



Consiglio Nazionale delle Ricerche

## IV Accordo di Programma MSE/CNR

---

### **CONSUNTIVO PAR 2016-2017** **“D.7: Smart cities e smart communities”**

*Relazione tecnica*

A cura del referente scientifico Ottorino Veneri

Dipartimento di Ingegneria,  
ICT e Tecnologie per  
l'Energia e i Trasporti

1 gennaio 2018  
31 dicembre 2018

---

# Progetto: Efficientamento dei processi di produzione e gestione integrata di utenze energivore con fonti rinnovabili e sistemi di accumulo mediante periferiche ICT in un contesto Smart District (D.7 SMART CITIES E SMART COMMUNITIES)

---

## Premessa

Negli ultimi anni si sta assistendo ad una continua trasformazione dei sistemi energetici, con un rapido aumento delle richieste di energia, dovuta principalmente all'incremento della popolazione ed al conseguente sviluppo industriale. Tali trasformazioni stanno affermando con forza il concetto di nuove entità territoriali, identificate come distretti energetici intelligenti (o Smart Districts), in cui si concentra un elevato grado di integrazione tra la generazione distribuita dell'energia e differenti categorie di utenti finali: dagli edifici intelligenti ai moderni sistemi di produzione. Gli Smart Districts saranno pertanto uno dei componenti fondamentali delle Smart Cities del futuro, visto che contribuiranno a rendere queste Smart Cities affidabili ed efficienti dal punto di vista energetico. Inoltre, risulta sempre maggiormente evidente che i futuri distretti energetici non saranno classificabili in base ad una unica destinazione d'uso (e cioè residenziali, commerciali, rurali od industriali), ma avranno una natura fortemente mista.

## Quadro generale di riferimento programmatico del progetto

Partendo dalle considerazioni riportate in premessa, nuove sfide tecnologiche, relative ad esempio all'integrazione di sistemi di generazione da fonti rinnovabili non programmabili ed alla necessità di sistemi di trasporto ad elevata efficienza, spingono l'interesse verso soluzioni energetiche di tipo integrato, volte fondamentalmente a migliorare la qualità della vita nei contesti urbani attraverso la gestione ottimale e coordinata delle risorse disponibili. Queste soluzioni, necessarie a supportare il richiesto sviluppo tecnologico, sono individuabili attraverso vari tipi di criteri di ottimizzazione, in cui gli aspetti economici assumono sicuramente fondamentale rilevanza. Tradizionalmente, un criterio di ottimo è stato ottenuto con soluzioni centralizzate. Ad esempio la rete elettrica nazionale è stata inizialmente realizzata a partire da grandi centrali di produzione. Analogamente, il sistema di trasporto pubblico è realizzato nel rispetto di orari e percorsi stabiliti da unità di coordinamento centrale. Anche le amministrazioni politiche centrali hanno preso decisioni e provvedimenti in rappresentanza di una maggioranza nazionale di cittadini. Oggigiorno, lo sviluppo delle tecnologie ICT ha consentito l'individuazione di criteri di ottimo del tutto nuovi, a vantaggio della qualità, affidabilità e flessibilità dei nuovi servizi offerti ai cittadini. Per tale motivo i risultati che è possibile ottenere nei nuovi processi implementativi di vari sistemi energetici sono oggi definiti "Smart". Ad esempio, mediante l'integrazione di sistemi di generazione distribuita di energia, può convenire che ogni edificio sia considerato anche come una sorgente di potenza. In tal caso un sistema di produzione distribuita risulta più efficace di uno centralizzato di tipo tradizionale solo nel caso in cui tale energia sia gestita in maniera appropriata. Tuttavia un mercato dell'energia sempre più decentralizzato, costituito da un grande numero di micro-produttori distribuiti in modo diffuso sul territorio, richiede nuovi modelli di

trading dell'energia e sistemi di monitoraggio e controllo della rete che siano basati su tecnologie che permettano una gestione decentralizzata delle informazioni e delle transazioni energetiche, ma che siano in grado di fornire le stesse garanzie di sicurezza dei sistemi tradizionali. Di particolare rilevanza risulta quindi lo studio e lo sviluppo di tecnologie innovative che permettano non solo ai *trader* dell'energia ma anche ai *prosumers* di inviare, ricevere ed effettuare ordini in forma anonima tramite scambi peer-to-peer, vale a dire in assenza di un operatore centrale. Al tempo stesso, i crescenti requisiti di scalabilità dei sistemi di acquisizione dei dati e di privacy dei dati stessi, impongono di affiancare alle tradizionali soluzioni cloud-centriche, in cui i dati sono memorizzati esclusivamente in server remoti dove tutte le computazioni ed elaborazioni sono eseguite in modo centralizzato, con i modelli emergenti del fog/edge computing, in cui le elaborazioni possono avvenire il più vicino possibile a dove i dati sono generati.

Nella visione di una Smart City il maggiore risparmio energetico è ottenuto anche tramite una crescente integrazione fra le infrastrutture ed i servizi cittadini maggiormente energivori. In particolare, il trasporto cittadino è una delle attività antropiche più energivore. Tuttavia, nuovi concetti di servizi on-demand e condivisi stanno emergendo in ambito urbano a supporto di una mobilità più sostenibile, che si distinguono dal trasporto pubblico tradizionale, ancora largamente basato su percorsi ed orari prestabiliti. Infatti, come nel caso dell'energia, i servizi di mobilità, se in eccesso rispetto alle richieste, possono essere resi disponibili anche per l'utilizzo da parte di altri utenti. Inoltre, la maggiore sostenibilità dei sistemi di trasporto urbano sarà ottenuta tramite l'incentivazione di schemi intermodale e comodali, cioè di sistemi in cui innovativi schemi di mobilità connessa (car sharing, car pooling) e di logistica di ultimo miglio sono integrati ed ottimizzati in modo congiunto. Ciò tuttavia non sarebbe possibile, senza opportune comunicazioni tra i singoli utenti ed i fornitori di servizi, gestite attraverso tecnologie ICT. In altri termini, in una società moderna, l'essenza di essere "smart" risiede nell'agire localmente, rimanendo comunque in connessione con servizi ed utenti dislocati geograficamente in altre posizioni. Infatti, le tecnologie ICT, quando propriamente utilizzate per l'integrazione e l'interconnessione, comportano benefici dal punto di vista sociale, economico ed ambientale per tutti. Tali aspetti sono ampiamente riconosciuti come una opportunità per il miglioramento della qualità della vita di tutta la popolazione di una nazione. In tale contesto si inserisce il concetto di smart city che fa riferimento alla gestione delle problematiche generate dalla rapida urbanizzazione ed industrializzazione, come la fornitura di energia, lo smaltimento dei rifiuti e la mobilità urbana, attraverso l'efficientamento ed ottimizzazione delle risorse disponibili. Pertanto i programmi di Smart City avranno un ruolo cruciale nei prossimi progetti di sviluppo urbano.

In tale contesto le attività proposte in questo progetto si inquadrano a pieno in una tematica trasversale ad altri temi di ricerca, in quanto forniscono una visione di sistema, sia per le prospettive applicative, in termini di innovazioni tecnologiche, sia di servizi e di nuovi modelli di business. Inoltre queste attività evidenziano un carattere dimostrativo che consente di trarre conclusioni articolate e tracciare quindi futuri scenari di ricerca.

### **Obiettivo generale del Progetto**

L'obiettivo generale del progetto consiste nello sviluppo di piattaforme ICT, basate su tecnologie e standard aperti IoT, per la raccolta/gestione dei dati ed il supporto di servizi decentralizzati per il

brokeraggio energetico. In tale contesto sarà sviluppata un'architettura elettrica di conversione in corrente continua, integrata con fonti rinnovabili e sistemi di accumulo stazionari, per la valutazione di strategie di gestione e controllo dei flussi energetici volte all'ottimizzazione della power quality, dell'efficienza e dei costi dell'energia in contesti smart district.

### Elenco dei Partecipanti al Progetto

Unità di Ricerca
Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto Motori (CNR-IM)
Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Informatica e Telematica (CNR-IIT)
Università di Bologna - Dipartimento d'Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione (UNIBO-DEI)
Università di Bologna - Dipartimento di Informatica Scienza ed Ingegneria (UNIBO-DISI)

### Partecipazione a progetti su tematiche affini

All'interno del progetto Europeo H2020 AUTOWARE "Wireless Autonomous, Reliable and Resilient Production Operation Architecture for Cognitive" (<http://autoware-eu.org/>) **CNR-IIT** ha sviluppato gli algoritmi per la gestione dei dati, da testare nell'ambiente sperimentale sviluppato in RDS. Come descritto nella relazione di sintesi del POA 2015, il contributo innovativo di **CNR-IIT** al progetto Ricerca di Sistema è stato lo sviluppo di un ambiente sperimentale dove tali algoritmi possono essere valutati sperimentalmente e confrontati con alcuni benchmark. Nel POA 2016-17 tali attività non sono state ulteriormente sviluppate in quanto le attività di **CNR-IIT** per il progetto Ricerca di Sistema sono focalizzate maggiormente sullo sviluppo sperimentale del gateway IoT, la cui progettazione hardware e software è iniziata nel POA 2015.

### Costi

Costo totale del progetto: € 480.000,00

Il dettaglio dei costi è riportato nelle tabelle di rendicontazione.

---

Linea progettuale 1: SVILUPPO DI PIATTAFORME ICT PER LA RACCOLTA, GESTIONE ED ANALISI DISTRIBUITA DI DATI TRAMITE TECNOLOGIE IOT IN AMBIENTI SMART DISTRICTS, E PER IL SUPPORTO DI SERVIZI DI BROKERAGGIO ENERGETICO SICURI ED AFFIDABILI.

---

#### Elenco dei Partecipanti alle attività

Unità di Ricerca	WP
Università di Bologna Dipartimento di Informatica - Scienza ed Ingegneria (UNIBO-DISI)	1.2
Istituto di Informatica e Telematica (CNR-IIT)	1.3, 1.4

#### Stato dell'arte

Il termine "Internet of Things" (IoT in breve) si riferisce al paradigma di rete per cui un numero potenzialmente illimitato di oggetti intelligenti, cioè dotati di tecnologie per comunicare, raccogliere ed elaborare informazioni, sono univocamente indirizzabili e possono essere interconnessi tra i loro a formare una rete di dispositivi che cooperano in modo autonomo per eseguire funzioni predefinite [1][2]. La realizzazione della visione dell'IoT necessita una significativa evoluzione delle esistenti infrastrutture di servizi e di rete. Proprio l'estrema diversità di dispositivi, tecnologie ed applicazioni rende particolarmente critica per i sistemi IoT la compatibilità ed interoperabilità tra piattaforme distinte. L'approccio tradizionale che è stato seguito nella progettazione di soluzioni per reti di sensori, precursori delle reti IoT, e cioè di progettare sistemi altamente specializzati per l'esecuzione di una specifica funzione ed utilizzando il più delle volte tecnologie proprietarie, chiaramente non è capace di soddisfare i requisiti dei sistemi IoT. Non si tratta solo di armonizzare dati che provengono da sorgenti diverse, ma anche di garantire che sensori dotati di funzionalità simili, ma diversi in termini di tecnologie trasmissive, sistemi operativi e capacità di elaborazione siano in grado di comunicare in modo trasparente ed autonomo. La soluzione più comunemente adottata per risolvere i problemi di interoperabilità e scalabilità è di seguire un approccio orizzontale nella progettazione del sistema IoT in cui un'unica piattaforma comune gestisce i servizi di rete ed i servizi necessari alle applicazioni per interagire con i dispositivi IoT. Quindi, per garantire l'interoperabilità tra reti IoT distinte è sufficiente sviluppare opportuni connettori tra le diverse tecnologie di comunicazione per reti IoT e la piattaforma orizzontale di rete. Questo è l'approccio che è stato seguito anche in questa linea progettuale per sviluppare i diversi componenti della piattaforma ICT da noi proposta per implementare la raccolta, gestione ed analisi distribuita di dati IoT. Come meglio spiegato nel seguito, la piattaforma di rete che abbiamo utilizzato come riferimento è quella standardizzata negli ultimi anni dall'IETF, e che permette di utilizzare protocolli di comunicazione Internet in sistemi IoT [3].

Nell'ambito IoT, una tecnologia emergente che si prevede avrà un enorme impatto nel prossimo futuro per garantire l'integrità dei dati scambiati dai dispositivi IoT è la tecnologia delle blockchain. La Blockchain è una tecnologia che consente la creazione e gestione di un grande registro distribuito per

la sincronizzazione dei numerosi dati, relativi alle transazioni, condivisi tra più nodi appartenenti al medesimo network. Il concetto di Blockchain fu concepito ed ideato nel 2008 [3] come fondamento del protocollo Bitcoin, il quale permette di automatizzare e decentralizzare in maniera sicura qualsiasi transazione digitale, scambio di valore o di dati, su ampia scala. La grande caratteristica della Blockchain è data dall'uso di strumenti crittografici, quali funzioni di hash, per garantire sicurezza ed immutabilità dei dati memorizzati e condivisi pubblicamente. Tale tecnologia, detta anche "tecnologia di codifica a blocchi", è considerata una delle innovazioni tecnologiche più importanti avvenute in ambito informatico negli ultimi trent'anni.

Nel corso degli anni, la Blockchain ha saputo liberarsi sempre di più dal legame che originariamente la teneva unita alla criptovaluta, acquistando maggiore credibilità e proponendosi come soluzione ed opportunità per diversi campi applicativi. In virtù del suo altissimo potenziale, si ritiene che la Blockchain sia un'innovazione capace di mutare radicalmente il mondo dell'impresa, dei servizi, della Pubblica Amministrazione, della finanza e della governance globale nel prossimo decennio. I settori di applicazione della Blockchain sono numerosissimi, poiché è una tecnologia che può essere progettata per le più diverse esigenze operative; infatti, la Blockchain può contenere dati ed eseguire istruzioni relative a documenti, contratti, proprietà e asset digitalizzati di qualsiasi tipo. I vantaggi sono considerevoli in termini di efficienza, automazione, riduzione di tempi e costi dei flussi di lavoro, maggiore resilienza e sicurezza infrastrutturale, privacy e condivisione dei dati tra i partecipanti del sistema. Come spiegato nel seguito, l'obiettivo generale delle attività di questo POA è sviluppare uno studio di fattibilità sull'utilizzo di questa tecnologia per realizzare servizi di brokeraggio energetico peer-to-peer.

### **Bibliografia**

- [1] Eleonora Borgia, "The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues", in *Computer Communications* 54: 1-31 (2014).
- [2] L. Atzori, A. Iera, G. Morabito, The internet of things: a survey, *Comp. Netw.: 2599 Int. J. Comp. Telecommun. Network.* 54 (15) (2010) 2787–2805.
- [3] Nakamoto, Satoshi, Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system, Technical report, <http://www.bitcoin.org/bitcoin.pdf>, 2019.

### **Obiettivi della linea**

Questa linea progettuale rappresenta il proseguimento di attività iniziate nel POA 2015. In particolare, nel POA 2015 è stata definita l'architettura di rete IoT ed i relativi servizi di comunicazione a supporto della raccolta di dati da sensori e dispositivi mobili distribuiti. In questo PAR si procederà con la prototipizzazione (hardware/software) del sistema. Il secondo obiettivo principale di questa linea progettuale è la progettazione e lo sviluppo di una piattaforma ICT basata sui concetti emergenti di DTL (Distributed Ledger Technology) e Blockchain per il supporto di servizi sicuri ed affidabili di brokeraggio energetico di tipo peer-to-peer tra piccoli produttori e consumatori di energia.

La linea progettuale 1 è stata suddivisa nelle seguenti attività:

**1.2: Analisi e progettazione di massima di una piattaforma di gestione IoT [UNIBO-DISI]**

Unità di ricerca coinvolte:

- Università di Bologna Dipartimento di Informatica - Scienza ed Ingegneria (UNIBO-DISI)

**1.3: Piattaforme ICT per la raccolta, gestione ed analisi distribuita di dati tramite tecnologie IoT in ambienti Smart Districts [CNR-IIT]**

Unità di ricerca coinvolte:

- Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Informatica e Telematica (CNR-IIT)

**1.4: Piattaforme ICT per il supporto di servizi di brokeraggio energetico sicuri ed affidabili in una logica di Smart Districts [CNR-IIT]**

Unità di ricerca coinvolte:

- Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Informatica e Telematica (CNR-IIT)

**Attività 1.2    Analisi e progettazione di massima di una piattaforma di gestione IoT. [UNIBO-DISI]**

---

**Obiettivi**

Obiettivo principale delle attività previste per questo task è fornire supporto scientifico e tecnico per la progettazione di una piattaforma software che, avvalendosi di un'infrastruttura di cloud computing, funga al contempo da collettore di dati, e da erogatore di servizi basati sui medesimi dati. La piattaforma dovrà quindi prevedere l'allacciamento di una moltitudine di device collocati nel dominio *Smart District* al fine di immagazzinare, rielaborare e infine servire i dati acquisiti.

**Risultati conseguiti**

Un moderno City Information System (CIS) è un insieme di risorse (hardware, software e infrastrutture di comunicazione) flessibile, e in costante interazione, in grado di elaborare dati provenienti da diverse fonti ed esporre servizi a valore aggiunto per il cittadino, per la PA e per enti privati [1]. Una delle caratteristiche principali di un CIS è la capacità di dialogare efficientemente con diverse reti di sensori (sottosistemi) catalogandone ed elaborandone le informazioni in modo da renderle trasparenti e fruibili dagli utenti. Nel contesto di un CIS assume grande rilevanza l'architettura della piattaforma dedicata alla gestione di IoT device.

Per fornire consulenza relativamente alle tematiche in oggetto, è stato anzitutto necessario svolgere ampie ricerche volte ad analizzare e valutare le principali soluzioni allo stato dell'arte in ambito IoT. Nella fattispecie, il team di ricerca ha analizzato le principali caratteristiche delle piattaforme software per la gestione dell'IoT note in letteratura o messe a disposizione da alcuni importanti player del settore ICT.

Le piattaforme sono state studiate sia dal punto di vista degli aspetti funzionali, al fine di riassumere le potenzialità in termini di tipologie di sensori gestibili e di operazioni attuabili sugli stessi, sia di quelli

legati alle caratteristiche dell'infrastruttura sulla quale insiste la piattaforma, al fine di valutarne il grado di resilienza complessiva.

La resilienza dell'infrastruttura è stata nella fattispecie valutata in base al grado di disponibilità e scalabilità consentite, fattori che a loro volta riassumono la capacità della soluzione esaminata di resistere ai guasti in tempo reale, di permettere strategie di backup o disaster recovery, di rispondere dinamicamente alle richieste anche quando esse dovessero repentinamente aumentare in numero o in complessità.

Oltre ai suddetti aspetti, strettamente legati alle caratteristiche tecniche delle soluzioni esaminate, sono stati presi in considerazione alcuni aspetti di licensing, con particolare attenzione alle componenti open source.

A valle delle indagini condotte in questo senso, il team di ricerca si è focalizzato sulla stesura di alcune linee guida per la progettazione di una piattaforma software inquadrabile nel dominio IoT, soffermandosi sia sul front-end che sul back-end. Di ciascun componente sono stati discussi i tratti salienti, e, in taluni casi, il team ha ritenuto opportuno corredare i componenti con alcuni schemi progettuali utili ai fini implementativi.

Nella fase di prototipazione, il team ha optato per porre maggior risalto alle tecnologie open source, per ovvie ragioni di opportunità di diffusione.

La piattaforma IoT ritenuta più adatta al contesto oggetto di studio permette di implementare strategie per il deployment della soluzione su larga scala, al fine di poterla replicare agevolmente qualora venisse adottata in più distretti urbani per consentire il monitoraggio di fonti energetiche diffuse e degli eventuali scambi intercorsi tra gli utenti finali.

In merito alla connessione del prototipo con i cloud provider, sono stati valutati alcuni aspetti aggiuntivi inerenti alla messa in sicurezza del canale di comunicazione, con particolare riferimento alle misure da adottare per garantirne autenticità, integrità e riservatezza. Inoltre, sono state affrontate alcune criticità relative alla *context-security* [2].

### 3.1) Descrizione delle procedure, della sperimentazione e dei risultati

*L'efficientamento energetico* e più in generale il paradigma *Smart District* [3] sono pienamente inquadrabili nella sfera dell'**Internet of Things (IoT)** [4]. Da quando, nel 1999, il termine IoT è stato proposto da Kevin Ashton, le idee alla base di questo dominio applicativo sono state ampiamente esplorate e discusse in ambito accademico e imprenditoriale [5]. Intuitivamente, Internet of Things consiste in un ecosistema di oggetti e sensori installati in un ambiente indefinitamente vasto (una casa, un'area urbana o l'intero globo terrestre), capaci di acquisire informazioni dall'ambiente circostante e di comunicarle ad altri oggetti, sottosistemi, o a sistemi informativi complessi. I dati così raccolti vengono riorganizzati e analizzati, in modo da produrre informazioni di maggior rilievo. Spesso, l'esistenza di tali reti di sensori in determinati contesti applicativi, limita o annulla l'interazione umana nei processi coinvolti.

Benché questi concetti possano sembrare lineari, implicano un'ampia gamma di questioni aperte. Per esempio, quale tipo di architettura ICT dovrebbe essere adottata per dispiegare un'applicazione IoT in un determinato contesto? Quali tra i requisiti applicativi giocano il ruolo più critico? Quali standard di comunicazione si potrebbero adottare per favorire l'interoperabilità fra i device e con altre



piattaforme? Quali API potrebbero essere esposte? Quali problematiche di sicurezza potrebbero sorgere?

Un'interessante comparazione atta a sottolineare gli aspetti architettonici che le piattaforme IoT spesso condividono, è proposta in [6]; analogamente, gli autori comparano le piattaforme IoT sulla base dei requisiti applicativi (tecnici o di processo) in [7].

Molte piattaforme IoT sono state sviluppate in tempi recenti, ciascuna con un indirizzo specifico e con un preciso modello di business alla base. Per questo, individuare una piattaforma completa e sufficientemente versatile è una operazione cruciale per la buona riuscita di qualsiasi progetto nel dominio *Smart District* [8]. Anzitutto, è bene comprendere la classificazione di alto livello che si applica a queste piattaforme, come esemplificato in [9]. Le piattaforme IoT afferiscono alle seguenti categorie:

- **Device Management Platforms:** come espresso dalla *Open Mobile Alliance Device Management*, queste piattaforme devono garantire la messa in opera e la manutenzione repentina, efficace e pervasiva di ampie flotte di sensori e device installati sul territorio. Per esempio, queste piattaforme consentono di eseguire l'update del *firmware* da un centro di controllo remoto, oppure il monitoraggio in real-time dello stato di salute dei device e dell'hardware ad essi connesso. Queste piattaforme consentono di disegnare la topologia e la gerarchia che regola le flotte di device, e permettono di stabilire specifiche policy di accesso ai device stessi. Le Device Management Platforms sono le ultime ad essersi affacciate sul mercato e stanno suscitando l'attenzione di un numero sempre maggiore di attori, tra cui Amazon, che a inizio 2018 ha rilasciato un nuovo servizio AWS denominato *Amazon IoT Device Management*.

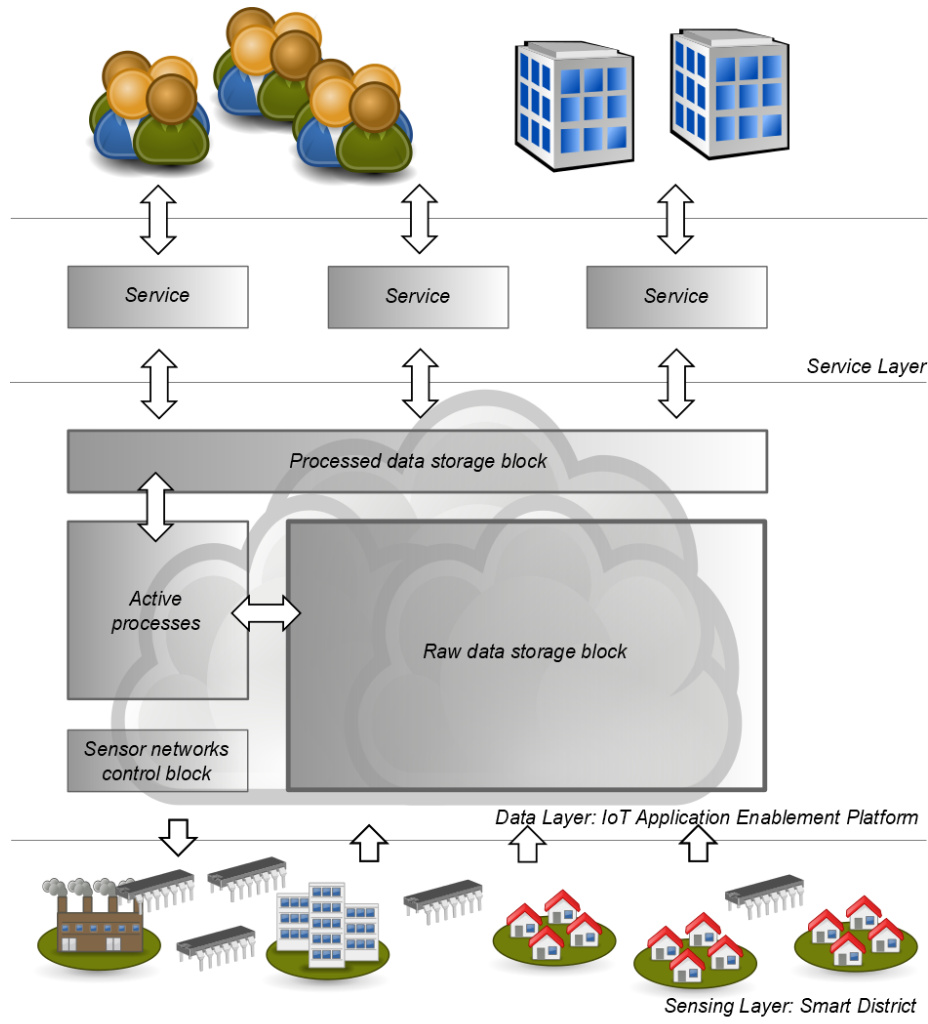


Figura 1: Architettura di alto livello per l'erogazione di servizi nel dominio Smart District mediante piattaforme di cloud computing.

- Application Development Platforms:** in questo caso, la piattaforma IoT ha come fine ultimo la facilitazione dello sviluppatore nell'implementare applicazioni IoT-oriented. Questi framework mettono a disposizione funzionalità di *code generation* che permettono di automatizzare buona parte dello sviluppo software, pur restando all'interno di logiche di massima imposte dalla piattaforma stessa. Allo stesso tempo, queste piattaforme forniscono una serie di API predefinite per l'aggancio di alcuni device a larga diffusione. Una delle piattaforme maggiormente note in questo caso è *Temboo*.
- Application Enablement Platforms:** questo tipo di soluzione è la più diffusa. Il presente studio ha appurato che, come presumibile, essendo queste piattaforme le prime ad essersi affacciate sul mercato, sono anche le più mature e garantiscono una maggiore stabilità e affidabilità. Questo tipo di soluzione consiste in un *middleware* che si frappone tra il substrato di sensori e attuatori installati nel territorio e le *end-user application*, che fruiscono effettivamente dei dati immagazzinati. Il modello architetturale è quindi assimilabile a quello proposto in [10]. I device comunicano direttamente con la piattaforma, sfruttando uno o più protocolli di trasporto (ogni piattaforma ne supporta diversi), come HTTP/S o MQTT. I dati trasmessi sono tipicamente incapsulati mediante formati di scambio dati a larga diffusione, come XML o JSON. Il *middleware* memorizza e riorganizza i dati in modo da predisporre le informazioni necessarie

---

allo strato applicativo sovrastante. Per quanto concerne questa categoria, *AWS IoT Core* si è dimostrato il framework più completo e sicuro.

Per i motivi sopra citati, la discussione si focalizza sull'ultima categoria presentata (Application Enablement Platforms).

### **Cenni sul Fog Computing**

Se da una parte la mole di dati raccolti continua a crescere a un ritmo vertiginoso, così come aumenta la capacità di calcolo necessaria per elaborarli, dall'altra la connettività disponibile per trasportare l'informazione da un contesto IoT verso i data center non si rivela sempre idonea allo scopo.

**Fog Computing** (o *Edge Computing*) è un termine coniato da Cisco per denotare un'architettura orizzontale, a livello di sistema, che ha lo scopo di distribuire senza soluzione di continuità risorse e servizi di calcolo, memorizzazione di dati, controllo e funzionalità di rete sull'infrastruttura che connette il contesto cloud a quello IoT.

Si tratta dunque di un'evoluzione del paradigma cloud in supporto ad applicazioni IoT che devono rispettare stringenti specifiche di *Qualità di Servizio (QoS)*, quali latenza e banda disponibili per una certa connessione; si estendono dunque i servizi cloud ai bordi di una enterprise network.

Le motivazioni per il ricorso a questo nuovo paradigma risiedono nelle esigenze espresse da alcune applicazioni chiave quali: smart grid, smart traffic lights in vehicular networks, autonomous car, software defined networks, self maintaining train.

In questo nuovo contesto i dispositivi comunicano peer-to-peer per condividere e memorizzare efficientemente i dati e prendere localmente decisioni. Inoltre, ogni smart thing è connesso a un fog device; i fog device possono essere interconnessi e ognuno di essi è collegato al cloud.

Fog Computing enfatizza la vicinanza all'utente finale e la considerazione delle esigenze dei clienti, tiene in debita considerazione la densa distribuzione geografica e i pool di risorse locali, mira inoltre a una riduzione della latenza dei servizi e a un uso appropriato della banda trasmissiva. Oltre a una migliore qualità dei servizi, si osserva che il ricorso a tecniche di ridondanza offre migliori garanzie in caso di guasti. Si può, inoltre, ipotizzare un aumento nel livello di sicurezza, in quanto le infrastrutture possono essere maggiormente controllabili.

Si tenga tuttavia conto del fatto che Fog Computing è una soluzione aggiuntiva e non sostitutiva rispetto a quella oggetto delle ricerche presentate in questa relazione, in quanto la messa in opera di un sistema *Smart District* non può prescindere dalla componente ICT centralizzata, atta al controllo e alla manutenzione dell'infrastruttura. Fog Computing potrebbe eventualmente essere preso in considerazione per potenziare la comunicazione fra dispositivi nel primo layer dello stack (vedi Figura 1), e scaricare parzialmente il cloud di alcune operazioni (al fine di ridurre i costi di servizio).

### **I protocolli di comunicazione per l'IoT**

Durante il presente studio sono stati valutati diversi protocolli di comunicazione in modo da individuare il più adatto al dominio *Smart District* (e più in generale all'IoT).

In uno scenario IoT, è plausibile pensare che i nostri oggetti smart comunichino gli uni con gli altri - device to device (D2D) - e raccolgano una serie di dati per poi inviarli eventualmente a un server remoto - device to server (D2S). Inoltre, per permettere la diffusione di questi dati, un server deve poter condividere con altri server i dati ricevuti - server to server (S2S). Sono stati sviluppati, nel corso degli anni, diversi protocolli al fine di agevolare queste forme di interazione.

<i>Protocol</i>	<i>Transport</i>	<i>Messaging</i>	<i>2G,3G,4G (1000's)</i>	<i>LowPower and Lossy (1000's)</i>	<i>Compute Resources</i>	<i>Security</i>	<i>Success Stories</i>	<i>Arch</i>
<b>Azure-IoT</b>	AMPQ or Https/TCP	Rqst/Rspnse	Excellent	Good	10K-100Ks RAM Flash	High- Mandatory	Weraables	Client- Server
<b>CoAP</b>	UDP	Rqst/Rspnse	Excellent	Excellent	10Ks/RAM Flash	Medium - Optional	Utility field area ntwks	Tree
<b>Continua HDP</b>	UDP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Fair	Fair	10Ks/RAM Flash	None	Medical	Star
<b>DDS</b>	UDP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Fair	Poor	100Ks/RAM Flash +++	High- Optional	Military, Industrial	Bus
<b>DPWS</b>	TCP		Good	Fair	100Ks/RAM Flash ++	High- Optional	Web Servers	Client Server
<b>HTTP/ REST</b>	TCP	Rqst/Rspnse	Excellent	Fair	10Ks/RAM Flash	Low- Optional	Smart Energy Phase 2	Client Server
<b>MQTT &amp; MQTT- SN/S</b>	TCP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Excellent	Good	10Ks/RAM Flash	Medium - Optional	IoT Msnging	Tree
<b>SNMP</b>	UDP	Rqst/Response	Excellent	Fair	10Ks/RAM Flash	High- Optional	Network Monitoring	Client- Server
<b>Thread</b>	UDP	Rqst/Rspnse	Excellent	Excellent	10Ks/RAM Flash	High- Mandatory	Nest?	Mesh
<b>UPnP</b>	UDP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Excellent	Good	10Ks/RAM Flash	None	Consumer	P2P Client Server
<b>XMPP</b>	TCP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Excellent	Fair	10Ks/RAM Flash	High- Mandatory	Rmt Mgmt White Gds	Client Server
<b>ZeroMQ</b>	UDP	Pub/Subsrb Rqst/Rspnse	Fair	Fair	10Ks/RAM Flash	High- Optional	CERN	P2P

Tabella 1: Confronto fra diversi protocolli per IoT.

Di seguito sono elencati alcuni fra i protocolli più utilizzati per le diverse tipologie di comunicazione.

- **UPnP** (Universal Plug and Play): fornisce supporto ai dispositivi in una rete IP ad hoc;
- **MQTT** (Message Queue Telemetry Transport): controllo remoto di numerosi device di piccole dimensioni – D2S);
- **CoAP** (Constrained Application Protocol): per il trasferimento via web di dati in reti o nodi caratterizzati da capacità limitate);
- **XMPP** (eXtensible Messaging and Presence Protocol): uno tra i miglior protocolli per connettere i device alle persone, quando sono connessi a dei server – D2S);
- **DDS** (Data Distribution Service): un veloce middleware per integrare oggetti smart - D2D);
- **AMQP** (Advanced Message Queuing Protocol): un sistema di code per connettere server tra loro - S2S.

La Tabella 1 riporta un confronto fra diversi protocolli per IoT apparso sul magazine di IEEE Standard University, con particolare riferimento a tecnologie di comunicazione wi-fi.

Benché molteplici applicazioni e piattaforme facciano uso del ben noto protocollo HTTP/S (prevalentemente mediante chiamate POST) per motivi di semplicità e interoperabilità, quello più adatto al dominio in oggetto è certamente *Message Queue Telemetry Transport* (MQTT). Data la notorietà di HTTP, discutiamo nel dettaglio il solo protocollo MQTT, dando risalto alle caratteristiche che lo rendono estremamente adatto al dominio applicativo *Smart District*. Si noti che in questo caso si fa riferimento allo stack di comunicazione riportato in Figura 1 (device to cloud) e non al modello machine to machine, tipico del *Fog Computing*.

## MQTT

L'acronimo MQTT deriva da *Message Queue Telemetry Transport* e consiste in un protocollo per la messaggistica *publish/subscribe*, estremamente semplice e leggero, introdotto da Andy Stanford-Clark e Arlen Nipper nel 1999. Il protocollo è stato progettato per piccoli device sottoposti a stretti vincoli di ampiezza di banda oltre che da elevata latenza. La collocazione tipica dei device è in reti caratterizzate da alta inaffidabilità e conseguente connessione intermittente, tipica del dominio *Smart District*. La struttura dei pacchetti MQTT è pensata per minimizzare il consumo di banda durante la comunicazione client-server e per preservare l'impiego di risorse di calcolo da parte dei device. Il protocollo prevede anche diversi livelli di QoS (Quality of Service), destinati ad adeguarne il funzionamento in base al dominio applicativo. Per tutti i motivi citati, il protocollo è particolarmente adatto al dominio IoT (e più nello specifico al contesto *Smart District*).

- MQTT è uno standard ISO/IEC PRF 20922;
- è basato sul paradigma *publish/subscribe*;
- richiede un Message Broker, componente software deputato allo smistamento dei messaggi;
- opera sopra TCP/IP;
- la dimensione dei pacchetti è limitata e il tasso di scambio di pacchetti è basso;
- la comunicazione sicura è instradata sulla porta logica 8883.

Il *fixed header* ha una dimensione di 2 byte. Il secondo byte può essere esteso fino a 4 byte e rappresenta la lunghezza totale del messaggio (escluso il fixed header). La dimensione massima dei pacchetti è quindi 256 MB, anche se tipicamente i pacchetti sono di dimensioni molto più contenute.

Il *payload* in un messaggio MQTT è al contrario presente solo in alcuni tipi di messaggio:

- **CONNECT**: il payload di un messaggio CONNECT contiene varie stringhe codificate in UTF-8 che specificano, fra l'altro, l'identificativo univoco del client.
- **SUBSCRIBE**: il payload di un messaggio SUBSCRIBE contiene una lista di topic ai quali il client si vuole registrare, codificati in UTF-8. Viene specificato anche il QoS desiderato.
- **SUBACK**: il payload di questo tipo di messaggio contiene una lista di QoS accordati al client, ciascuno relativo a uno dei topic indicati nel corrispondente messaggio SUBSCRIBE.
- **PUBLISH**: il payload dei messaggi di tipo PUBLISH dipende da ogni specifica applicazione. Viene in sostanza trattato come un campo BLOB.

Un messaggio di tipo *publish* serve a inviare al server le informazioni da distribuire ai vari *subscribers*. Ogni messaggio di questo tipo è relativo a un *topic* specifico, indicato nel *variable header*. Il payload può contenere qualsiasi cosa (anche 0 byte). La sua interpretazione è application-specific ed è pertanto demandata al livello applicativo.

La risposta ad un messaggio di tipo *publish* dipende dal QoS impostato:

- **QoS 0** (al massimo una consegna): invia il contenuto a tutti coloro che si sono registrati al topic indicato. Non è previsto alcun messaggio di risposta.
- **QoS 1** (almeno una consegna): memorizza il messaggio e lo invia a tutti coloro che si sono registrati al topic indicato. Poi, invia un messaggio di tipo *puback* al mittente.
- **QoS 2** (esattamente una consegna): memorizza il messaggio senza inviarlo a nessuno. Poi, invia un messaggio di tipo *pubrec* al mittente. L'invio effettivo ai sottoscrittori del topic viene posticipato alla ricezione di un messaggio di tipo *pubrel*.

Spesso, nel dominio IoT, per i messaggi inviati dai device si sceglie il QoS 0, in quanto la natura dei pacchetti non è tale da comportare gravi o significativi danni in caso di mancata consegna. Questo consente tuttavia di minimizzare la quantità di pacchetti trasferiti al back-end, e quindi di limitare i costi. In ogni caso, la scelta del QoS da utilizzare andrà accuratamente valutata in sede implementativa, durante lo svolgimento delle attività di questo progetto caratterizzate da un TRL superiore.

