

## **Allegato B**

### **Scheda di Progetto/Project Form**

*[Da compilare in italiano o inglese. Il numero di caratteri è puramente indicativo.]*

*To be filled in in English or Italian. The number of characters is purely indicative.]*

#### **Titolo del progetto/Project title**

Smart-E (Smart Edge): Una piattaforma IoT edge-cloud per il monitoraggio capillare e continuo della qualità dell'aria atmosferica mediante sensori portatili a basso costo e maggiore controllo al margine.

#### **Referente del progetto/Principal Investigator**

*[Nome, cognome, organizzazione e posizione. Name, surname, organization and role.]*

Patrizia Scandurra, Università di Bergamo, Professore di II fascia nel settore ING-INF/05.

#### **Background e stato dell'arte/Background and state of the art**

(max 3000 caratteri spazi inclusi/characters spaces included)

*[Descrivere quali esigenze del mercato il prodotto/servizio/processo va a soddisfare rispetto a conoscenze esistenti e background. Describe what market needs the product/service/process meets with respect to existing knowledge and background.]*

L'avvento di dispositivi Internet of Thing (IoT), con capacità di calcolo e di connettività impensabili fino a qualche anno fa, apre nuovi scenari d'uso per raccogliere ed elaborare i dati. Grazie all'impiego di reti wireless (come LoRaWAN) è possibile geolocalizzare e connettere a lungo raggio dispositivi IoT (sensori e attuatori) su diverse aree della città, e con protocolli di messaggistica leggeri (come lo standard MQTT, basato sul protocollo TCP/IP di Internet) è possibile interconnettere dispositivi e sistemi su Cloud usando meno energia e banda. L'IoT è sempre più utilizzato, ad esempio, nelle applicazioni di smart city, come i sistemi di parcheggio intelligenti e di monitoraggio dell'ambiente. L'ingegnerizzazione di tali sistemi è però impegnativa perché deve fronteggiare problemi di latenza, affidabilità, mancanza di banda, e dinamiche nell'ambiente, difficili da prevedere e risolvere mediante il modello di computazione cloud convenzionale. Un modello di distribuzione edge-cloud, nel quale l'elaborazione dei dati e il controllo delle operazioni avviene in parte il più vicino possibile a dove i dati vengono generati (computazione *al margine*) e in parte su un server cloud, è una soluzione chiave per affrontare queste sfide [1] [2]. Secondo il rapporto *State of the Edge 2021* [1], si prevede che il nascente mercato dell'edge computing tenderà a crescere enormemente nei prossimi anni (2019-2028), alimentato da una gamma crescente di casi d'uso e servizi digitali, in parte per affrontare le sfide create dalla pandemia COVID-19, con richieste di risorse di calcolo distribuite, dispositivi e infrastrutture edge (dai server nei data center metropolitani a

microcontrollori nei dispositivi presso i clienti) e requisiti di servizio chiave (come bassa latenza e larghezza di banda ridotte) .

Un caso d'uso di forte interesse è quello dei sistemi IoT per il monitoraggio della qualità dell'aria in spazi aperti. In questo ambito, un ruolo essenziale è svolto dalle reti di controllo nazionale delle Agenzie regionali per la protezione ambientale (ARPA), mediante l'impiego di stazioni di monitoraggio fisse e di laboratori mobili, dai costi non contenuti, sia di acquisto che di gestione. La piattaforma Smart-E proposta farebbe da cerniera tra le stazioni di monitoraggio fisse e quelle mobili mediante una rete scalabile di sensori IoT a basso costo capace di rilevare e monitorare la qualità dell'aria atmosferica in modo più capillare. Altre iniziative sul medesimo tema, degne di nota, sono i progetti AirSense [3] [4], CITI-SENSE [5] e Citi-Sense-MOB [6]. I progetti Wiseair [7] e Airly [8] puntano invece a creare una nuova sensibilità attraverso una rete di sensori da posizionare presso le abitazioni o i luoghi di lavoro. Un approccio basato su sensori in movimento è stato seguito dai progetti SwarmBike [9], Sense Square [10] e UrVAMM [11], che invece hanno inserito i loro sensori su autoveicoli in movimento, potendo mappare zone diverse della città.

