



POLITECNICO DI MILANO

**Facoltà di Ingegneria dell'Informazione
Dipartimento di Elettronica e Informazione**

**DEFINIZIONE E VALUTAZIONE
DI METODI DI COORDINAMENTO
PER ROBOT MOBILI AUTONOMI
IN APPLICAZIONI DI SEARCH AND RESCUE**

Relatore: prof. Francesco AMIGONI

Correlatore: ing. Nicola BASILICO

**Tesi di Laurea Specialistica di:
Chiara NICHETTI matr. 682487**

Anno Accademico 2009 - 2010

***" Gli ostacoli esistono per una ragione.
Ci offrono l'opportunità di dimostrare
quanto desideriamo realmente qualcosa."***

(Randy Pausch)

SOMMARIO

L'esplorazione autonoma multi-robot richiede ai robot la capacità di decidere autonomamente dove muoversi all'interno di un ambiente inizialmente sconosciuto collaborando, allo stesso tempo, con gli altri membri del team. In particolare, uno degli aspetti importanti è il metodo con il quale i robot sono assegnati alle posizioni di osservazione.

In questa tesi sono stati sviluppati e valutati quattro diversi metodi per l'esplorazione autonoma multi-robot, ognuno caratterizzato da un particolare algoritmo che definisce la modalità di assegnamento di ogni robot alla successiva posizione da raggiungere al fine di costruire incrementalmente una mappa dell'ambiente. In questo contesto è essenziale una strategia esplorativa che consenta di valutare l'utilità di una posizione candidata ad essere la prossima raggiunta da un robot. In questa tesi sono state implementate due strategie di esplorazione all'interno dei quattro metodi: la strategia VISSER e la strategia MCDM, che si distinguono per la specifica modalità di combinazione dei criteri utilizzati per la valutazione di ogni possibile posizione da raggiungere.

Attraverso l'analisi dei dati derivanti dalle simulazioni si è rilevato che gli assegnamenti in grado di determinare la maggiore copertura dell'ambiente sono quelli basati su una stima precisa dell'utilità di ogni punto candidato. Si è potuto osservare inoltre che, indipendentemente dal metodo di esplorazione autonoma multi-robot adottato, l'aggregazione dei criteri secondo la strategia MCDM rispetto a quella della strategia VISSER, è una scelta in grado di garantire migliori performance.

Ringraziamenti

Oggi ho raggiunto il traguardo tanto sognato e tanto combattuto. E' stata una sfida contro me stessa; ci sono stati momenti in cui credevo di non potercela fare, momenti in cui le forze non c'erano più, momenti nei quali abbandonare tutto sembrava essere la scelta migliore. Ma le vette più alte si raggiungono solo combattendo, stringendo i denti e andando avanti, alzando la testa e rimettendosi in piedi, pronti a camminare ancora.

Se non si è soli, però, tutto ha un colore diverso: il mio ringraziamento più grande va alla mia famiglia, che spronandomi sempre senza abbandonarmi mai, mi ha sostenuto condividendo con me le difficoltà, le fatiche e le gioie di questi anni. Grazie a chi ha sempre avuto per me un pensiero, un ricordo, a chi non mi ha mai fatto mancare la sua preghiera; un grazie a chi non ha potuto vedere realizzata questa tesi, ma che sono certa ha sempre vegliato su di me. Grazie a una persona speciale che, incondizionatamente, non mi ha mai fatto mancare il suo aiuto e il suo appoggio; grazie agli amici, vecchi e nuovi, per la loro pazienza. Grazie anche a chi ha pensato non fossi abbastanza in gamba per arrivare fino in fondo facendomi così trovare l'orgoglio e la determinazione per andare avanti. Un ringraziamento al prof. Francesco Amigoni per avermi seguito in questa tesi e ai compagni di università per il cammino percorso insieme.

INDICE

SOMMARIO	5
RINGRAZIAMENTI	7
INDICE	9
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE	13
CAPITOLO 2: STATO DELL'ARTE	17
2.1 – URBAN SEARCH AND RESCUE.....	18
2.1.1 – <i>Il contesto e gli obiettivi</i>	18
2.1.2 – <i>RoboCup Rescue</i>	18
2.2 – ESPLORAZIONE AUTONOMA	19
2.2.1 – <i>Il problema dell'esplorazione</i>	19
2.2.2 – <i>I metodi SLAM</i>	20
2.2.2.1 – Scan-Matching.....	20
2.2.2.2 – Occupancy Grid.....	21
2.2.2.3 – Feature-based.....	21
2.2.3 – <i>Le strategie di esplorazione</i>	22
2.2.3.1 – Metodo di Gonzàles-Baños e Latombe	22
2.2.3.2 – Metodo di Burgard	23
2.2.3.3 – Metodo di Newman, Bosse and Leonard	24
2.3 – USARSIM	25
2.3.1 – <i>Architettura del sistema</i>	26
2.3.1.1 – Unreal Engine	28
2.3.1.2 – Gamebots.....	28
2.3.1.3 – Controller	28
2.3.1.4 – Unreal Client	29
2.3.1.5 – L'Image Server	29
2.3.1.6 – Le mappe e i modelli.....	29
2.3.2 – <i>Componenti</i>	30
2.3.2.1 – Ambiente di simulazione: le arene.....	30
2.3.2.2 – Sensori	32
2.3.2.3 – Robot	33
2.3.2.4 – Comunicazione inter-robot.....	35
2.4 – MULTI CRITERIA DECISION MAKING (MCDM).....	37

2.4.1 – <i>Next-Best-View</i>	37
2.4.2 – <i>I criteri</i>	38
2.4.3 – <i>La normalizzazione</i>	38
2.4.4 – <i>I pesi</i>	39
2.4.5 – <i>Sinergia e ridondanza</i>	39
2.4.6 – <i>L'integrale di Sugeno-Choquet: Choquet fuzzy integral</i>	40
CAPITOLO 3: UVARESCUE2009	43
3.1 – INTRODUZIONE.....	44
3.1.1 – <i>Cos'è UvARescue2009</i>	44
3.2 – INTERFACCIA GRAFICA.....	45
3.2.1 – <i>Status 1: Preparing</i>	46
3.2.2 – <i>Status 2: Ready</i>	49
3.2.3 – <i>Status 3: Running</i>	50
3.2.4 – <i>Status 4: Reporting e Status 5: Done</i>	52
3.3 – FUNZIONAMENTO DI BASE.....	52
3.3.1 – <i>L'UsarCommander</i>	52
3.3.1.1 – <i>Il MainForm</i>	53
3.3.1.2 – <i>Creazione e configurazione del team</i>	53
3.3.1.3 – <i>Attivazione di uno specifico behavior</i>	54
3.3.1.4 – <i>Creazione e gestione della mappa</i>	56
3.3.2 – <i>Gli UsarClient</i>	57
3.3.2.1 – <i>Gestione dei robot</i>	58
3.4 – LE FRONTIERE.....	61
3.5 – STRATEGIE DI ESPLORAZIONE: VISSER VS MCDM.....	63
3.5.1 – <i>Strategia VISSER</i>	64
3.5.2 – <i>Strategia MCDM</i>	65
CAPITOLO 4: METODI DI ASSEGNAMENTO ROBOT/FRONTIERA	69
4.1 – INTRODUZIONE.....	70
4.2 – METODO 1: SISTEMA CON COORDINAMENTO BASATO SU UTILITÀ “REALE”.....	71
4.3 – METODO 2: SISTEMA CON COORDINAMENTO BASATO SU UTILITÀ “IDEALE”.....	78
4.4 – METODO 3: ASSEGNAMENTO ROBOT/FRONTIERA SENZA COORDINAMENTO.....	80
4.5 – METODO 4: ASSEGNAMENTO RANDOM ROBOT/FRONTIERA.....	83
CAPITOLO 5: RISULTATI SPERIMENTALI	87
5.1 – INTRODUZIONE.....	88
5.2 – LE PROVE.....	89

5.3 – CONFRONTO TRA STRATEGIE	92
5.3.1 – <i>Gli andamenti</i>	93
5.3.2 – <i>Analisi dei risultati</i>	103
5.4 – CONFRONTO TRA METODI.....	105
5.4.1 – <i>Strategia MCDM: confronto tra metodi</i>	106
5.4.2 – <i>Strategia VISSER: confronto tra metodi</i>	112
5.4.3 – <i>VISSER vs MCDM: confronto globale tra metodi</i>	116
5.5 – COMMENTI ALLE SIMULAZIONI	119
5.5.1 – <i>Confronto tra strategie</i>	120
5.5.2 – <i>Confronto tra metodi</i>	121
CAPITOLO 6: CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	125
BIBLIOGRAFIA	129
APPENDICE A: DATI DELLE PROVE SPERIMENTALI	135
A.1 – CONFRONTO TRA STRATEGIE.....	136
A.1.1 – <i>Metodo 4</i>	136
A.1.2 – <i>Metodo 3: confronto VISSER vs MCDM</i>	139
A.1.3 – <i>Metodo 2: confronto VISSER vs MCDM</i>	142
A.1.4 – <i>Metodo 1: confronto VISSER vs MCDM</i>	145
A.2 – CONFRONTO TRA METODI	148
A.2.1 – <i>Strategia VISSER</i>	148
A.2.2 – <i>Strategia MCDM</i>	149
APPENDICE B: MANUALE D'INSTALLAZIONE E D'USO	151
B.1 – <i>INSTALLAZIONE</i>	152
B.2 – <i>UTILIZZO</i>	153

Capitolo 1:

INTRODUZIONE

L'Urban Search and Rescue (USAR) è una tipologia di soccorso specializzato per le situazioni caratterizzate da gravi collassi strutturali in edifici; gli obiettivi dell'USAR sono localizzare ed estrarre le vittime oltre che fornire un iniziale intervento medico. L'Urban Search and Rescue è considerata una disciplina necessaria in molte situazioni pericolose tra cui i terremoti, cicloni, tempeste e trombe d'aria, inondazioni, cedimenti delle dighe, incidenti tecnologici, attività terroristiche e pericolosi rilasci di materiali [33] [34] [35]. In questa visione si inserisce il progetto RoboCup Rescue, il cui scopo è promuovere la ricerca e lo sviluppo nell'ambito della robotica e dell'intelligenza artificiale al fine di sviluppare sistemi robotici robusti, affidabili e di supporto nelle operazioni USAR.

Requisiti fondamentali per i robot inseriti nel contesto USAR sono l'autonomia e la collaborazione: una volta inseriti in un ambiente a priori sconosciuto e nel quale il controllo da parte di un operatore umano potrebbe essere impossibile, i robot devono essere in grado di individuare le vittime presenti nel minor tempo possibile. Per fare questo sono necessari metodi che, basandosi su un modello del mondo costruito in maniera incrementale ad ogni passo esplorativo e condiviso tra tutti i membri del team, determinino le possibili posizioni raggiungibili dai robot (posizioni che solitamente si trovano al confine tra lo spazio conosciuto e quello sconosciuto) e ne definiscano le modalità di assegnamento ai robot. Tale assegnamento è vincolato ad una efficace ed efficiente strategia di esplorazione che sia in grado di valutare, relativamente ad ogni robot, l'utilità di ogni possibile posizione da raggiungere, al fine di ottenere il maggior mapping possibile dell'ambiente.

Le annuali Virtual Robots Competition (inserite all'interno delle RoboCup Competition) [36] [37] [39] costituiscono un'ottima occasione di confronto tra i diversi sistemi multi-robot sviluppati per applicazioni USAR. In particolare, attraverso l'impiego del simulatore USARSim [14] [15], i vari gruppi di ricercatori possono concentrarsi sullo sviluppo dei controllori dei robot, delegando l'aspetto fisico e grafico della simulazione ad un motore preesistente: l'Unreal Engine. A livello internazionale, sono molti i controllori proposti; tra questi vi è UvARescue2009 [6] [7] [8] [9], sviluppato dai ricercatori dell'UvA (Universiteit van Amsterdam) e dall'Oxford University Computing Laboratory.

Questa tesi propone quattro diversi metodi per l'assegnamento ai robot delle successive posizioni da raggiungere nell'ambito dell'esplorazione autonoma. I quattro metodi sono stati implementati nel controllore UvARescue2009 e ognuno di essi è stato implementato in due versioni che si differenziano sulla base della specifica strategia di esplorazione adottata: la strategia VISSER e la strategia MCDM (Sezione 3.5). Obiettivo delle strategie è stabilire un valore "di bontà", o in termini più formali, di utilità per i punti candidati a essere i prossimi raggiunti all'interno del processo esplorativo. In particolare: la strategia VISSER (da Arnaud Visser, professore responsabile del progetto UvARescue) adottata originariamente all'interno del controllore UvARescue2009, propone un calcolo dell'utilità in cui i criteri, sulla base dei quali una posizione candidata viene valutata rispetto ad un robot, sono aggregati semplicemente attraverso una funzione che sfrutta il concetto di proporzionalità. Nella strategia MCDM (Multi Criteria Decision Making), invece, l'utilità di una posizione candidata rispetto ad un robot viene calcolata aggregando i criteri, opportunamente pesati, attraverso una tecnica chiamata "Choquet fuzzy integral". Attraverso MCDM è possibile modellare la ridondanza e la sinergia tra i criteri attraverso un opportuno settaggio dei pesi delle combinazioni dei criteri stessi.

La tesi confronta i diversi metodi di assegnamento robot/frontiera al fine di individuare il metodo e la strategia che complessivamente sono in grado di determinare la maggior estensione di area mappata. Quello che si è rilevato è che globalmente la strategia MCDM garantisce migliori performance rispetto alla strategia VISSER, indipendentemente dal metodo di assegnamento robot/frontiera impiegato. Si è inoltre potuto osservare che l'elemento chiave ai fini della migliore prestazione è la modalità di stima dell'utilità di ogni punto raggiungibile: più tale stima è precisa (ossia sfrutta informazioni più affidabili) più l'area mappata risulta essere maggiore.

La tesi è organizzata come segue: nel Capitolo 2 vengono illustrati più dettagliatamente il contesto e gli obiettivi dell'Urban Search and Rescue, nonché della RoboCup Competition; sono inoltre illustrate alcune tecniche per l'esplorazione autonoma; si prosegue poi con la descrizione di USARSim e infine si entra nel dettaglio del Multi Criteria Decision Making.

Il Capitolo 3 presenta in modo dettagliato il controllore adottato nella tesi, ossia l'UvARescue2009, soffermandosi non solo sull'interfaccia grafica, ma soprattutto sul suo funzionamento di base in termini dei due componenti principali: l'UsarCommander e l'UsarClient.

Il Capitolo 4 entra nel dettaglio dei quattro metodi per l'assegnamento robot/frontiera implementati in questa tesi.

Il Capitolo 5 illustra i risultati delle attività sperimentali condotte nella fase di simulazione.

Nel Capitolo 6, si traggono le conclusioni del lavoro svolto proponendo possibili sviluppi futuri.

Infine, l'Appendice A illustra i dati numerici riassuntivi delle prove, mentre l'Appendice B spiega i passi di installazione e di utilizzo del simulatore USARSim e del controllore UvARescue2009.

Capitolo 2:

STATO DELL'ARTE

2.1 – Urban Search And Rescue

2.1.1 – Il contesto e gli obiettivi

USAR (Urban Search And Rescue) è una tipologia di soccorso tecnico specialistico atta a localizzare, mettere in salvo e prestare una iniziale stabilizzazione medica delle vittime rimaste intrappolate a seguito di un collasso strutturale. La nascita dell'USAR viene fatta risalire nel 1960, ma fu durante il terremoto verificatosi a Città del Messico nel 1985 che emerse la gravità del problema: l'impatto emotivo e il pesante bilancio di vittime determinò l'esigenza di creare team specializzati in grado di operare in ambiente ostile.

L'utilizzo di robot al posto delle persone nelle attività più pericolose può ridurre drasticamente la perdita di vite umane. E' in questo contesto che nasce e si inserisce il progetto RoboCup Rescue.

2.1.2 – RoboCup Rescue

Il progetto RoboCup Rescue, nato a seguito del terremoto di Hanshi-Awahi che ha colpito Kobe il 17 gennaio 1995, si inserisce nel contesto USAR con lo scopo di promuovere la ricerca e lo sviluppo di robot nell'ambito delle operazioni USAR.

In questa visione, tale progetto si propone di mettere a punto sistemi in grado di assicurare affidabilità e robustezza durante le operazioni di emergenza, dare tempestivo supporto durante le operazioni di ricerca e soccorso oltre che costituire un valido strumento nella raccolta e distribuzione delle necessarie informazioni. Questo obiettivo ha spinto verso ricerche sempre più approfondite nella tecnologia robotica e nell'intelligenza artificiale, concentrandosi in particolare nel ragionamento automatico, nella mappatura dell'ambiente, nella pianificazione di percorsi e nell'individuazione delle vittime.

Le annuali RoboCup Competition [30] costituiscono un'ottima occasione di confronto tra i diversi sistemi multi-robot. La finalità è introdurre significativi miglioramenti negli aspetti focali quali: l'individuazione di vittime, di ostacoli e di pericoli; la realizzazione di mappe dettagliate e precise; la percezione sensoriale; la comunicazione inter-robot, al fine di permettere agli operatori umani un sempre più rapido e mirato intervento nell'estrazione e messa in salvo di vite umane.

All'interno delle RoboCup Competition sono state organizzate, a partire dal 2006, le Virtual Robots Competition, ossia competizioni a livello di simulazione, nelle quali l'obiettivo è valutare e confrontare i controllori dei robot progettati e sviluppati da diverse squadre di ricercatori. I vari controllori proposti, tra i quali è da annoverare in particolare UvARescue2009 (in quanto controllore di riferimento per questa tesi), si avvalgono dell'utilizzo del simulatore USARSim.

USARSim (Unified System for Automation and Robot Simulation) [14] [15] è un simulatore 3D che riproducendo dettagliatamente un ambiente di soccorso robotico, si propone l'analisi dell'interazione uomo-robot (Human Robot Interface, HRI) e del coordinamento multi-robot nel contesto dell'Urban Search And Rescue.

2.2 – Esplorazione autonoma

2.2.1 – Il problema dell'esplorazione

Requisito fondamentale della robotica mobile è la capacità dei robot di esplorare un ambiente al fine di costruirne la mappa il più possibile accurata [12] [13] [18] [19] [20] [21]. Molti compiti che un robot deve eseguire, come ad esempio, raccogliere campioni di roccia su Marte, localizzare miniere oceaniche, pianificare operazioni di ricerca e soccorso richiedono una sua accurata capacità di navigazione. Tuttavia in molti ambienti come ad esempio su Marte, in spazi sottomarini o in ambienti interni e/o disastri, il sistema GPS non è disponibile. Il risultato è che il miglior modo per un robot di navigare è utilizzare i suoi sensori per localizzarsi all'interno di un ambiente e costruirvi la mappa; la mappa costituisce quindi il modello dell'ambiente che il robot utilizza per pianificare i suoi spostamenti.

Il problema per un robot di costruire la mappa dell'ambiente a partire dai dati rilevati attraverso i suoi sensori e allo stesso tempo di localizzarsi all'interno della mappa stessa, è conosciuto come SLAM: Simultaneous Localization and Mapping [28]. Gli algoritmi SLAM, tuttavia, si focalizzano unicamente sulla costruzione della mappa dell'ambiente il più accurata possibile a partire dai dati sensoriali, ma non si occupano di far decidere al robot dove muoversi. L'obiettivo è quello di rendere il robot in grado di decidere dove andare all'interno dell'ambiente, al fine di rilevare nuovi territori incrementando, così, la mappa dell'ambiente.

Questo è ciò che definisce il concetto di *esplorazione autonoma*.

Diverse sono le strategie esplorative che hanno come obiettivo quello di permettere ad un robot di muoversi autonomamente in un ambiente. Approccio comune di tali strategie è scegliere iterativamente la posizione che i robot devono raggiungere al fine di incrementare la loro conoscenza dell'ambiente; in particolare tali posizioni (o punti) vengono scelte, secondo modalità diverse, al confine tra lo spazio conosciuto e lo spazio non conosciuto chiamato frontiera. Queste strategie vengono definite frontier-based [16] [26] e verranno discusse dettagliatamente nella Sezione 2.2.3.

2.2.2 – I metodi SLAM

In questa sezione vengono illustrati i diversi algoritmi SLAM che si distinguono sulla base della modalità con cui la mappa viene costruita e rappresentata.

2.2.2.1 – Scan-Matching

Lo Scan-Matching è uno dei metodi più lineari per costruire la mappa dell'ambiente [5] [22] [23]. L'idea base è che il robot, muovendosi, memorizza le scansioni dell'ambiente attraverso sensori come i laser scanner o il sonar, sovrapponendo scansioni successive e componendo, in questo modo, la mappa.

L'algoritmo si articola in tre fasi che vengono ripetute in sequenza fino al termine dell'esplorazione:

1. il robot effettua una prima scansione;
2. appena una seconda scansione diviene disponibile, l'algoritmo confronta le due scansioni al fine di individuare la parte comune; a questo punto la seconda scansione viene ruotata e traslata al fine di far coincidere le due parti comuni costruendo, così, un'unica mappa più completa;
3. nel momento in cui risulta disponibile una terza scansione, questa viene confrontata con l'intera mappa generata fino a quel momento per individuare le comuni zone di sovrapposizione; una volta individuate, la terza scansione viene roto-traslata al fine di allineare le regioni comuni formando, di conseguenza, una nuova e più completa mappa.

2.2.2.2 - Occupancy Grid

Nelle mappe occupancy grid [1] [11] l'ambiente viene rappresentato come una collezione di celle dove, ad ogni cella della mappa, viene assegnata la probabilità che la corrispondente collocazione nell'ambiente sia occupata o libera da ostacoli.

In fase iniziale ogni cella contiene un valore di probabilità standard detto "probabilità a priori" tipicamente stabilito a 0,5. Procedendo nella navigazione i robot rilevano l'ambiente attraverso i sensori e ogni cella viene aggiornata in termini del valore di probabilità che esprime la relativa situazione nell'ambiente. In particolare, le celle risultano così suddivise:

- celle *open*: probabilità occupazione < probabilità a priori
- celle *unknown*: probabilità occupazione = probabilità a priori
- celle *occupied*: probabilità occupazione > probabilità a priori

2.2.2.3 - Feature-based

Nell'approccio basato su features l'ambiente esterno è caratterizzato dalla presenza di alcuni punti di riferimento (landmark) che il robot è in grado di distinguere e rispetto ai quali è in grado di effettuare delle misure. In questo approccio, quindi, la mappa è costituita esclusivamente dai landmark, la cui posizione viene stimata unitamente alla posizione dei robot.

Basando la soluzione su stime probabilistiche si verifica che gli errori sulla posizione dei landmark sono necessariamente correlati tra loro in quanto basati su misurazioni relative prese a partire dalla stessa posizione incerta del robot. Addirittura, come recentemente dimostrato da Dissanayake et al. [10], la stima della posizione dei landmark è asintoticamente totalmente correlata: diventa quindi necessario mantenere ed aggiornare una matrice di covarianza la cui computazione, però, può risultare molto pesante, soprattutto nel caso in cui l'ambiente sia caratterizzato da un numero elevato di Landmark. In questo caso l'effetto è quello di non rendere possibile l'aggiornamento della mappa in tempo reale. Per questo motivo negli ultimi anni lo sforzo di molti ricercatori si è concentrato sullo sviluppo di soluzioni sub-ottime, ma più efficienti dal punto di vista computazionale.

2.2.3 – Le strategie di esplorazione

Esistono diverse strategie di esplorazione che definiscono la modalità attraverso la quale un robot viene assegnato ad un determinato punto candidato nella mappa al fine di incrementare la conoscenza dell'ambiente.

In questa sezione vengono descritte le principali strategie frontier-based.

2.2.3.1 – Metodo di Gonzàles-Baños e Latombe

Il contributo fondamentale del metodo di Gonzàles-Baños e Latombe è da ricercarsi nella modalità di scelta dei punti candidati [5] [27]. Questo metodo assegna a tali punti una utilità che rispecchia una stima dell'ammontare di area inesplorata che il robot potrebbe “vedere” da tale punto.

Prima di procedere nei dettagli di tale metodo, occorre precisare il significato di due termini, fondamentali per comprenderne il funzionamento e la logica:

- *solid curve (o solid edge)*: l'insieme dei confini dell'ambiente esplorato che corrispondono a pareti o contorni di oggetti (ossia gli ostacoli);
- *free curve*: l'insieme dei confini che rappresentano il limite di fondo scala raggiunto dal raggio dello scanner laser, ossia dove i raggi non hanno incontrato pareti o oggetti;
- *safe region*: l'area dell'ambiente esplorata e priva di ostacoli.

A partire dal punto q_k (ultima posizione raggiunta dal robot), il metodo seleziona il nuovo punto q_{k+1} del processo esplorativo seguendo i seguenti step:

1. vengono generati un insieme di punti candidati (N_{sam}) interni alla safe region vicini alle free curves rilevate dal robot nella posizione q_k ;
2. per ogni $q \in N_{sam}$ viene calcolata la lunghezza delle solid curves: se tale lunghezza è maggiore di una certa soglia, il punto q viene tenuto; in caso contrario viene scartato dall'insieme dei valori campionati. Questo valore di soglia ha come obiettivo quello di assicurare il corretto funzionamento dell' algoritmo di riallineamento utilizzato;
3. per ogni $q \in N_{sam}$ viene ricercato un path (attraverso il path planning) tra la posizione del robot q_k e q : se il path non esiste, il punto q viene rimosso da N_{sam} .

Ai punti rimasti in N_{sam} viene assegnato un valore di utilità secondo la seguente formula:

$$\forall q \in N_{sam}, utilità(q) = A(q) * e^{-\lambda * L(q)}$$

Dove:

- $A(q)$: area inesplorata potenzialmente visibile da q ;
- λ : costante positiva;
- $L(q)$: lunghezza del più breve path libero da ostacoli calcolato attraverso il path planning.

A questo punto viene selezionato per il prossimo step esplorativo il punto q con maggiore valore di utilità.

La figura sottostante mostra i passi salienti di questo procedimento:

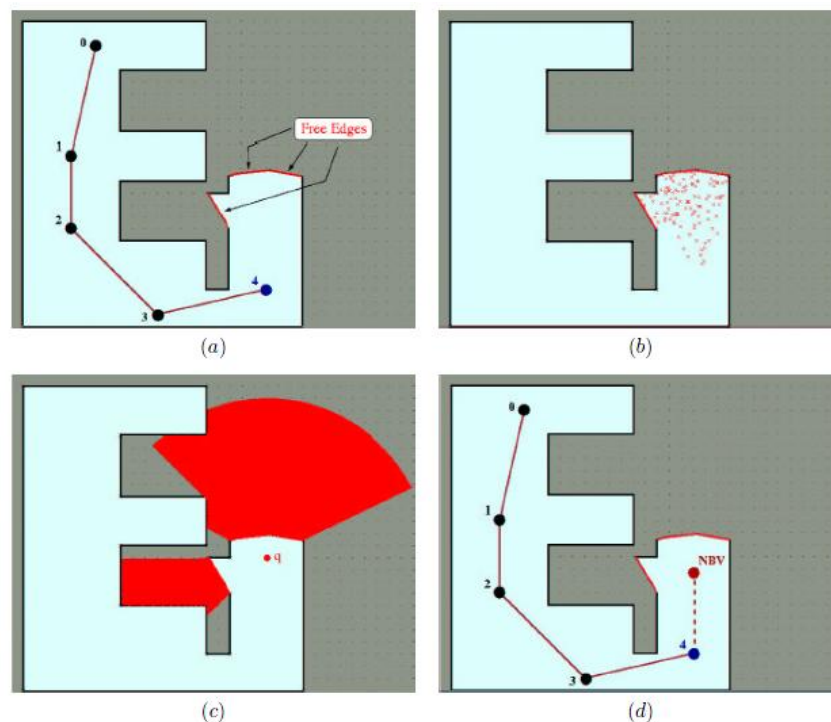


Figura 2.1 - Metodo Gonzàles-Baños e Latombe

2.2.3.2 – Metodo di Burgard

La caratteristica di questo metodo è l'assegnamento di un valore di utilità ai punti candidati (sulla base del quale verrà effettuato l'assegnamento dei robot) che esprime l'interazione tra i candidati stessi [12].

Inizialmente ad ogni punto candidato viene assegnato un valore di utilità pari a 1; successivamente viene effettuato un assegnamento tra la coppia robot/candidato più vicina: tale robot raggiungerà quindi la posizione che contraddistingue il punto. Una volta raggiunto, l'area mappata dal robot potrebbe sovrapporsi più o meno parzialmente con la nuova area potenzialmente visibile da altri punti candidati che diventano, in questo modo, meno "desiderabili". Questo avviene attraverso una rivalutazione di ogni punto candidato attraverso la seguente modalità: l'utilità di ogni punto viene decrementata di un valore calcolato sulla base della stimata probabilità che il punto in esame sia visibile dal punto candidato associato al robot in fase iniziale; più tale probabilità è alta e più il rispettivo valore di utilità viene decrementato. Per stimare tale probabilità il metodo calcola la distanza in linea d'aria tra i due candidati in questione e assegna una probabilità uguale ad una frazione del tempo che i robot hanno misurato per simili distanze nel passato.

Dopo aver aggiornato i valori di utilità di ogni punto, viene scelto, come prossimo assegnamento, la coppia robot/candidato che massimizza il valore di utilità del candidato decurtata del costo del più breve path tra il robot e il candidato. Effettuato l'assegnamento, il processo viene ripetuto.

2.2.3.3 - Metodo di Newman, Bosse and Leonard

Questo metodo di esplorazione ha come obiettivo quello di mappare più area possibile al minor costo di path; inoltre è applicato principalmente su mappe feature-based in quanto è un approccio basato sull'identificazione di features nella mappa che non sono ancora state completamente estratte, al fine di inviarvi i robot per esplorarle completamente [13].

Ogni feature nella mappa genererà punti candidati vicino a se stessa la cui disposizione dipende dal tipo di feature; per esempio, in una linea i punti verranno posizionati ai suoi estremi. L'idea è che ogni feature debba avere la sua teoria in base alla quale esplorare l'area circostante al fine di completare se stessa e scoprire nuove feature.

Il metodo di esplorazione assegna a ogni punto candidato un valore di utilità che stima la quantità di nuova area che il robot sarà in grado di rilevare da quel

punto. L'area inesplorata viene stimata seguendo due differenti approcci.

Secondo il primo approccio il metodo segue la seguente procedura: prima di tutto esamina le traiettorie passate dei robot tenendovi traccia attraverso dei "marcatori" lasciati nei punti di passaggio dei robot a distanze fisse. Successivamente posiziona un numero fissato di "punti campione" all'interno di una circonferenza di un certo raggio e con centro nel punto candidato in questione: tale circonferenza delinea il confine della zona nelle immediate vicinanze del punto candidato. Per verificare se il robot, muovendosi lungo una certa traiettoria, avesse già rilevato l'area nelle vicinanze di un punto candidato, il metodo testa se esiste una chiara linea di vista all'interno del raggio dei "punti campione" tra ognuno di essi e ogni "marcatore". Se esiste, tali "punti campione" vengono scartati. A questo punto, al punto candidato viene attribuito un valore di utilità che è pari al numero di "punti campioni" rimasti diviso il numero complessivo dei "punti campione".

Nel secondo approccio, invece, cambia la modalità di validazione dei "punti campione" e, di conseguenza, anche il calcolo dell'utilità. L'obiettivo è quello di valutare quanto un candidato è circondato da feature contando quanti "punti campione" hanno una chiara linea di vista rispetto al punto candidato stesso. L'idea sottostante è che se tra i due punti non esiste una linea di vista, allora significa che tra di essi si trova una feature; e siccome un "punto campione" delinea l'immediata vicinanza di un candidato, allora, questa feature interposta deve ovviamente trovarsi nelle immediate vicinanze del punto candidato. Vengono quindi invalidati tutti i "punti campione" che non hanno una chiara linea di vista e l'utilità del punto campione viene calcolata come il numero di "punti campione" validi per tale punto diviso il numero totale dei suoi "punti campione".

2.3 - USARSim

USARSim (Unified System for Automation and Robot Simulation) [14] [15] è un simulatore 3D orientato al soccorso robotico, sviluppato come strumento di ricerca all'interno di un progetto della National Science Foundation (NSF) inerente lo studio dell'interazione uomo-robot (HRI) e il coordinamento multi-robot nel contesto dell'Urban Search And Rescue.

In USARSim viene riprodotto fedelmente un ambiente di soccorso robotico,

includendo una serie di arene, di robot e tutta la sensoristica necessaria.

Il simulatore è stato progettato come un'estensione dell'Unreal Engine; un motore grafico avanzato sviluppato dalla Epic Games al quale il simulatore demanda completamente il rendering grafico della scena tridimensionale e la simulazione delle interazioni fisiche tra gli oggetti. In questo modo, lasciando gli aspetti più difficili della simulazione ad una piattaforma commerciale in grado di offrire un rendering visuale superiore ed una buona modellazione fisica, tutti gli sforzi nello sviluppo di USARSim sono concentrati su aspetti specifici della robotica, quali la modellazione di ambienti, sensori, sistemi di controllo e strumenti d'interfaccia.

Il professor Michael Lewis, dell'Università di Pittsburgh, costituisce la guida ed il principale punto di riferimento del team di sviluppo di USARSim; la manutenzione del codice è affidata allo sviluppatore principale Jijun Wang, che cura il rilascio delle varie release del simulatore.

2.3.1 – Architettura del sistema

Il sistema usa una architettura di tipo client/server: il lato client è composto dall'Unreal Client, dall'Image Server e dal controllore; il lato server (chiamato anche Unreal Server) è invece caratterizzato dall'Unreal Engine, dal Gamebots, dalle mappe e dai vari modelli (modelli dei robot, dei sensori e delle vittime).

Lo schema di Figura 2.2 mostra l'architettura completa del sistema; di seguito verranno poi descritte le varie componenti.

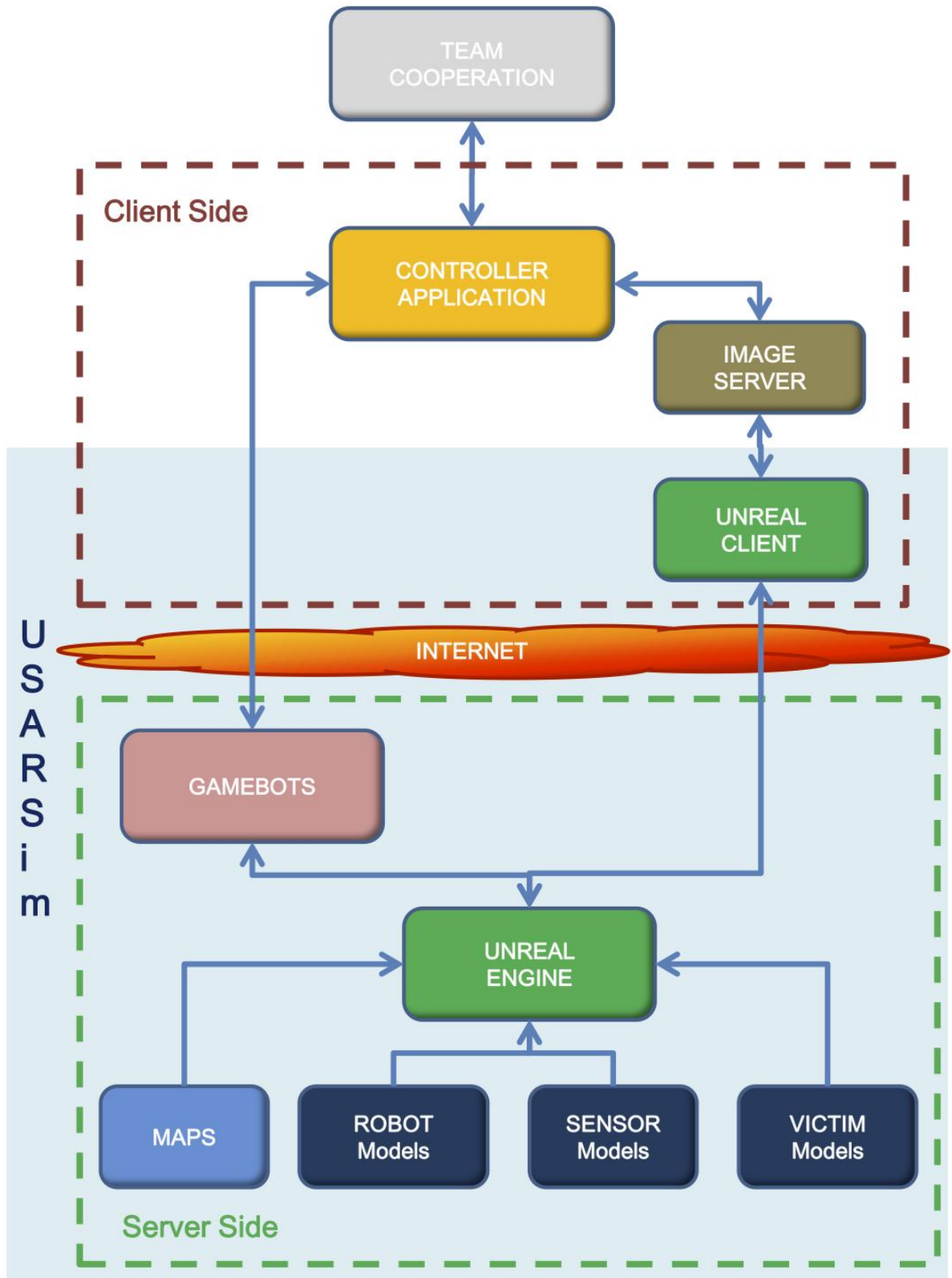


Figura 2.2 - Architettura USARSim

2.3.1.1 - Unreal Engine

L'Unreal Engine è il motore grafico di gioco che sta alla base di USARSim; è rilasciato dalla Epic Games all'interno del videogioco Unreal Tournament.

L'Unreal Engine è un sistema completo di sviluppo e simulazione di ambienti tridimensionali, composto da:

- un renderer grafico 3D, *Unreal Client*, in grado di fornire visuali egocentriche (poste sul robot) della simulazione;
- un motore per le interazioni fisiche, Karma Engine, che simula la gravità e le interazioni tra gli oggetti;
- un tool di authoring 3D, Unreal Editor, per la creazione di mappe;
- un linguaggio di scripting, Unreal Script, per modificare il comportamento del sistema.

L'Unreal Engine riceve informazioni e comandi dall'Unreal Client sotto forma di messaggi; li elabora creandone una rappresentazione grafica, ossia modificando l'ambiente. Invia infine all'Unreal Client lo stato del mondo dopo l'aggiornamento.

2.3.1.2 - Gamebots

Il protocollo di comunicazione utilizzato dall'Unreal Engine è proprietario e questo rende difficile l'accesso ad Unreal Tournament da parte di applicazioni esterne. Gamebots è una modifica all'Unreal Tournament realizzata con lo scopo di consentire la comunicazione tra l'Unreal Engine e i controllori esterni. Tale comunicazione viene stabilita attraverso l'apertura di una connessione socket TCP/IP sulla porta 3000.

2.3.1.3 - Controller

Vengono definite Controller tutte le applicazioni esterne che utilizzano il simulatore; in particolare si tratta di sistemi di controllo e coordinamento robotici che utilizzano USARSim per essere testati.

L'interazione viene creata come segue:

- inizialmente il Controller si connette all'Unreal Engine attraverso il

Gamebots;

- successivamente il Controller invia il comando per inserire un robot in USARSim;
- a questo punto il Controller entra in un ciclo infinito (che dura per tutto il tempo previsto per la simulazione) in cui, ad ogni passo, riceve in input i dati dai sensori e invia in output i comandi per controllare il robot.

L'architettura client/server permette, inoltre, di aggiungere più di un robot nella simulazione (creando un team di robot e definendo, quindi, un contesto multi-robot).

Ogni robot utilizza un proprio socket per comunicare: il Controller deve quindi creare una diversa connessione per ognuno dei robot impiegati.

2.3.1.4 - Unreal Client

L'Unreal Client, lato client del simulatore, si occupa dell'interfaccia grafica e del rendering (ossia di generare una rappresentazione grafica) partendo dallo stato del mondo calcolato dall'Unreal Engine.

2.3.1.5 - L'Image Server

L'Image Server è un'applicazione che permette di catturare e osservare le immagini provenienti dalle telecamere utilizzate all'interno del motore del gioco. Essa si interpone tra il simulatore USARSim e il controllore, fungendo da client per il primo e da server per il secondo.

2.3.1.6 - Le mappe e i modelli

Le mappe costituiscono l'ambiente all'interno del quale avviene la simulazione. Diverse sono le mappe disponibili, tuttavia in ognuna si ritrovano gli elementi caratteristici del contesto USAR, ossia, disastri strutturali e/o ambientali, ostacoli e vittime.

Le mappe, unitamente ai modelli dei robot, dei sensori e delle vittime vengono utilizzati dall'Unreal Engine per creare la rappresentazione grafica dell'ambiente tridimensionale.

2.3.2 – Componenti

2.3.2.1 – Ambiente di simulazione: le arene

L'ambiente di simulazione è il contesto nell'ambito del quale la simulazione è posta in essere. Questo ambiente viene comunemente definito arena.

Il National Institute of Standards and Technology (NIST) ha creato tre diverse arene (l'arena gialla, l'arena arancio, l'arena rossa) che riproducono ambienti disastrati a difficoltà progressiva; è tuttavia possibile crearne di nuove sulla base delle specifiche esigenze di studio in ambito robotico. Per esempio, il pacchetto "DM-RoboCup06Worlds" contiene una serie di mappe che riproducono fedelmente l'interno di edifici disastrati e ambienti esterni caratterizzati da incidenti. Tali mappe sono state create in occasione delle Virtual Robots Competition per fornire un ambiente comune a tutti i team partecipanti.

L'**arena gialla** (Figura 2.3): è la più semplice da attraversare. E' composta da ampi pavimenti piatti con muri perpendicolari e ostacoli di moderata difficoltà.

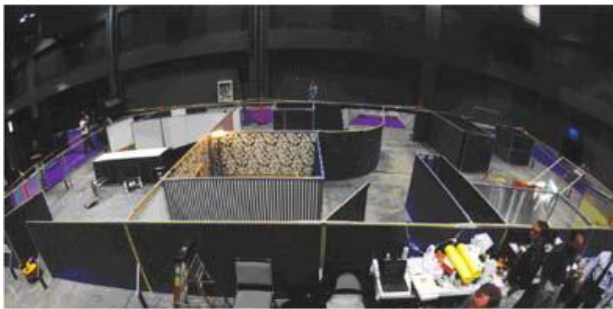


Figura 2.3 - Arena gialla

L'**arena arancio** (Figura 2.4): è un'arena a due piani con ostacoli impegnativi come scale e rampe. Il pavimento è coperto da detriti come carta, tubi e blocchi di cemento.



Figura 2.4 - Arena arancio

L'**arena rossa** (Figura 2.5): è la più difficile da attraversare in quanto definisce un ambiente completamente destrutturato dove sono presenti mucchi di macerie, blocchi di cemento, lastre e detriti.