Adottando un QoS uguale a 0 il messaggio viene consegnato in base al buon esito del protocollo TCP/IP sottostante; non è inoltre previsto alcun messaggio di risposta e non è definita alcuna procedura di retry. Il messaggio perviene quindi al server zero o al massimo una volta.

Un'altra peculiarità di MQTT è la predisposizione agli eventi di downtime dei dispositivi e la gestione nativa di questi eventi. Elemento di maggiore spicco in questo senso è costituito dalla possibilità, per ogni device, di indicare una sua "ultima volontà" in fase di connessione. Questo meccanismo, noto come *last will*, permette di indicare al Message Broker un pacchetto speciale da inoltrare su un determinato topic in caso di fallimento del device in questione. Perciò, è possibile automatizzare il processo conseguente alla rottura o all'indisponibilità di ogni singolo device. Il processo di inoltro del *last will* è strettamente legato ai parametri di connessione specificati nel *variable header* dei pacchetti di tipo *connect*.

bit	7	6	5	4	3	2	1	0
	User Name Flag	Password Flag	Will Retain	Will QoS	Will Flag	Clean Session	Reserved	
	x	x				1	x	x

Figura 2: Impostazione dei bit nel variable header di un messaggio MQTT per l'apposizione del last will.

Nella fattispecie, l'inoltro del last will è previsto nei seguenti casi:

- errore di I/O riscontrato dal server;
- mancato rispetto del keep alive da parte del client;
- chiusura della connessione TCP da parte del client senza l'invio di un messaggio di tipo *disconnect*;
- chiusura della connessione TCP da parte del server per un errore di protocollo o infrastruttura.

## Piattaforme di Cloud Computing per l'IoT

Oggi si contano circa 450 piattaforme (anche open source) a supporto dello sviluppo di progetti IoT. La maggior parte di queste piattaforme è focalizzata per specifici settori industriali, mentre alcune sono state progettate con una filosofia più generale, allo scopo di poter abbracciare qualsiasi progetto pensato per questo contesto. Tra le molteplici a disposizione, il team di ricerca ha selezionato tre tra le più interessanti. La prima, è una delle migliori piattaforme open source per l'IoT, e dunque è certamente degna di nota. Come descritto in seguito, soffre tuttavia di alcune mancanze dovute alla natura open source (e dunque non strutturata) del progetto. La seconda e la terza sono invece, probabilmente, le due piattaforme IoT maggiormente gettonate (e strutturate).

### SiteWhere

*SiteWhere* [11] differisce dai più diffusi framework commerciali in ambito IoT per il suo modello di business. Infatti, questa piattaforma è completamente **open-source**, ed è rilasciata sotto licenza CPAL-1.0 (*Common Public Attribution License Version 1.0*). Più precisamente, *SiteWhere* è utilizzabile in due versioni distinte: la prima, nota come *Community Edition* è effettivamente gratuita. La seconda (*Enterprise Edition*) è soggetta a un canone d'acquisto una tantum, ed è acquistabile direttamente sul sito web del produttore.

Una volta scaricato il framework, è **responsabilità dell'utente predisporre un'infrastruttura hardware-software atta ad ospitarlo**. La configurazione minima richiede un server *Apache Tomcat* e un'istanza di DBMS *MongoDB*. Sono inoltre richiesti *Java* e il Message Broker *HiveMQ* per l'operatività del protocollo MQTT.

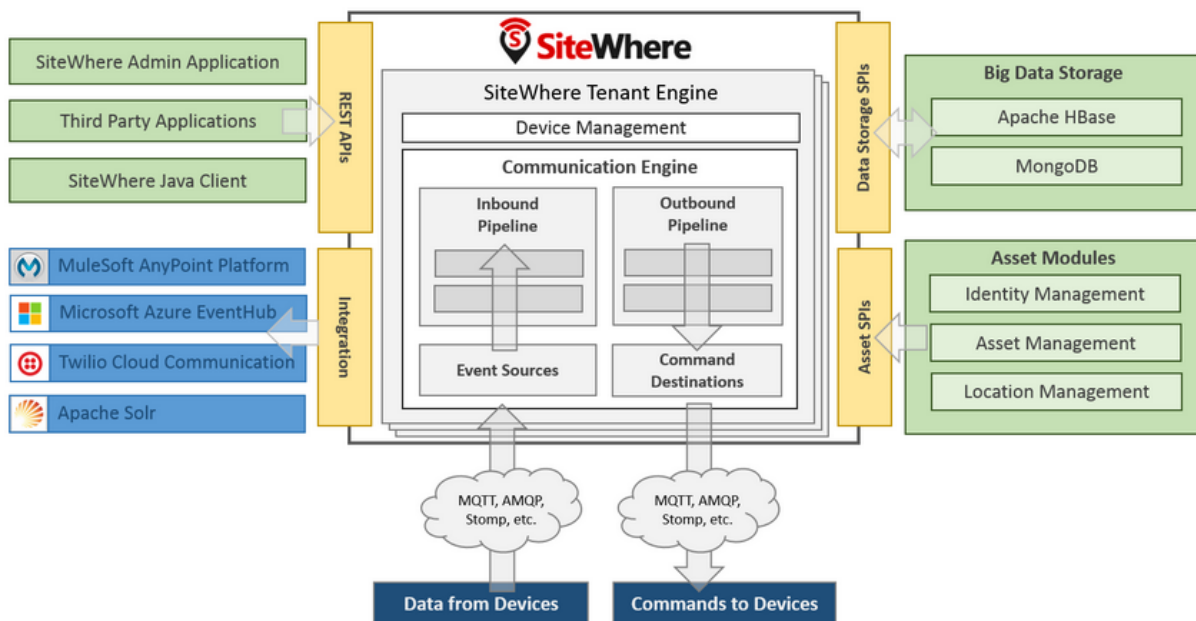


Figura 3: Architettura di alto livello della piattaforma open source SiteWhere. Fonte: <https://sitewhere.io>

Una volta installato sul back-end, SiteWhere funge da nodo centrale dell'infrastruttura IoT, sul quale gestire i digital-twin dei device e i servizi REST per operare sui dati. Il framework consiste in un sistema multi-tenant, dove ogni istanza, eseguita in modo trasparente rispetto agli utenti finali, è responsabile



singolarmente dei vari processi. Ogni server può ospitare più istanze (più tenant), ciascuna erogante un diverso servizio IoT ed accoppiata con un nodo di storage esclusivo. In ogni tenant è possibile configurare una pipeline di processing specifica, in modo da disegnare il processo che devono subire i dati una volta che pervengono al server, in base al tipo di applicazione.

Analogamente ad altre piattaforme IoT, i device comunicano con il back-end attraverso un *Gateway* che supporta alcuni protocolli di comunicazione: MQTT, AMQP e REST.

In sintesi le funzionalità offerte sono raggruppabili come appresso descritto.

- **IoT Server Platform:**

Fornisce un server basato su tecnologie comprovate che funge da controller per l'elaborazione dei dati trasmessi da dispositivi. Il server può essere installato su una macchina locale o eseguito su cloud e si basa su tecnologie progettate per scalare a miliardi di eventi generati al giorno dai dispositivi connessi.

Garantisce la persistenza a lungo termine dei dati inviati dai dispositivi. I dati non vengono mai eliminati, indipendentemente dal volume degli eventi.

Rende disponibili service provider interface che forniscono un object core model per la piattaforma e consentono a terzi di estendere e personalizzare il sistema per lavorare con le nuove tecnologie.

Fornisce un sistema avanzato di comunicazione che consente il controllo del ciclo di vita completo dei dispositivi di registrazione, l'invio di comandi in base al tipo di hardware, la ricezione di risposte e l'aggregazione di dati. Il sistema si basa su un insieme di interfacce che consentono di aggiungere e configurare facilmente nuovi protocolli di comunicazione e schemi di codifica.

Ha in dotazione un'applicazione d'amministrazione HTML5 che consente di visualizzare e manipolare tutti i dati di sistema in modo da renderne più semplice la comprensione. Questa applicazione utilizza i servizi REST fornite dalla piattaforma principale per interagire con i dati. Le applicazioni di terze parti possono utilizzare gli stessi servizi REST per interagire con i dati di SiteWhere senza dover utilizzare l'applicazione di amministrazione.

- **Device Management:**

Fornisce un modello completo di gestione dei dispositivi. Le specifiche consentono di dichiarare classi di dispositivi insieme a metadati di contesto. Molti protocolli IoT sono inclusi e pronti all'uso quali: MQTT, Stomp, AMQP, JMS, WebSockets, connessioni dirette a sockets, ecc.

Fornisce un modello per i tipi standard di dati generati dai dispositivi. Eventi quali misurazioni di valori, allarmi e aggiornamenti di posizione vengono memorizzati in timeseries datastore scalabili.

Consente di associare dispositivi a risorse esterne come persone o elementi fisici. Ad esempio, un badge può essere associato con la persona che lo possiede, un dispositivo di tracciamento può essere associato con un'attrezzatura a cui è collegato. Un framework apposito consente ai sistemi esterni di gestire le informazioni d'interesse. Ad esempio, l'elenco delle persone a cui possono essere assegnati i badge può provenire da un service directory esistente. SiteWhere



tiene traccia dell'assegnazione dei dispositivi ai beni o alle persone nel tempo e lega gli eventi all'assegnazione in modo che in una data successiva si possa sapere quali erano le posizioni del badge quando era stato assegnato a quella persona.

- **Integration:**

Si integra con framework di terze parti consentendo di attivare interazioni complesse sulla base del verificarsi di eventi.

Offre un client Java che può interagire con la maggior parte dei servizi REST forniti. Per i sistemi esterni realizzati in Java interfacciarsi con SiteWhere è semplice tramite poche righe di codice.

Protegge le informazioni limitando l'accesso a dati basati su un sistema di gestione degli utenti comprovato. Il sistema può essere configurato per utilizzare fonti esterne di dati di autenticazione d'identità. Si rimanda all'url <http://www.sitewhere.org/> per maggiori dettagli sui vari componenti dell'architettura e per esempi d'uso.

Dato l'elevato onere comportato dalla messa in opera e dalla manutenzione di basso livello di una infrastruttura hardware, molti utenti che hanno scelto SiteWhere come framework per la progettazione dei processi IoT e per il conseguente aggancio dei device, hanno poi optato per avvalersi di operatori terzi per il noleggio delle infrastrutture. In sostanza, il deployment finale vede spesso il framework SiteWhere installato su AWS, IBM Blue Mix, Microsoft Azure e similari.

Per questo motivo, non si ritiene opportuno avvalersi di questa soluzione, in quanto introduce un ulteriore livello di complessità (il know-how del framework) e non solleva dalla gestione dell'infrastruttura.

### **Microsoft Azure**

*Azure IoT Suite* [12] è la soluzione per l'IoT erogata sul cloud di Microsoft. Il modello di business è il ben noto *Platform as a Service* (PaaS), ovvero, la soluzione è erogata in modalità pay-per-use e segue un complesso tariffario a consumo.

Una caratteristica interessante di questa suite è che consente di installare alcune soluzioni pre-configurate, studiate per soddisfare alcuni comuni scenari del contesto IoT.

Per esempio, è possibile attivare una configurazione adatta al contesto delle previsioni meteo che abilita la ricezione dati dalle sensing station e l'elaborazione degli stessi attraverso il modulo di Machine Learning (*Azure Machine Learning*).

Tutte queste soluzioni pre-configurate si appoggiano, oltre che ad IoT Suite, ad altri moduli di Azure, e giocano quindi il ruolo di *System Integrator*.

Analogamente ad altri casi, IoT Suite può essere visto come un integration middleware che si frappone tra la moltitudine di device installati nel territorio e i servizi end-user che si desidera erogare. Sulla base della documentazione tecnica disponibile possiamo asserire che IoT Suite supporta la connessione di miliardi di dispositivi e gestisce le comunicazioni (bidirezionali) attraverso tre protocolli ampiamente noti: MQTT, AMQP e HTTPS.

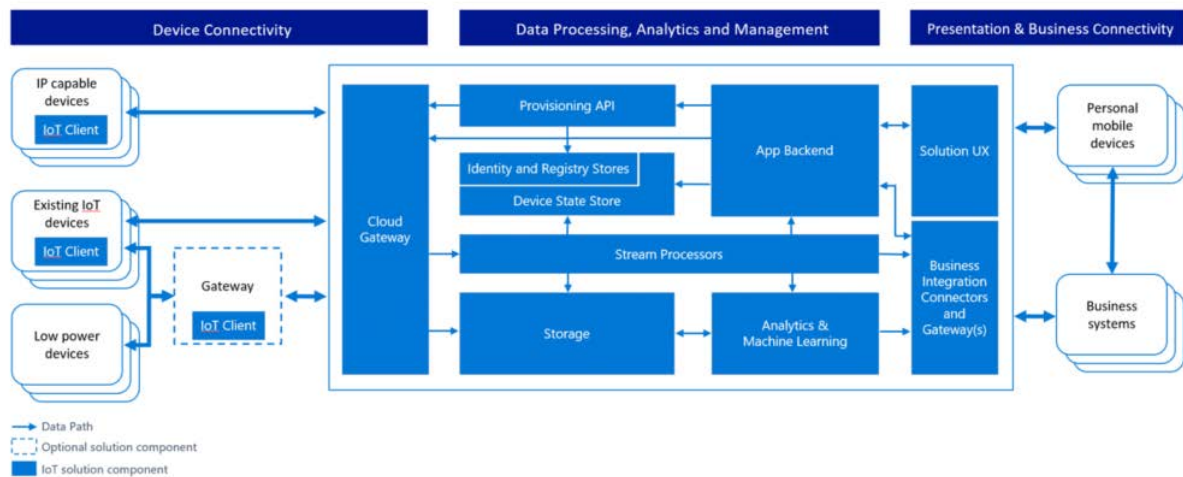


Figura 4: Architettura di alto livello della piattaforma cloud Microsoft Azure IoT Suite. Fonte: <https://azure.microsoft.com/>

Lo stato dei dispositivi connessi, non sempre disponibili per la peculiare natura del contesto IoT, è memorizzato (sul cloud) nel cosiddetto *twin device*. Questo digital twin consiste in un documento JSON che le applicazioni possono interrogare per conoscere l'ultimo stato utile del dispositivo, qualora esso non fosse raggiungibile.

Per quanto concerne l'aspetto della sicurezza digitale, IoT Suite permette una gestione delle autorizzazioni mediante *token* e certificati digitali X.509. Le autorizzazioni possono essere utilizzate per limitare l'accesso all'hub e per limitare alcune funzionalità.

### AWS IoT Core

AWS IoT Core [13] è l'*integration middleware* proposto da Amazon Web Services. Consiste in una soluzione cloud che insiste su una *Platform as a Service*, interamente gestita. Tra i maggiori pregi di questa soluzione troviamo l'eccellente **scalabilità** e **interoperabilità**. Una singola istanza di IoT Core può gestire miliardi di dispositivi, e altrettanti messaggi scambiati fra di essi attraverso gli endpoint esposti.

Il modello di business, come nel caso di Azure IoT Suite, è *pay per use*. Esso rappresenta fra l'altro l'unico notevole difetto di questa piattaforma, non perché i costi siano di entità particolarmente elevata rispetto alle altre piattaforme, ma per la sua complessità.

AWS IoT Core supporta la connessione dei diversi oggetti al cloud mediante tre protocolli: *HTTPS*, *MQTT over TLS* e *WebSockets*.

Inoltre, il canale di comunicazione può essere messo in sicurezza attraverso esecuzione di *Transport Layer Security* con modalità di autenticazione bilaterale mediante certificati digitali X.509.

La piattaforma è costituita da quattro componenti principali:

**Device Gateway/Message Broker:** espone gli endpoint e le API per permettere ai device di comunicare con il *Message Broker* mediante i protocolli sopra citati. Il *Message Broker* è un componente software deputato allo smistamento dei messaggi, caratteristico delle applicazioni che si ispirano al paradigma

publish/subscribe, particolarmente appropriato per il dominio *IoT*, e di conseguenza per lo scenario *Smart District*.

**Device Shadows:** questo componente permette ad IoT Core di memorizzare lo stato dei dispositivi anche quando questi fossero offline, condizione spesso verificata nel dominio IoT a causa delle connessioni intermittenti e inaffidabili, oltre che dalla naturale fallacia dei dispositivi. Grazie alle *shadow*, concetto che estende quello di *twin device* di Azure, le applicazioni che si avvalgono di IoT Core possono conoscere lo stato dei dispositivi in ogni momento, e soprattutto, possono impartire comandi per modificarne lo stato anche qualora i dispositivi non siano raggiungibili: il modulo di *Device Shadow* si preoccupa infatti di riallineare lo stato con la versione desiderata al primo momento utile.

**Rules Engine:** questo fondamentale modulo consente di automatizzare azioni di complessità a piacere attivando delle regole in seguito alla ricezione dei messaggi da parte dei device. A titolo esemplificativo, è possibile memorizzare i messaggi su un DBMS (relazionale o NoSQL), instradarli su un differente topic per propagarne l'effetto, accodarli in un sistema a code di messaggi e così via. Tra le varie possibilità è bene annoverare anche quella di attivare programmi scritti in linguaggi computazionalmente completi (*Function as a Service*), il che significa che i processi disegnati con questo strumento possono risolvere qualsiasi problema calcolabile. Similmente a quanto detto per le soluzioni pre-configurate di Azure IoT Suite, questo componente permette di disegnare processi di *System Integration*. Tuttavia, a differenza del precedente framework, è l'utente stesso a definire i flussi di integrazione con gli altri moduli di AWS, disponendo quindi della massima libertà progettuale.

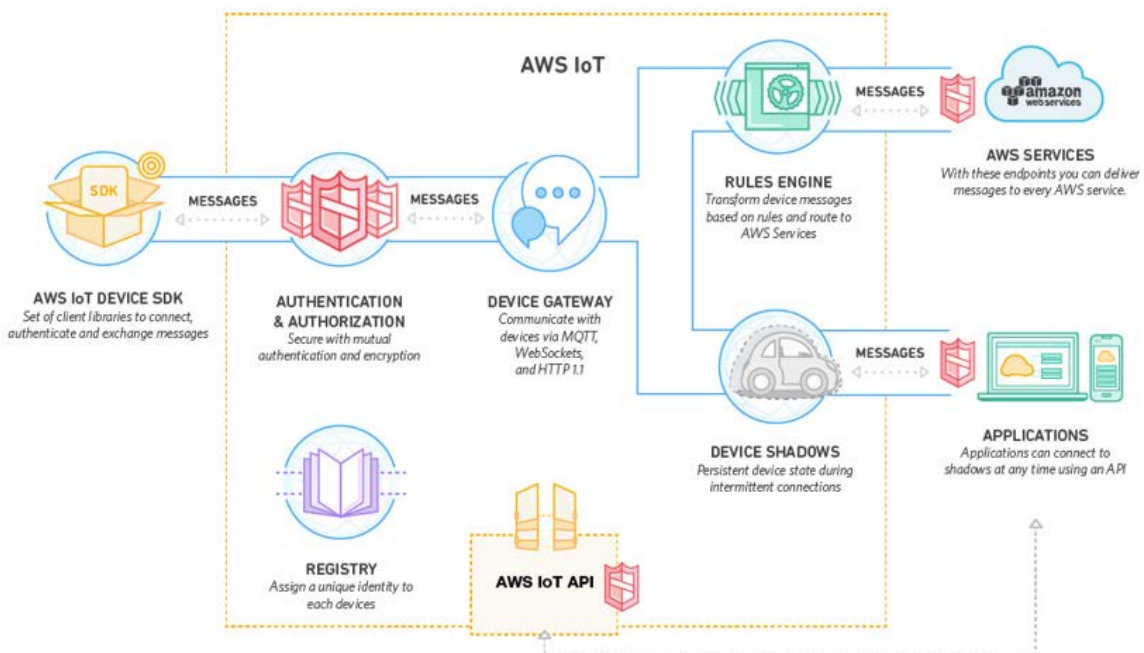


Figura 5: I componenti principali di AWS IoT Core. Fonte: <https://aws.amazon.com/it/iot/>

**Authentication and Authorization:** è il modulo deputato alla messa in sicurezza della comunicazione, piuttosto sofisticato. Consente di instaurare una connessione TLS ad autenticazione bilaterale tramite certificati X.509.

Le caratteristiche architettoniche e le ottime proprietà di connessione ai dispositivi rendono dunque IoT Core una scelta perfetta per il dominio applicativo in oggetto. Inoltre, elemento di fondamentale importanza è la possibilità di interfacciare i dispositivi mediante SDK e librerie **open source**, senza quindi avvalersi di software proprietario on-premise. Questo implica che, nel calcolo del costo di gestione del progetto in ambito *Smart District*, inciderà la sola voce di noleggio della componente infrastrutturale (le risorse hardware che AWS mette a disposizione dell'istanza di IoT Core), mentre la componente software installata sui singoli (e molteplici) device sarà nulla. Riassumiamo di seguito le ragioni per cui si ritiene che questa piattaforma sia la più consona per l'implementazione del progetto:

- **Scalabilità:** il servizio IoT Core è offerto dalla suite Amazon Web Services e si basa quindi sulla nuvola di risorse hardware gestite dalla medesima azienda. Il servizio è in grado di scalare **automaticamente** in base al numero di richieste da servire, dunque è estremamente versatile anche nel caso il numero di distretti urbani da connettere aumenti o nel caso il servizio debba far fronte a picchi di richieste in determinate fasce orarie, caratteristica, quest'ultima, tipica della gestione energetica in abitazioni private.
- **Fault-tolerance:** per le medesime ragioni sopra elencate, l'infrastruttura è esente da Single Point of Failure (SPoF), e dunque è garantita la continuità del servizio anche nel caso si verificassero guasti temporanei lato server.
- **Interoperabilità:** IoT Core supporta tre protocolli di comune uso e soprattutto **MQTT**, che è integrabile attraverso svariati SDK in ogni device dotato di un sistema operativo. Inoltre, oltre che sulla porta standard 8883, AWS IoT Core supporta le comunicazioni MQTT anche su porta 443, che comportano un minimo impatto sui firewall. Questo elemento può rivelarsi di fondamentale importanza qualora i device siano installati in ambiente domestico (come nel caso *Smart District*), in quanto la porta 443 è utilizzata di default per la comunicazione HTTPS e dunque non comporta intervento diretto da parte dell'utente.
- **System Integration:** il modulo di *Rules Engine* permette di progettare flussi di processo di qualsiasi complessità, avvalendosi pressoché di ogni modulo AWS che risulti necessario.
- **Software open source:** è possibile avvalersi interamente di software open source per la programmazione delle routine eseguite lato server e per la creazione dei client da installare a bordo di ogni device.

### AWS IoT Core: il modello di costo

Come già rimarcato, affidarsi a un cloud provider per la gestione del data layer di uno stack IoT *Smart District* (vedi Figura 1) è certamente una buona scelta, ma comporta importanti oneri dovuti al modello di business pay per use che caratterizza la maggior parte delle piattaforme in commercio. Per questo, il team di ricerca ha ritenuto opportuno dedicare una significativa quantità di tempo allo studio del modello di costo di AWS IoT Core, che è di seguito descritto.

Tutti i costi di AWS variano in base alla *AWS Region* nella quale viene erogato il servizio.

I costi di seguito riportati fanno riferimento alla AWS Region UE (Irlanda) e sono aggiornati a Luglio 2018.

*Connettività:*

Tipologia del servizio	Servizio	Unità di misura	Unità temporale	Costo	Note
Connettività	<b>Connessione di un dispositivo</b>	Device	Minuto	<b>0,00000008 \$</b>	(0,08 \$ per milione di minuti)

Ad esempio, nella regione UE (Irlanda) saranno addebitati 0,042 USD per dispositivo all'anno (1 device \* 0,08 USD/1.000.000 di minuti di connessione \* 525.600 minuti in un anno) per una connettività senza interruzioni. Per mantenere la connettività, i dispositivi possono inviare messaggi di keep-alive (messaggi MQTT PINGREQ e PINGRESP) con frequenze che variano da 20 minuti a 30 secondi, senza alcun costo aggiuntivo.

#### Scambio di messaggi MQTT:

Tipologia del servizio	Servizio	Unità di misura	Costo	Note
Comunicazione	<b>Invio messaggi MQTT</b>	5KB	<b>0,000001 \$</b>	Fino a un miliardo di messaggi da 5KB (1,00 \$ per milione di messaggi)
Comunicazione	<b>Invio messaggi MQTT</b>	5KB	<b>0,0000008 \$</b>	Da uno a cinque miliardi di messaggi da 5KB (0,80 \$ per milione di messaggi)
Comunicazione	<b>Invio messaggi MQTT</b>	5KB	<b>0,0000007 \$</b>	Oltre cinque miliardi di messaggi da 5KB (0,70 \$ per milione di messaggi)

Non tutte le tipologie di messaggio MQTT sono considerate ai fini del calcolo della mole di dati trasferita. I messaggi che contribuiscono al calcolo dei costi di comunicazione sono, nella fattispecie: CONNECT, PUBACK (ricevuto dal device), SUBSCRIBE, PUBLISH (inviato dal device o dal server).

#### Invio di comandi e gestione dei Device Shadow:

Tipologia del servizio	Servizio	Unità di misura	Costo	Note
Comunicazione	<b>Invio di comandi di registro</b>	KB	<b>0,00000125 \$</b>	1,25 \$ per milione di operazioni

Comunicazione	<b>Gestione aggiornamento Device Shadow</b>	<b>e di</b>	KB	<b>0,00000125 \$</b>	1,25 \$ per milione di operazioni
---------------	---	-----------------	----	----------------------	-----------------------------------

Ogni comando viene frazionato a blocchi di 1 KB in base alle dimensioni del rispettivo record. Ad esempio, un aggiornamento di 1,5KB al Device Shadow conta come due operazioni.

Esempi di chiamate a comandi di registro sono *CreateThing*, *CreateThingType*, *ListThings*, *UpdateThing* ecc.

Supponiamo che l'esecuzione a linea di comando della primitiva *ListThings* restituisca una lista di 50 device, ciascuno dei quali è descritto da 2KB di dati. Il comando provocherà un addebito corrispondente a 100 operazioni (da 1KB).

#### Rules Engine:

Tipologia del servizio	Servizio	Unità di misura	Costo	Note
Operazioni	<b>Attivazione di regole</b>	Attivazione	<b>0,00000125 \$</b>	0,15 \$ per milione di attivazioni
Operazioni	<b>Esecuzione di azioni associate alle regole</b>	Azione	<b>0,00000125 \$</b>	0,15 \$ per milione di azioni

L'attivazione di una regola è soggetta alla verifica delle condizioni di attivazione, che operano sul messaggio MQTT ricevuto su un determinato topic. Se il messaggio supera i 5KB, deve essere conteggiata una attivazione aggiuntiva per ogni 5KB aggiuntivi.

Ad esempio, un messaggio da 8KB provoca l'attivazione di una regola che scrive i dati del messaggio su DynamoDB. In questo caso vengono conteggiate **due** attivazioni e **una** azione.

Volendo dunque applicare il precedente modello di costo ad una possibile soluzione IoT progettata in contesto *Smart District*.

Nell'ipotesi che uno o più distretti urbani di una grande metropoli europea siano stati dotati di contatori intelligenti e altri device, ubicati nei vari edifici, atti a comunicare periodicamente informazioni di rilievo in contesto energetico (temperature, consumi di gas ed energia elettrica, ecc...). Nell'ipotesi che la flotta dei suddetti device conti **100.000 unità**.

Ogni device invia **un pacchetto** PUBLISH tramite protocollo MQTT **al minuto**, contenente alcune informazioni inerenti alla temperatura ambiente e ai consumi energetici. La comunicazione avviene mediante **QOS=1**. I pacchetti inviati hanno una dimensione di **2KB**.

Una volta **ogni ora**, ciascun dispositivo aggiorna la sua **Device Shadow** con pacchetti da **9KB**.

I dispositivi sono **perennemente connessi**, fatti salvi alcuni periodi di disconnessione dovuti a manutenzione e malfunzionamenti. Complessivamente, il tempo di **disconnessione** è stimato intorno al **4%** del tempo totale di connessione.

Sui messaggi ricevuti da IoT Core è applicata una **regola**. In caso di **attivazione**, la regola comporta **due azioni**: la prima consiste nella **ripubblicazione del messaggio** su un topic specifico, utilizzato dai device per la gestione di alcune comunicazioni da parte del back end (**solo il 2% dei device è registrato a tale topic**). La seconda azione consiste nell'accodare il messaggio presso una coda SQS (Simple Queue Service). Questa regola scatta in media per lo **0,01% dei messaggi ricevuti**.

Il costo del servizio (stimato) è calcolabile come segue:

### Connettività

Connessione permanente  
 100.000 device, 43.200 minuti al mese → 4.320.000.000 minuti al mese  
 Downtime 4% → 172.800.000 minuti di disconnessione  
 Totale mensile dei minuti di connessione: 4.147.200.000

### Calcolo del costo mensile

*UE (Irlanda)*  
 $4.147.200.000 \cdot 0,08 \$ / 1.000.000 = 331,78 \$$

### Comunicazione

100.000 device, 43.200 minuti al mese → 4.320.000.000 PUBLISH (2KB) al mese  
 QOS 1 → altrettanti messaggi PUBACK  
 Sia i PUBLISH che i PUBACK contano per un messaggio ciascuno (<5KB)  
 Numero mensile di messaggi MQTT: 8.640.000.000  
 Downtime 4% → 8.294.400.000 messaggi al mese  
 Messaggi indotti da Rules Engine (vedi slide successive): 829.440.000  
 Totale mensile messaggi MQTT: 9.123.840.000

### Calcolo del costo mensile

*UE (Irlanda)*  
 $9.123.840.000 \cdot 0,7 \$ / 1.000.000 = 6.386,69 \$$



**Comunicazione**

100.000 device, 720 ore al mese → 72.000.000 UpdateShadow (9KB) al mese  
 Ogni update pesa per 9 operazioni.  
 Totale mensile di operazioni: 648.000.000  
 Downtime 4% → 622.080.000 operazioni

**Calcolo del costo mensile**

*UE (Irlanda)*

$$622.080.000 \cdot 1,25 \$ / 1.000.000 = \mathbf{777,60 \$}$$

**Operazioni**

4.147.200.000 messaggi da 2KB al mese (compreso downtime)  
 Lo 0,01% fa scattare la regola → 414.720 attivazioni al mese  
 Ad ogni attivazione seguono due azioni → 829.440 azioni al mese  
**Attenzione:** la prima azione comporta la ripubblicazione su altro topic al quale sono registrati il 2% dei device (2.000 device) →  $414.720 \cdot 2.000 = 829.440.000$  PUBLISH da 2KB  
 (Vedi parte precedente)

**Calcolo del costo mensile**

*UE (Irlanda)*

$$(414.720 \cdot 0,15 \$ / 1.000.000) + (829.440 \cdot 0,15 \$ / 1.000.000) = 0,19 \$$$

**Connettività:**

*UE (Irlanda):* 331 \$

**Comunicazione:**

*UE (Irlanda) MQTT:* 6.387 \$

*UE (Irlanda) Shadow:* 778 \$

**Operazioni:**

*UE (Irlanda):* 1 \$

**Stima del costo mensile complessivo:** 7.497 \$



---

Si noti infine che, a questo costo, vanno aggiunti i costi relativi agli altri componenti di AWS che si desidera utilizzare nei processi del back end, come ad esempio quelli del DBMS scelto per archiviare i dati.

### **Schemi di progetto prototipali per un applicativo IoT in contesto Smart District mediante IoT Core.**

Nel seguito, descriviamo per sommi capi le scelte progettuali per la realizzazione di un servizio IoT Smart District erogato nel cloud.

Con riferimento alla Figura 1, dovremo anzitutto definire i device che costituiranno il substrato hardware della soluzione. A tal fine, supponiamo di utilizzare dei *Single Board Computer* (SBC) a basso costo, che sono in grado di interfacciarsi con qualsivoglia sensore e di comunicare dati via Ethernet o wi-fi.

In secondo luogo, è necessario stabilire a quale fornitore affidare l'hosting dei dati e dei processi nel cloud. In base alle osservazioni di cui sopra, *AWS IoT Core* sembra essere ad oggi una delle scelte più sagge ed affidabili. Ovviamente altri player che adottano modelli pay per use, come i framework offerti da Cisco, IBM, Microsoft, possono essere altrettanto validi.

Si tenga presente che l'attuale tendenza dei fornitori di molteplici servizi innovativi nel settore Smart City, di cui certamente fanno parte le soluzioni di efficientamento dei processi di produzione e gestione integrata in ambito *Smart District*, è proprio quella di far debito ricorso alle tecnologie IoT in contesti cloud. Poter disporre di una struttura integrata in cloud permette una maggiore scalabilità delle risorse, consentendo quindi di affrontare carichi di lavoro crescenti, o comunque bilanciati in base al carico effettivo da sostenere. Oltre alle suddette motivazioni è da sottolineare il fatto che l'archiviazione dei dati risulta maggiormente garantita potendo fare affidamento su server dislocati in remoto ma gestiti con un elevato grado di tolleranza ai guasti. Così come non sarebbero più a carico dell'utilizzatore/gestore di un impianto l'aggiornamento dei server, applicazione delle patch di sicurezza e le operazioni di manutenzione dei server installati. Tuttavia, sposare questa soluzione comporta il rispetto di determinati vincoli. In primo luogo è necessario che l'utente accetti questo tipo di servizio rinunciando ad avere un suo server proprietario che può gestire in proprio. Infatti non è in genere conveniente replicare il sistema di comunicazione, il database e altre funzioni specifiche dell'architettura cloud adottata all'interno di un server fisico o virtuale proprietario del cliente (private cloud).

Per quanto sopra detto si deve prestare massima attenzione ai modelli di costo che caratterizzano i diversi scenari. Infine, nel caso in cui la scelta della esternalizzazione delle risorse in cloud risultasse non percorribile (ad esempio per motivi giuridici), si dovrà far ricorso ad una infrastruttura hardware proprietaria. In tal caso, *SiteWhere* può essere un'ottima piattaforma software per la gestione dei processi IoT su tale infrastruttura (si veda la rispettiva sezione).

Infine, si renderà necessario sviluppare uno o più servizi che si interfaccino con il back end per fruire dei dati catalogati e godere dei servizi a valore aggiunto implementati nello *Smart District*. Questo tipo di scelta è strettamente dipendente dal modello di business che si vuole adottare, e dipende dal target medio rappresentante l'utente del distretto urbano informatizzato. A puro titolo di esempio, una applicazione per smartphone o tablet *Android* potrebbe essere una buona scelta in merito. Al contempo, sarà probabilmente necessario prevedere la connessione al back end anche da parte di

client completamente diversi, per implementare la console di gestione remota dell'intero sistema (App Desktop, Interfaccia Web-based).

Concentriamoci ora sulla strategia progettuale per la comunicazione tra i device e la piattaforma IoT Core. In Figura 6 è mostrata una possibile strategia che, a partire da un pacchetto MQTT correttamente ricevuto, smista le rilevazioni dei sensori e ne memorizza il contenuto su un DBMS NoSQL (si è supposto di utilizzare il DBMS DynamoDB, erogato nel cloud di AWS).

Anzitutto, viene accertata l'autenticità del client connesso, mediante verifica della catena di certificati X.509 proposti. Questo implica che ogni device dovrà essere equipaggiato con una coppia asimmetrica di chiavi di cifratura e con un corrispondente certificato che attesti la validità della chiave pubblica. Per praticità, è possibile avvalersi della *Certification Authority* di AWS in fase di emissione dei certificati.

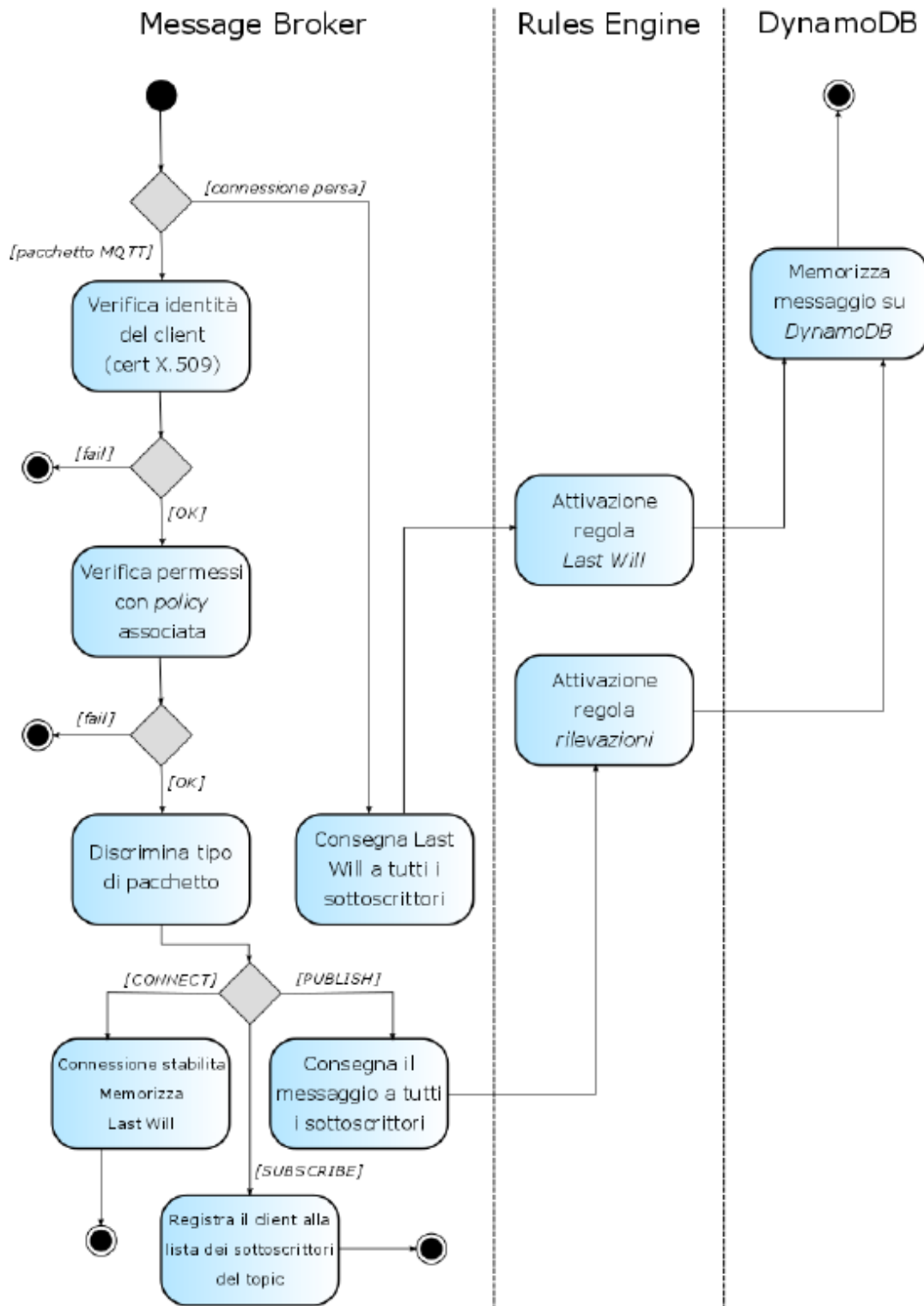


Figura 6: Diagramma di attività UML rappresentante il flusso di gestione di un pacchetto MQTT pervenuto sul back-end di AWS IoT Core.