### **Originalità del progetto e innovazione / Project originality and innovation**

(max 1000 caratteri spazi inclusi/characters spaces included)

*[Descrivere in che modo e con quali elementi di novità il progetto colmi le lacune, risponda alle esigenze descritte precedentemente e rappresenti un significativo passo avanti. Describe how and with what new elements the project fills the gaps, responds to the above-mentioned needs and is a significant step forward.]*

Smart-E punta ad essere una piattaforma IoT per il monitoraggio continuo della qualità dell'aria esterna con una rete di sensori portatili a basso costo che offre (i) copertura spaziale più capillare rispetto alle stazioni fisse di riferimento e (ii) pre-elaborazione e controllo su dispositivi edge a basso consumo e dimensioni contenute, inclusa la diagnosi di problemi (come dispositivi silenti e rete instabile). Un sistema siffatto può essere usato per condurre campagne preliminari di analisi dell'aria. Il progetto ha come obiettivo a lungo termine quello di sperimentare la piattaforma Smart-E in altri ambiti legati al *monitoraggio ambientale*, come ad esempio il monitoraggio della salute dei lavoratori, e altri di interesse per l'amministrazione della città di Bergamo. L'impiego di tali piattaforme verticali di Smart City avranno nel futuro un impatto importante sugli enti locali e sui loro modelli di governance per promuovere centri urbani più innovativi ma più sostenibili.

### **Analisi di mercato e concorrenti/Market analysis and competitors**

(max 2000 caratteri spazi inclusi/characters spaces included)

*[Descrivere il mercato, eventuali barriere, risultati di ricerche di mercato, dimensioni e prospettive di sviluppo del segmento di mercato, il profilo dei principali concorrenti e lacune dei loro prodotti/servizi/processi. Describe the market, any barriers, the results of market*

*researches, the size and development prospects of the market segment, the profile of the main competitors and gaps in their products/services/processes.]*

Sebbene nascente, diversi fornitori di servizi cloud stanno proponendo infrastrutture edge e strumenti software per lo sviluppo nativo di applicazioni IoT nei loro ecosistemi edge-cloud. Esempi di tali iniziative sono *Azure IoT Edge* [12], *Cisco IOx* [13], *IBM Edge Application Manager* [14] e *Google Anthos* [15]. Anche se usano protocolli e standard aperti, tali soluzioni promuovono lo sviluppo di applicazioni *cloud native* con il conseguente *vendor lock-in*.

Esistono iniziative aperte basate su framework e protocolli standard per creare applicazioni IoT su dispositivi edge, come ad esempio i progetti IoT Mozilla WebThings e OpenHAB [16] [17] in ambito smart home e Things Stack [18] per reti LoRaWAN. Similmente a tali iniziative, l'ingegnerizzazione della piattaforma Smart-E si baserà su standard aperti e modelli di caso d'uso [19] nel definire una API (Application Programming Interface) leggera e uniforme per lo scambio di messaggi di controllo e gestione remota di dispositivi IoT per il *monitoraggio ambientale*. Verranno considerati schemi architetturali di loop di *controllo decentralizzato* [20] [21] come in alcuni prototipi di ricerca proposti in forma di simulatori [22] o sperimentati su scala ridotta in scenari di smart home [23], [24] o in spazi aperti [25] e reti di smart grid [26].

Il mercato del monitoraggio della qualità dell'aria con sensori a basso costo è giovane e, per questo, di difficile lettura e previsione. Ad oggi non vi è una realtà che sia riuscita a imporsi sulla concorrenza. Principalmente, si possono individuare due categorie di portatori di interesse: soggetti privati e soggetti istituzionali. Questi ultimi, più influenti, potrebbero essere interessati a condurre delle mirate campagne di monitoraggio del territorio, per poi adottare delle misure correttive. Tra i progetti menzionati in precedenza, solo tre sono giunti a un livello di maturazione per affacciarsi sul mercato e configurarsi come concorrenti: Wiseair [7], Sense Square [10] e Airly [8].

## **Sviluppo del progetto/Project plan**

(max 10000 caratteri spazi inclusi, escluse immagini e tabelle/characters spaces included, excluding figures and tables)

***[Azioni pianificate, milestones, deliverables, risultati attesi, eventuale TRL di partenza e arrivo, ruoli e responsabilità, calendario (Gantt), analisi opportunità/rischi e soluzioni alternative (SWOT), fattibilità e scalabilità. Planned actions, milestones, deliverables, expected results, possible start and end TRL, roles and responsibilities, calendar (Gantt), opportunity/risk analysis and alternative solutions (SWOT), feasibility and scalability.]***