Figura 2.5 - Arena rossa

Per tutte le arene, l'ambiente di simulazione include:

- ostacoli: sono oggetti geometrici statici, immutabili e inamovibili come ad esempio muri, scale, piani, rampe, ecc.;

- speciali effetti di simulazione: elementi particolari dell'ambiente come vetri, vasi di fiori, finestre, macerie, ecc.;
- luce: fattore fondamentale per la mobilità del robot;
- vittime: costituisce l'obiettivo di ricerca nell'ambito USAR. Il modello della vittima non è statico, ma consente dei piccoli movimenti come muovere un braccio o una gamba o emettere dei suoni come richiesta d'aiuto.

2.3.2.2 - Sensori

I sensori sono elementi fondamentali per un robot autonomo. Lo schema seguente ne mostra l'architettura completa all'interno di USARSim.

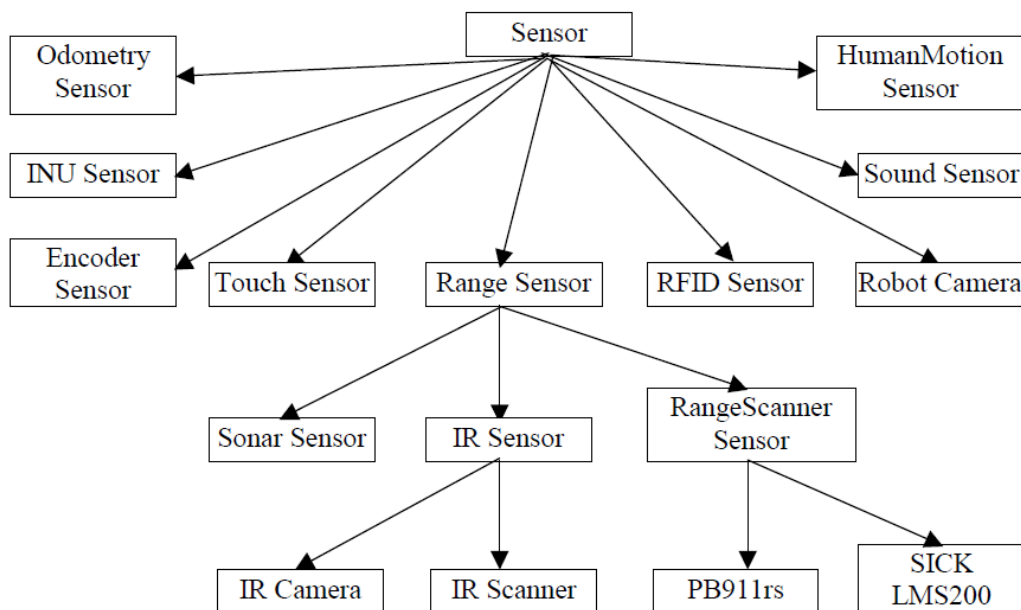


Figura 2.6 - Schema sensori

Tra tutta la sensoristica a disposizione, quelli principalmente usati nell'ambito della tesi sono i seguenti:

- *l'INS* (Inertial Navigation Sensor): sensore in grado di stabilire la posizione del robot rispetto al punto iniziale analizzando l'andamento delle ruote in termini di velocità e rotazione, permettendo al robot di capire in che posizione si trova.
- Sensori per l'individuazione di una vittima: in questa categoria rientrano i

sensori *RFID* e gli *HumanMotion Detection*. I primi sono in grado di rilevare la presenza di targhette in grado di emettere deboli segnali radio, il presupposto è che queste targhette siano state consegnate anticipatamente a tutte le potenziali vittime; mentre i secondi sono in grado di fornire la probabilità di aver rilevato il movimento di una vittima nella scena.

- *Laser scanner*: sono dispositivi in grado di emettere una schiera di impulsi elettromagnetici e di riceverne il segnale riflesso, misurando l'intervallo di tempo trascorso e quindi la distanza tra lo strumento ed il punto rilevato.
- *IR (Infrarosso)*: funzionano secondo lo stesso principio dei laser scanner, ma a luce infrarossa;
- Il *Sonar (sound navigation and ranging)*: è un sensore in grado di rilevare la presenza di un oggetto sfruttando il riflesso delle onde sonore. Rispetto al laser scanner è meno preciso, ma a più ampio raggio.
- *Encoder*: fornisce l'informazione sull'angolo di rotazione di un giunto;
- *Sensori odometrici*: forniscono una stima della posizione e dell'orientamento del robot a livello planare; i dati generati sono quindi una tripla x,y,ϑ .
- *Sensori di contatto*: avvertono il robot dell'urto con un oggetto;
- *Telecamera*: è il sensore più importante oltre che essere l'unico a fornire dati esternamente al protocollo Gamebots; l'utilizzo dei dati della telecamera è subordinato alla cattura dell'output video dell'Unreal Client. Per il sistema Windows è distribuito con USARSim il programma ImageServer il quale, selezionata una istanza di Unreal Client in esecuzione, ne distribuisce in rete il contenuto ai client connessi.

2.3.2.3 – Robot

I robot sono gli attori più importanti all'interno della simulazione. Ogni robot è modellizzato come l'unione di vari sottosistemi: il sottosistema della mobilità (simula le componenti meccaniche come ruote, telai, ecc.), il sottosistema dei sensori e attuatori e il sottosistema “mission-package” che simula l'interazione tra le varie parti del robot; in particolare, connette attuatori e sensori permettendo di eseguire un ben preciso compito.

USARSim offre una vasta gamma di robot effettivamente costruiti nella realtà,

ognuno corredato dalle proprie caratteristiche: P2AT, StereoP2AT, ATRVjr, HUMMWW, SnowStorm, Sedan, Cooper, Submarine, Tarantula, Zerg, Talon, QRIO, ERS, Soryu, Kurt2D, Kurt3D, Lisa, TeleMax, AirRobot, RugBot, Kenaf.

In questa tesi è stato utilizzato per le simulazioni il robot P2AT (Figura 2.7). Qui di seguito sono riportate le sue caratteristiche.



Figura 2.7 - P2AT reale e simulato

- *Dimensioni*: Lunghezza x Larghezza x Altezza[cm] = 50 x 49 x 26
- *Ruote*: Diametro x profondità [cm] = 22 x 7.5
- *Peso*: 14 kg
- *Carico Utile*: 40 Kg
- *Velocità massima di traslazione*: 700 mm/s
- *Velocità massima di rotazione*: 140 deg/s

E' inoltre equipaggiato con i seguenti componenti:

- camera, attraverso la quale osservare l'ambiente;
- due sonar: uno frontale e posteriore;
- un laser scanner
- l'INS
- un sensore di odometria
- sensore RFID

E' stato scelto questo robot in quanto particolarmente adatto per ambienti interni (nella tesi è stata usata la mappa "DM-compWorldDay4b_250" che riproduce fedelmente l'interno di un edificio a due piani nel quale sono stati strutturati degli uffici) in quanto versatile nello spostamento; risulta essere invece poco adatto su terreni accidentati perché la poca stabilità potrebbe causare una caduta dalla quale non è in grado di riprendersi.

2.3.2.4 – Comunicazione inter-robot

Un aspetto importante in ambito multi-robot è il coordinamento tra tutti i membri del team. Nel contesto USAR tali comunicazioni vengono gestite via Wireless. Per questo motivo USARSim dispone di un tool chiamato WSS (Wireless Simulation Server) [2] in grado di simulare tale tipologia di comunicazione inter-robot in un ambiente disastroso.

Lo schema del processo di comunicazione tra robot è presentato qui di seguito (esemplificando il procedimento con l'utilizzo di un robotA e di un robotB).

- Il robotA deve aprire una connessione di controllo con il WSS (che servirà esclusivamente per inviare e ricevere comandi di simulazione) e registrarsi una porta che rimarrà sempre in ascolto;
- Stessa cosa per il robotB.

Una volta stabilita la connessione di controllo, il robot può considerarsi “attivo” in un ambiente disastroso.

A questo punto, quando tutti i membri del team sono registrati, ossia hanno creato una connessione di controllo con il WSS, si apre una seconda fase nella quale viene creata un nuovo tipo di connessione, mediata dal WSS, tra tutte le coppie di robot, al fine di permettere la comunicazione tra i vari membri del team. Tale connessione è di tipo TCP.

- RobotA, attraverso la comunicazione di controllo precedentemente creata, richiede al WSS una porta, presso il WSS stesso, per la comunicazione con il robotB;
- il WSS risponde con un numero di porta presso il quale il robotA effettuerà la connessione TCP. Questa connessione verrà accettata dal WSS solamente nel caso in cui il robotB è “attivo” presso il WSS;
- sotto questa ipotesi, il WSS assegna una porta al suo indirizzo e apre una connessione TCP con il robotB;
- il robotB accetta la connessione;
- a questo punto robotA e robotB possono comunicare attraverso la mediazione del WSS.

Il risultato di questo procedimento è quindi creare due tipologie di

comunicazione: una di controllo dedicata tra il WSS e ogni robot del team e una TCP per ogni coppia di robot. Tale seconda connessione è caratterizzata a sua volta da una coppia di porte presso il WSS che permettono la ricezione dati in input e in output rispettivamente.

La Figura 2.8 mostra lo schema di funzionamento del WSS così come descritto sopra.

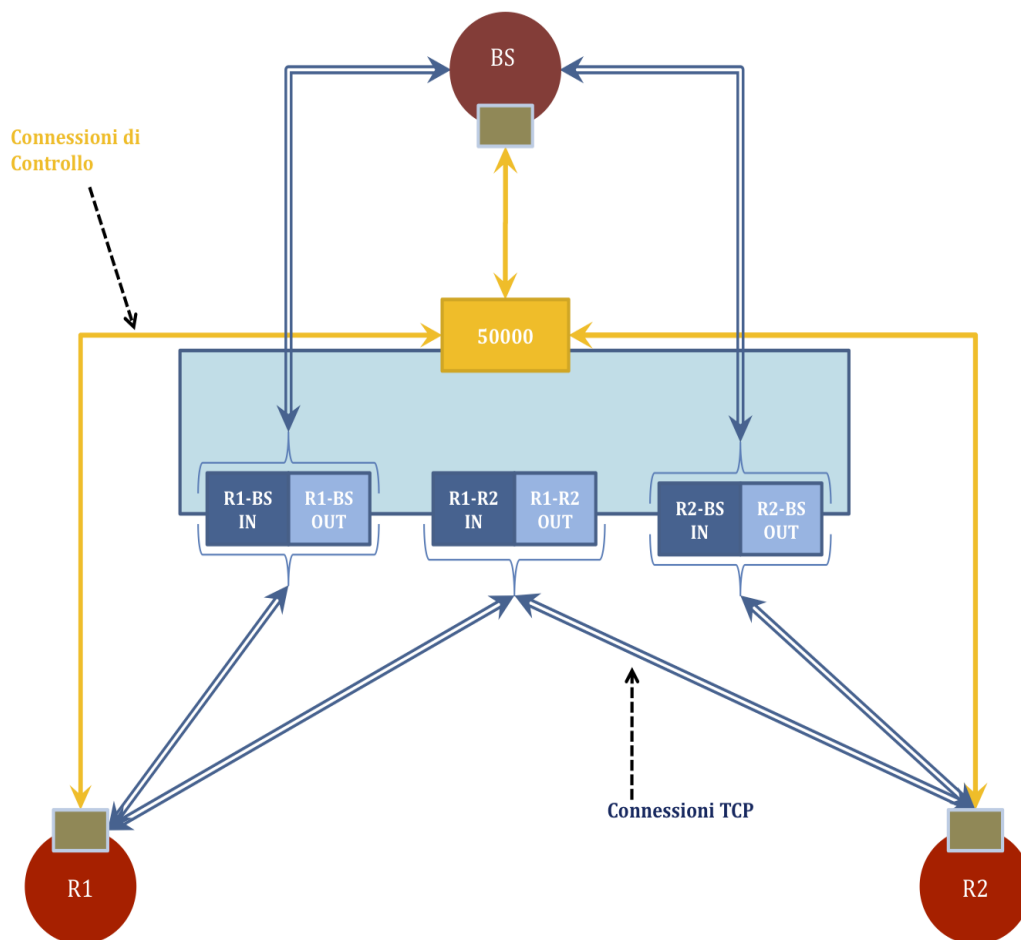


Figura 2.8 - WSS

2.4 – Multi Criteria Decision Making (MCDM)

Compito fondamentale della robotica mobile è la capacità di costruire autonomamente modelli dell'ambiente. In questa direzione si inseriscono due problematiche: la prima riguarda l'aspetto della localizzazione e del mapping (SLAM) (sezione 2.2.2); la seconda è invece inerente l'esplorazione.

Per quanto riguarda lo SLAM, l'obiettivo è quello di integrare le informazioni raccolte durante la navigazione al fine di costruire la mappa dell'ambiente il più precisa possibile. Obiettivo dell'esplorazione è invece definire una strategia che guidi il robot nella scelta della miglior nuova posizione durante la navigazione, dove per "miglior nuova posizione" si intende quella che massimizza la quantità e la qualità di informazione acquisita una volta raggiunta. Diversi sono i criteri che guidano nella scelta del punto candidato, ed è in questa direzione che si inserisce MCDM: una strategia esplorativa che aggrega flessibilmente tali criteri tenendo in considerazione le mutue dipendenze.

2.4.1 – Next-Best-View

Per *Next-Best-View* [3] [12] si intende quell'insieme di metodi che hanno come obiettivo quello di determinare il successivo passo di esplorazione che il robot deve compiere al fine di incrementare la mappatura di un ambiente a priori sconosciuto.

Questi metodi si distinguono tra loro sulla base del differente criterio adottato per la valutazione del candidato. Si veda, per esempio, il metodo di Gonzàles-Baños e Latombe presentato in 2.2.3.1, il metodo Burgard illustrato in 2.2.3.2 e il metodo di Newman, Bosse and Leonard discusso in 2.2.3.3.

In generale questi metodi combinano i diversi criteri selezionati con una funzione ad hoc che restituisce un valore di utilità per ogni punto candidato.

L'algoritmo base che accomuna tutti questi metodi è mostrato nello schema di Figura 2.9:

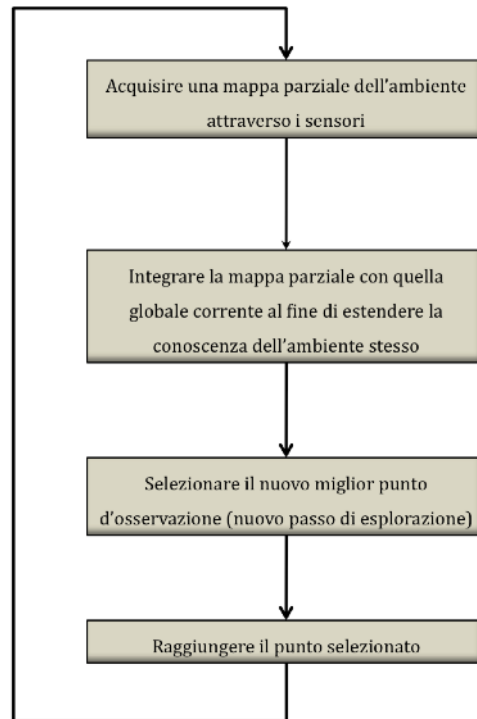


Figura 2.9 - Algoritmo Next-Best-View

2.4.2 - I criteri

Diversi sono i criteri che possono essere presi in considerazione per la valutazione dei punti candidati. La scelta non è però così banale: considerare troppi criteri, potrebbe causare ridondanza oltre che aumentare la complessità della funzione di utilità e quindi il suo tempo computazionale. Di contro, una scelta minimale porta ad una utilità poco significativa.

2.4.3 - La normalizzazione

Per poter aggregare significativamente criteri di natura diversa, è indispensabile, prima di tutto, farli ricadere all'interno di uno stesso range di valori. Questo procedimento prende il nome di normalizzazione dei criteri, il cui intervallo è comunemente $[0;1]$.

Esistono diverse tecniche di normalizzazione; in questa tesi è stata utilizzata la seguente funzione lineare:

$$x(p)_{normalizzato} = \frac{x(p) - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

Dove:

- $x(p)$ è il valore del criterio “x” per il punto “p”;
- x_{\min} e x_{\max} sono il valore minimo e massimo assunto dal criterio considerando tutti i punti candidati.

Se il criterio preso in considerazione è inversamente proporzionale all'utilità (esempio il costo), la funzione di normalizzazione si modifica come segue:

$$x(p)_{normalizzato} = 1 - \frac{x(p) - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

2.4.4 - I pesi

I criteri vengono pesati singolarmente per uno specifico valore compreso tra 0 e 1 (facendo attenzione che la somma dei pesi dia 1); inoltre un peso viene anche associato ad ogni gruppo possibile di criteri. Diverse sono le modalità attraverso le quali effettuare tale aggregazione; un esempio potrebbe essere l'utilizzo della media pesata. Nel contesto MCDM viene utilizzato invece, come metodo di aggregazione, l'integrale di Sugeno-Choquet in quanto permette di tenere in considerazione gli aspetti fondamentali di sinergia e ridondanza tra i criteri.

Tali aspetti e l'integrale di Sugeno-Choquet, sono oggetto di dettaglio nei paragrafi 2.4.5 e 2.4.6.

2.4.5 - Sinergia e ridondanza

Sinergia e ridondanza sono due aspetti importanti che esprimono i legami tra i criteri.

Definiamo, per esempio, alcuni criteri:

- $c(p)$: costo, in termini di distanza, per raggiungere il punto p dalla posizione attuale del robot;
- $A(p)$: area visibile dal punto p;
- b : livello di carica della batteria del robot.

In particolare, due o più criteri si dicono tra loro *ridondanti* quando, nella valutazione dell'utilità di un punto candidato, considerano uno stesso aspetto. Ad

esempio: $c(p)$ e b sono tra loro ridondanti in quanto entrambi tengono in considerazione la quantità di strada da percorrere per arrivare al punto candidato.

Due o più criteri si dicono tra loro in *sinergia* quando riguardano aspetti completamente diversi che si vogliono ottimizzare concorrentemente, come ad esempio $A(p)$ e $c(p)$.

Detto in termini più formali, dati due criteri generici c_1 e c_2 , essi sono tra loro ridondanti se l'utilità congiunta è minore della somma delle rispettive utilità individuali:

$$\mu(\{c_1, c_2\}) < \mu(c_1) + \mu(c_2);$$

se invece la loro utilità congiunta è maggiore della somma delle rispettive utilità individuali allora i criteri c_1 e c_2 sono tra loro in sinergia:

$$\mu(\{c_1, c_2\}) > \mu(c_1) + \mu(c_2).$$

Qualora invece la loro utilità congiunta fosse esattamente uguale alla somma delle rispettive utilità individuali, i due criteri c_1 e c_2 sarebbero tra loro indipendenti.

$$\mu(\{c_1, c_2\}) = \mu(c_1) + \mu(c_2).$$

L'indipendenza tra criteri è l'assunzione base che caratterizza il metodo della media pesata come modalità di aggregazione tra criteri.

2.4.6 - L'integrale di Sugeno-Choquet: Choquet fuzzy integral

Per calcolare il valore di utilità di un punto candidato, i criteri vengono pesati e combinati tra di loro. Come già accennato nel paragrafo 2.4.4, diverse possono essere le modalità attraverso le quali effettuare tale aggregazione; un esempio è la media pesata. Tuttavia quest'ultima soffre di un problema, ossia la mutua indipendenza dei criteri: usando infatti la media pesata come funzione di aggregazione si assume l'indipendenza degli stessi, perdendo di conseguenza la possibilità di tenere in considerazione le relative ridondanze e sinergie.

Per risolvere questo problema ed esprimere quindi le relazioni di ridondanza e sinergia tra criteri, MCDM utilizza, per il calcolo dell'utilità complessiva di un punto candidato, una tecnica di aggregazione chiamata *Choquet fuzzy integral* così definita:

$$u(p) = \sum_{j=1}^N (u_j(p) - u_{j-1}(p)) \mu(A_j)$$

dove:

- N è il numero di criteri considerati;
- $u_j(p)$ è il valore di utilità per il solo criterio j . Per poter individuare questo valore è necessario prima riordinare i criteri in ordine crescente:

$$u_1(p) \leq \dots \leq u_N(p) \leq 1, \text{ con } u_0(p) = 0$$

- A_j è l'insieme dei criteri dal j -esimo (compreso) all' N -esimo:

$$A_j = \{i \in N \mid u_j(p) \leq u_i(p) \leq u_N(p)\}$$

- $\mu(A_j)$ è la funzione di aggregazione definita sull'insieme di criteri che assegna ad ogni insieme di criteri A il rispettivo peso secondo le seguenti proprietà:

$$1) \mu(\emptyset) = 0; \mu(N) = 1$$

$$2) \text{ se } A \subset B \subset N, \text{ allora } \mu(A) \leq \mu(B)$$

Da sottolineare che utilizzando l'integrale di Sugeno-Choquet nell'ipotesi di indipendenza tra i criteri, il valore di utilità che si ottiene per un punto coincide con la media pesata dei criteri stessi per quel punto.

Capitolo 3:

UvARescue2009

3.1 – Introduzione

Come già ampiamente discusso nel paragrafo 2.3, il simulatore USARSim si presta ad essere utilizzato per testare sistemi di controllo e coordinamento robotici. Esistono diversi sistemi di controllo utilizzabili, come ad esempio Pyro, Player e Moast; in questa tesi è stato scelto di utilizzare il controllore UvARescue2009 in quanto il controllore più completo in termini delle funzionalità offerte. In particolare sono da sottolineare l'aspetto grafico legato alla generazione run-time della mappa unitamente alla possibilità di visualizzare le frontiere individuate ad ogni step, la comoda interfaccia grafica dalla quale è possibile gestire la configurazione del team di robot, nonché la possibilità di modificare il comportamento di ogni singolo robot qualora sussistano particolari esigenze di navigazione.

3.1.1 – Cos'è UvARescue2009

UvARescue2009 è il controllore sviluppato dalla squadra “Amsterdam Oxford Joint Rescue Forces”, composta dai ricercatori dell'UvA (Universiteit van Amsterdam) e dall'Oxford University Computing Laboratory. La prima versione di questo controllore risale al 2006 in occasione della prima Virtual Robots Competition della RoboCup Rescue League dove la squadra si classificò terza sulle 8 squadre in competizione. Ogni anno sono state presentate versioni successive caratterizzate da correzioni di bug nonché da diversi miglioramenti nelle performance.

UvARescue è un controllore di alto livello che permette la gestione dei task più complessi come l'esplorazione autonoma di un'area a priori sconosciuta unitamente alla rilevazione e alla localizzazione delle vittime. Dispone inoltre di un'interfaccia grafica comoda e molto intuitiva che permette all'utente una facile interazione ed utilizzo: configurare il team, definire posizione e orientamento iniziale di ogni robot, impostare una strategia di esplorazione (come AutonomousExploration, TeleOperation, ...) e vedere la mappa formarsi man mano che i robot avanzano nell'esplorazione.

UvARescue è un software open-source scaricabile direttamente dal sito degli sviluppatori [31] e scritto in Visual Basic.

3.2 – Interfaccia grafica

Compilando il codice, si ottengono due eseguibili: UsarCommander e UsarClient. Il primo consente all'utente di configurare il team e scegliere la strategia esplorativa attraverso l'interfaccia grafica; il secondo crea effettivamente i robot e gestisce lo scambio di messaggi tra il controllore e USARSim. L'UsarClient sarà discusso più avanti nella Sezione 3.3.2.

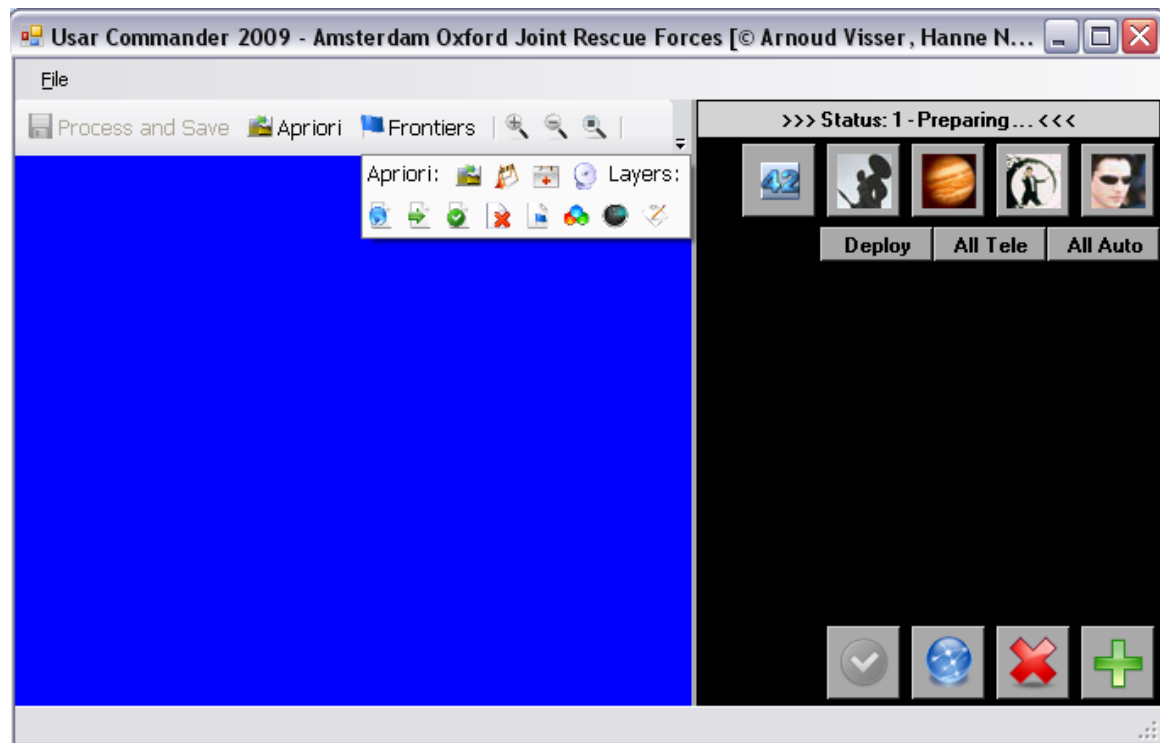


Figura 3.1 - UsarCommander

Eseguendo l'UsarCommander, si apre l'interfaccia mostrata in Figura 3.1 caratterizzata da due sezioni:

- il lato sinistro (in blu) nel quale si genera run-time, durante la fase esplorativa dei robot, la mappa dell'ambiente. In questa sezione è possibile visualizzare gli ostacoli, le frontiere individuate, nonché il valore della relativa area visibile e il percorso che il robot deve compiere per raggiungerle. Di maggiore rilevanza è la visualizzazione delle tre diverse tipologie di area che vengono rilevate dai robot, ossia:
 - l'area FREE: rappresenta l'area visibile, ma ancora da esplorare (e

dove quindi non si ha ancora l'esatta conoscenza di dove sono gli ostacoli) individuata con il laser scanner di raggio 20 metri (zone colorate di bianco);

- l'area SAFE: sottoinsieme dell'area FREE, rappresenta l'area sicuramente priva di ostacoli individuata con il laser scanner di raggio 3 metri (zone colorate di grigio);
 - l'area CLEAR: sottoinsieme dell'area SAFE, rappresenta l'area coperta dal robot e libera da vittime (zone colorate di verde).
- Il lato destro riguarda invece la configurazione iniziale del team di robot oltre che la relativa gestione durante l'intera fase di simulazione.

3.2.1 - Status 1: Preparing

Lo stato "Preparing" è quello in cui si apre il controllore lanciando l'UsarCommander (Figura 3.2).

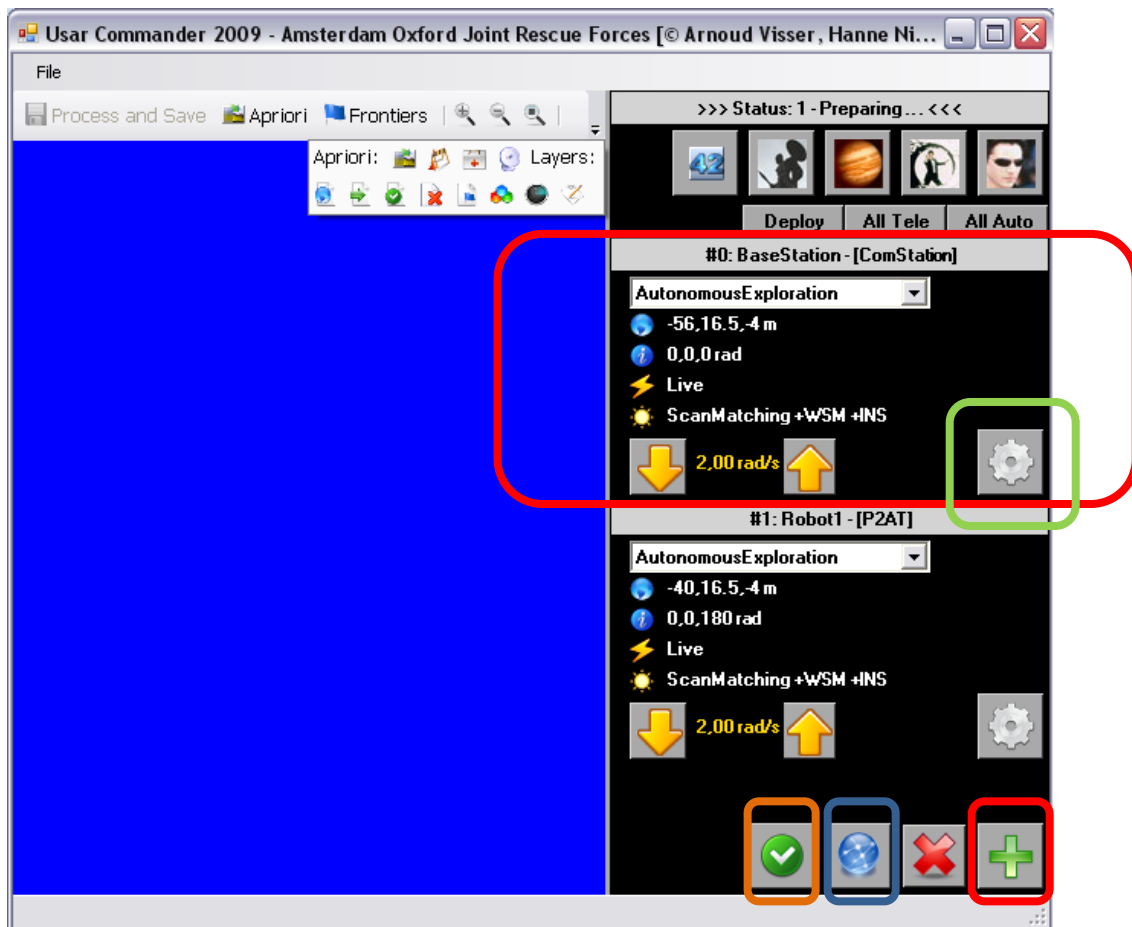


Figura 3.2 - UsarCommander_Preparing

In questo primo stato avviene l'inserimento e la configurazione dei robot e la configurazione del team attraverso le form (Figura 3.3 e Figura 3.4) che si aprono cliccando sui vari pulsanti evidenziati nella Figura 3.2.

La figura seguente mostra la form di configurazione del singolo robot:

The image shows a dialog box titled "Agent Configuration - [Robot1]". It contains several sections for configuring a robot agent:

- Config File:** AC.cfg
- Spawn Configuration:** Robot Model: P2AT, Robot Number: 1, Start Location: -44.5,16.5,-4 m, Start Rotation: 0,0,0 rad. A red button labeled "Spawn from Commander" is present.
- Behavior Configuration:** Behavior: AutonomousExploration, Cost/Gain Balance: 1 rad/s, Path Goal: (empty).
- Slam Configuration:** Localization Mode: ScanMatching, Scan Matcher: WSM, Pose Seed Mode: INS, Add Zero-Mean Gaussian Noise: 0 m.
- Skindetector Configuration:** Skindetector Mode: Detection, Teacher Mode: SkinOnly, Detector Theta: (empty).
- Driver Type:**
 - Log Playback Mode - Run offline from Logfile
 - Logfile Format: UsarSim
 - Live Mode - Connect to UsarSim
 - Create Logfile
 - Use MultiView
 - Use Image Server
 - Panels: (empty)
- Agent Type:**
 - Usar Operator
 - Usar SLAM
 - Usar Skin
 - Usar Follow
 - Usar Base

Figura 3.3 - Agent Configuration

Gli elementi fondamentali di questa form sono:

- “Spawn Configuration”: vengono definite le proprietà fondamentali per l’inserimento del robot nell’ambiente: la posizione (x,y,z), la rotazione (attorno all’asse x, attorno all’asse y, attorno all’asse z), il tipo di robot e relativo numero/nome (a seconda di quale delle cinque scelte di nomi si sia deciso di adottare). Per quanto riguarda il tipo di robot, è in questa fase che viene indicato se si tratta del robot ComStation o di un robot “esploratore”; in particolare il robot ComStation si occupa di effettuare il merge delle informazioni provenienti dai robot esploratori al fine di ricavare la mappa globale che viene poi inviata a tutti i robot del team in modo che questi possano scegliere il passo esplorativo successivo sulla base dell’informazione completa sullo stato del mondo. La ComStation viene anche chiamata BaseStation in quanto non esplorando, funge come da base di riferimento per i robot esploratori.
- “BehaviorConfiguration”: viene scelta la strategia esplorativa;
- “SLAM Configuration”: si impostano le caratteristiche della tecnica SLAM (metodo di localizzazione, lo scan matcher e il sensore di posizione);
- “Agent Type”: definisce il tipo di Agent, ognuno con caratteristiche specifiche e funzionalità aggiuntive. In questa tesi vengono impiegati: un UsarOperator per la stazione di comunicazione (ComStation) e due Usar SLAM, agent in grado di minimizzare l’errore di localizzazione del robot all’interno della mappa e quindi ottimo nell’ambito dell’esplorazione autonoma.

Ultimo ma fondamentale passo dello stato Preparing è la configurazione del team, la cui form è mostrata nella Figura 3.4.

Tale operazione consiste nella configurazione della rete: il controllore UvARescue fornisce infatti l’opportunità di distribuire i tre componenti necessari per la simulazione (ossia: USARSim, Image Server e WSS) su macchine diverse semplicemente indicando i relativi indirizzi IP.

Da sottolineare è l’importanza di questa fase, in quanto errori di configurazione impediscono la comunicazione con il simulatore e con il software WSS. Dettagli sulla corretta configurazione si trovano nell’Appendice B.

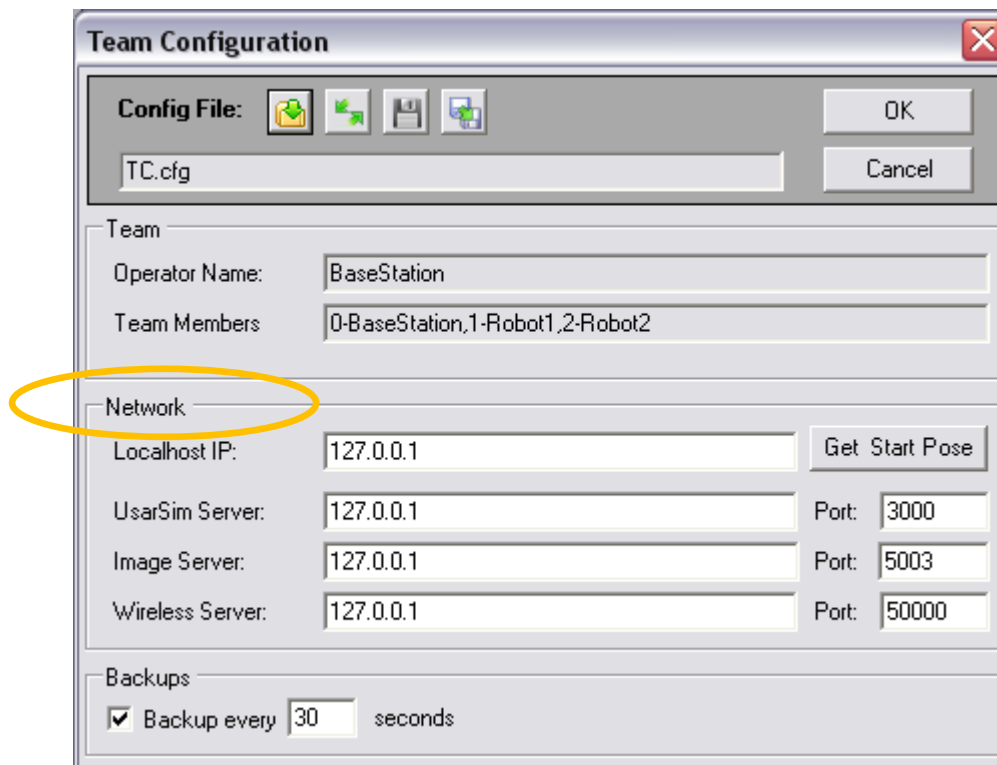


Figura 3.4 - Team Configuration

3.2.2 – Status 2: Ready

Lo stato successivo è lo stato di “Ready” (Figura 3.5). Esso può essere inteso come una sorta di stato intermedio nel quale l’utente prende visione di tutti i dati di configurazione inseriti e sulla base di questi decide se è necessario apportare delle modifiche oppure confermare e iniziare la simulazione passando al successivo stato di “Running”.

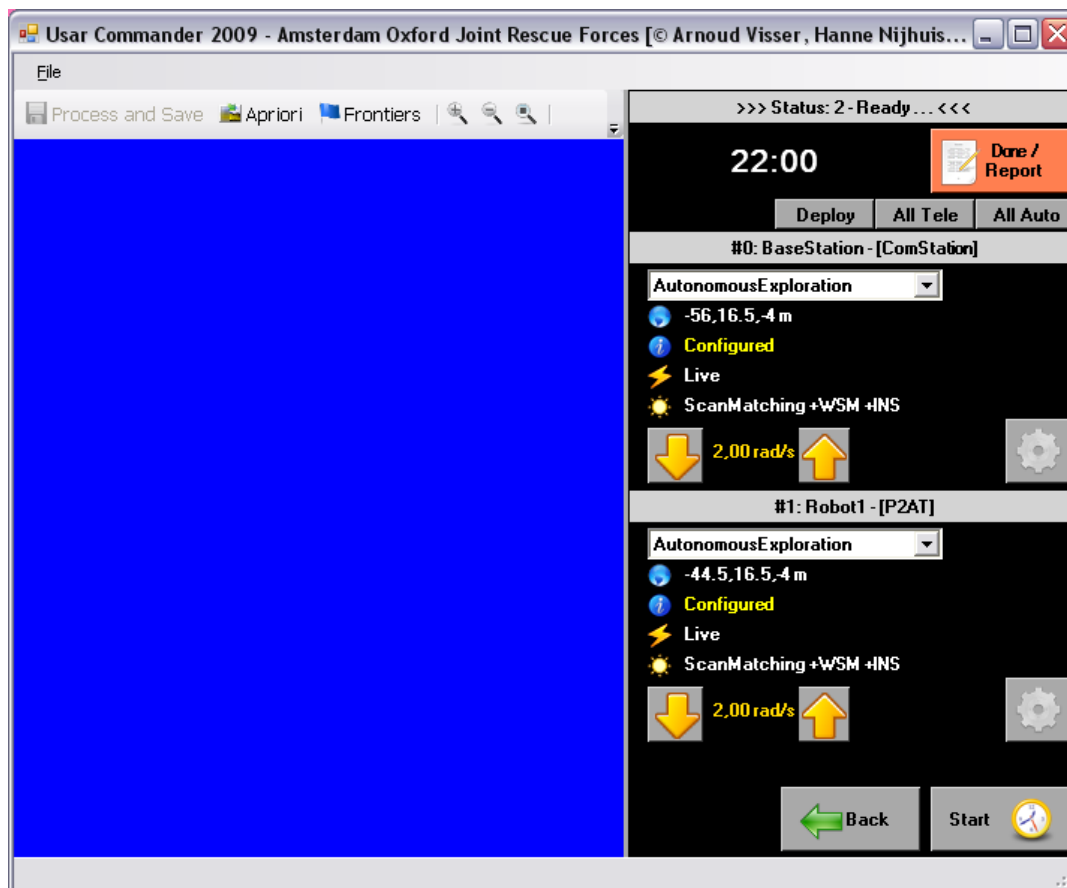


Figura 3.5 - UsarCommander_Ready

3.2.3 – Status 3: Running

Da questo stato parte la simulazione vera e propria: il cronometro inizia il conto alla rovescia (che indica il tempo rimanente al termine della simulazione) e i robot sono “Ready to Spawn”, ossia pronti per essere inseriti nell’ambiente, come indicato nella Figura 3.6. Una volta inseriti nell’ambiente, è possibile visualizzare sul lato sinistro del controllore la mappa che si forma mano a mano che i robot proseguono nell’esplorazione oltre che tenere sotto controllo l’effettiva posizione di ogni robot in ogni istante. Un esempio è mostrato in Figura 3.7.

Da notare come, ad ogni istante, sia la localizzazione dei robot sulla mappa sia il loro spostamento rispecchi la loro relativa posizione e spostamento all’interno dell’ambiente simulato (visibile attraverso l’Image Server).

Qui di seguito vengono mostrate le due figure che rappresentano lo stato di “Running” prima che i robot vengano effettivamente inseriti nell’ambiente (Figura 3.6) e la cattura di un istante di simulazione (Figura 3.7).

