

Progetti di Ateneo per la Ricerca di Base e Avvio alla Ricerca

Anno 2026

Serafino Cicerone

January 20, 2026

Università degli Studi dell'Aquila
Area Ricerca e Trasferimento Tecnologico
Settore Fundraising e gestione progetti di Ateneo
67100 L'Aquila (AQ), Italy

Con la presente si trasmette il modello (Allegato 1) per la presentazione della proposta progettuale, nell'ambito della selezione progetti di ateneo per la ricerca di base e l'avvio alla ricerca 2026.

Cordialmente,
Serafino Cicerone

A. Titolo del progetto:

STEPS - Scalable Time-constrained Efficient Path-finding in high-density environments (Algoritmi efficienti per Multi-Agent Path Planning con vincoli temporali in ambienti ad alta densità)

- **tipologia di progetto:** Progetto di Ricerca

B. Proponente (PI): Serafino Cicerone (SSD IINF-05/A, Area Cun 09)

C. Posizione accademica del proponente: Professore Associato

D. Curriculum vitae del proponente (max 5000 caratteri – circa 2 pagine).

- **Posizione:** Serafino Cicerone è Professore Associato di Ingegneria Informatica (SSD IINF/05) presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Scienze Informatiche e Matematiche (DISIM) dell'Università dell'Aquila. Ha conseguito il dottorato di ricerca presso l'università "La Sapienza" di Roma.

È membro del Centro di Eccellenza Ex-Emerge (Research Centre of EXcellence on Connected, Geo-localized and Cyber-secure vehicles) e del comitato tecnico-scientifico del CITraMS (Centro Interdipartimentale di Ricerca per i Trasporti e la Mobilità Sostenibile) dell'Università dell'Aquila.

È in possesso dell'**Abilitazione Scientifica Nazionale** per il ruolo di Professore di I Fascia nel settore scientifico disciplinare IINF/05.

- **Attività didattica e di servizio:** Appassionato di progettazione software e relative tecnologie. Per questo motivo, l'attività didattica si è concentrata soprattutto sui corsi di "Software Engineering" e "Front-End Engineering" per il corso di laurea magistrale in Ingegneria Informatica, di "Programmazione Web" per il corso di laurea triennale in Ingegneria dell'Informazione. Su queste tematiche (e su tematiche relative all'attività di ricerca) è stato relatore di circa **150 tesi** tra triennali e magistrali. Ha tenuto corsi su questi temi anche **presso aziende e università estere:** Marconi-Selenia Communications (ora Leonardo), Area IT presso Istat (per conto di SSPA), Missouri Univ. of Science & Technology (USA).

Tra le attività di servizio in ateneo, si rimarcano: **Membro del Senato Accademico** [2021-2027], **Presidente del CAD** del corso di laurea magistrale in Ingegneria Informatica [2025-2028], **Vice-Presidente del CAD** del corso di laurea magistrale in Ingegneria Informatica e Automatica [2005-2019].

- **Attività di ricerca:** Gli interessi di ricerca ruotano attorno alla specificazione, alla progettazione, alla verifica e all'implementazione di algoritmi efficienti. Le aree specifiche di interesse includono algoritmi distribuiti, teoria algoritmica dei grafi, ottimizzazione combinatoria, ingegneria algoritmica, dati spaziali e geometrici.
- **Progetti di ricerca:** Durante la carriera, ha avuto responsabilità di ricerca e gestione in numerosi progetti. Progetti internazionali: [2000 - 2004] HPRN-CT-1999-00104 European Project AMORE - Algorithmic Methods for Optimizing the Railways in Europe, [2006 - 2009]; FET European Project ARRIVAL - Algorithms for Robust and online Railway optimization, contract no. FP6-021235-2; [2002 - 2006] COLUMBUS - Design of embedded controllers for safety-critical systems, research project IST-2001-38314; [2016 - 2021] RISE-H2020 European Project GEO-SAFE - Geospatial-based Environment for