---

Una volta dichiarato il client attendibile, IoT Core verifica che il certificato associato risulti attivo, e procede al parsing della *security policy* associata al certificato. Questo oggetto, specifico di IoT Core, è pensato per abilitare la *context-security*, in quanto permette di specificare, per ogni device, il tipo di pacchetti MQTT che è titolato a inviare, i topic sui quali può pubblicare messaggi e quelli ai quali può sottoscrivere. Questo permette in sostanza di definire, a monte, i permessi di ciascun device, ed evitare indesiderati sconfinamenti in caso di attacco malevolo (che, nel dominio IoT, può consistere anche nel banale furto di un dispositivo).

Terminati i controlli di sicurezza, IoT Core discrimina la tipologia di pacchetto ricevuto ed agisce di conseguenza:

- **Pacchetto di tipo Connect:** il server memorizza le informazioni di connessione, stabilisce la connessione stessa e memorizza il pacchetto last will del client.
- **Pacchetto di tipo Publish:** il server instrada il pacchetto a tutti i client che hanno sottoscritto quel topic. Inoltre, attiva un flusso di esecuzione parallelo atto a rendere persistenti i dati ricevuti su DynamoDB. La connessione con DynamoDB è resa possibile dalla System Integration offerta dal componente Rules Engine, come descritto in precedenza.
- **Pacchetto di tipo Subscribe:** il client viene accodato alla lista dei sottoscrittori del determinato topic.

Come si nota, nel caso il pacchetto MQTT (o TCP) indichi una inattesa caduta della connessione, il pacchetto transita per un flusso parallelo che comporta la propagazione del last will associato al client.

Prima di passare agli schemi di connessione del data layer con in service layer (vedi Figura 1), è bene notare che la scelta del DBMS è tutt'altro che scontata. Tendenzialmente, in ambito IoT, si opta per soluzioni NoSQL (come DynamoDB), quantomeno per la memorizzazione dei dati grezzi che provengono dai singoli device. Queste soluzioni sono infatti adatte alla memorizzazione di gigantesche moli di dati (anche non strutturati). In base alla natura della soluzione implementata, tuttavia, potrebbe essere sufficiente un RDBMS. Analogamente, un data base relazionale potrebbe essere una ottima soluzione per memorizzare i dati strutturati (più sintetici) elaborati periodicamente a partire da quelli grezzi. In conclusione, una soluzione ibrida che utilizza sia sistemi classici che NoSQL è la più utilizzata.

Infine, valutiamo anche il progetto del flusso di esecuzione che intercorre tra una ipotetica applicazione client e il back end. In tal caso, possiamo immaginare di disporre di alcune API REST che consentano ai client di autenticarsi e richiedere una serie di dati disponibili sui server, prodotti dallo Smart District. In Figura 7 è esemplificato un plausibile flusso di esecuzione.

Anzitutto, l'applicazione client invia un comando attraverso le API REST al server (che potrebbe essere esposto su AWS EC2, o direttamente da una funzione serverless su IoT Core).

Il WebServer provvede ad istanziare un oggetto AuthManager, deputato alla verifica della validità delle credenziali utente. Solo in caso affermativo, il flusso di esecuzione procede.

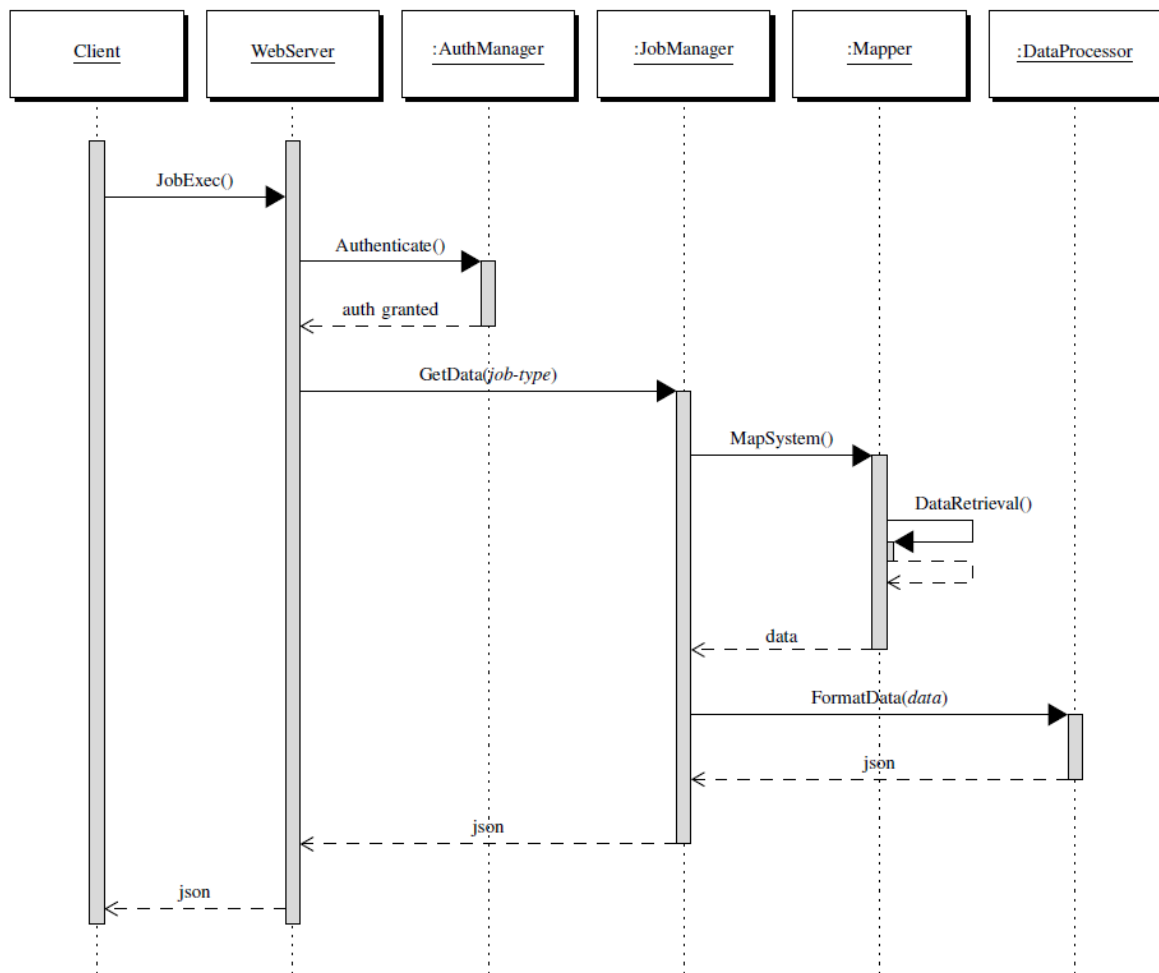


Figura 7: Diagramma di sequenza UML rappresentante il flusso di gestione di una richiesta di un end-user al servizio IoT Smart District proposto.

Il WebServer procede istanziando un JobManager, oggetto deputato a discriminare il tipo di procedura richiesta dal client. In base al tipo di lavoro da svolgere, questo oggetto istanzia, possibilmente in Thread separati, un Mapper e un DataProcessor.

Il primo, è l'oggetto che conosce la struttura di memorizzazione adottata (ad esempio DynamoDB) ed è quindi in grado di reperire i dati necessari all'espletamento del lavoro.

Il secondo, si preoccupa di formattare i dati recuperati, rispettando i requisiti delle API REST invocate dal client, in modo da restituire le informazioni nel corretto formato.

Per le sperimentazioni e per il design degli schemi progettuali si è fatto uso, fra l'altro, del framework **IoT Manager**, software open source sviluppato all'interno di *Smart City Lab*, e disponibile al seguente url: <https://github.com/smartcitylabunibo>.

### Interfacciamento dei dispositivi e SDK.

Si noti infine che, per connettere i device al componente Device Gateway di AWS IoT Core, è necessario avvalersi di un SDK, rilasciato come codice open source da Amazon stessa.

Amazon mette a disposizione questi SDK per molteplici linguaggi di programmazione. Quello che risulta più performante, anche se più complesso, è certamente quello per *embedded C*.

Questo SDK è pubblicato sulla piattaforma GitHub ed è stato rilasciato con licenza Apache 2.0. Il client MQTT costruito mediante questo SDK si appoggia inoltre a due librerie esterne che devono essere opportunamente aggiornate e ricompilate a monte della scrittura della client application. La prima, denominata CppUTest, è pubblicata su GitHub2 con licenza BSD 3-Clause. La seconda, denominata MbedTLS, è anch'essa presente su GitHub3 ed è stata rilasciata sotto licenza Apache 2.0.

- [1] S. Gaitan, L. Calderoni, P. Palmieri, M. t Veldhuis, D. Maio, and M. B. van Riemsdijk, "From Sensing to Action: Quick and Reliable Access to Information in Cities Vulnerable to Heavy Rain," *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 12, pp. 4175–4184, Dec. 2014.
- [2] P. Palmieri, L. Calderoni, and D. Maio, "Private Inter-network Routing for Wireless Sensor Networks and the Internet of Things," in *Proceedings of the Computing Frontiers Conference*, New York, NY, USA, 2017, pp. 396–401.
- [3] S. Borlase, *Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions*. CRC Press, 2012.
- [4] *Vision and Challenges for Realising the Internet of Things*. Publications Office of the European Union, 2010.
- [5] D. Uckelmann, M. Harrison, and F. Michahelles, Eds., *Architecting the Internet of Things*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [6] J. Guth, U. Breitenbücher, M. Falkenthal, F. Leymann, and L. Reinfurt, "Comparison of IoT platform architectures: A field study based on a reference architecture," in *2016 Cloudification of the Internet of Things (CIoT)*, 2016, pp. 1–6.
- [7] M. A. Razzaque, M. Milojevic-Jevric, A. Palade, and S. Clarke, "Middleware for Internet of Things: A Survey," *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, no. 1, pp. 70–95, Feb. 2016.
- [8] A. Keyhani, *Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems*. John Wiley & Sons, 2011.
- [9] M. A. A. da Cruz, J. J. P. C. Rodrigues, J. Al-Muhtadi, V. V. Korotaev, and V. H. C. de Albuquerque, "A Reference Model for Internet of Things Middleware," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 2, pp. 871–883, Apr. 2018.
- [10] L. Calderoni, D. Maio, and P. Palmieri, "Location-aware Mobile Services for a Smart City: Design, Implementation and Deployment," *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res.*, vol. 7, no. 3, pp. 74–87, Dec. 2012.
- [11] "SiteWhere Open Source Internet of Things Platform." [Online]. Available: <https://sitewhere.io/en/>. [Accessed: 29-Jan-2019].
- [12] "Azure IoT – Internet of Things Platform | Microsoft Azure." [Online]. Available: <https://azure.microsoft.com/en-us/overview/iot/>. [Accessed: 29-Jan-2019].
- [13] "Panoramica di AWS IoT Core – Amazon Web Services," Amazon Web Services, Inc. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/it/iot-core/>. [Accessed: 29-Jan-2019].

## Confronto con i risultati attesi ed eventuali scostamenti rilevati

Sulla base delle ipotesi avanzate in fase preventiva, i risultati hanno confermato le aspettative. La parte più onerosa ha di fatto riguardato lo studio delle molteplici piattaforme cloud per l'IoT e la loro adeguata predisposizione al dominio *Smart District*. Infatti, il mercato offre numerose soluzioni, a volte di difficile comparazione, che si sono rapidamente consolidate e hanno visto un'evoluzione molto veloce. Cloud Computing e Internet of Things sono paradigmi nati in seno ai grandi player dell'ICT, caratterizzati dunque da uno sviluppo spesso privo di solide basi accademiche e scientifiche. Per questo motivo, i canoni sui quali si basano queste piattaforme sono di difficile inquadramento e variano molto rapidamente, rendendo così problematico il reciproco confronto e le prospettive di sviluppo a lungo termine.

In conclusione, non si riscontrano scostamenti degni di nota.

## Deliverables

Unità di ricerca	DESCRIZIONE DELIVERABLE	RISULTATI QUANTITATIVI
UNIBO-DISI	Il deliverable " <b>Report D_1.2</b> : Analisi e Progettazione di Massima di una Piattaforma di Gestione IOT" consiste in una relazione tecnico scientifica relativa alle linee guida per la progettazione di una piattaforma software inquadrabile nel dominio IoT, sia lato <i>front-end</i> che lato <i>back-end</i> .	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisi delle principali piattaforme software disponibili in letteratura in ambito IoT.</li> <li>• Linee guida e schemi progettuali per la realizzazione di una piattaforma basata su tecnologie open source che possa fungere da strumento di monitoraggio di sensoristica diffusa, con particolare riferimento al dominio Smart District.</li> </ul>

## Benefici per gli utenti finali

Le attività svolte nell'ambito del task 1.2 sono da considerarsi di supporto alle attività riportate nei task 1.3 ed 1.4. Pertanto, si rimanda alle descrizioni di tali attività per i relativi benefici per gli utenti finali.

## Diffusione dei Risultati

I risultati scientifici di maggiore rilievo sono stati inclusi in due pubblicazioni scientifiche attualmente under review in una rivista e una conferenza a carattere internazionale, rispettivamente:

- Luca Calderoni, Antonio Magnani, Dario Maio. *Behind the platform: a dissemination study on IoT distributed systems design and implementation*.
- Luca Calderoni, Antonio Magnani, Dario Maio. *IoT Manager: a Case Study of the Design and Implementation of an Open Source IoT Platform*.

## Apparecchiature Disponibili ed Acquisite

Per le ricerche svolte e per la predisposizione dei deliverable si è fatto uso unicamente delle attrezzature di proprietà del *Dipartimento di Informatica - Scienza e Ingegneria* (DISI) dell'Università di Bologna, in parte ubicate presso il laboratorio di ricerca *Smart City Lab* (Cesena).

Per alcune sperimentazioni si è fatto uso del framework IoT Manager, software open source sviluppato all'interno di *Smart City Lab*, e disponibile al seguente url: <https://github.com/smartcitylabunibo>.

## Attività 1.3 Piattaforme ICT per la raccolta, gestione ed analisi distribuita di dati tramite tecnologie IoT in ambienti Smart Districts [CNR-IIT].

---

### Obiettivi

L'obiettivo di questa attività consiste nella progettazione di una piattaforma ICT per la raccolta, la gestione ed il supporto all'analisi distribuita di dati provenienti da sensori e dispositivi IoT (Internet of Things) per fornire servizi di efficienza energetica per gli utenti di uno Smart District. Tale piattaforma deve avere le seguenti caratteristiche: i) utilizzare tecnologie open e standard; ii) sfruttare il paradigma emergente dell'edge/fog computing; e iii) poter essere integrata con piattaforme classiche cloud-based. Le funzionalità della piattaforma sono validate attraverso lo sviluppo di un pannello di controllo per il monitoraggio dei consumi energetici di un edificio.

### Risultati conseguiti

Nel POA 2015 è stato sviluppato un prototipo hardware e software di gateway IoT, che offre il supporto del service discovery sia a reti esterne che ai dispositivi IoT ad esso connessi utilizzando le funzionalità standard offerte da COAP. In particolare il gruppo di lavoro che standardizza CoAP ha definito un servizio di resource directory (o RD), che funge da database dei descrittori delle risorse e servizi di una data rete IoT. Nel POA 2015 è stata estesa la definizione standard di RD integrando anche delle funzionalità di proxy di tutte le risorse presenti nella rete e di caching del loro stato attuale, al fine di limitare il traffico dati nella rete IoT dovuto a frequenti richieste di aggiornamento dello stato delle risorse generate da applicazione esterne. Nel dettaglio la RD crea per ogni risorsa fisica una risorsa virtuale che ha il compito di rappresentare lo stato di una risorsa reale. Quindi una applicazione esterna che vuole ricevere aggiornamenti (o semplicemente l'ultima rappresentazione) da una risorsa CoAP, anziché interrogare direttamente il sensore, dirige le sue richieste alla risorsa virtuale esposta dalla RD. Nel POA 2016\_2017 è estesa l'implementazione della RD con ulteriori due componenti che sono brevemente descritte nel seguito.

Il **primo componente** che è stato aggiunto al gateway IoT implementa uno schema avanzato di proxy che permette di regolare l'accesso alle risorse IoT tenendo in considerazione sia il livello di congestione del traffico nella rete IoT che i requisiti delle applicazioni. Infatti se le applicazioni potrebbero richiedere aggiornamenti dalle risorse in modo troppo frequente comportando fenomeni di sovraccarico, perdita di messaggi e degradazione dei tempi di risposta. Allo stesso tempo, in assenza di regolazione dell'accesso, l'eterogeneità dei requisiti delle applicazioni può comportare il verificarsi di fenomeni di unfairness, in cui alcune applicazioni più aggressive ottengono un'assegnazione iniqua della banda, rispetto ad altre applicazioni meno esigenti. Al fine di affrontare le problematiche introdotte nel



paragrafo precedente, la RD è stata estesa aggiungendo un nuovo modulo detto brokering engine (BE) ed introducendo una nuova politica dinamica di assegnazione del periodo di polling detta “controlled polling”.

In breve, il BE svolge i seguenti task:

- monitora l’affidabilità delle trasmissioni verso le risorse CoAP al fine di determinare se esse risultano congestionate o meno.
- ridurre il periodo di polling al fine di allocare banda alle risorse non congestionate
- aumentare il periodo di polling al fine di de allocare banda alle risorse congestionate.

Durante il ciclo di vita il BE divide il tempo in intervalli  $t_k$ . Durante l’intervallo  $t_k$  le statistiche di trasmissione dei pacchetti tra risorse virtuali e reali vengono collezionate. Alla fine dell’intervallo  $t_k$ , sulla base delle statistiche consumate, il BE classifica lo stato di congestione delle risorse. All’inizio dell’intervallo  $t_{k+1}$  (quindi prima dell’acquisizione delle nuove statistiche) vengono aggiornati i periodi di polling. L’estensione del modulo RD ha richiesto l’aggiunta di nuovi elementi costitutivi rappresentati dalle seguenti classi Java:

- `BrokeringEngine.java`: implementa le logiche per la classificazione della congestione delle risorse e si fa carico di gestire l’aggiornamento dei periodi di polling per le risorse con demone attivo. Se la lista delle risorse attive non è vuota, il BE ciclicamente effettua le seguenti azioni:
  - Attende l’acquisizione di un numero sufficienti di statistiche sulla trasmissione relative a tali risorse;
  - Analizza le statistiche relative alla perdita di transazioni per ciascuna risorsa;
  - Classifica le risorse in uno stato operativo sulla base delle statistiche;
  - Aggiorna il periodo di polling in accordo alla precedente classificazione.
- `RateInformationContainer.java`: classe contenitore che contiene le informazioni relative al periodo di *polling* per una data risorsa virtuale.
- `StatisticsContainer.java`: traccia le statistiche di trasmissione durante la comunicazione fra risorsa virtuale e risorsa reale. Tra i campi di maggiore interesse si distinguono: i) numero di transazioni correttamente completate; ii) il numero medio di richieste CoAP per transazione; iii) il tasso di perdita di transazioni o TLR (calcolato su periodo di campionamento configurabile); iv) il ritardo medio di transazione; v) dimensione media del payload delle risposte CoAP. Il componente che si fa carico di comunicare l’esito delle transazioni CoAP (per transazione si intende una richiesta con relativa risposta COAP) è il demone di aggiornamento della risorsa virtuale. Il *Brokering Engine*, invece, accede al tasso di perdita delle transazioni al fine di classificare lo stato di congestione delle risorse.

Il diagramma delle classi del prototipo sviluppato è illustrato in Figura A.

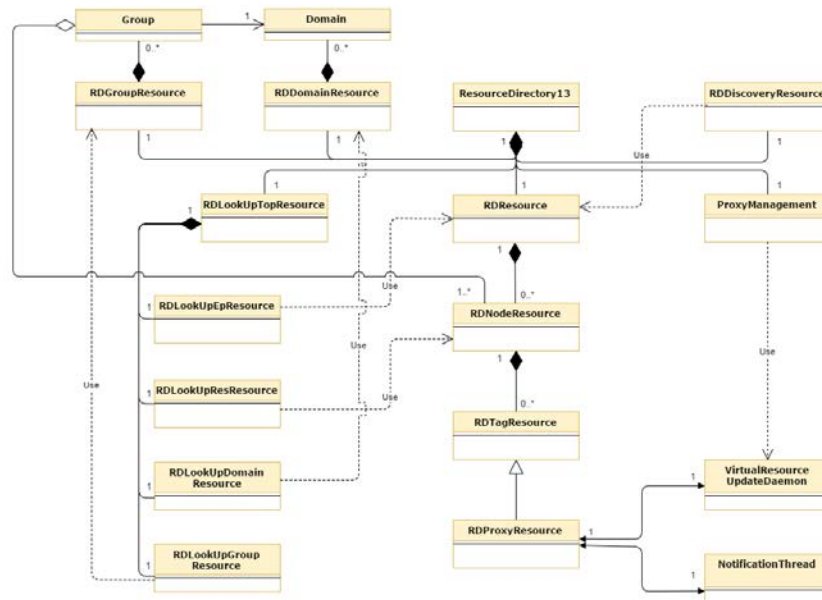


Figura A: Diagramma delle classi del prototipo sviluppato.

In Figura B è, inoltre, mostrato un esempio di sincronizzazione tra il *brokering engine* e gli altri oggetti del sistema. Il *BE*, in presenza di risorse attive, si risveglia periodicamente. Con riferimento alla figura, si indicano con  $t_k$  il periodo uscente e con  $t_{k+1}$  il periodo entrante. Alla fine del periodo  $t_k$  il *BE* si attiva, acquisisce le statistiche da tutti gli oggetti di tipo *StatisticsContainer* relativi alle risorse attive ed applica i suoi meccanismi di aggiornamento dei periodi di polling (una descrizione dettagliata dell’algoritmo di aggiornamento della frequenza di polling è riportato nel deliverable D\_2.2), i quali vengono salvati negli oggetti *RateInfoContainer* associati. Tali oggetti saranno, poi, utilizzati dai demoni di sincronizzazione al fine di acquisire il corretto intervallo di polling.

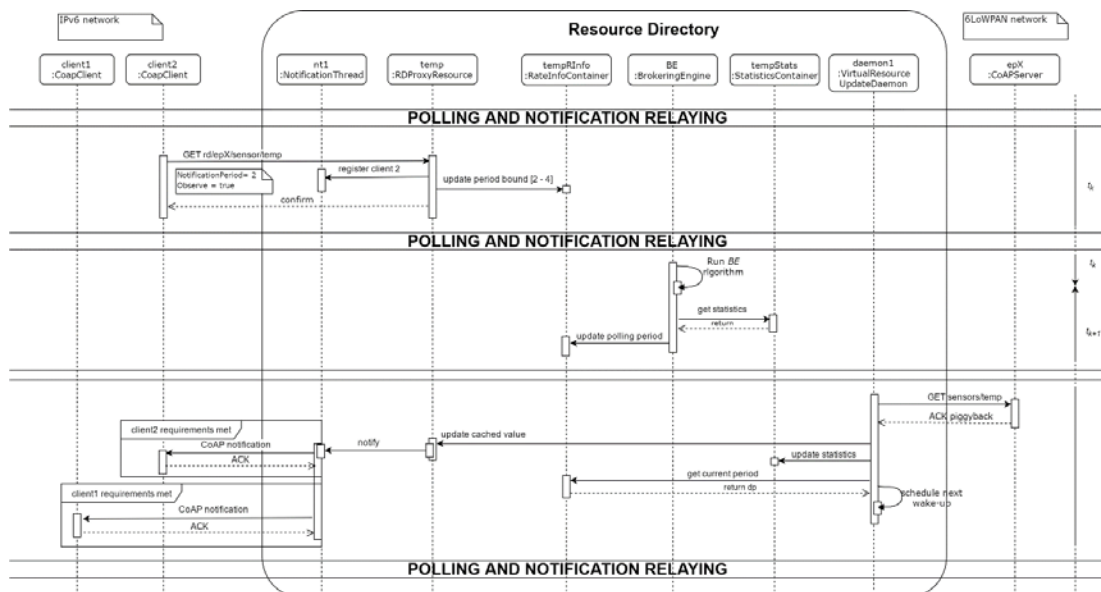


Figura B: Diagramma di sequenza del BE.

Al fine di testare le prestazioni della RD da noi sviluppata si è fatto utilizzo del simulatore Cooja, che è parte del progetto Contiki OS. Con Cooja è possibile creare reti IoT con nodi commerciali il cui comportamento (sia hardware che software) viene emulato. Inoltre, esso consente di iniettare nella

rete simulata traffico IP generato da dispositivi esterni o applicazioni attraverso un sistema di *bridging* grazie all'utility *Tunslip*, permettendoci di testare lo scambio di messaggi reali tra una RD ed i client COAP. Inoltre, è stato realizzato un prototipo hardware del nostro gateway IoT usando una Raspberry model Pi 3 B+, un popolare sistema embedded a basso costo e dal consumo energetico limitato, in grado di eseguire una distribuzione completa del sistema operativo Linux. In particolare, sul nodo Raspberry, invece, si è utilizzato il sistema operativo Raspbian, una distribuzione di Linux derivata da Debian. Ciò consente l'installazione di una JVM e l'installazione del modulo JAVA della RD da noi sviluppato sul gateway stesso. Inoltre, si è sfruttato il software CETIC 6LBR al fine di far agire il gateway come border router verso la rete Internet esterna. L'architettura complessiva del prototipo hardware e software del gateway IoT è illustrata in Figura 3.

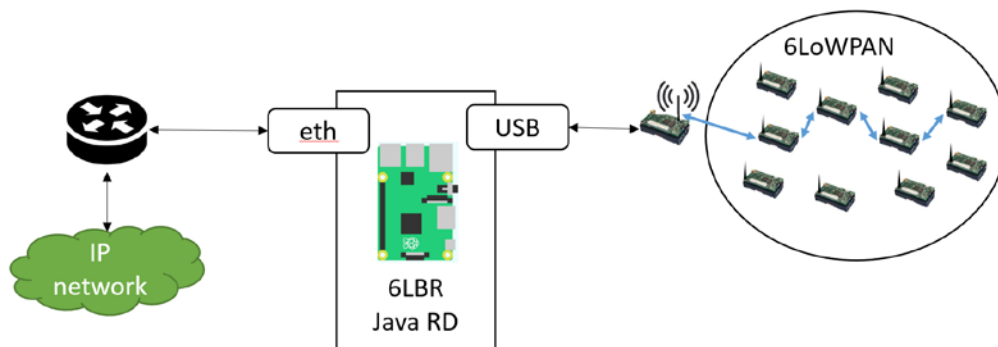


Figura C: Architettura del prototipo hardware e software del gateway IoT.

L'obiettivo primario di questo test è stato di quantificare il vantaggio di introdurre un meccanismo di regolazione della frequenza di polling, in funzione dello stato di congestione della rete. Si è valutato uno scenario di tipo eterogeneo, in cui ciascun client seleziona il periodo desiderato di notifica in modo casuale ed uniforme nel range  $[M, M + 10]$  secondi. È stato, quindi, fatto variare  $M$ , considerando un numero fisso di 10 client per ciascuna risorsa virtuale. Si noti che al diminuire di  $M$  la frequenza con cui un server dovrebbe generare notifiche COAP aumenta. La Figura D mostra il goodput come funzione del carico della rete (espresso come *total observing load*). I risultati mostrano come il goodput di entrambe le soluzioni sotto esame si mantiene simile quando il traffico della rete è limitato. Di contro, all'aumentare del livello di congestione, lo schema *POLL* (senza regolazione della frequenza di polling) sperimenta una sostanziale diminuzione del goodput, mentre, lo schema *BROKER* (con regolazione della frequenza di polling) ottiene prestazioni superiori fino a quattro volte. Inoltre, si osserva come *POLL* abbia una tendenza a deteriorare le sue performance, mentre, *BROKER* risulta in un andamento stabile.

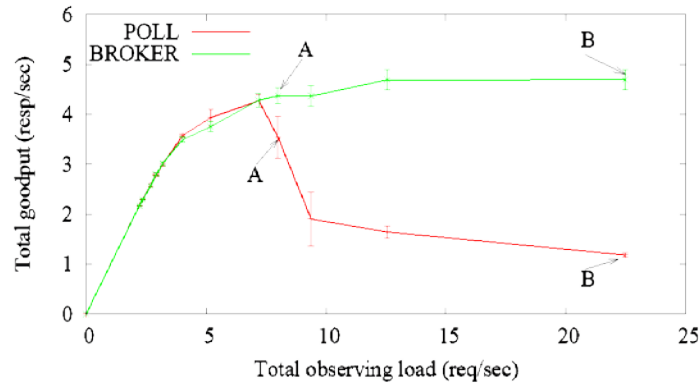


Figura D: Frequenza di aggiornamento dello stato delle risorse in funzione della frequenza delle richieste generate dalle applicazioni.

Il **secondo componente** che è stato aggiunto al gateway IoT è un CoAP adapter che permette le interazioni tra la RD ed una piattaforma middleware tradizionale basata su server centralizzati per lo storage dei dati, che fornisce interoperabilità anche con applicazioni che non supportano CoAP. Inoltre la piattaforma middleware selezionata permette di interagire con le risorse della rete attraverso un approccio publish-subscribe alternativo al modello client-server di CoAP. Inoltre la piattaforma middleware utilizza il protocollo MQTT per permettere lo scambio di messaggi tra i publisher ed i subscriber.

In Figura E viene mostrata l'architettura ad alto livello delle interazioni fra un nodo non CoAP, il Middleware e-cabin e l'RD.

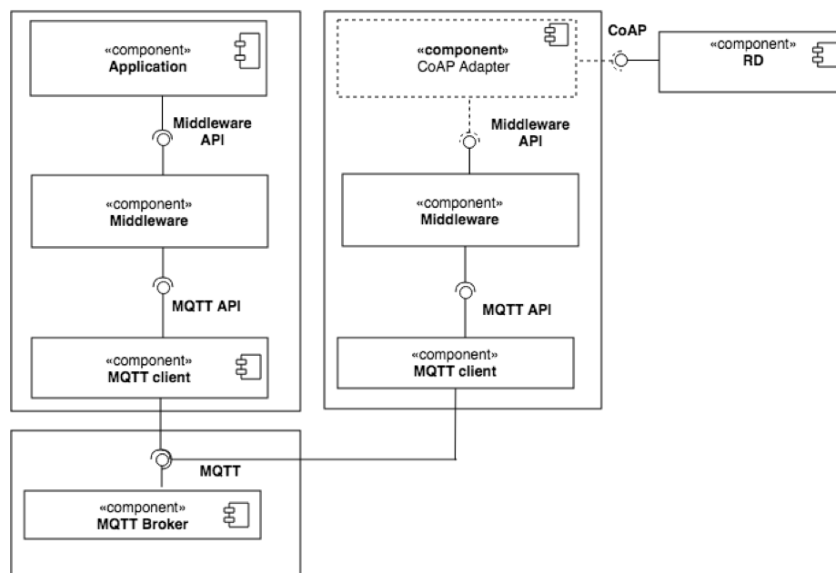


Figura E: Interazioni fra la RD e un componente *non* CoAP attraverso il Middleware

All'interno del COAP Adapter, si possono identificare i seguenti layer software:

1. Il layer di interazione con l'RD (**rdInteraction**). Questo layer all'interno di esso conterrà i seguenti sottocomponenti:
  - a. il *ResourceObserver*, che periodicamente, effettuando delle richieste all'RD, si accorgerà se una o più risorse sono state aggiunte o rimosse dall'RD stesso.

- b. Il *NotificationManager*, il quale si metterà in ascolto, attraverso la richiesta di *Observe*, dello stato delle risorse registrate sull'RD.
2. Il layer di interazione con il Middleware (*middlewareInteraction*). Questo layer all'interno di esso conterrà i seguenti sottocomponenti:
  - a. Il *dataFeedManager*, che si occuperà di gestire le richieste di announce e unregister dei *DataFeedDescriptor* sul Middleware.
  - b. Il *ServiceManager*, che si occuperà di gestire le richieste di announce e unregister dei servizi sul Middleware e-cabin.
  - c. Il *ServiceRequestActuatorHandler*, il quale si occuperà di gestire le richieste e le risposte provenienti rispettivamente dal Middleware e dagli attuatori CoAP.
3. Di un ulteriore layer di interazione con gli endpoint CoAP, in particolare con gli attuatori (*endPointInteraction*).
4. Il layer *core*, quello che mette in comunicazione il *middlewareInteraction* con *rdInteraction* e con *endPointInteraction*. Esso tradurrà i messaggi dal formato CoAP al formato Middleware e viceversa.

Nella figura seguente è illustrato con un esempio la sequenza di eventi e di messaggi scambiati tra un sensore, verso cui il gateway IoT da noi sviluppato mantiene una relazione di observing, il CoAP adapter e la piattaforma Middleware, in cui viene creata un data feed per accedere allo stato aggiornato della risorsa da parte di applicazioni esterne.

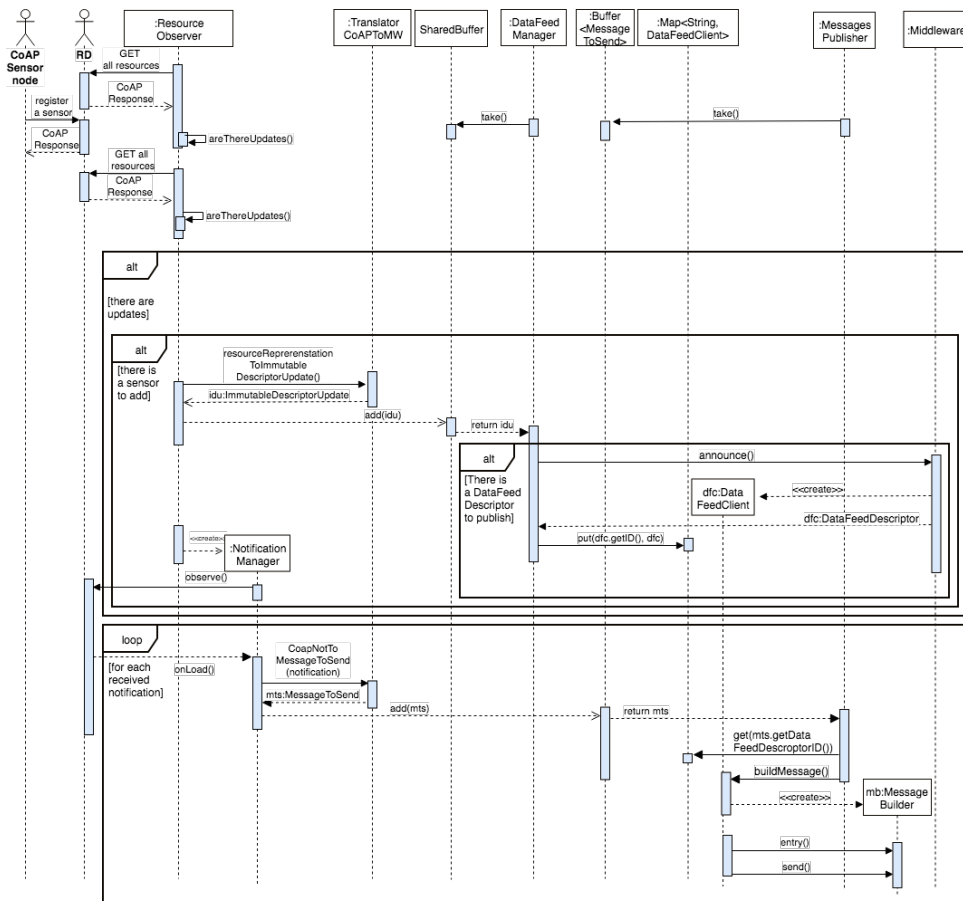


Figura E: diagramma di sequenza della registrazione di un sensore CoAP all'interno del Middleware

Al fine di validare la funzionalità del CoAP adapter e la corretta integrazione dei dispositivi IoT nella piattaforma middleware di tipo cloud-based, abbiamo realizzato una **dashboard**, cioè una applicazione web il cui scopo principale è la visualizzazione e manipolazione, attraverso un'interfaccia web, delle serie temporali e dei metadati dei dispositivi (sensori e attuatori) di una rete di sensori. Per quanto riguarda la dashboard, da un punto di vista architetturale, possono essere identificate la parte che si occupa della visualizzazione dei dati (frontend) e la parte che si occupa della gestione degli stessi (backend). La parte di backend espone delle REST API che possono essere utilizzate sia per il login dell'utente che per la gestione dei dati temporali.

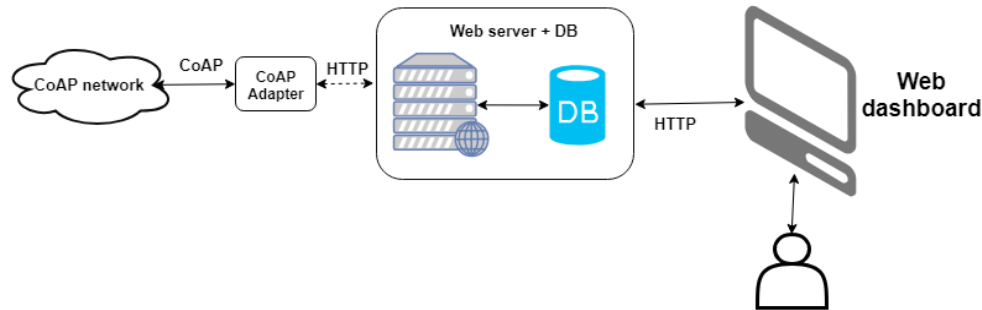


Figura G - Architettura generale della Web Dashboard

Le funzionalità di tale dashboard sono in corso di validazione in un dimostratore di un sistema di monitoraggio dei consumi energetici e del livello di benessere di un sistema edificio.