Il progetto Smart-E ha come obiettivo la progettazione e sviluppo di una piattaforma edge-cloud per la gestione di dispositivi IoT di piccole dimensioni, come dispositivi *sentinella* (*watcher*) realizzati con sensori a basso costo, portatili e geolocalizzabili che si intende impiegare per il monitoraggio continuo e capillare della qualità dell'aria esterna. Il gruppo di ricerca proponente ha già realizzato un primo prototipo di dispositivo sentinella su scheda Arduino come primo studio di fattibilità, insieme ad un web server che espone come interfaccia verso le sentinelle una API basata sul protocollo HTTP/REST e un formato dati

JSON per ricevere i valori misurati e memorizzarli in una base di dati. Si ritiene, pertanto, che il livello di maturità di partenza sia TRL3, poiché i principi e il concetto della tecnologia sono stati formulati in forma sperimentale attraverso simulazioni e piccole sperimentazioni. L'obiettivo, alla fine dei 18 mesi previsti dal progetto, è di passare a uno stadio TRL6, attraverso lo sviluppo di una piattaforma di monitoraggio e controllo via software, secondo il modello di distribuzione edge-cloud, di dispositivi IoT terminali e *gateway* di piccole dimensioni. Si vuole inoltre dimostrarne la validità in un ambito industrialmente rilevante quale quello del monitoraggio della qualità dell'aria. Al fine di aumentare l'efficienza e l'affidabilità del sistema IoT, si renderà possibile (vedi Figura 1) la distribuzione ed esecuzione di micro-servizi software sui dispositivi IoT edge o *gateway*, in grado di connettersi ad un server/hub cloud via Internet. Tali micro-servizi software riguardano la pre-elaborazione dati (come filtraggio, aggregazione e prioritizzazione), per ridurre i flussi di informazione e ottenere set di valori più puliti prima di inviarli ed elaborarli in cloud per ulteriori analisi. In aggiunta, sempre sui dispositivi edge, si realizzeranno via software funzioni di controllo decentralizzato per automatizzare e/o rendere più robusta la diagnosi e mitigazione di problemi e malfunzionamenti dei dispositivi stessi (quali livelli bassi di batteria, dispositivi silenti, rete instabile con possibile perdita di dati, ecc.). Un noto modello di riferimento per organizzare il controllo autonomo di un sistema software è il MAPE-K [20] [21], che comprende quattro ruoli di componenti principali per il monitoraggio (M), l'analisi (A), la pianificazione (P) e l'esecuzione (E) su una base di conoscenza condivisa (K). Questi sono responsabili delle funzioni chiave di autoadattamento e del processo decisionale autonomo. L'obiettivo è ridurre i flussi di dati non necessari verso il cloud e ottimizzare gli interventi manutentivi manuali, necessariamente frequenti per alcuni sistemi IoT.