- Optimisation Systems Addressing Fire Emergencies (GEO-SAFE). Progetti Prin: (2014) AMANDA - Algorithms for MASSive and Networked DATA, (2002) SPADA - Representation and Processing of Spatial Data in Geographic Information Systems. Progetti PNRR: Vitality (Ecosistema Innovazione, Digitalizzazione e Sostenibilità per l'economia diffusa nel Centro Italia), Edihamo (European Digital Innovation Hub Abruzzo e Molise), Sparks (Supporting restARt spoKe 3 reSearch), Econet (Ecosostenibilità degli insediamenti umani: analisi sensoristiche da satellite e a terra integrate da intelligenza artificiale, per la protezione delle acque superficiali), Ohtis (Oxygen Home Therapy Integrated System).
- **Trasferimento tecnologico:** Co-fondatore di TEEMA (Tools for Efficient ElectroMagnetic Analysis), spin-off accademico dell'Università dell'Aquila. Fondata nel 2022 come startup innovativa. Obiettivo: sviluppo, produzione e commercializzazione di applicazioni software SaaS a supporto della progettazione e della prototipazione di sistemi elettronici complessi. Contributo personale: definizione dell'architettura software e delle tecnologie web; sviluppo di algoritmi per dati geometrici. Premiato in tre competizioni per startup (PNI Cube, StartCup Abruzzo, Innovalley 4 StartCup Abruzzo con Invitalia).
 - **Incarichi scientifici, comitati editoriali, comitati di programma, collaborazioni:** Nel periodo [2019 - 2024] è stato **Direttore dell'Unità di Ricerca CINI** (Consorzio Nazionale Interuniversitario per l'Informatica) presso l'Università dell'Aquila. Membro dei seguenti comitati editoriali: [2021 - oggi] **Topic Editor** della rivista internazionale Algorithms, MDPI, [2021] **Editor** della Special Issue "Graph Algorithms and Applications", Algorithms (MDPI), volume 14, numero 5, n. 150, 2021, [2013 - 2016] **Membro del comitato editoriale** della rivista internazionale "Computer Science Journal", pubblicata dalla casa editrice Hindawi; [2012 - 2016] **Membro del comitato editoriale** della rivista internazionale "Journal of Discrete Mathematics", pubblicata dalla casa editrice Hindawi. Membro del Comitato di programma e/o del Comitato organizzativo di numerose conferenze scientifiche. Tra i più recenti, ALGO/ATMOS (2022, 2009), AINA/E3WSN (2020, 2021 **co-chair**, 2022), DCAI (2021, **co-chair**), ICDCS (2018, **session chair**), LAGOS (2011, **session chair**).
 - **Periodi di ricerca e insegnamento presso istituzioni straniere:** [09/1999 - 12/1999] **Titolare di un contratto di ricerca** (visiting) presso il Dipartimento di Informatica dell'Università di Rostock (Germania), nell'ambito del progetto "Algorithmen zur Lösung von Optimierungsproblemen in metrischen diskreten Strukturen", finanziato dalla DFG. [07/2008 - 08/2008] **Titolare di un contratto di docenza** per il corso "OOP & Software Design" tenuto presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e Informatica della Missouri University of Science & Technology, USA. Ha collaborazioni attive con numerosi centri di ricerca internazionali.
 - **Elenco delle pubblicazioni più significative (max 10) nel periodo 2021-25, relative al tema del progetto (max 10).**
 - Serafino Cicerone, Alessia Di Fonso, Gabriele Di Stefano, Alfredo Navarra: *Molecular pattern formation on grids in the Moblot model*. Theor. Comput. Sci. 996: 114510 (2024)
 - Serafino Cicerone: *Breaking Symmetries on Tessellation Graphs via Asynchronous Robots: The Line Formation Problem as a Case Study*. IEEE Access 9: 147855-147873 (2021)
 - Serafino Cicerone, Alessia Di Fonso, Gabriele Di Stefano, Alfredo Navarra: *The geodesic mutual visibility problem: Oblivious robots on grids and trees*. Pervasive Mob. Comput. 95: 101842 (2023)

- Serafino Cicerone, Alessia Di Fonso, Gabriele Di Stefano, Alfredo Navarra: *Arbitrary pattern formation on infinite regular tessellation graphs*. Theor. Comput. Sci. 942: 1-20 (2023)
 - Serafino Cicerone, Gabriele Di Stefano, Alfredo Navarra: *Solving the Pattern Formation by Mobile Robots With Chirality*. IEEE Access 9: 88177-88204 (2021)
 - Serafino Cicerone, Gabriele Di Stefano, Alfredo Navarra: *A structured methodology for designing distributed algorithms for mobile entities*. Inf. Sci. 574: 111-132 (2021)
 - Serafino Cicerone, Alessia Di Fonso, Gabriele Di Stefano, Alfredo Navarra: *MOBLOT: Molecular Oblivious Robots*. AAMAS 2021: 350-358
 - Andrea D'Ascenzo, Mattia D'Emidio, Michele Flammini, Gianpiero Monaco: *Digraph k-Coloring Games: New Algorithms and Experiments*. J. Artif. Intell. Res. 81: 163-202 (2024)
 - Gianlorenzo D'Angelo, Mattia D'Emidio, Esmail Delfaraz, Gabriele Di Stefano: *Improved Algorithms for the Capacitated Team Orienteering Problem*. ATMOS 2024: 7:1-7:17
 - Davide Bilò, Luciano Gualà, Stefano Leucci, Guido Proietti, Mirko Rossi: *New approximation algorithms for the heterogeneous weighted delivery problem*. Theor. Comput. Sci. 932: 102-115 (2022)
- **Indicatori ASN 2024/26 alla scadenza del bando relativamente alla fascia superiore del settore concorsuale e del settore scientifico-disciplinare di appartenenza.**