#### Confronto con i risultati attesi ed eventuali scostamenti rilevati

I risultati conseguiti appaiono in linea con le attività preventivate. Sono stati sviluppati prototipi software della maggior parte delle componenti definite, e sono stati utilizzati ambienti sperimentali su larga scala per la verifica delle funzionalità e delle prestazioni di tali prototipi. La piattaforma di raccolta e gestione di dati IoT è stata utilizzata per sviluppare una dashboard di controllo che permette di visualizzare lo stato dei servizi offerti da sensori ed attuatori IoT, e di implementare logiche di controllo. Le funzionalità di tale dashboard sono in corso di validazione in un dimostratore di un sistema di monitoraggio dei consumi energetici e del livello di benessere di un sistema edificio.

#### Deliverables

- Report D\_2.2 "Sviluppo di un dimostratore di piattaforma ICT basata su tecnologie IoT per la gestione dell'efficienza energetica e del confort termico di un edificio che integra fonti rinnovabili eterogenee" (CNR-IIT)

Unità di ricerca	DESCRIZIONE DELIVERABLE	RISULTATI QUANTITATIVI
CNR-IIT	Il Report D_2.2 "Sviluppo di un dimostratore di piattaforma ICT basata su tecnologie IoT per la gestione dell'efficienza energetica e del confort termico di un edificio che integra fonti rinnovabili	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rilascio di un prototipo hardware e software di un gateway IoT con moduli per il supporto di funzioni di resource discovery, proxying e caching.</li> <li>• Rilascio di un prototipo software di una dashboard di controllo che permette di</li> </ul>

Unità di ricerca	DESCRIZIONE DELIVERABLE	RISULTATI QUANTITATIVI
	eterogenee" include una descrizione del prototipo software della piattaforma ICT per l'interoperabilità e la raccolta di dati da sensori eterogenei. Inoltre il report descrive la validazione della piattaforma tramite la realizzazione di una dashboard di visualizzazione e controllo predisposta per applicazioni di monitoraggio energetico e di gestione del confort termico in edifici non residenziali.	visualizzare lo stato dei servizi offerti da sensori ed attuatori IoT, e di implementare logiche di controllo.

### Benefici per gli utenti finali

I benefici per gli utenti finali (principalmente utenze domestiche e prosumer) sono di poter usufruire di una piattaforma ICT che permette di gestire le funzioni di trasmissione e gestione dei dati in uno smart district in modo cooperativo, senza la presenza di un Aggregatore centrale. Questo permette di: i) ridurre i tempi di accesso ai dati rispetto ad architetture centralizzate tradizionali di tipo cloud-based; ii) ridurre la congestione della rete di comunicazione ed i conseguenti problemi di latenza nell'esecuzione dei processi di controllo; iii) fornire una maggiore flessibilità ed interoperabilità fra le applicazioni ed i servizi; e i) garantire una maggiore privacy per gli utenti in quanto i dati sono gestiti localmente o trasferiti in forma aggregata.

### Diffusione dei risultati (indicare anche le modalità di diffusione)

R. Bruno and S. Bolettieri, "Design and Implementation of a COAP-Based Broker for Heterogeneous M2M Applications," 2018 IEEE International Congress on Internet of Things (ICIOT), San Francisco, CA, 2018, pp. 1-8. doi: 10.1109/ICIOT.2018.00008.

Altre attività di diffusione dei risultati hanno riguardato la partecipazione al Convegno nazionale Ricerca di Sistema 2019 che si è tenuto a Roma il 10 Aprile 2019.

### Apparecchiature Disponibili e Acquisite

Per l'attività di ricerca sono state utilizzate apparecchiature già di proprietà del CNR-IIT di cui è riportato di seguito una descrizione delle principali:

- Raspberry model Pi 3 B+, un sistema embedded a basso costo e dal consumo energetico limitato, in grado di eseguire una distribuzione completa del sistema operativo Linux.
- sensori Zolertia RE-Mote, un piattaforma hardware IoT dal basso consumo e compatibile col sistema operativo Contiki.

## Attività 1.4 Piattaforme ICT per il supporto di servizi di brokeraggio energetico sicuri ed affidabili in una logica di Smart Districts [CNR-IIT].

### Obiettivi

L'obiettivo generale di questa attività consiste in un'analisi dei requisiti ed in una progettazione di massima di piattaforma ICT basata sulla tecnologia emergente delle Blockchain (o DLT) per supportare l'implementazione di servizi sicuri ed affidabili di brokeraggio energetico di tipo peer-to-peer tra piccoli produttori e consumatori di energia. Tale progettazione prevede anche uno studio sperimentale di fattibilità per l'utilizzo dei sistemi blockchain su dispositivi IoT, oltre che un'analisi preliminare sull'uso di "smart contract" per la gestione di transazioni energetico in ambienti peer-to-peer e sfruttando dispositivi IoT a risorse limitate.

### Risultati conseguiti

I risultati conseguiti sono principalmente tre.

Il **primo risultato** di questa attività è stato una analisi dettagliata ed esaustiva principali tipologie di sistemi blockchain allo stato dell'arte e delle relative piattaforme software. La blockchain è una tecnologia che consente la creazione e gestione di un grande registro distribuito per la sincronizzazione dei numerosi dati, relativi alle transazioni, condivisi tra più nodi appartenenti al medesimo network. La blockchain nasce come tecnologia abilitante del protocollo Bitcoin, il quale permette di automatizzare e decentralizzare in maniera sicura qualsiasi transazione digitale, scambio di valore o di dati, su ampia scala. Il modello proposto dalla blockchain si basa sulla combinazione tra firma digitale e marca temporale (timestamp): la prima garantisce che mittente e destinatario di un qualsiasi tipo di messaggio siano identificati in modo certo, la seconda permette che un insieme di messaggi, validato con la marca temporale da parte di un nodo scelto casualmente da un robusto modello matematico, venga comunicato e scritto nel registro di tutti gli altri nodi della rete e reso irreversibile. Il distributed ledger della blockchain è rappresentato da una catena di blocchi, ognuno dei quali contiene più transazioni, è aggiornato in tempo reale e mantenuto collettivamente da tutti i nodi del sistema, ciascuno dei quali è chiamato a verificare ed approvare ogni singolo blocco, prima che quest'ultimo possa essere aggiunto definitivamente alla catena pubblica condivisa tra tutti gli altri nodi partecipanti. Come mostrato in Figura H, le transazioni sono raccolte in blocchi, condivise e convalidate dai nodi secondo uno specifico algoritmo di consenso, il quale esegue automaticamente la prova di verifica di un blocco, senza necessità di intervento umano o di un'autorità centrale.

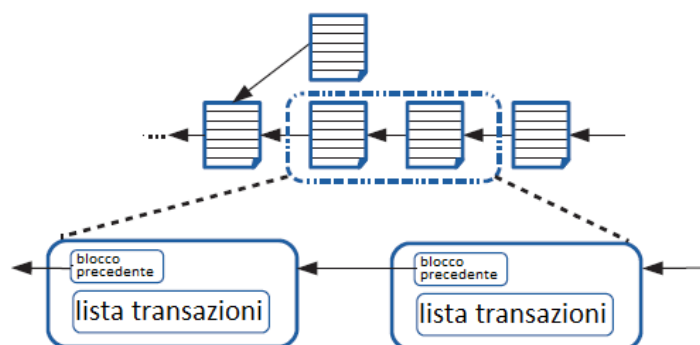


Figura H - Rappresentazione blockchain



---

In un ecosistema Blockchain, affinché ogni dato sia validato, e quindi scritto sul registro pubblico, occorre il consenso da parte dei nodi partecipanti alla rete, ovvero un metodo che sia in grado di mettere d'accordo la maggioranza di tali nodi. Un protocollo di consenso consiste in un processo nella quale una maggioranza dei nodi cosiddetti validatori di una rete Blockchain, o in alcuni casi tutti, giungono a concordare sullo stato di un registro, garantendo integrità ed affidabilità nelle operazioni eseguite. Tali protocolli, infine, rappresentano un insieme di regole e procedure che permettono di mantenere un insieme coerente di blocchi e transazioni, in modo distribuito tra più nodi partecipanti. Esistono vari e differenti algoritmi di consenso, tra i quali i più famosi e diffusi risultano essere: i) Proof-of-WorkG (PoWG); ii) Proof-of-StakeG (PoSG); e iii) Byzantine Fault Tolerance. Un altro importante punto da sottolineare risiede nella scelta del modello di blockchain che si intende adottare: permissioned e permissionless. Le blockchain di tipo permissioned richiedono un'autorizzazione per poter partecipare alla rete, e dunque, possono essere controllate ed avere un ente superiore che le governa. In questo modo, si permette di definire speciali regole per l'accesso e la visibilità dei dati, introducendo un concetto di governance e di definizione di regole di comportamento, oltre che migliori performance rispetto alle blockchain di tipo permissionless. Quando un nuovo dato o record viene aggiunto, il sistema di approvazione non è vincolato alla maggioranza dei partecipanti alla Blockchain, bensì a un numero limitato e definito di nodi validatori detti trusted, a seconda dell'algoritmo di consenso in uso. Le Blockchain di tipo permissionless (o unpermissioned), di cui l'esempio più famoso e diffuso è rappresentato dalla Bitcoin Blockchain, sono completamente aperte, pubbliche, prive di una proprietà o un attore di riferimento, e sono concepite per non essere controllate da nessun ente superiore. Una permissionless Blockchain presenta i seguenti punti critici rispetto alla soluzione permissioned vista in precedenza. La scalabilità comporta un naturale processo di centralizzazione del potere computazionale, dovuto al numero decrescente di miners in grado di eseguire la verifica matematica richiesta dal protocollo, il quale ha costi sempre più crescenti. Per quanto possa fondarsi su una rete peer-to-peer apparentemente robusta, una Blockchain pubblica è intrinsecamente volatile e può subire una biforcazione (fork) o essere semplicemente abbandonata dalla community in qualsiasi momento, perché ritenuta non più interessante o remunerativa.

In ambito IoT, la tecnologia Blockchain può essere sfruttata per gestire l'autenticazione e garantire l'integrità della messaggistica e il conseguente scambio di dati che avviene tra smart devices, creando record immutabili associati. Ciò consente a tali dispositivi di comunicare in modo diretto ed in totale autonomia, oltre che a verificare la validità delle transazioni, senza la necessità di un'autorità garante centralizzata. I dispositivi vengono registrati nella Blockchain una volta entrati all'interno di una rete IoT, dopo di che, possono elaborare in autonomia le transazioni. Le problematiche nelle quali è possibile incorrere con simili soluzioni applicate in questo ambito sono essenzialmente due. La potenza di elaborazione necessaria per eseguire la cifratura di tutti gli oggetti coinvolti in un ecosistema IoT basato su Blockchain può essere eccessiva, e poiché ogni dispositivo dispone di differenti capacità di elaborazione e quindi, non tutti sono in grado di eseguire i medesimi algoritmi di cifratura alla velocità desiderata. Inoltre, lo storage necessario per mantenere il registro distribuito aumenta di dimensioni nel tempo, man mano che aumenta il numero di transazioni e nuovi nodi si aggiungono alla rete IoT (ad esempio, i sensori hanno quasi sempre una capacità di archiviazione molto bassa). Essendo i dispositivi IoT limitati da un punto di vista computazionale e della memoria, tipicamente non si richiede a tutti i dispositivi IoT di effettuare sempre tutte le operazioni che un normale nodo all'interno della blockchain effettua. Per tale motivo, un dispositivo IoT può essere classificato come nodo light o full. Il

primo esegue solamente parte delle funzionalità della blockchain (quali l'emissione di una transazione), mentre il nodo full riesce ad eseguirle tutte.

Come discusso nel seguito, nell'ambito delle smart grid, i processi di automazione attivabili con le DLTs potrebbero rivelarsi strategici in vista dell'accesso alle reti di distribuzione da parte di piccoli e piccolissimi produttori di energia. La Blockchain potrebbe essere sfruttata nell'ambito Smart Energy per coordinare le vendite tra produttori residenziali di energie rinnovabili e rendere possibile effettuare scambi di energia direttamente tra privati, senza l'intermediazione di operatori centralizzati.

il confronto fra le principali applicazioni di blockchain è riportato nella seguente tabella.

Applicazione		Esecuzione smart contract	Linguaggio smart contract	Modello dei dati	Algoritmo di consenso
Hyperledger 1.0	Applicazioni generiche	Docker	GoLang, Java	Chiave-valore	Kafka
Bitcoin	Criptovaluta	nativo	GoLang, C++	Basato sulle transazioni	PoW (memoria)
Litecoin	Criptovaluta	nativo	GoLang, C++	Basato sulle transazioni	PoW (memoria)
Ethereum	Applicazioni generiche	EVM	Solidity, Serpent, LLL	Basato sull'account	PoW
Quorum	Applicazioni generiche	EVM	GoLang	Basato sull'account	Raft
BigchainDB	Digital assets	nativo	Python, cryptocondizioni	Basato sulle transazioni	Validatori fidati (maggioranza)
Monax	Applicazioni generiche	EVM	Solidity	Basato sull'account	Tendermint
Ripple	Digital assets	-	-	Basato sull'account	Ripple
Parity	Applicazioni generiche	EVM	Solidity, Serpent, LLL	Basato sull'account	Validatori fidati (round robin)
Corda	Digital assets	JVM	Kotlin, Java	Basato sulle transazioni	Raft
SawTooth Lake	Applicazioni generiche	nativo	Python	Chiave-valore	Prova del tempo trascorso

Ogni applicazione basata sulla blockchain, oltre ad avere un insieme di possibili scopi realizzativi (dalle applicazioni generiche ai digital assets e così via), possiede un ambiente di esecuzione: Docker, ad esempio, è un container multipiattaforma portabile con il quale è possibile effettuare il deploy dello stesso in poco tempo. Altri ambienti virtuali come quelli di JVM (Java Virtual Machine) e EVM (Ethereum Virtual Machine) devo prima essere installati e configurati per permettere l'esecuzione delle relative applicazioni blockchain. Quest'ultimo, interpreta il bytecode degli smart contract compilati e interagisce direttamente con la blockchain. Eccezione è fatta per gli ambienti nativi i quali non necessitano né l'installazione né la configurazione di nessun tipo particolare di ambiente di esecuzione.

Uno delle caratteristiche più importanti delle blockchain moderne è il supporto per gli "Smart contract", che non è altro che un codice che rappresenta l'accordo tra due o più parti, il quale è in grado di essere eseguito automaticamente al verificarsi di certe condizioni specificate al suo interno. Il codice di uno smart contract viene eseguito solo quando messo in atto da una transazione o un messaggio che viene inviato allo smart contract stesso, ad esempio da un altro smart contract. Gli smart contract vengono scritti in genere in un linguaggio ad alto livello (come GoLang e Solidity) ed/od orientato ad oggetti (come Serpent o Java o C++) o anche di scripting (come Python) attraverso il quale è possibile, nel caso del modello chiave-valore, creare ed aggiornare le tuple chiave-valore all'interno della blockchain. Invece, nel modello dei dati basato sugli account usato, ad esempio, in Ethereum, la transazione viene effettuata in base alla disponibilità della criptovaluta posseduta da ogni singolo account. Ben diverso è il modello basato sulle transazioni: ogni account ha il cosiddetto UTXO (Unspended Transaction Output) ovvero le transazioni non ancora spese. Quando si vogliono trasferire dei Bitcoin da un account all'altro, vengono generati altri due UTXO che verranno immessi nella blockchain: uno relativo alla somma ancora spendibile da parte del mittente, e uno relativo alla somma spendibile da parte del destinatario. In questo modo si ha lo storico di tutte le transazioni spese all'interno della blockchain.

Il **secondo risultato** di questa attività è uno studio di fattibilità per l'utilizzo dei sistemi blockchain su dispositivi IoT. Per tale studio ci siamo affidati sia a risultati che sono disponibili in letteratura che a test sperimentali svolti in laboratorio. In particolare i test tipicamente consistono nel misurare il consumo energetico e l'utilizzo delle risorse per una durata di 30 minuti quando il nodo della rete blockchain è installato su un dispositivo IoT dotato di un microprocessore. Ad esempio la tabella seguente riporta test effettuati con un dispositivo per Raspberry Pi 3 modello B con una card SD da 128 GB per contenere tutta la blockchain di test.

Applicazione	Tipo di nodo* <sup>1</sup>	Energia media consumata (mA)	Utilizzo medio CPU (%)* <sup>2</sup>	Utilizzo medio memoria (%)	Totali MB	
					Inviati	Ricevuti
Bitcoin	Light	283.45	2.19	9.6	0.074	0.068
Litecoin		275.53	2.05	7.6	0.081	0.104

<sup>1</sup>(s) durante la sincronizzazione; (ds) dopo la sincronizzazione

<sup>2</sup>il raspberry è dotato di 4 core, per cui l'utilizzo massimo è del 400%, ovvero la somma degli utilizzi massimi di ogni core.

Ethereum	Full (s)	599.72	256.82	85.96	78.9	490
	Full (ds)	371.26	47.39	29.36	15.3	80.3
Bitcoin	Full (s)	429.05	55.47	27.55	48	912
Litecoin	Full(s)	437.62	117.8	19.36	17.1	546
Litecoin	Full(ds)	280.04	7.01	51.7	1.22	2.06

I risultati forniscono un'idea generale su come ogni applicazione utilizzi le risorse del dispositivo, visto che non c'è nessun controllo sulla frequenza delle transazioni e quindi dei blocchi aggiunti nelle blockchain pubbliche. I nodi light (nel caso del Bitcoin e del Litecoin) hanno degli utilizzi delle risorse che sono comparabili. Per quanto riguarda i nodi full, invece, è degno di nota il confronto fra Ethereum e Bitcoin: essi utilizzano due algoritmi di consenso differenti, PoS e PoW e quindi hanno due differenti richieste di risorse. Inoltre, è evidente che il processo di sincronizzazione richieda più risorse rispetto a quando il nodo è già sincronizzato perché deve scaricare l'intera blockchain. A causa della grandezza della blockchain del Bitcoin (circa 156 GB) non è stato possibile testare il bitcoin dopo la sincronizzazione.

In laboratorio abbiamo replicato alcuni di questi test con condizioni più restrittive. In particolare, l'hardware utilizzato è un Raspberry PI 3 B+ con 1 GB di memoria RAM ed una SD card da 16 GB. Inoltre come blockchain è stata utilizzata **Ropsten**, una blockchain pubblica di test la cui dimensione attuale (02/2019) è di circa 5 milioni di blocchi (circa 11 GB). In questo caso sono stati ottenuti i seguenti risultati per Ethereum:

Tipo di Nodo*1	Temperatura media CPU (°C)	Utilizzo medio CPU (%)*2	Utilizzo medio memoria (%)	Totali MB	
				Inviati	Ricevuti
Full (s)	65	223	81.30	28	189
Fast(s)	58	171.4	95.63	30	178.61
Light(s)	71.29	306.21	48.21	8.7	250

In questo caso possono distinguersi tre tipi di nodi:

- Full: scarica l'header dei blocchi e il contenuto di tutti i blocchi e valida ogni elemento a partire dal blocco genesis, ovvero il blocco iniziale.
- Fast: scarica l'header dei blocchi e il contenuto di tutti i blocchi e non processa nessuna transazione fino al blocco corrente. Successivamente, passa alla modalità full node.
- Light: ottiene solamente l'header dei blocchi e li verifica. Per verificare il contenuto dei blocchi, ha bisogno di chiedere ai nodi full il corrispondente albero delle transazioni. Questa modalità nell'implementazione attuale è ancora in fase di sviluppo per cui i risultati potrebbero essere fuorvianti.

Si può notare che l'utilizzo di risorse per un nodo full in Ethereum utilizzando due modelli differenti di raspberry è comparabile. Le differenze sono dovute alle leggere differenti caratteristiche hardware dei

due dispositivi e alla configurazione della rete: in questo caso non è stato possibile utilizzare la connessione cablata, poiché il protocollo blockchain è bloccato da un firewall. Per tale motivo si è optato su una connessione wireless. Dati i risultati in tabella è possibile notare che vi è un dispendio minore di utilizzo della CPU (e conseguentemente una temperatura media minore) nel caso di fast rispetto al nodo full, perché non vi è nessuna elaborazione delle transazioni. Rimane comunque considerevole l'utilizzo di memoria visto che, come nel caso fast, è necessario scaricare sia l'header dei blocchi che il contenuto di questi. Nel caso del nodo light, invece, l'utilizzo delle risorse rispetto a un nodo full è minore solo nel caso dell'utilizzo medio di memoria. Negli altri casi si ha addirittura un utilizzo maggiore di risorse: questo risultato paradossale potrebbe essere giustificato dal fatto che stia verificando l'header dei blocchi che sta scaricando e anche dal fatto che tale modalità è in fase di sperimentazione, per cui non ancora del tutto ottimale.

Il **terzo risultato** di questa attività consiste in uno studio di fattibilità per l'utilizzo di "Smart Contract" per la gestione di transazioni in ambito IoT, e la relativa progettazione di massima di un servizio di brokeraggio energetico peer-to-peer. Per il nostro studio abbiamo preso in considerazione la piattaforma Ethereum, la cui architettura viene mostrata in Figura K, è una piattaforma ad-hoc utilizzata per gli smart contract. Una volta scritto in un linguaggio ad alto livello chiamato *Solidity*, questo viene localmente compilato e successivamente validato e inserito all'interno della blockchain. Ogni volta che viene effettuata un'operazione sul contratto (a partire dalla sua creazione), viene generata una transazione da validare da parte della blockchain. Il costo della transazione dipenderà dal tipo di operazione che si vuol effettuare.

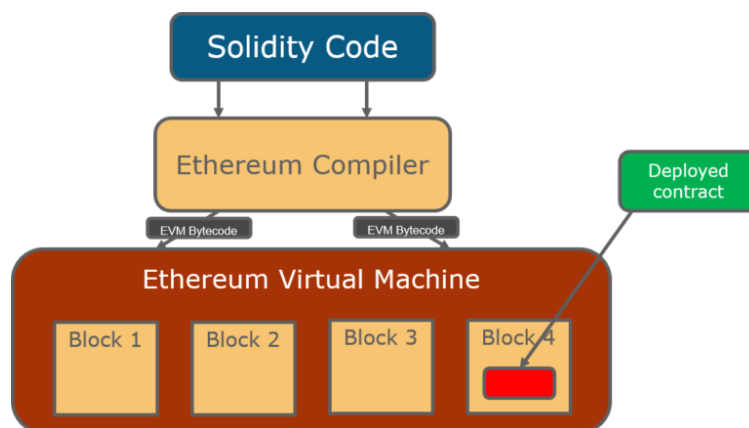


Figura K: Architettura Ethereum

Un servizio di brokeraggio energetico di tipo peer-to-peer può essere modellato nel caso più semplice come una asta aperta. Il banditore in questo caso decide il prezzo minimo e massimo a cui vendere l'energia accumulata e la durata dell'asta stessa. In questo intervallo di tempo, l'offerente con l'offerta maggiore, vince l'asta. Essendo un'asta aperta, ogni offerente può essere a conoscenza di chi è l'offerente con la proposta maggiore. È possibile, quindi, identificare le informazioni relative all'asta stessa, quelle relative al suo stato e le operazioni su questa:

- Informazioni sull'asta: beneficiario (a chi verrà inviata la criptovaluta alla fine dell'asta), durata (espressa in secondi), descrizione (Contiene la quantità di energia che si vuol vendere), puntata minima e puntata massima.
- Stato dell'asta: offerente maggiore, offerta maggiore, aperta/chiusa
- Operazioni sull'asta: effettua offerta, mostra stato asta, mostra informazioni asta, termina asta.

Una volta che i nodi della blockchain sono a conoscenza dello smart contract, gli offerenti possono interagire con questo e, attraverso il supporto dei nodi che validano le transazioni, questi potranno effettuare le offerte finché il periodo di asta è valido. Maggiori dettagli su una possibile implementazione dello smart contract precedentemente descritto sono riportati nel deliverable D\_2.3.

Nello smart contract saranno presenti i vincoli caratterizzanti un'asta aperta (da un punto di vista implementativo questi possiedono la keyword **require**). Alcuni di questi sono: il beneficiario dell'asta non può fare un'offerta, se viene effettuata un'offerta minore o uguale a quella maggiore, questa non viene presa in considerazione, le offerte proposte dopo la scadenza non vengono considerate e così via.

Una volta scaduto il periodo dell'asta, il beneficiario può chiudere l'asta e ricevere l'eventuale offerta maggiore proposta. Gli altri nodi che avranno effettuato l'offerta ma non vinto l'asta potranno farsi rimborsare della quantità precedentemente offerta (funzione *withdraw*). Nei test sperimentali da noi svolti, a titolo di esempio è stata scelta come durata dell'asta un periodo di 300 secondi (5 minuti), una base minima di  $10^{16}$  wei (che corrispondono a circa a 95 centesimi di Euro), un'offerta massima di  $2 \cdot 10^{16}$  wei (circa 1,90 €) e una quantità di energia pari a 30 KWh da vendere.<sup>3</sup>

Inoltre, sono stati utilizzati per scopo di test quattro nodi in una blockchain privata:

- il beneficiario, il quale una volta aver effettuato il deploy dello smart contract, chiude l'asta e riceve l'eventuale maggiore offerta.
- un miner per la validazione delle transazioni, per permettere una visione immediata agli altri nodi sullo stato dell'asta.
- due offerenti, che effettueranno delle proposte.

Di seguito è descritta l'esecuzione di quanto descritto.

1. Lo smart contract è immesso all'interno della blockchain e quando mancano 287 secondi allo scadere, non ha ancora nessun miglior offerente.

```
> auctiononenergy.getInfo()
["0x0000000000000000000000000000000000000000", 287, "30 KWh energy"]
> auctiononenergy.getStatus()
["0x0000000000000000000000000000000000000000", 0, false]
```

2. Viene effettuata un'offerta di  $10^{18}$  wei da parte del nodo il cui indirizzo termina per 5036 e i nodi che conoscono il contratto sono a conoscenza anche lo stato dell'asta di seguito riportato.

```
> auctiononenergy.getInfo()
["0x4f9ede04602781c9d079e21157f406e8685856c8", 232, "30 KWh energy"]
> auctiononenergy.getStatus()
["0xaa68ece323732baaa2996f90ef4bf0c8e4085036", 1000000000000000, false]
>
```

<sup>3</sup> Il wei è un sottomultiplo dell'Eth ( $10^{18}$  wei = 1 eth) ed è utilizzato come unità di misura per il trasferimento della criptovaluta all'interno degli smart contract. Il valore corrente (08/02/2019) dell'Eth è di circa 95 €. La base di asta minima e la puntata massima sono state scelte tenuto conto che il prezzo dell'energia è di circa 0.06 €/KWh.

3. L'offerta più alta viene rilanciata con un'offerta di  $2 \cdot 10^{18}$  wei da parte del nodo il cui indirizzo termina per 7775.

```
> auctiononenergy.getInfo()
["0x4f9ede04602781c9d079e21157f406e8685856c8", 161, "30 KWh energy"]
> auctiononenergy.getStatus()
["0xb09772ee34b045686e0a74637e1a92ea9c924775", 20000000000000000, false]
```

4. Quando l'asta è terminata, i non vincitori potranno farsi rimborsare della somma offerta. Di seguito viene riportato lo stato dell'asta quando questa è terminata.

```
> auctiononenergy.getStatus()
["0xb09772ee34b045686e0a74637e1a92ea9c924775", 20000000000000000, true]
> auctiononenergy.getInfo()
["0x4f9ede04602781c9d079e21157f406e8685856c8", 0, "30 KWh energy"]
```

È importante sottolineare che la validazione e l'immissione del contratto all'interno della blockchain ha un costo che dipende dallo spazio e l'utilizzo delle risorse del contratto stesso. In questo caso il costo è di circa  $4.7 \cdot 10^{15}$  wei (circa 48 centesimi di Euro). Tali costi sono solamente indicativi, perché ogni blockchain ha il suo cosiddetto **gas price**, ovvero un parametro necessario per calcolare il costo per la validazione delle transazioni e dei contratti. Inoltre, altro fattore che influisce sul costo del contratto è il valore stesso della criptovaluta eth (e dei suoi sottomultipli) che subisce oscillazioni del suo valore.

Ogni volta che viene effettuata un'offerta o viene terminata l'asta e quindi una transazione all'interno della blockchain, si ha un costo:  $9 \cdot 10^{12}$  wei, quasi un centesimo di euro.

#### Confronto con i risultati attesi ed eventuali scostamenti rilevati

I risultati conseguiti appaiono in linea con le attività preventivate. È stata sviluppata un'analisi delle principali tipologie di sistemi blockchain allo stato dell'arte e delle relative piattaforme software. È stata completata lo studio di fattibilità sull'utilizzo dei sistemi blockchain su dispositivi IoT, e degli smart contract per la gestione di transazioni energetici.

#### Deliverables

Unità di ricerca	DESCRIZIONE DELIVERABLE	RISULTATI QUANTITATIVI
CNR-IIT	Il report Report "Sviluppo di un dimostratore di una piattaforma di brokeraggio energetico cooperativo basato sulla tecnologia Blockchain" include un'analisi dello stato dell'arte delle piattaforme blockchain esistenti oltre ad uno studio di fattibilità dell'utilizzo degli smart contact per lo sviluppo delle API di accesso e	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analisi dello stato dell'arte delle tecnologie blockchain (o DLT).</li> <li>Progettazione di massima di smart contract per la gestione di un servizio di brokeraggio energetico.</li> </ul>

Unità di ricerca	DESCRIZIONE DELIVERABLE	RISULTATI QUANTITATIVI
	gestione di una piattaforma di trading energetico peer-to-peer.	

### Benefici per gli utenti finali

La piattaforma ICT sviluppata può permettere di implementare servizi di brokeraggio energetico di tipo peer-to-peer senza la presenza di un *Aggregatore* centrale o di un'autorità centrale di audit. Quindi gli utenti finali ed i prosumer potranno accedere a servizi di scambio di energia in modo affidabile e più economico di quelli gestiti dai distributori tradizionali. Inoltre, fornitori di servizi di tipo micro-grid e VPP potranno usufruire di infrastrutture e tecnologie abilitanti a basso costo.

### Diffusione dei risultati (indicare anche le modalità di diffusione)

Le principali attività di diffusione dei risultati hanno riguardato la partecipazione al Convegno nazionale Ricerca di Sistema 2019 che si è tenuto a Roma il 10 Aprile 2019.

### Apparecchiature disponibili e acquisite

Per l'attività di ricerca sono state utilizzate apparecchiature già di proprietà del CNR-IIT di cui è riportato di seguito una descrizione delle principali:

- Raspberry model Pi 3 B+, un sistema embedded a basso costo e dal consumo energetico limitato, in grado di eseguire una distribuzione completa del sistema operativo Linux.
- sensori Zolertia RE-Mote, una piattaforma hardware IoT dal basso consumo e compatibile col sistema operativo Contiki.



---

Linea progettuale 2: Sviluppo di un dimostratore di smart micro-grid, basato su un'architettura in corrente continua che integra fonti rinnovabili - sistemi di accumulo stazionari e carichi energivori, con ottimizzazione della power quality mediante controllo di convertitori active front end

---

#### Elenco dei Partecipanti alle attività

Unità di Ricerca	Attività
Università di Bologna - Dipartimento d'Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione (UNIBO-DEI)	2.3
Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto Motori (CNR-IM)	2.4

#### Stato dell'arte

La crescente diffusione di impianti di produzione dell'energia elettrica da fonti rinnovabili ha spinto la ricerca scientifica verso lo studio di architetture di potenza innovative finalizzate ad incrementare i livelli di efficienza, affidabilità e flessibilità dell'attuale sistema di trasmissione e distribuzione dell'energia. In particolare, l'integrazione e la gestione di tecnologie di accumulo dell'energia elettrica con tali sistemi rappresenta un argomento di particolare interesse, ponendosi come valida soluzione alle problematiche di natura tecnica ed economica, derivanti dalla presenza di sistemi di generazione da fonti di tipo non-programmabile. A riguardo le architetture di potenza basate su bus in corrente continua ed integrate con periferiche ICT costituiscono un efficace strumento per la gestione di flussi energetici bidirezionali, che caratterizzano le diverse condizioni operative di funzionamento di uno smart district. Tale gestione è inoltre mirata a ridurre le richieste di potenza di picco per la rete elettrica, con conseguenze positive sul dimensionamento dei componenti del sistema di distribuzione e sugli investimenti infrastrutturali nel medio lungo-termine, e ad evitare regolazioni inefficienti per i sistemi tradizionali di produzione dell'energia.

Negli ultimi anni, si è inoltre assistito ad una rapida diffusione dei convertitori statici DC/AC, o inverter, che trovano impiego in numerose applicazioni, dalla produzione e dal condizionamento dell'energia elettrica in ambito industriale e civile, agli azionamenti elettrici a velocità variabile. Ciò mette in evidenza l'importanza strategica che questi dispositivi assumono all'interno dei sistemi elettrici moderni. A tal riguardo, sono stati fatti notevoli progressi nello sviluppo di nuovi componenti elettronici più performanti. In particolare, i materiali semiconduttori carburo di silicio (SiC) e gallio-nitruro (GaN) consentono la realizzazione di convertitori di potenza ad alte tensioni, ma soprattutto a temperature e velocità di commutazione maggiori rispetto alla tecnologia convenzionale in Si. Permangono alcuni ostacoli da superare, come la difficoltà di far crescere spessi strati di GaN sul silicio per ottenere tensioni nominali elevate, realizzare i transistor ad arricchimento e migliorare l'affidabilità.

In tale contesto, è chiaro che la complessità delle suddette tipologie di architetture richiede tecniche di controllo adeguate, oggetto di questa linea progettuale, che vadano ad operare su diversi livelli gerarchici, dalla gestione dei singoli componenti, fino a gestioni centralizzate basate su logiche aggregative di tipo *multi-agent*. In particolare, l'ottimizzazione di tecniche di controllo dei flussi energetici costituisce uno dei fondamentali aspetti di indagine per garantire il corretto ed efficiente funzionamento di uno smart district. Tali aspetti vanno evidentemente a scontrarsi con la difficoltà di verificare gli effetti di tali logiche su reali installazioni implementative. Pertanto risultano evidenti i vantaggi derivanti da una analisi condotta su un dimostratore di laboratorio seppure in scala ridotta, che lavora su valori di tensione pari o confrontabili con quelle reali.

### Bibliografia

- [1] Olivares, Daniel E., et al. "Trends in microgrid control." IEEE Transactions on smart grid 5.4 (2014): 1905-1919.
- [2] Lie Xu, Dong Chen "Control and operation of a DC microgrid with variable generation and energy storage" IEEE Trans. Power Delivery, 26 (4) (2011), pp. 2513-2522.
- [3] J. Rabkowski, D. Peftitsis, and H. P. Nee, "Silicon carbide power transistors: a new era in power electronics is initiated," IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 6, no. 2, pp. 17-26, Jun. 2012.
- [4] A. L. Dimeas and N. D. Hatziargyriou, "Operation of a multiagent system for microgrid control," IEEE Trans. Power Syst., vol. 20, no. 3, pp. 1447-1455, Aug. 2005.

### Obiettivi della linea

Questa linea progettuale rappresenta il proseguimento di attività iniziate nel POA 2015.

L'obiettivo di questa linea progettuale consiste nell'analisi ed implementazione di strategie di gestione e controllo dei flussi energetici, per il dimostratore di micro-grid realizzato nell'ambito del POA 2015, volte all'ottimizzazione della power quality, dell'efficienza e dei costi dell'energia in contesti di tipo smart district, favorendone l'integrazione con fonti rinnovabili e sistemi di accumulo stazionari. Parallelamente sono confrontate diverse topologie hardware per la realizzazione di convertitori di interfaccia della micro-grid con la rete elettrica, tenendo in conto sia soluzioni tradizionali sia soluzioni hard-switching, soft-switching e WBG.

La linea progettuale 2 è stata suddivisa nelle seguenti attività:

#### **2.3: Strutture di conversione statica per applicazioni smart-grid e grid-connected ad elevata efficienza (UNIBO-DEI)**

Unità di ricerca coinvolte:

- Università di Bologna - Dipartimento d'Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione (UNIBO-DEI)

#### **2.4 Ottimizzazione delle logiche di gestione energetica su dimostratore di smart-grid (CNR-IM)**

Unità di ricerca coinvolte:

- Consiglio Nazionale Delle Ricerche – Istituto Motori (CNR IM)

### **Attività 2.3 Strutture di conversione statica per applicazioni smart-grid e grid-connected ad elevata efficienza (UNIBO-DEI)**

---

#### **Obiettivi**

I principali obiettivi delle attività 2.3 sono riportati di seguito:

a) Confronto tra diverse topologie hardware per la realizzazione di convertitori di interfaccia con la rete elettrica

b) Confronto tra le soluzioni tradizionali hard-switching, soft-switching e WBG.

L'obiettivo iniziale è quello di confrontare entrambe le famiglie, realizzando modelli al calcolatore che rappresentino i principali fenomeni dei convertitori e permettano di individuare le sollecitazioni dei componenti e i vincoli di progetto.

Il secondo obiettivo è quello di realizzare un prototipo di convertitore a poli risonanti (che è la soluzione più promettente) di piccola taglia (1 kW, monofase) per confrontarne le prestazioni con quelle di un convertitore di pari taglia basato su componenti WBG.

Ciò consente sia di acquisire le competenze e le metodologie che sono necessarie per la realizzazione di convertitori con componenti WBG, sia di valutare i vantaggi delle diverse tecnologie. Inoltre, la realizzazione dei prototipi dei convertitori permette anche un confronto dei costi di realizzazione.

#### **Risultati conseguiti**

L'attività del gruppo di UNIBO-DEI è volta alla simulazione, modellazione, controllo di convertitori AC/DC di interfaccia per micro-reti a tensione continua, nonché alla valutazione delle loro prestazioni.

Una descrizione dettagliata dei risultati di tali attività è riportata di seguito.

a) Confronto tra topologie di convertitori per applicazioni smart-grid.

Inizialmente, è stato analizzato il contesto normativo. La norma di riferimento sull'immissione in rete pubblica (a bassa tensione) di armoniche di corrente è la IEC 61000-3-2 per apparecchi con corrente di fase  $\leq 16$  A e la IEC 61000-3-4 per apparecchi con correnti di fase superiori a 16 A. Queste norme prescrivono le procedure di misura e la classificazione degli apparecchi sotto test (EUT). Per ogni classe vengono stabiliti dei limiti in valore assoluto per le armoniche, differenti a seconda dell'ordine armonico. Ad esempio, per un apparecchio di classe A, i limiti normativi sono mostrati nella Tab. I.