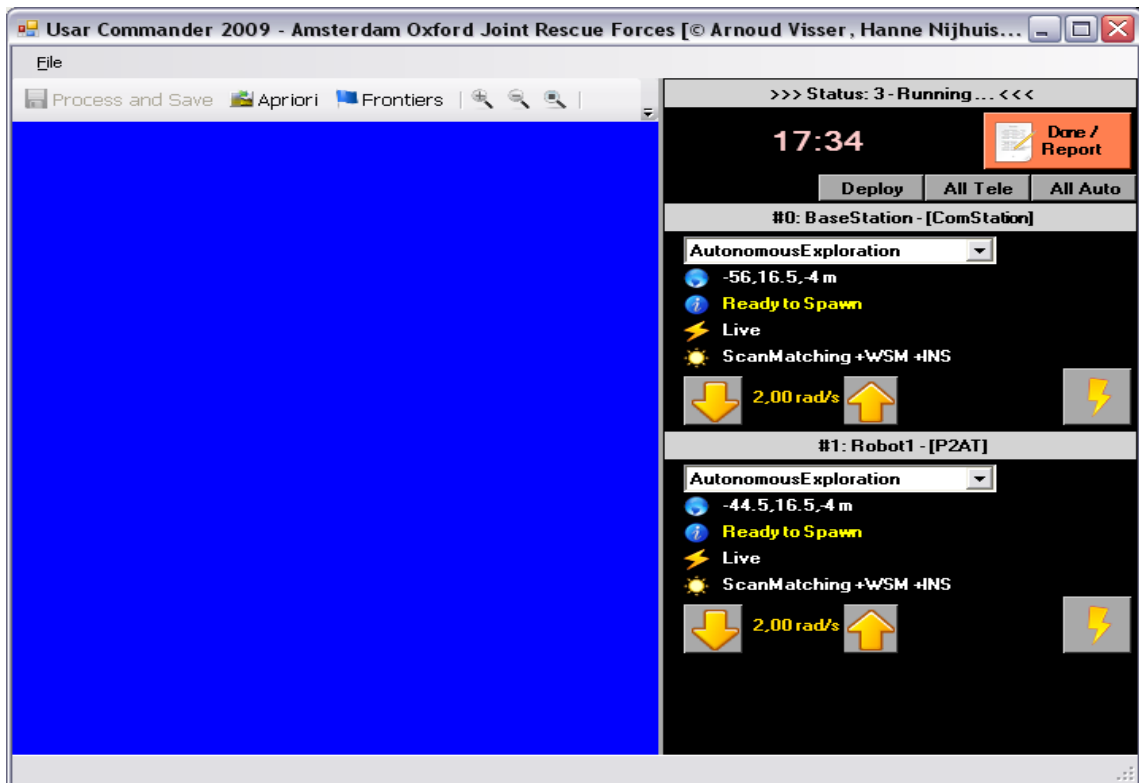


Figura 3.6 - UsarCommender_Running_ReadyToSpawn

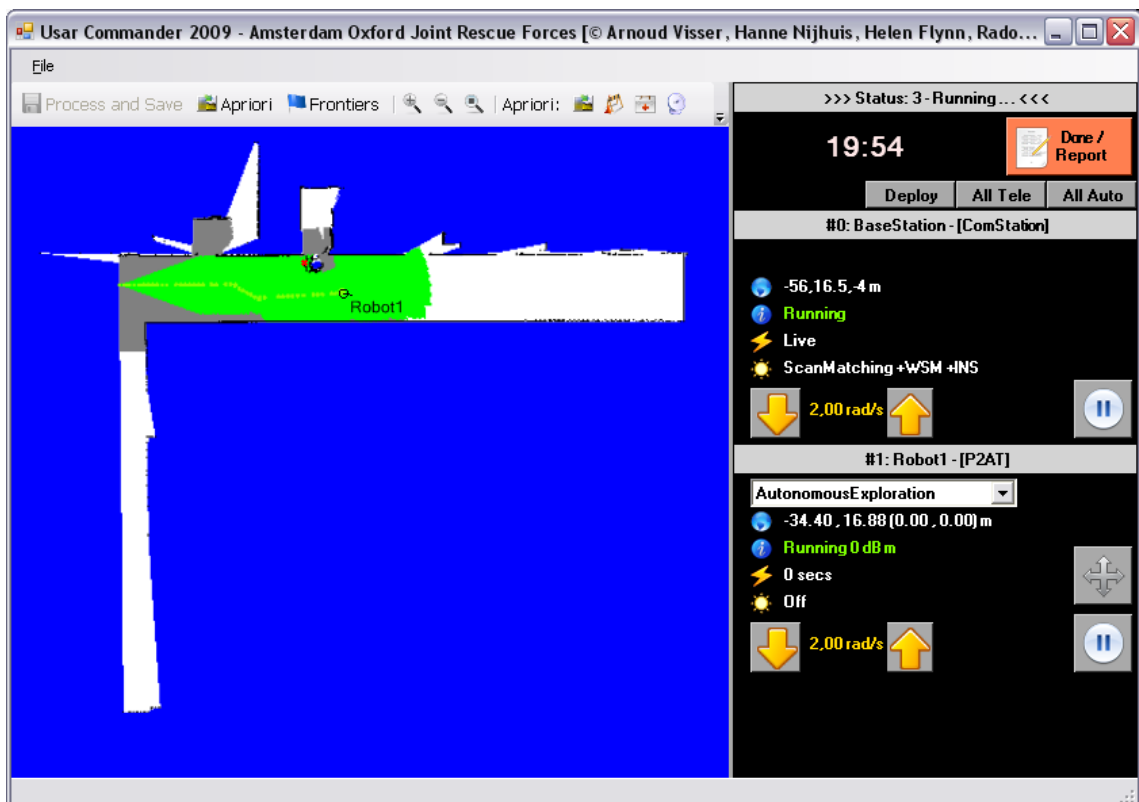


Figura 3.7 - UsarCommander_Running

3.2.4 – Status 4: Reporting e Status 5: Done

Terminata la simulazione (o durante un qualsiasi istante intermedio) i robot vengono fermati e si entra nello stato di “Reporting” dove è possibile per l’operatore salvare la mappa. Infine il controllore offre la possibilità di ritornare nella fase iniziale di “Preparing” per eseguire una nuova simulazione.

La figura seguente mostra lo schema riassuntivo delle fasi illustrate sopra: i nodi del grafo identificano gli stati; gli archi, invece, descrivono la navigazione tra gli stati stessi sulla base dei comandi che l’utente invia al controllore premendo gli opportuni pulsanti presenti sulle relative interfacce.

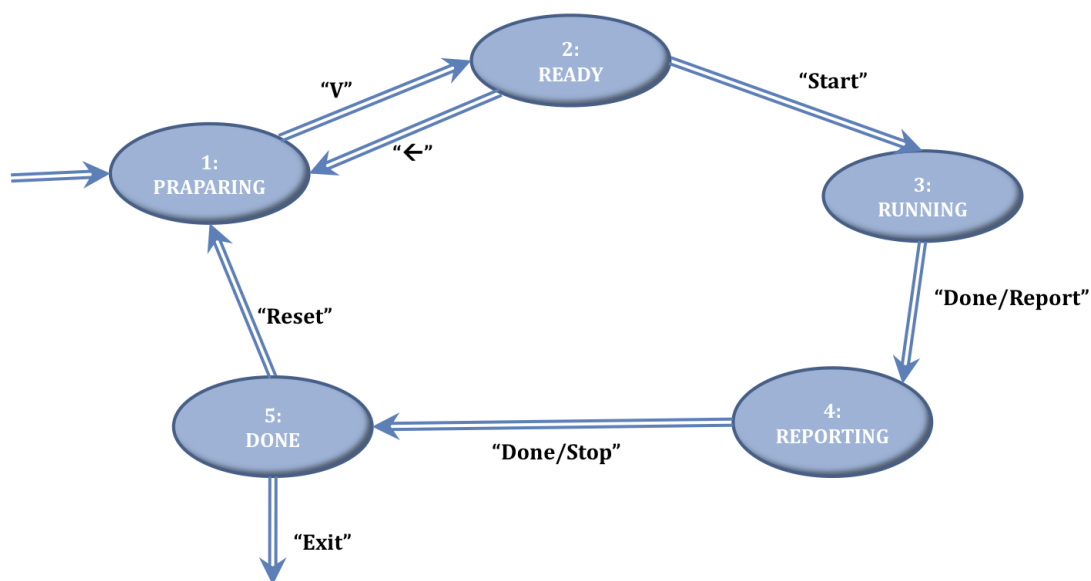


Figura 3.8 - UsarCommander_schema degli stati

3.3 – Funzionamento di base

3.3.1 – L’UsarCommander

Come già spiegato nella Sezione 3.2, compilando il codice fornito dagli sviluppatori, vengono generati due eseguibili: lo UsarCommander e lo UsarClient.

Lo UsarCommander crea i file di configurazione dei robot e del team (vedi Sezione 3.2), aggiorna la mappa generata durante l’esplorazione rendendola visibile all’utente. Le sessioni successive dettagliano questi aspetti.

3.3.1.1 - Il MainForm

Lanciando l'eseguibile UsarCommander.exe, viene istanziata la classe MainForm, che, a sua volta, istanzia le classi necessarie per la gestione della parte destra (il team) e della parte sinistra (la mappa) dell'interfaccia del controllore (vedi Sezione 3.2); in particolare la classe TeamController per la gestione del team e le classi Manifold, ManifoldImage e ManifoldView per la gestione della mappa.

Qui di seguito è riportato lo schema UML che mostra come vengono generate tali istanze. Le frecce tratteggiate indicano le classi necessarie per istanziare la classe a cui le frecce puntano.

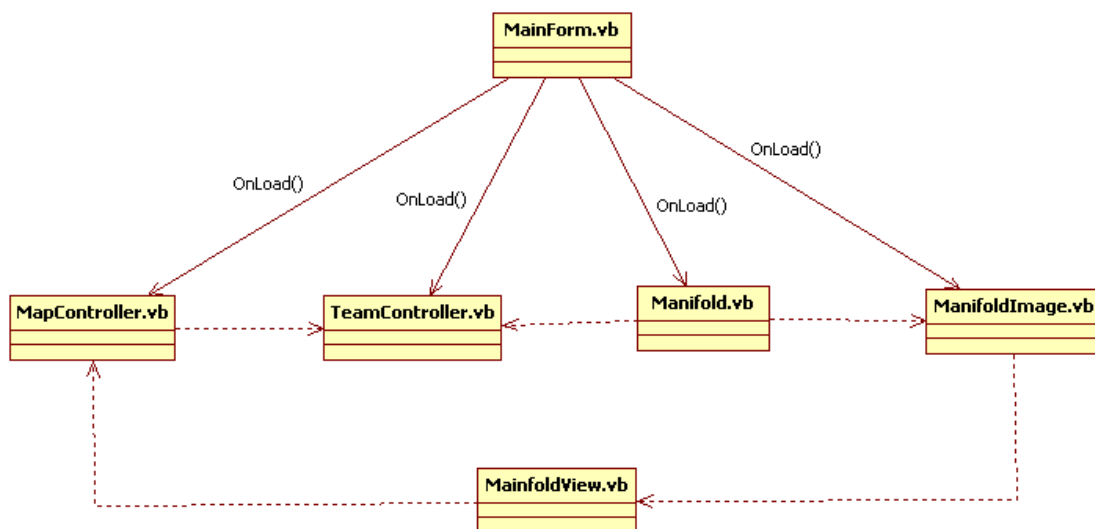


Figura 3.9 - MainForm

3.3.1.2 - Creazione e configurazione del team

A questo punto è istanziata la classe deputata alla gestione del team: TeamController. Questa classe si occupa principalmente della gestione degli eventi derivanti dalla pressione dei pulsanti sulla form "Team Configuration" oltre che di operazioni di gestione del team come, ad esempio, l'importante fase di Backup dei dati ricavati dall'esplorazione.

Qui di seguito è riportato lo schema che definisce il comportamento di suddetta classe:

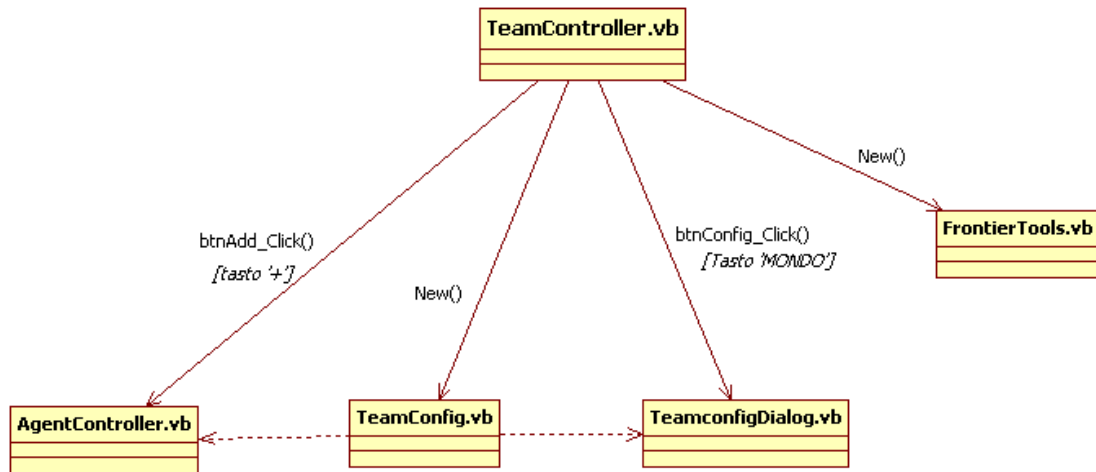


Figura 3.10 - TeamController

La classe TeamConfigDialog gestisce la finestra di configurazione del team (Figura 3.4) e viene istanziata nel momento in cui l'utente preme il tasto raffigurante il mondo. Questa operazione si conclude generando il file di configurazione del team ".cfg"; un file di log che contiene, in formato testuale, i dati di configurazioni inseriti dall'utente (nella mia tesi è il file TC.cfg).

Importante è la classe AgentController: ne viene istanziata una per ogni pressione del pulsante raffigurante il più. Compito di questa classe, similmente al TeamController, è gestire gli eventi derivanti dalla pressione dei pulsanti presenti sulla form "Agent Configuration" oltre che tutti i cambiamenti nello stato del robot che avvengono durante la fase esplorativa.

La classe UsarAgentConfig gestisce l'inserimento nella form "Agent Configuration" (Figura 3.3) dei dati di configurazione da parte dell'utente. Questa operazione si conclude con la creazione del file di configurazione ".cfg", un file di log simile a quello del team, che contiene, in formato testuale, i dati di configurazione di ogni robot inseriti dall'utente (nella mia tesi è il file AC.cfg).

3.3.1.3 - Attivazione di uno specifico behavior

La scelta di uno specifico behavior è il cuore di una strategia esplorativa. A questo proposito, il controllore UvARescue mette a disposizione diversi comportamenti attuabili, ma quello di maggiore interesse nel contesto USAR è

l'esplorazione autonoma.

Come già ampiamente discusso nella Sezione 3.2, l'utente seleziona il tipo di behavior in fase di configurazione; tuttavia UvARescue permette di modificare questa scelta anche in fase di simulazione. La motivazione è semplicemente legata alla possibilità di poter guidare dall'esterno il robot qualora, durante la simulazione, ci fossero dei problemi tali da impedire il corretto spostamento del robot.

Selezionando nel menù della form "Agent Configuration" un particolare behavior, l'AgentController viene sollecitato al fine di gestire opportunamente il cambiamento. Questo comporta l'attivazione in sequenza di una serie di funzioni che porteranno all'attivazione della relativa motion, ossia la modalità di movimento dei robot all'interno dell'ambiente; ad esempio, la motion TeleOperation consente all'operatore di guidare i robot nell'ambiente mentre la motion FrontierExploration realizza l'esplorazione autonoma.

Lo schema di Figura 3.11 esplicita tale percorso con particolare riferimento al behavior di interesse in questa tesi, ossia, l'AutonomousExploration:

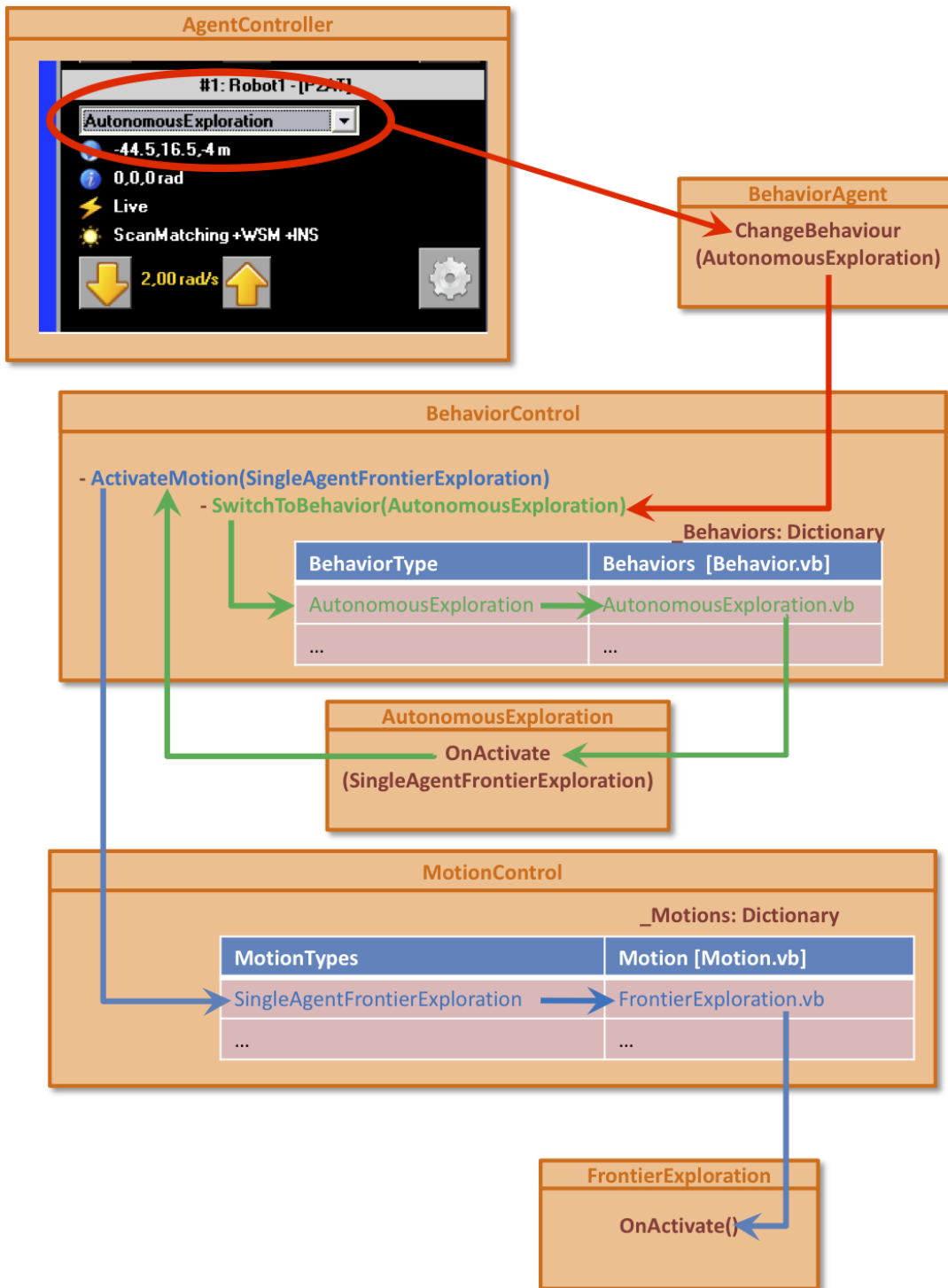


Figura 3.11 - Attivazione della specifica motion

3.3.1.4 - Creazione e gestione della mappa

Due classi molto importanti sono **Manifold** e **ManifoldImage**, istanziate lanciando la simulazione. Queste classi si occupano della gestione della mappa che si

viene a creare durante la fase esplorativa dei robot.

In generale, il manifold è una struttura a grafo che cresce all'aumentare dell'area esplorata: ogni nodo (patch) rappresenta una osservazione, ossia quello che il robot vede intorno a sé attraverso i suoi sensori mano a mano che si muove nell'ambiente; gli archi (relation) rappresentano la possibilità di spostarsi da un nodo ad un altro. Per quanto riguarda la creazione del link, l'algoritmo di mapping non dipende dalle informazioni circa il movimento del robot: lo spostamento, come riportato dal sensore inerziale di navigazione, serve come una stima iniziale per lo scan matching. Successivamente, la stima dello spostamento è raffinata confrontando l'attuale scansione laser con quelle registrate poco prima e immagazzinate in nodi vicini del grafo. Non appena lo spostamento diventa tale da far venire meno il match tra la scansione in corso e le scansioni precedenti, viene creato un nuovo nodo per memorizzare la scansione attuale e un nuovo collegamento che corrisponde allo spostamento. L'aggiunta del nuovo nodo e del nuovo link corrisponde ad un aumento di conoscenza dell'ambiente.

La struttura a grafo significa inoltre che è possibile mantenere più mappe tra loro scollegate. Nel contesto di SLAM multi-robot, questo permette di avere una mappa per ogni robot e, comunicando i grafi alla ComStation, ottenere la mappa comune.

A livello grafico l'utente può selezionare, nella form che compare lanciando lo UsarCommander (Sezione 3.2), i tasti che consentono la visualizzazione delle varie aree (Area FREE, Area SAFE, Area CLEAR), degli ostacoli, dei robot con il percorso da compiuto, le vittime e le frontiere.

3.3.2 - Gli UsarClient

Gli UsarClient si occupano principalmente della creazione effettiva del modello del robot, della comunicazione con USARSim, ImageServer e WSS e dello scambio di messaggi tra il simulatore e il controllore. Vengono eseguiti tanti UsarClient quanti sono i robot "esploratori"; la ComStation, dovendo semplicemente elaborare le informazioni provenienti dai robot del team e dividerle tra tutti, non deve scambiare dati direttamente con lo USARSim e quindi non necessita di uno UsarClient dedicato.

3.3.2.1 – Gestione dei robot

Dopo aver configurato il team creando le classi deputate al controllo (Sezione 3.3.1), si è pronti per mandare i robot “esploratori” nell’ambiente e iniziare la simulazione vera e propria. Per far questo vengono eseguiti tanti UsarClient quanti sono i suddetti robot, passando come argomenti ad ogni UsarClient il nome del robot e i due file di configurazione precedentemente creati (nella fattispecie: AC.cfg e TC.cfg).

Lanciando ogni eseguibile, viene creata un’istanza della classe Main che crea effettivamente le classi deputate alla configurazione del team (TeamConfig.vb) e del robot (AgentConfig.vb) le quali inizializzano le loro proprietà con i dati provenienti dai due file di configurazione passati come argomenti. Vengono inoltre istanziate due classi molto importanti: la classe Agent e la classe Driver, creando effettivamente l’agent e il driver attraverso le funzioni “createAgent” e “createDriver” della classe UsarAgentConfig. Lo schema è mostrato nella figura sottostante:

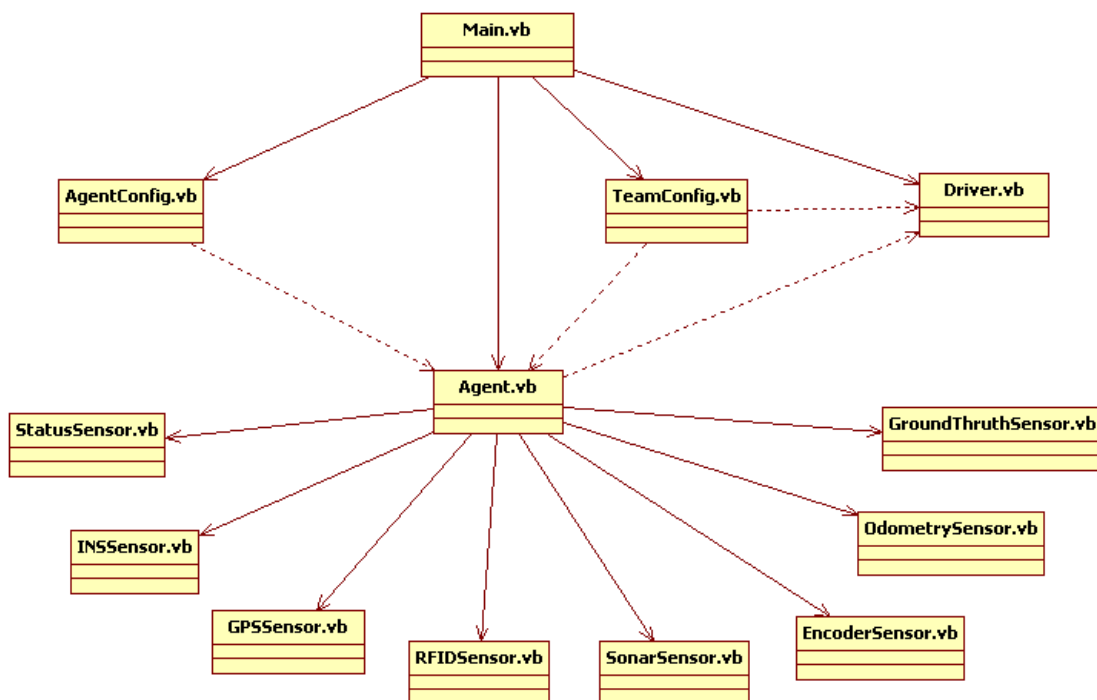


Figura 3.12 - UsarClient_Main

La classe Agent (o una sua derivata a seconda delle impostazioni iniziali: vedi figura 3.14), è la classe base che gestisce il singolo robot nel contesto della

simulazione; in particolare fornisce tutte le funzionalità per effettuare lo spawn del robot nell'ambiente; spedire e ricevere messaggi, istanziare le classi che gestiscono i vari sensori e montare tali sensori sul robot. In particolare:

- *Mount e UnMount*: aggiunge e toglie un sensore al robot;
- *NotifyPoseEstimateUpdated*: utilizzata dai metodi SLAM per notificare l'aggiornamento della posizione del robot;
- *ChangeBehavior*: permette di cambiare il comportamento del robot;
- *SendUSARSimCommand e ReceiveMessage*: l'agent dispone di due code; una nella quale accoda i messaggi in ingresso e una nella quale accoda i messaggi in uscita. Questo accodamento riflette l'operazione "ricevi messaggi" e "manda messaggi". Sarà compito della classe Driver occuparsi effettivamente della ricezione e della spedizione.

La prima operazione eseguita nell'ambito del Main è lanciare la funzione della classe Driver che si occupa della creazione delle comunicazioni con USARSim e ImageServer. Per quanto riguarda invece il WSS, la comunicazione viene stabilita direttamente dalla ComStation nel momento in cui avviene il suo spawn nell'ambiente.

Dopo aver stabilito le comunicazioni, il Driver entra in fase Run che durerà per tutto il tempo della simulazione. In questo stato il driver è attivo per catturare i messaggi in input e in output da USARSim interagendo con le code della classe Agent che vive all'interno del thread che gestisce la classe Driver stessa.

In particolare, quando riceve dati da USARSim, il driver chiama la classe deputata al parsing delle informazioni. I dati vengono scomposti nei due componenti: il type, ossia la tipologia di dato sensoriale (ad esempio INS se si tratta di un dato sensoriale proveniente dall'Inertial Navigation Sensor), e il corpo del messaggio che contiene l'informazione vera e propria (ad esempio le rilevazioni dell'ambiente catturate attraverso il sensore); successivamente vengono inviati nella coda di input dell'agent relativo.

A questo punto, gli observers attivi nell'agent, rilevando l'inserimento di un nuovo messaggio in coda, notificano l'aggiornamento dello stato del sensore relativo processando il corpo del messaggio e caricando i dati nella classe del sensore indicato dal type.

La figura qui di seguito mostra il processo di scambio di messaggi sopra descritto:

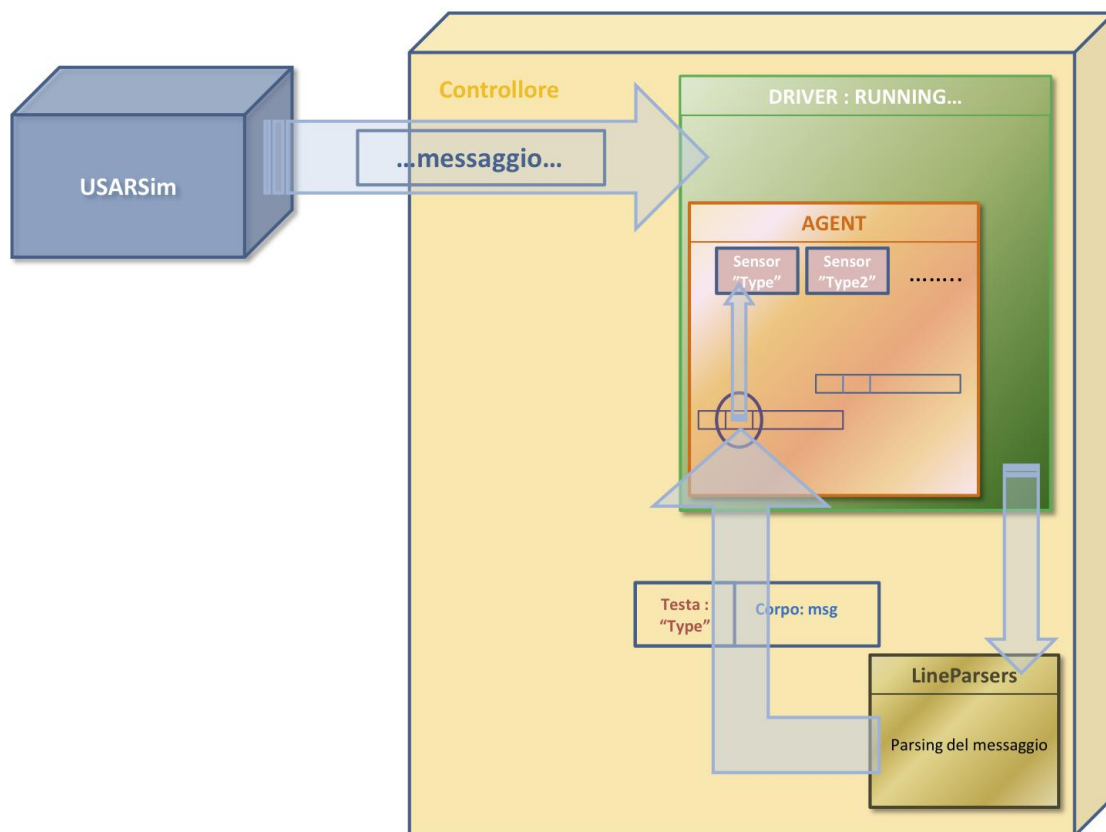


Figura 3.13 - UsarClient_gestione dei robot

Da ultimo, viene mostrato un diagramma UML che esprime lo schema di ereditarietà della classe Agent (Figura 3.14).

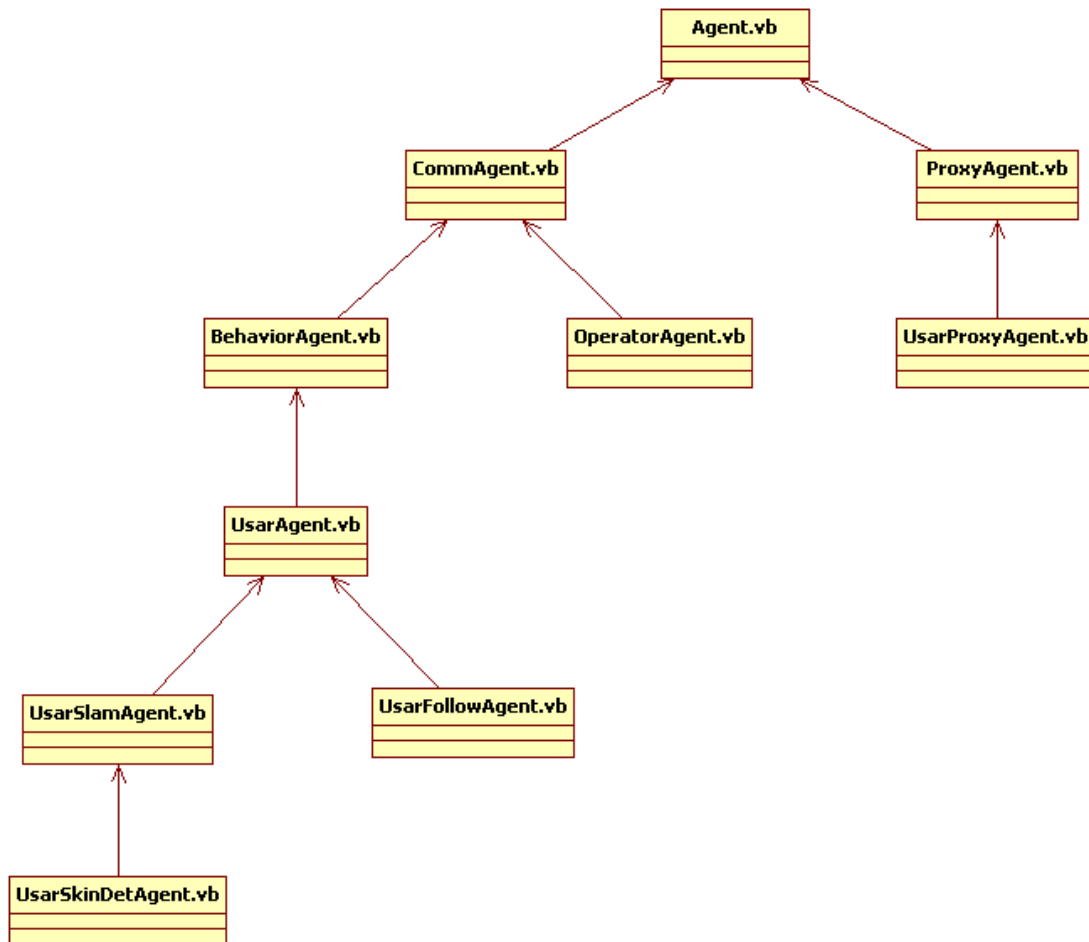


Figura 3.14 - Classe Agent_schema di ereditarietà

3.4 - Le frontiere

Il problema fondamentale nell'esplorazione è: *dato ciò che è eventualmente conosciuto del mondo, dove dovrebbe muoversi il robot per guadagnare più informazione possibile sull'ambiente?* L'obiettivo è costruire nel minor tempo possibile, una mappa che descriva il più possibile dell'ambiente. L'idea centrale dell'esplorazione *frontier-based* è quella di guadagnare il maggior numero di informazioni possibili del mondo, muovendosi verso il confine tra lo spazio conosciuto e il territorio inesplorato. Tale confine è definito frontiera. Muovendosi verso frontiere successive, il robot incrementa costantemente la conoscenza del mondo.

UvARescue adotta l'approccio *frontier-based* simile a quello utilizzato da Gonzàles-Baños e Latombe, ma con una differenza: in quest'ultimo metodo il

prossimo punto da raggiungere nel processo esplorativo viene scelto, dopo un processo di selezione, vicino alla frontiera stessa (vedi Sezione 2.2.3.1), in UvARescue, invece, ogni frontiera viene identificata da un solo punto, ossia il suo centro.

Per definire esattamente le frontiere, occorre determinare due tipologie di aree (rispetto alla versione originaria dove si considera semplicemente lo spazio aperto): l'Area SAFE e l'Area FREE (Area SAFE \subset Area FREE) il cui significato è già stato discusso nella Sezione 3.2.

Per poter operare questa distinzione, viene impiegata una tecnica di ray-casting per generare due occupancy grid a partire dai dati ottenuti con scan matching e memorizzati nel manifold. La prima viene generata a partire da un raggio r_{\max} di 20 metri (che darà origine all'Area FREE); la seconda, invece, da un raggio r_{safe} di 3 metri (che darà origine all'Area SAFE). Le frontiere sono le linee di demarcazione estratte al confine tra la regione (o area) SAFE e la regione FREE; la regione visibile oltre la frontiera rappresenta l'area FREE ma non SAFE ed è impiegata nel calcolo dell'information gain (l'information gain verrà discusso nella Sezione 3.5).

L'immagine seguente mostra un esempio di estrazione delle frontiere:

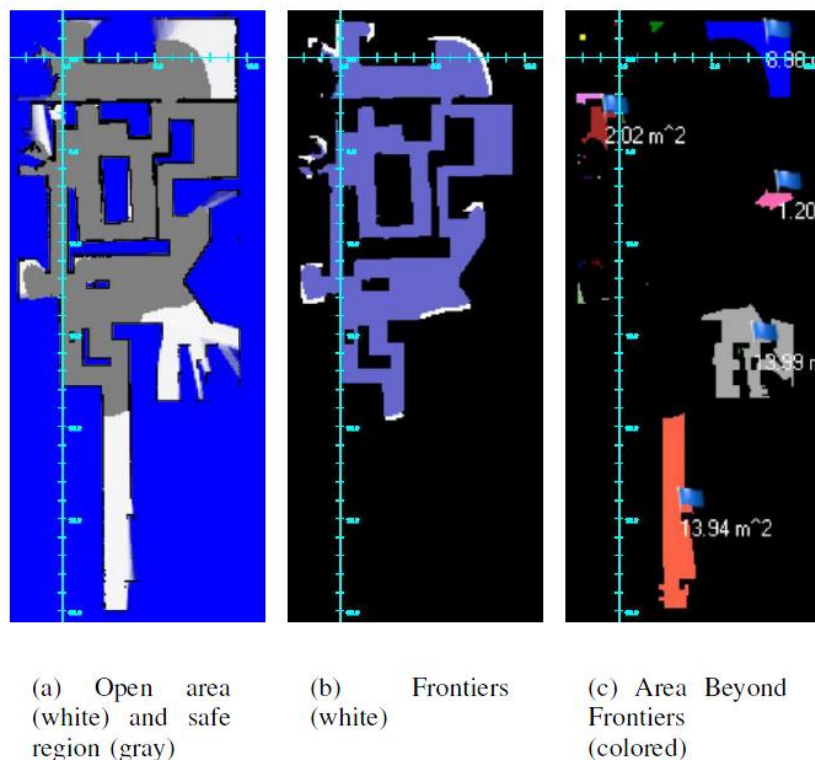


Figura 3.15 - Frontiere

Le frontiere in ambito UvARescue sono caratterizzate da una serie di dati; in particolare:

- il centro della frontiera: è una coppia di coordinate cartesiane che, considerando la linea di frontiera, ne definiscono il suo centro. Questo consentirà di identificare la frontiera esattamente con il suo centro all'interno dei metodi esplorativi; in altre parole, i punti candidati ad ogni passo esplorativo coincidono con i centri delle frontiere rilevati a tale step. Questo è quello che contraddistingue l'approccio frontier-based adottato all'interno del controllore UvARescue rispetto al metodo di Gonzàles (Sezione 2.2.3.1) dove invece i punti candidati vengono scelti all'interno di un insieme di punti generato random vicino alle frontiere;
- area visibile dalla frontiera: rappresenta l'area FREE ma non SAFE per quella frontiera;
- probabilità di comunicazione: la probabilità che il robot, giunto a quella frontiera, possa comunicare con la ComStation.

Queste precisazioni sono fondamentali per comprendere le strategie di esplorazione qui di seguito illustrate e i metodi di assegnamento robot/frontiera implementati nel contesto di questa tesi.

3.5 – Strategie di esplorazione: VISSER vs MCDM

Per strategia di esplorazione si intende il metodo con il quale viene calcolato il valore di utilità di ogni punto candidato al fine di effettuare il miglior assegnamento robot/frontiera.

I paragrafi seguenti entrano nel dettaglio delle due strategie che hanno costituito il fulcro di valutazione dei metodi di assegnamento sviluppati in questa tesi: la strategia "VISSER", ovvero quella implementata dagli sviluppatori dell'UvARescue e la strategia "MCDM" sviluppata ex novo in questa tesi e implementata all'interno del controllore.

Una precisazione importante sul linguaggio adottato da questo punto in poi nella tesi: sulla base di quanto spiegato nella Sezione 3.4, ossia il fatto che la frontiera sia rappresentata dal suo centro, frontiera e centro diventano

rappresentativi dello stesso concetto e verranno quindi usati indifferentemente.

3.5.1 – Strategia VISSER

La strategia implementata all'interno del controllore UvARescue2009 (da noi denominata "strategia VISSER" da Arnoud Visser, professore dell'università di Amsterdam, responsabile del progetto UvARescue) si basa sul concetto di *information gain* così definito:

$$info_gain = Area(f) * comm_success(f) ,$$

dove:

- f rappresenta la generica frontiera
- $Area(f)$ rappresenta l'area visibile da quella frontiera
- $comm_success(f)$ è la probabilità di comunicare da quella frontiera ed è così calcolato:

$$comm_success(f) = 1 - Min(Max(2 * 10^{signalCutOff - pathloss}; 0.0); 1.0)$$

dove:

- $signalcutOff$ è un valore fissato a -93dBm;
- $pathloss$ è la potenza del segnale di comunicazione tra il centro della frontiera e la ComStation.

VISSER utilizza questo concetto per calcolare il valore di utilità di ogni coppia robot/ frontiera:

$$U(r/f) = \frac{info_gain}{dist_robot(r)^{PowerLow}}$$

dove:

- $PowerLow$ rappresenta il livello raggiunto dalla batteria del robot;
- $dist_robot(r)$ è la distanza del robot a quella frontiera. Qui va fatta una precisazione che verrà, però, discussa ampiamente nel Capitolo 4: la distanza del robot dalla frontiera è da intendersi principalmente come la distanza euclidea, ossia data dalla seguente relazione:

$$dist_robot(r) = \sqrt{(f.x - r_pose.x)^2 + (f.y - r_pose.y)^2} ,$$

tuttavia, nel corso dell'algoritmo che determinerà l'assegnamento, il valore di utilità verrà ricalcolato e questa volta verrà impiegata come distanza quella reale, ossia quella determinata attraverso il path planning.

3.5.2 – Strategia MCDM

La strategia MCDM implementata in questa tesi si fonda sui concetti dettagliati nella Sezione 2.4.

Qui di seguito verrà illustrato come tutti questi concetti siano stati utilizzati al fine di determinare il valore di utilità delle frontiere, oltre che i passi implementativi seguiti.

I criteri presi in considerazione in questa tesi per determinare il valore di utilità delle frontiere sono i seguenti:

- *Area(f)*: area inosservata potenzialmente visibile da f (Area FREE ma non SAFE visibile da f);
- *dist(f)*: costo per raggiungere f in termini di distanza;
- *comm (f)*: probabilità di comunicazione da quella frontiera;
- *PowerLow*: livello della batteria del robot.