La seguente figura mostra una sintesi del report generato in data 15.01.2026 dallo strumento di simulazione dei parametri ASN disponibile all'url <https://ricerca.univaq.it>, nel settore concorsuale 09/H1.

Inquadramento	
Struttura	Dipartimento di Ingegneria e scienze dell'informazione e matematica
Qualifica	Professori Associati
Area	AREA MIN. 09 - Ingegneria industriale e dell'informazione
SSD	Settore ING-INF/05 - Sistemi di Elaborazione delle Informazioni
SC	09/H1 - SISTEMI DI ELABORAZIONE DELLE INFORMAZIONI

	Valore	INDICATORE	Soglia	Stato
PRIMA FASCIA	24	Numero articoli ultimi 10 anni	10	✓
	560	Numero citazioni ultimi 15 anni	389	✓
	14	H index ultimi 15 anni	11	✓
	La simulazione ASN per il ruolo di docente di Prima Fascia ha esito positivo?			

E. Eventuali componenti del gruppo di ricerca:

- Serafino Cicerone (PI) SSD: IINF-05/A Area Cun: 09
- Stefano Leucci SSD: INFO-01/A Area Cun: 01
- Mattia D'Emidio SSD: IINF-05/A Area Cun: 09

F. Settore di ricerca ERC di riferimento per la proposta (indicare anche due sotto-settori):

- Settore PE6 Computer Science and Informatics: Informatics and information systems, computer science, scientific computing, intelligent systems

- i. PE6_6: Algorithms, distributed, parallel and network algorithms, algorithmic game theory
- ii. PE6_7: Artificial intelligence, intelligent systems, multi-agent systems

G. Abstract (max 1000 caratteri):

Il progetto STEPS affronta il problema della pianificazione di percorsi per sistemi multi-agente in contesti caratterizzati da scadenze temporali stringenti e alta densità operativa. Mentre i modelli classici assumono spesso che ogni punto dello spazio possa ospitare un solo agente, la realtà delle smart cities e della logistica automatizzata richiede la gestione di flussi in ambienti con capacità multiple.

L'obiettivo è sviluppare un framework algoritmico innovativo per la navigazione anonima con scadenze temporali in reti capacitate. La ricerca integrerà scenari sbilanciati (numero di agenti diverso dai target) e modellerà diverse dinamiche post-arrivo (Disappear, Stay, Hot Swap). Il progetto fornirà algoritmi con garanzie formali di ottimalità e scalabilità. Sarà inoltre adottato un approccio di Algorithm Engineering, combinando teoria e sperimentazione durante la progettazione e l'analisi/valutazione di algoritmi e metodi computazionali. I risultati permetteranno di superare gli attuali limiti computazionali, offrendo soluzioni robuste per il coordinamento di flotte autonome su larga scala in infrastrutture complesse.

H. Descrizione del progetto (max 8.000 caratteri, compresi eventuali riferimenti bibliografici. È consentito inserire figure nella proposta. Le figure non concorrono alla determinazione del calcolo del numero dei caratteri)

○ Stato dell'arte.

Il **coordinamento dei movimenti di una flotta di agenti o robot** definisce una serie di problemi che esiste da alcuni decenni ed è stato oggetto di studi approfonditi da parte delle comunità di robotica e intelligenza artificiale [1-6]. Le applicazioni di questi problemi si possono trovare in diversi contesti, tra cui assemblaggio [7], evacuazione [8], formazione [9-11], localizzazione [12], trasporto di oggetti [13], ricerca e soccorso [14] e gestione del traffico aereo [15]. Un'applicazione specifica di questo problema generale che ha suscitato notevole interesse nella comunità di ricerca è il settore dei magazzini, dove diverse centinaia e talvolta anche diverse migliaia di robot operano in modo autonomo raccogliendo, trasportando e riponendo i contenitori.