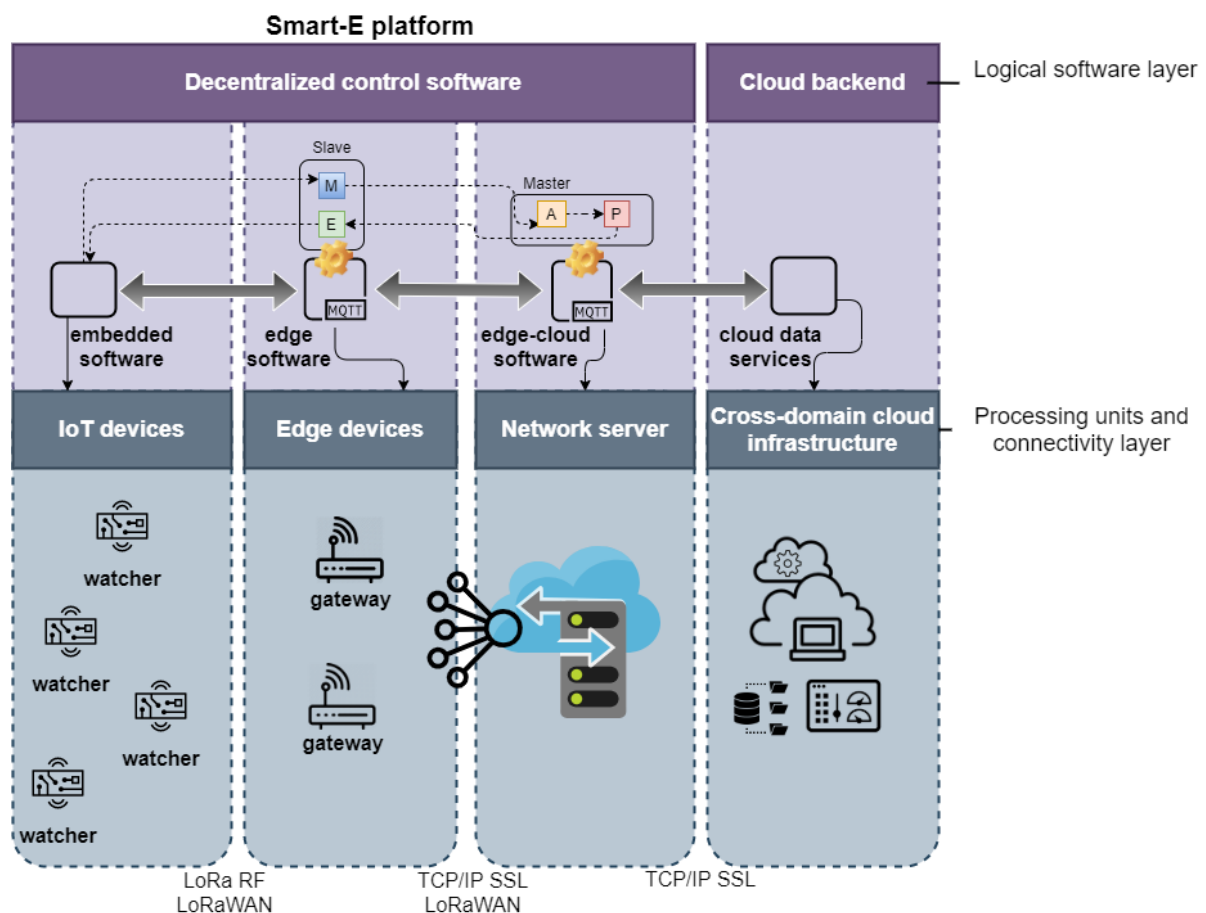


Figura 1: Architettura della piattaforma Smart-E

Il progetto ha come obiettivo a lungo termine quello di sperimentare l'uso della piattaforma Smart-E in domini di interesse per l'amministrazione della città di Bergamo, con dati e sensori diversi ma stesse funzioni di controllo decentralizzato dei dispositivi. Altro ambito interessante dove dimostrare l'utilità della piattaforma di controllo edge-cloud è quello dei dispositivi portatili per la salute dei lavoratori nei cantieri edili, attraverso il monitoraggio della qualità dell'aria respirata durante le attività lavorative.

La metodologia per la realizzazione del progetto appena descritto è articolata nel modo seguente.

### ***i) Azioni pianificate***

Tecnicamente, le azioni che vengono intraprese agiscono su più livelli e riflettono la tipologia di nodi hardware (dispositivi IoT terminali, gateway e server/hub Cloud), l'architettura di connessione e software di controllo da realizzare:

- A1. Progettazione di una API di messaggistica a micro-servizi per gestire i flussi dati e realizzare funzioni di controllo in edge-cloud dei dispositivi IoT.
- A2. Progettazione e prototipazione di un'architettura software distribuita che implementa le API al punto A1 (*lato server*) ed è costituita da un sottosistema in esecuzione sui gateway edge e un server/hub dati cloud.
- A3. Validazione del sistema software di cui in A2 in un ambiente virtualizzato, ovvero con dispositivi IoT sentinella per il monitoraggio della qualità dell'aria simulati in forma software.
- A4. Prototipazione di dispositivi IoT *sentinella* per il monitoraggio della qualità dell'aria su schede di tipo Arduino con sensori a basso costo (*Commercial Off-the-Shelf*).
- A5. Calibrazione e validazione del comportamento di un dispositivo sentinella e relative misure sulla qualità dell'aria, in modo da modellare correttamente la risposta della sentinella agli inquinanti atmosferici da monitorare.
- A6. Prototipazione dei gateway su schede di tipo Raspberry Pi e del relativo software embedded (*lato dispositivo*) di connessione con i dispositivi sentinella mediante tecnologia wireless (ad esempio LoRaWAN).
- A7. Validazione del funzionamento dell'intera rete IoT di sentinelle e dell'efficienza e scalabilità della comunicazione con i gateway.
- A8. Integrazione e validazione della piattaforma software edge-cloud con la rete IoT di sentinelle.
- A9. Pianificazione ed esecuzione di scenari di test dell'intero sistema IoT per la misurazione dei parametri della qualità dell'aria direttamente sul campo.
- A10. Analisi del mercato, strategie di business, scouting tecnologico e identificazione di nuovi scenari d'uso della piattaforma Smart-E.