Lo schema di Figura 3.16 mostra in dettaglio i passi algoritmici e implementativi necessari per determinare il valore di utilità per una singola coppia robot/frontiera:

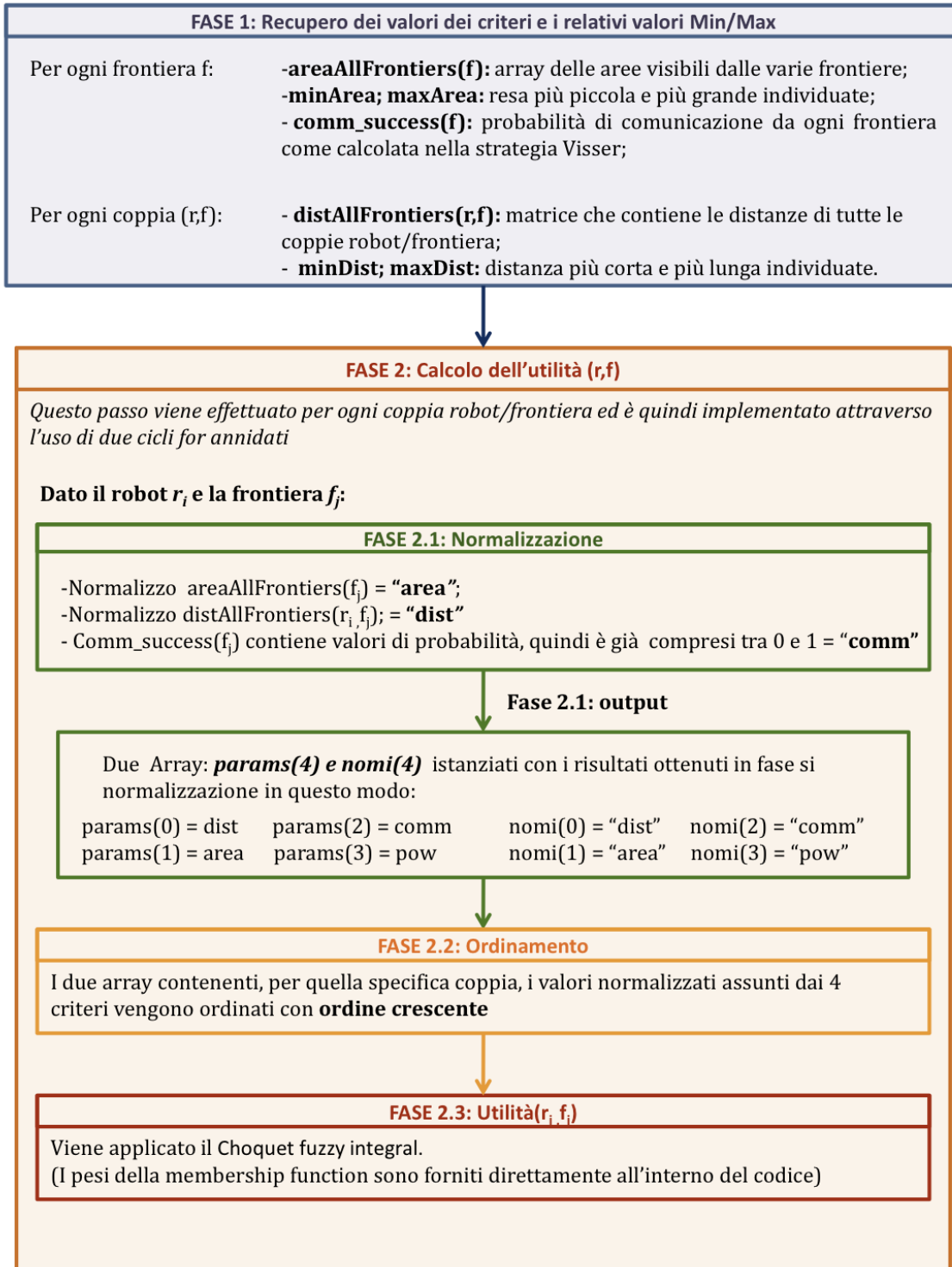


Figura 3.16 - MCDM

Per completezza qui di seguito viene riportata la membership function $\mu(A_j)$ utilizzata nel Choquet fuzzy integral:

$$\{\text{Area}\} = 0.4$$

$$\{\text{Dist}\} = 0.3$$

$$\{\text{Comm}\} = 0.05$$

$$\{\text{Pow}\} = 0.25$$

$$\{\text{Area, Dist}\} = 0.75$$

$$\{\text{Area, Comm}\} = 0.55$$

$$\{\text{Area, Pow}\} = 0.55$$

$$\{\text{Dist, Comm}\} = 0.4$$

$$\{\text{Dist, Pow}\} = 0.32$$

$$\{\text{Comm, Pow}\} = 0.28$$

$$\{\text{Area, Dist, Comm}\} = 0.9$$

$$\{\text{Area, Dist, Pow}\} = 0.8$$

$$\{\text{Area, Comm, Pow}\} = 0.85$$

$$\{\text{Dist, Comm, Pow}\} = 0.4$$

Capitolo 4:

METODI DI ASSEGNAIMENTO ROBOT/FRONTIERA

4.1 – Introduzione

Come già discusso nella Sezione 2.2, un requisito fondamentale della robotica mobile autonoma è la capacità dei robot di sapersi muovere autonomamente in un ambiente a priori sconosciuto al fine di costruirne la mappa: questo è ciò che caratterizza l'esplorazione autonoma. Tuttavia, è importante tenere in considerazione anche un ulteriore aspetto, ossia il fatto che all'interno del processo di esplorazione possono operare più robot contemporaneamente.

Tutto questo si traduce nel cercare di capire come individuare il miglior nuovo punto che ogni robot deve raggiungere ad ogni passo esplorativo tenendo in considerazione il fatto che è inserito in un contesto di team: detto in altre parole, l'obiettivo è quello di individuare la combinazione di assegnamenti che globalmente garantiscono la migliore copertura di un ambiente a priori sconosciuto.

A questo proposito, nel controllore UvARescue2009 è implementato il concetto di frontiera (come definito nella Sezione 2.2.1), ognuna identificata attraverso il suo centro: l'obiettivo diventa quindi quello di individuare, ad ogni passo esplorativo, il miglior assegnamento robot/frontiera al fine di ottenere, al termine della simulazione, la maggiore copertura dell'ambiente. Per far questo è fondamentale la strategia esplorativa, ossia il criterio sulla base del quale viene calcolato il valore di utilità per ogni coppia robot/frontiera.

In questo capitolo verranno illustrati dettagliatamente i vari metodi implementati e testati nella tesi per l'assegnamento dei robot del team alle frontiere rilevate ad ogni passo esplorativo.

Per metodo di assegnamento si intende appunto l'algoritmo che determina gli assegnamenti robot/frontiera migliori sulla base della strategia di esplorazione adottata all'interno del metodo stesso. Questo significa che ogni metodo è stato implementato in due versioni, uno per ogni strategia di calcolo dell'utilità: la strategia VISSER e la strategia MCDM, le cui formulazioni sono state dettagliate nel capitolo precedente.

L'aspetto fondamentale che accomuna tutti e quattro i metodi di assegnamento considerati è la condivisione della mappa globale generata a partire dalle mappe parziali dei singoli robot. Questo requisito viene soddisfatto grazie alla presenza della ComStation all'interno di ogni team.

4.2 – Metodo 1: sistema con coordinamento basato su utilità “reale”

Questo primo metodo si basa sull’idea di assegnamento originale proposta da VISSER e implementata nella versione 2009 del controllore UvARescue. La caratteristica del contesto multi-robot è che l’algoritmo alla base di tale metodo viene eseguito in parallelo da tutti robot esploratori del team.

L’idea base può essere definita attraverso i seguenti tre aspetti:

1. calcolo del valore di soglia per la selezione delle frontiere;
2. doppia fase di calcolo dell’utilità al fine di determinare la miglior coppia robot/frontiera;
3. assegnamento di ogni frontiera ad un unico robot.

Per quanto riguarda il primo punto (ossia come selezionare, tra tutte le frontiere, quelle effettivamente assegnabili) l’idea è quella di individuare il valore di “*max_area*” (dove l’area è quella visibile dalla frontiera in accordo a quanto ampiamente discusso nel capitolo precedente) intesa come l’area massima tra le aree delle frontiere appartenenti ad un sottoinsieme di tutte le frontiere; questo sottoinsieme viene ricavato a partire dall’array di tutte le frontiere individuate dai robot durante l’esplorazione e prendendo le prime $\#frontiere/e$ ($e =$ numero di Nepero), ossia considerando le frontiere appartenenti, all’incirca, al primo terzo di tutto l’array. In altre parole, indicare come valore massimo di area quello corrispondente ad una frontiera appartenente al primo terzo dell’array ha come obiettivo quello di individuare un valore di area indicativo per stabilire una “soglia di interesse” delle frontiere. Questo significa che, nella successiva fase dell’algoritmo (secondo punto), le frontiere con area inferiore a quella soglia verranno scartate perché di poco interesse ai fini esplorativi. La selezione delle frontiere avviene quindi contestualmente al calcolo della matrice delle utilità ideali e reali semplicemente valutando se la frontiera rispetto a cui si sta calcolando l’utilità ha un’area maggiore o uguale alla soglia.

Qui di seguito (Figura 4.1) è riportato in pseudocodice la suddetta procedura di selezione:

Def. *infos*(#frontiere): array contenente tutte le frontiere individuate dal robot a quel passo esplorativo

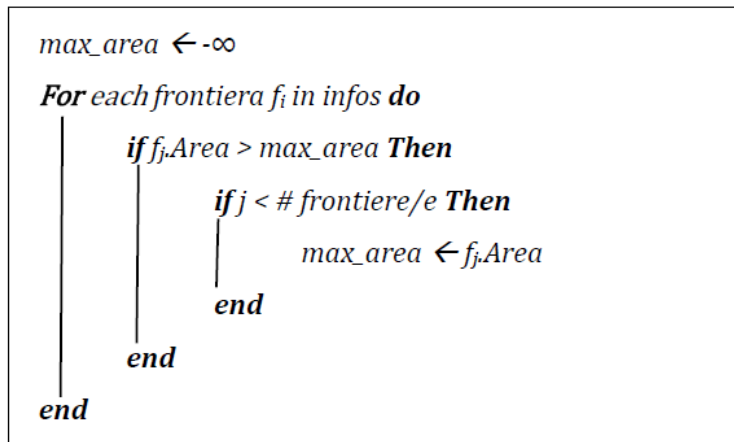


Figura 4.1 - Determinazione di max_area

Per quanto riguarda il secondo punto, in una prima fase viene individuata e scelta la coppia migliore intesa come quella con il valore di utilità “ideale” più grande, dove per “ideale” si intende l’utilità valutata tenendo conto della distanza euclidea robot/frontiera. Nella seconda fase l’utilità della coppia migliore viene ricalcolata sulla base della vera distanza robot/frontiera, ossia della lunghezza del percorso reale calcolato attraverso il path planning.

Nel dettaglio, questo secondo punto è da considerarsi il cuore del metodo e può essere strutturato in tre step successivi: il primo dove vengono calcolate le utilità ideali di ogni coppia robot/frontiera riempiendo la relativa matrice delle utilità ideali e viene scelta la migliore coppia robot/frontiera; il secondo in cui si calcola, attraverso il path planning, l’utilità reale della coppia con migliore utilità ideale e, sulla base di questa nuova informazione si verifica se la coppia scelta è ancora la migliore; infine il terzo step in cui si effettua l’assegnamento e si individua il prossimo robot da assegnare.

Lo pseudocodice e il grafo di flusso seguenti illustrano nel dettaglio il funzionamento di ognuna di queste tre parti.

Dati:

- R: array dei robot;
- F: array delle frontiere;

- r_i : i -esimo robot in R ;
- r_c : robot corrente che esegue l'algoritmo;
- f_j : j -esima frontiera in F ;
- max_area : valore massimo dell'area come calcolato in Figura 4.1;
- $u(|r|,|f|)$: la matrice delle utilità con tante righe quante i robot, tante colonne quante le frontiere;
- $gmu(|r|)$: array delle seconde migliori utilità per ogni robot.

Lo *step 1* ha come obiettivo quello di costruire la matrice delle utilità ideali di tutte le coppie robot/frontiera utilizzando, all'interno del calcolo, il valore della distanza euclidea.

Da sottolineare sono le condizioni necessarie per il calcolo, ossia:

- che il robot non sia la ComStation (infatti la ComStation non ha funzione di esplorazione);
- che la posizione (pose, in termini di coordinate x,y) dei robot sia conosciuta (non posso calcolare la distanza se non so dove si trova il robot);
- che la frontiera considerata abbia un'area maggiore di quella massima precedentemente calcolata (max_area) (questo perché vogliamo escludere a priori aree troppo piccole in quanto darebbero un contributo minimo nella costruzione della mappa).

Il risultato di questo step è la matrice delle utilità riempita, in corrispondenza delle celle che rispettano i requisiti sovrastanti, con il valore di utilità ideale della relativa coppia robot/frontiera (nelle altre celle si trova il valore $-\infty$ inserito in fase di inizializzazione della matrice), oltre che l'individuazione della massima utilità e della coppia robot/frontiera corrispondente.

Qui di seguito (Figura 4.2) è riportato, in pseudo-codice, l'algoritmo di funzionamento di questo primo step.

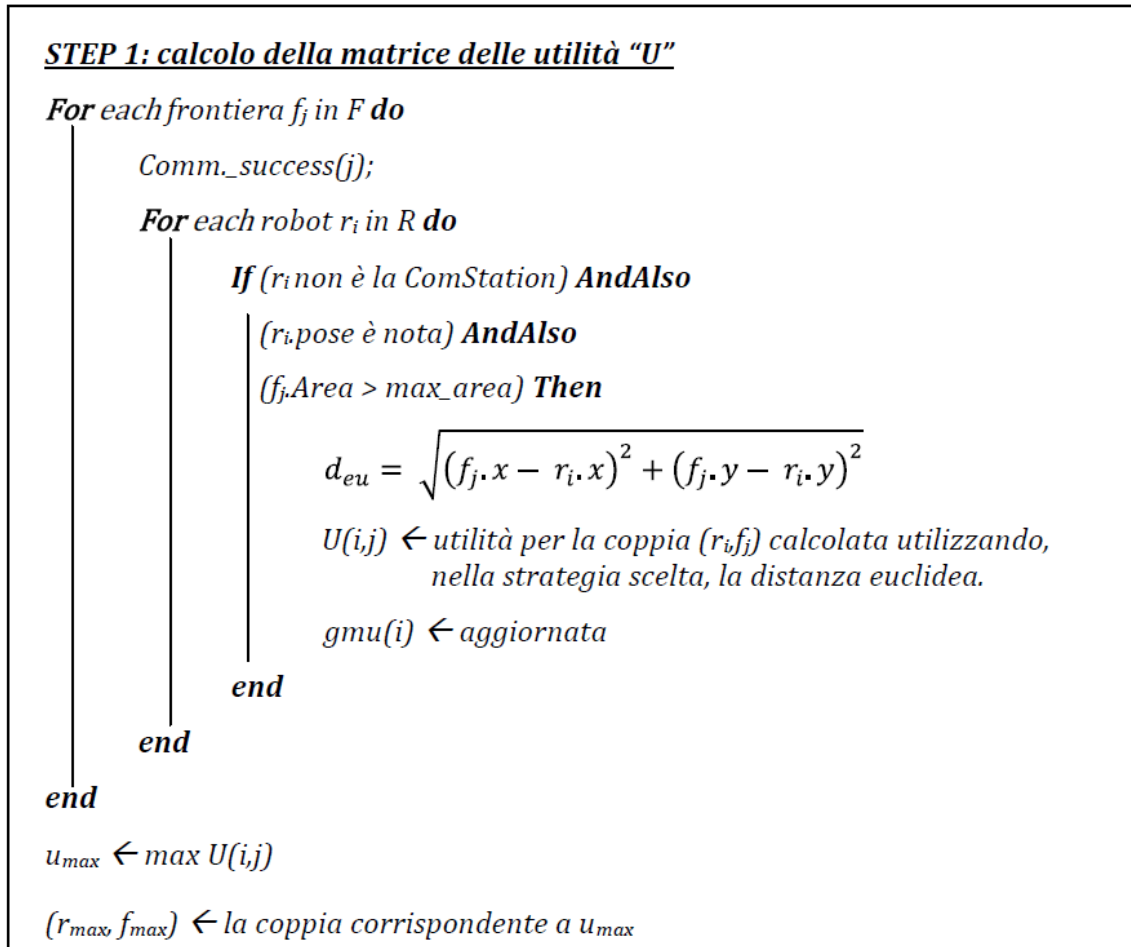


Figura 4.2 - Determinazione della matrice delle utilità ideali

Lo *step 2* si concentra sulla miglior coppia trovata e la relativa utilità: l'obiettivo è quello di calcolare il vero valore di utilità, ossia quello che tiene conto dell'effettiva distanza da percorrere per raggiungere la frontiera dall'attuale posizione dei robot. Questo viene fatto attraverso il path planning che determina l'effettivo percorso che il robot dovrà compiere. Qualora il path planning non andasse a buon fine, il valore di utilità viene ridotto ad un valore minimo in modo da non considerare di nuovo la coppia robot/frontiera corrispondente.

A questo punto viene eseguito un controllo sulla riga; si valuta cioè se per quel robot r_{max} , f_{max} è ancora la frontiera che corrisponde alla massima utilità o se, invece, la massima utilità si trova in corrispondenza di un'altra frontiera. Da notare che *ogni frontiera può essere assegnata ad un solo robot*; per questo motivo occorre quindi verificare la disponibilità dell'eventuale nuova frontiera.

L'output di questa fase è la (eventuale) nuova coppia (r_{max} , f_{max}) da poter assegnare.

Lo schema seguente mostra nel dettaglio l’algoritmo alla base dello step 2.

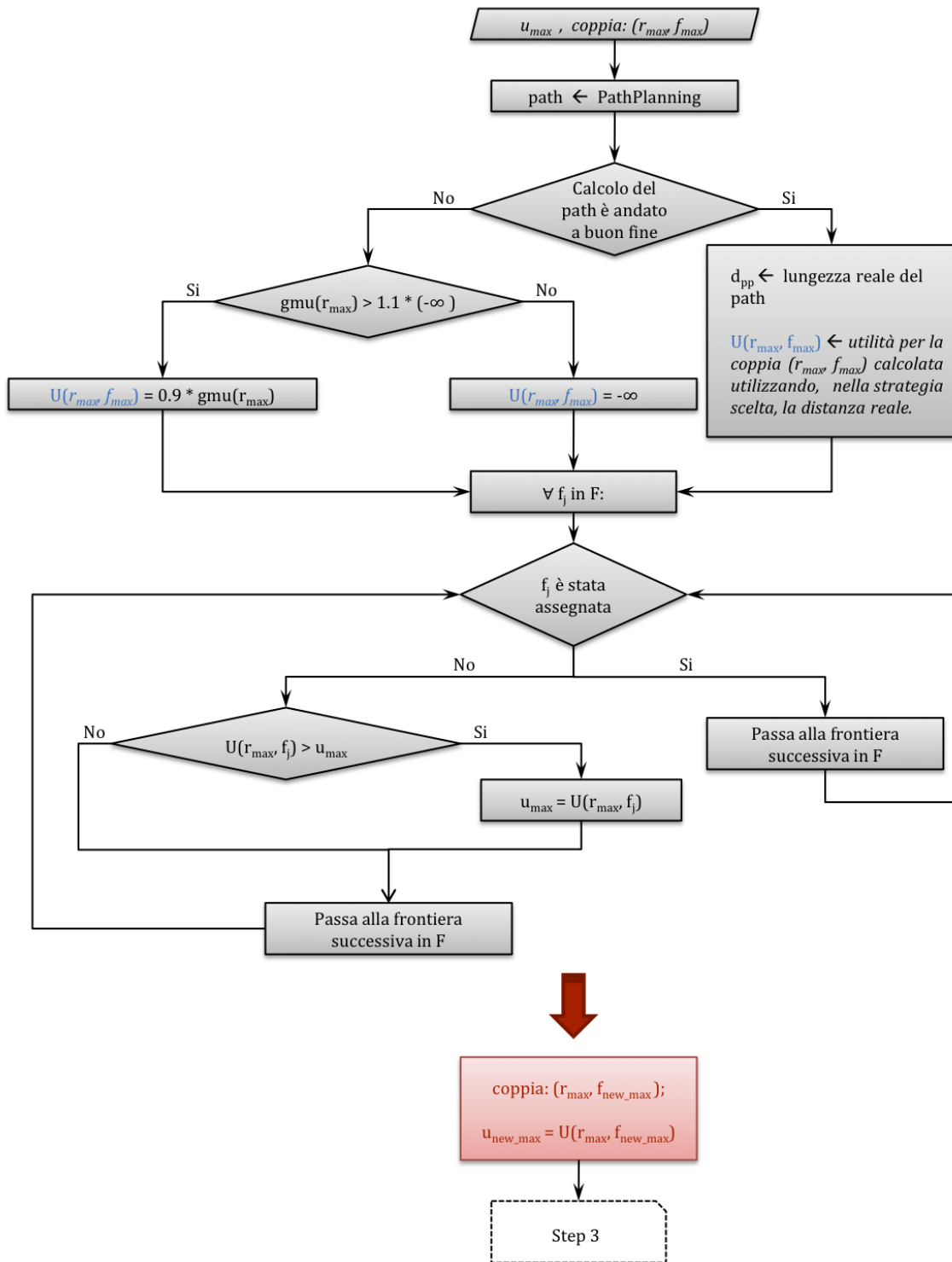


Figura 4.3 - Metodo1_step2

Nello *step 3* si effettua, semplicemente, l’assegnamento della coppia robot/frontiera ottenuta al passo precedente e la scelta del prossimo robot da

assegnare coincidente al robot che corrisponde al massimo valore di utilità rimanente. Quindi, individuato tale successivo robot e la relativa frontiera, si ritorna allo step 2. Il procedimento si ripete fino a quando il robot che esegue l'algoritmo non viene assegnato.

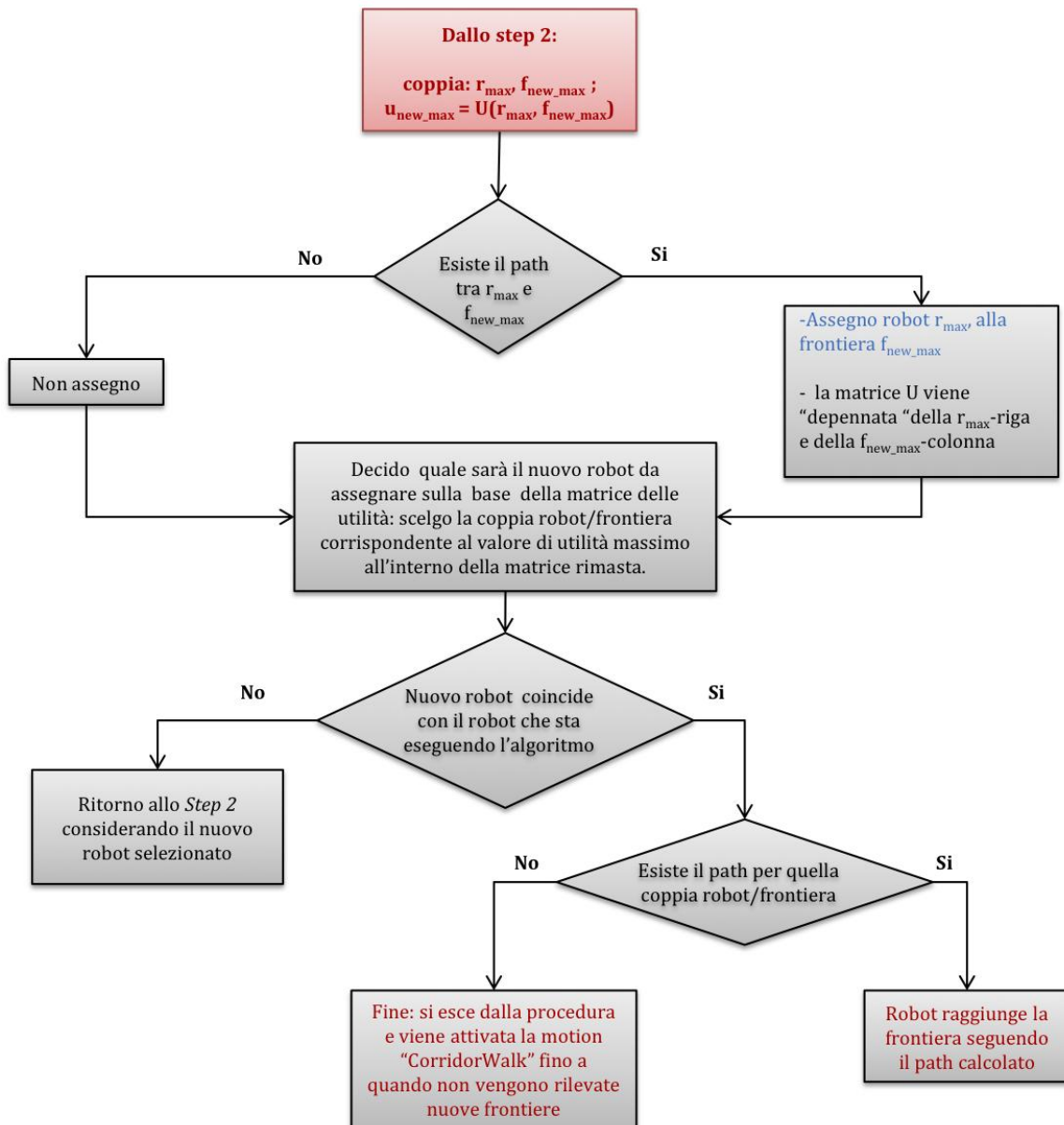


Figura 4.4 - Metodo1_step3

La scelta del nuovo robot da assegnare si basa sempre sulla matrice delle utilità decurtata dell'assegnamento precedente (ossia della riga corrispondente al robot r_{max} e della frontiera f_{new_max}): viene scelta, come nuova coppia, quella corrispondente al più alto valore di utilità restante.

Il processo termina quando il robot che ha eseguito l'algoritmo r_c (ossia quello che ha invocato la FrontierExploration per ottenere la sua prossima assegnazione) viene effettivamente assegnato.

Per quanto riguarda, invece, il terzo punto dei requisiti fondamentali del metodo, il coordinamento è garantito non solo grazie alla presenza della ComStation (che si preoccupa di effettuare il merge delle informazioni provenienti dai vari robot, costruire la mappa globale e distribuirla in broadcast a tutti i membri del team), ma anche dal fatto che la scelta di una coppia per l'assegnamento viene effettuata tenendo conto della situazione degli altri membri del team. Non è garantito che il robot corrente venga assegnato subito, perché potrebbe benissimo essere quello nella condizione più sfavorevole. Detto in altre parole, il comportamento di un robot è vincolato dalla situazione e dal comportamento di tutti gli altri e questo è ciò che maggiormente caratterizza il coordinamento multi-robot.

Qui di seguito, lo schema riassuntivo:

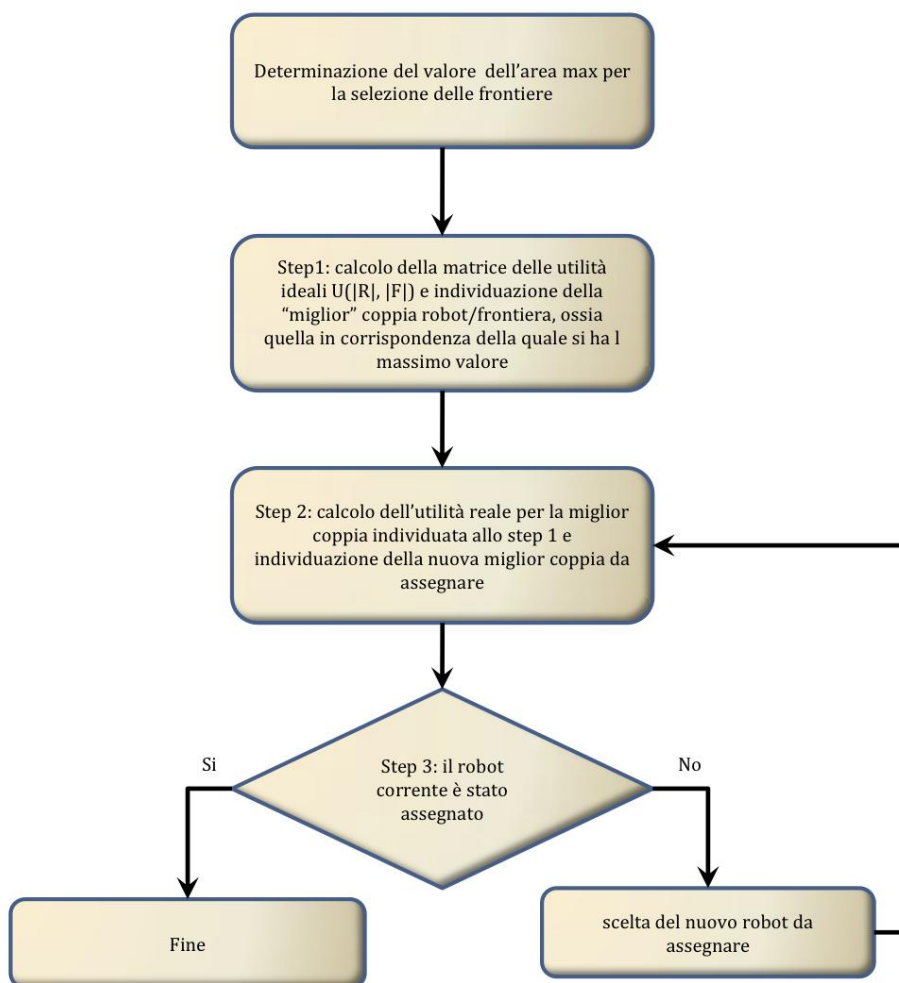


Figura 4.5 - Metodo1_riepilogo

4.3 – Metodo 2: sistema con coordinamento basato su utilità “ideale”

Il secondo metodo di assegnamento studiato e implementato in questa tesi consiste in una “semplificazione” del metodo 1: lo step 2, che, attraverso il calcolo dell'utilità reale della coppia con migliore utilità ideale portava all'individuazione del miglior assegnamento robot/frontiera, non viene eseguito. Di conseguenza, l'assegnamento viene pianificato semplicemente sulla base della matrice delle utilità ideali, calcolata esattamente seguendo l'approccio algoritmico e concettuale dello step 1 dettagliatamente illustrato nella Sezione 4.2. Questo significa, semplicemente, che una volta calcolata la matrice delle utilità ideali e individuata la coppia con il massimo valore di utilità, questa viene assegnata.

Resta tuttavia garantita l'unicità di assegnamento delle frontiere; questo significa che non è possibile assegnare la stessa frontiera anche qualora risultasse la scelta migliore per più robot. L'algoritmo prosegue fino a che non viene assegnato il robot che esegue l'algoritmo, scegliendo il prossimo robot sulla base della migliore utilità ideale rimasta dopo aver depennato la riga e la colonna corrispondenti all'utilità massima della coppia assegnata all'iterazione precedente dell'algoritmo.

Questo approccio garantisce il rispetto dell'elemento fondamentale del metodo, ossia il coordinamento: come nel caso precedente, la scelta di dove mandare ogni robot è assolutamente vincolata alla situazione e al comportamento di tutti gli altri membri del team.

Anche in questo metodo è stata mantenuta la scelta sullo screening delle frontiere: viene determinato il valore della `max_area` che verrà impiegato nelle fasi successive dell'algoritmo per operare una scrematura delle frontiere sulla base dell'area osservabile. L'idea sottostante è sempre la stessa: le frontiere la cui area visibile (che ricordo essere l'area FREE ma non SAFE) è troppo piccola, di fatto contribuiscono solo minimamente alla copertura dell'ambiente e quindi sono considerate di scarsa rilevanza.

Un ultimo aspetto, seppure marginale, riguarda la `goodMemberUtil` ($gmu(r_i)$) (vedi Figura 4.3): in questo caso non deve più essere calcolata in quanto fondamentale solo nel caso del ricalcolo dell'utilità effettuato nello step2.

Sulla base di quanto sopra, si evince che metodo è caratterizzato da una minore complessità computazionale rispetto al metodo 1 (Sezione 4.2) in quanto

prevede un assegnamento basato semplicemente sull'utilità ideale. Ciò consente, ad ogni step esplorativo, di giungere ad una decisione di assegnamento in un tempo inferiore rispetto a quello richiesto ai metodi basati sull'utilità reale. Tuttavia l'utilità di ogni punto è "approssimata" e questo causa assegnamenti non ottimali.

L'obiettivo è quindi valutare se tale inferiore complessità computazionale ha effetti incisivi in termini di copertura dell'ambiente in misura tale da bilanciare gli effetti di un assegnamento robot/frontiera meno preciso.

Lo schema seguente mostra il principio di funzionamento di questo metodo. Per evitare ridondanza, ho scelto di indicare nel dettaglio solo le modifiche intervenute rispetto al metodo precedente.

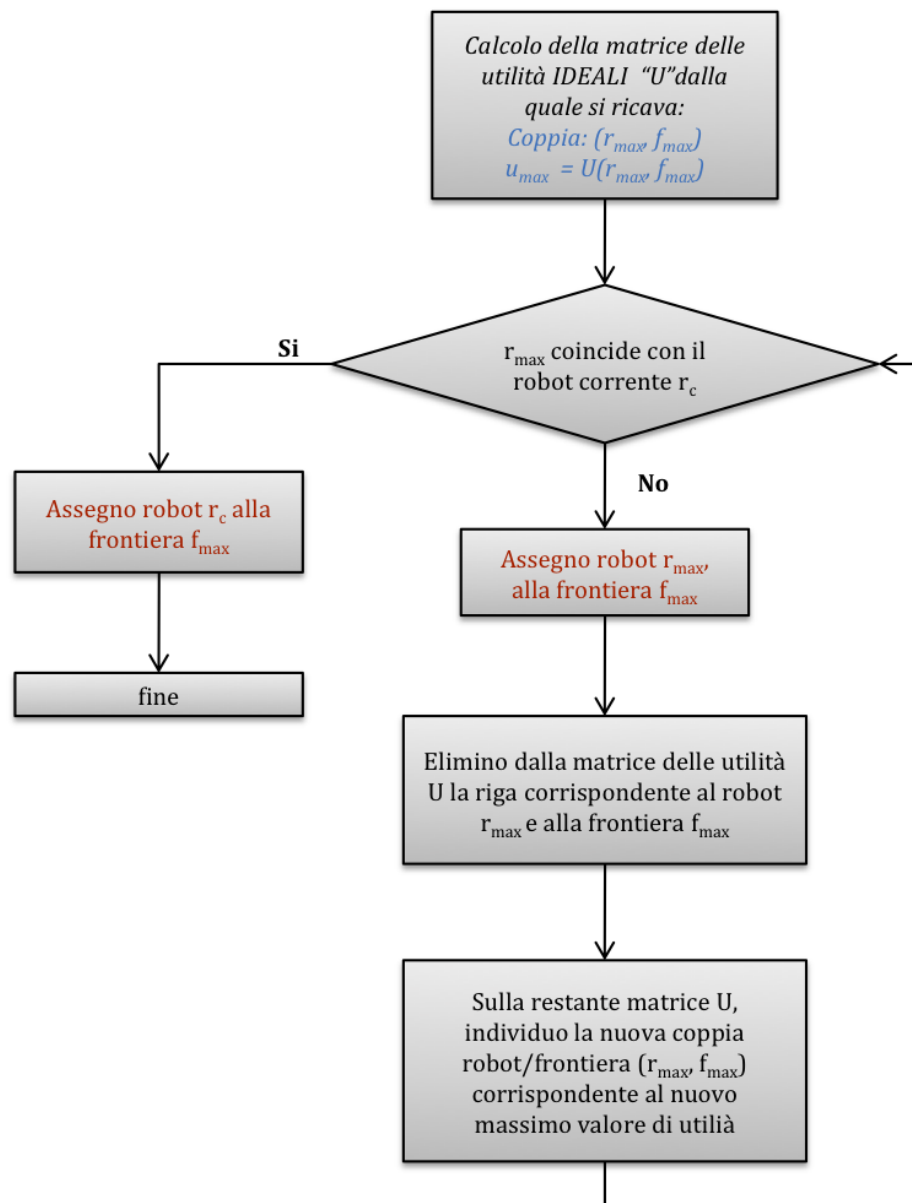


Figura 4.6 - Metodo2

4.4 – Metodo 3: assegnamento robot/frontiera senza coordinamento

L'elemento caratteristico del terzo metodo di assegnamento implementato in questa tesi e che lo contraddistingue dai precedenti, è l'assenza di coordinamento all'interno del team di robot, ossia ogni robot sceglie quella che per lui è la migliore frontiera, senza tenere in considerazione le scelte operate dagli altri robot. Questo significa che ogni robot viene assegnato alla frontiera rispetto alla quale ha la massima utilità: in questo modo viene permesso l'eventuale multiplo assegnamento di una frontiera qualora risultasse, sulla base dell'utilità, la migliore per più di un robot.

Il metodo di assegnamento senza coordinamento segue concettualmente le idee di base del metodo 1:

- screening a priori delle frontiere sulla base dell'area massima (max_area) seguendo l'approccio mostrato in Figura 4.1;
- calcolo della matrice delle utilità ideali U tenendo conto, all'interno del calcolo, del valore ideale di distanza, ossia la distanza euclidea tra ogni coppia robot/frontiera. Per il calcolo si segue il procedimento illustrato nella Figura 4.2.

A questo punto, non viene più considerata la migliore utilità in assoluto (e, di conseguenza, la migliore coppia), ma la migliore relativamente ad ogni robot del team, in modo completamente disgiunto: ogni robot effettuerà il ricalcolo della sua migliore utilità tenendo conto della reale distanza verso la sua migliore frontiera.

Questo ricalcolo avviene esattamente seguendo l'approccio del metodo 1 e, in particolare dello step 2 come dettagliatamente illustrato nella Figura 4.3.

Da sottolineare un aspetto molto importante che costituisce l'essenza del metodo: ogni frontiera è assegnabile ad ogni robot, indipendentemente dal fatto che sia già stata assegnata anche ad un altro all'interno del team. Questo aspetto è ciò che caratterizza la mancanza del coordinamento: ogni robot sceglie solamente sulla base della sua situazione, senza tenere conto del comportamento e della situazione degli altri.

Si può quindi facilmente evincere che, concettualmente, vengono mantenuti tutti gli step che caratterizzavano il metodo 1; vengono tuttavia apportate all'interno

di tali step delle modifiche che definiscono e caratterizzano la mancanza di coordinamento di questo metodo.

Nel dettaglio, gli step di questo metodo sono così caratterizzati:

- *step 1, calcolo della matrice delle utilità ideali*: questo aspetto segue esattamente la procedura illustrata nella Figura 4.2; quello che però si ottiene in output non è la migliore utilità in assoluto e la relativa coppia robot/frontiera, ma la migliore utilità relativa a ogni robot con la frontiera associata;
- *step 2, ricalcolo*: per ogni robot viene effettuato il ricalcolo della sua migliore utilità ideale basandosi sul path planning e trovando il valore reale dell'utilità; viene aggiornata la matrice e valutato se la coppia è ancora la migliore tenendo conto di tutte le frontiere, anche di quelle già assegnate. L'output, per ogni robot, è la nuova reale miglior coppia;
- *step 3, assegnamento*: viene assegnato il robot alla frontiera individuata nello step precedente.

Come già accennato nella Sezione 4.2, resta comunque garantito l'aspetto legato alla condivisione della mappa tra i membri del team, elemento fondamentale per garantire la conoscenza completa dell'ambiente da parte di tutti i robot e la conseguente scelta delle frontiere su tutto lo spettro di possibilità.

Riassumendo, l'obiettivo di questo metodo è il seguente: se da una parte togliere il coordinamento potrebbe influire negativamente sulle performance complessive, dall'altra si vuole garantire che i robot possano scegliere quella che per loro è la migliore su tutte le frontiere a disposizione, senza precludersi delle frontiere perché già assegnate a qualcun altro.

Gli schemi seguenti, suddivisi per step, mostrano il funzionamento dell'algoritmo sulla base di quanto precedentemente esposto, omettendo, per evitare ridondanza, i dettagli inerenti le parti comuni con gli altri metodi.

Step 1: segue l'approccio dettagliatamente illustrato nella Figura 4.2.

Step 2:

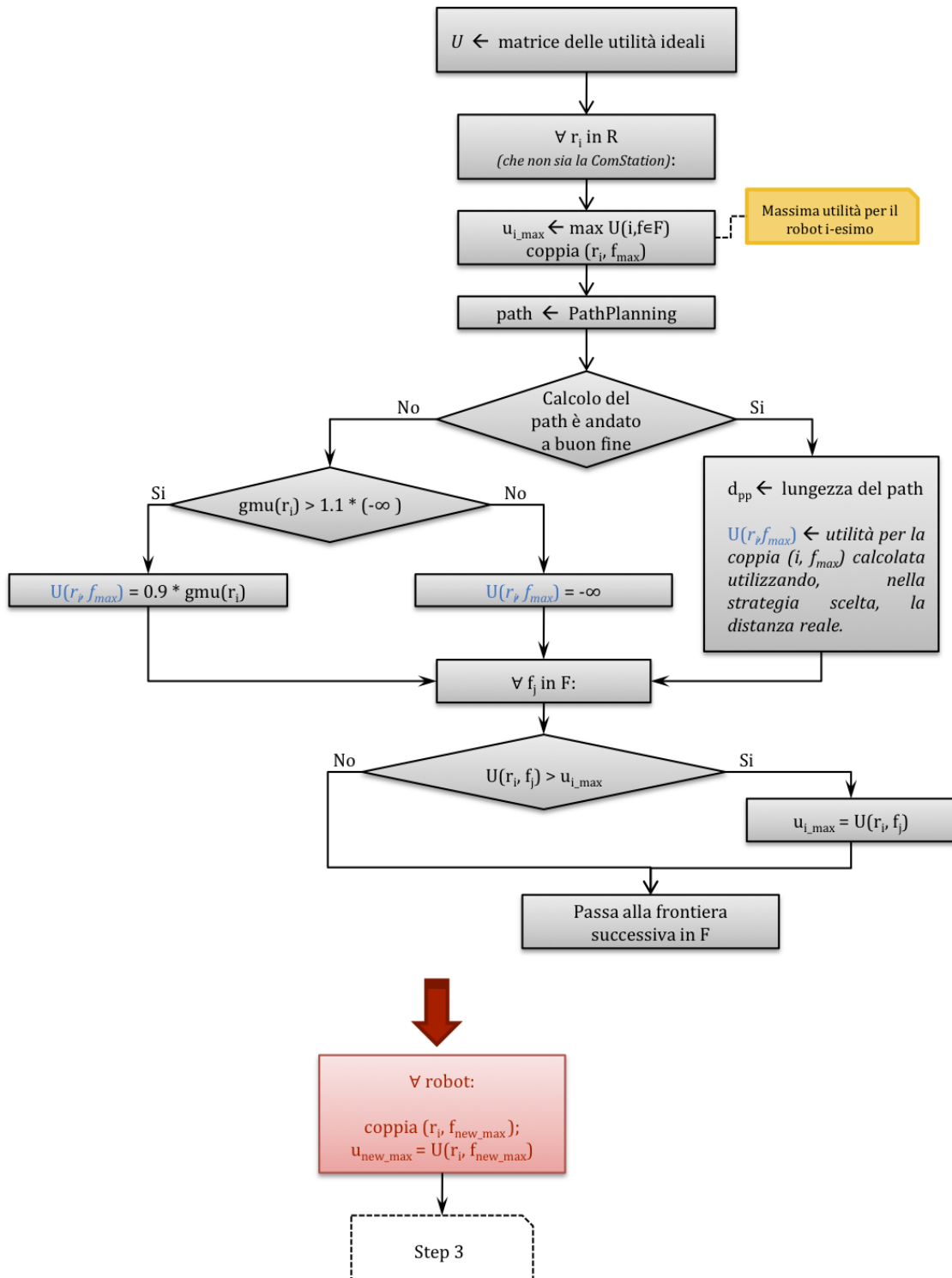


Figura 4.7 - Metodo3_step2

Step 3:

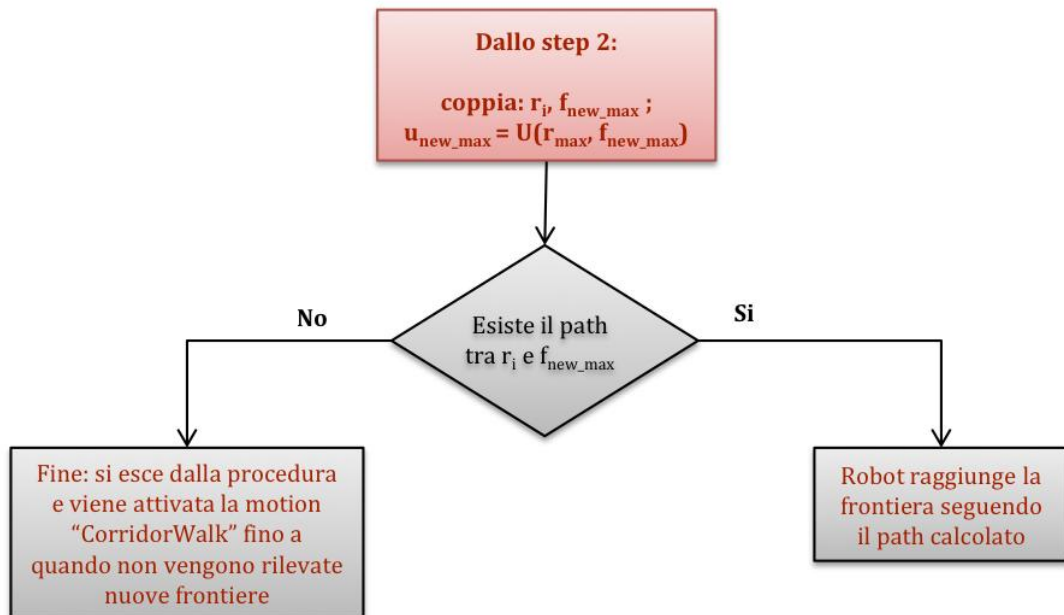


Figura 4.8 - Metodo3_step3

4.5 – Metodo 4: assegnamento random robot/frontiera

Il metodo di assegnamento random è il più semplice e potrebbe essere considerato il metodo di più basso livello.