In questo contesto, una famiglia di problemi computazionali e combinatori relativi all'ottimizzazione di sistemi composti da agenti autonomi è il Multi-Agent Path Finding (MAPF). In termini generici, il problema consiste nel trovare un insieme di percorsi **privi di collisioni** per una flotta di agenti che operano in un ambiente condiviso, al fine di raggiungere specifiche posizioni target partendo da posizioni iniziali date. La soluzione cercata deve tipicamente ottimizzare una metrica di prestazione, tra cui le più comuni sono il **Makespan** (tempo totale necessario affinché l'ultimo agente raggiunga la sua destinazione) e il **Total Travel Cost** (distanza totale o l'energia complessiva consumata da tutti gli agenti per completare i loro percorsi) [16].

Il problema MAPF classico è intrinsecamente difficile [17]. **È classificato come NP-hard** per l'ottimizzazione sia del makespan che del costo totale, e la sua intrattabilità permane anche in casi semplificati, come su grafi planari o griglie 2D. Data la natura difficile del problema MAPF classico, la ricerca si è concentrata in misura significativa sullo sviluppo di

euristiche e di approcci approssimati per ottenere soluzioni di buona qualità in tempi ragionevoli. Le strategie principali possono essere suddivise in tre categorie [3]:

- Approcci che adattano classici algoritmi di ricerca su grafi per gestire lo spazio degli stati multi-agente (es, Conflict-Based Search, o CBS);
- Euristiche Greedy e Prioritizzate, tra le più veloci dal punto di vista computazionale, dove gli agenti vengono ordinati secondo una priorità; ogni agente pianifica il proprio percorso evitando quelli degli agenti con priorità superiore già calcolati;
- Riduzioni a Problemi Trattabili, come la tecnica di riduzione a problemi di Network Flow. Soddisfacibilità Booleana (SAT), Programmazione Lineare Intera (ILP) o Answer Set Programming (ASP).

L'Anonymous Multi-Agent Path Finding (**AMAPF**) è una sottoclasse specializzata del problema MAPF in cui gli agenti non sono pre-assegnati a obiettivi specifici. In questo scenario, gli agenti sono considerati intercambiabili: l'obiettivo del sistema è che ogni target sia raggiunto da un qualsiasi agente della flotta. AMAPF modella bene il coordinamento di agenti/robot in contesti dove conta il risultato collettivo piuttosto che l'identità del singolo robot:

- **Logistica di Magazzino:** Robot mobili che devono prelevare merci da scaffali generici o rifornire stazioni di imballaggio.
- **Gestione di Flotte di Veicoli Elettrici:** Coordinamento di veicoli verso stazioni di ricarica o hub di consegna in una smart city.
- **Risposta ai Disastri:** Droni dispiegati per consegnare rifornimenti (cibo, medicine) a punti critici dove ogni drone è funzionalmente identico agli altri.
- **Sistemi di Trasporto Autonomo:** Gestione di "sciame" di veicoli che devono raggiungere parcheggi o punti di raccolta passeggeri minimizzando la congestione stradale.

A differenza di MAPF, dove ogni agente ha il suo obiettivo specifico preassegnato ed è NP-hard, l'anonimato aumenta drasticamente la trattabilità computazionale. AMAPF può essere risolto in tempo polinomiale per diversi obiettivi (come il costo totale o il makespan) attraverso riduzioni a modelli di flusso di rete a costo minimo [18]. Anche aggiungendo scadenze temporali per ogni target (versione **AMAPFWID**), il problema rimane risolvibile in tempo polinomiale [19]. È importante notare che sia per AMAPF che per AMAPFWID, gli algoritmi basati su riduzione a modelli di flusso non permettono la soluzione di istanze grandi (migliaia di nodi e centinaia di agenti) in tempi ragionevoli.

○ **Obiettivi.**

I modelli usati fino ad ora per MAPF e le sue varianti presentano limitazioni critiche per l'applicazione nel mondo reale:

- **Assunzione di capacità unitaria:** La maggior parte degli studi assume che un nodo possa ospitare un solo robot alla volta, ignorando la capacità di strade o piazze di gestire flussi multipli.
- **Rapporto agente-target 1:1:** Si assume spesso che il numero di agenti corrisponda esattamente a quello delle destinazioni, scenario raramente verificato in logistica o nei soccorsi.
- **Comportamento post-arrivo:** Non esiste un framework unificato che modelli cosa accade quando un agente raggiunge il target (se deve restare, sparire o essere sostituito) in presenza di scadenze.