### ***ii) Milestone e deliverable***

MS1: a 6M: A1-A5. Deliverable: API di messaggistica, prototipo architettura software Smart-E (*lato server*) e relativi risultati di validazione del prototipo del dispositivo sentinella; calibrazione di quest'ultimo.

MS2: a 12M: A6-A7. Deliverable: prototipo software embedded (lato dispositivo) nei gateway e risultati di validazione della comunicazione con i prototipi sentinella.

MS3: a 18M: A8-A10. Deliverable: integrazione e risultati validazione delle varie parti dell'intera piattaforma IoT edge-cloud; identificazione di nuovi scenari d'uso.

### ***iii) Risultati attesi***

1. Una API di messaggistica leggera e relativa implementazione in forma di framework/libreria di componenti/microservizi per realizzare architetture software di controllo in edge-cloud per dispositivi IoT in domini applicativi diversi (dati e tipologie di sensori diversi) nell'ambito del monitoraggio ambientale.
2. Realizzazione di una rete di sentinelle portatili e a basso costo in grado di monitorare correttamente la qualità dell'aria outdoor.
3. Piattaforma IoT edge-cloud per il monitoraggio dell'aria outdoor: integrazione della rete di sentinelle con una piattaforma di controllo in edge-cloud (ottenuta mediante API e micro-servizi definiti al punto 1, istanziati nel dominio del monitoraggio della qualità dell'aria) e relativo server/hub dati cloud per la persistenza e lo smistamento verso altre applicazioni e/o dashboard client.

### ***iv) Ruoli e responsabilità***

Patrizia Scandurra: referente principale del progetto e responsabile scientifico per l'ingegnerizzazione della piattaforma Smart-E.

Giuseppe Ruscica: responsabile scientifico per la sperimentazione dei sensori e la telemetria dei dispositivi IoT sul territorio; responsabile pianificazione finanziaria.

Vittorio Paris: stesura di report tecnici e attività di comunicazione con le aziende.

Collaboratore/borsista #1: addetto alla progettazione, sviluppo, testing e documentazione di una architettura software di controllo, concepita come microservizi in esecuzione sui dispositivi edge e sul server/hub cloud e connessi mediante una API di messaggistica leggera.

Collaboratore/borsista #2: addetto alla progettazione e sviluppo del software embedded sui dispositivi sentinella e sul gateway (per la ricezione dei flussi di dati), all'installazione, posizionamento e periodico controllo dei sensori dislocati sul territorio.

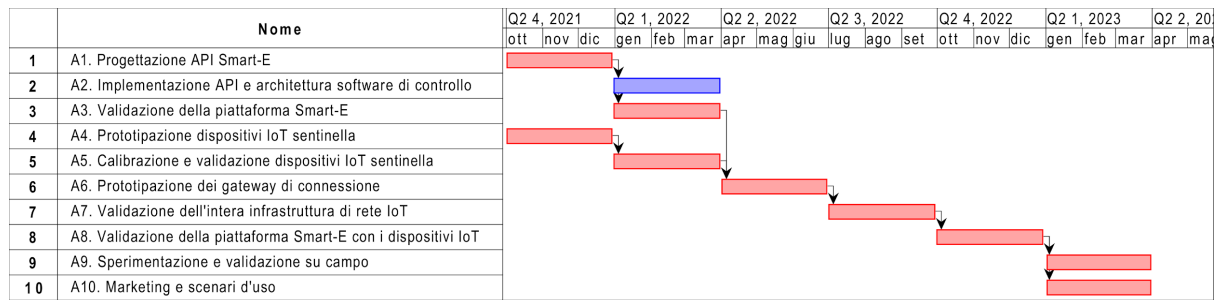
Le prestazioni professionali di terzi avverranno nelle seguenti modalità:

1. Consulenza per una approfondita analisi di mercato, scouting tecnologico, strategie di business e licenze software, in modo da individuare in maniera più precisa modi e tempi per il collocamento del prodotto alla fine dei 18 mesi.
2. Incarico per la realizzazione di una scheda sentinella personalizzata e di involucro per l'uso dell'attrezzatura in ambienti esterni.

Il **Comune di Bergamo** ha inoltre fornito apposita **lettera di supporto** al progetto Smart-E.

### ***v) Calendario (Gantt)***

Di seguito viene riportato il diagramma di Gantt corrispondente alle azioni pianificate A1-A10.