Funziona molto semplicemente: date tutte le frontiere rilevate a quel passo esplorativo, ogni robot viene assegnato ad una frontiera scelta casualmente dall'insieme, a prescindere dal valore di utilità associato rispetto a quella frontiera. Per questo è l'unico metodo di assegnamento avente un'unica implementazione, in quanto, essendo l'assegnamento del tutto indipendente dall'utilità, quest'ultima non deve essere calcolata e quindi non necessita della doppia implementazione (una per ogni strategia).

Resta sempre da sottolineare che le frontiere a disposizione per l'assegnamento non sono tutte quelle rilevate a quel passo esplorativo, ma quelle che hanno superato lo screening sull'area massima, esattamente come in tutti i metodi precedentemente esposti. La determinazione del valore di area massima (max_area) segue l'algoritmo riportato in Figura 4.1.

Anche in questo metodo, come nel precedente, non viene effettuato il controllo sul preventivo assegnamento di una frontiera. Questo significa che la scelta random può essere vista come una estrazione con reinserimento: una frontiera può casualmente essere scelta più volte consecutivamente e quindi essere assegnata a robot diversi.

L'assegnamento random ha il vantaggio di essere estremamente leggero dal punto di vista computazionale, permettendo quindi di giungere ad una decisione di assegnamento in un tempo estremamente breve (molto più breve di tutti gli altri metodi precedentemente descritti); tuttavia gli assegnamenti, non tenendo conto di alcun criterio, sono completamente casuali e quindi meno ottimali rispetto a qualsiasi metodo fino ad ora esposto. L'obiettivo è stato quindi quello di valutare, come nel caso del metodo 2, se tale minore complessità computazionale porta ad una copertura dell'ambiente più ampia, anche a fronte di scelte di assegnamento che non tengono in considerazione alcun parametro in grado di esprimere la "bontà" di una frontiera rispetto ad un'altra.

Lo pseudo-codice seguente mostra quanto sopra esposto:

Metodo 4: assegnamento random robot/frontiera

preInfos ← array di tutte le frontiere rilevate ad un passo esplorativo

max_area ← l'area massima visibile dalle prime #frontiere/e frontiere

calcolata seguendo l'approccio algoritmico illustrato nella
Figura 4.1

infos ← array delle frontiere (*f*) estratte da *preInfos* che hanno superato la
selezione sull'area visibile:

$f \in \text{preInfos} \mid f.\text{Area} \geq \text{max_area}$

For each robot r_i in R do

$f_j \leftarrow \text{random}(\text{infos})$

 Assegna r_i a f_j

end

Figura 4.9 - Metodo 4

Anche in questo metodo, se il path tra coppia robot/frontiera non esiste, viene attivata la motion CorridorWalk che rimane attiva fino a quando il robot non rileva nuove frontiere.

Capitolo 5:

RISULTATI SPERIMENTALI

5.1 – Introduzione

Nel capitolo precedente sono stati illustrati dettagliatamente i quattro metodi per l'assegnamento dei robot alle frontiere oggetto della tesi. Come già sottolineato nella Sezione 4.1, ognuno di essi è stato implementato in due versioni: una nella quale le utilità (quella ideale ed eventualmente quella reale) vengono calcolate secondo la strategia VISSER e una nella quale vengono calcolate secondo la strategia MCDM. L'unico metodo che fa eccezione, come già sottolineato, è il quarto che, prevedendo un assegnamento random, non necessita di alcun calcolo delle utilità e per questo è stato implementato in un'unica versione. Le due strategie, VISSER e MCDM, sono state illustrate nella Sezione 3.5.

Dopo aver implementato i vari metodi, il passo successivo del lavoro è stato raccogliere i dati inerenti il mapping dell'ambiente, ossia i m² di area FREE, SAFE e CLEAR coperti dal team di robot durante l'esplorazione allo scopo di confrontare tali metodi di assegnamento e valutare quale soluzione garantisca la maggiore copertura dell'ambiente. Si è proceduto, quindi, alla fase delle simulazioni.

Ogni simulazione è caratterizzata da un team composto da una ComStation e due robot esploratori; inoltre ha una durata di 15 minuti: nella versione originale del controllore, la durata prevista è di 20 minuti; tuttavia, a causa della complessità del controllore stesso, del simulatore e dei software necessari, non è stato possibile, con gli strumenti a mia disposizione, raggiungere tale limite temporale. Tuttavia, 15 minuti è da ritenersi un arco di tempo sufficiente per comprendere l'andamento di un metodo implementato secondo una determinata strategia.

Non essendo stato possibile eseguire simulazioni della durata massima prevista, si è cercato di ottenere dati (ossia i m² di area FREE, SAFE e CLEAR) il più precisi possibili: per questo motivo sono stati raccolti con un intervallo di 30 secondi permettendo di costruire curve degli andamenti piuttosto precise. In particolare: ogni 30 secondi il controllore calcola il valore di area FREE, SAFE e CLEAR che fino a quell'istante il team di robot è stato complessivamente in grado di mappare. Quello che si è ricavato è stato un valore crescente di m² per ognuna delle tipologie di area di interesse; la cosa interessante è stata quindi confrontare i vari metodi per capire e valutare quale fosse il migliore in termini di copertura, ossia quale fosse in grado, al termine dei 15 minuti, di mappare più area possibile.

Per ogni metodo sono state effettuate cinque prove caratterizzate da cinque

diverse posizioni iniziali dei robot; tali posizioni, una volta scelte, sono state mantenute nelle simulazioni di ogni versione (il termine versione sta ad indicare un metodo di assegnamento associato a una specifica strategia di esplorazione). Questo significa che per ogni versione, sono state effettuate 5 prove; di queste, per ogni istante di rilevamento, è stato calcolato il valore medio riassuntivo. Tali valori medi costituiscono la base sulla quale sono stati costruiti i grafici descrittivi dei vari metodi e dai quali sono state effettuate le osservazioni e tratte tutte le conclusioni che verranno discusse più avanti nel capitolo.

Nelle sezioni successive vengono dettagliati i risultati ottenuti dalle simulazioni di ogni metodo. Si è deciso di organizzare i risultati partendo dal metodo di più basso livello, ossia quello che implementa l'assegnamento random robot/frontiera, per poi passare a metodi più sofisticati: il metodo 3, caratterizzato dalla mancanza di coordinamento e dall'assegnamento sulla base dell'utilità reale; il metodo 2, caratterizzato dal coordinamento, ma dove l'assegnamento si basa semplicemente sulle utilità ideali e infine il metodo 1, il più complesso e completo, caratterizzato sia dal coordinamento, sia dall'assegnamento sulla base dell'utilità reale.

I risultati sono stati organizzati in tre parti: nella prima parte vengono poste a confronto, per ogni metodo, le due strategie; nella seconda parte vengono confrontati, per ogni strategia, i quattro metodi e infine nella terza parte viene fatto un confronto globale tra tutte le versioni implementate nella tesi.

Per ognuna di queste parti sono stati riportati i grafici che esprimono l'andamento dei valori medi delle aree FREE, SAFE e CLEAR riassuntivi delle prove seguiti da un'analisi; nell'Appendice A si possono trovare i dati numerici delle singole prove (corrispondenti ai m² di area FREE, SAFE e CLEAR) ottenuti in ognuna delle due versioni in cui il metodo è stato implementato e i relativi valori medi (dai quali sono stati tratti i grafici suddetti).

5.2 – Le prove

Le prove sono state eseguite utilizzando una delle mappe del pacchetto RoboCupo06Worlds, ossia la "DM-compWorldDay4b_250". In questa mappa viene rappresentato molto fedelmente l'interno di un edificio a due piani nel quale sono

presenti degli uffici. Le immagini seguenti mostrano alcuni dettagli dell'interno:



Figura 5.1 - Interno 1

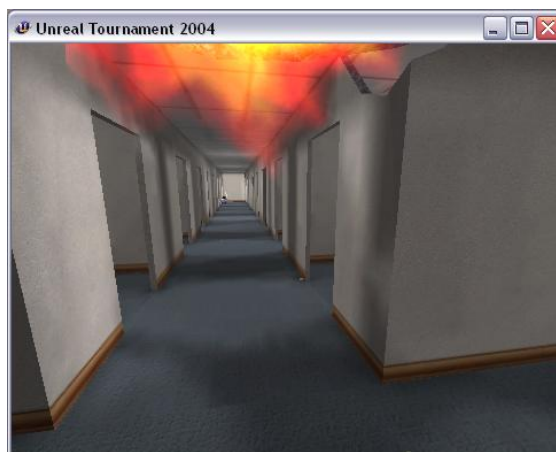


Figura 5.2 - Interno 2



Figura 5.3 - Interno 3



Figura 5.4 - Interno 4



Figura 5.5 - Interno 5

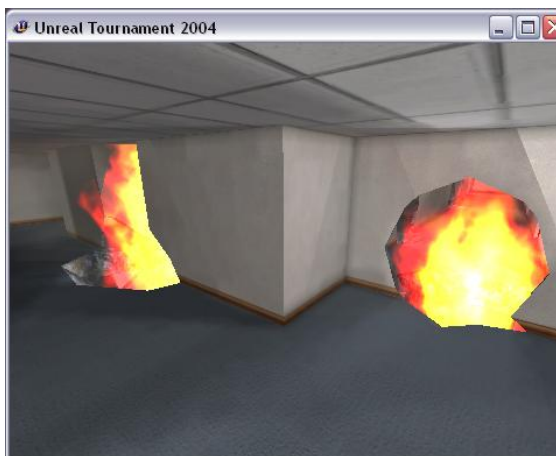


Figura 5.6 - Interno 6

In questa sezione sono riportati i parametri che caratterizzano le cinque prove effettuate per ogni metodo e per ogni strategia, ossia le posizioni e le rotazioni iniziali dei robot definiti in fase di configurazione.

- prova 1

	Coordinata x [m]	Coordinata y [m]	Coordinata z [m]	Rotazione attorno all'asse x [gradi]	Rotazione attorno all'asse y [gradi]	Rotazione attorno all'asse z [gradi]
ComStation	-48,3	34,5	-4	0	0	0
Robot1	-27,95	27,59	-4	0	0	-233
Robot2	-53,4	28,4	-4	0	0	0

- prova 2

	Coordinata x [m]	Coordinata y [m]	Coordinata z [m]	Rotazione attorno all'asse x [gradi]	Rotazione attorno all'asse y [gradi]	Rotazione attorno all'asse z [gradi]
ComStation	-56	16,5	-4	0	0	0
Robot1	-40	16,5	-4	0	0	233
Robot2	-28	28	-4	0	0	0

- prova 3

	Coordinata x [m]	Coordinata y [m]	Coordinata z [m]	Rotazione attorno all'asse x [gradi]	Rotazione attorno all'asse y [gradi]	Rotazione attorno all'asse z [gradi]
ComStation	-48,3	34,5	-4	0	0	0
Robot1	-21,5	16,5	-4	0	0	0
Robot2	-54,38	23,69	-4	0	0	0

- prova 4

	Coordinata x [m]	Coordinata y [m]	Coordinata z [m]	Rotazione attorno all'asse x [gradi]	Rotazione attorno all'asse y [gradi]	Rotazione attorno all'asse z [gradi]
ComStation	-56	16,5	-4	0	0	0
Robot1	-44,5	16,5	-4	0	0	0
Robot2	-21	16,5	-4	0	0	0

- prova 5

	Coordinata x [m]	Coordinata y [m]	Coordinata z [m]	Rotazione attorno all'asse x [gradi]	Rotazione attorno all'asse y [gradi]	Rotazione attorno all'asse z [gradi]
ComStation	-48,3	34,5	-4	0	0	0
Robot1	-44,5	16,5	-4	0	0	0
Robot2	-21	16,5	-4	0	0	0

Come si può notare non è mai variata la coordinata z: il valore “-4” sta a indicare, nel sistema di riferimento, il piano terra dell’edificio. Il piano superiore è caratterizzato da buchi nel pavimento; per questo motivo non vi sono mai stati posizionati i robot.

C’è da fare una precisazione per quanto riguarda l’esecuzione delle simulazioni: in alcune occasioni si è reso necessario l’intervento manuale (TeleOperation) per guidare i robot fuori da situazioni di stallo dalle quali non erano in grado di uscire da soli, come, ad esempio, quando giravano su se stessi o si incagliavano contro una gamba del tavolo o un vaso di fiori. Queste situazioni si verificavano in corrispondenza dei momenti in cui il sistema arrivava alla quasi completa saturazione delle risorse disponibili: la CPU mostrava una percentuale di utilizzo del 99% - 100%. In queste situazioni, il perfetto coordinamento di tutti gli aspetti che costruiscono il corretto funzionamento del controllore e del simulatore vengono meno, con la conseguenza che i robot perdono l’esatto riferimento della loro localizzazione rispetto all’ambiente.

5.3 – Confronto tra strategie

In questa sezione vengono messe a confronto le due implementazioni di ogni metodo confrontando, appunto, la versione implementata secondo la strategia VISSER con la versione implementata secondo la strategia MCDM. L’obiettivo è valutare, relativamente ad ogni metodo, quale delle due strategie risponde meglio ai fini della copertura massima dell’ambiente.