Il progetto STEPS si innesta in questo vuoto tecnologico, estendendo i risultati noti in letteratura verso una modellazione più complessa e realistica. Il progetto mira a raggiungere quattro obiettivi fondamentali, mirati a trasformare la gestione teorica dei flussi multi-agente in strumenti algoritmici applicabili:

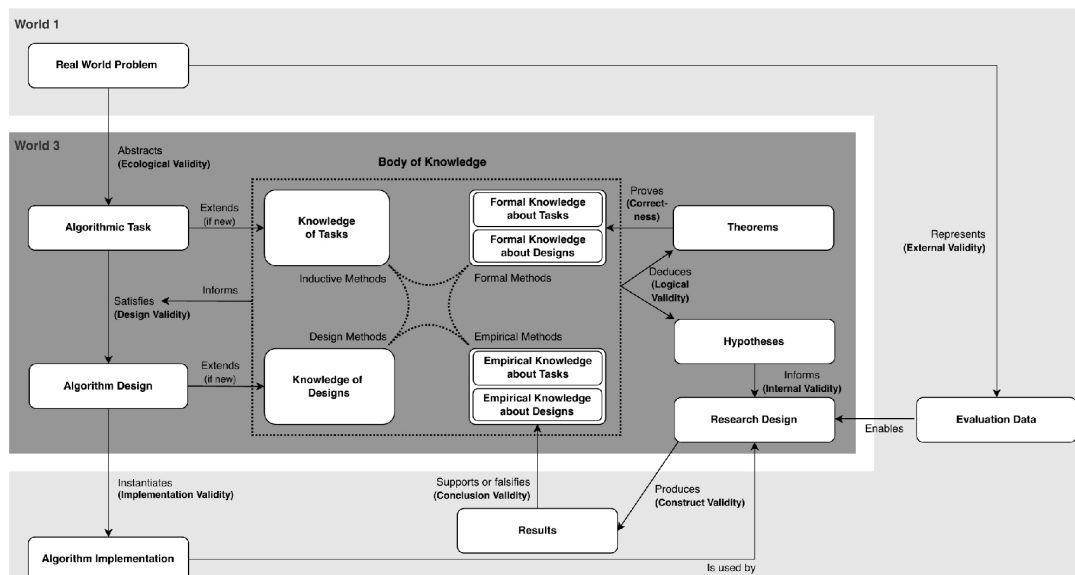
- **Generalizzazione del modello:** Definire formalmente il problema Unbalanced Anonymous Multi-Agent Path Finding with Deadlines and Capacities. Questo modello includerà grafi dove vertici e archi hanno capacità arbitrarie, permettendo di simulare la congestione urbana o i colli di bottiglia nei magazzini.
- **Analisi dei comportamenti degli agenti:** Studiare e classificare tre varianti comportamentali fondamentali: DOT (Disappear On Target), per task di consegna dove l'agente termina il servizio all'arrivo; SOT (Stay On Target), per compiti di presidio o copertura dell'area; HOT (Hot Swapping), per rotazioni di turni in stazioni di ricarica o monitoraggio continuo.
- **Sviluppo di algoritmi efficienti:** Progettare algoritmi (esatti o approssimati) che risolvano ognuna delle tre varianti DOT, SOT e HOT in modo efficiente, garantendo la scalabilità per migliaia di agenti.
- **Validazione sperimentale:** Testare gli algoritmi sviluppati su istanze realistiche (mappe di città e magazzini) e istanze benchmark di riferimento in letteratura (es vedi <https://www.movingai.com/benchmarks/mapf/>) per dimostrare che l'approccio non è solo teoricamente solido, ma utilizzabile in contesti realistici.

○ **Metodologia.**

L'approccio metodologico che si intende utilizzare per il presente progetto è quello classico dell'area algoritmica.

Per quanto riguarda lo sviluppo di algoritmi, l'approccio si basa su analisi matematiche, formali e rigorose della correttezza, della complessità di computazione (ad esempio, complessità temporale e requisiti di spazio), e della qualità delle soluzioni restituite dagli algoritmi proposti, misurata come rapporti di approssimazione rispetto alla qualità delle soluzioni ottime.

Per quanto riguarda la validazione sperimentale, abbiamo intenzione di seguire un approccio di ingegneria algoritmica (AE), combinando teoria e sperimentazione durante la progettazione e l'analisi/valutazione di algoritmi e metodi computazionali [20, 21]. Più in dettaglio, l'AE è stata definita come un processo olistico e iterativo che combina intuizioni teoriche e considerazioni pratiche per ottenere algoritmi e metodi computazionali migliori per i problemi del mondo reale. La metodologia enfatizza l'equilibrio tra rigore teorico e validazione empirica, garantendo che gli algoritmi non solo soddisfino le aspettative teoriche, come nella progettazione algoritmica tradizionale, ma funzionino anche in modo efficace nei casi d'uso reali. Le fasi principali della metodologia AE sono riassunte nella Figura seguente.