### Eventuale sostenibilità sociale, economica e ambientale/Possible social, environmental and economic sustainability

(max 2000 caratteri spazi inclusi/characters spaces included)

*[Evidenziare se il progetto ha un impatto dal punto di vista sociale/economico/ambientale anche nel solco della trasformazione in chiave green, con nuove opportunità di sviluppo e/o occupazione. Highlight if the project has a social/economic/environmental impact also in the context of the green transformation, with new opportunities for development and/or employment.]*

Gli effetti attesi di questo progetto sul territorio sono molteplici. Se ne può individuare un primo, diretto, legato alla mera analisi della qualità dell'aria in cui è immersa la popolazione. I risultati delle campagne di misurazione potrebbero infatti costituire la base di future decisioni della macchina amministrativa pubblica. Un secondo effetto, indiretto, è legato al mondo dell'occupazione: le competenze che verrebbero a crearsi con lo studio e l'applicazione sul territorio di un sistema di monitoraggio come quello qui proposto, potrebbero generare nuova occupazione attraverso le attività correlate con l'approntamento su scala cittadina della rete di sensori a basso costo.

C'è anche un ultimo effetto, anch'esso indiretto, che riguarda gli aspetti della cosiddetta *Citizen Science* e la sensibilizzazione delle persone che partecipano a un progetto condiviso di sperimentazione con sensori sulla misurazione della qualità dell'aria. Per la cittadinanza è un modo per comprendere, dati alla mano, quali possono essere gli effetti dell'attività dell'uomo sull'ambiente naturale. Un coinvolgimento attivo della popolazione può portare infatti a una maggiore consapevolezza dell'importanza delle politiche di tutela ambientale.

Una rete di sensori che possa diventare parte attiva del complesso sistema urbano fatto di persone, norme, infrastrutture, interazioni, creando così un "tutto" interconnesso (la smart city, appunto) rappresenta una sfida che è davvero il caso di affrontare se si pensa alle città del futuro.

### Dettaglio del budget/Detailed budget

Attrezzature e software/Equipment and software	€ 10.000
Personale non strutturato/Temporary staff	€ 45.000
Prestazioni professionali di terzi/Sub-contractors and consultants	€ 12.000
Materiali di consumo/Materials and supplies	€ 1.000
Materiale promozionale/Promotional material	€ 2.000
Intellectual property protection (trademark, NDA)	€ 2.000
Total/Totale	€ 72.000

### Brevetti/Patents

(max 2000 caratteri spazi inclusi/characters spaces included)

*[Descrivere gli eventuali brevetti legati al progetto e la percentuale di proprietà. Describe any patents linked to the project and percentage of ownership.]*

Per tale progetto non sono mai stati depositati brevetti di invenzione o brevetti per modello di utilità. Non si esclude, tuttavia, la possibilità di procedere con il deposito di un brevetto di invenzione procedurale (tutela del metodo), qualora ci siano le condizioni preliminari per farlo.

### Sintesi del progetto/Executive Summary

(max 2000 caratteri spazi inclusi/characters spaces incl.)

*[Riassumere background e stato dell'arte, scopo, metodi, risultati attesi, gruppo di ricerca, budget.]*

*Summarize background and state of the art, purpose, methods, expected results, research group, budget.]*



**Background e stato dell'arte:** Soluzioni architetturali edge-cloud si stanno sempre più affermando per consentire la realizzazione di sistemi IoT più flessibili ed efficienti. D'altro canto, emerge la necessità di disporre di piattaforme IoT per il monitoraggio ambientale, come il controllo capillare degli inquinanti dell'aria.

**Scopo:** L'obiettivo del progetto è realizzare una piattaforma IoT edge-cloud, complementare alla rete di monitoraggio nazionale di ARPA, per una capillare attività di monitoraggio della qualità dell'aria esterna con sensori portatili a basso costo e maggior controllo al margine.

**Metodi:** Grazie a sensori a basso costo, a micro-computer con capacità di calcolo elevate, al modello di distribuzione edge-cloud, ai nuovi protocolli di comunicazione e al paradigma di sviluppo software a micro-servizi, si ritiene possibile: (i) pre-elaborare e filtrare i dati vicino a dove vengono generati, riducendo così la latenza del loro processo di acquisizione e il flusso informativo verso il backend cloud, e (ii) implementare funzioni di controllo più robuste con modelli noti in letteratura per il controllo decentralizzato.