5.3.1 - Gli andamenti

- **METODO 4** Area FREE, area SAFE, area CLEAR: gli andamenti

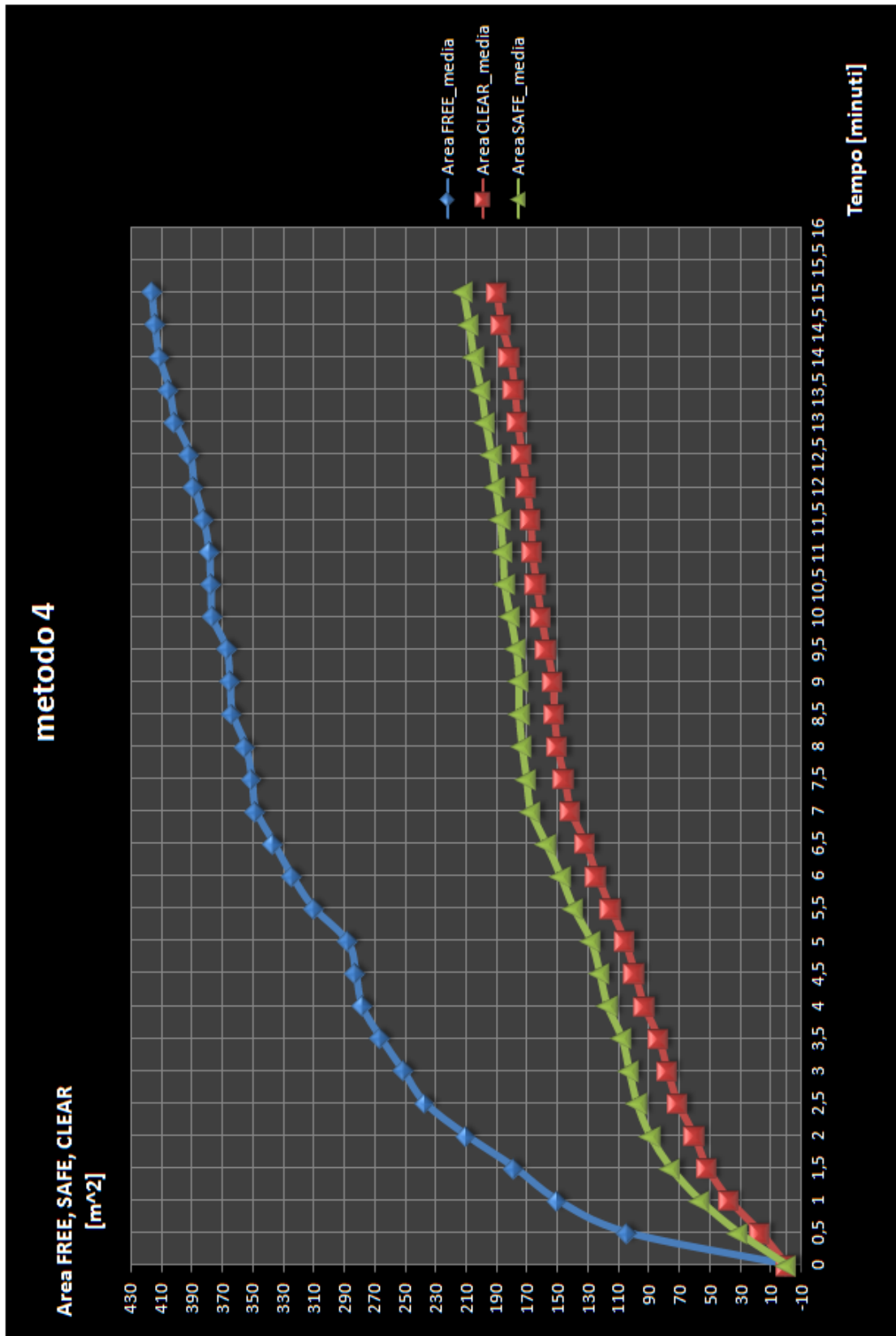


Figura 5.7 - Metodo4_area FREE, area SAFE, area CLEAR

- **METODO 3** Area FREE: gli andamenti

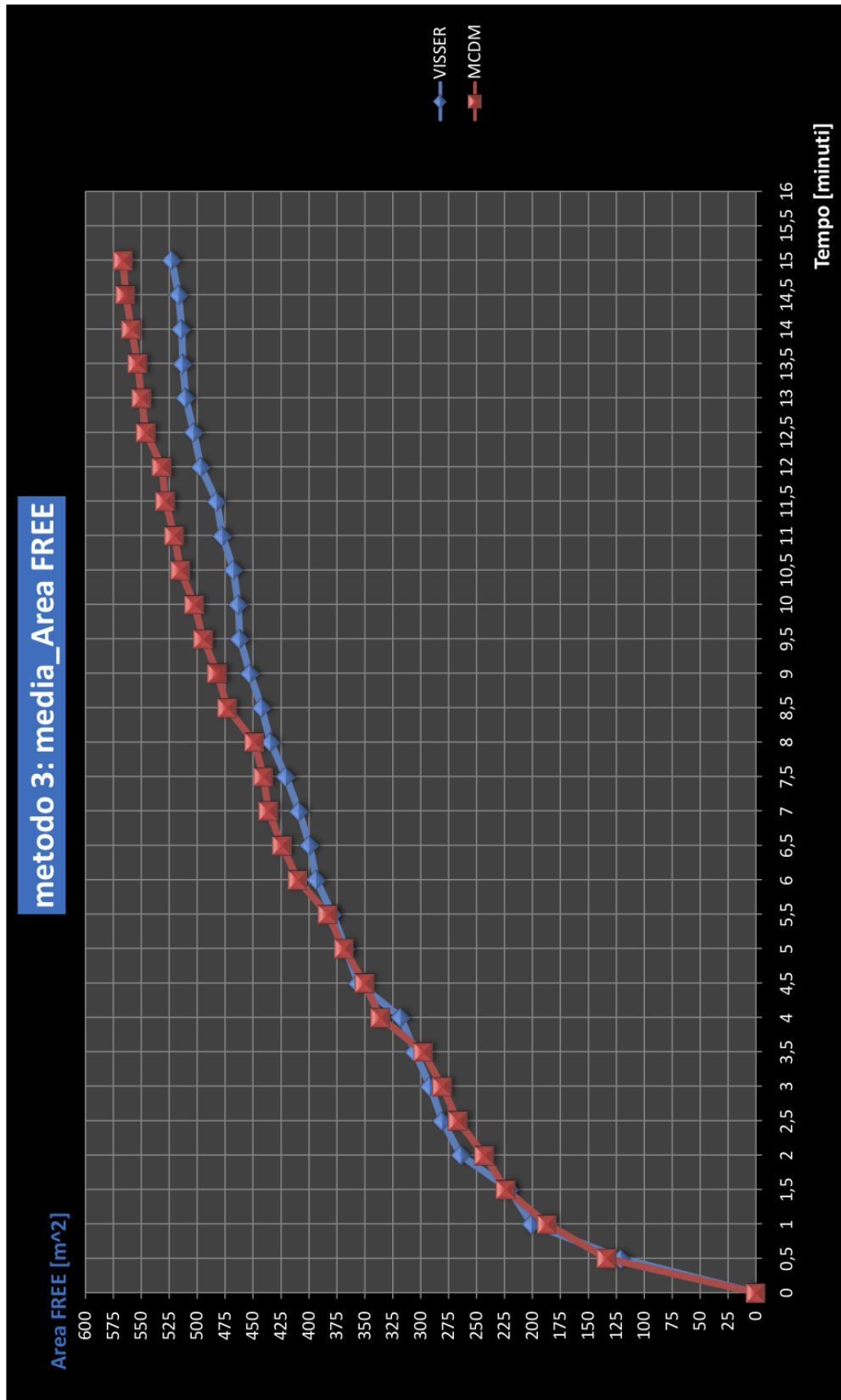


Figura 5.8 - Metodo3_area FREE

- **METODO 3 Area SAFE: gli andamenti**

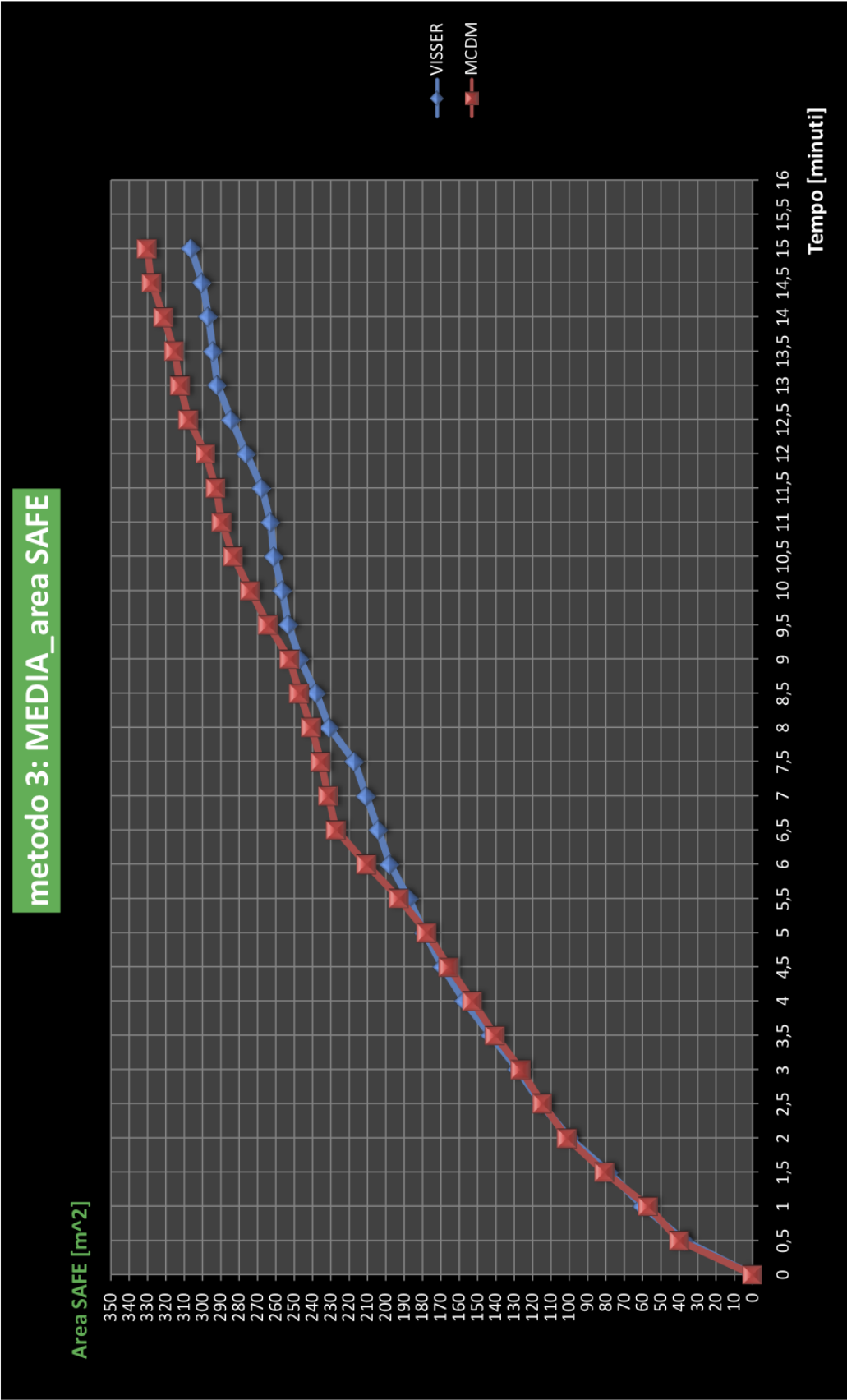


Figura 5.9 - Metodo3_area SAFE

- **METODO 3** Area CLEAR: gli andamenti

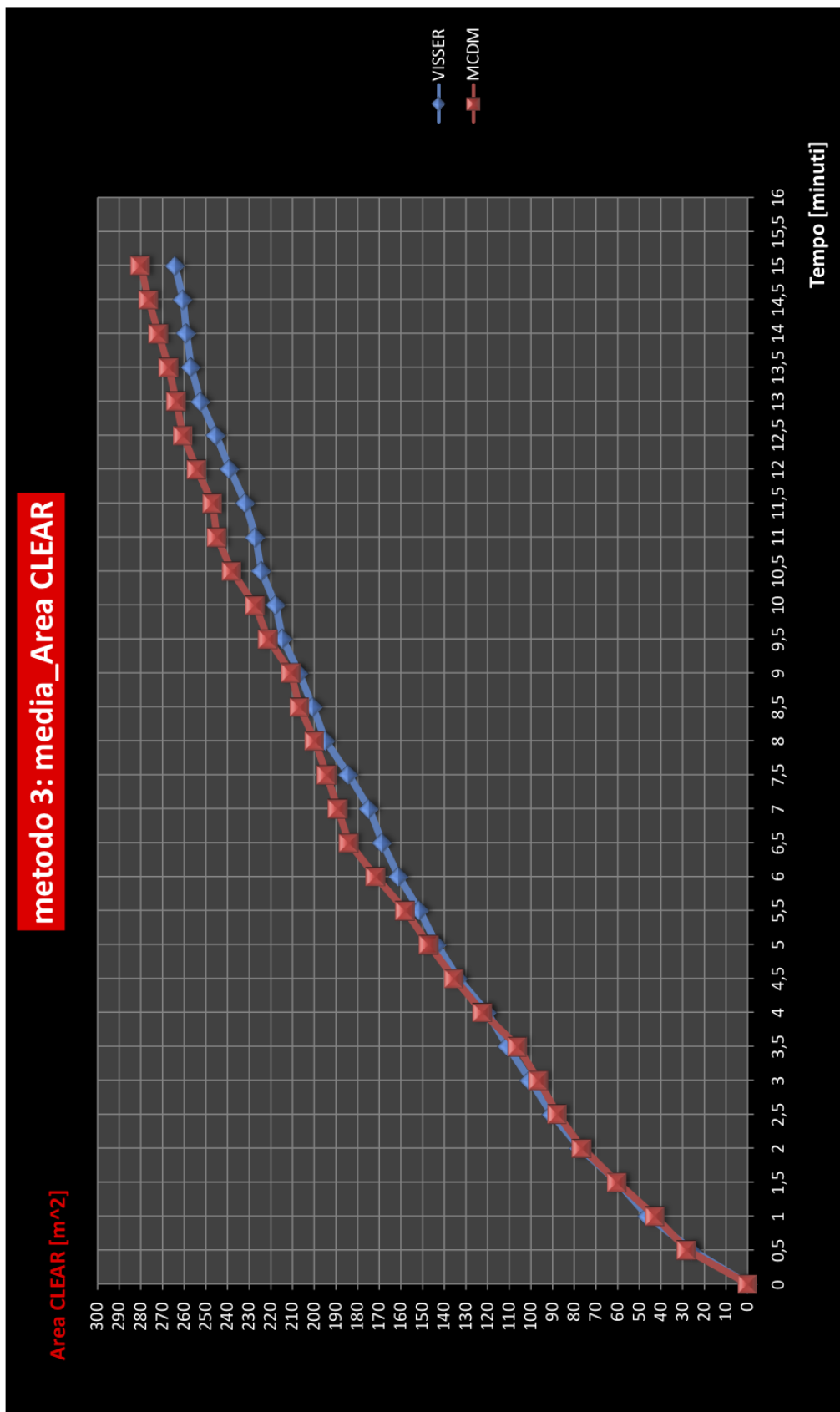


Figura 5.10 - Metodo3_area CLEAR

- **METODO 2** Area FREE: gli andamenti

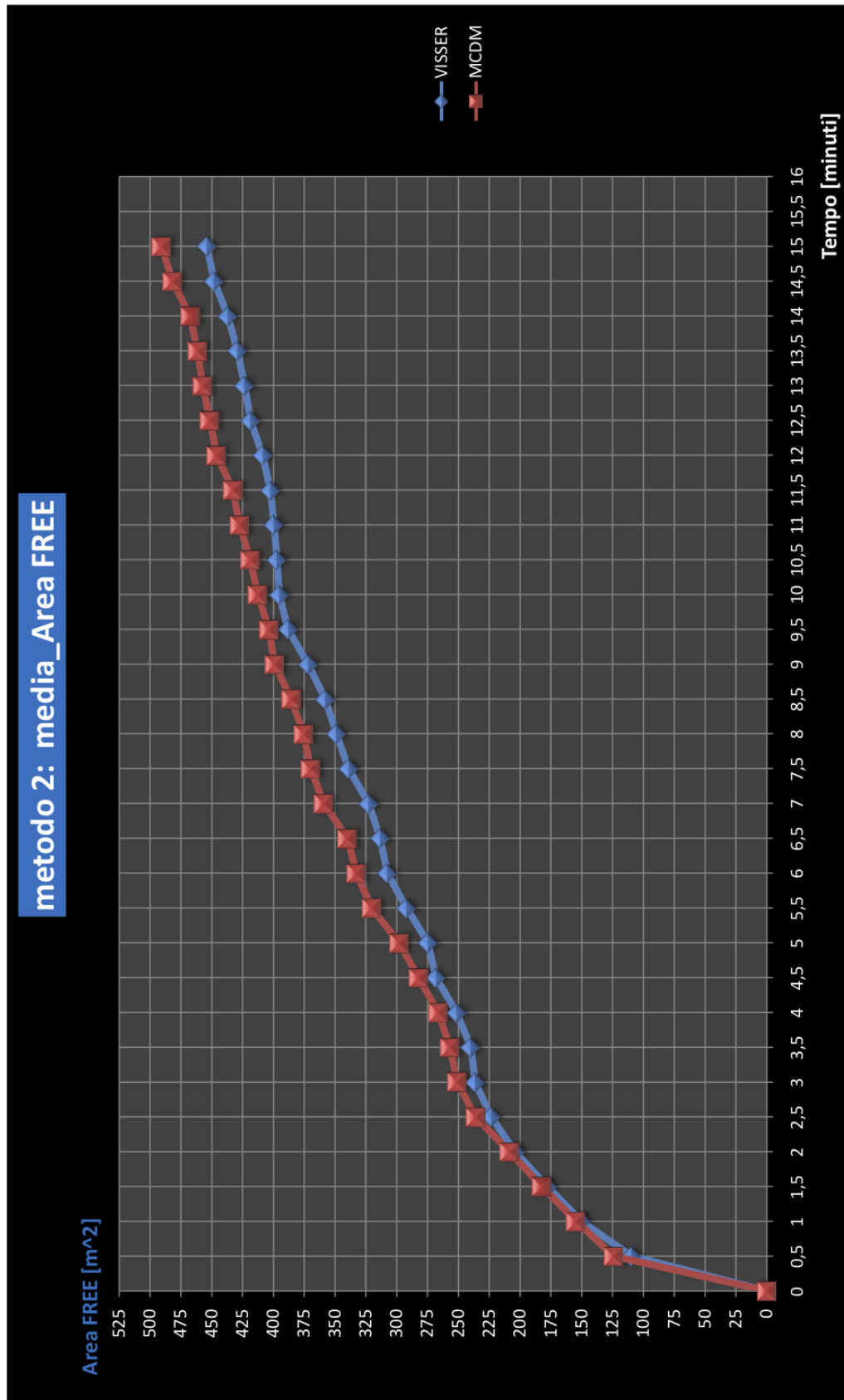


Figura 5.11 - Metodo2_area FREE

- **METODO 2** Area SAFE: gli andamenti

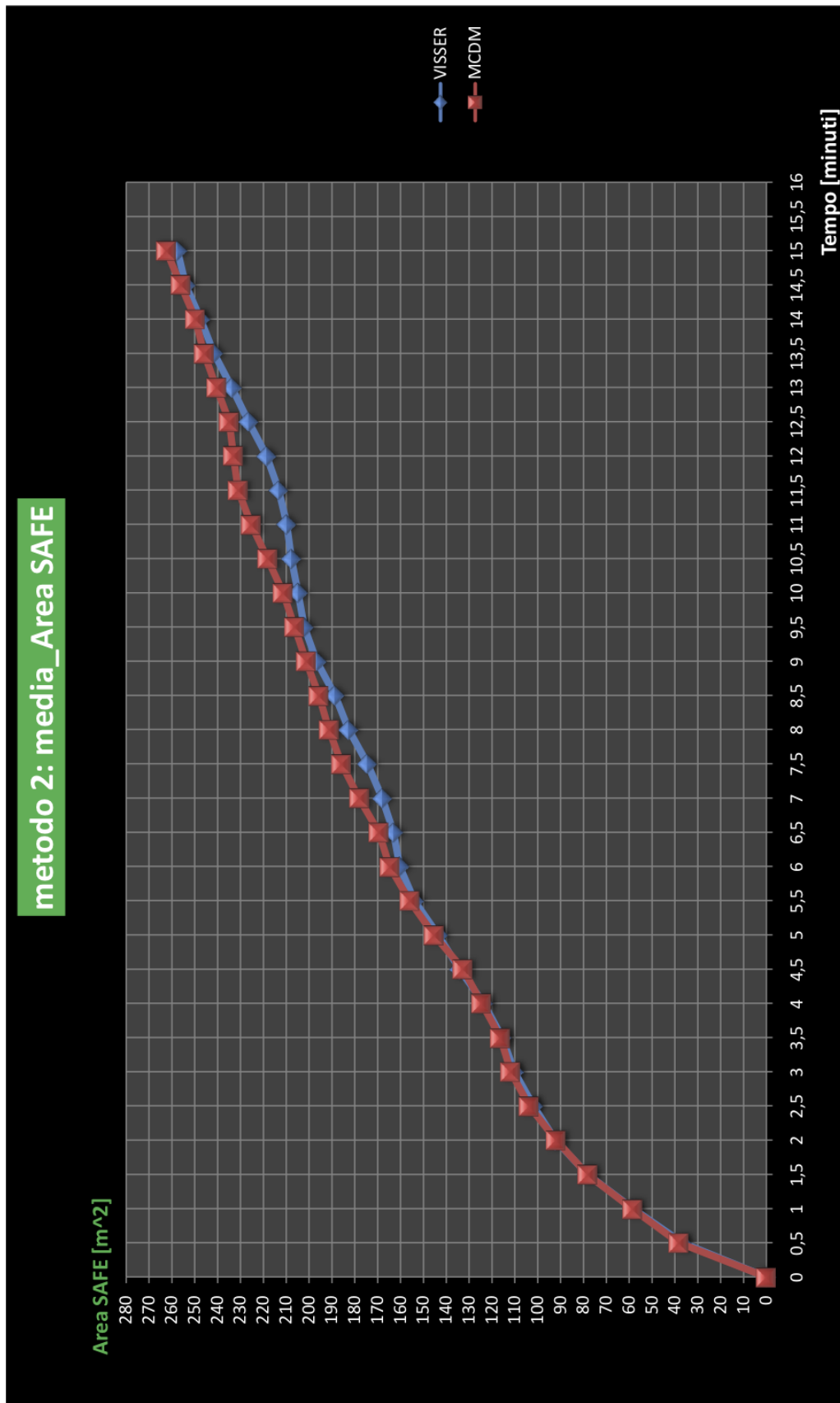


Figura 5.12 - Metodo2_area SAFE

- **METODO 2 Area CLEAR: gli andamenti**

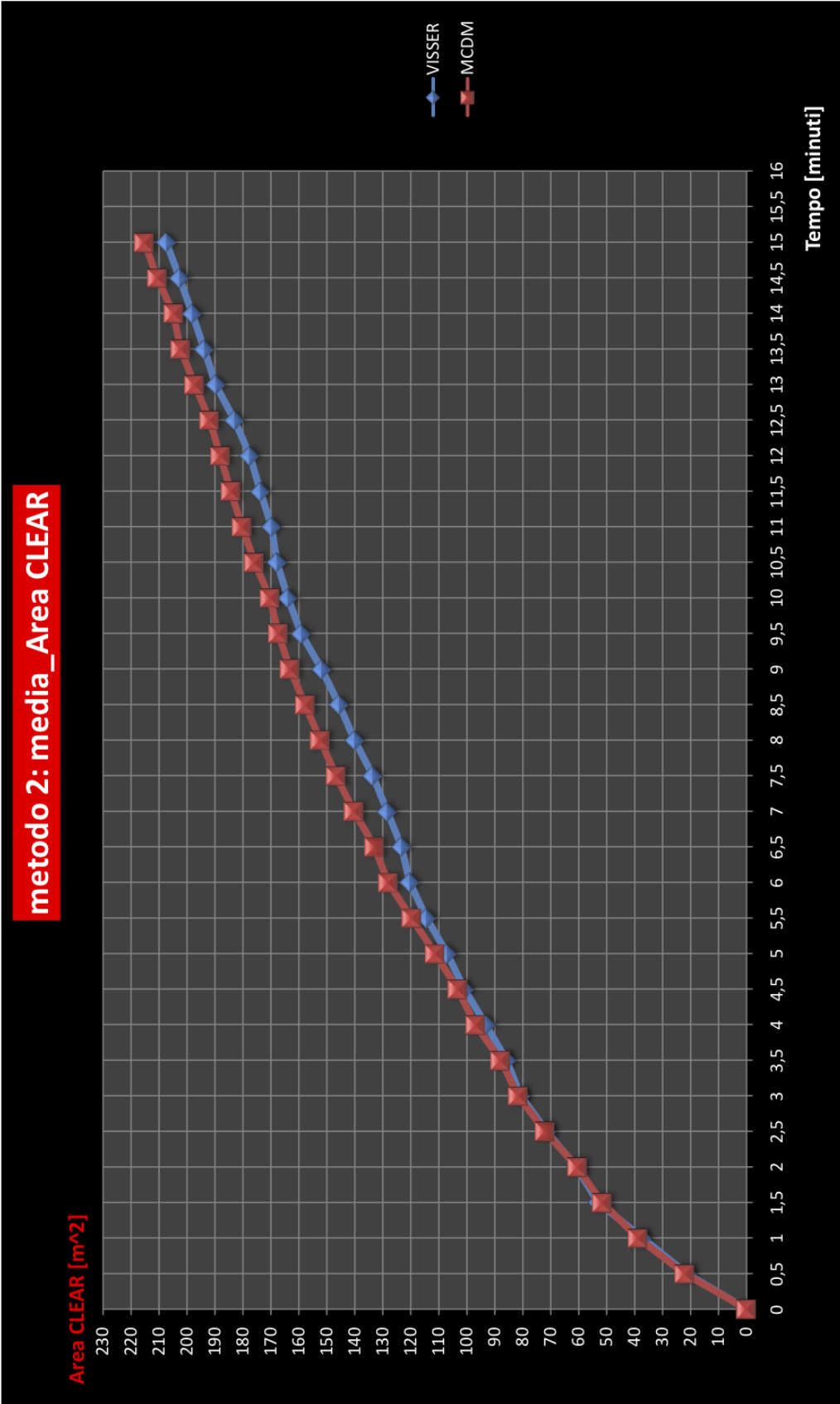


Figura 5.13 - Metodo2_area CLEAR

- **METODO 1** Area FREE: gli andamenti

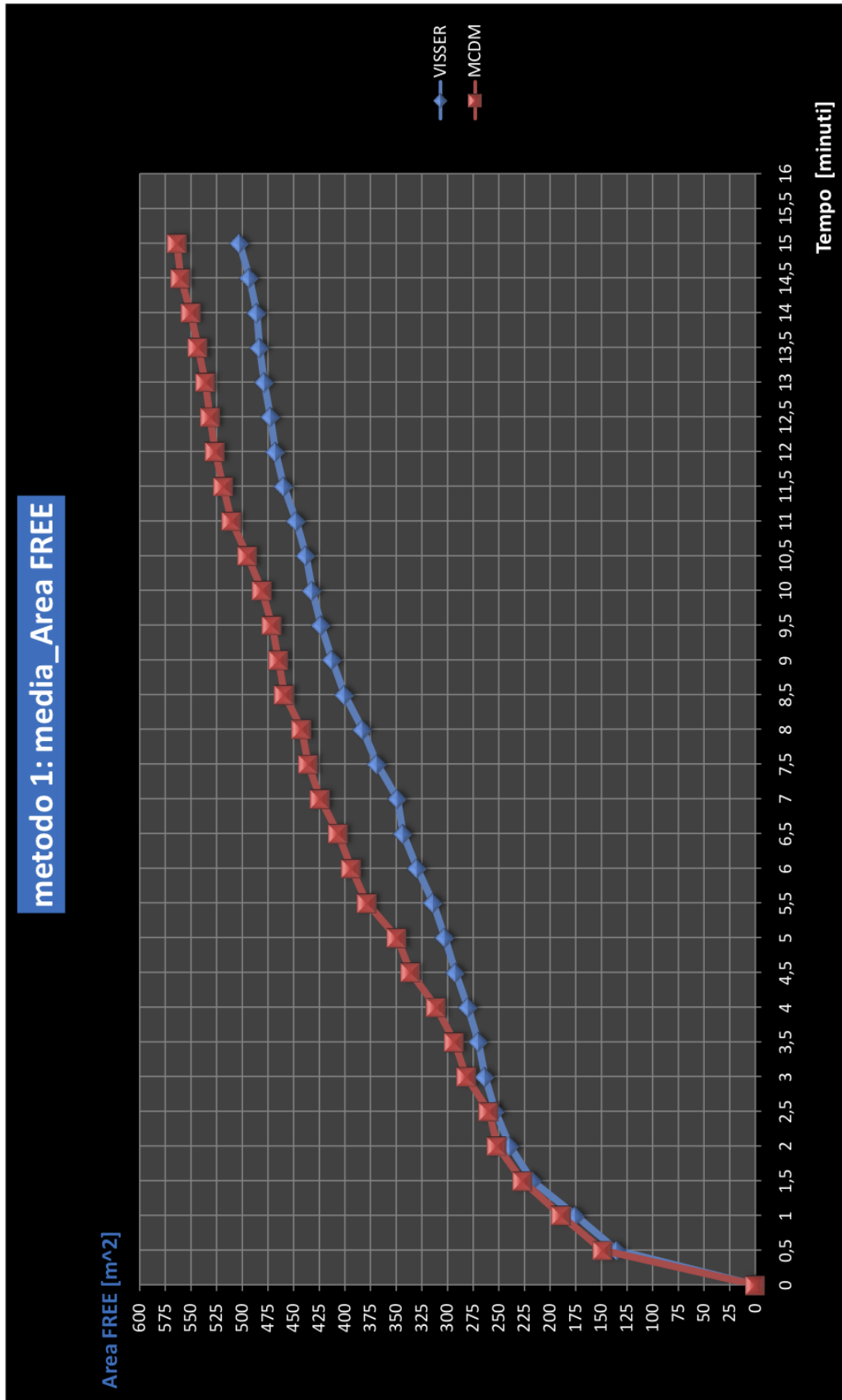


Figura 5.14 - Metodo1_area FREE

- **METODO 1** Area SAFE: gli andamenti

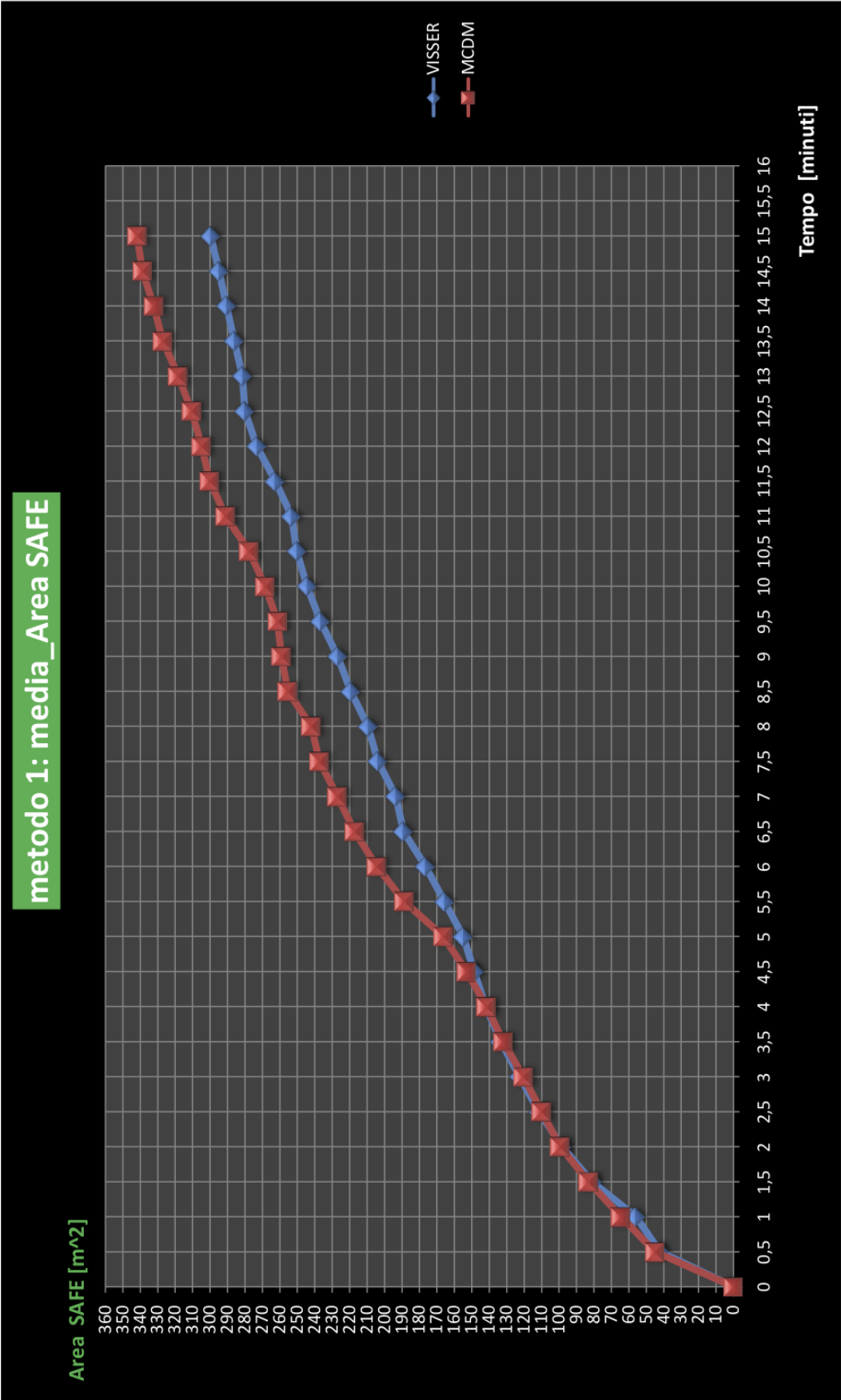


Figura 5.15 - Metodo1_area SAFE

- **METODO 1** Area CLEAR: gli andamenti

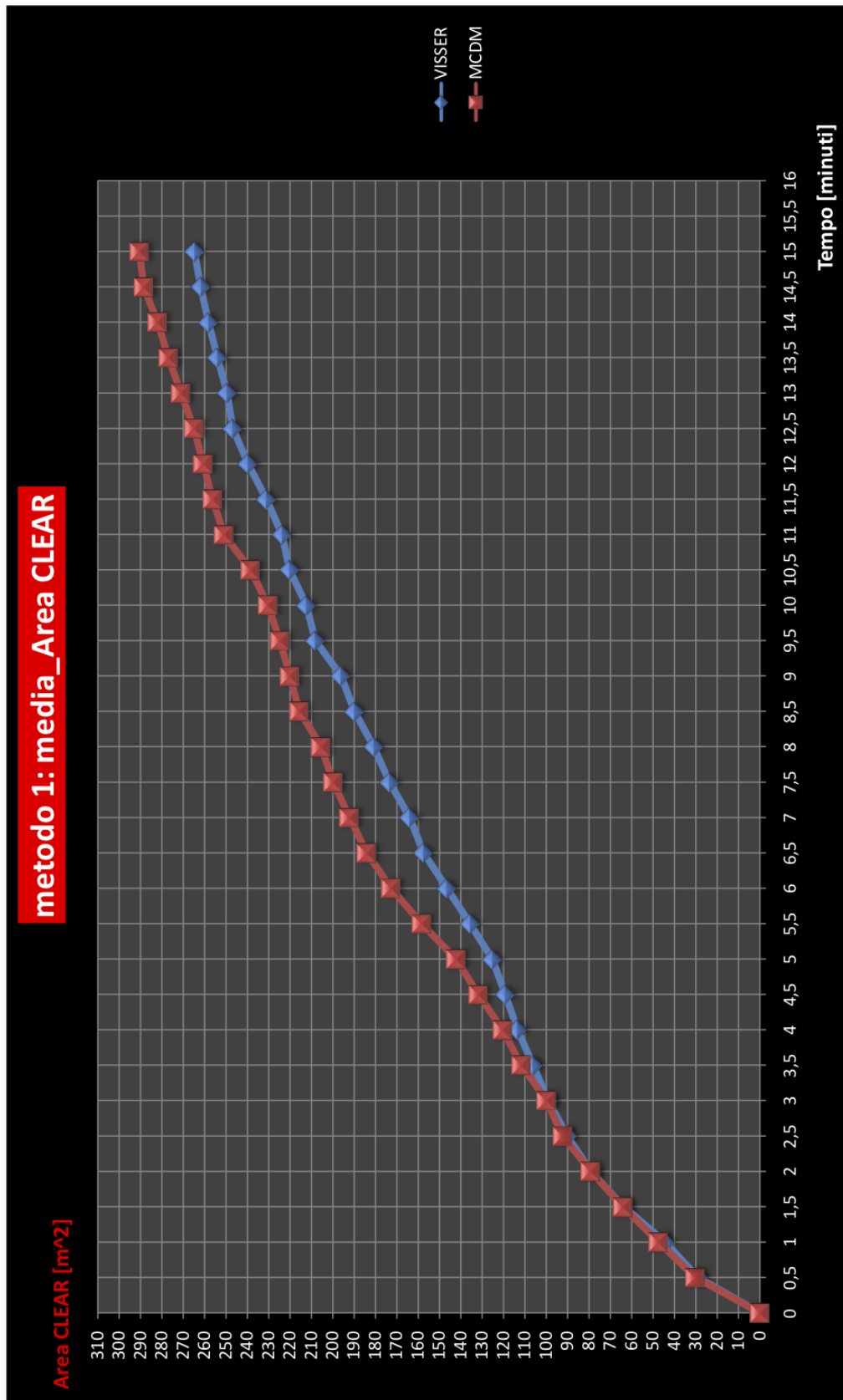


Figura 5.16 - Metodo1_area CLEAR

5.3.2 – Analisi dei risultati

I grafici riportati nella Sezione 5.3.1 mostrano per ogni metodo, l'andamento delle tre tipologie di area (area FREE, area SAFE, area CLEAR), ponendo a confronto le due versioni, ossia l'implementazione secondo la strategia VISSER e l'implementazione secondo la strategia MCDM.

Globalmente si può osservare che gli andamenti sono caratterizzati da due fasi: una prima, iniziale, nella quale le due versioni tendono a crescere sostanzialmente allineate e una seconda in cui, invece, le due curve si distanziano sottolineando appunto un'influenza diversa delle due strategie sul ogni metodo. Per analizzare meglio questo ultimo focale aspetto, si è reso necessario l'utilizzo di una tabella che esprimesse, in media, la differenza tra le due curve di ogni metodo in termini di area esplorata ad ogni step temporale. Sostanzialmente la tabella delle differenze evidenzia, seppure in termini medi, se e quanto la strategia MCDM è da preferire alla strategia VISSER relativamente ad uno specifico metodo.

Da sottolineare il calcolo effettuato per determinare la distanza tra le due curve: in corrispondenza di ogni istante di rilevazione, è stata effettuata la differenza tra il valore di area rilevata attraverso MCDM e l'area rilevata attraverso VISSER; dei risultati ottenuti ne è poi stato calcolato il valore medio.

Una precisazione: il metodo 4, come già ampiamente discusso, ha un'unica implementazione in quanto prescinde dalla particolare strategia; per questo motivo non necessita di ulteriori dettagli in questa sezione. Del metodo 4 se ne parlerà più diffusamente nella Sezione 5.4 dedicata espressamente al confronto tra metodi.

Metodo	differenza Aree FREE [m²]	differenza Aree SAFE [m²]	differenza Aree CLEAR [m²]
metodo 3	21,16	12	7,57
metodo 2	23,43	5,31	6,7
metodo 1	47,58	23	17,35

Tabella 5.1 - Differenze aree MCDM - VISSER

Delle tre tipologie di aree, quella di maggiore interesse è l'area FREE in quanto, pur non garantendo la massima certezza in termini di ostacoli, è quella che più di tutte le altre descrive la totalità dell'area esplorata dal team di robot.

Guardando i dati sintetizzati nella Tabella 5.1, oltre che i grafici riportati nella

Sezione 5.3.1, quello che si evince immediatamente è che, in generale, la strategia MCDM è da preferire alla strategia VISSER in quanto, nel complesso, garantisce un mapping più ampio dell'ambiente; più in dettaglio le considerazioni che si possono evincere sono le seguenti:

- il metodo 1, ossia quello caratterizzato dal coordinamento e dall'assegnamento sulla base della distanza reale, è quello nel quale si evidenzia la maggiore e notevole discrepanza tra le due strategie. Si può osservare che, in media, ad ogni passo temporale MCDM copre circa 47,58 m², 23 m² e 17,35 m² di area FREE, SAFE e CLEAR rispettivamente in più rispetto alla strategia VISSER. Quello che si può concludere è che l'aumento di complessità computazionale introdotta dalla strategia MCDM è assolutamente bilanciata da un incremento sostanziale della mappatura dell'ambiente. Questo è dovuto al fatto che il metodo 1 utilizza non solo più informazioni per "decidere", ma allo stesso tempo anche più accurate. Infatti, come dettagliato nella Sezione 4.2, prima di giungere ad un assegnamento il metodo effettua un doppio ricalcolo dell'utilità: prima adottando tra i criteri la distanza euclidea e poi, per la coppia robot/frontiera migliore, rivalutando l'utilità tenendo conto del reale costo di cammino. Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni di questo metodo si evince quindi che la strategia MCDM è in grado di sfruttare meglio le informazioni rispetto alla strategia VISSER: più sono le informazioni e più queste sono precise, e più MCDM è in grado di calcolare valori di utilità tali da permettere migliori decisioni.
- Nel metodo 3 e nel metodo 2, invece, le distanze tra le due strategie sono decisamente meno sostanziali (soprattutto nelle aree SAFE e CLEAR), ossia i m² esplorati in più da MCDM ad ogni step temporale sono decisamente minori e questo, di fatto, comporta differenze di copertura più sottili al termine dei 15 minuti di simulazione.
- Il metodo 2, ossia quello in cui l'assegnamento avviene sulla base della sola utilità ideale, è quello in cui maggiormente si nota quanto sopra esposto: la distanza in termini di area mappata ad ogni step è talmente piccola da non giustificare la complessità della strategia MCDM.

5.4 – Confronto tra metodi

In questa sezione vengono posti a confronto gli andamenti (in termini di area esplorata) dei quattro metodi di assegnamento robot/frontiera seguendo due approcci.

Nel primo i metodi vengono confrontati sulla base di una ben determinata strategia di esplorazione, VISSER o MCDM. In questa visione, l'obiettivo è capire quale metodo è in grado di garantire il maggior mapping dell'ambiente; si vuole inoltre poter valutare tale incremento di area mappata, ossia capire se l'impiego del "miglior" metodo è giustificabile rispetto alla complessità sia concettuale che computazionale dei metodi meno sofisticati.

Nel secondo approccio, invece, tutti i metodi vengono posti a confronto tra loro a prescindere dalla particolare strategia esplorativa. In questo caso l'obiettivo è avere una visione complessiva di tutte le versioni implementate in questa tesi in modo da poterne trarre una valutazione globale.

L'ultima considerazione riguarda il metodo 4: come già ampiamente discusso nel capitolo precedente, questo metodo non necessita del calcolo dell'utilità al fine dell'assegnamento robot/frontiera e per questo motivo presenta un'unica implementazione. Prescindendo, quindi, dalla specifica strategia, viene inserito sia nel confronto tra metodi basati su strategia VISSER sia nel confronto tra metodi basati su strategia MCDM.

I risultati sono organizzati nel seguente modo:

- nella Sezione 5.4.1 vengono posti a confronto i metodi implementati secondo la strategia MCDM;
- nella Sezione 5.4.2 vengono posti a confronto i metodi implementati secondo la strategia VISSER;
- nella Sezione 5.4.3 vengono poste a confronto tutte le versioni prescindendo dalla particolare strategia.

5.4.1 - Strategia MCDM: confronto tra metodi

- Area FREE: gli andamenti

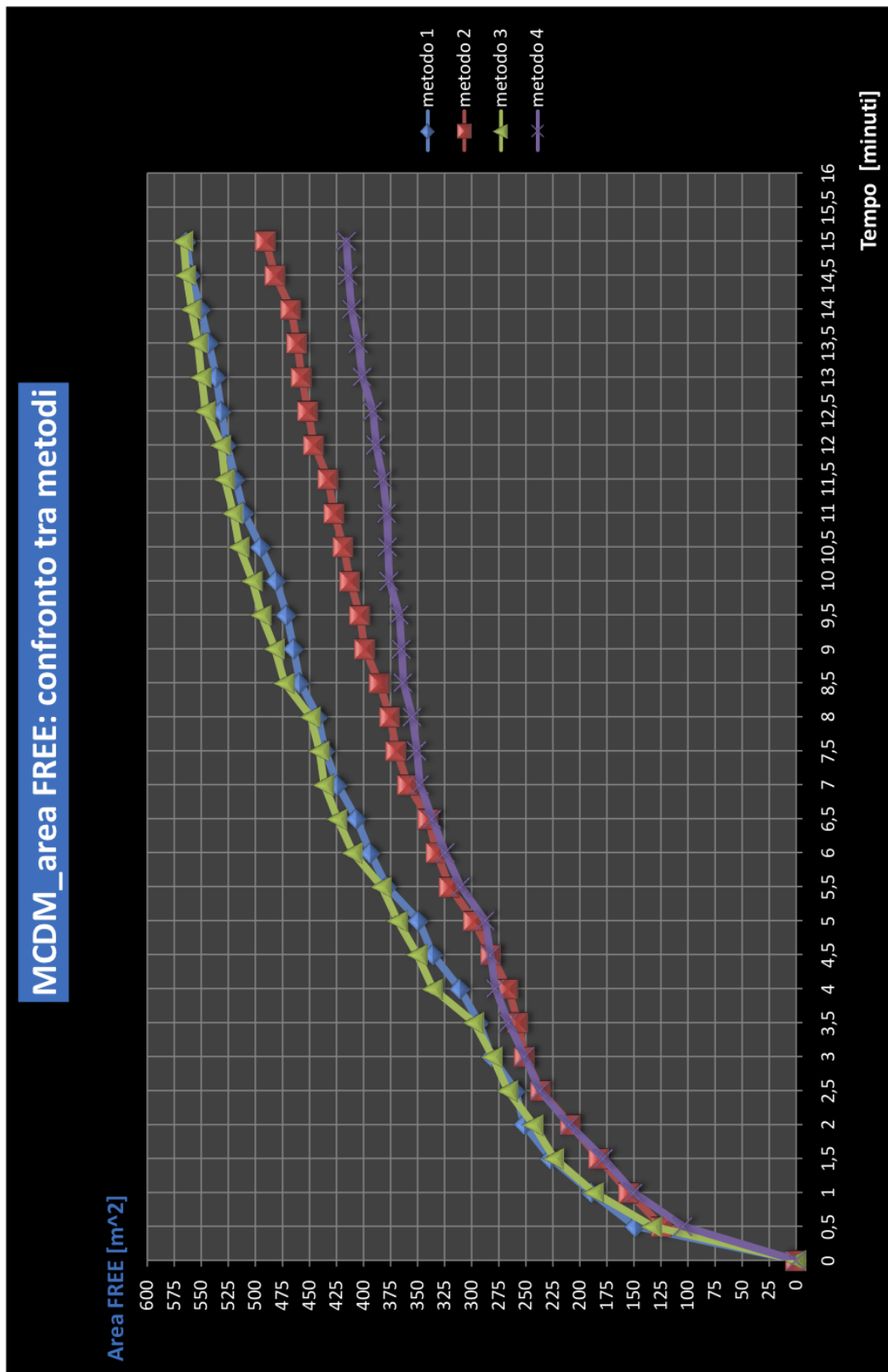


Figura 5.17 - MCDM_area FREE

- Area SAFE: gli andamenti

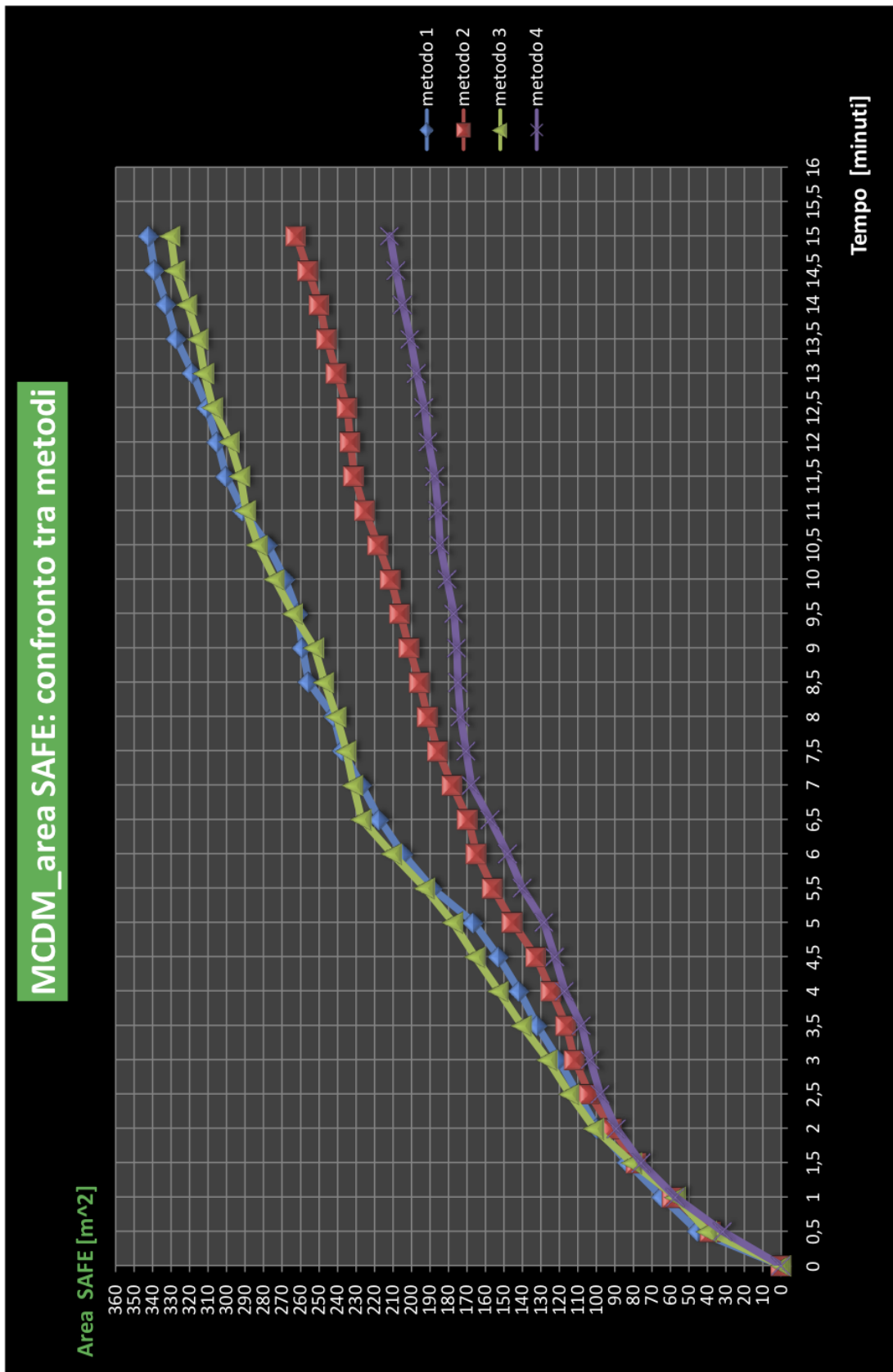


Figura 5.18 - MCDM_area SAFE

- Area CLEAR: gli andamenti

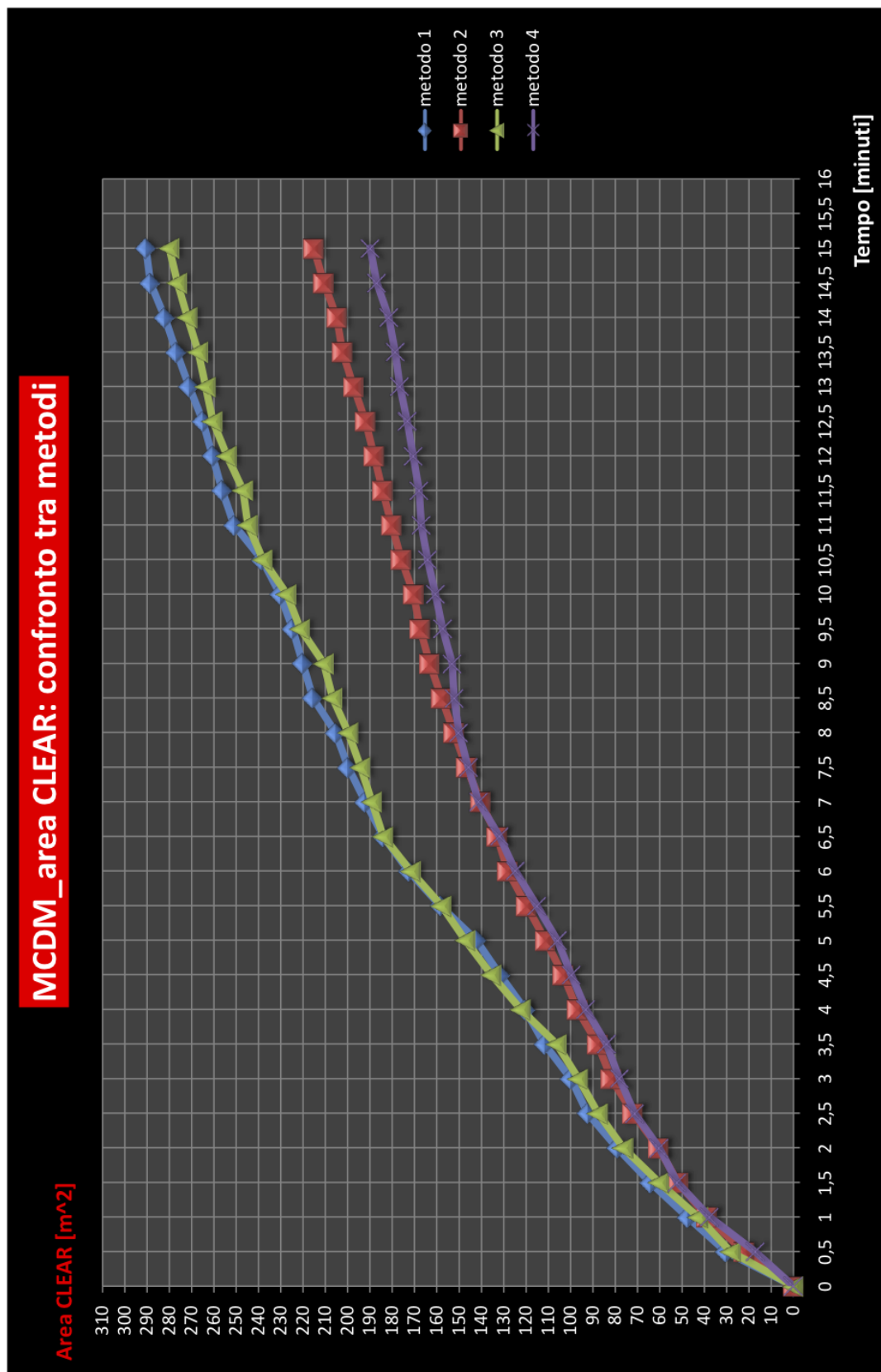


Figura 5.19 - MCDM_area CLEAR

Le Figure 5.17, 5.18 e 5.19 mettono a confronto l'andamento dei quattro metodi implementati secondo la strategia MCDM in termini delle tre tipologie di area (area FREE, area SAFE, area CLEAR). Per entrare nel dettaglio dell'analisi di tali andamenti risulta utile una tabella che mostra, in termini di valore medio, l'incremento di area mappata tra uno step temporale e il successivo. C'è da sottolineare che questi dati, seppure rappresentativi di un valore medio riassuntivo dell'intero fenomeno, sono da considerarsi utili ai fini dell'analisi e della valutazione complessiva dei vari metodi.

Metodo (Strategia MCDM)	incremento Area FREE [m²]	incremento Area SAFE [m²]	incremento Area CLEAR [m²]
metodo 1	18,79	11,4	9,68
metodo 2	15,83	8,75	7,17
metodo 3	18,88	11,01	9,34
metodo 4	13,86	7,06	6,33

Tabella 5.2 - MCDM incremento medio di aree

Guardando i grafici della Sezione 5.4.1 il primo aspetto evidente è come le curve dei metodi 1 e 3, oltre che essere significativamente distanti dalle curve del metodo 2 e soprattutto del metodo 4, siano estremamente vicine tra loro fino a sovrapporsi in alcuni istanti. Come si può vedere dai dati riportati in Tabella 5.2, il metodo 1 e il metodo 3 presentano degli incrementi medi di area mappata ad ogni step temporale quasi coincidenti; in particolare nell'area FREE il metodo 3 ha un incremento di 0,09 m² in più rispetto al metodo 1: la conseguenza è che, sebbene il metodo 3 garantisca una copertura maggiore, di fatto la maggiore area è in valore così minimo da poter considerare i due metodi praticamente coincidenti. Discorso molto simile anche per quanto riguarda le aree SAFE e CLEAR: le distanze tra gli incrementi medi sono di 0,39 m² e 0,34 m² rispettivamente, e questo fa sì che le curve presentino una crescita molto ravvicinata seppure leggermente più ampia rispetto all'area FREE; infatti, come si vede chiaramente dai grafici, al termine della simulazione il metodo 1 garantisce una copertura leggermente superiore.

Per quanto riguarda il metodo 2 e il metodo 4, quello che si nota è che fino alla metà circa della simulazione presentano un andamento molto simile e poco distanziato, sovrapponendosi addirittura in alcuni istanti; nella seconda parte della

simulazione, invece, il metodo 4 tende a perdere in prestazioni allontanandosi considerevolmente.

La conclusione che si può trarre è la seguente: i metodi che garantiscono la miglior copertura sono il primo e il terzo. Da questo si può ricavare la sorprendente conclusione che il coordinamento tra robot e l'assoluta mancanza dello stesso portano mediamente agli stessi risultati in termini di mapping dell'ambiente. Questo perché l'elemento chiave ai fini della massima copertura dell'ambiente risiede nel calcolo dell'utilità: come si vede facilmente, i metodi che utilizzano l'assegnamento robot/frontiera sulla base dell'utilità reale, garantiscono la maggiore copertura rispetto a quello che utilizza la sola utilità ideale. Il metodo 4 che, al contrario, non tiene conto di alcun criterio, è quello che ha le minori prestazioni. Tutto questo porta a concludere che la lunghezza reale del percorso robot/frontiera (o costo reale di cammino), essendo l'unico elemento che varia nel calcolo dell'utilità reale rispetto a quella ideale, diventa quindi il criterio discriminante per ottenere le migliori prestazioni.

Una possibile spiegazione la si può evincere da quanto segue: il calcolo dell'utilità reale è computazionalmente più complesso (e quindi richiede più tempo per giungere ad una decisione di assegnamento) rispetto al calcolo dell'utilità ideale (e a maggior ragione rispetto al metodo di assegnamento random che non considera alcun valore di utilità). Nell'utilità ideale viene assegnato il punto che idealmente è tra i più vicini; tuttavia può benissimo essere che il path reale sia superiore a quello stimato con la distanza euclidea (per via degli ostacoli); questo implica che il tempo necessario al robot per arrivare a destinazione (portando quindi a termine l'algoritmo), cresce notevolmente. La conseguenza è che il numero di iterazioni possibili dell'algoritmo stesso nell'arco della simulazione si riduce. Nel caso dell'utilità reale, invece, il costo reale del path è implicito nel valore dell'utilità del punto; quindi se viene scelto (perché comunque globalmente il migliore), sicuramente si trova nelle vicinanze del robot che quindi impiegherà poco tempo per raggiungerlo riducendo, in questo modo, il tempo di esecuzione dell'algoritmo. Tale riduzione comporta un aumento del numero di iterazione dell'algoritmo stesso, ossia del numero di decisioni di assegnamento. Il risultato, come si può evincere dai grafici di Figura 5.17, 5.18 e 5.19, è una copertura maggiore dell'ambiente.

In altre parole si può dire che la maggiore complessità computazionale del

calcolo dell'utilità reale è bilanciata da assegnamenti più precisi e funzionali che, riducendo i tempi di esecuzione della singola iterazione dell'algoritmo, permettono di prendere più decisioni e quindi effettuare più assegnamenti con la conseguenza di favorire un mapping più completo dell'ambiente.

Una precisazione per quanto riguarda il metodo 4. In questo caso l'assegnamento oltre che non prendere in considerazione la distanza (con le conseguenze di cui sopra), non tiene conto nemmeno dell'area potenzialmente visibile dalla frontiera: questo comporta che un robot potrebbe raggiungere un punto dal quale l'incremento di conoscenza in termini di area visibile è sottile e poco incisiva. Da questo si può evincere che la minore complessità di tale metodo non viene bilanciata da buone performance di mapping dell'ambiente.

5.4.2 - Strategia VISSER: confronto tra metodi

- Area FREE: gli andamenti

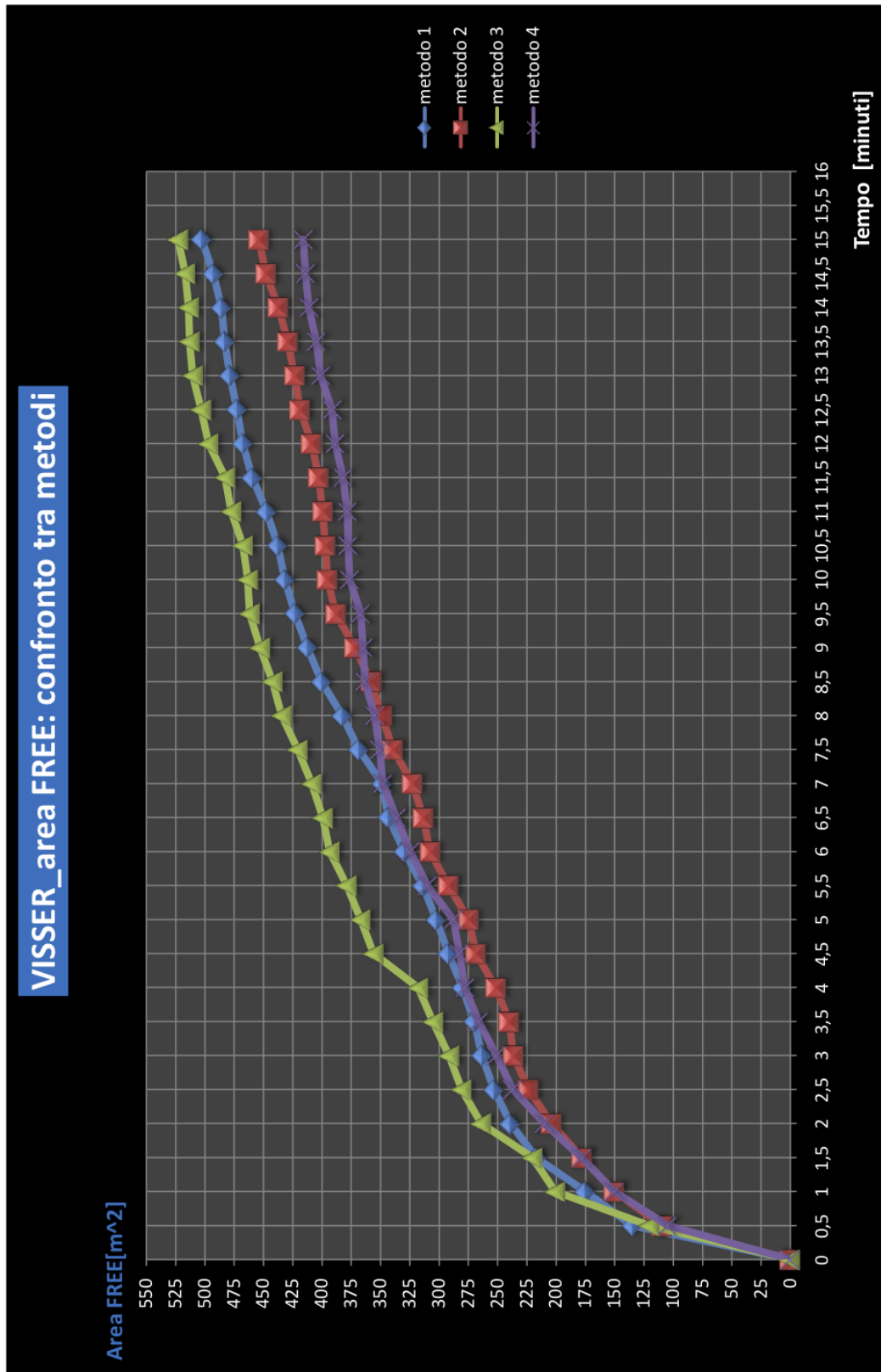


Figura 5.20 - VISSER_area FREE

- Area SAFE: gli andamenti

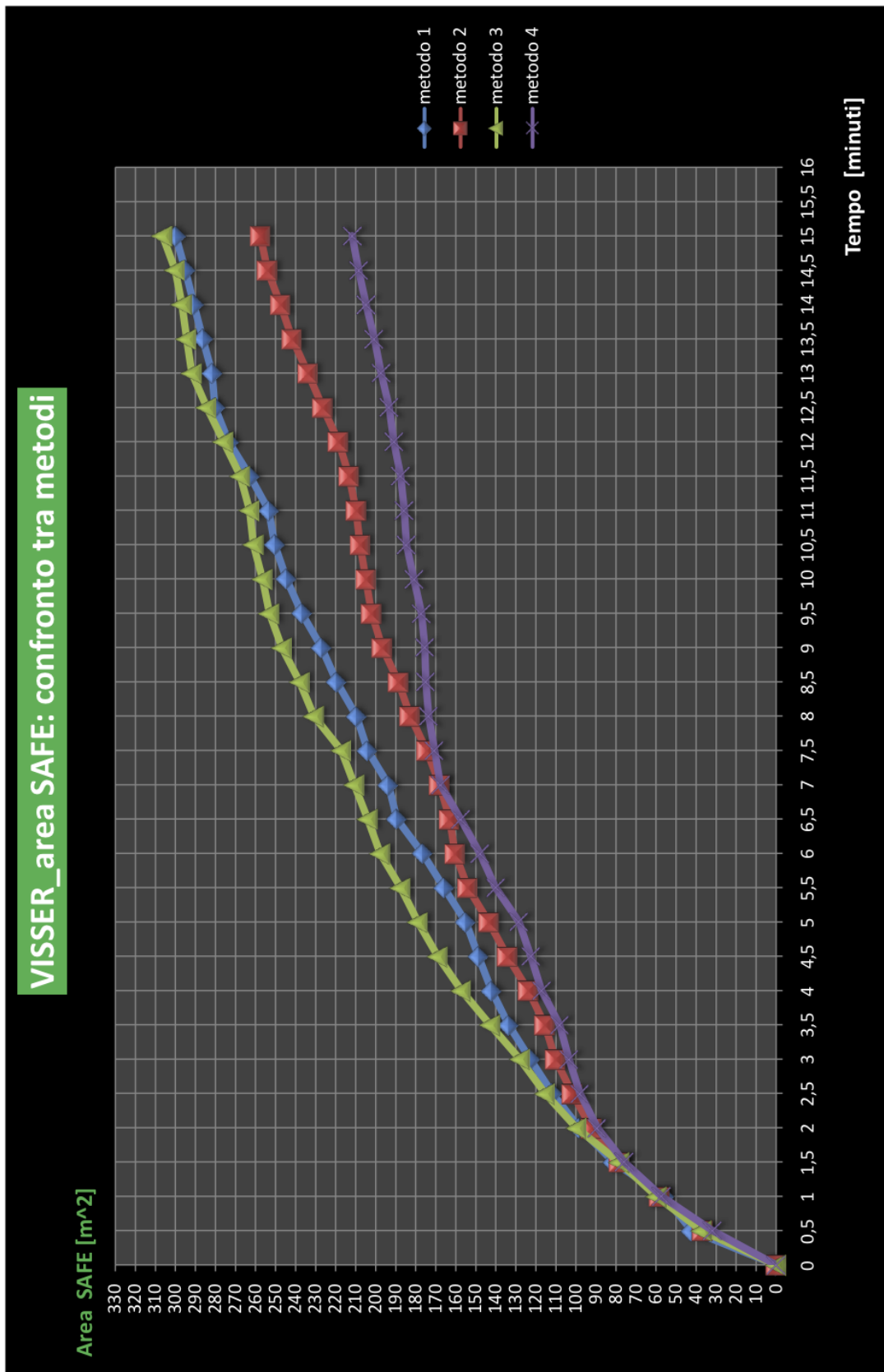


Figura 5.21 - VISSER_area SAFE

- Area CLEAR: gli andamenti

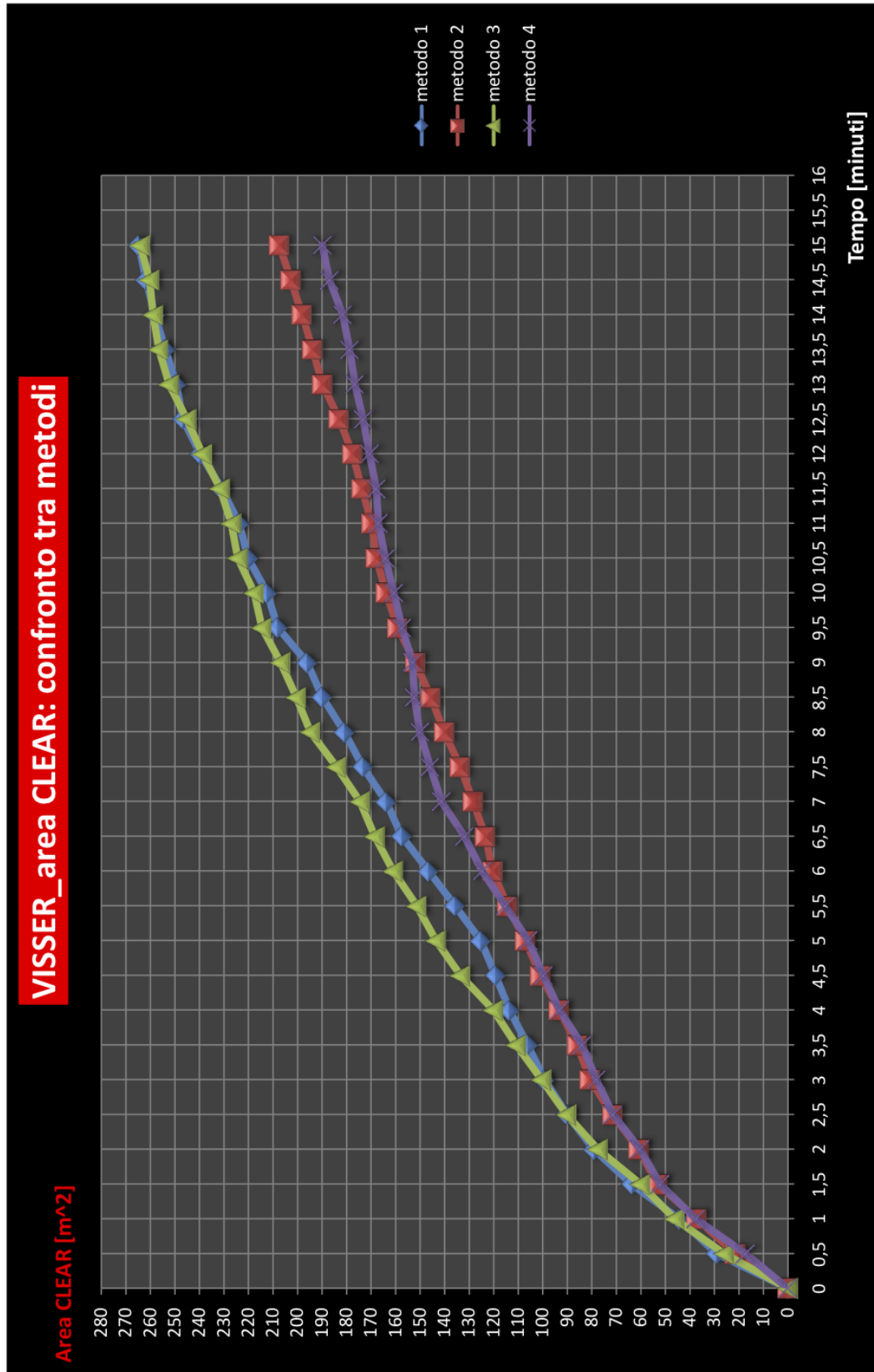


Figura 5.22 - VISSER_area CLEAR

Similmente a quanto proposto nella Sezione 5.4.1, vengono mostrati (nelle Figure 5.20, 5.21 e 5.22) i grafici che mostrano l'andamento dei quattro metodi implementati secondo la strategia VISSER in termini delle tre tipologie di area. Anche in questo caso risulta utile una tabella che mostra, in termini di valore medio, l'incremento di area mappata tra uno step temporale e il successivo.