Harmonic order n	Class A max permissible harmonic current A
Odd harmonics	
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
15 ≤ n ≤ 39	2.25/n
Even harmonics	
2	1.08
4	0.43
6	0.30
8 ≤ n ≤ 40	1.84/n

Tab. I – Limiti normativi IEC 61000-3 per le armoniche di corrente di apparecchi di classe A.

I modelli del raddrizzatore attivo di tipo PWM, mostrato in Fig. 7, del convertitore con filtro armonico e del convertitore Vienna sono stato realizzati in ambiente PLECS Standalone. A titolo d'esempio, la Fig. 8 mostra il modello PLECS del raddrizzatore attivo di Fig. 7. PLECS Standalone è un pacchetto software autonomo per la simulazione nel dominio del tempo dei sistemi elettronici di potenza. PLECS Standalone fornisce la soluzione all-in-one per la modellazione di circuiti elettrici complessi e controlli sofisticati in un singolo ambiente. PLECS Standalone è dotato di un proprio motore per risolvere le equazioni del circuito. L'utente può scegliere tra risolutori a passo variabile e passo fisso. Generalmente, i solutori a tempo variabile sono preferiti per simulazioni accurate ed efficienti, poiché adattano le dimensioni del passo durante la simulazione in base alla dinamica del modello.

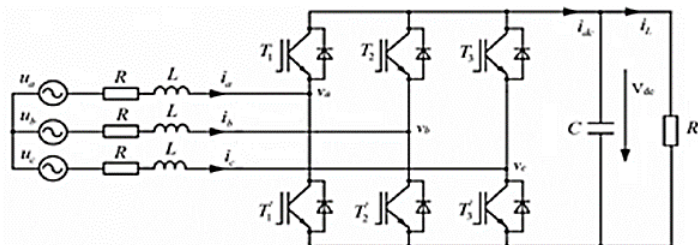


Fig. 7 – Raddrizzatore attivo di tipo PWM

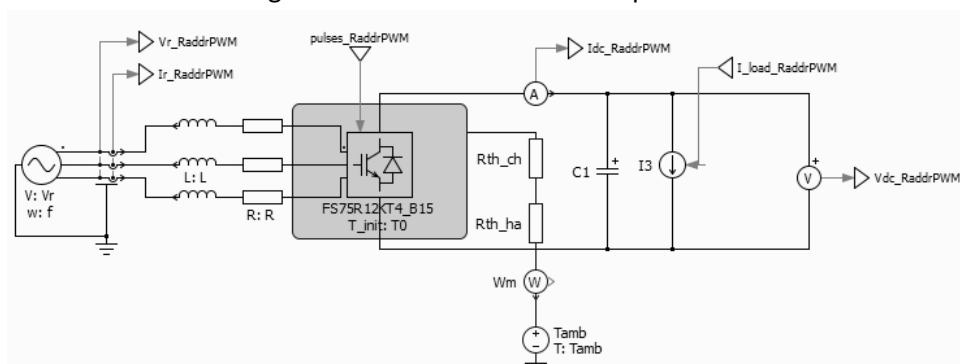


Fig. 8 – Modello del raddrizzatore attivo in ambiente PLECS.

Per un'analisi generale, sono state considerate numerose tecniche di controllo, riportate nella Tab. II. Tra di esse, sono state scartate le tecniche a frequenza di commutazione variabile, che pongono problemi di dimensionamento dell'elettronica di potenza e possono comportare subarmoniche di corrente tali da interferire con i dispositivi di protezione. La tecnica nota come Voltage Oriented Control

(VOC), nonostante la sua semplicità, è parsa la più idonea ad essere implementata per le varie tipologie di convertitori presi in considerazione.

Tab. II – Tecniche di controllo per convertitori d’interfaccia

TECHNIQUE	ADVANTAGES	DISADVANTAGES
VOC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fixed switching frequency (smaller input filter [11])</li> <li>Advanced PWM strategies can be used</li> <li>Cheaper A/D converters</li> <li>No sensitivity to line inductance variation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coordinate transformation and decoupling between active and reactive components is required</li> <li>Complex algorithm</li> <li>Input power factor lower than that for V-DPC</li> </ul>
V-DPC	<ul style="list-style-type: none"> <li>No separate PWM voltage modulation block</li> <li>No current regulation loops</li> <li>No coordinate transformation</li> <li>Good dynamic performance</li> <li>Decoupled active and reactive power control</li> <li>Instantaneous variables with all harmonic components are estimated (improvement of the power factor and efficiency)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High values of the inductance and sampling frequency are needed (important for the estimator, because smooth shape of the current waveform is needed)</li> <li>Power and voltage estimation should be avoided at the moment of switching (it yields high errors)</li> <li>Variable switching frequency (input filter should cut frequencies lower than the average switching frequency, so that bigger filters are needed than those with VOC and VFOC)</li> <li>Fast microprocessor and A/D converters required</li> </ul>
VFOC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fixed switching frequency</li> <li>Advanced PWM strategies can be used.</li> <li>Cheaper A/D converters</li> <li>No sensitivity to line inductance variation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coordinate transformation and decoupling between active and reactive components is required</li> <li>Complex algorithm</li> <li>Input power factor lower than that for VF-DPC</li> </ul>
VF-DPC	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simple and noise-resistant power estimation algorithm, easy to implement in a DSP</li> <li>Lower sampling frequency than that for V-DPC</li> <li>Low THD of line currents at a distorted and unbalanced supply voltage</li> <li>No separate PWM voltage modulation block</li> <li>No current regulation loops</li> <li>No coordinate transformation</li> <li>Good dynamic performance</li> <li>Decoupled active and reactive power control</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variable switching frequency</li> <li>Fast microprocessor and A/D converters required</li> </ul>

Le condizioni base di prova sono state le seguenti:

$V_{concat}$	=	400 Vrms;	Tensione concatenata
$f$	=	50 Hz	Frequenza di rete
$L$	=	2 mH;	Induttanza lato AC
$R$	=	0.01 W	Resistenza linea
$C_{dc}$	=	1mF	Condensatori bus DC
$f_{sw}$	=	15 kHz	Frequenza di switching
$V_{dc}$	=	700 V	Tensione riferimento del bus DC
$T_{amb}$	=	40;	Temperatura ambiente

Sono state eseguite numerose simulazioni, volte a determinare l’efficienza, la distorsione della corrente, la sollecitazione termica dei componenti. Il fattore di potenza è stato mantenuto unitario dal sistema di controllo durante le diverse prove. A titolo d’esempio, le Fig. 9(a) e 9(b) mostrano la forma d’onda delle principali grandezze di rete per diversi valori della corrente assorbita dal carico.

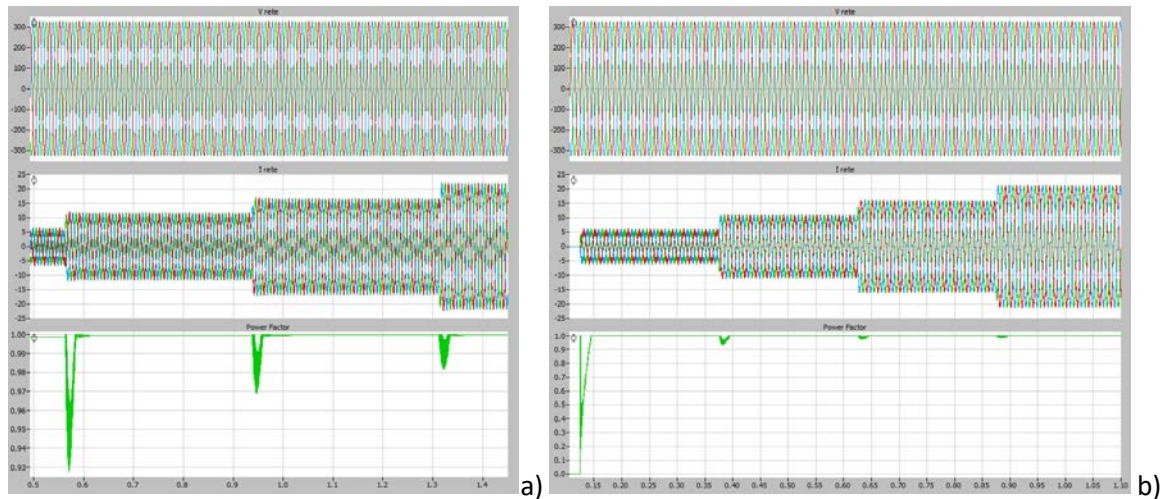


Fig. 9 – Andamento delle grandezze di rete al variare della corrente assorbita dal carico.

La distorsione della corrente di rete è stata diagrammata in funzione della frazione di potenza convertita. Il THD del 15% è stato assunto come la soglia minima per considerare accettabile la qualità della corrente assorbita dalla rete. Si è osservato che tale condizione si realizza per tutti i convertitori a una percentuale di carico variabile tra il 20 %, ottenuto con il convertitore Vienna e il 35% (ottenuto dal filtro armonico).

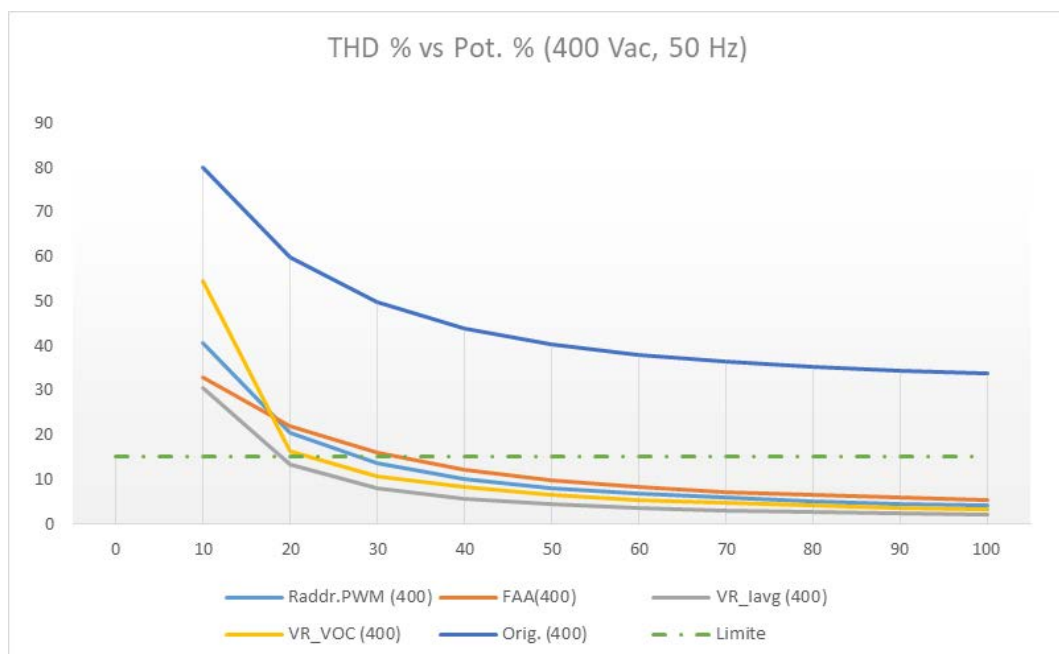


Fig. 10 – Distorsione della corrente di rete al variare della potenza % convertita.

Il costo e le dimensioni dei convertitori, mostrati rispettivamente in Fig. 11 e 12, sono stati stimati considerando i componenti principali, come gli interruttori, i sensori e gli elementi reattivi. Il contributo maggiore alle dimensioni è quello dovuto agli elementi reattivi. L'analisi ha mostrato che il convertitore Vienna con controllo della corrente media abbia diversi vantaggi rispetto a quello con controllo a orientamento di tensione (costo minore, controllo più semplice, prestazioni superiori), con un volume

praticamente uguale. Il raddrizzatore trifase PWM e il convertitore Vienna presentano sostanzialmente lo stesso ingombro. Tuttavia, per il maggior numero di componenti, il convertitore Vienna con controllo VOC ha un costo superiore del 30%.

Il raddrizzatore PWM è la soluzione che offre il miglior bilanciamento tra costi e benefici. In termini di prestazioni, ha un THD della corrente di rete e fattore di potenza comparabili con quello del raddrizzatore Vienna. Anche il costo tra le due opzioni è molto vicino. Tuttavia, ha il vantaggio di poter invertire il flusso di potenza. Infine, il raddrizzatore PWM è, tra quelli analizzati, il convertitore che occupa il minor volume.

In conclusione, si può affermare che il raddrizzatore PWM è il candidato ideale per sostituire lo stadio di ingresso a diodi nelle applicazioni smart grid. Come è emerso dall'analisi, ha i seguenti vantaggi:

- costo comparabile con le altre soluzioni;
- ingombro minore delle altre soluzioni;
- può essere utilizzato sia con alimentazione 208 Vac / 60 Hz sia con alimentazione 400 Vac / 50 Hz senza riprogettare gli stadi a valle;
- può assorbire e immettere potenza in rete;
- sfrutta una soluzione tecnica matura, in commercio da anni.

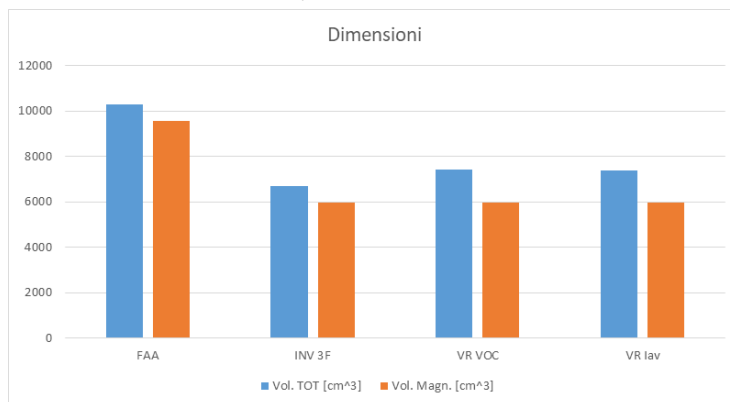


Fig. 11 – Ingombro dei convertitori

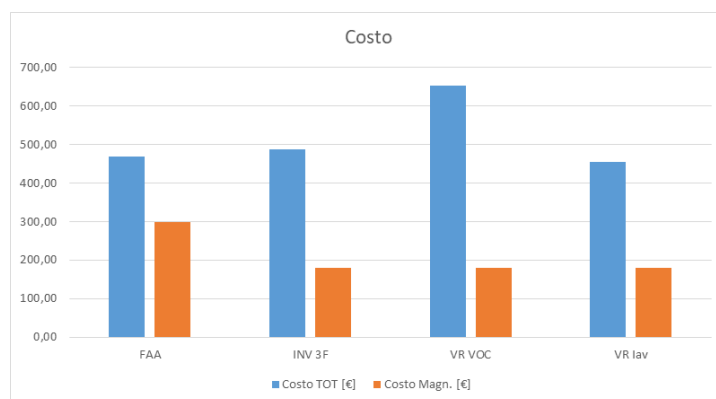


Fig. 12 – Stima di costo dei convertitori

#### b) Convertitore AC-DC a matrice.

Per quanto riguarda le prestazioni del raddrizzatore AC-DC a matrice, è stato messo a punto un prototipo riadattando un convertitore AC-AC a matrice già disponibile. Ciò ha comportato la modifica



del sistema di controllo e della struttura hardware del convertitore. Il nuovo prototipo è costituito da uno stadio di potenza (a contatto col dissipatore), una scheda di adattamento dei segnali e da una scheda di controllo su DSP Texas TMS2812, programmato in linguaggio C. L'immagine del prototipo è mostrato in Fig. 13.

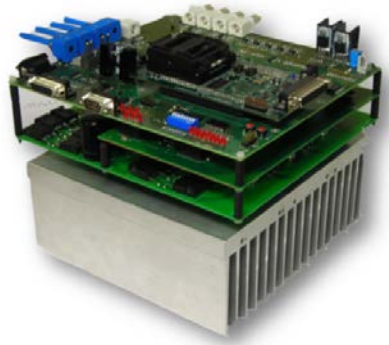


Fig. 13. Prototipo di convertitore AC-DC di tipo a matrice.

Sono state implementate 7 diverse tecniche di modulazione, caratterizzate da un diverso pattern di commutazione della matrice degli interruttori. Ciò comporta non solo una diversa distribuzione delle perdite, ma anche una diversa qualità della corrente prodotta in ingresso e in uscita, nonché di rendimento. La Fig. 14 mostra, a titolo d'esempio, l'andamento delle principali grandezze del convertitore, simulate in ambiente Simulink-PLECS, mentre la Fig. 15 mostra le corrispondenti prove sperimentali.

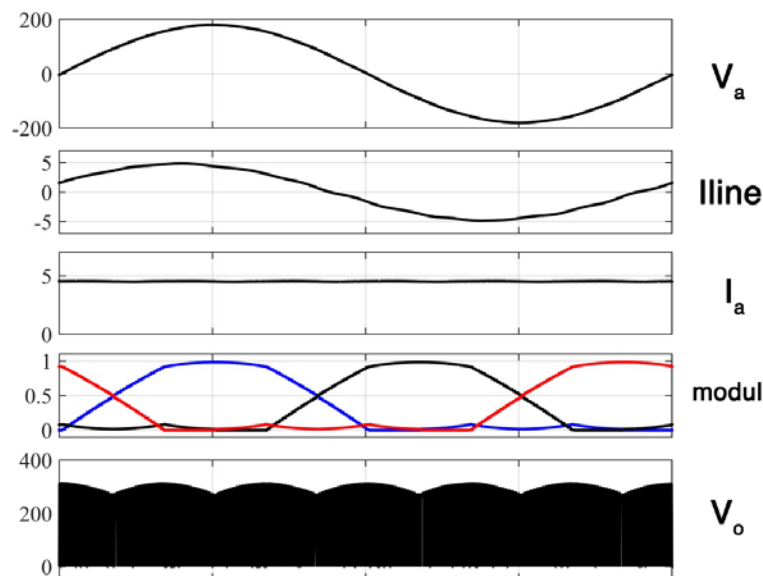


Fig. 14. Forme d'onda delle correnti e tensioni del convertitore AC-DC a matrice.

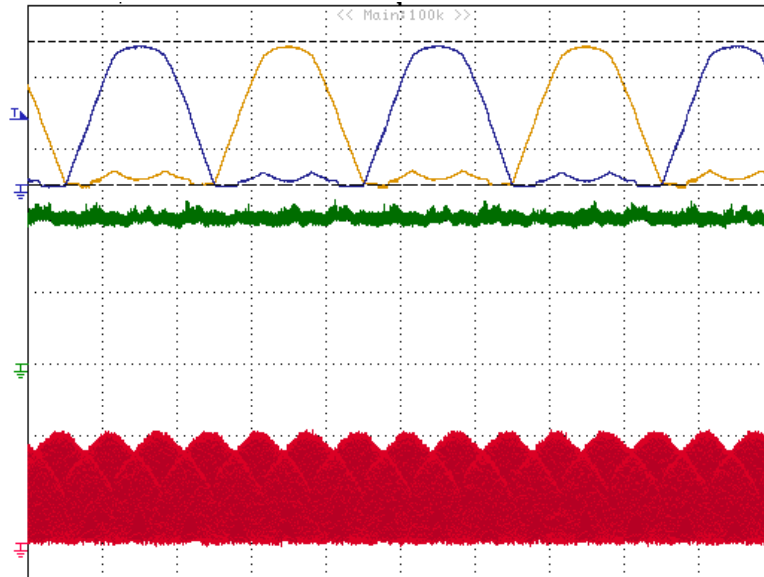


Fig. 15. Forme d'onda sperimentali delle correnti e tensioni del convertitore AC-DC a matrice.

Il THD sperimentalmente misurato della corrente d'uscita è mostrato nella Fig. 16, mentre la Fig. 17 illustra il comportamento ottenuto mediante le simulazioni al computer.

### THD\_out sperimentale

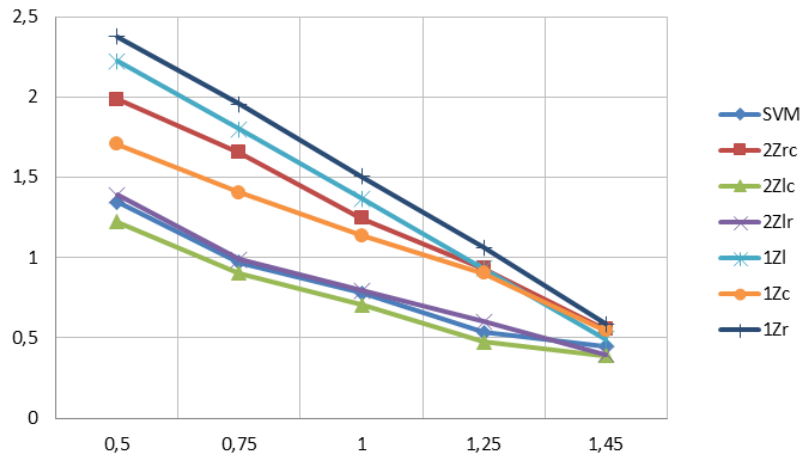


Fig. 16. THD della corrente d'uscita del convertitore AC-DC a matrice (sperimentale)

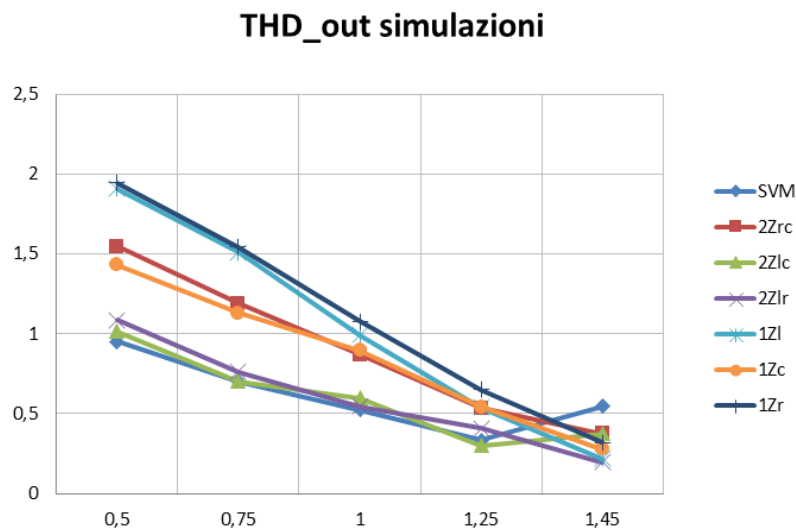


Fig. 17. THD della corrente d'uscita del convertitore AC-DC a matrice (simulazione)

Il convertitore AC-DC a matrice è risultato la topologia più compatta e performante per un funzionamento su quattro quadranti, con ottimi risultati anche in termini di efficienza complessiva, superiore al 95%. Tale convertitore può controllare il fattore di potenza in ingresso, mantenere sinusoidale la corrente sul lato AC, invertire la tensione d'uscita.

#### c) Confronto tra convertitori Si, Sic e Soft-Switching.

Sono stati esaminati numerose topologie di convertitori soft-switching, classificate in Fig. 18.

Alla fine degli anni '80, sono stati proposti inverter soft-switching per aumentare l'efficienza dei convertitori DC-AC. A quel tempo, i transistori bipolari a bassa velocità di commutazione e gli IGBT erano ampiamente adottati negli inverter di potenza, pertanto la commutazione dei transistor in condizioni di Zero-Voltage (ZV) o Zero-Current (ZC) poteva migliorare drasticamente l'efficienza dei convertitori. Il vantaggio introdotto dalle topologie di soft-switching era significativo e la maggiore complessità del convertitore era conveniente in alcune applicazioni di nicchia. L'inverter DC-Link a risonanza attiva (AC-RDCL) è stato il primo convertitore di commutazione soft moderno, proposto da D. Divan nel 1989. Più tardi nel 1990, R. De Doncker propose il convertitore con risonanza ausiliaria (ARCP), basato su un metodo diverso per ottenere la commutazione *soft* dei componenti. Questi due convertitori hanno originato due famiglie di inverter: il lato CA e gli inverter di commutazione soft sul lato di carico. Da allora, diverse topologie sono state derivate e sviluppate per superare i limiti e gli svantaggi delle topologie iniziali.

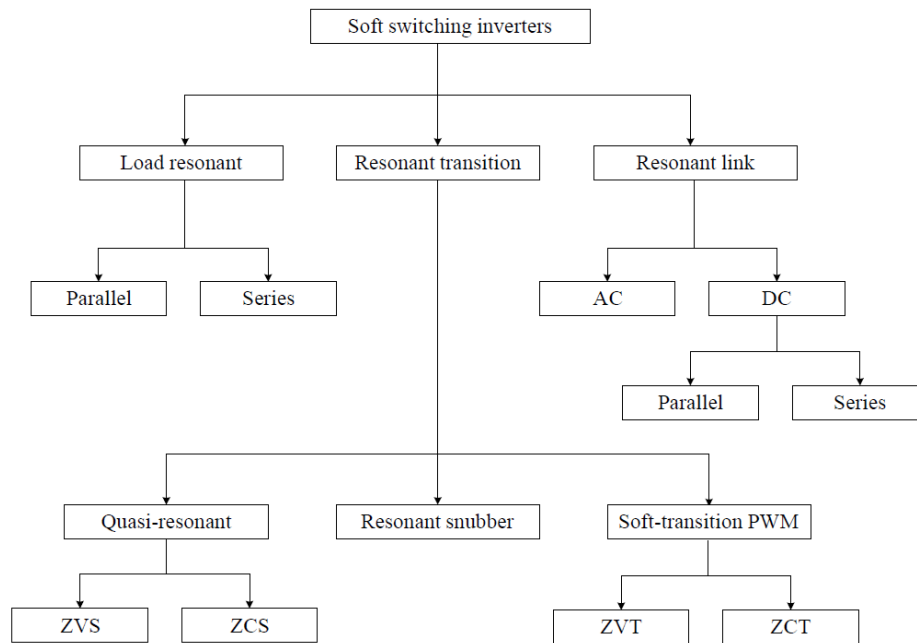


Fig. 18. Classificazione dei convertitori soft-switching

Un convertitore soft-switching a bus DC risonante è stato modellato in ambiente Simulink PLECS. Lo schema del convertitore è mostrato in Fig. 19, mentre in Fig. 20 è mostrato la forma d’onda della corrente in uscita. Il modello si riferisce a un convertitore di piccola taglia con una corrente in uscita inferiore a 10 A. L’analisi mostra che gli interruttori del bus DC sono particolarmente sollecitati, in quanto devono sopportare l’intera corrente per una frazione di tempo.

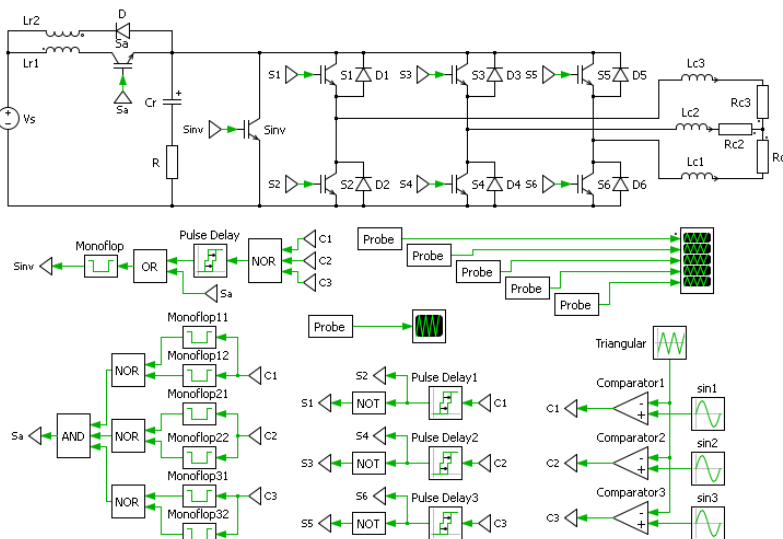


Fig. 19. Convertitore soft-switching a bus DC risonante

Una delle più recenti e più efficienti topologie sviluppate è l’inverter Zero Voltage Transition (ZVT) con due induttanze accoppiate in un polo di risonanza (ZVT-2CI). Questo convertitore risolve i principali problemi della famiglia di convertitori a commutazione di tensione lato carico: la saturazione del nucleo di ferro dei trasformatori adottati nei circuiti ausiliari e il funzionamento a frequenza di carico zero.

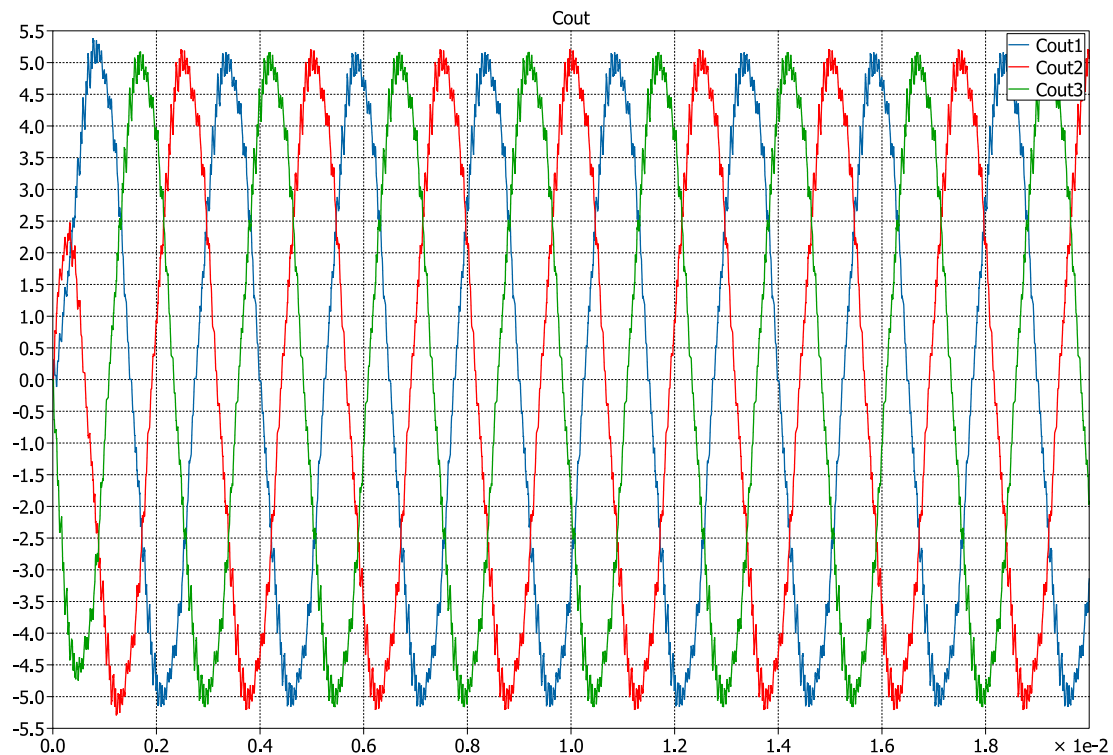


Fig. 20. Forma d'onda della corrente prodotta dal convertitore soft-switching a bus DC risonante.

Insieme ai miglioramenti delle topologie dei convertitori analizzati sopra, gli sviluppi della microelettronica hanno portato ad un significativo aumento delle prestazioni dei transistor al silicio, soprattutto nelle perdite di commutazione. Pertanto, il risparmio energetico ottenuto dalle topologie basate su silicio soft-switching sta diventando meno evidente rispetto alle controparti hard-switching. Per tale ragioni, nel corso della ricerca, alcuni prototipi di inverter ZVT-2CI e inverter hard-switching sono stati realizzati utilizzando dispositivi Si e SiC ad alte prestazioni. Il problema del confronto tra diverse topologie di convertitori non è semplice perché i criteri di comparazione non sono univoci. La scelta dei vincoli e degli indici di qualità per il confronto non è semplice. Infatti, un miglioramento dei parametri critici come l'efficienza, la potenza di uscita e il volume, può essere dannoso per gli altri parametri. I requisiti di ottimizzazione sono spesso contrastanti, quindi ogni scelta può essere altrettanto discutibile. Per semplificare il problema e le condizioni del confronto, i convertitori sono stati costruiti sulla stessa piattaforma hardware riconfigurabile, caratterizzata da una corrente di uscita di 16 Arms e 400 V attraverso il DC link. Questo approccio consente di confrontare le topologie del convertitore con lo stesso layout del circuito di alimentazione e del sistema di raffreddamento.

La Tab. III mostra le caratteristiche dei 4 convertitori progettati. Due prototipi si basano su commutazione soft-switching e differiscono l'uno dall'altro nei tipo di interruttori statici, ovvero Si IGBT e SJ Si MOSFET. Gli altri prototipi sono inverter hard-switching, rispettivamente basati su interruttori Si IGBT e SiC MOSFET.

La struttura di circuito di prova, comprendente un ramo del convertitore soft-switching a polo risonante, è mostrata in Fig. 21. Inoltre, in Fig. 22 è mostrata una foto del prototipo realizzato.

TAB. III - ELENCO DEI PROTOTIPI REALIZZATI

Prototype n.	Inverter Topology	Characteristics of Power Switches $Q_1$ and $Q_2$		
		Technology	Voltage Rating	Commercial code
1	Soft switching	Si MOSFET (SJ)	650 V	Infineon IPW65R080CFD
2	Soft switching	Si IGBT	650 V	Infineon IKW40N65H5
3	Hard switching	Si IGBT	650 V	Infineon IKW40N65H5
4	Hard switching	SiC MOSFET	1200 V	CREE C2M0080120D

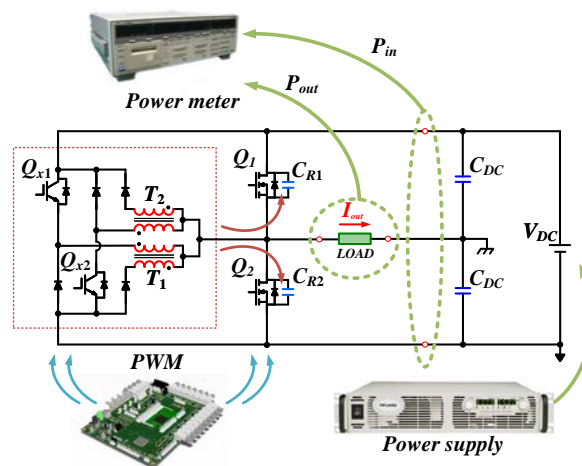


Fig. 21. Schema del circuito di misura con un ramo di convertitore soft-switching.



Fig. 22. Prototipo di convertitore soft-switching.

Tutti i convertitori sono stati testati nelle stesse condizioni operative per valutare il rendimento al variare della frequenza di commutazione, tra 10 e 30 kHz, come riportato nella Fig. 23. A 10 kHz, il rendimento di tutti i prototipi è superiore al 98%, e quello del prototipo con componenti Mosfet Super Junction al silicio tocca 98,8%. Tuttavia, al crescere della frequenza le prestazioni variano sensibilmente. In particolare, già a 30 kHz, la superiorità dei componenti in SiC è evidente.

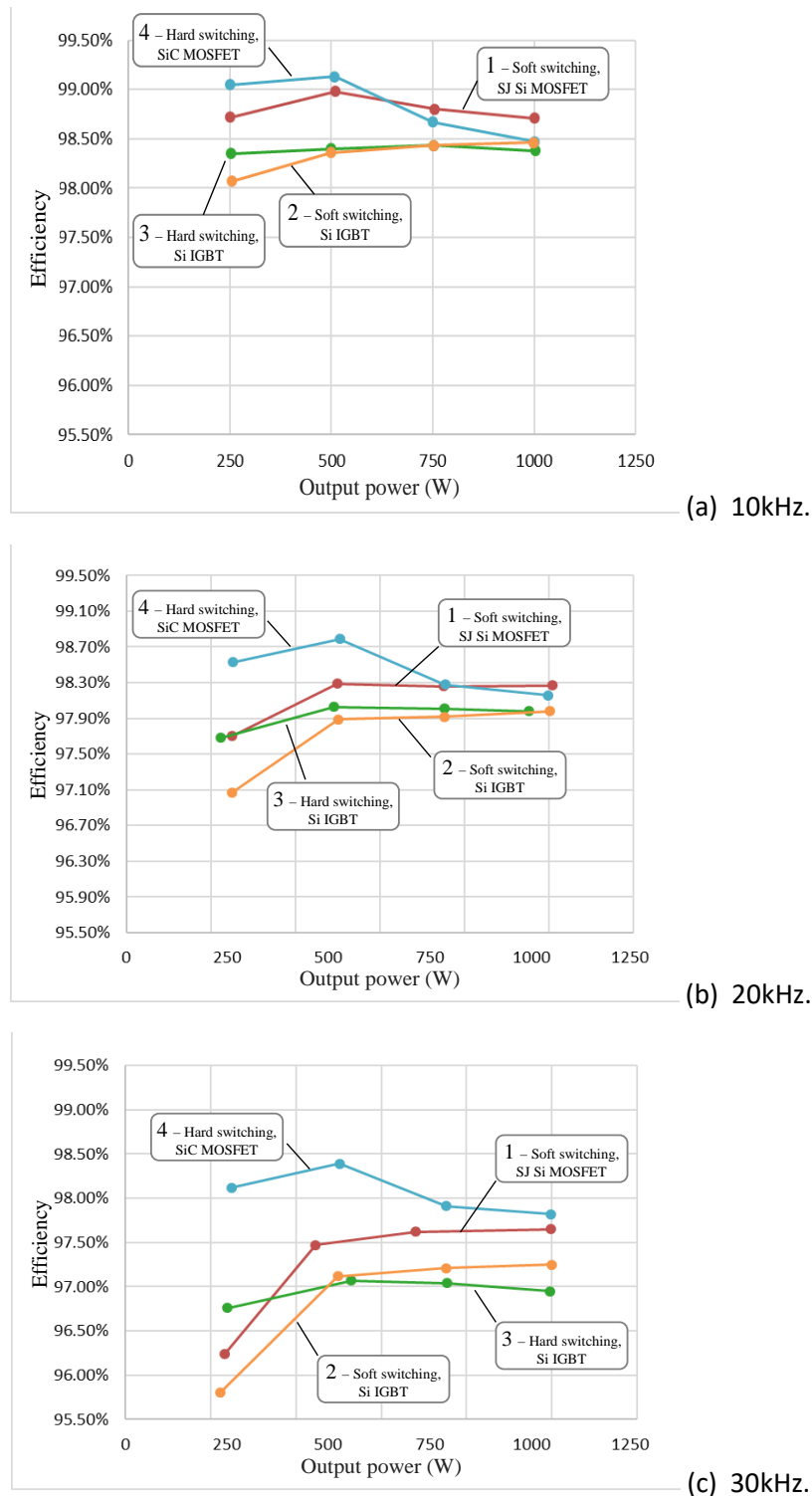


Fig. 23. Confronto delle efficienze dei prototipi 1-4 in funzione della potenza d’uscita per frequenze di commutazione di a) 10 kHz, b) 20 kHz, and c) 30 kHz.

