contabilizzazione e dei metodi di ripartizione del calore", v) PAR2018. "Sviluppo di un software per l'analisi della fattibilità tecnica ed economica dei sistemi di contabilizzazione individuale dei consumi di ACS".

Di seguito si riporta un breve curriculum vitae degli autori del presente rapporto di ricerca.

Marco Dell'Isola, Laureato con lode in Ingegneria Meccanica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli "Federico II". È Professore Ordinario Settore Scientifico Disciplinare ING/IND-10 Fisica Tecnica Industriale e attualmente Rettore dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale. È stato Direttore del Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica (DICEM), Preside Vicario della Facoltà di Ingegneria, Presidente del Corso di Studi in Ingegneria Meccanica, Delegato del Rettore alle problematiche energetiche e membro del Senato Accademico. È Membro del Comitato Settoriale di Accreditamento Organismi Notificati di ACCREDIA, Coordinatore del Comitato tecnico CT271 "Contabilizzazione del calore" del CTI, Membro del Consiglio Direttivo di AICARR. Le sue attività di ricerca fanno riferimento agli ambiti della sostenibilità energetica ed ambientale e della metrologia delle grandezze termofluidodinamiche, e in particolare a: i) le tecniche di diagnosi energetica ed ambientale in riferimento ai modelli ed alla metodiche di misura; ii) la misura del benessere e dello stress termico approfondendo le problematiche di caratterizzazione e taratura della strumentazione di misura; iii) l'applicazione di modelli di "governance" per lo sviluppo sostenibile del territorio e la pianificazione strategica per lo sviluppo dei sistemi produttivi ; iv) gli aspetti energetici e fluidodinamici dei sistemi di aspirazione locale e dei sistemi per il risparmio energetico; v) le fonti rinnovabili di energia; vi) la misura dell'umidità, della pressione, della velocità e della portata; vii) l'analisi dell'incertezza di misura, la progettazione degli esperimenti e la modellazione numerica di sistemi di misura. È autore di oltre 150 lavori scientifici pubblicati su riviste ed atti di convegno nazionali ed internazionali.

Giorgio Ficco è laureato con lode in Ingegneria Meccanica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cassino e Dottore di Ricerca in Ingegneria Meccanica presso la stessa Università. Attualmente è Professore Associato per il settore ING-IND/12 Misure Meccaniche e Termiche presso il DICEM, Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale, dove è Docente dei corsi di Misure Industriali e Misure Meccaniche e Termiche. È Ispettore ed Esperto tecnico per ACCREDIA Dipartimento di Taratura. Le attività di ricerca sviluppate sono riconducibili principalmente ai seguenti ambiti: i) Misure Meccaniche e Termiche, ii) Metrologia Legale, iii) Misura della portata di fluido, iv) Misura delle prestazioni energetiche degli edifici, v) Misura e contabilizzazione dei consumi energetici, vi) Misura dell'Inquinamento Ambientale, vii) Analisi dell'incertezza di misura, progettazione degli esperimenti e modellazione numerica di sistemi di misura. È stato Responsabile del Laboratorio Accreditato di Prove e Taratura del Palmer Scarl di Latina e del Laboratorio LAMI dell'Università di Cassino e del Lazio Meridionale. È autore di oltre 100 pubblicazioni su primarie riviste scientifiche e negli atti di convegni nazionali ed internazionali.

Laura Canale è laureata con lode in Ingegneria Meccanica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cassino, e Dottore di Ricerca in Ingegneria Meccanica presso la stessa Università. Attualmente ricopre il ruolo di Ricercatore a tempo determinato tipo A presso l'Universitas Mercatorum nel settore concorsuale 09/C2 e, a decorrere dal 03/02/2022, è abilitata come Professore di II Fascia per il Settore Concorsuale 09/C2 - FISICA TECNICA E INGEGNERIA NUCLEARE. Dall'anno accademico 2020-2021 è inoltre docente a contratto per l'insegnamento "Energetica dell'Edificio" (6 CFU settore ING-IND/11) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica dell'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale. Le attività di ricerca sviluppate sono riconducibili principalmente all'ambito della Fisica Tecnica Industriale ed Ambientale, con particolare riferimento allo studio delle tecniche di misura, analisi e monitoraggio dell'energia termica, al monitoraggio delle prestazioni energetiche degli edifici e del comfort ambientale, all'efficientamento energetico degli edifici ottenibile attraverso l'informazione degli utenti finali (end-user awareness). È autrice di 25 pubblicazioni su primarie riviste scientifiche e negli atti di convegni nazionali ed internazionali.

Marianna De Monaco è laureata in Ingegneria Meccanica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Cassino, e Dottoranda di Ricerca in Ingegneria Meccanica presso la stessa Università. Attualmente è iscritta al secondo anno del corso di Dottorato Industriale "Metodi, modelli e tecnologie per l'ingegneria", XXXVI ciclo presso l'Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, in collaborazione con ENEA. Le attività di ricerca sviluppate sono riconducibili principalmente all'ambito della Fisica Tecnica Ambientale, con particolare riferimento ai temi dello Smart Building e dell'efficientamento energetico degli edifici ottenibile attraverso l'informazione degli utenti finali (end-user awareness).