**Risultati attesi:** API di messaggistica e implementazione in forma di architettura software di controllo in edge-cloud; la realizzazione di una rete di sentinelle portatili e a basso costo in grado di monitorare correttamente la qualità dell'aria outdoor; una piattaforma IoT edge-cloud per il monitoraggio dell'aria atmosferica. Dal punto di vista sociale vi sono inoltre delle ricadute indirette sul settore dell'occupazione e, nell'ambito della *Citizen Science*, la sensibilizzazione di parte della cittadinanza attraverso la consapevolezza dell'importanza delle politiche di tutela ambientale.

**Gruppo di ricerca:** è costituito da informatici ed ingegneri edili, in modo da disporre delle competenze di entrambi i "mondi": quello dell'informatica/elettronica e quello del rapporto con la città/territorio.

**Budget:** complessivamente ammonta a € 72.000.

## Team

(max 2000 caratteri spazi inclusi per partecipante/characters spaces included per participant)

Patrizia Scandurra, Giuseppe Ruscica, Vittorio Paris.

Endorsement da parte del Comune di Bergamo.

*[Compilare una tabella per ciascun partecipante. Fill in one table for each participant.]*

Nome/Name	Patrizia
-----------	----------

Cognome/Surname	Scandurra
Organizzazione e posizione/Organization and role	DIGIP, Università degli Studi di Bergamo, Professore di II fascia nel settore ING-INF/05
Istruzione e formazione/Education	PhD e laurea in Informatica
Nro totale di brevetti/Total n° of patents	-
Eventuale partecipazione a spin off (indicare la ragione sociale)/ Possible participation in spin offs (indicate the company name)	-
Ruolo nel progetto/Role in the project	Referente principale del progetto e responsabile scientifico per l'ingegnerizzazione della piattaforma Smart-E.

Nome/Name	Giuseppe
Cognome/Surname	Ruscica
Organizzazione e posizione/Organization and role	DISA, Università degli Studi di Bergamo, Ricercatore universitario nel settore ICAR/11
Istruzione e formazione/Education	PhD e laurea in Ingegneria edile
Nro totale di brevetti/Total n° of patents	-
Eventuale partecipazione a spin off (indicare la ragione sociale)/	-

Possible participation in spin offs (indicate the company name)	
Ruolo nel progetto/Role in the project	Responsabile scientifico per la sperimentazione dei sensori e la telemetria dei dispositivi IoT sul territorio; responsabile pianificazione finanziaria.

Nome/Name	Vittorio
Cognome/Surname	Paris
Organizzazione e posizione/Organization and role	DISA, Università degli Studi di Bergamo, Assegnista di ricerca
Istruzione e formazione/Education	PhD e laurea in Ingegneria edile
Nro totale di brevetti/Total n° of patents	-
Eventuale partecipazione a spin off (indicare la ragione sociale)/ Possible participation in spin offs (indicate the company name)	-
Ruolo nel progetto/Role in the project	Stesura di report tecnici e attività di comunicazione con le aziende.

### **Bibliografia/Bibliography**

*[Elencare tutti gli articoli citati nel progetto con nome degli autori, titolo, rivista, volume, numero, pagine, anno di pubblicazione, link se disponibile. List all articles cited in the project]*

with authors' names, title, journal, volume, number, pages, year of publication, link if available.]