Sebbene i risultati del confronto siano validi solo per la gamma di potenza di pochi kW, possono essere utili per future indagini e valutazioni di massima. Complessivamente, gli inverter con commutazione soft consentono di migliorare l'efficienza a un'elevata corrente di uscita rispetto agli inverter Si a commutazione rigida, ma la loro efficienza è risultata paragonabile a quella degli inverter SiC o

addirittura inferiore a basse correnti di uscita. Inoltre, la diminuzione dell'efficienza, all'aumentare della frequenza di commutazione, sembra maggiore rispetto a quella degli inverter SiC. In media, l'inverter soft-switching basato su MOSFET SJ ha un'efficienza maggiore rispetto agli altri a frequenze di commutazione inferiori a 20 kHz, specialmente con un'elevata potenza di uscita. Viceversa, al di sopra delle frequenze di commutazione di 20 kHz, l'inverter SiC hard-switching mostra la massima efficienza sull'intero range di funzionamento.

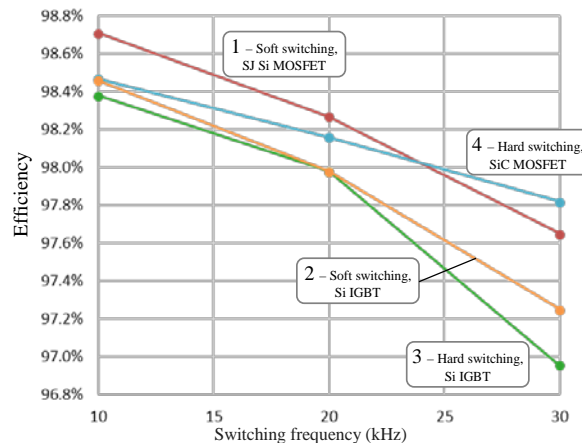


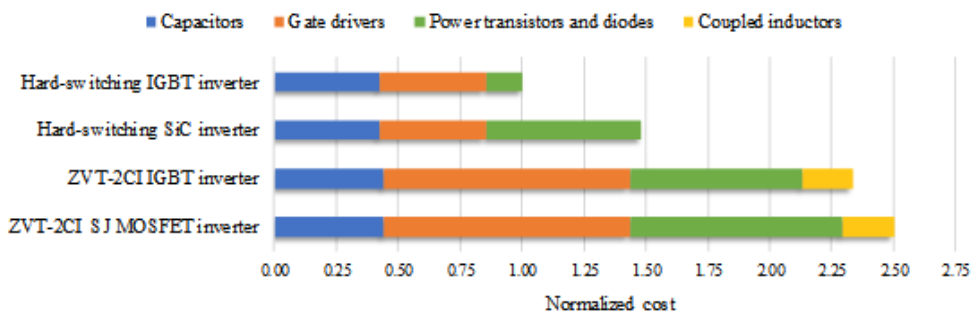
Fig. 24. Efficienza al variare della frequenza di commutazione.

La Fig. 24 mostra l'efficienza in funzione della frequenza di commutazione al massimo carico. Se si esaminano le efficienze dei prototipi 2 e 3 (versioni di commutazione soft e hard che utilizzano gli stessi IGBT), si può notare che l'inverter ZVT-2CI ha prestazioni migliori a carico elevato e la sua efficienza è nettamente superiore all'efficienza dell'inverter a IGBT a 30 kHz. Viceversa, un calo significativo dell'efficienza nella curva del prototipo 2 è stato riscontrato a bassa potenza di uscita. Due ragioni principali spiegano questo comportamento. In primo luogo, a basso carico, la perdita di efficienza è dovuta alle perdite dei circuiti ausiliari, che sono presenti anche a corrente di uscita zero e dipendono dalla frequenza di commutazione, poiché un impulso di corrente risonante viene generato ogni volta che commutano i transistori del ramo principale. In secondo luogo, i dispositivi bipolari come gli IGBT non possono soddisfare tutti i vantaggi della topologia ZVT-2CI. In effetti, le perdite di turn-off degli IGBT dovute alla coda di corrente non possono essere completamente evitate dai condensatori risonanti. Pertanto, il miglioramento dell'efficienza ad alta velocità di commutazione e carico elevato è principalmente dovuto alla riduzione delle perdite di accensione. I componenti più adatti per questa topologia soft-switching sono i dispositivi unipolari, come i MOSFET di potenza. Il prototipo 1 mostra un miglioramento significativo delle prestazioni a carico medio e alto rispetto ai prototipi basati su IGBT. Tuttavia, un calo delle prestazioni è ancora presente a basso carico a causa della perdita di potenza aggiuntiva dei circuiti ausiliari. Il potenziale vantaggio dell'uso di dispositivi unipolari a carichi leggeri è quindi vanificato dalle perdite dei circuiti ausiliari. Vale la pena ricordare che la topologia ZVT-2CI consente l'utilizzo di MOSFET al silicio ad alta tensione in inverter DC-AC, un'opzione solitamente non presente per i convertitori hard-switching a causa delle scarse prestazioni del diodo integrato. Infine, le curve di efficienza del prototipo 4 basato su SiC mostrano chiaramente una maggiore efficienza a basso carico rispetto a tutti gli altri prototipi. Questa caratteristica è dovuta principalmente al comportamento di conduzione resistiva dei dispositivi unipolari, che è vantaggioso in condizioni di bassa corrente. All'aumentare della frequenza di commutazione, il divario tra la curva di efficienza del

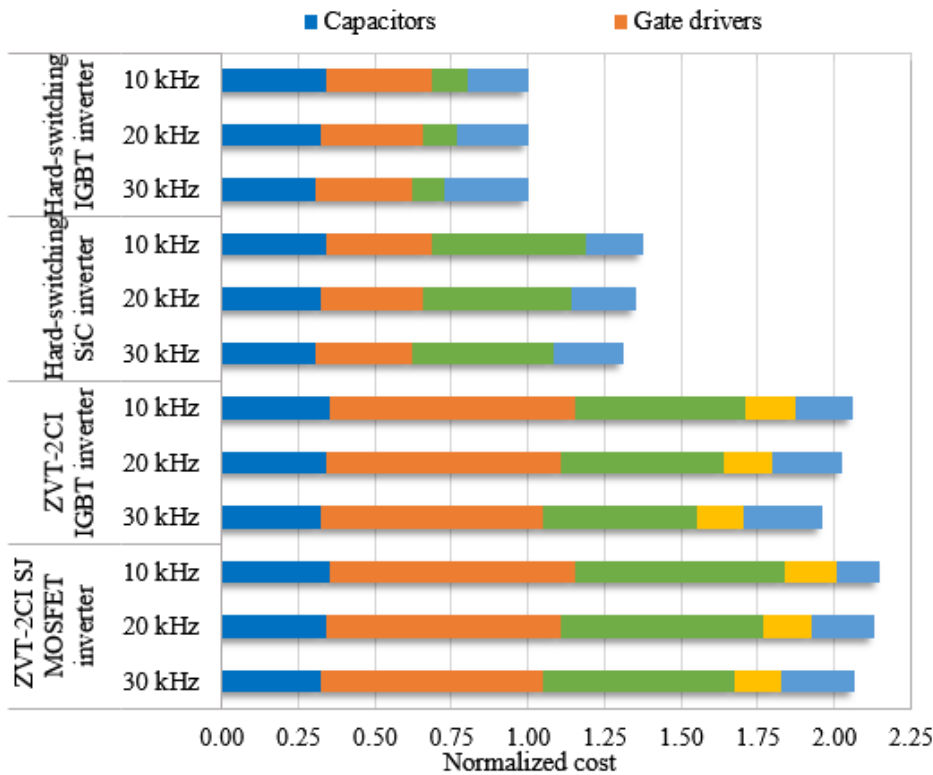


prototipo 4 e le curve degli altri prototipi tende ad aumentare. Questo comportamento è dovuto principalmente alle prestazioni di commutazione superiori dei dispositivi SiC.

L'analisi economica delle Fig. 25 e 26 ha dimostrato che il costo dello stadio di potenza degli inverter ZVT-2CI e dell'invertitore SiC hard-switching è rispettivamente di circa 2,5 e 1,5 volte quello dell'inverter hard-switching basato su IGBT Si. Tuttavia, se il confronto viene effettuato in termini costo per unità di potenza nominale, il risultato dipende dalla frequenza di commutazione. Il costo per unità di potenza dell'inverter SiC diminuisce all'aumentare della frequenza di commutazione. Inoltre, il costo per unità di potenza del convertitore SiC è molto vicino a quello dell'invertitore Si IGBT hard-switching a circa 30kHz, mentre il costo per unità di potenza dei convertitori a commutazione soft è quasi il doppio. Va notato, tuttavia, che il costo relativo dei convertitori soft-switching può diminuire man mano che il livello di potenza del convertitore aumenta poiché il costo relativo dei componenti ausiliari e dei circuiti di pilotaggio diventa meno rilevante.



a)



b)

Fig. 25. Confronto dei costi normalizzati per la costruzione dello stadio di potenza dei quattro prototipi senza considerare il dissipatore (a) e con dissipatore (b).

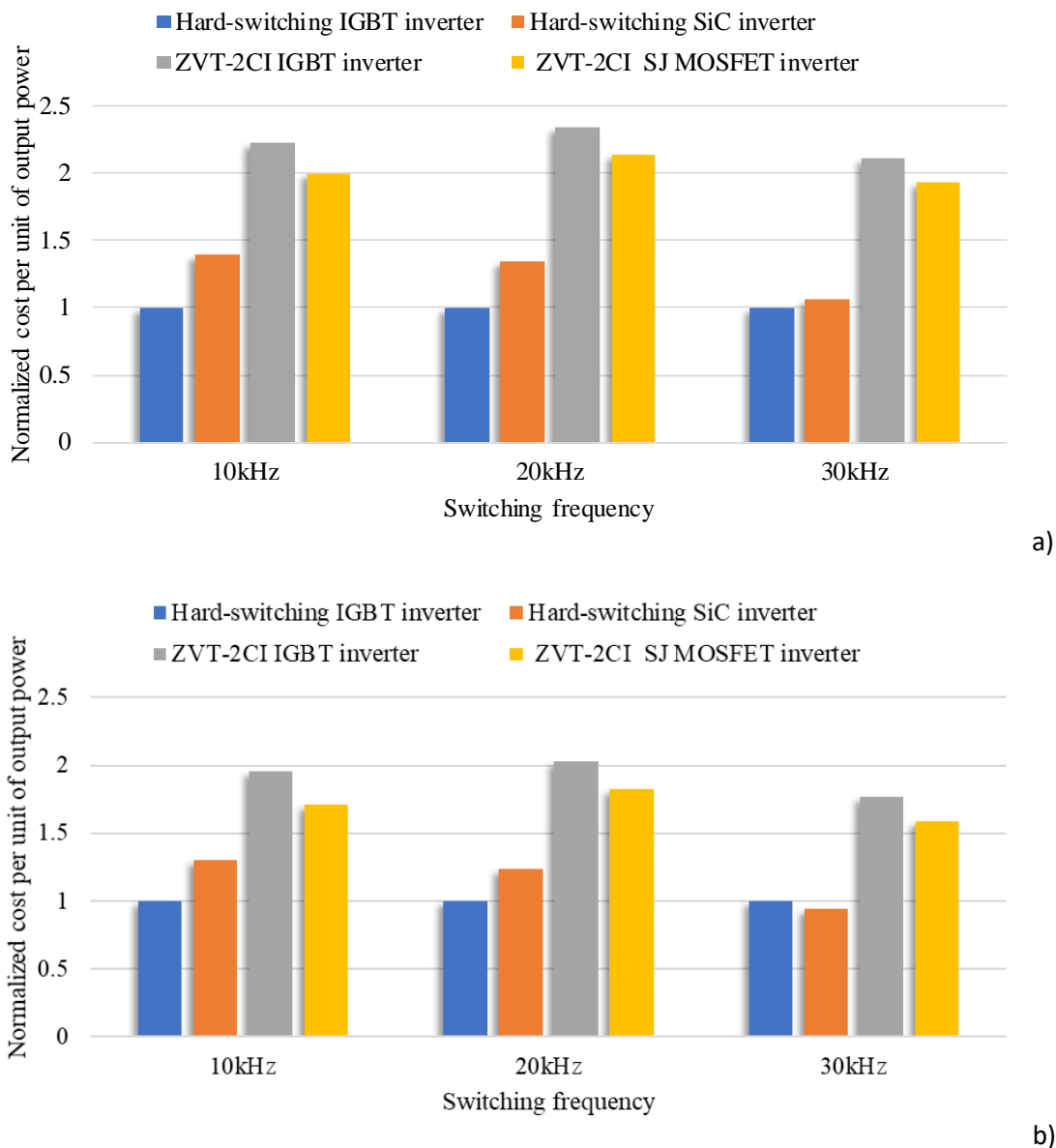


Fig. 26. Confronto tra i costi normalizzati per KW di potenza nominale dei quattro prototipi senza includere il dissipatore a) e con dissipatore b).

L'analisi economica ha dimostrato che il costo dello stadio di potenza degli inverter ZVT-2CI e dell'invertitore SiC hard-switching è rispettivamente di circa 2,5 e 1,5 volte quello dell'invertitore hard-switching basato su IGBT Si. Tuttavia, se il confronto viene effettuato in termini di costo per unità di potenza nominale, il risultato dipende dalla frequenza di commutazione. Il costo per unità di potenza dell'invertitore SiC diminuisce all'aumentare della frequenza di commutazione. Inoltre, il costo per unità di potenza del convertitore SiC è molto vicino a quello dell'invertitore Si IGBT hard-switching a circa 30kHz, mentre il costo per unità di potenza dei convertitori a commutazione soft è quasi il doppio. Va notato, tuttavia, che il costo relativo dei convertitori soft-switching può diminuire man mano che il livello di potenza del convertitore aumenta poiché il costo relativo dei componenti ausiliari e dei circuiti di pilotaggio diventa meno rilevante.

### Confronto con i risultati attesi ed eventuali scostamenti rilevati

Il risultato previsto dell'attività di ricerca consisteva in:

- realizzazione di modelli dei convertitori in ambiente Matlab/Simulink o PLECS, che consentiranno il confronto tra diverse soluzioni adottabili, in termini di qualità della corrente di linea, dimensione dei filtri, stabilità e rendimento di conversione.
- sviluppo di metodologie progettuali di convertitori basati su componenti WBG, con rendimenti superiori al 95%.
- analisi delle prestazioni e criteri di confronto tra topologie di convertitori differenti.
- analisi dei costi di realizzazione per convertitori di piccola potenza, idonei ad applicazioni smart-grid e IoT.

Tutti gli obiettivi sono stati raggiunti.

- Sono stati realizzati modelli dei convertitori in ambiente PLECS standalone dei convertitori di interfacciamento alla rete, come l'inverter VSI, il convertitore di Vienna, o il convertitore a matrice AC-DC. Di alcune soluzioni è stata valutato il costo di realizzazione. Inoltre, il convertitore a matrice AC-DC è stato sottoposto a un'estesa campagna di prove sperimentali.
- Sono state sviluppate metodologie di progetto per convertitori basati su componenti WBG. E' stato realizzato un prototipo con componenti Mosfet in Silicon Carbide e una potenza nominale di 1 kW. Inoltre, sono state sviluppate delle metodologie di progettazione per convertitori soft-switching. Tutti i convertitori, operanti a 10 kHz, hanno un rendimento superiore al 98%.
- Sono stati confrontati sperimentalmente quattro prototipi (due di tipo soft-switching, due di tipo hard-switching con componenti in Si e SiC), per valutare l'efficienza e le prestazioni.
- E' stata condotta un'analisi dei costi per la realizzazione per convertitori di piccola potenza, idonei ad applicazioni smart-grid e IoT. I costi sono stati normalizzati, assumendo come costo di riferimento quello degli inverter VSI.

### Deliverables

Unità di ricerca	DESCRIZIONE DELIVERABLE	RISULTATI QUANTITATIVI
UNIBO-DEI	Report "Strutture di conversione statica per applicazioni smart-grid e grid-connected ad elevata efficienza"	a) E' stato eseguito un confronto tra alcune topologie di convertitori per l'interfacciamento alla rete in applicazioni smart-grid. Le topologie considerate sono il raddrizzatore a diodi (come base per il confronto), l'inverter a tensione impressa con e senza filtro armonico, il convertitore Vienna. Per ciascuna topologia è stato realizzato un modello in ambiente PLECS. I convertitori sono stati confrontati in termini di efficienza e prestazioni, costo e volume. Ciò ha permesso di concludere che il raddrizzatore

Unità di ricerca	DESCRIZIONE DELIVERABLE	RISULTATI QUANTITATIVI
		<p>PWM è attualmente quello con il miglior rapporto prezzo/prestazioni. Le prestazioni del convertitore di Vienna sono adeguate solo se si utilizza il controllo ad orientamento di corrente.</p> <p>b) E' stato sviluppato un raddrizzatore trifase a matrice. Il prototipo è stato sottoposto a un'intensa campagna di prove sperimentali. Il convertitore ha mostrato un rendimento superiore al 95% a pieno carico, e ha la capacità di operare su 4 quadranti, con il controllo del fattore di potenza in ingresso.</p> <p>c) Sono stati analizzati alcuni tipi di inverter soft-switching a bus DC risonante e polo risonante. E' stato realizzato il prototipo di inverter monofase ZVS con due induttori accoppiati a polo risonante. Inoltre, sono stati realizzati dei prototipi di inverter tradizionale con componenti in silicio e in carburo di silicio per sviluppare le tecniche di progettazione e per confrontare le prestazioni e i costi dei convertitori. Sebbene a frequenze di commutazione di 10 kHz il convertitore hard-switching con mosfet superjunction in Si ha mostrato le prestazioni migliori, all'aumentare della frequenza di commutazione i convertitori in SiC hanno evidenziato un rendimento superiore.</p>

### Benefici per gli utenti finali

Il Piano Triennale della Ricerca del Sistema Elettrico Nazionale, al punto 6, promuove attività volte

- alla fruibilità e integrazione delle diverse fonti di energia rinnovabili (punto B.1)
- all'integrazione di un elevato livello di intelligenza, nelle reti di distribuzione, per la presenza diffusa nel prossimo futuro di generazione distribuita di piccola taglia e microgrids, in particolare per quanto concerne la qualità dell'energia nell'interazione con l'utente finale (punto C.3)
- al miglioramento dell'efficienza energetica e al risparmio nell'uso dell'energia elettrica, da perseguire attraverso il miglioramento dei processi di conversione energetica presso gli utenti finali e attraverso il miglioramento dei processi di gestione (punto D).

Gli studi compiuti nel corso del PAR 2016-17 riguardano le prestazioni dei convertitori di interfacciamento alla rete che possano essere impiegati in contesti smart-grid. Il confronto tra diverse soluzioni ha dimostrato che il miglior rapporto prezzo/prestazioni del raddrizzatore PWM. Tuttavia, se

il flusso di potenza è unidirezionale, anche il convertitore Vienna può essere una soluzione accettabile, ammesso che il sistema di controllo sia ad orientamento di corrente. Nel caso in cui il funzionamento sia su 4 quadranti, la soluzione con convertitore a matrice si è dimostrata essere molto efficiente (>95%) e compatta.

In secondo luogo, la riduzione delle armoniche in rete e delle perdite del convertitore comporta un aumento potenziale dell'efficienza del gestore, che potrebbe auspicabilmente riflettersi in una riduzione del costo dell'energia per l'utente finale, o comunque un risparmio delle risorse energetiche.

Infine, il confronto tra le soluzioni soft-switching e hard-switching ha dimostrato che:

- è possibile realizzare convertitori con un rendimento superiore al 98% con frequenze di commutazione tradizionale (10 kHz) impiegando componenti al Si di ultima generazione. Se la frequenza di commutazione aumenta per ridurre il volume dei componenti reattivi, i componenti in carburo di silicio diventano più vantaggiosi già a 30 kHz.

- i convertitori soft-switching hanno rendimenti più alti dei convertitori hard-switching tradizionali, ma i vantaggi si perdono rapidamente all'aumentare della frequenza a causa della maggior complessità dei circuiti ausiliari.

### **Diffusione dei risultati**

Una prima diffusione dei risultati conseguiti durante l'attività di ricerca è avvenuta attraverso le pubblicazioni seguenti:

A. Amerise, M. Mengoni, G. Rizzoli, L. Zarri, A. Tani, D. Casadei, "Adaptive Voltage Saturation Algorithms for Selective Harmonic Control in Shunt Active Power Filters," IEEE Energy Conversion Congress and Expo (ECCE 2018), Portland, US, September 23-27, 2018, pp. 5692-5698, IEEE Catalog Number: CFP18ECD-USB, ISBN USB: 978-1-4799-7311-8.

G. Rizzoli, M. Mengoni, L. Zarri, A. Tani, G. Serra, D. Casadei, "Comparative Experimental Evaluation of Zero-Voltage Switching Si Inverters and Hard-Switching Si and SiC Inverters," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 7, no. 1, pp. 515-527, March 2019, doi: 10.1109/JESTPE.2018.2831603.

L. Sandrolini, D. W. P. Thomas, M. Sumner and C. Rose, "Measurement and Evaluation of the Conducted Emissions of a DC/DC Power Converter in the Frequency Range 2–150 kHz," 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI & PI), Long Beach, CA, 2018, pp. 345-350.

D. W. P. Thomas et al., "WED-PM-5-4 Characterisation of Low Frequency Disturbances on AC and DC Systems," 2018 IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity (EMC, SI & PI), Long Beach, CA, 2018, pp. 1-28.

Il primo lavoro scientifico analizza il sistema di controllo di un convertitore active-front end nella configurazione da filtro attivo per il miglioramento della qualità della corrente. In particolare, viene considerato il caso della saturazione dei regolatori di corrente qualora la tensione disponibile per gli obiettivi di controllo sia insufficiente. IEEE Energy Conversion Congress and Expo (ECCE) è una tra le più note conferenze nel settore dell'elettronica di potenza e degli azionamenti elettrici, vede la

partecipazione di circa 1500 persone, una fiera industriale e circa 1000 presentazioni scientifiche. I lavori sono selezionati sulla base del giudizio di 5 esperti del settore e la percentuale di accettazione è spesso inferiore al 50%. I lavori presentati su indicizzati sul database IEEE Xplore.

Il secondo lavoro scientifico è stato presentato sulla rivista IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Power Electronics, il cui IF è attualmente superiore a 4. L'articolo confronta le prestazioni di convertitori soft-switching e hard-switching con componenti SiC.

Infine, gli ultimi due lavori sono relativi alla progettazione elettromagnetica dei convertitori e trattano le problematiche di compatibilità magnetiche. Pur essendo specialistici, questi problemi emergono durante la fase di progettazione dei convertitori. I lavori sono stati presentati nella conferenza Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity, sponsorizzata dalla IEEE EMC Society, con oltre 150 diversi espositori.

### **Apparecchiature disponibili e acquisite**

I modelli dei convertitori elettronici sono stati implementati in due diversi ambienti:

- l'ambiente Matlab/Simulink, prodotto da Mathworks, di uso comune in ambito universitario,
- l'ambiente PLECS Standalone, prodotto da PLEXSIM.

Il primo è un toolbox di Matlab ampiamente noto per la realizzazione di simulazione di sistemi elettrici. Ha il vantaggio di essere perfettamente integrato in Simulink, ma non nasce specificatamente per la simulazione di sistemi elettronici di potenza in commutazione.

Diversamente, PLECS Blockset (Piece-wise Linear Electrical Circuit Simulation) è sviluppato in particolare per la simulazione dei circuiti elettrici in commutazione. Il vantaggio principale consiste nella buona velocità di esecuzione, perché l'algoritmo d'integrazione si limita a calcolare lo stato del convertitore statico solo negli istanti di commutazione, approssimando per quanto possibile le forme d'onda inter-ciclo in modo lineare.

Il sistema di controllo dei convertitori è stato realizzato in linguaggio C. Sono stati utilizzati due schede di controllo, sviluppate presso il laboratorio LEMAD dell'Università di Bologna, basate su evaluation board di Spectrum Digital e Texas Instruments.

L'algoritmo di controllo del convertitore AC-DC a matrice è stato implementato su un processore di segnali digitali (DSP) fixed-point TMSF2812 di Texas Instruments, mentre quello dei rimanenti convertitori è stato implementato su DSP floating-point DSP TMS320F28335.

Tutti i software e le apparecchiature erano già disponibili presso UNIBO-DEI e non sono state acquisite nell'ambito di questo progetto.

---

## **Attività 2.4 Ottimizzazione delle logiche di gestione energetica su dimostratore di smart-grid [CNR-IM]**

### **Obiettivi**

L'obiettivo di questa attività consiste nell'analisi, implementazione e validazione di logiche ottimizzate per la gestione energetica di un'architettura di tipo micro-grid in corrente continua a supporto di utenze energivore in contesti di tipo smart district, a ridotto impatto sulla rete elettrica e con integrazione di sistemi di accumulo e produzione dell'energia elettrica da fonti rinnovabili.

### **Risultati conseguiti**

I risultati riportati nella presente relazione e le attività relative a questa linea di ricerca completano le attività di ricerca svolte dal CNR-IM nell'ambito della Linea 2.2 del POA 2015. In particolare, nell'ambito del POA 2015 è stato dimensionato ed allestito un dimostratore di micro-grid in corrente continua volto alla simulazione in laboratorio di uno smart district energetico in scala ridotta. Con riferimento a tale dimostratore, i risultati ottenuti per il POA 2016-2017 riguardano l'identificazione, l'implementazione e valutazione sperimentale di strategie di controllo e gestione dei flussi energetici volte all'ottimizzazione della power quality, dell'efficienza energetica e dei costi dell'energia in contesti di tipo smart-district. Sono state inoltre identificate e confrontate specifiche architetture per l'integrazione ottimale di sistemi fotovoltaici con micro-grid in corrente continua.

Una descrizione dettagliata dei risultati conseguiti in questa attività è riportata di seguito.

#### **1. Controllo di Micro-grid in contesti smart district**

Le micro-grid rappresentano una particolare architettura di sistemi di distribuzione, che appartengono al più ampio concetto di smart-grid e possono essere considerate come una rete elettrica in scala ridotta, che opera in bassa o media tensione. Tale architettura generalmente integra sistemi di generazione di tipo distribuito, programmabili o non programmabili, sistemi di accumulo stazionari ed utenze elettriche controllabili secondo logiche di demand side management. La principale caratteristica delle micro-grid è la possibilità di agire come sistemi isolati, soprattutto in caso di guasti, aumentando l'affidabilità dell'approvvigionamento locale di energia. Attualmente, l'applicazione più comune di tale architettura è l'alimentazione elettrica di sistemi isolati come veicoli, imbarcazioni, centri dati, sistemi di telecomunicazione, aree rurali e isole [1] - [3]. Tali sistemi possono in genere essere interconnessi tramite un collegamento in corrente alternata, realizzando una micro-grid in AC, o tramite un circuito intermedio in corrente continua, che realizza una microgrid in DC.

Le micro-grid in corrente continua hanno recentemente iniziato ad attirare sempre maggiore attenzione a causa dei loro principali vantaggi rispetto alle classiche architetture in corrente alternata. Infatti i sistemi distribuiti di produzione dell'energia elettrica possono essere coordinati più semplicemente, in quanto, lavorando con bus in corrente continua, non comportano problematiche di sincronizzazione. Inoltre, il controllo primario di potenza all'interno della micro-grid risulta semplificato in quanto non è presente potenza reattiva. Infine, ad oggi, i sistemi di accumulo dell'energia elettrica, gran parte delle utenze elettroniche e dei sistemi di generazione da fonte rinnovabile operano in

corrente continua. Pertanto, l'impiego di una architettura in DC consente un'integrazione più efficiente di tali elementi, evitando perdite legate agli stadi di conversione DC/AC.

L'analisi di strategie di gestione per micro-grid in corrente continua, che operano in contesti smart district, rappresenta un argomento di grande interesse per la letteratura scientifica ed è supportata sperimentalmente, nell'ambito di tale attività di ricerca, dal caso studio del dimostratore di micro-grid, allestito in Istituto Motori nell'ambito del POA 2015. A riguardo, in Fig. 1 sono riportati lo schema a blocchi ed un'immagine del dimostratore realizzato nei laboratori del CNR Istituto Motori.

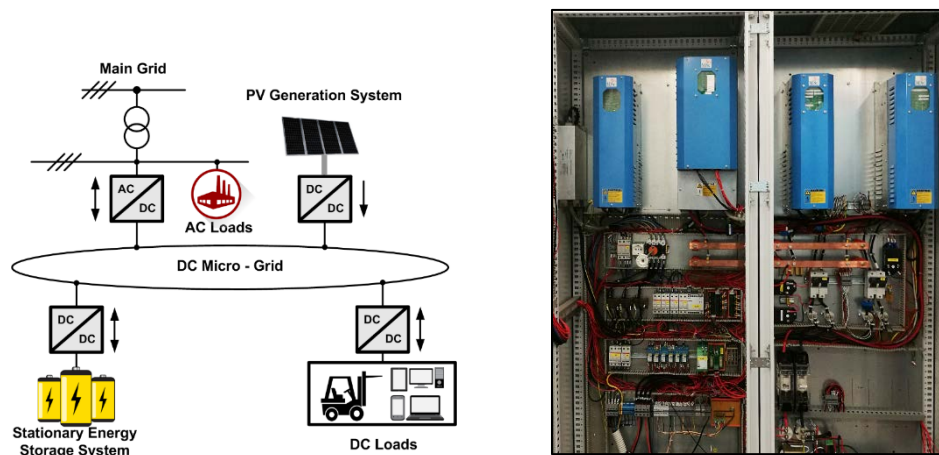


Fig. 1 schema ed immagine del dimostratore di Microgrid DC allestito al CNR-IM.

In particolare, le principali strategie di controllo per una micro-grid in corrente continua sono generalmente finalizzate al mantenimento della tensione del bus in corrente continua, al load sharing tra i sistemi distribuiti di generazione/accumulo connessi alla micro-grid ed all'ottimizzazione della power quality nell'interfacciamento con la rete elettrica. A riguardo, possono essere identificate due differenti architetture di controllo di una o più micro-grid basate su approcci molto distinti: *approccio centralizzato* e *decentralizzato*. Un'architettura di controllo completamente centralizzata si basa sulla raccolta dei dati in un unico sistema di controllo centrale che, in base a specifici algoritmi, determina a livello di rete azioni di controllo per tutte le micro-grid interconnesse. Ciò richiede una rete di comunicazione rapida ed estesa a supporto delle interazioni tra controllore centrale ed i singoli componenti delle micro-grid. In un'architettura di controllo completamente decentralizzata, ciascuna micro-grid è invece controllata da un sistema dedicato di controllo locale, che riceve solo informazioni riguardanti la micro-grid in esame e non è influenzato da variabili globali, relative ad esempio a condizioni operative della rete elettrica, né da azioni di altri controllori.

I sistemi di potenza interconnessi sono in genere dislocati su aree geografiche molto estese. Pertanto l'implementazione di un controllo interamente centralizzato è in genere sconsigliata, in quanto comporterebbe la necessità di disporre di un'infrastruttura di comunicazione ad altissime prestazioni ed un'elevata complessità computazionale legata all'enorme quantità di dati che il sistema di controllo si troverebbe a gestire. Allo stesso tempo, un approccio completamente decentralizzato non è applicabile a causa della forte interazione tra le condizioni operative delle diverse micro-grid connesse in rete, che richiedono pertanto un livello di coordinamento non raggiungibile con la sola conoscenza dei parametri di funzionamento locali [4].

Un compromesso tra i suddetti schemi di controllo può essere raggiunto mediante uno schema di *controllo gerarchico* costituito da tre livelli di controllo: primario, secondario e terziario. Questi livelli differiscono tra loro nella velocità di risposta, nel range di tempo in cui operano e nei requisiti in termini



di infrastruttura (es. infrastruttura di comunicazione). I tre livelli di controllo previsti dall'approccio gerarchico sono riportati schematicamente in Fig. 2 [5].

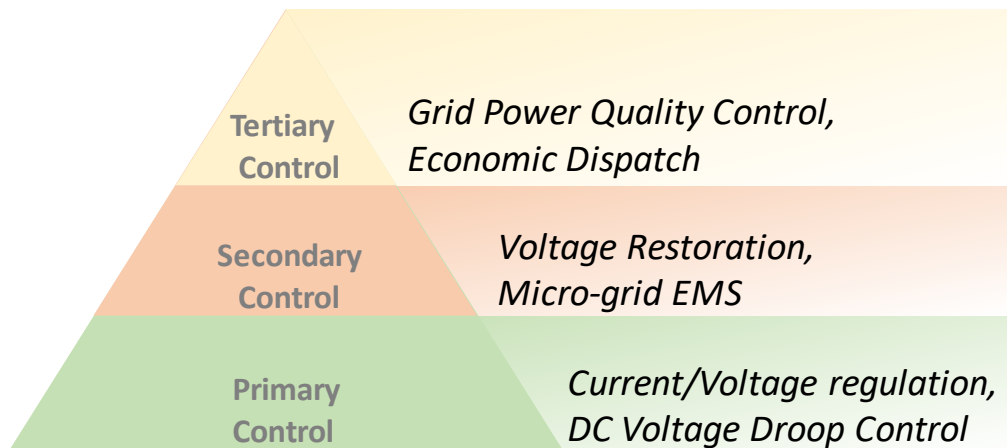


Fig. 2 Architettura di controllo gerarchico per Microgrid DC.

Tale architettura è caratterizzata da un elevato grado di indipendenza tra i livelli di controllo proposti e da un'elevata affidabilità, in quanto continua ad essere operativa anche in caso di indisponibilità di controlli centralizzati di livello gerarchico superiore.

Di seguito sono analizzati in dettaglio le principali caratteristiche del controllo primario e secondario, i quali coinvolgono in maniera diretta o indiretta tutti i componenti della micro-grid. Il controllo terziario è discusso solo sinteticamente, in quanto è principalmente in carico al gestore di rete.

### 1.1. Controllo primario

Il controllo primario, noto anche come controllo locale o controllo interno, rappresenta il primo livello nella gerarchia, ed è caratterizzato dal tempo di risposta più rapido. Tale controllo si basa principalmente su misurazioni ed informazioni locali, relative allo stato di funzionamento di una singola unità di accumulo/generazione/utilizzo dell'energia elettrica.

In particolare, il controllo primario si focalizza principalmente sul controllo dei singoli convertitori, in termini di regolazioni di corrente/tensione e sul controllo della caduta di tensione sul DC bus della micro-grid, attraverso la gestione preliminare del power sharing&balance.

Come già visto nell'ambito del PAR 2015, un punto cruciale del controllo primario per micro-grid in corrente continua è rappresentato dal controllo del convertitore AC/DC, che interfaccia la micro-grid con la rete elettrica. A riguardo, nel PAR 2016-2017, grazie alla consulenza di UNIBO-DEI, sono stati analizzati particolari schemi di controllo ed architetture di potenza orientate ad un'ottimizzazione del funzionamento del convertitore in termini di power quality, con conseguenti impatti positivi sulle dimensioni dei filtri di ingresso. In particolare, è stato eseguito un confronto tra alcune topologie di convertitori per l'interfacciamento alla rete in applicazioni smart-grid. Le topologie considerate sono il raddrizzatore a diodi (come base per il confronto), l'inverter a tensione impressa con e senza filtro armonico ed il convertitore Vienna. Per ciascuna topologia è stato realizzato un modello in ambiente PLECS. I convertitori sono stati quindi confrontati in termini di efficienza, prestazioni, costo e volume. E' stato inoltre sviluppato da UNIBO-DEI un prototipo di raddrizzatore trifase a matrice, che è stato sottoposto ad un'intensa campagna di prove sperimentali. Il convertitore realizzato ha mostrato un rendimento superiore al 95% a pieno carico, ed ha inoltre la capacità di operare su 4 quadranti, con controllo del fattore di potenza in ingresso. Sono stati infine analizzati e confrontati alcuni tipi di

inverter soft-switching a bus DC risonante e polo risonante. Tali analisi sono state basate su applicazioni prototipali che hanno riguardato un inverter monofase ZVS, con due induttori accoppiati a polo risonante, ed inverter tradizionali con componenti in silicio e in carburo di silicio.

I convertitori DC/DC connessi alla micro-grid possono essere basati su differenti tipologie di architetture di potenza. Ad ogni modo, le modalità di controllo primario per tali convertitori possono essere raggruppate in due categorie: *controllo in tensione* e *controllo in corrente*. Nel primo caso, i convertitori DC/DC lavorano come generatori di tensione controllabili in base ad un riferimento esterno di tensione,  $V_{ref}$ . Nel caso di controllo in corrente, i convertitori lavorano come generatori di corrente controllabili in base ad un riferimento esterno di corrente,  $I_{ref}$ . Tali controlli sono schematizzati sinteticamente in **Fig. 3** dove  $G_I$  e  $G_V$  rappresentano i controllori di corrente e tensione, mentre  $\rho$  rappresenta il *duty cycle* per il controllo PWM del convertitore [5].

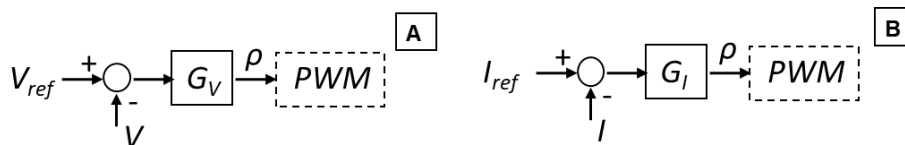


Fig. 3 Controllo in Tensione e Corrente di convertitori DC/DC

Il controllo della caduta di tensione (*voltage droop control*) è finalizzato alla gestione del load sharing tra i singoli convertitori connessi alla micro-grid, variando il rispettivo set-point di tensione/corrente di uscita in funzione della corrente/potenza richiesta. Tale controllo può essere realizzato in maniera distribuita, ovvero senza alcuna forma di comunicazione tra i singoli sistemi di controllo dei convertitori. Il *voltage droop control* è in genere realizzato attraverso il concetto di *resistenza virtuale*, posta in uscita al convertitore in esame. La resistenza virtuale è un valore ideale non influenzato dalle proprie condizioni operative e non genera alcuna perdita di potenza reale. Tale resistenza è in genere indicata anche come viene anche chiamata guadagno, costante, o coefficiente di caduta.