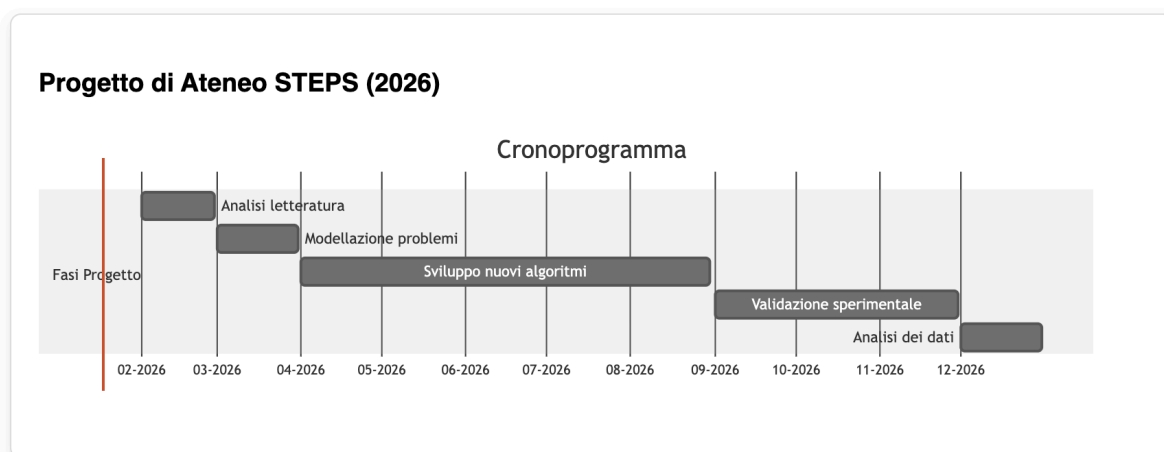
I risultati ottenuti saranno diffusi nella comunità scientifica attraverso pubblicazioni in atti di conferenze peer-reviewed di alto livello e riviste di alto profilo scientifico. Pianifichiamo di organizzare visite scientifiche con altri ricercatori esperti dell'area per attivare nuove collaborazioni scientifiche e rafforzare quelle esistenti.

○ **Piano di lavoro.**

Le attività del progetto saranno suddivise in quattro fasi principali descritte nel seguente workflow:

- Fase 1 (durata: 1 mese): revisione sistematica della letteratura sulla famiglia di problemi computazionali MAPF e sui risultati algoritmi noti;
- Fase 2 (durata 1 mese): modellazione delle previste estensioni al problema AMAPF per includere vincoli temporali, grafi capacitati, differenti comportamenti degli agenti a target;
- Fase 3 (durata: 5 mesi): progettazione e analisi teorica di nuovi algoritmi;
- Fase 4 (durata: 3 mesi): implementazione e valutazione sperimentale degli algoritmi definiti;
- Fase 5 (durata: 1 mese): analisi dei dati, conclusioni.

La figura successiva fornisce una panoramica dell'interazione tra le varie fasi di sviluppo del progetto, sotto forma di diagramma di Gantt.