- [1] "State of the Edge." <https://stateoftheedge.com/> (accessed Apr. 08, 2021).
- [2] M. D'Angelo, "Decentralized self-adaptive computing at the edge," in *Proceedings of the 13th International Conference on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems*, New York, NY, USA, May 2018, pp. 144–148, doi: 10.1145/3194133.3194160.
- [3] J. Dutta, F. Gazi, S. Roy, and C. Chowdhury, "AirSense: Opportunistic crowd-sensing based air quality monitoring system for smart city," in *2016 IEEE SENSORS*, Oct. 2016, pp. 1–3, doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808730.
- [4] J. Dutta, C. Chowdhury, S. Roy, A. I. Middya, and F. Gazi, "Towards Smart City: Sensing Air Quality in City based on Opportunistic Crowd-sensing," in *Proceedings of the 18th International Conference on Distributed Computing and Networking - ICDCN '17*, New York, New York, USA, Jan. 2017, pp. 1–6, doi: 10.1145/3007748.3018286.
- [5] P. Schneider, N. Castell, F. R. Dauge, M. Vogt, W. A. Lahoz, and A. Bartonova, "A Network of Low-Cost Air Quality Sensors and Its Use for Mapping Urban Air Quality," in *Mobile information systems leveraging volunteered geographic information for earth observation*, vol. 4, G. Bordogna and P. Carrara, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 93–110.
- [6] N. Castell *et al.*, "Mobile technologies and services for environmental monitoring: The Citi-Sense-MOB approach," *Urban Climate*, vol. 14, pp. 370–382, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.uclim.2014.08.002.
- [7] "Wiseair." <https://www.wiseair.vision/> (accessed Mar. 20, 2021).
- [8] "Home | Airly." <https://airly.org/en/> (accessed Mar. 20, 2021).
- [9] C. Migliore, "SwarmBike: an IoT Sensing Platform for Air Pollution."
- [10] N. Lotrecchiano, D. Sofia, and A. Giuliano, "Real-time on-road monitoring network of air quality," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 74, pp. 241–246, 2019.
- [11] A. Rionda *et al.*, "UrVAMM — A full service for environmental-urban and driving monitoring of professional fleets," in *2013 International Conference on New Concepts in Smart Cities: Fostering Public and Private Alliances (SmartMILE)*, Dec. 2013, pp. 1–6, doi: 10.1109/SmartMILE.2013.6708173.
- [12] "IoT Edge | Microsoft Azure." <https://azure.microsoft.com/it-it/services/iot-edge/> (accessed Apr. 09, 2021).
- [13] "Cisco IOx Network Infrastructure Products - Cisco." <https://www.cisco.com/c/en/us/products/cloud-systems-management/iox/index.html> (accessed Apr. 09, 2021).
- [14] "Edge Application Manager - Panoramica - Italia | IBM." <https://www.ibm.com/it-it/cloud/edge-application-manager> (accessed Apr. 09, 2021).
- [15] "Anthos at the Edge | Google Cloud." <https://cloud.google.com/solutions/anthos-edge> (accessed Apr. 09, 2021).
- [16] "Web Thing API." <https://iot.mozilla.org/wot/> (accessed Apr. 09, 2021).
- [17] "openHAB." <https://www.openhab.org/> (accessed Apr. 09, 2021).
- [18] "The Things Network." <https://www.thethingsnetwork.org/> (accessed Apr. 09, 2021).
- [19] "Web of Things (WoT) Architecture." <https://www.w3.org/TR/wot-architecture10/> (accessed Apr. 13, 2021).
- [20] J. O. Kephart and D. M. Chess, "The vision of autonomic computing," *Computer*, vol.

- 36, no. 1, pp. 41–50, Jan. 2003, doi: 10.1109/MC.2003.1160055.
- [21] D. Weyns *et al.*, “On Patterns for Decentralized Control in Self-Adaptive Systems,” in *Software Engineering for Self-Adaptive Systems II: International Seminar, Dagstuhl Castle, Germany, October 24-29, 2010 Revised Selected and Invited Papers*, vol. 7475, R. de Lemos, H. Giese, H. A. Müller, and M. Shaw, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 76–107.
  - [22] H. Muccini, R. Spalazzese, M. T. Moghaddam, and M. Sharaf, “Self-adaptive IoT architectures: An emergency handling case study,” in *Proceedings of the 12th European Conference on Software Architecture Companion Proceedings - ECSA '18*, New York, New York, USA, Sep. 2018, pp. 1–6, doi: 10.1145/3241403.3241424.
  - [23] P. Arcaini, R. Mirandola, E. Riccobene, and P. Scandurra, “MSL: A pattern language for engineering self-adaptive systems,” *Journal of Systems and Software*, vol. 164, p. 110558, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jss.2020.110558.
  - [24] P. Arcaini *et al.*, “Smart home platform supporting decentralized adaptive automation control,” in *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, New York, NY, USA, Mar. 2020, pp. 1893–1900, doi: 10.1145/3341105.3373925.
  - [25] D. Weyns, M. U. Iftikhar, D. Hughes, and N. Matthys, “Applying Architecture-Based Adaptation to Automate the Management of Internet-of-Things,” in *Software Architecture*, vol. 11048, C. E. Cuesta, D. Garlan, and J. Pérez, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 49–67.
  - [26] M. T. Moghaddam, E. Rutten, P. Lalandi, and G. Giraud, “IAS: An IoT Architectural Self-adaptation Framework,” in *Software architecture: 14th european conference, ECSA 2020, l’aquila, italy, september 14–18, 2020, proceedings*, vol. 12292, A. Jansen, I. Malavolta, H. Muccini, I. Ozkaya, and O. Zimmermann, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 333–351.