In particolare, per i convertitori controllati in tensione, il controllo fornisce un riferimento di tensione  $V_{dc}^*$  basato su una *caratteristica di caduta tensione-corrente* avente la seguente equazione:

$$V_{dc}^* = V_0 - I_{dc} \cdot k \quad (1)$$

dove  $V_0$  rappresenta il valore nominale della tensione per il bus in corrente continua;  $k$  è il coefficiente di caduta;  $I_{dc}$  rappresenta la corrente in uscita dal convertitore lato bus in corrente continua. A riguardo, in **Fig. 4** si riporta il load sharing tra due convertitori con diverse caratteristiche di caduta tensione-corrente [6].

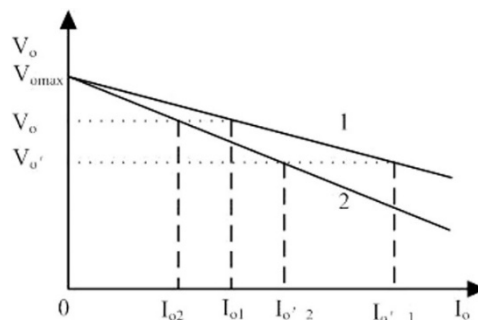


Fig. 4 Load sharing tra convertitori con diversa caratteristica di caduta tensione-corrente.

In base alle suddette considerazioni, lo schema del *droop control*, per convertitori AC/DC e DC/DC controllati in tensione, può essere sintetizzato come riportato in Fig. 5 [5].

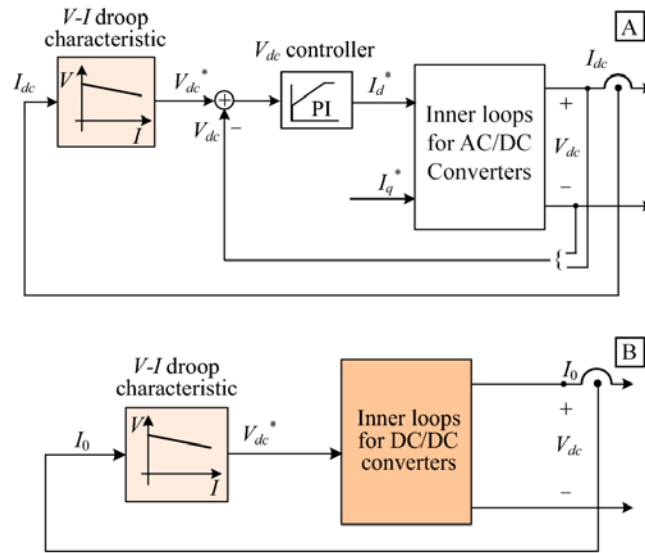


Fig. 5 Schema di controllo della caduta di tensione, per convertitori AC/DC (A) e DC/DC (B) controllati in tensione.

Analogamente, per convertitori controllati in corrente, il controllo primario fornisce un riferimento di corrente  $I_{dc}^*$  basato su una *caratteristica di caduta corrente-tensione* avente la seguente equazione:

$$I_{dc}^* = \frac{V_0 - V_{dc}}{k} \tag{2}$$

Pertanto, lo schema di controllo della caduta di tensione, per convertitori AC/DC e DC/DC controllati in corrente, può essere sintetizzato come riportato in Fig. 6.

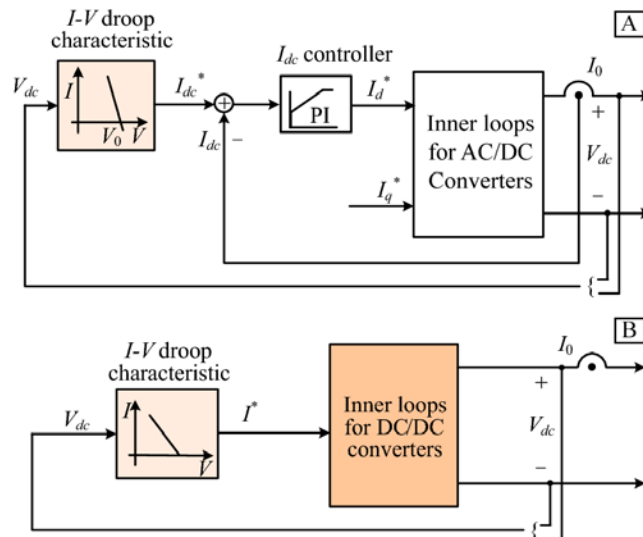


Fig. 6 Schema di controllo della caduta di tensione, per convertitori AC/DC (A) e DC/DC (B) controllati in corrente.

Nel caso di micro-grid in corrente continua, che operano in contesti smart district, oltre alla presenza di sistemi di generazione dell'energia elettrica di tipo distribuito è prevista anche l'integrazione di sistemi di accumulo stazionario. Tali sistemi sono generalmente integrati con la micro-

grid mediante l'impiego di convertitori DC/DC di tipo bidirezionale. A tal riguardo, in letteratura sono previste diverse tipologie di controllo primario finalizzate alla gestione del load sharing, in base allo stato di carica dei singoli sistemi di accumulo connessi alla micro-grid. Lo schema di tale controllo, noto anche come *SoC Based Droop Control (SBDC)* è riportato in Fig. 7 [7].

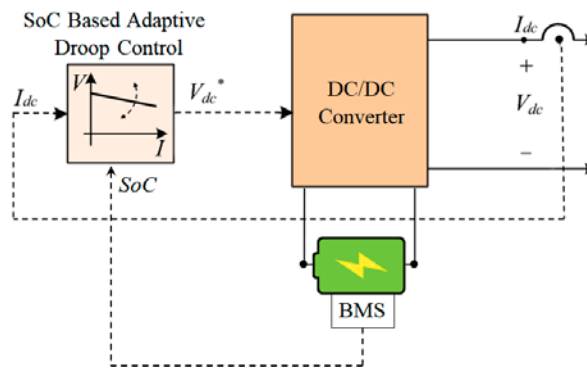


Fig. 7 Schema del SoC Based Droop Control.

In particolare, l'SBDC è basato su una relazione tensione-corrente non più di tipo lineare, come previsto dall'equazione (1), ma di tipo adattativo. Infatti, in questo caso il coefficiente di caduta  $k_i$  per l'*i-esima* unità di accumulo è valutato, in funzione del relativo stato di carica  $SoC_i$ , mediante l'equazione:

$$k_i = k_0 / SoC_i^n \quad (3)$$

dove  $k_0$  rappresenta il coefficiente di caduta iniziale per  $SoC_i=1$  ed  $n$  rappresenta un coefficiente arbitrario, scelto in base alla velocità di controllo desiderata. Pertanto, la caratteristica tensione corrente del *SoC Based Droop Control* può essere valutata in base alla seguente equazione.

$$V_{dc}^* = V_0 - I_{dc} \cdot \frac{k_0}{SoC^n} \quad (4)$$

Il valore del SoC, impiegato per il SoC Based Droop Control, è generalmente fornito, al sistema di controllo del convertitore, direttamente dal BMS del sistema di accumulo o in alternativa può essere ricavato attraverso l'integrazione della corrente di carica/scarica del pacco batteria.

## 1.2. Controllo Secondario

Il controllo secondario, noto anche come micro-grid Energy Management System (EMS), è responsabile della gestione energetica della micro-grid, in termini di affidabilità, sicurezza ed economia. Tale controllo opera in condizioni di funzionamento sia in isola che grid-connected ed assume un ruolo particolarmente critico nelle micro-grid isolate, con presenza di sistemi di produzione dell'energia elettrica da fonti altamente variabili (tipicamente eolico e fotovoltaico). Infatti, in questo caso, la velocità di aggiornamento del comando di controllo delle singole unità di generazione/accumulo deve essere sufficientemente elevata da seguire i cambiamenti improvvisi del carico e dei sistemi di generazione da fonte non programmabile. L'obiettivo dell'EMS consiste quindi nel trovare lo *Unit Commitment (UC)* ottimale (o quasi ottimale) per la micro-grid decidendo quali, tra le unità disponibili, regolare e/o accendere, ed in un secondo momento determinare il dispacciamento più economico che soddisfi la richiesta dell'utenza [8]. Anche le variazioni di tensione e frequenza prodotte dall'azione del controllo primario vengono ripristinate dal controllo secondario. Al fine di

determinare lo Unit Commitment della micro-grid, sono in genere identificate tre opzioni principali: ottimizzazione in tempo reale, sistemi esperti e controllo gerarchico decentralizzato [9].

Il controllo secondario rappresenta il più alto livello gerarchico di controllo per le micro-grid che operano in modalità stand-alone. Tale controllo opera generalmente su un intervallo di tempo più ampio rispetto al livello primario al fine di (i) disaccoppiare il controllo secondario dal controllo primario, (ii) ridurre la larghezza di banda richiesta per la comunicazione, utilizzando solo misurazioni campionate delle variabili della micro-grid di riferimento, e (iii) consentire di avere tempo sufficiente per eseguire algoritmi complessi. Le comunicazioni a ridotta larghezza di banda, basate su protocolli standard semplici ed affidabili, sono inoltre facilitate dalla limitata distribuzione geografica tipica delle micro-grid [17]. Le condizioni operative ottimali su scala più grande possono essere ricercate attraverso l'implementazione di un market environment basato su sistemi multi-agent (MAS), in cui le singole unità di generazione/accumulo distribuito sono controllate da agenti locali, che scambiano informazioni con un controllore di ordine gerarchico superiore, dedicato alla gestione della compravendita dell'energia elettrica [18].

L'architettura dell'EMS può essere sia di tipo centralizzato che decentralizzato (o distribuito). Mentre l'approccio centralizzato è basato su processi decisionali assegnati ad un unico controller centrale, l'approccio decentralizzato consente l'interazione tra varie unità di controllo presenti all'interno della micro-grid al fine di ottenere processi decisionali distribuiti. A riguardo, **Fig. 8** riporta un confronto tra l'approccio centralizzato e l'approccio distribuito.

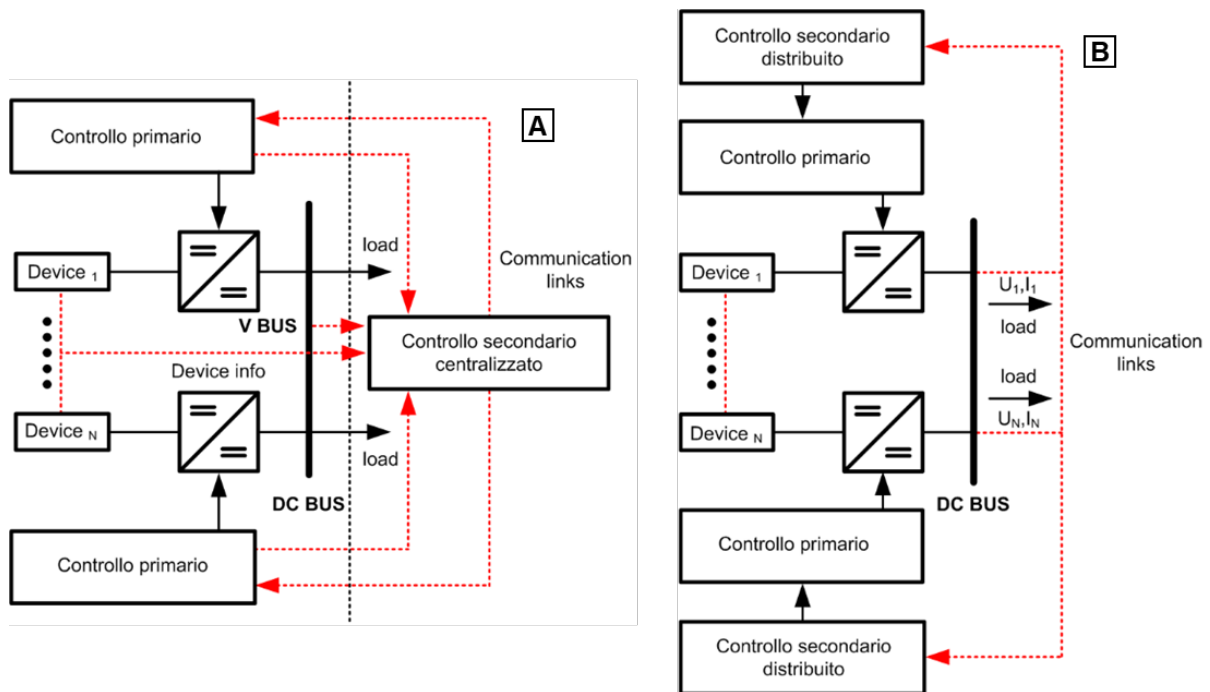


Fig. 8 Confronto tra controllo secondario centralizzato (A) e Distribuito (B).

L'adozione di un approccio centralizzato consente l'implementazione di procedure di ottimizzazione online, in quanto tutte le informazioni rilevanti sono raccolte in un unico punto. Tuttavia, tale approccio presenta notevoli limiti in termini di funzionalità *plug-and-play*, che consentono la semplice interconnessione alla micro-grid di nuove unità di accumulo/generazione dell'energia elettrica. Tale problematica non si verifica con l'approccio decentralizzato, in cui le nuove unità sono inglobate senza necessità di apportare modifiche alle impostazioni del controllore principale. Tuttavia, con

quest'ultima architettura, la gestione delle procedure di ottimizzazione e coordinamento risulta più complessa. In generale, l'approccio centralizzato è più impiegato per micro-grid isolate caratterizzate da infrastrutture fisse, con criticità in termini di gestione del bilancio locale tra produzione e richiesta di energia elettrica. L'approccio decentralizzato è maggiormente impiegato per le micro-grid connesse alla rete elettrica, con proprietari multipli e numero di unità generazione/accumulo che cambiano rapidamente. Di seguito viene presentata una descrizione dettagliata degli approcci centralizzati e decentralizzati.

### 1.2.1. Controllo Secondario: Approccio Centralizzato

Un'architettura di controllo secondario centralizzato è costituita da un sistema di controllo centrale, che conosce le principali informazioni relative alle singole unità distribuite di generazione/accumulo dell'energia, ai carichi presenti all'interno della micro-grid ed alla gestione della rete stessa (ad esempio, funzioni di costo, caratteristiche tecniche / limitazioni, parametri di rete e modalità di funzionamento). Il sistema di controllo centrale riceve inoltre informazioni dai sistemi di previsione (ad esempio carico locale, velocità del vento, irraggiamento solare) al fine di determinare uno *Unit Commitment* appropriato, gestendo le risorse in base a specifici obiettivi selezionati. Il controllore centrale può prendere decisioni sulla base di algoritmi on-line per la determinazione di condizioni operative ottimali (o quasi ottimali) oppure sulla base di database, pre-costruiti e continuamente aggiornati, contenenti informazioni su condizioni operative ottimali, determinate da calcoli offline o da altri approcci euristici [10]. La struttura generale di un controllo secondario centralizzato per micro-grid è mostrata in Fig. 9 [9].

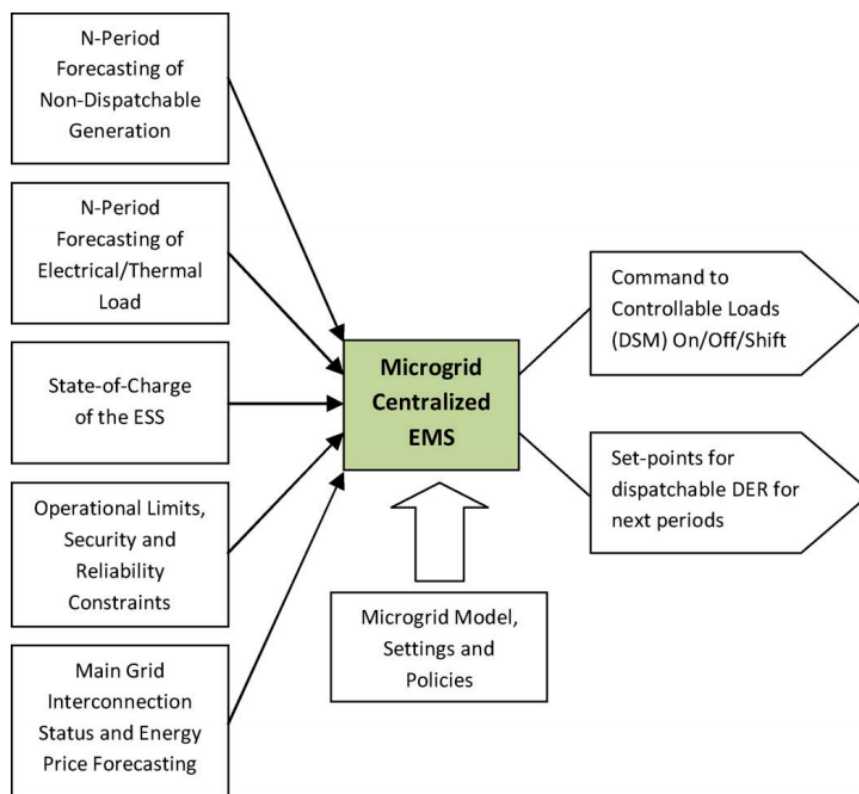


Fig. 9 struttura generale di un controllo secondario centralizzato per micro-grid.

In particolare, in base al suddetto schema, le variabili/parametri di ingresso per il controllore centrale possono includere:

- previsione della potenza di uscita per i sistemi di produzione da fonti non-programmabili;
- previsione del carico locale per la micro-grid;
- stato di carica dei sistemi di accumulo connessi alla micro-grid;
- limiti operativi delle unità di generazione/accumulo connesse alla micro-grid;
- vincoli di sicurezza e affidabilità della micro-grid;
- stato di interconnessione con la rete principale;
- previsione dei costi dell'energia della rete;

Le variabili di uscita del controllore secondario sono rappresentate dai valori di riferimento da fornire al sistema di controllo primario (ad esempio, potenza e/o tensione di uscita), per ciascuna unità di generazione/accumulo connessa alla micro-grid, e dalle variabili decisionali per controllare i carichi attraverso operazioni di load shifting/shedding.

In micro-grid di dimensioni ridotte con un basso numero di scenari di funzionamento, il controllo secondario centralizzato è generalmente basato sul calcolo offline delle condizioni operative ottimali per tutti i possibili scenari, con notevoli vantaggi in termini di costi e prestazioni del sistema. In questo caso, tutte le possibili condizioni operative sono analizzate offline e l'output ottimale del sistema di controllo, per ogni scenario, viene valutato e memorizzato in una look-up table a cui accedere per prendere decisioni in tempo reale [11]. Sebbene questo approccio produca, al variare delle condizioni di funzionamento, una risposta istantanea da parte del sistema di controllo, il numero di possibili scenari si amplifica notevolmente se si tengono in considerazione anche eventuali guasti del sistema di distribuzione o se, oltre ad un'ottimizzazione dei carichi elettrici, deve essere prevista anche un'ottimizzazione dei carichi termici. Inoltre, la presenza di sistemi di accumulo interconnessi alla micro-grid introduce ulteriori complessità computazionali legati alle informazioni sulla loro capacità disponibile, stato di carica e vita utile.

Il problema della gestione energetica ottimale delle micro-grid può essere convenientemente affrontato come un problema di *Mixed Integer Nonlinear Programming*. In questo caso, la funzione obiettivo può includere funzioni di costo basate su equazioni polinomiali di secondo ordine (o di ordine superiore). Inoltre, alcuni vincoli complessi possono essere impiegati per modellare i limiti operativi di alcuni dispositivi di generazione/accumulo dell'energia o per rappresentare carichi controllabili. In questo caso, i vincoli legati alla rete elettrica aggiungono un ulteriore grado di complessità al problema di gestione ottimale dell'energia per la micro-grid. Per la gestione di tali problematiche, i diversi approcci proposti in letteratura fanno principalmente riferimento a tecniche di ottimizzazione euristica, inclusi Algoritmi Genetici (GA), Particle Swarm Optimization (PSO) e Ant Colony Optimization (ACO) [12] - [15].

La riduzione al minimo dei costi operativi totali, nelle condizioni di funzionamento stand-alone, e la massimizzazione delle entrate economiche per il gestore della micro-grid, in modalità grid-connected, sono due obiettivi tipicamente perseguiti nel controllo secondario. Altri approcci presentati in letteratura hanno inoltre incorporato la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra (GHG) come ulteriore obiettivo per il raggiungimento delle condizioni di funzionamento ottimali della micro-grid.

Le problematiche relative all'incertezza nei profili di carico e di generazione possono essere principalmente indirizzate indirettamente nello *Unit Commitment* mediante l'approccio *Model Predictive Control* (MPC) [19]. L'MPC è un approccio generale adatto ad essere applicato in problemi di controllo multi-variabile (MIMO: multi input-multi output) con elevato grado di interazione fra variabili di ingresso e di uscita. Tale metodo è inoltre grado di gestire vincoli di disuguaglianza per variabili di ingresso/uscita, quali limiti minimi e massimi e limiti sui gradienti delle variabili considerato [20]. In



particolare il controllo MPC, partendo da un modello dettagliato del sistema da controllare, è in grado di fare previsioni sul comportamento del sistema in un opportuno orizzonte temporale. Ad ogni istante di campionamento, la determinazione della legge di controllo è ripetuta e le predizioni sono aggiornate a partire dalle nuove misure acquisite. Le strategie MPC risultano di grande interesse per la gestione energetica delle microgrid, in quanto consentono l'implementazione di azioni di controllo che anticipano eventi futuri come le variazioni di potenza per sistemi di generazione da fonti non-programmabili, i prezzi dell'energia e la domanda istantanea. L'implementazione di MPC per risolvere problemi di ottimizzazione non lineare in ogni fase temporale è chiamata MPC non lineare (NMPC) [21]-[23].

Gli approcci centralizzati sono basati sulla presenza di architetture di comunicazione veloci e affidabili. Infatti, la gran parte delle applicazioni richiede un rapido coordinamento tra sistemi di controllo e sistemi di protezione. Per soddisfare tali requisiti lo standard IEC 61850 è in genere applicato a livello di micro-grid. Tale standard è stato progettato dall'*International Electrotechnical Commission (IEC) – Technical Committee 57*, per l'automazione delle sottostazioni elettriche e può essere implementato su reti TCP/IP utilizzando l'infrastruttura di comunicazione esistente (in alcuni casi con hardware specifico), realizzando con tempi di risposta compatibili con le velocità richieste per l'intervento dei sistemi di protezione. Lo standard definisce modelli di dati astratti che possono essere mappati su diversi protocolli come il Generic Object Oriented Substation Events (GOOSE) ed il Manufacturing Message Specification (MMS). La sezione IEC 61850-7-420 descrive i sistemi di comunicazione per unità di produzione distribuita dell'energia elettrica, che possono essere utilizzati in applicazioni di controllo micro-grid [24][25].

### 1.2.2. Controllo Secondario: Approccio decentralizzato

Il controllo secondario decentralizzato (o distribuito) è finalizzato a risolvere le problematiche di gestione energetica all'interno di una micro-grid fornendo al tempo stesso la massima autonomia possibile per le diverse unità e carichi distribuiti. Sebbene questo approccio si ancora basato su una struttura gerarchica per lo scambio di dati, le decisioni sulle variabili di controllo sono prese a livello locale. L'autonomia decisionale è ottenuta attraverso una struttura gerarchica con almeno 3 livelli: Distribution Network Operator (DNO) e Market Operator (MO), che operano allo stesso livello gerarchico, Micro-Grid Central Controller (MGCC) e Local Controller (LC) [26],[27].

Il DNO è responsabile per la gestione dell'interazione tra la rete di distribuzione e le singole micro-grid e tra più micro-grid vicine. A questa figura è in genere affiancata quella del MO, che è responsabile della gestione della compravendita dell'energia per una specifica area. Sia il DNO che il MO fanno parte del controllo terziario. Il MGCC è responsabile del funzionamento affidabile ed economico della micro-grid e della sua interazione con la rete principale. Infine, i LC controllano le unità di generazione/accumulo distribuito all'interno della micro-grid, o una loro aggregazione, interagendo con i controllori di livello superiore al fine di raggiungere obiettivi sia locali che globali. In un'architettura decentralizzata, una LC può comunicare sia con il MGCC che con altri LC al fine di condividere informazioni, richiedere/offrire un servizio e scambiare le diverse informazioni pertinenti al funzionamento della micro-grid [27].

Partendo dalle suddette considerazioni, i sistemi di controllo secondari decentralizzati possono essere gestiti secondo logiche Multi-Agent. Un Multi-Agent System (MAS) può essere descritto come un sistema composto da più agenti intelligenti (hardware o software), che acquisiscono, monitorano ed elaborano informazioni locali ed interagiscono tra loro al fine di raggiungere molteplici obiettivi sia



---

a livello locale che globale. Le prestazioni in termini di connettività, funzionalità e responsabilità relative a ciascun agente svolgono un ruolo chiave nelle prestazioni dell'intero sistema. In particolare, un agente può essere definito "intelligente" se, a differenza di un componente di potenza convenzionale (ad esempio un relè), è caratterizzato da reattività (capacità di mostrare reazioni ai cambiamenti nell'ambiente), proattività (capacità di agire in anticipo in base a specifiche previsioni) e capacità di comunicazione. Sebbene gli agenti possano comunicare tra loro e/o con entità di controllo che operano a livello gerarchico superiore, gran parte del controllo distribuito si basa sulla loro autonomia nell'esecuzione di operazioni locali.

Un controllo secondario basato su logiche MAS per micro-grid è stato proposto per la prima volta in [28], come soluzione per il funzionamento coordinato di micro-grid in un *market environment* competitivo con la presenza di sistemi di generazione gestiti da più proprietari. I principali attori energetici della micro-grid sono raggruppati e rappresentati da diversi agenti che interagiscono nel mercato al fine di determinare le condizioni di funzionamento ottimali per la micro-grid. In particolare, le singole utenze, i sistemi distribuiti di produzione/accumulo di energia elettrica e la rete elettrica principale partecipano al mercato, inviando offerte per la compra-vendita dell'energia al MGCC, in base alle loro specifiche esigenze in termini di disponibilità, funzioni di costo, limitazioni tecniche, aspettative e previsioni. Il MGCC regola il mercato, incrociando le offerte di acquisto e vendita dell'energia, ottimizzando le entrate economiche per la micro-grid e per i singoli sotto-componenti e garantendo al tempo stesso l'opportuno coordinamento tra sistemi di produzione e accumulo dell'energia elettrica. Specifici agenti addizionali possono essere assegnati a differenti compiti come il load shifting e la regolazione del carico, per consentire i servizi di *demand-side management* [29].

La pianificazione di operazioni che coinvolgono a più stadi di controllo gerarchico, diventa un problema particolarmente rilevante negli schemi di controllo decentralizzati. Infatti, in questo caso, le informazioni necessarie riguardanti lo stato del sistema, le funzioni di costo, le previsioni del carico e della potenza proveniente da fonti non programmabili non sono disponibili per tutti gli agenti. Una possibile soluzione proposta in letteratura [30] è l'impiego di agenti aggiuntivi (denominati *service agents*) che forniscono servizi ausiliari, come ad esempio quelli di *weather forecasting* e di *database*, ai local controllers al fine di consentire una migliore gestione delle risorse energetiche in un orizzonte operativo più esteso. L'architettura di un controllo secondario decentralizzato con service agent e la relativa struttura interna di un LC sono mostrati in **Fig. 10**.

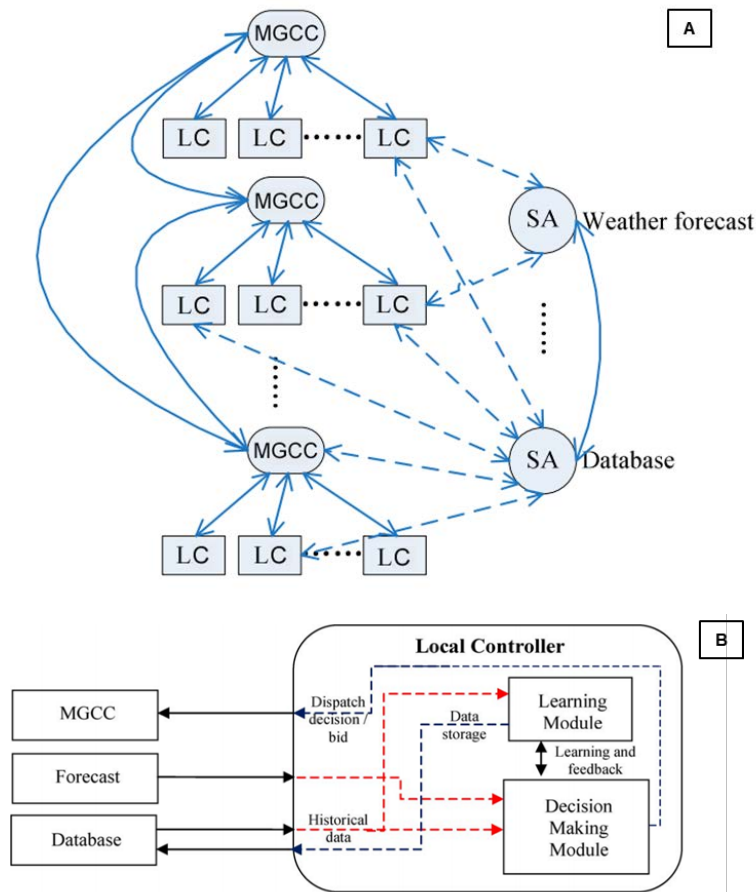


Fig. 10 Architettura di un controllo secondario decentralizzato con service agent (A) e relativa struttura interna del LC (B).

Come mostrato dagli schemi i Service Agent possono anche operare a livelli di controllo gerarchico superiori fornendo servizi di supporto anche ai MGCC.

### 1.3. Controllo Terziario

Il controllo terziario rappresenta il livello di controllo più alto della struttura gerarchica presentata ed è delegato al raggiungimento di set point "ottimali" a lungo termine, tipicamente basati sui requisiti del sistema elettrico a cui è connessa la micro-grid. Tale tipologia di controllo è responsabile del coordinamento di più micro-grid connesse allo stesso sistema elettrico e della comunicazione di specifiche esigenze o richieste da parte della rete ospitante (es. supporto di tensione, regolazione di frequenza, ecc.). Ad esempio, la gestione complessiva della potenza reattiva per una rete elettrica, che contiene diverse micro-grid, potrebbe essere ottenuta coordinando adeguatamente, attraverso il controllo terziario, l'immissione di potenza reattiva da parte di generatori e microgrid, in base ad un approccio centralizzato di minimizzazione delle perdite per l'intera rete. Il livello di controllo terziario opera in genere in tempi che sono dell'ordine di alcuni minuti, fornendo segnali ai controlli di livello secondario delle microgrid e ad altri sottosistemi interconnessi alla rete elettrica. I sistemi di controllo secondario, a loro volta, vanno a coordinare i controlli primari all'interno delle singole microgrid e dei relativi sotto-sistemi nel giro di pochi minuti. In fine, come detto precedentemente, i controlli primari reagiranno istantaneamente alle informazioni ricevute dall'esterno.

#### 1.4. Interfacce di controllo del dimostratore di micro-grid

L'implementazione delle strategie di controllo per il dimostratore di micro-grid realizzato nell'ambito di questo progetto è basata sull'architettura gerarchica descritta nei paragrafi precedenti, con un controllo secondario di tipo centralizzato basato sul sistema di acquisizione e controllo descritto nella relazione tecnica del POA 2015.

I singoli convertitori che costituiscono il dimostratore sono stati opportunamente configurati per poter essere controllati in tensione e/o in corrente mediante segnali analogici esterni 0-10 V. Il controllo direzionale dei flussi energetici è invece ottenuto mediante segnali digitali a 5V. Il sistema di controllo è stato quindi realizzato mediante lo sviluppo di interfacce Labview. A riguardo, in Fig. 11 è riportata la schermata di una delle interfacce Labview realizzate per il controllo del dimostratore.

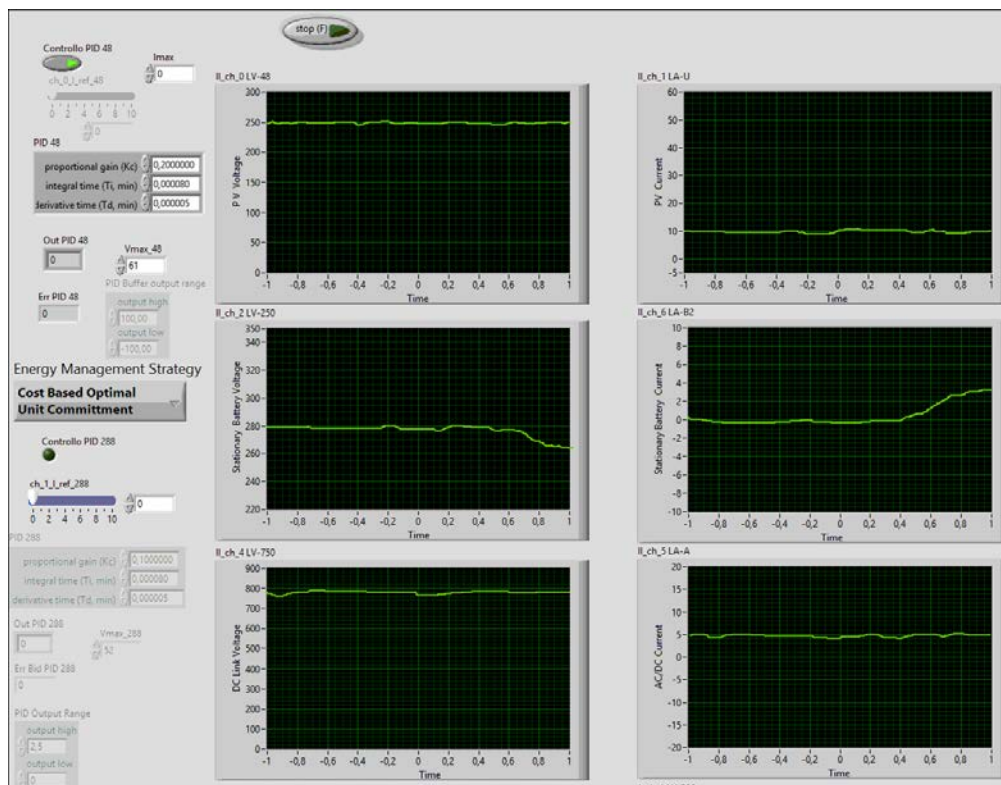


Fig. 11 Schermata interfaccia Labview per il controllo del dimostratore di micro-grid.

Le interfacce software sono state implementate mediante la programmazione a blocchi in Labview, avvenuta con il supporto dei tool LabVIEW Control Design and Simulation Module. In Fig. 12 si riporta la *block diagram* di primo livello per la programmazione dell'interfaccia Labview.

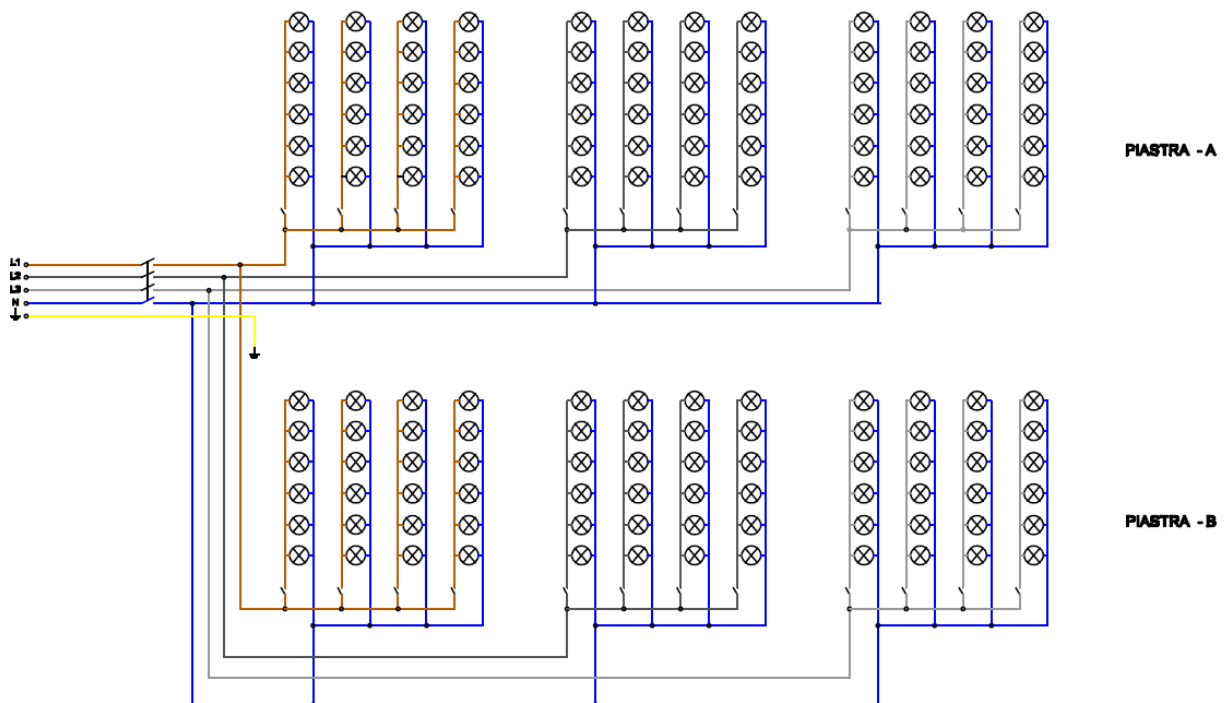


controllo dei sistemi fotovoltaici possono essere valutate e confrontate a partire dal modello del dimostratore realizzato nell'ambito delle attività del PAR 2015.

In particolare, è stata svolta una prima fase di caratterizzazione sperimentale dei moduli fotovoltaici, sia in condizioni di irraggiamento uniformi che in condizioni di mismatching. I risultati ottenuti hanno consentito di migliorare e validare sperimentalmente i modelli realizzati per l'impianto fotovoltaico nell'ambito del PAR 2015. Successivamente, in base ai modelli ottenuti, le diverse architetture di integrazione, per l'impianto fotovoltaico connesso al dimostratore, sono state valutate e confrontate in ambiente simulazione.