○ **Riferimenti bibliografici:**

- [1] Max Barer, Guni Sharon, Roni Stern, Ariel Felner: Suboptimal Variants of the Conflict-Based Search Algorithm for the Multi-Agent Pathfinding Problem. ECAI 2014: 961-962
- [2] Eli Boyarski, Ariel Felner, Roni Stern, Guni Sharon, David Tolpin, Oded Betzalel, Solomon Eyal Shimony: ICBS: Improved Conflict-Based Search Algorithm for Multi-Agent Pathfinding. IJCAI 2015: 740-746
- [3] Ariel Felner, Roni Stern, Solomon Eyal Shimony, Eli Boyarski, Meir Goldenberg, Guni Sharon, Nathan R. Sturtevant, Glenn Wagner, Pavel Surynek: Search-Based Optimal Solvers for the Multi-Agent Pathfinding Problem: Summary and Challenges. SOCS 2017: 29-37
- [4] Steven M. LaValle, Seth Hutchinson: Optimal motion planning for multiple robots having independent goals. IEEE Trans. Robotics Autom. 14(6): 912-925 (1998)
- [5] Trevor Scott Standley: Finding Optimal Solutions to Cooperative Pathfinding Problems. AAAI 2010: 173-178
- [6] Jingjin Yu, Steven M. LaValle: Optimal Multirobot Path Planning on Graphs: Complete Algorithms and Effective Heuristics. IEEE Trans. Robotics 32(5): 1163-1177 (2016)
- [7] Dan Halperin, Jean-Claude Latombe, Randall H. Wilson: A General Framework for Assembly Planning: The Motion Space Approach. Algorithmica 26(3-4): 577-601 (2000)
- [8] Róbert Selvek, Pavel Surynek: Engineering Smart Behavior in Evacuation Planning using Local Cooperative Path Finding Algorithms and Agent-based Simulations. KEOD 2019: 137-143
- [9] Herbert G. Tanner, George J. Pappas, Vijay Kumar: Leader-to-formation stability. IEEE Trans. Robotics 20(3): 443-455 (2004)
- [10] Serafino Cicerone, Alessia Di Fonso, Gabriele Di Stefano, Alfredo Navarra: Arbitrary pattern formation on infinite regular tessellation graphs. Theor. Comput. Sci. 942: 1-20 (2023)
- [11] Serafino Cicerone, Gabriele Di Stefano, Alfredo Navarra. Embedded pattern formation by asynchronous robots without chirality. Distributed Computing, 32(4):291–315, 2019.
- [12] Dieter Fox, Wolfram Burgard, Hannes Kruppa, Sebastian Thrun: A Probabilistic Approach to Collaborative Multi-Robot Localization. Auton. Robots 8(3): 325-344 (2000)
- [13] Daniela Rus, Bruce Randall Donald, Jim Jennings: Moving furniture with teams of autonomous robots. IROS (1) 1995: 235-242
- [14] Jean Berger, Nassirou Lo: An innovative multi-agent search-and-rescue path planning approach. Comput. Oper. Res. 53: 24-31 (2015)
- [15] David Sislák, Premysl Volf, Michal Pechoucek: Agent-Based Cooperative Decentralized Airplane-Collision Avoidance. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 12(1): 36-46 (2011)
- [16] Roni Stern, Nathan R. Sturtevant, Ariel Felner, Sven Koenig, Hang Ma, Thayne T. Walker, Jiaoyang Li, Dor Atzmon, Liron Cohen, T. K. Satish Kumar, Roman Barták, Eli Boyarski: Multi-Agent Pathfinding: Definitions, Variants, and Benchmarks. SOCS 2019: 151-158
- [17] Jingjin Yu, Steven M. LaValle: Structure and Intractability of Optimal Multi-Robot Path Planning on Graphs. AAAI 2013: 1443-1449
- [18] Jingjin Yu, Steven M. LaValle: Multi-agent Path Planning and Network Flow. WAFR 2012: 157-173
- [19] Gilad Fine, Dor Atzmon, Noa Agmon: Anonymous Multi-Agent Path Finding with Individual Deadlines. AAMAS 2023: 869-877
- [20] C. C. McGeoch. *A Guide to Experimental Algorithmics*. Cambridge University Press, 2012.

- [21] J. Mendling, H. Leopold, H. Meyerhenke, and B. Depaire. Methodology of algorithm engineering, 2023.

I. Elementi di originalità e innovazione della proposta e impatto in termini di rilevanza dell'avanzamento nella ricerca di base per la comunità scientifica di riferimento (max 3000 caratteri).