Metodo (Strategia VISSER)	incremento Area FREE [m²]	incremento Area SAFE [m²]	incremento Area CLEAR [m²]
metodo 1	16,76	9,99	8,83
metodo 2	15,13	8,59	6,91
metodo 3	17,43	10,21	8,81
metodo 4	13,86	7,06	6,33

Tabella 5.3 - VISSER incremento medio di aree

Guardando i grafici riportati nella Sezione 5.4.2 unitamente alla tabella di cui sopra, si può facilmente notare che in termini di area SAFE e CLEAR, il metodo 1 e il metodo 3 presentano un incremento di area mappata molto ravvicinato, addirittura sostanzialmente coincidente nella fase iniziale e nell'ultimo terzo delle simulazioni. L'area FREE, invece, tende ad ampliare proporzionalmente tali distanze: all'inizio e nell'ultimo terzo sono molto ravvicinate; nella parte centrale, invece, il metodo 3 garantisce performance decisamente migliori. Da questo si può ricavare che l'unico caso in cui la mancanza di coordinamento tra robot ha un'influenza abbastanza sostanziale è relativamente all'implementazione del metodo 3 con strategia VISSER.

Per quanto riguarda, invece, i metodi 2 e 4 è interessante osservare come le due curve siano molto vicine soprattutto nella prima metà delle simulazioni: per quanto riguarda le aree CLEAR e FREE l'assegnamento random coincide e supera l'assegnamento basato sulle utilità ideali, invertendosi, poi, nella seconda fase. Per quanto riguarda l'area SAFE, invece, il metodo 2 tende a sovrastare il 4 seppure in maniera incisiva solo nella seconda fase delle simulazioni.

Le conclusioni a cui si giunge sono simili a quelle tratte nel confronto tra metodi implementati con la strategia MCDM (Sezione 5.4.1), con una piccola osservazione aggiuntiva, ossia che la mancanza di coordinazione ha un impatto più sostanziale sulla copertura dell'ambiente rispetto alla strategia MCDM, soprattutto relativamente all'area FREE.

5.4.3 - VISSER vs MCDM: confronto globale tra metodi

- Area FREE: gli andamenti

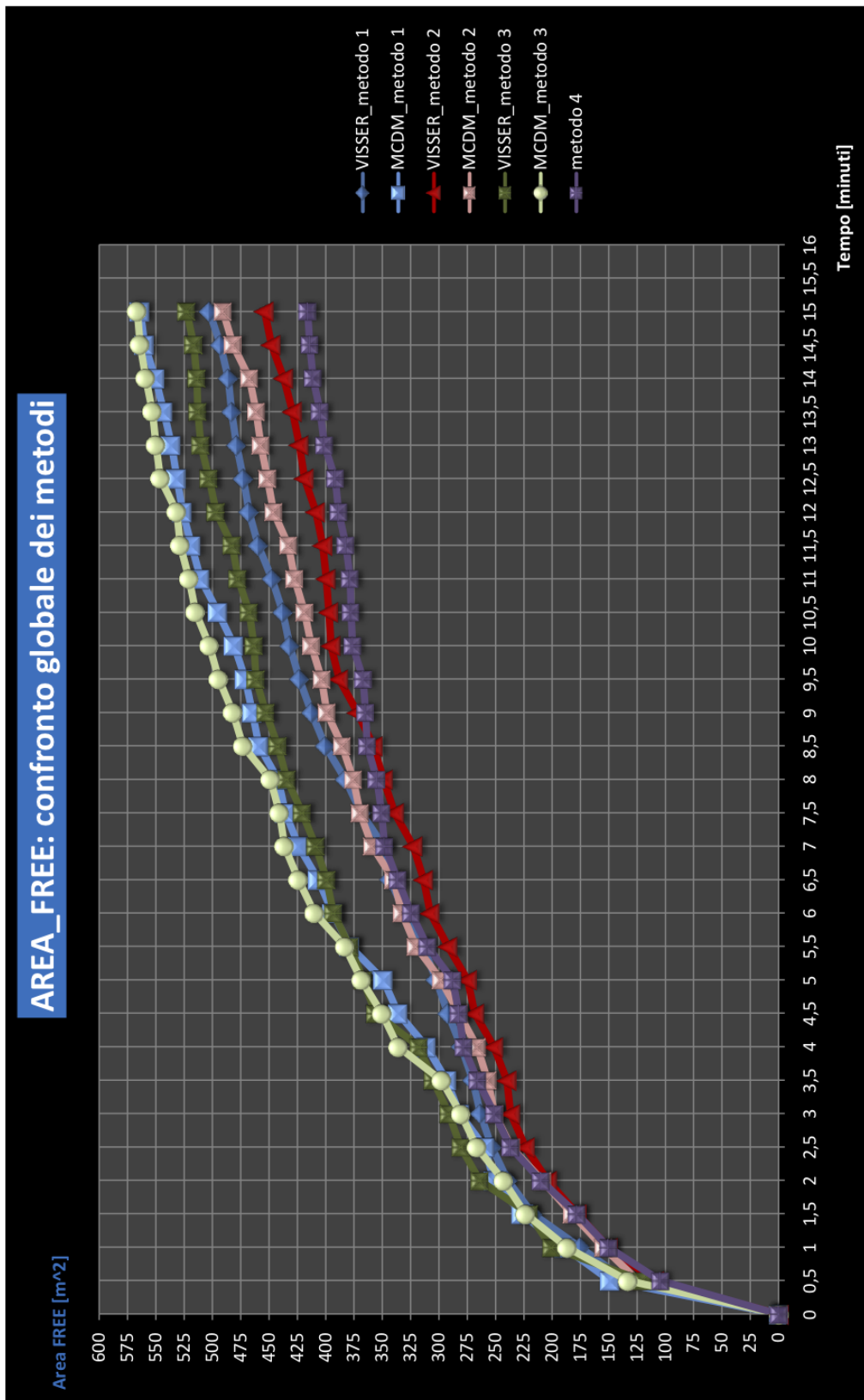


Figura 5.23 - Confronti globali_area FREE

- Area SAFE: gli andamenti

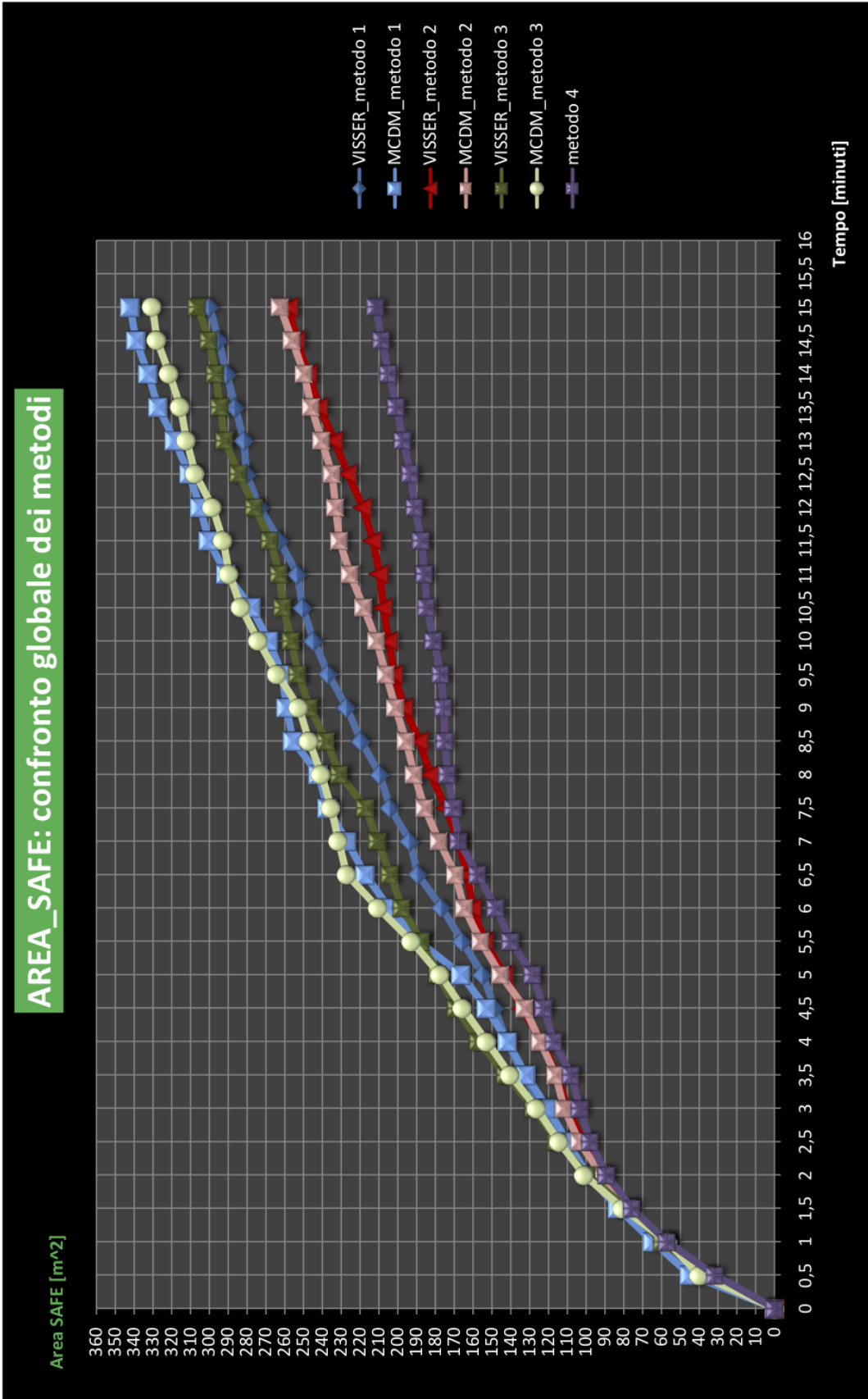


Figura 5.24 - Confronti globali_area SAFE

- Area CLEAR: gli andamenti

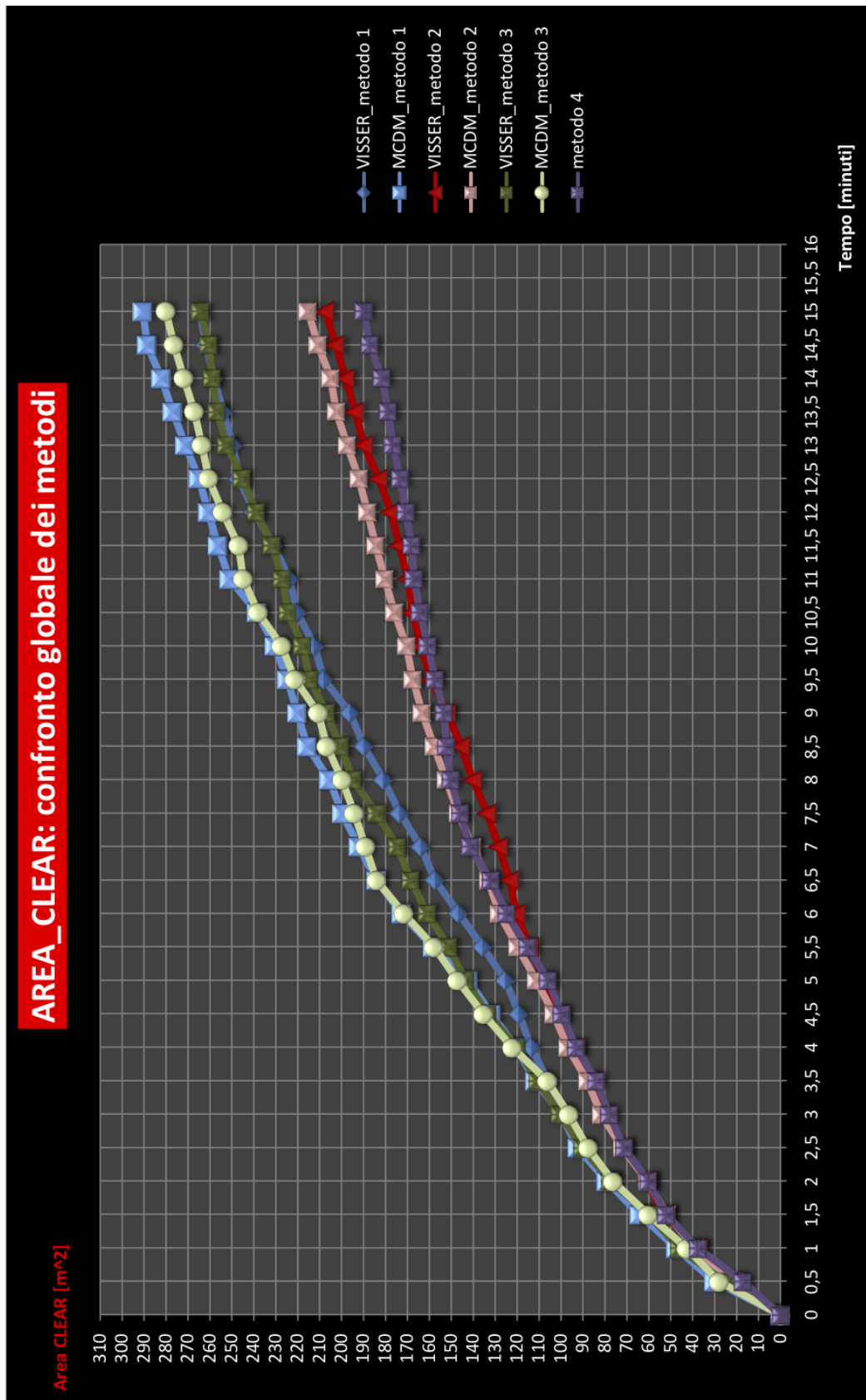


Figura 5.25 - Confronti globali_area CLEAR

L'ultima analisi riguarda il grafico riportato nella Sezione 5.4.3 che mostra, su un unico piano, gli andamenti di tutte le versioni a parità di tipologia di area.

Quello che si evidenzia è che l'andamento globale di tutte le curve rispecchia quelli delle due strategie: le versioni 1 e le versioni 3 (dove si ricorda che, per versione si intende un metodo di assegnamento associato a una specifica strategia di esplorazione) sono complessivamente migliori delle versioni 2 e le versioni 2, a loro volta, sono da ritenersi generalmente migliori (soprattutto nella seconda metà delle simulazioni) del metodo 4.

5.5 – Commenti alle simulazioni

Analizzando i grafici che confrontano gli andamenti di ogni singolo metodo nelle sue due implementazioni, la prima cosa che balza all'occhio è la modalità di crescita di tutte le curve: si può notare come in tutti i metodi, la crescita sia strutturata in due fasi; una prima, iniziale, che segue un andamento più rapido e una seconda, più lunga in termini temporali, dove la crescita tende ad essere quasi lineare. La motivazione è che all'inizio l'ambiente è completamente ignoto (e quindi l'area esplorata è zero); appena i robot vengono inseriti nell'ambiente i sensori INS installati a bordo rilevano l'area che circonda i robot attraverso i raggi r_{safe} e r_{free} (Sezione 3.4). Questo incrementa molto la conoscenza dell'ambiente nei primi istanti: muovendosi l'area esplorata aumenta sempre di più perché il robot, nel suo movimento, attraversa poche zone conosciute con la conseguenza che ad ogni intervallo temporale la conoscenza aumenta considerevolmente. Proseguendo nella navigazione, e quindi in un ambiente sempre più noto, il robot, per raggiungere le frontiere selezionate, tende a muoversi in aree ovviamente già esplorate e quindi i sensori rileveranno, ad ogni passo, meno area nuova con la conseguenza che l'incremento si riduce pur mantenendosi più o meno costante fino al termine della simulazione.

“Più o meno costante” è un'espressione che richiede una precisazione: in realtà la crescita lineare, estremamente chiara e visibile, presenta delle piccole fluttuazioni; questo fenomeno è facilmente spiegabile: fino a che un robot prosegue all'incirca dritto davanti a sé, di fatto si muove all'interno di una zona già nota e quindi l'incremento di area percepita ad ogni step può essere approssimato, almeno concettualmente, ad una frazione di corona circolare (“almeno concettualmente”

perché si possono incontrare ostacoli che, bloccando il raggio, non definiscono una reale e precisa corona circolare) corrispondente quindi a una quantità di area relativamente piccola e piuttosto costante. Quando poi i robot modificano la direzione ruotando considerevolmente rispetto al loro orientamento, la zona di esplorazione cambia: i raggi dei sensori tenderanno a coprire porzioni di area più ampia provocando un incremento di copertura leggermente più corposo. Ovviamente, se questo processo avviene in fase avanzata di simulazione il robot potrebbe trovarsi in zone comunque già parzialmente osservate e questo spiega perché l'incremento di area non dà origine a dei veri e propri picchi, ma semplicemente a delle ondulazioni che alterano l'andamento rettilineo.

Come si può inoltre notare questa differenza tra i due tipi di incremento è maggiormente sottolineata nell'andamento dell'area FREE che, essendo caratterizzata da un raggio del sensore più lungo, permette di individuare porzioni più consistenti di ambiente; nell'area SAFE e nell'area CLEAR, invece, questa crescita iniziale ha un andamento più dolce.

5.5.1 – Confronto tra strategie

Il confronto tra strategie è stato caratterizzato da un'analisi, per ogni metodo di assegnamento robot/frontiera, delle due strategie VISSER e MCDM in cui è stato implementato. L'obiettivo è stato valutare sia relativamente ad ogni metodo, sia globalmente, quale delle due strategie esplorative fosse da ritenersi migliore in termini di copertura dell'ambiente.

Entrando nel dettaglio dei risultati ottenuti confrontando, per ogni metodo, le due strategie possiamo osservare che all'inizio delle simulazioni, ossia nei primi minuti, le due strategie proseguono circa alla pari, contribuendo in eguale misura alla copertura del territorio non giustificando quindi l'utilizzo di MCDM, computazionalmente più complesso. C'è inoltre da sottolineare che la durata della sovrapposizione delle due curve coincide sostanzialmente con quella che nel paragrafo precedente è stata definita come una prima fase iniziale a crescita più rapida. La considerazione che si può trarre da questa osservazione è che le due strategie, nella fase iniziale delle esplorazioni dove l'ambiente è quasi completamente sconosciuto, non presentando significative differenze in termini di copertura, non fanno propendere per la scelta dell'una o dell'altra. Questo sta a

significare che qualsiasi scelta venga fatta inizialmente in termini di strategia adottata, si rivelerà comunque buona ai fini del mapping.

Passati i primi minuti di simulazioni, corrispondenti circa al primo terzo della durata complessiva, si vede chiaramente che le due strategie tendono a presentare differenze significative: nel complesso MCDM garantisce, al termine dei 15 minuti previsti, il maggiore mapping del territorio in termini di tutte e tre le tipologie di area. Si può notare infatti che, seppure in quantità diverse, le aree di ogni metodo presentano un andamento molto simile.

Sulla base delle considerazioni di cui sopra e dell'analisi specifica condotta nella Sezione 5.3.2 nella quale sono stati discussi dettagliatamente i risultati che si evincono degli andamenti dei vari metodi nelle due strategie, si può concludere che MCDM risulta essere una strategia più incisiva qualora la si implementi all'interno di un metodo che effettua l'assegnamento robot/frontiera sulla base dell'utilità reale che usa informazioni più raffinate per decidere, a prescindere dal fatto che operi su un team coordinato o meno di robot. Quindi, il ricalcolo dell'utilità della migliore coppia robot/frontiera sulla base della strategia MCDM risulta essere un aspetto importante per garantire un mapping più completo dell'ambiente.

5.5.2 – Confronto tra metodi

Il confronto tra i metodi è stato condotto proponendo due tipologie di analisi: nella prima sono stati posti a confronto i quattro metodi sulla base di una specifica strategia; nella seconda, invece, è stato effettuato un confronto globale tra tutte le implementazioni a prescindere dalla particolare strategia. Gli obiettivi sono così riassumibili:

- individuare il miglior metodo nell'ambito di una specifica strategia;
- capire, nel complesso, quale versione (si ricorda che per versione si intende un metodo di assegnamento associato a una specifica strategia di esplorazione) risulta essere migliore in termini di soluzione del nostro quesito fondamentale, ossia *chi garantisce la massima copertura*.

Ad un primo sguardo dei grafici riportati nelle Sezioni 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3 si nota subito come gli andamenti delle curve rappresentative della strategia MCDM e

di quelle rappresentative della strategia VISSER siano piuttosto simili in termini di ordinamento relativo: i metodi 1 e 3 sono preferibili ai metodi 2 e 4, ed, in linea generale, presentano un andamento piuttosto appaiato.

Inoltre, è rilevante notare come tutti i metodi nella fase iniziale, corrispondente all'incirca ai primi 2 minuti della simulazione, abbiano un andamento estremamente ravvicinato se non addirittura sovrapposto, per poi differenziarsi.

Da queste considerazioni si può evincere che gli effetti delle diverse modalità di assegnamento robot/frontiera sono nulli in fase iniziale quando l'ambiente è completamente ignoto o conosciuto solo in una minima frazione, e questo a prescindere dalla particolare strategia esplorativa. Tali effetti hanno invece un impatto evidente mano a mano che la conoscenza dell'ambiente incrementa.

Da un confronto globale tra le due strategie si può inoltre notare che, in linea generale, le differenze relative tra le curve nel caso MCDM sono più importanti e marcate che nel caso VISSER. Possiamo quindi concludere che la strategia MCDM, prendendo in considerazione i legami tra i criteri per il calcolo delle utilità, rende i metodi di assegnamento più incisivi.

Queste osservazioni unite alle analisi condotte nelle Sezioni 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3 portano a confermare quanto già sottolineato precedentemente nell'analisi del confronto tra metodi implementati secondo la medesima strategia, ossia che l'elemento chiave per garantire la massima copertura di un ambiente a priori sconosciuto non è da ricercarsi primariamente nella strategia, quanto, fondamentalmente, nella modalità con la quale viene eseguito l'assegnamento robot/frontiera: la scelta di un assegnamento basato sull'utilità reale della coppia con la massima utilità ideale è quella che garantisce in assoluto il massimo mapping dell'ambiente, intendendo per assoluto l'algoritmo di assegnamento ottimale a prescindere dalla particolare strategia VISSER o MCDM. Ciò che quindi diventa fondamentale per la valutazione di un punto assegnabile è il numero e la qualità delle informazioni che vengono considerate all'interno di una strategia: più sono le informazioni e più sono dettagliate, e migliore è la qualità del valore di utilità del punto e, di conseguenza, migliore sarà l'assegnamento.

Entrando più nel dettaglio nelle versioni 1 e nelle versioni 3 (di maggiore interesse in quanto da considerarsi le migliori relativamente al nostro obiettivo), si

può osservare che le implementazioni di tali metodi secondo la strategia MCDM sono a loro volta sostanzialmente migliori rispetto alle implementazioni degli stessi secondo la strategia VISSER. Da ciò si ricava che, all'interno della modalità di assegnamento basata sull'utilità reale, la strategia MCDM, pesando e combinando opportunamente i criteri, risulta essere migliore rispetto a VISSER che li combina semplicemente attraverso un rapporto di proporzionalità.

Da qui la conclusione che la migliore scelta ai fini di garantire la massima copertura di un ambiente a priori sconosciuto è quella di combinare la modalità di assegnamento basata sull'utilità reale a prescindere dal coordinamento o meno dei robot, combinata con la strategia di esplorazione MCDM.

Capitolo 6:

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il lavoro di questa tesi si è concentrato sullo sviluppo di quattro diversi metodi per l'assegnamento dei robot alla successiva posizione da raggiungere nell'ambito dell'esplorazione autonoma di un ambiente inizialmente sconosciuto. Elemento chiave ai fini del suddetto assegnamento è la strategia di esplorazione adottata per stabilire il valore di utilità dei punti candidati ad essere i prossimi raggiunti nel processo esplorativo; in particolare due sono state le strategie utilizzate: la strategia VISSER e la strategia MCDM.

L'obiettivo è stato valutare quale fosse la versione (dove per versione si intende un metodo di assegnamento associato a una specifica strategia di esplorazione) in grado di mappare, in un tempo prefissato, la maggior area possibile di un ambiente a priori sconosciuto.

Nel capitolo precedente sono stati illustrati e commentati approfonditamente i risultati derivanti dalle simulazioni dei quattro metodi di assegnamento robot/frontiera nelle due strategie VISSER e MCDM. Qui proponiamo una sintesi delle conclusioni alle quali si è giunti attraverso questa tesi.

Le conclusioni possono essere interpretate a partire dai tre interrogativi posti all'inizio del lavoro di tesi, ossia:

1. *“Considerando l'assegnamento che tiene conto della reale distanza tra ogni coppia robot/frontiera, la mancanza di coordinamento all'interno del team riduce le performance in termini di mapping?”*
2. *“Gli algoritmi che prevedono l'assegnamento basato sulle utilità ideali e l'assegnamento random sono caratterizzati da una minore complessità computazionale derivante dal fatto che, nel primo, l'assegnamento avviene semplicemente sulla base del valore di utilità ideale; nel secondo caso, invece, avviene in modo completamente casuale. Questo significa che il tempo necessario per giungere ad una decisione di assegnamento ad ogni step esplorativo è inferiore rispetto a quello richiesto ai metodi basati sull'utilità reale. D'altro canto in tali algoritmi l'utilità di ogni punto è “approssimata” (addirittura nel metodo 4 tali punti non vengono nemmeno valutati) e questo porta ad assegnamenti non ottimali, diversamente da quanto avviene per i metodi basati sull'utilità reale. La minore complessità computazionale di tali*

algoritmi ha effetti incisivi in termini di mapping tale da bilanciare gli effetti di un assegnamento robot/frontiera meno preciso?"

3. *"La strategia MCDM è da ritenersi competitiva se confrontata con la strategia VISSER?"*

Sulla base dei dati raccolti e delle osservazioni discusse nel Capitolo 5, possiamo concludere quanto segue:

- Per quanto riguarda il primo interrogativo possiamo concludere che, al contrario di quanto ci si aspettava, la mancanza di coordinamento e quindi l'assegnamento di ogni robot alla sua migliore frontiera senza considerare gli altri robot, risulta essere una scelta vincente nel caso di assegnamenti basati sull'utilità reale. Nell'implementazione con strategia MCDM le performance di questo metodo sono praticamente le stesse dell'analogo metodo caratterizzato dal coordinamento; è con la strategia VISSER che si denotano delle leggere differenze (soprattutto nell'area FREE) dove la mancanza di coordinamento tende ad essere leggermente migliore in termini di maggiore copertura dell'ambiente.
- Per quanto concerne, invece, il secondo punto, possiamo affermare che i due metodi caratterizzati dall'assegnamento sulla base dell'utilità ideale e dall'assegnamento random, mostrano globalmente le peggiori performance sia nella versione VISSER che nella versione MCDM. Inoltre, soprattutto nella strategia VISSER, si nota come questi due metodi siano molto vicini in termini di andamento. Da questo possiamo concludere che l'elemento chiave ai fini della massima copertura dell'ambiente risiede nel calcolo dell'utilità: i metodi che effettuano gli assegnamenti robot/frontiera basandosi su valori più approssimati di utilità o addirittura senza prendere in considerazione alcun criterio portano alle peggiori performance. Da qui si evince che il criterio fondamentale per garantire il massimo mapping è il costo reale di cammino, in quanto unico criterio discriminante tra l'utilità ideale e quella reale. In termini più generali si può affermare che l'elemento chiave non è da ricercarsi primariamente nell'assegnamento robot/frontiera quanto nella modalità sulla base della quale avviene calcolata l'utilità: più l'utilità è calcolata attraverso stime precise (considerando più informazioni e/o

usando valori reali anziché approssimati), più gli assegnamenti sono tali da garantire, al termine della simulazione, la maggiore copertura dell'ambiente.

- Per quanto riguarda, invece, il terzo quesito, possiamo affermare che, per ogni metodo, la strategia MCDM si è sempre dimostrata la migliore rispetto alla strategia VISSER. Da questo possiamo concludere che l'aggregazione di criteri secondo MCDM risulta essere una buona scelta per garantire una migliore copertura di un ambiente a priori sconosciuto.

Un interessante studio futuro potrebbe essere quello di effettuare gli assegnamenti partendo direttamente da una matrice di utilità reale: anziché (come nel metodo 1 e nel metodo 3) calcolare l'utilità reale solo della coppia corrispondente alla migliore utilità ideale, calcolare direttamente tutte le utilità reali e, sulla base di queste, procedere subito all'assegnamento.

Il problema legato a questo approccio è che ad ogni iterazione, il path planning, anziché essere eseguito, nella peggiore delle ipotesi, tante volte quante sono i robot, verrebbe sempre eseguito $|\text{numero dei robot}| * |\text{numero di frontiere}|$ volte. Questo approccio richiederebbe, però, un utilizzo decisamente superiore delle risorse del sistema. Da qui la necessità di utilizzare adeguati strumenti hardware e software. Potrebbe essere tuttavia utile capire se questo impiego ulteriore di risorse è compensato da un incremento in termini di prestazioni.

Un altro aspetto da sottolineare è la mancanza di una documentazione che illustri, anche in termini generali, la struttura e il funzionamento del controllore UvARescue2009, almeno nei suoi elementi base. Inoltre anche il codice è molto scarso di commenti e questo rende la lettura e la comprensione del controllore decisamente complicata. Sarebbe utile quindi realizzare un manuale per permettere agli sviluppatori un approccio più semplice e soprattutto chiaro in vista di futuri lavori di sviluppo ed ottimizzazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Thrun, "Exploration and model building in mobile robot domains", *IEEE International Conference on Neural Networks*, p. 175 – 180, 1993.
- [2] M. Pffingsthorn, "RoboCup Rescue Virtual Robots: Wireless Simulation Server Documentation", 2008.
- [3] F. Amigoni, N. Basilico, "Exploration Strategies based on Multi-Criteria Decision Making for an Autonomous Mobile Robot", *Fourth European Conference on Mobile Robots*, p. 259-264, 2009.
- [4] A. Visser, A. SLAMet, "Including communication success in the estimation of information gain for multi-robot exploration", *6th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks and Workshops*, p. 680 – 687, 2008.
- [5] H. Gonzalez-Banos, J.C. Latombe, "Navigation Strategies for Exploring Indoor Environments". *The International Journal of Robotics Research*, p. 829 – 848, 2002.
- [6] M. Pffingsthorn, B. Slamet, A. Visser, N. Vlassis, "UvA Rescue Team 2006 RoboCup Rescue - Simulation League".
- [7] A. Visser, B. SLAMet, T. Schmits, "Design decision of the UvA Rescue 2007 Team".
- [8] A. Visser, T. Schmits, S. Roebert, J. de Hoog, "Amsterdam Oxford Joint Rescue Forces Team Description Paper Virtual Robot competition Rescue Simulation League RoboCup 2008".
- [9] A. Visser, H. Nijhuis, J. de Hoog, "Amsterdam Oxford Joint Rescue Forces Team Description Paper Virtual Robot competition Rescue Simulation League RoboCup 2009".

- [10] M. W. M. G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, and H. F. DurrantWhite, "A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem", *Transaction on Robotics and Automation*, p. 229 – 241, 2001.
- [11] S. Thrun, "Learning metric-topological maps for indoor mobile robot navigation", *Artificial Intelligence*, p. 21 – 71, 1998.
- [12] W. Burgard, D. Fox, M. Moors, R. Simmons, and S. Thrun, "Collaborative Multi-Robot Exploration", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 476 – 481, 2000.
- [13] P. Newman, M. Bosse, J. Leonard, "Autonomous feature-based exploration", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1234 – 1240, 2003.
- [14] J.Wang, S. Balakirsky, "USARSim V3.1.3".
- [15] N. Basilico, "USARSim/MOAST: a game-based 3D simulation framework for mobile robots", *presentazione per il Politecnico di Milano*.
- [16] B. Yamauchi, "Frontier-Based Exploration Using Multiple Robots", *2nd International Conference on Autonomous Agents*, p. 47 – 53, 1998.
- [17] P. Newman, J. Leonard, J. D. Tardos, and J. Neira, "Explore and return: experimental validation of real-time concurrent mapping and localization", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1802 – 1809, 2002.
- [18] M. W. M. G. Dissanayake, P. Newman, H. F. Durrant Whyte, S. Clark, and M. Csorba, "An experimental and theoretical investigation into simultaneous localization and map building", *6th International Symposium on Experimental Robotics*, p. 265 – 274, 1999.

- [19] J. Guivant and E. Nebot, "Optimization of the simultaneous localization and map building algorithm for real time implementation", *IEEE Transactions on Robotic and Automation*, p. 242 – 257, 2001.
- [20] P. Newman, J. Leonard, J.D. Tardòs, and J. Neira, "Explore and return: Experimental validation of real time concurrent mapping and localization", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 1802 – 1809, 2002.
- [21] R. Rikoski, J. Leonard, and P. Newman, "Stochastic mapping frameworks", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, p. 426 - 433 , 2002.
- [22] D. Hahnel, D. Schulz, and W. Burgard, "Map building with mobile robots in populated environments", *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, p. 496 - 501, 2002.
- [23] S. Thrun, "A probabilistic online mapping algorithm for teams of mobile robots," *International Journal of Robotics Research*, p. 335-363, 2001.
- [24] A. Elfes, "Sonar-based real-world mapping and navigation", *IEEE Journal of Robotics and Automation*, p. 249-265, 1987.
- [25] S. Thrun, "Robotic mapping: A survey", *Exploring Artificial Intelligence in the New Millennium*, p. 1 – 35, 2003.
- [26] B. Yamauchi, "A Frontier-Based Approach for Autonomous Exploration", *IEEE International Symposium on Computational Intelligence, Robotics and Automation*, p. 146 – 151, 1997.
- [27] H. Gonzalez-Banos, E. Mao, J.C. Latombe, T.M. Murali, and A. Efrat, "Planning Robot Motion Strategies for Efficient Model Construction", *9th International Symposium on Robotics Research*, p. 345–352, 1999.

- [28] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard and Dieter Fox, "Probabilistic Robotics",
ed. MIT Press.
- [29] G. Gini e V. Cagliotti, "Robotica", ed. Zanichelli, 2003.
- [30] www.robocup.org
- [31] www.jointrescueforces.eu
- [32] www.sourceforge.net
- [33] www.en.wikipedia.org/wiki/Urban_search_and_rescue
- [34] www.usar.org.uk
- [35] www.intrescue.org
- [36] www.usarsim.sourceforge.net/wiki/index.php/RoboCup_Rescue_Virtual_Robot_Competition
- [37] www.robocuprescue.org/wiki/index.php?title=VRCompetitions
- [38] www.robocuprescue.org/
- [39] www.robocuprescue.org/virtualsim.html

Appendice A:

***DATI DELLE PROVE
SPERIMENTALI***

A.1 – Confronto tra strategie

A.1.1 – Metodo 4

- *Area FREE*

Metodo 4: AREA FREE

minuto	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5	media
0	0	0	0	0	0	0
0,5	105,36	109,55	74,77	114,92	118,44	104,608
1	137,89	177,56	155,87	140,15	140,08	150,31
1,5	148,15	224,56	201,38	163,87	153,54	178,3
2	188,95	232,82	222,02	199,73	206,64	210,032
2,5	227,46	264,28	254,1	220,15	218,74	236,946
3	238,96	276,07	286,18	223,49	230,84	251,108
3,5	240,02	285,84	301,78	226,85	275,32	265,962
4	240,99	308,92	322,11	234,62	283,72	278,072
4,5	242,14	318,4	323,07	238,83	289,74	282,436
5	249,24	323,81	331,35	240,74	293,4	287,708
5,5	254,91	344,01	396,96	245,61	308,85	310,068
6	256	360,25	404,86	290,15	311	324,452
6,5	267,26	375,81	415,47	298,61	324,76	336,382
7	295,02	383,68	421,81	305,16	334,2	347,974
7,5	297,43	384,14	428,15	306	337,21	350,586
8	304,94	388,43	431,83	311,11	337,96	354,854
8,5	320,94	398,75	433,36	322,74	340,73	363,304
9	321,32	403,12	434,89	322,8	341,53	364,732
9,5	324,14	406,41	435,13	323,21	345,17	366,812
10	324,44	409,4	473,01	324,76	349,36	376,194
10,5	325,24	413,18	474,36	325,42	349,47	377,534
11	325,8	414,52	476,41	325,75	349,73	378,442
11,5	338,96	417,05	476,44	328,38	349,74	382,114
12	344,32	418,55	476,73	331,06	371,98	388,528
12,5	350,84	418,67	481,2	333,12	373,18	391,402
13	351,15	418,67	481,2	379,51	375,07	401,12
13,5	351,51	419,23	481,2	395,4	377,24	404,916
14	352,93	419,8	481,49	422,56	378,68	411,092
14,5	354,35	420,16	482,59	434,06	378,8	413,992
15	354,41	423,66	484,9	437,76	378,81	415,908

Tabella A.1 - Metodo4_area FREE

- **Area SAFE**

Metodo 4: AREA SAFE

minuto	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5	media
0	0	0	0	0	0	0
0,5	36,25	36,01	21,83	31,9	33,34	31,866
1	53,5	61,57	47,27	62,84	60,69	57,174
1,5	73,28	77,55	67,64	83,35	77,35	75,834
2	91,09	86,56	86,38	90,69	91,75	89,294
2,5	94,46	99,37	101,83	95,32	98,75	97,946
3	97,13	100,81	117,28	96,12	105,74	103,416
3,5	97,58	101,2	121,06	97,28	123,24	108,072
4	105,25	109,16	135,24	98,1	138,12	117,174
4,5	111,69	116,56	135,3	98,84	150,35	122,548
5	117,35	132,53	142,44	98,88	151,02	128,444
5,5	126,36	152,86	161,91	98,88	160,48	140,098
6	128,88	161,64	165,58	121,81	162,04	147,99
6,5	142,45	169,84	173,97	136,43	165,02	157,542
7	160,54	183,7	178,31	149,06	166,44	167,61
7,5	165,84	184,19	182,65	149,62	170,55	170,57
8	166,48	184,97	194,55	150,13	171,4	173,506
8,5	170,34	185,53	194,81	150,8	173,28	174,952
9	170,34	186,07	195,06	150,89	174,95	175,462
9,5	173,12	187,83	198,14	150,99	175,33	177,082
10	176,86	193,46	203,21	154,04	176,7	180,854
10,5	177,85	210,14	203,27	154,74	176,84	184,568
11	178,2	210,88	207,31	154,99	176,84	185,644
11,5	185,12	212,72	207,54	155,1	176,84	187,464
12	199,14	212,8	207,72	155,68	179,3	190,928
12,5	203,54	213,17	208,59	160,8	179,86	193,192
13	205,07	213,21	208,59	178,6	180,59	197,212
13,5	205,07	213,3	208,59	195,29	180,97	200,644
14	207,21	213,3	208,65	213,42	181,41	204,798
14,5	209,35	213,36	209,43	228,85	181,41	208,48
15	209,44	220,62	214,9	232,01	181,44	211,682

Tabella A.2 - Metodo4_area SAFE

- *Area CLEAR*

Metodo 4: AREA CLEAR

minuto	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5	media
0	0	0	0	0	0	0
0,5	18,83	23,18	9,36	17,31	17,4	17,216
1	36,31	42,16	25,64	42,5	41,43	37,608
1,5	53,08	51,4	42,91	58,35	54,96	52,14
2	59,61	60,93	57,47	60,58	62,77	60,272
2,5	70,61	75,83	69,76	67,32	73,04	71,312
3	71,97	83,75	82,05	69,32	83,31	78,08
3,5	76,4	86,95	89,31	70,8	96,3	83,952
4	85,4	96,4	100,44	73,83	109,41	93,096
4,5	93,1	107,06	100,96	77,71	119,78	99,722
5	102,45	119,93	106,8	77,91	122,52	105,922
5,5	113,28	132,91	120,05	78,22	131,69	115,23
6	115,32	142,75	137	92,57	135,98	124,724
6,5	126,56	151,15	141,1	100,88	139,94	131,926
7	137,88	160,62	147,05	114,92	146,16	141,326
7,5	138,03	166,3	152,99	118,78	153,29	145,878
8	139,57	167,66	164,94	121,6	157,01	150,156
8,5	143,78	167,9	166,43	126,08	157,27	152,292
9	143,78	170,11	167,92	126,53	157,32	153,132
9,5	150,46	180,02	169,12	127,57	159,92	157,418
10	151,99	183,73	175,6	129,68	162,44	160,688
10,5	155,68	193,68	175,86	133,41	162,52	164,23
11	155,98	203,03	179,65	133,52	162,52	166,94
11,5	158,93	203,08	179,72	135,36	162,52	167,922
12	169,83	204,59	180,38	135,74	162,55	170,618
12,5	174,49	204,88	181,28	143,12	162,56	173,266
13	176,52	205,07	181,28	154,58	165,42	176,574
13,5	176,88	205,2	181,8	164,19	165,42	178,698
14	180,55	205,94	182,56	173,3	165,42	181,554
14,5	184,22	210,84	188,1	186,46	165,43	187,01
15	184,66	213,06	191,91	192,17	167,51	189,862