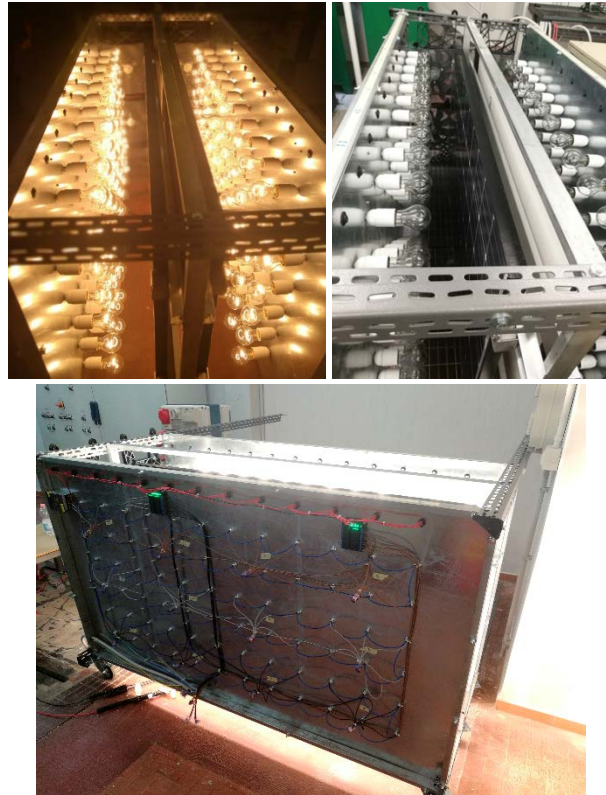
### 2.1. Caratterizzazione sperimentale dei moduli fotovoltaici

L'attività di caratterizzazione dei moduli fotovoltaici, svolta nell'ambito del progetto, è finalizzata a validare i modelli di simulazione realizzati ed a fornire dati utili sul comportamento dei pannelli in possibili condizioni di mismatching. In particolare, al fine di creare condizioni di test ripetibili, è stato realizzato un sistema di test per i singoli pannelli basato su lampade ad incandescenza da 100 W, posizionate su 2 apposite piastre forate. A riguardo, sono state impiegate 72 lampade per piastra, al per poter regolare l'illuminazione di ogni singola cella. Lo schema elettrico del sistema realizzato per il test di moduli fotovoltaici è riportato in *Fig. 13*.



*Fig. 13* Schema elettrico del sistema da laboratorio per test fotovoltaico.

Sono stati inoltre predisposti specifici relè da 5 V e dimmer di regolazione per poter controllare le lampade in gruppi da 6 e simulare da remoto specifiche condizioni di ombreggiamento. Il sistema è stato infine dotato di ventole di raffreddamento per evitare l'eccessivo surriscaldamento dei moduli fotovoltaici durante i test. Si riporta in *Fig. 14* una serie di immagini del sistema realizzato.



*Fig. 14 Sistema da laboratorio per caratterizzazione moduli fotovoltaici.*

Grazie al sistema di test per caratterizzazione moduli fotovoltaici è stato possibile analizzare sperimentalmente il comportamento dei moduli fotovoltaici Panasonic N240 HIT, che costituiscono il campo fotovoltaico realizzato presso il CNR Istituto Motori. In particolare sono stati svolti diversi test per differenti condizioni di illuminazione, al variare del carico. Le variazioni di carico sono state realizzate mediante un carico elettronico ITECH IT8814C, controllabile sia da pannello che mediante segnali di riferimento analogico. Le principali caratteristiche del carico elettronico sono riportate in Tabella 1.



Tabella 1. Principali caratteristiche carico elettronico ITECH IT8814C.

Model		IT8814C	
Rated value ( 0-40 °C)	Input voltage	0~120V	
	Input current	0~24A	0~240A
	Input power	1500W	
	Min. operating voltage	0.15V/24A	1.5V/240A
Constant voltage mode	Range	0.1~18V	0.1~120V
	Resolution	1mV	10mV
	Accuracy	$\pm(0.025\%+0.05\%FS)$	$\pm(0.025\%+0.05\%FS)$
Constant current mode	Range	0~24A	0~240A
	Resolution	1mA	10mA
	Accuracy	$\pm(0.05\%+0.1\%FS)$	$\pm(0.05\%+0.1\%FS)$
Constant resistance mode *1	Range	0.01 $\Omega$ ~10 $\Omega$	10 $\Omega$ ~7.5K $\Omega$
	Resolution	16 bit	
	Accuracy	0.01%+0.08S *2	0.01%+0.0008S
Constant power Mode *3	Range	1500W	
	Resolution	100mW	
	Accuracy	0.2%+0.2%FS	
Dynamic mode			
CC mode			
T1&T2	20uS~3600S /Res:1 uS		
Accuracy	5uS $\pm$ 100ppm		
Ascending/descending slope *4	0.0001~0.25A/uS	0.001~2.5A/uS *	
Minimum rise time *5	$\approx$ 60uS	$\approx$ 60uS	
Measuring range			
Read-back voltage	Range	0~18V	0~120V
	Resolution	0.1 mV	1 mV
	Accuracy	$\pm(0.025\%+0.025\%FS)$	$\pm(0.025\%+0.025\%FS)$
Read-back current	Range	0~24A	0~240A
	Resolution	1mA	10mA
	Accuracy	$\pm(0.05\%+0.05\%FS)$	
Read-back power	Range	1500W	
	Resolution	100mW	
	Accuracy	$\pm(0.2\%+0.2\%FS)$	
Protection range			
Overpower protection	$\approx$ 1550W		
Overcurrent protection	$\approx$ 26.4A	$\approx$ 264A	
Overvoltage protection	$\approx$ 130V		
Overtemperature protection	$\approx$ 85°C		

I primi test hanno riguardato la caratterizzazione di un modulo fotovoltaico in condizioni di irraggiamento uniformi. A titolo di esempio, in Fig. 15 sono riportati i principali risultati in termini di caratteristica V-I del modulo fotovoltaico, per un valore di irraggiamento pari a 680 lux.

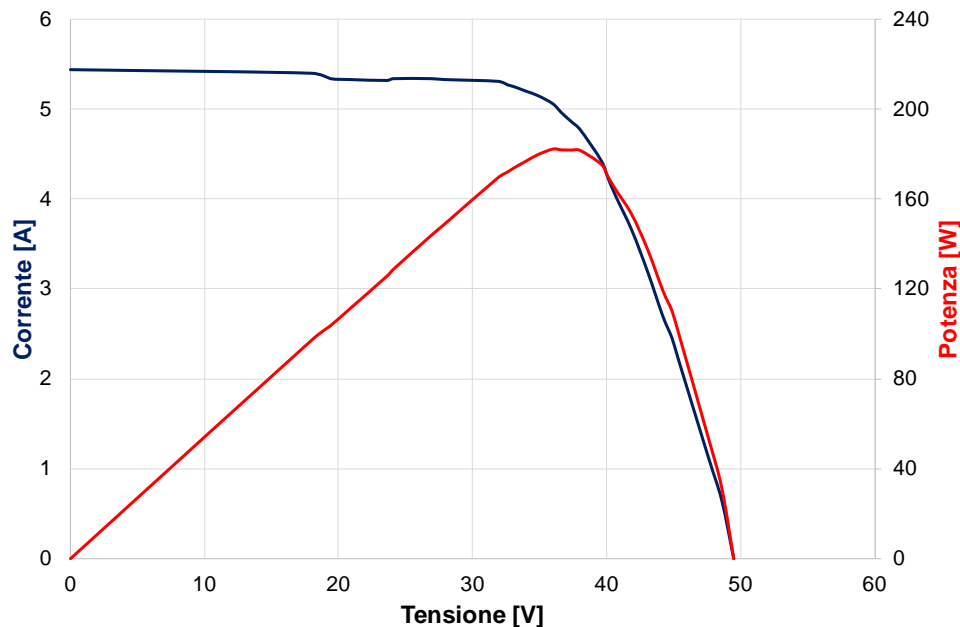


Fig. 15 Caratteristica sperimentale V-I del modulo fotovoltaico Panasonic HIT 240 per un valore di irraggiamento pari a 680 lux.

Come riportato in figura, la corrente di corto circuito è pari a circa 5.5 A. Il pannello continua a fornire tale valore di corrente fino ad una tensione di circa 35 V. Il punto a massima potenza (MPP) è ottenuto per una tensione pari a circa 38 V, con un valore di potenza elettrica pari a circa 180 W.

Ulteriori test di caratterizzazione sono stati rivolti all'analisi del comportamento dei moduli fotovoltaici in condizioni di irraggiamento non uniformi. A titolo di esempio si fa riferimento alle condizioni di mismatching riportate in Fig. 16, in cui è stato spento un gruppo di 6 lampade.

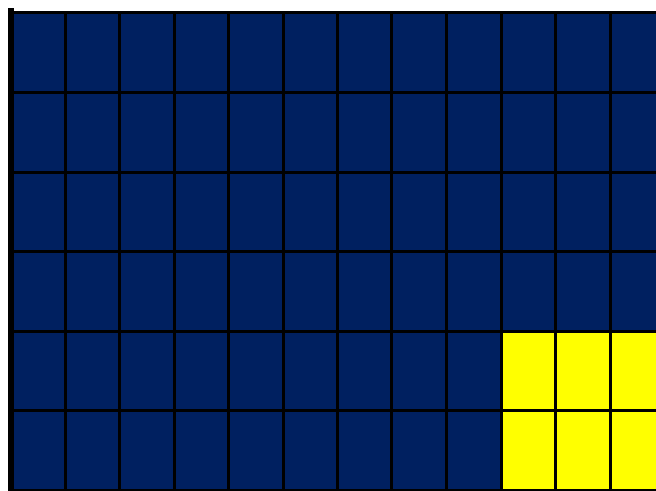


Fig. 16 Condizioni di irraggiamento non uniforme simulato mediante spegnimento lampade.

La caratterizzazione sperimentale, in tali condizioni di mismatching, è stata svolta al variare del carico, per un singolo pannello. I risultati, in termini di caratteristica tensione-corrente, ottenuti in tale configurazione sono riportati in Fig. 17.



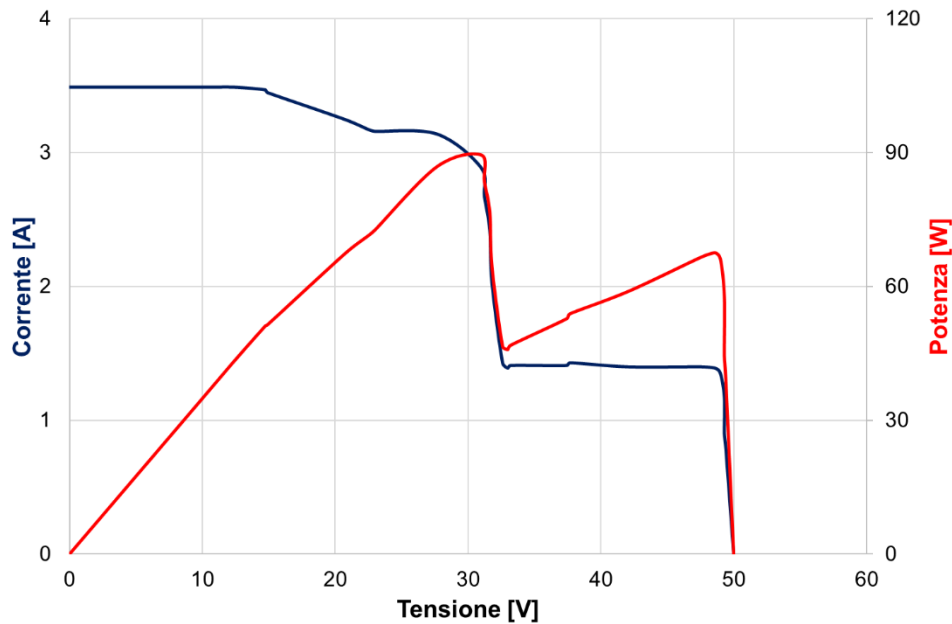


Fig. 17 Caratteristica sperimentale V-I del modulo fotovoltaico Panasonic HIT 240 in condizioni di mismatching.

In particolare, il valore complessivo di corrente di corto circuito del pannello è di circa 3.5 A. All'aumentare della tensione, tale valore si riduce progressivamente, fino a provocare l'intervento del primo diodo di bypass ad una tensione di circa 35 V, con una conseguente riduzione a gradino della corrente erogata dal pannello fotovoltaico. Infatti, come mostrato in Fig. 18, i moduli fotovoltaici sono equipaggiati con 3 diodi di bypass che intervengono cortocircuitando stringhe di 24 celle in caso di fenomeni di mismatching.

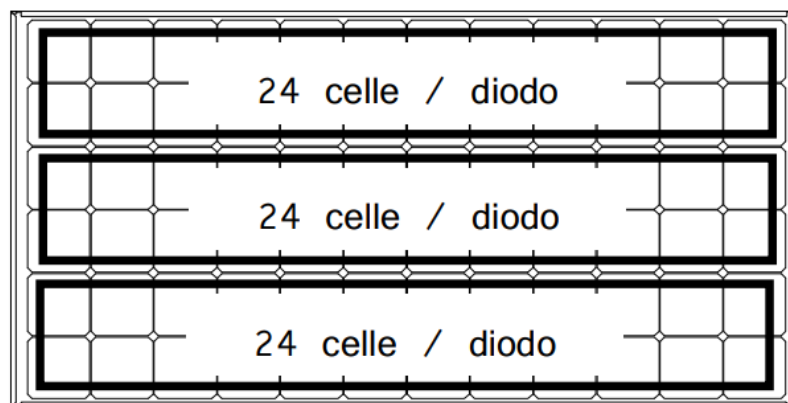


Fig. 18 configurazioni celle/diodi dei moduli Panasonic HIT 240.

Le attività svolte sui singoli pannelli hanno quindi consentito di ottenere informazioni sperimentali utili al miglioramento del modello di dimostratore di micro-grid già presentato nel POA 2015 ed all'identificazione ed analisi delle migliori strategie di integrazione del sistema fotovoltaico con il dimostratore.

## 2.2. Architetture di Integrazione del sistema fotovoltaico con la micro-grid

Grazie alla attività di modellistica e caratterizzazione sperimentale è stato possibile analizzare e confrontare specifiche architetture per l'integrazione del campo fotovoltaico con il dimostratore di

micro-grid oggetto delle attività 2.4, prevedendo una possibile connessione sia lato AC che lato DC. A riguardo, sono state prese in considerazione diverse architetture di conversione, basate sulla presenza di convertitori che implementano algoritmi di Maximum Power Point Tracking (MPPT), a *livello concentrato (CMPPT)* o a *livello distribuito (DMPPT)*. Tali architetture sono schematicamente riportate in Fig. 19 [31].

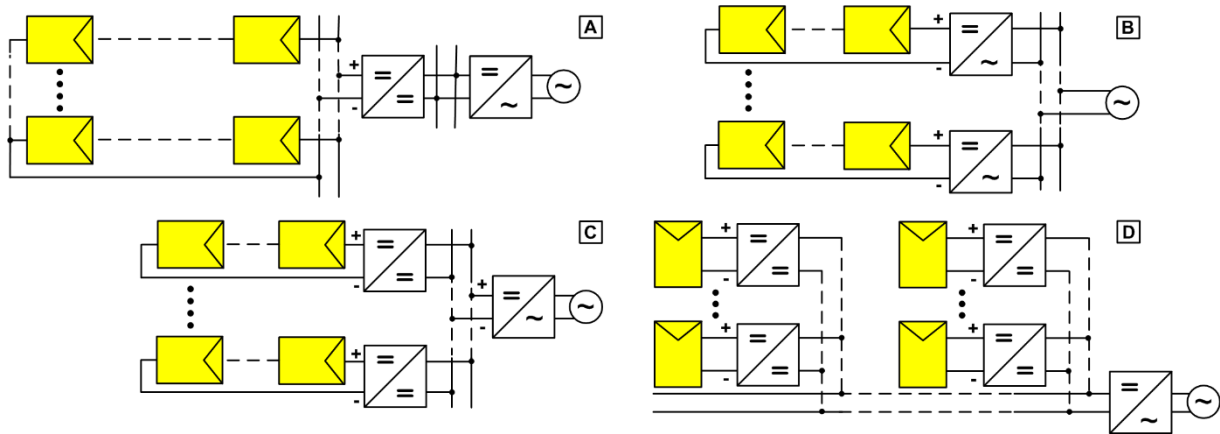


Fig. 19 Architetture di integrazione del campo fotovoltaico con la micro-grid: (A) CMPPT con singola conversione DC/AC, (B) DMPPT al livello di stringa con conversione diretta DC/AC, (C) DMPPT a livello di stringa con conversione DC/DC e connessione al DC-link (D) DMPPT a livello di pannello con connessione al DC-Link.

In particolare, con l'impiego di un singolo convertitore DC/DC con CMPPT (A), tutti i moduli fotovoltaici sono collegati elettricamente in serie/parallelo ed il controllo MPPT è affidato al convertitore DC/DC. Con l'architettura riportata in (B) ed in (C) il controllo DMPPT viene eseguito a livello di stringa, attraverso l'impiego di un convertitore DC/AC (B) o DC/DC (C) per ogni singola stringa. Questa tipologia di DMPPT si basa sull'idea che diverse stringhe possono essere caratterizzate da differenti condizioni operative ottimali, che possono essere opportunamente tenute in conto andando a lavorare in base alle caratteristiche tensione-corrente delle singole stringhe per estrarne la massima potenza. Il DMPPT può essere realizzato anche controllando singoli moduli PV (D), al fine di raggiungere condizioni di funzionamento che consentono di estrarre la massima potenza elettrica da ciascun modulo. Tuttavia, allo stato attuale della tecnologia, questa soluzione comporta un aumento rilevante del costo complessivo del sistema di controllo a causa della maggiore complessità di gestione dovuta all'elevato numero di convertitori. Altre soluzioni presenti in letteratura [32],[33] possono essere considerate come un ibrido delle tecniche sopra citate e sono generalmente basate sull'uso di convertitori modulari multilivello.

L'algoritmo considerato per l'implementazione del controllo MPPT è il classico *perturbe and observe (P&O)* il cui diagramma di flusso è riportato nella seguente Fig. 20.

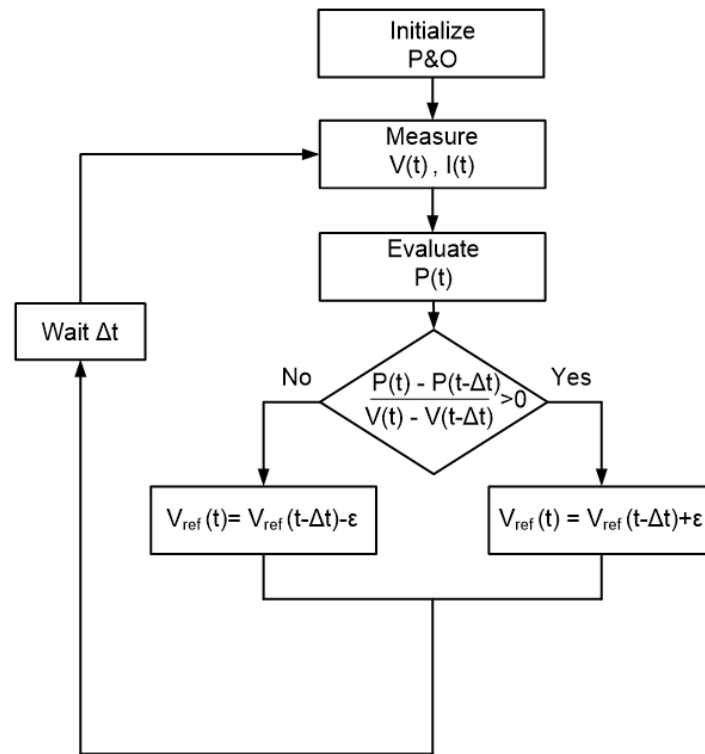


Fig. 20 Schema di Funzionamento dell' algoritmo MPPT P&O.

Tale algoritmo si basa sul fatto che, come ben noto, la caratteristica potenza-tensione di una singola cella fotovoltaica può essere suddivisa in due fasi. Una prima fase è caratterizzata da valori di potenza che crescono all'aumentare della tensione. Successivamente, superato il valore di tensione,  $V_{MPP}$ , corrispondente alla massima potenza erogabile dal modulo fotovoltaico per le condizioni di temperatura ed irraggiamento in esame, si ha una seconda fase caratterizzata da tensione crescente e potenza decrescente. Pertanto, il funzionamento della singola cella fotovoltaica può essere ottimizzato, in termini di potenza, analizzando l'andamento delle variazioni  $\Delta P/\Delta V$ . In particolare, sulla base del diagramma di flusso riportato in Fig. 20, il convertitore ciclicamente imposta una variazione,  $\varepsilon$ , per il riferimento di tensione,  $V_{ref}$ , ed analizza l'effetto di tale variazione sulla potenza,  $P$ , del sistema fotovoltaico, in termini di  $\Delta P/\Delta V$ . Se tale variazione è positiva la tensione di riferimento viene incrementata di un'ulteriore variazione,  $\varepsilon$ , altrimenti viene decrementata della stessa variazione ma con segno negativo,  $-\varepsilon$ .

Partendo dalle suddette considerazioni, è stato quindi possibile simulare e confrontare le diverse tipologie di architetture MPPT presentate in Fig. 19. Per tali analisi, è stata fatta l'ipotesi semplificativa di trascurare le perdite legate all'efficienza di conversione dei singoli convertitori ed ai ritardi di attuazione del controllo MPPT.

Per effettuare un confronto dettagliato tra le architetture MPPT sopra elencate, sono stati presi in considerazione due differenti casi studio, caratterizzati da una diversa distribuzione dell'irraggiamento. Nel primo caso studio, tutti i pannelli fotovoltaici sono esposti allo stesso livello di irraggiamento uniforme, che è fissato a  $600 \text{ W/m}^2$ . Nel secondo caso, è stata invece considerata una distribuzione di irraggiamento non uniforme con differenti valori per ciascun pannello. La distribuzione di irraggiamento considerata per quest'ultimo caso studio è riportata in Fig. 21.

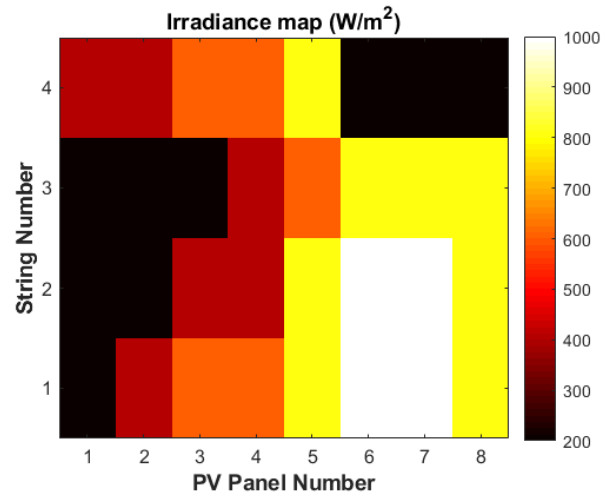


Fig. 21 Caso Studio 2: campo fotovoltaico con irradiazione non uniforme. Ogni cella colorata rappresenta l'irraggiamento medio per un pannello fotovoltaico.

È chiaro che, nel primo caso studio, in cui l'impianto fotovoltaico è soggetto ad una distribuzione di irraggiamento di tipo uniforme, l'MPPT centralizzato può essere considerato più conveniente. Infatti in tali condizioni di irraggiamento, l'impiego di un singolo convertitore riduce i costi e la complessità del sistema senza andare ad influire negativamente sulla potenza erogata dal campo fotovoltaico. Risultati più interessanti sono invece ottenuti per il secondo caso studio, dove ogni pannello fotovoltaico è caratterizzato da differenti condizioni operative. In questo caso, il controllo MPPT centralizzato impone un unico valore di tensione comune per tutte le stringe connesse in ingresso al convertitore. Il controllo MPPT, distribuito a livello di stringa, opera invece sul valore di tensione che massimizza la potenza di singola stringa, forzando i singoli pannelli fotovoltaici ed erogare tutti la stessa corrente, che corrisponde necessariamente alla corrente erogata dalla singola di stringa. Pertanto, alcuni dei pannelli fotovoltaici che compongono le stringhe saranno costretti a lavorare lontano dal loro punto di funzionamento ottimale. I risultati ottenuti in simulazione per le 4 stringhe del campo fotovoltaico sono mostrati in Fig. 22, che mostra la potenza massima erogata dalle stringhe in funzione del valore di corrente di stringa. Con il controllo MPPT distribuito a livello di pannello, per le specifiche condizioni di irraggiamento considerate, ciascun modulo lavora nel punto di massima potenza consentito. In questo caso, la potenza della stringa è data quindi dalla somma della potenza estratta dai singoli moduli fotovoltaici. I risultati riportati in Fig. 23 mostrano la potenza massima ottenuta per ciascun modulo fotovoltaico nelle condizioni di irraggiamento in presenza di mismatching.

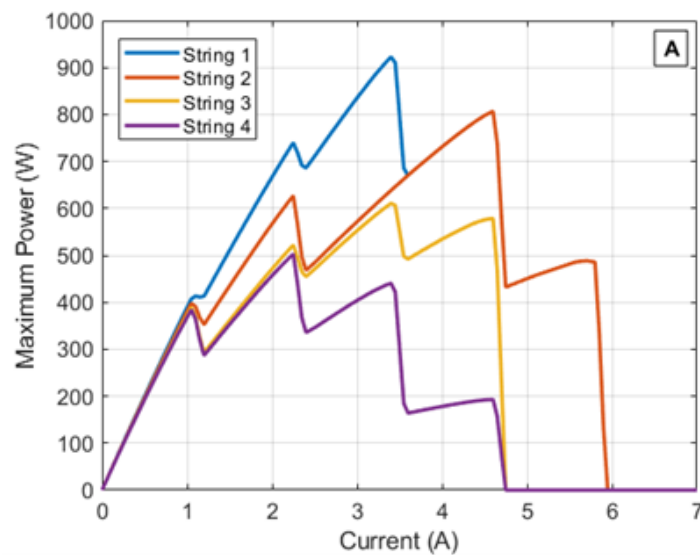


Fig. 22 Potenza massima erogata dalle singole stringhe in funzione della corrente con controllo DMPPT a livello di stringa.

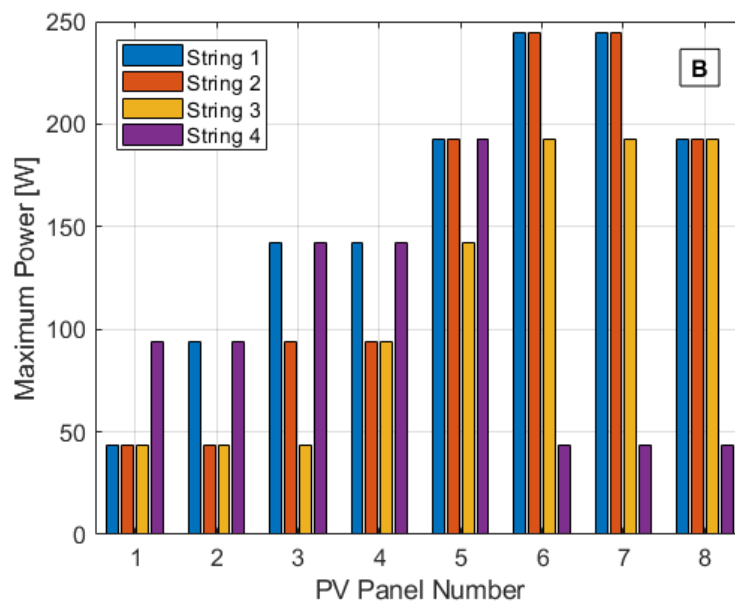


Fig. 23 Potenza massima erogata dai singoli moduli fotovoltaici con DMPPT a livello di pannello.

Dal confronto tra le tre architetture MPPT è quindi possibile ottenere differenti risultati in funzione della distribuzione di irraggiamento solare considerata. L'analisi di tali risultati è riportato in Fig. 24, in termini di potenza massima ed irraggiamento.

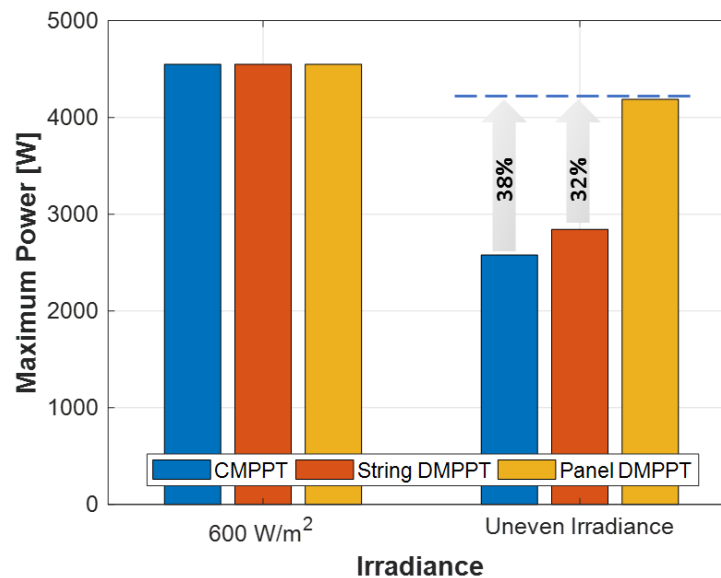


Fig. 24 Confronto tra le diverse tecniche MPPT per il caso studio 1 e 2.

In particolare, per il primo caso studio, con un irraggiamento uniforme di  $600 \text{ W/m}^2$ , le tre tecniche MPPT danno esattamente lo stesso risultato fornendo una potenza massima complessiva di circa  $4,5 \text{ kW}$ . In questo caso la scelta può quindi essere orientata su soluzioni a costo più ridotto. Per il secondo caso studio, con distribuzione irregolare dell'irraggiamento, il CMPPT raggiunge una potenza massima di soli  $2,6 \text{ kW}$ . Prestazioni migliori sono invece ottenute con l'algoritmo MPPT distribuito a livello di stringa e di pannello che raggiungono valori di potenza massima superiori, rispettivamente del 32% e del 38% rispetto al semplice CMPPT.

Alla fine di questa analisi è necessario chiarire che il secondo caso studio è considerato come worst case in quanto una vasta area di pannelli fotovoltaici è coperta da ombre. Tale condizione operativa estrema limita le prestazioni del CMPPT e le tecniche DMPPT a livello di stringa. I risultati ottenuti suggeriscono che, in caso di frequenti condizioni di irraggiamento irregolari, le tecniche di MPPT che lavorano a livello di stringa o di pannello possono comportare un gran numero di vantaggi rispetto alle tecniche di MPPT centralizzate. D'altro canto, soluzioni avanzate basate sulla riduzione del numero di dispositivi di commutazione potrebbero aiutare a ridurre i costi relativi alle tecniche MPPT distribuite.

In base ai risultati ottenuti ed alle condizioni di irraggiamento valutate per l'area di Napoli, l'integrazione sperimentale del campo fotovoltaico con il dimostratore di micro-grid realizzato in Istituto Motori, è stata basata su una soluzione con controllo MPPT centralizzato mediante un singolo convertitore DC/DC. L'attività di simulazione e caratterizzazione sperimentale svolta sul sistema fotovoltaico installato in Istituto Motori suggerisce comunque la possibilità futura di analizzare sperimentalmente architetture di conversione più complesse che, anche se caratterizzate da costi maggiori, possono portare ulteriori benefici in termini di potenza elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico.

### 3. Conclusioni

In tale documento sono stati descritti i principali risultati ottenuti per le attività svolte nella Linea Progettuale 2 - 2.4. "Ottimizzazione delle logiche di gestione energetica su dimostratore di smart-grid" nell'ambito del POA 2016-2017, che vanno a completamento dei risultati ottenuti dall'unità di ricerca del CNR Istituto Motori nel POA 2015.

I risultati presentati fanno riferimento alla valutazione di strategie ottimali per la gestione dei flussi energetici in micro-grid, che integrano fonti rinnovabili e sistemi di accumulo stazionari. Tali valutazioni sono state svolte sia dal punto di vista teorico, sia mediante attività sperimentali basate sul dimostratore di micro-grid allestito nei laboratori del CNR – Istituto Motori di Napoli, nell’ambito delle attività del POA 2015.

In particolare, le strategie proposte per la gestione ottimale dei flussi energetici, si basano su un’architettura di controllo che, agendo a diversi livelli gerarchici, consente di ottimizzare il funzionamento di micro-grid, che operano in contesti smart district, in termini di efficienza, power quality e costi dell’energia. A riguardo, l’analisi si è focalizzata principalmente su controlli primari e secondari, sia di tipo centralizzato che distribuito, con particolare riferimento alla regolazione dei singoli convertitori ed all’ottimizzazione dei flussi energetici all’interno della micro-grid. La tematica dell’interfacciamento della micro-grid con la rete elettrica è stata completata ed approfondita con la consulenza di UNIBO-DEI ed ha consentito di confrontare diverse topologie hardware per la realizzazione di convertitori di interfaccia con la rete elettrica, tenendo conto di soluzioni tradizionali hard-switching, soft-switching e WBG.

Specifica attenzione è stata inoltre rivolta all’integrazione della micro-grid con sistemi di generazione da fonte fotovoltaica. A riguardo, è stata svolta preliminarmente un’attività di caratterizzazione in laboratorio di moduli fotovoltaici in differenti condizioni operative. Tali condizioni sono state simulate mediante l’impiego di un carico elettronico programmabile e di un sistema di caratterizzazione, realizzato nei laboratori del CNR - Istituto Motori, in grado di simulare sia condizioni di irraggiamento uniforme che condizioni di mismatching. L’attività di caratterizzazione svolta ha quindi consentito di validare i modelli di simulazione implementati nell’ambito del POA 2015 e di analizzare e confrontare differenti architetture, sia di tipo concentrato che distribuito, e le relative strategie per l’integrazione ottimale dei sistemi fotovoltaici con micro-grid operanti in contesti smart-district.

### **Confronto con i risultati attesi ed eventuali scostamenti rilevati**

Per tale attività non si riscontrano particolari scostamenti rispetto ai risultati attesi. Infatti l’obiettivo principale dell’attività 2.4 è stato pienamente raggiunto con l’analisi ed implementazione sul dimostratore di micro-grid di strategie di gestione e controllo dei flussi energetici, volte all’ottimizzazione della power quality, dell’efficienza e dei costi dell’energia in contesti di tipo smart district. Sono state inoltre analizzate e confrontate diverse architetture e strategie di gestione per l’integrazione ottimale di sistemi fotovoltaici in micro-grid in corrente continua. Per quanto riguarda l’interfacciamento della micro-grid con la rete elettrica, la consulenza di UNIBO-DEI ha consentito di confrontare diverse topologie hardware per la realizzazione di convertitori di interfaccia con la rete elettrica, tenendo conto di soluzioni tradizionali hard-switching, soft-switching e WBG.

### **Deliverables**

Unità di ricerca	DESCRIZIONE DELIVERABLE	RISULTATI QUANTITATIVI
CNR-IM	<b>Report Tecnico:</b> Sviluppo di strategie di controllo per la gestione integrata di uno smart district	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisi strategie di gestione per micro-grid in contesti smart district.</li> <li>• Programmazione di interfacce per l'implementazione delle strategie sul dimostratore mediante i sistemi di acquisizione e controllo.</li> <li>• Analisi e confronto architetture di controllo per l'integrazione di fonti rinnovabili con micro-grid in corrente continua.</li> </ul>

### Diffusione dei risultati

Le attività di diffusione dei risultati sono avvenute mediante partecipazioni, sottomissioni di articoli e gestione sessioni per le seguenti conferenze:

- International Conference on Applied Energy ICAE 2018 che si è tenuta ad Hong Kong dal 22 al 25 Agosto 2018. Il tema della conferenza è "Innovative Solutions for Energy Transitions". I principali topics della conferenza sono: tecnologie di conversione per l'energia rinnovabile, energy management, sistemi di accumulo dell'energia, sistemi energetici intelligenti, geo-energia, smart cities & smart communities.
- Renewable Energy Integration with Mini/Microgrid during REM-2018 che si è tenuta a Rodi dal 28 al 30 Settembre 2018. REM 2018 è una conferenza del Network di Applied Energy. I principali topics della conferenza riguardano sistemi energetici ad Isola, integrazione delle fonti rinnovabili, progettazione e pianificazione energetica in contesti di mini/micro-grid, DC micro-grids, sistemi di accumulo, demand side response, sistemi distribuiti di generazione dell'energia elettrica, sistemi di controllo e protezione in smart-grid.
- International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2018) che si è tenuta ad Amalfi dal 20 al 22 Giugno 2018. I principali topic della conferenza riguardano l'elettronica di potenza, i sistemi di generazione dell'energia elettrica da fonti rinnovabili, smart grid, macchine elettriche, veicoli elettrici stradali e sistemi di automazione industriale.

Sono stati inoltre pubblicati i seguenti paper, in cui è fatto specifico riferimento alle attività di progetto:

- Marino, P., Rubino, G., Rubino, L., Capasso, C., Veneri, O., & Motori, I. (2018, June). A case study of a DC-microgrid for the smart integration of renewable sources with the urban electric mobility. In 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM) (pp. 544-549). IEEE.
- C Capasso, G Rubino, L Rubino, O Veneri. Power architectures for the integration of photovoltaic generation systems in DC-microgrids. Energy Procedia 159, 34-41

Infine, i risultati delle attività di ricerca sono stati presentati al Convegno nazionale Ricerca di Sistema 2019 che si è tenuto a Roma il 10 Aprile 2019 ed al Maker Faire 2018 che si è tenuto a Roma dal 12 al 14 Ottobre 2019.

### Apparecchiature disponibili e acquisite



Per lo svolgimento dell'attività 2.4 sono state utilizzate le seguenti attrezzature disponibili presso il CNR Istituto Motori: schede di acquisizione National Instruments dSpace, oscilloscopi ed alimentatori Tecktronix, carico elettronico ITCH

### **Benefici per gli utenti finali**

Le attività di ricerca proposte in questa Linea Progettuale, nel loro complesso, contribuiranno a favorire gli utenti ed il gestore del sistema elettrico in termini di stabilità, power quality, risparmio energetico e sicurezza dell'infrastruttura di distretti energetici, garantendo un impiego ottimale dei sistemi distribuiti di produzione ed accumulo dell'energia elettrica. Ciò consentirà inoltre di ridurre i tempi di trasferimento tecnologico agli operatori del settore, migliorando l'efficienza di conversione energetica e la qualità/affidabilità del servizio fornito. In generale, quindi, le attività proposte contribuiranno a mettere a disposizione dei beneficiari know-how tecnico scientifico di supporto per la realizzazione di politiche energetiche e la valutazione preliminare delle reali prestazioni energetiche di apparati e sistemi che compongono uno smart district. I beneficiari di tali attività sono pertanto tutti i principali attori del distretto energetico, dalla mobilità elettrica fino ad utenze aziendali ed alle singole utenze domestiche in edifici intelligenti ad alta efficienza energetica.