- L'originalità del progetto risiede nel superamento dei modelli classici per MAPF, solitamente limitati da assunzioni di capacità unitaria e scenari statici. Come descritto nei paragrafi precedenti, gli elementi innovativi chiave sono:
 - **Integrazione di Capacità e Scadenze:** A differenza della letteratura esistente, che spesso tratta separatamente la congestione (capacità dei grafi) e i vincoli temporali, la proposta introduce il modello Unbalanced Anonymous MAPF with Deadlines and Capacities. Questo permette di modellare per la prima volta ambienti ad alta densità (es. corridoi stretti o piazze affollate) dove il flusso non è binario ma quantitativo.
 - **Modellazione dei Comportamenti Post-Arrivo:** L'innovazione risiede nell'analisi sistematica delle dinamiche degli agenti una volta raggiunto l'obiettivo (varianti Disappear, Stay, e Hot Swap). Questa tassonomia permette di adattare l'algoritmo a contesti operativi reali molto diversi tra loro (consegne espresse vs. presidio di sicurezza).
 - **Ottimalità in Scenari Sbilanciati:** Il progetto affronta il caso in cui il numero di agenti e quello dei target non coincidono, una situazione comune nella pratica ma complessa da risolvere teoricamente garantendo l'ottimalità.
- Riguardo l'impatto e la rilevanza dell'avanzamento nella ricerca di base, il progetto promette un impatto significativo sulla comunità scientifica di riferimento (Robotica, Intelligenza Artificiale e Algoritmica) attraverso:
 - **Avanzamento della Teoria dei Grafi e dei Flussi:** La ricerca contribuirà alla comprensione teorica dei flussi multi-agente su reti con vincoli temporali. Dimostrare la risolubilità in tempo polinomiale o pseudo-polinomiale di problemi finora ritenuti intrattabili aprirà nuove strade per la ricerca sull'ottimizzazione combinatoria.
 - **Scalabilità Algoritmica:** L'enfasi su algoritmi efficienti e scalabili risponde alla necessità della comunità scientifica di gestire sistemi con migliaia di agenti, superando il collo di bottiglia computazionale degli attuali approcci basati su ricerca (search-based) che scalano con difficoltà.
 - **Base per Standard Futuri:** I risultati, pubblicati su riviste di alto profilo e conferenze di primo piano (come AAMAS, IJCAI o ECAI), potranno costituire i nuovi benchmark di riferimento per la valutazione di sistemi autonomi in ambienti congestionati.
 - **Cross-disciplinarità:** L'impatto si estenderà oltre l'informatica teorica, offrendo strumenti rigorosi per la ricerca applicata in ambiti quali la logistica automatizzata di nuova generazione, la gestione del traffico di droni in ambito urbano (UAM) e la pianificazione di evacuazioni di emergenza.
- **Il gruppo di lavoro vanta un background consolidato sui temi di ricerca necessari per perseguire gli obiettivi del progetto:** ricercatori del settore IINF/05, con esperienza di ingegneria algoritmica e di algoritmi/euristiche per il coordinamento di agenti; ricercatori del settore INFO/01 con esperienza nello sviluppo di algoritmi esatti e approssimati per risolvere problemi complessi su grafi.

J. Impatto del progetto in riferimento alle tematiche di genere (facoltativo, max 3000 caratteri):

Sebbene il progetto tratti di algoritmi e ottimizzazione matematica, è possibile dimostrare come la ricerca possa contribuire all'equità di genere sia nel metodo che nell'applicazione.

Bias di genere negli algoritmi e nei dati. Nella ricerca di base, l'algoritmo non è mai "neutro" se applicato a contesti sociali:

- Analisi della neutralità: Il progetto si impegna a verificare che gli algoritmi di pianificazione per smart cities o gestione del traffico non integrino involontariamente bias che potrebbero penalizzare specifici gruppi demografici.
- Accessibilità e sicurezza urbana: Nelle applicazioni di coordinamento veicolare in smart cities, l'ottimizzazione dei percorsi può essere orientata a garantire una mobilità più sicura e capillare, facilitando l'accesso ai servizi per tutti i generi, specialmente in contesti di mobilità "non lineare" (spesso associata a compiti di cura che statisticamente ricadono maggiormente sulle donne).

Impatto delle applicazioni finali (Social Impact): La ricerca di base prodotta fornirà strumenti per sistemi di automazione che, riducendo la congestione e migliorando la sicurezza, generano un impatto sociale inclusivo e trasversale:

- Sicurezza nei trasporti: L'uso di sistemi multi-agente per la gestione di emergenze e soccorsi (es. droni per medicinali) mira a un impatto universale che riduca le disparità di accesso alle risorse in situazioni critiche.
- Robotica assistiva: Sebbene il cuore del progetto sia algoritmico, i risultati possono essere applicati a flotte di robot ospedalieri o di assistenza, settori dove l'analisi dell'interazione genere-macchina è fondamentale per l'accettazione della tecnologia.

K. Piano di spesa (orientativo)

<i>Voce di spesa</i>	<i>Importo (Euro)</i>
Borse di ricerca (art.2 del Regolamento per il conferimento di borse di ricerca attualmente in vigore) - <i>cofinanziamento</i>	7.000
Rinnovo assegni di ricerca	0
Materiali di consumo	0
Attrezzature, strumentazioni, software	4.000
Missioni	4.000
Acquisto prodotti ritenuti necessari per la realizzazione del progetto (es. materiale librario, licenze per l'accesso a banche dati, ecc.)	0
Pubblicazioni, organizzazione di convegni e workshop	0
Totale	15.000