Tabella A.3 - Metodo4_area CLEAR

A.1.2 - Metodo 3: confronto VISSER vs MCDM

- **Area FREE**

Metodo 3: AREA FREE

minuto	VISSER					media_VISSER	media_MCDM	MCDM						
	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	131,78	153,24	8,1	158,71	150,49	120,464	133,346	124,64	154,93	70,72	157,26	159,18	157,26	159,18
1	195,84	219,4	154,57	223,92	210,28	200,802	187,004	157,17	180,92	152,52	221,04	223,37	221,04	223,37
1,5	211,13	229,3	176,19	248,37	236,73	220,344	223,792	219,47	230,29	185,11	242,17	241,92	242,17	241,92
2	272,8	235	221,88	295,78	294,87	264,066	243,152	224,61	235,65	220,17	266,95	268,38	266,95	268,38
2,5	282,85	236,49	256,65	303,45	323,87	280,661	266,74	257,23	262,51	253,45	283,93	276,58	283,93	276,58
3	292,89	236,52	256,65	317,82	353,58	291,492	280,798	289,85	275,96	254,69	300,91	282,58	300,91	282,58
3,5	298,56	237,46	296,84	331,2	361,84	305,18	297,86	306,32	298,27	264,76	320,99	298,96	320,99	298,96
4	301,75	253,47	315,31	342,78	375,16	317,694	336,082	325,67	334,23	320,98	355,08	344,45	355,08	344,45
4,5	304,77	334,12	364,2	381,03	396,02	356,028	350,38	342,5	353,23	331,67	369,34	355,16	369,34	355,16
5	321,66	346,84	377,82	383,4	404,99	366,942	368,556	345,36	358,55	357,15	418,57	363,15	418,57	363,15
5,5	325,34	385,92	389,12	384,2	409,73	378,862	383,216	362,37	376	367,44	432,27	378	432,27	378
6	328,42	406,85	425,22	386,52	419,51	393,304	409,95	376,21	426,63	406,91	438,35	401,65	438,35	401,65
6,5	329,32	413,29	432,69	391,52	429,94	399,352	424,212	377,21	433,24	443,52	453,77	413,32	453,77	413,32
7	331,73	418,3	465,5	398,2	430,36	408,818	436,438	387,71	438,77	473,38	460,88	421,45	460,88	421,45
7,5	332,14	422,26	506,29	405,17	437,81	420,734	440,817	390,02	442,09	481,18	464,73	426,07	464,73	426,07
8	335,22	433,44	537,5	427,46	438,44	434,412	448,944	393,43	452,03	490,72	477,86	430,68	477,86	430,68
8,5	337,49	439,64	545,4	448,06	440,69	442,256	473,116	487,04	468,01	495,59	482,44	432,5	482,44	432,5
9	340,4	451,16	549,16	459,62	463,9	452,848	482,08	491,88	470,04	503,93	509,19	435,36	509,19	435,36
9,5	340,81	456,98	576,48	460,86	473,48	461,722	494,54	492,04	471,36	527,74	524,3	457,26	524,3	457,26
10	340,87	457,98	581,22	461,3	475,49	463,372	502,742	492,61	474,78	549,52	525,24	471,56	525,24	471,56
10,5	342,21	466,31	583,51	462,99	482,69	467,542	514,99	503,76	490,52	565,52	532,86	482,29	532,86	482,29
11	348	467,17	591,15	469,57	511,28	477,434	520,68	510,44	491,5	571,61	537,34	492,51	537,34	492,51
11,5	360,19	468,21	592,4	475,01	517,64	482,69	528,476	516,92	493,8	582,39	547,27	502	547,27	502
12	362,35	478,21	597,86	477,05	568,83	496,86	531,688	522,67	496,46	583,71	547,88	507,72	547,88	507,72
12,5	362,76	486,96	607,29	478,86	579,63	503,1	546,05	569,43	513,64	590,18	548	509	548	509
13	364,56	486,96	622,04	497,11	580,73	510,28	550	581,18	517,56	592,72	548,31	510,23	548,31	510,23
13,5	366,52	486,98	624,59	502,07	584,97	513,026	553,182	588,87	517,92	597,2	548,68	513,24	548,68	513,24
14	367,3	487,88	624,9	504,09	585,2	513,874	559,036	593,04	518,12	601,11	565,49	517,42	565,49	517,42
14,5	370,63	487,88	625,03	514,09	585,49	516,624	564,088	601,54	518,28	614,47	566,15	520	566,15	520
15	399,74	487,88	625,16	515,56	586,05	522,878	566,494	607,55	518,79	616,15	567,84	522,14	567,84	522,14

Tabella A.4 - Metodo3_area FREE

- **Area SAFE**

Metodo 3: AREA SAFE

minuto	VISSER					media_VISSER	media_MCDM	MCDM							
	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	48,06	55,02	8,03	40,32	34,68	37,222	40,07	44,88	52	22,47	39,6	41,4			
1	80,1	71,02	47,7	55,99	44,2	59,802	57,044	61,75	68,21	46,78	53,27	55,21			
1,5	95,29	79,04	62,24	83,13	72,31	78,402	80,82	98,99	77,41	70,55	78,51	78,64			
2	120,41	88,52	81,49	104,87	103,6	99,778	101,186	118,69	88,63	85,54	104,73	108,34			
2,5	135,82	93,6	109,55	112,04	126,2	115,442	114,563	134,23	89,32	104,84	125,63	118,8			
3	151,23	98,72	109,65	125,63	154,69	127,984	126,396	149,77	104,31	109,03	146,52	122,35			
3,5	151,78	108,88	142,33	142,04	168,98	142,802	140,396	163,16	115,76	139,14	158,06	125,86			
4	153,76	132,19	161,8	157,78	180,65	157,236	152,876	165,13	149,35	146,81	161,24	141,85			
4,5	154,28	147,22	184,14	173,7	185,89	169,046	165,666	179,12	157,57	161,63	179,27	150,74			
5	169,91	149,18	199,82	180,64	194,99	178,908	177,62	182,79	166,46	184,29	199,2	155,36			
5,5	175,29	165,31	221,33	180,64	195,12	187,538	192,756	199,53	175,08	205,48	214,01	169,68			
6	179,96	179,78	249,99	182,29	196,79	197,762	210,54	215,27	207,84	220,61	216,84	192,14			
6,5	184,92	181,12	259,96	183,54	210,54	204,016	227,072	216,54	223,97	258,32	230,81	205,72			
7	189,92	181,27	277,57	191,68	213,07	210,702	231,524	221,92	228,03	264,3	234,35	209,02			
7,5	193,79	182,73	288,82	197,79	222,52	217,13	235,361	222,43	231,18	274,8	235,81	212,59			
8	194,02	195,64	324,96	217,18	222,55	230,87	240,662	225,45	241,95	280,2	239,56	216,15			
8,5	196,27	196,54	333,69	234,81	228,51	237,964	247,104	241,42	253,39	281,3	240,51	218,9			
9	199,38	197,4	337,56	249,88	249,87	246,818	252,554	244,67	253,43	289,91	255,72	219,04			
9,5	200,19	203,48	348,88	249,99	262,78	253,064	264,076	245,72	253,89	311,02	274,13	235,62			
10	200,29	207,77	355,68	250,18	268,4	256,464	274,006	245,84	257,1	332,73	275,31	259,05			
10,5	200,73	222,25	359,84	251,87	270,12	260,962	283,188	248,84	273,23	350	281,59	262,28			
11	201,22	222,54	365,53	252,39	272,92	262,92	289,482	259,36	274,66	354,97	288,58	269,84			
11,5	202,78	228,95	365,89	255,05	285,28	267,59	292,698	259,49	276,19	361,22	296,44	270,15			
12	204,99	236,76	375,72	255,77	306,59	275,966	298,368	264,43	281,91	362,37	301,33	281,8			
12,5	210,86	243,51	392,62	257,48	317,14	284,322	307,472	281,6	301,16	368,87	302,04	283,69			
13	218,14	243,51	393,87	272,53	330,86	291,782	312,126	292,87	303,51	372,85	307,67	283,73			
13,5	218,36	247,29	397,91	276,42	331,53	294,302	315,326	293,8	304,68	377,86	315,48	284,81			
14	219,08	254,44	397,93	280,02	332,1	296,714	321,22	303,65	304,68	385,19	327,04	285,54			
14,5	222,75	254,44	397,97	285,23	340,04	300,085	327,758	314,09	304,68	403,91	329,92	286,19			
15	234,73	263,1	398	288,8	347,18	306,362	330,268	317,68	304,76	407,08	334,85	286,97			

Tabella A.5 - Metodo3_area SAFE

• Area CLEAR

Metodo 3: AREA CLEAR

minuto	VISSER					media_VISSER	media_MCDM	MCDM														
	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,5	38,91	42,77	2,73	24,45	20,71	25,914	28,114	35,33	42,69	10,1	23,28	29,17	53,68	54,36	25,17	38,19	42,72	78,15	63,58	41,26	58,05	60,4
1	70,24	56,26	27,02	44,73	32,9	46,23	42,824	78,15	81,42	67,63	94,89	88,8	93,04	77,68	50,61	79,54	81,15	106,01	81,42	67,63	94,89	88,8
1,5	78,77	65,49	37,09	63,38	55,8	60,106	60,288	106,01	81,42	67,63	94,89	88,8	93,04	77,68	50,61	79,54	81,15	106,01	81,42	67,63	94,89	88,8
2	99,91	78,55	46,83	81,79	80,84	77,584	76,404	118,97	93,63	69,48	110,24	90,27	106,01	81,42	67,63	94,89	88,8	118,97	93,63	69,48	110,24	90,27
2,5	114,89	84,1	66,73	90,3	95,81	90,366	87,75	131,49	104,14	79,89	118,55	97,32	106,01	81,42	67,63	94,89	88,8	131,49	104,14	79,89	118,55	97,32
3	129,86	89,52	66,73	101,42	114,69	100,444	96,518	140,68	129,07	105,28	124,06	112,57	129,86	89,52	66,73	94,89	88,8	140,68	129,07	105,28	124,06	112,57
3,5	132,23	98,44	85,08	111,22	127,23	110,84	106,278	155,85	137,23	116,26	144,33	123,8	132,23	98,44	85,08	111,22	127,23	155,85	137,23	116,26	144,33	123,8
4	133,82	115,03	97,32	122,73	131,98	120,176	122,332	161,99	149,1	135,07	161,19	128,89	133,82	115,03	97,32	122,73	131,98	161,99	149,1	135,07	161,19	128,89
4,5	137,75	132,36	122,81	138,18	136,74	133,568	135,494	171,39	158,01	147,43	172,67	140,18	137,75	132,36	122,81	138,18	136,74	171,39	158,01	147,43	172,67	140,18
5	151,48	133,84	142,02	142,58	147,83	143,55	147,248	182,13	185,35	159,7	180,58	150,79	151,48	133,84	142,02	142,58	147,83	182,13	185,35	159,7	180,58	150,79
5,5	158,7	144,82	157,63	143	152,61	151,352	157,936	186,84	193,83	192,66	191,37	159,29	158,7	144,82	157,63	143	152,61	186,84	193,83	192,66	191,37	159,29
6	162,53	158,65	176,07	148,06	159,62	160,986	171,71	186,97	208,21	208,84	200,12	163,68	162,53	158,65	176,07	148,06	159,62	186,97	208,21	208,84	200,12	163,68
6,5	169,16	164,43	189,64	151,6	167,71	168,508	184,078	186,97	208,21	208,84	200,12	163,68	169,16	164,43	189,64	151,6	167,71	186,97	208,21	208,84	200,12	163,68
7	173,24	164,68	201,92	163,44	169,65	174,586	189,132	186,97	208,21	208,84	200,12	163,68	173,24	164,68	201,92	163,44	169,65	186,97	208,21	208,84	200,12	163,68
7,5	178,46	168,94	220,14	168,47	184,68	184,138	194,246	186,97	208,21	208,84	200,12	163,68	178,46	168,94	220,14	168,47	184,68	186,97	208,21	208,84	200,12	163,68
8	181,44	180,23	243,02	182,47	186,52	194,736	199,806	186,97	208,21	208,84	200,12	163,68	181,44	180,23	243,02	182,47	186,52	186,97	208,21	208,84	200,12	163,68
8,5	182,72	187,25	250,94	192,75	189,12	200,556	206,752	204,95	222,95	222,09	213,09	170,68	182,72	187,25	250,94	192,75	189,12	204,95	222,95	222,09	213,09	170,68
9	186,49	188,33	255,63	204,56	199,9	206,982	210,72	205,69	223,5	228,15	224,45	171,81	186,49	188,33	255,63	204,56	199,9	205,69	223,5	228,15	224,45	171,81
9,5	188,88	193,44	266,6	204,92	218,93	214,554	221,294	205,69	223,5	228,15	224,45	171,81	188,88	193,44	266,6	204,92	218,93	205,69	223,5	228,15	224,45	171,81
10	188,96	196,16	273,76	204,96	224,87	217,742	227,352	212,8	229,12	244,15	238,18	182,22	188,96	196,16	273,76	204,96	224,87	212,8	229,12	244,15	238,18	182,22
10,5	190,48	215,17	282,15	206,48	227,72	224,4	238,014	212,8	229,12	244,15	238,18	182,22	190,48	215,17	282,15	206,48	227,72	212,8	229,12	244,15	238,18	182,22
11	191,58	217,32	286,13	209	231,11	227,028	244,822	213,43	231,99	256,96	241,24	193,14	191,58	217,32	286,13	209	231,11	213,43	231,99	256,96	241,24	193,14
11,5	193,41	218,95	291,62	211,33	243,05	231,672	246,926	213,43	231,99	256,96	241,24	193,14	193,41	218,95	291,62	211,33	243,05	213,43	231,99	256,96	241,24	193,14
12	198,75	225,14	300,46	212,54	257,38	238,854	254,164	224,6	255,76	280,03	254,01	209,71	198,75	225,14	300,46	212,54	257,38	224,6	255,76	280,03	254,01	209,71
12,5	206,86	227,22	313,66	213,73	264,96	245,286	260,564	224,6	255,76	280,03	254,01	209,71	206,86	227,22	313,66	213,73	264,96	224,6	255,76	280,03	254,01	209,71
13	215,6	227,22	316,7	223,81	278,75	252,416	263,698	226,4	256,99	282,43	258,3	210,51	215,6	227,22	316,7	223,81	278,75	226,4	256,99	282,43	258,3	210,51
13,5	217,68	230,29	319,94	225,81	289,56	256,656	267,108	243,37	260,35	283,69	262,88	220,53	217,68	230,29	319,94	225,81	289,56	243,37	260,35	283,69	262,88	220,53
14	218,46	234,79	320,83	230,02	290,52	258,924	271,922	243,37	260,35	283,69	262,88	220,53	218,46	234,79	320,83	230,02	290,52	243,37	260,35	283,69	262,88	220,53
14,5	219,95	234,79	321,81	230,19	295,4	260,428	276,42	247,46	274,24	285,72	269,31	226,09	219,95	234,79	321,81	230,19	295,4	247,46	274,24	285,72	269,31	226,09
15	228,85	237,68	322,79	232,36	299,46	264,228	280,074	247,46	274,24	285,72	269,31	226,09	228,85	237,68	322,79	232,36	299,46	247,46	274,24	285,72	269,31	226,09

Tabella A.6 - Metodo3_area CLEAR

A.1.3 – Metodo 2: confronto VISSER vs MCDM

• Area FREE

Metodo 2: AREA FREE

minuto	VISSER					media_VISSER	media_MCDM	MCDM																
	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
0,5	106,19	115,31	93,99	117,96	114,51	109,592	124,218	158,66	128,67	158,66	128,67	116,56	113,92	137,04	185,41	180,35	138,55	132,83	149,96	226,83	216,2	161,08	158,81	
1	131,21	183,82	163,71	135,58	138,17	150,498	154,836	207,51	233,94	238,15	291,09	266,04	182,76	202,42	260,12	297,8	292,29	184,8	219,77	262,23	306,17	299,26	185,89	231,24
1,5	144,45	225,65	208,7	156	155,47	178,054	182,576	238,15	233,94	260,12	297,8	292,29	184,8	219,77	262,23	306,17	299,26	185,89	231,24	263,43	333,45	306,23	185,98	242,82
2	195,12	233,44	230,83	181,17	180,25	204,162	208,71	299,19	376,86	310,44	390,83	386,78	208,59	305,76	264,03	360,76	307,88	186,7	292,52	299,19	376,86	320,72	191,04	303,14
2,5	239,3	256,36	254,16	183,53	184,69	223,608	236,092	324,33	393,31	324,33	393,31	394,36	224,16	327,79	260,12	297,8	292,29	184,8	219,77	324,33	393,31	394,36	224,16	327,79
3	254,42	279,28	275,04	184,96	189,13	236,566	250,956	329,74	395,32	329,74	395,32	395,19	234,56	345,64	262,23	306,17	299,26	185,89	231,24	335,6	396,7	416,28	275,49	371,27
3,5	256,88	280,45	285,39	187,32	189,74	239,956	256,958	338,4	399,9	338,4	399,9	430,31	296,12	383,74	263,43	333,45	306,23	185,98	242,82	344,41	403,17	437,03	306,87	386,72
4	257,59	323,48	297,78	188,4	190,39	251,528	266,382	347,76	412,15	347,76	412,15	447,29	332,05	388,23	264,03	360,76	307,88	186,7	292,52	351,1	421,12	457,54	357,22	408,09
4,5	258,81	338,69	364,04	188,65	191,41	268,32	282,378	353,39	431,99	353,39	431,99	462,76	358,46	411,26	299,19	376,86	320,72	191,04	303,14	360,08	450,12	478,23	359,2	415,48
5	270,23	348,41	372	189,11	193,8	274,71	298,19	362,05	456,76	362,05	456,76	481,01	420,36	440,35	310,44	390,83	386,78	208,59	305,76	363,37	462,78	484	405,43	421,37
5,5	306,8	362,67	377,48	207,04	206,29	292,056	320,48	366,74	470,53	366,74	470,53	488,36	416,05	422,48	324,33	393,31	394,36	224,16	327,79	392,32	475,24	491,24	438,54	432,5
6	322,29	363,88	417,38	215,42	219,35	307,664	332,79	399,014	511,63	399,014	511,63	509,52	440,55	433,8	329,74	395,32	395,19	234,56	345,64	413,7	477,12	492,62	440,55	433,8
6,5	323,31	364,07	423,2	223,8	232,6	313,396	340,09	403,572	412,622	403,572	412,622	415,48	411,26	411,26	335,6	396,7	416,28	275,49	371,27	360,08	450,12	478,23	359,2	415,48
7	323,91	365,45	437,22	240,15	246,84	322,714	359,068	418,72	427,39	418,72	427,39	481,01	420,36	440,35	335,6	396,7	416,28	275,49	371,27	362,05	456,76	481,01	420,36	440,35
7,5	326,15	369,67	448,85	255,29	295,65	339,122	369,694	427,39	432,832	427,39	432,832	484	405,43	421,37	338,4	399,9	430,31	296,12	383,74	363,37	462,78	484	405,43	421,37
8	326,94	370,48	458,75	284,21	304,12	348,9	375,64	432,832	445,968	432,832	445,968	488,36	416,05	422,48	344,41	403,17	437,03	306,87	386,72	366,74	470,53	488,36	416,05	422,48
8,5	329	387,32	475,3	288,1	310,19	357,982	385,496	445,968	451,558	445,968	451,558	491,24	438,54	432,5	347,76	412,15	447,29	332,05	388,23	392,32	475,24	491,24	438,54	432,5
9	332,44	388,63	485,77	306,31	346,32	371,894	399,014	451,558	457,326	451,558	457,326	494,28	448,53	440,35	353,39	431,99	462,76	358,46	411,26	413,7	477,12	492,62	440,55	433,8
9,5	334,77	399	490	344,32	372,72	388,162	403,572	457,326	461,456	457,326	461,456	496,86	454,48	441,11	360,08	450,12	478,23	359,2	415,48	421,5	481,97	494,28	448,53	440,35
10	335,37	403,56	495,28	368,62	373,23	395,212	412,622	461,456	467,406	461,456	467,406	496,86	454,48	441,11	360,08	450,12	478,23	359,2	415,48	429,3	485,53	496,86	454,48	441,11
10,5	335,56	405,55	502,08	368,84	373,67	397,14	418,72	467,406	473,078	467,406	473,078	496,86	454,48	441,11	362,05	456,76	481,01	420,36	440,35	450,09	491,63	496,89	455,68	442,74
11	337,07	408,74	503,95	369,49	377,81	399,412	427,39	473,078	479,958	473,078	479,958	496,89	455,68	442,74	363,37	462,78	484	405,43	421,37	497,39	500,36	501,88	464,69	444,99
11,5	337,16	416,52	504,13	374,6	380,19	402,52	432,832	479,958	484,86	479,958	484,86	496,89	455,68	442,74	366,74	470,53	488,36	416,05	422,48	497,39	500,36	501,88	464,69	444,99
12	338,16	429,2	505,19	385,84	385,11	408,7	445,968	484,86	490,706	484,86	490,706	496,89	455,68	442,74	392,32	475,24	491,24	438,54	432,5	519,38	507,8	507,2	473,7	445,45
12,5	344,38	437,84	505,52	388,58	416,88	418,64	451,558	490,706	497,39	490,706	497,39	496,89	455,68	442,74	413,7	477,12	492,62	440,55	433,8	519,38	507,8	507,2	473,7	445,45
13	345,83	451,3	509,52	390,58	419,4	423,326	457,326	497,39	507,8	497,39	507,8	496,89	455,68	442,74	421,5	481,97	494,28	448,53	440,35	519,38	507,8	507,2	473,7	445,45
13,5	346,2	463,84	511,63	391,7	432,92	429,258	461,456	497,39	507,8	497,39	507,8	496,89	455,68	442,74	429,3	485,53	496,86	454,48	441,11	519,38	507,8	507,2	473,7	445,45
14	346,28	465,22	512,01	419,09	442,79	437,078	467,406	497,39	507,8	497,39	507,8	496,89	455,68	442,74	450,09	491,63	496,89	455,68	442,74	519,38	507,8	507,2	473,7	445,45
14,5	351,24	480,32	525,94	437,49	444,8	447,958	481,862	497,39	507,8	497,39	507,8	496,89	455,68	442,74	497,39	500,36	501,88	464,69	444,99	519,38	507,8	507,2	473,7	445,45
15	354,85	484,19	531,93	448,86	449,71	453,908	490,706	497,39	507,8	497,39	507,8	496,89	455,68	442,74	519,38	507,8	507,2	473,7	445,45	519,38	507,8	507,2	473,7	445,45

Tabella A.7 - Metodo2_area FREE

• **Area SAFE**

Metodo 2: AREA SAFE

minuto	VISSER					media_VISSER	media_MCDM	MCDM							
	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	38,43	41,85	31,61	37,83	34,32	36,808	38,318	38,13	49,32	37,58	34,7	31,86			
1	49,63	69,23	53,16	59,94	59,89	58,37	58,688	51,36	69,85	55,67	61,55	55,01			
1,5	68,44	82,94	71,52	87,19	81,07	78,232	78,322	69,52	82,5	76,52	87,2	75,87			
2	90,84	95,02	90,89	93,61	91,36	92,344	92,028	88,04	94,33	96,48	90,23	91,06			
2,5	97,83	108,86	112,28	95,95	94,28	101,84	103,732	99,13	112,23	121,2	91,56	94,54			
3	100,2	122,69	133,23	97,76	97,2	110,216	111,83	103,06	124,99	139,25	93,12	98,73			
3,5	101,09	137,14	143,77	97,76	98,05	115,562	116,368	111,16	133,91	143,58	93,19	100			
4	105,28	160,82	156,2	98,14	98,05	123,698	124,474	124,28	150,91	147,9	93,4	105,88			
4,5	121,15	175,56	175,6	98,14	100,83	134,256	132,77	137,87	156,69	151,48	96,2	121,61			
5	146,23	182,66	189,1	98,17	101,6	143,552	145,438	166,63	164,82	164,93	97,42	133,39			
5,5	176,59	189,64	202,44	98,98	102,2	153,97	156,094	171,49	176,22	187,95	98,5	146,31			
6	183,23	191,52	224,22	100,1	102,99	160,412	164,756	180,08	176,44	203,52	100,4	163,34			
6,5	185,89	191,99	232,24	101,21	104,04	163,074	169,514	186,63	176,88	212,01	101,37	170,68			
7	187,28	193,25	248,64	104,53	106,56	168,052	178,12	198,07	178,68	228,61	108	177,24			
7,5	188,34	196,41	257,92	108,65	121,09	174,482	185,786	202,19	180,57	232,74	125,88	187,55			
8	191,6	198,6	266,87	121,9	134,77	182,748	191,362	205,76	182,18	233,92	141,07	193,88			
8,5	192,65	198,73	276,49	131,36	144,01	188,648	195,708	208,7	183,73	236,47	153,83	195,81			
9	194,96	198,81	282,28	148,56	158,93	196,708	201,274	211,63	185,27	239,02	166,58	203,87			
9,5	196,11	201,47	286,27	162,49	164,1	202,088	206,302	211,95	187,05	249,44	172,5	210,57			
10	196,82	203,95	290,15	168,53	164,83	204,856	211,346	214,64	195,15	255,46	177,69	213,79			
10,5	197,13	213,66	291,15	169,17	167,46	207,714	218,144	217,12	206,94	256,08	185,93	224,65			
11	197,83	214,7	294,24	169,17	172,84	209,756	225,326	217,72	220,62	256,41	202,33	229,55			
11,5	199,08	217,9	297,61	169,2	182,51	213,26	231,016	218,5	229,75	258,24	212,46	236,13			
12	199,73	229,32	298,12	175,29	190,36	218,564	233,058	220,49	230,33	261,65	214,29	238,53			
12,5	200	248,06	299,08	179,51	205,49	226,428	234,862	223,98	230,89	262,97	215,63	240,84			
13	200,55	275,12	300,09	182,77	210,59	233,824	240,458	231,46	234,88	264,42	225,72	245,81			
13,5	201,98	293,98	303,75	192,52	216,17	241,68	245,96	238,93	238,92	271,06	230,52	250,37			
14	202,76	307,86	305,68	204,6	216,39	247,458	249,79	250,5	240,18	273,66	233,96	250,65			
14,5	203,6	312	311,9	225,04	217,42	253,992	256,056	266,55	241,53	274,7	246,07	251,43			
15	204,92	312,59	320,71	225,55	223,88	257,53	262,426	278,93	244,84	278,55	258,18	251,63			

Tabella A.8 - Metodo2_area SAFE

- **Area CLEAR**

Metodo 2: AREA CLEAR

minuto	VISSER					media_VISSER	media_MCDM	MCDM														
	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,5	18,78	31,09	16,65	21,29	19,33	21,428	22,242	21,55	35,66	17,28	19,38	17,34	37,16	40,58	37,7	53,02	62,34	65,22	73,58	78,87	91,76	100,19
1	27,57	45,05	31,36	40,36	42,04	37,276	38,908	37,16	45,79	33,31	40,58	37,7	50,28	53,67	55,2	62,34	65,22	73,58	78,87	91,76	100,19	
1,5	45,77	55,26	47,39	59,81	57,68	53,182	51,748	50,28	53,67	46,57	55,2	53,02	57,84	64,49	60,2	62,34	65,22	73,58	78,87	91,76	100,19	
2	49,04	67,09	61,08	65,42	61,49	60,824	60,662	57,84	64,49	58,44	60,2	62,34	71,93	86,48	63,96	65,22	73,58	78,87	91,76	100,19	100,19	
2,5	62,93	81,96	74,52	71,73	66,62	71,552	72,092	71,93	86,48	72,87	63,96	65,22	80,2	97,43	66,94	73,58	78,87	91,76	100,19	100,19	100,19	
3	71,22	96,83	90,3	73,82	71,74	80,782	81,766	80,2	97,43	90,68	66,94	73,58	92,92	105,56	67,41	78,87	91,76	100,19	100,19	100,19	100,19	
3,5	78,69	107,24	97,48	73,82	72,2	85,886	87,958	92,92	105,56	95,03	67,41	78,87	106,03	117,02	70,76	91,76	100,19	100,19	100,19	100,19	100,19	
4	85,92	123,72	107,02	76,05	73,56	93,254	96,99	106,03	117,02	99,38	70,76	91,76	116,4	124,34	72,2	100,19	100,19	100,19	100,19	100,19	100,19	
4,5	103,65	131,76	118,04	76,55	74,47	100,894	103,392	116,4	124,34	103,83	72,2	100,19	130,32	134,56	72,2	100,19	100,19	100,19	100,19	100,19	100,19	
5	115,86	140,74	127,08	76,87	74,78	107,066	111,324	130,32	134,56	112,09	72,2	100,19	135,68	146,45	73,29	117,41	129,59	134,24	142,81	151,41	161,06	165,86
5,5	135,54	145,22	138,62	77,85	74,88	114,422	119,84	135,68	146,45	126,37	74,46	129,59	142,84	150,3	78,15	134,24	142,81	151,41	161,06	165,86	165,86	165,86
6	148,19	149,4	147,72	80,85	75,86	120,404	128,228	142,84	150,3	143,95	78,15	134,24	148,81	153,27	87,56	142,81	151,41	161,06	165,86	165,86	165,86	165,86
6,5	149,27	150,8	156,18	83,85	76,74	123,368	133,084	148,81	153,27	150,95	87,56	142,81	158,94	155,06	103,07	151,41	161,06	165,86	165,86	165,86	165,86	165,86
7	149,93	151,87	166,53	89,04	84,71	128,416	140,386	158,94	155,44	164,61	103,07	151,41	159,42	155,44	115,92	161,06	165,86	165,86	165,86	165,86	165,86	165,86
7,5	157,66	153,04	171,39	92,33	93,79	133,642	146,79	159,42	158,47	165,66	115,92	161,06	160,95	158,47	128,1	165,86	165,86	165,86	165,86	165,86	165,86	165,86
8	160,29	153,32	182,2	103,34	101,76	140,182	152,412	160,95	158,47	168,88	128,1	165,86	169,76	163,9	140,28	170,22	174,15	174,15	174,15	174,15	174,15	174,15
8,5	164,96	153,74	188,63	109,58	111,23	145,628	157,878	169,92	165,05	182,39	146,03	174,15	173,04	170,71	151,53	174,15	174,15	174,15	174,15	174,15	174,15	174,15
9	169,25	155,07	192,98	125,92	116,56	151,956	163,252	169,92	165,05	187,25	159,56	181,63	173,04	177,59	159,56	181,63	181,63	181,63	181,63	181,63	181,63	181,63
9,5	172,83	163,47	199,73	133,81	126,31	159,23	167,508	173,04	170,71	182,85	167,38	182,53	174,15	186,04	167,38	182,53	182,53	182,53	182,53	182,53	182,53	182,53
10	172,91	167,8	206,21	142,28	130,59	163,958	170,456	173,04	170,71	187,25	173,85	187,95	174,15	186,04	173,85	187,95	187,95	187,95	187,95	187,95	187,95	187,95
10,5	172,91	175	210,01	144,5	136,89	167,862	175,926	173,04	170,71	187,25	173,85	187,95	174,15	186,04	173,85	187,95	187,95	187,95	187,95	187,95	187,95	187,95
11	173,29	177,29	212,36	145,67	140,36	169,794	180,356	174,37	186,04	191,46	167,38	182,53	174,15	186,04	167,38	182,53	182,53	182,53	182,53	182,53	182,53	182,53
11,5	173,58	181,93	216,92	146,87	149,7	173,8	184,414	177,55	189,26	193,46	173,85	187,95	174,15	189,26	173,85	187,95	187,95	187,95	187,95	187,95	187,95	187,95
12	174,15	189,43	219,77	150,05	154,32	177,544	188,172	181,97	193,97	200,1	175,41	189,41	174,15	193,97	175,41	189,41	189,41	189,41	189,41	189,41	189,41	189,41
12,5	174,76	205,94	220,6	152,57	161,35	183,044	192,014	189,72	195,65	204,63	178,27	191,8	174,15	195,65	178,27	191,8	191,8	191,8	191,8	191,8	191,8	191,8
13	176,55	221,49	221,84	162,14	167,08	189,82	197,408	195,22	197,69	211,11	187,96	195,06	174,15	197,69	187,96	195,06	195,06	195,06	195,06	195,06	195,06	195,06
13,5	177,73	225,08	228,2	170,36	167,93	193,86	202,372	200,72	201	221,04	189,63	199,47	174,15	201	189,63	199,47	199,47	199,47	199,47	199,47	199,47	199,47
14	177,92	237,08	230,96	173,57	171,1	198,126	204,884	208,09	201	222,52	191,08	201,73	174,15	201	191,08	201,73	201,73	201,73	201,73	201,73	201,73	201,73
14,5	177,92	246,4	232,05	181,55	175,65	202,714	210,742	217,69	204,59	229,44	200,26	201,73	174,15	204,59	200,26	201,73	201,73	201,73	201,73	201,73	201,73	201,73
15	178,53	250,83	243,43	183,6	180,68	207,414	215,248	223,66	210,69	230,68	209,44	201,73	174,15	210,69	209,44	201,73	201,73	201,73	201,73	201,73	201,73	201,73

Tabella A.9 - Metodo2_area CLEAR

A.1.4 - Metodo 1: confronto VISSER vs MCDM

- **Area FREE**

Metodo 1: AREA FREE

minuto	VISSER					media_VISSER	media_MCDM	MCDM													
	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5									
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,5	174,57	170,8	29,77	141,95	158,08	135,034	149,034	176,06	170,98	99,92	141,39	156,82	212,13	179,54	127,95	202,47	224,01	224,01	224,01	224,01	224,01
1	189,61	188,9	109,93	163,21	224,36	175,202	189,22	212,13	179,54	127,95	202,47	224,01	232,31	239,91	190,08	226,94	245,43	245,43	245,43	245,43	245,43
1,5	199,64	231,62	176,08	228,5	250,36	217,24	226,934	232,31	239,91	190,08	226,94	245,43	234,16	291,54	203,16	261,73	267,21	267,21	267,21	267,21	267,21
2	200,23	256,87	191,34	248,79	298,44	239,134	251,56	234,16	291,54	203,16	261,73	267,21	240,94	299,48	216,5	268,17	272,72	272,72	272,72	272,72	272,72
2,5	207,54	270,39	195,64	275,95	316,78	253,26	259,562	272,83	301,96	283,76	272,95	277,21	272,83	301,96	283,76	272,95	277,21	277,21	277,21	277,21	277,21
3	232,47	270,39	198,67	280,59	335,12	263,448	281,742	289,25	313,18	298,72	277,72	287,22	289,25	313,18	298,72	277,72	287,22	287,22	287,22	287,22	287,22
3,5	232,47	271,93	199	282,34	364,19	269,986	293,218	299,26	334,92	344,79	280	296,22	299,26	334,92	344,79	280	296,22	296,22	296,22	296,22	296,22
4	235,73	304,28	199,07	293,27	368,53	280,176	311,038	308,11	376,21	353,28	289,73	352,51	308,11	376,21	353,28	289,73	352,51	352,51	352,51	352,51	352,51
4,5	239,12	307,39	200,36	337,78	375,86	292,102	335,968	311,64	390,24	371,08	304,36	368,12	311,64	390,24	371,08	304,36	368,12	368,12	368,12	368,12	368,12
5	241,22	319,04	214,6	353,45	384,16	302,494	349,088	327,58	406,67	408,89	353,32	396,32	327,58	406,67	408,89	353,32	396,32	396,32	396,32	396,32	396,32
5,5	246,47	343,66	217,08	369,11	393,22	313,908	378,556	355,55	423,71	419,88	364,13	406,12	355,55	423,71	419,88	364,13	406,12	406,12	406,12	406,12	406,12
6	246,82	366,77	225,92	402,81	406,25	329,714	393,878	359,37	446,97	425,49	393,8	407,19	359,37	446,97	425,49	393,8	407,19	407,19	407,19	407,19	407,19
6,5	253,06	391,11	238,72	410,57	423,12	343,316	406,564	375,47	481,08	440,63	412,8	409,9	375,47	481,08	440,63	412,8	409,9	409,9	409,9	409,9	409,9
7	254,79	401,49	238,72	418,02	430,34	348,672	423,976	380,68	481,63	457,41	431,6	427,16	380,68	481,63	457,41	431,6	427,16	427,16	427,16	427,16	427,16
7,5	261,57	423,75	294,78	424,95	437,81	368,572	435,696	381,23	481,98	474,18	442,7	430,72	381,23	481,98	474,18	442,7	430,72	430,72	430,72	430,72	430,72
8	273,35	459,4	304,73	436,25	440,42	382,83	442,162	401,17	496,02	487,62	447,73	462,21	401,17	496,02	487,62	447,73	462,21	462,21	462,21	462,21	462,21
8,5	278,68	482,44	341,55	455,09	444,21	400,394	458,95	402,93	499,9	487,65	458,56	474,88	402,93	499,9	487,65	458,56	474,88	474,88	474,88	474,88	474,88
9	279,29	487,51	370,92	478,48	446,3	412,5	464,784	414,02	502,64	488,06	462,94	487,62	414,02	502,64	488,06	462,94	487,62	487,62	487,62	487,62	487,62
9,5	282,81	493,6	393,1	480,65	465,78	423,188	471,056	420,41	510,67	488,35	484,29	500,78	420,41	510,67	488,35	484,29	500,78	500,78	500,78	500,78	500,78
10	282,93	517,66	395,51	494,75	468,13	431,796	480,9	448,56	532,6	489,4	498,56	505,88	448,56	532,6	489,4	498,56	505,88	505,88	505,88	505,88	505,88
10,5	283,56	521,28	406,27	498,3	480,24	437,93	495	477,51	536,79	493,35	524,84	520,6	477,51	536,79	493,35	524,84	520,6	520,6	520,6	520,6	520,6
11	304,22	522,48	420,97	500,88	488,52	447,414	510,618	493,17	538,33	493,35	532,48	535,24	493,17	538,33	493,35	532,48	535,24	535,24	535,24	535,24	535,24
11,5	334,75	525,5	431,06	505,86	500,64	459,562	518,514	499,06	558,52	496,08	538,58	539,81	499,06	558,52	496,08	538,58	539,81	539,81	539,81	539,81	539,81
12	350,95	539,95	436,56	508,29	503,12	467,774	526,41	500,86	569,89	496,08	546,16	544,5	500,86	569,89	496,08	546,16	544,5	544,5	544,5	544,5	544,5
12,5	353,68	543,3	452,24	509,31	505,13	472,732	531,498	501,2	577,58	504,36	550,59	547,19	501,2	577,58	504,36	550,59	547,19	547,19	547,19	547,19	547,19
13	365,79	546,28	465,08	510,96	505,55	478,732	536,184	504,45	584,99	512,64	562,66	551,09	504,45	584,99	512,64	562,66	551,09	551,09	551,09	551,09	551,09
13,5	366,54	561,92	465,08	513,79	508,32	483,13	543,166	504,54	601,02	527,38	567,53	551,43	504,54	601,02	527,38	567,53	551,43	551,43	551,43	551,43	551,43
14	367,91	571,69	465,14	515,56	509,56	485,972	550,38	521,31	617,04	534,75	572,93	554	521,31	617,04	534,75	572,93	554	554	554	554	554
14,5	384,88	573,42	465,17	515,75	525,89	493,022	560,006	524,19	618,75	542,12	577,97	555,73	524,19	618,75	542,12	577,97	555,73	555,73	555,73	555,73	555,73
15	432,92	573,66	465,2	515,93	525,95	502,732	563,752														

Tabella A.10 - Metodo1_area FREE

- **Area SAFE**

Metodo 1: AREA SAFE

minuto	VISSER					media_VISSER	media_MCDM	MCDM														
	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5										
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0,5	55,96	58,22	13,3	43,03	40,58	42,218	45,084	58,63	58,94	24,89	44,6	38,36	94,75	67,97	41	67,57	51,58	109,04	75,73	71,3	79,36	80,55
1	71,45	76,74	31,46	48,92	51,85	56,084	64,574	94,75	67,97	41	67,57	51,58	109,04	75,73	71,3	79,36	80,55	114,26	83,12	90,28	105,24	104,29
1,5	92,26	87,52	63,2	80,16	82,86	81,2	83,196	109,04	75,73	71,3	79,36	80,55	114,26	83,12	90,28	105,24	104,29	120,55	89,78	115,93	110,76	113,29
2	108,16	103,52	79,52	94,83	105,91	98,388	99,438	114,26	83,12	90,28	105,24	104,29	120,55	89,78	115,93	110,76	113,29	133,25	92,16	134,32	117,21	125,99
2,5	108,35	119,03	84,97	117,24	128,72	111,662	110,062	120,55	89,78	115,93	110,76	113,29	133,25	92,16	134,32	117,21	125,99	139,32	92,16	134,32	117,21	125,99
3	123,47	119,03	96	123,66	151,53	122,738	120,586	133,25	92,16	134,32	117,21	125,99	139,32	92,16	134,32	117,21	125,99	144,69	117,39	152,6	123,66	127,55
3,5	123,47	139,64	101,22	125,35	178,32	133,6	132,104	139,32	117,39	152,6	123,66	127,55	144,69	117,39	152,6	123,66	127,55	152,59	117,39	152,6	123,66	127,55
4	133,56	161,63	101,52	135,1	178,56	142,074	141,75	144,69	129,84	167,39	127,78	139,05	152,59	117,39	152,6	123,66	127,55	157,3	129,84	167,39	127,78	139,05
4,5	143,45	165,27	101,62	151,98	181,12	148,688	153,01	152,59	155,81	178,78	128,02	149,85	157,3	182,62	191,78	130,09	170,61	171,24	155,81	178,78	128,02	149,85
5	146,24	168,6	110,27	166,53	183,21	154,97	166,48	157,3	182,62	191,78	130,09	170,61	171,24	155,81	178,78	128,02	149,85	171,24	155,81	178,78	128,02	149,85
5,5	146,51	192,09	125,28	181,08	184,24	165,84	188,876	171,24	207,01	211,04	158,55	196,54	199,84	239,37	219,68	164,84	199,5	171,24	207,01	211,04	158,55	196,54
6	149,38	206,4	132,25	208,57	186,74	176,668	204,646	199,84	239,37	219,68	164,84	199,5	199,84	239,37	219,68	164,84	199,5	206,17	262,24	227,34	188,47	202,48
6,5	153,81	224,28	145,67	215,33	207,64	189,346	217,34	206,17	262,24	227,34	188,47	202,48	206,17	262,24	227,34	188,47	202,48	206,17	262,24	227,34	188,47	202,48
7	154,94	225,51	145,67	217,53	224,4	193,61	227,098	206,17	262,24	227,34	188,47	202,48	206,17	262,24	227,34	188,47	202,48	206,17	262,24	227,34	188,47	202,48
7,5	166,67	235,83	171,41	220,03	226,05	203,998	237,376	229,24	268,01	251,95	217,11	220,57	229,24	268,01	251,95	217,11	220,57	229,24	268,01	251,95	217,11	220,57
8	169,29	247,87	175,88	228,59	226,2	209,566	242,074	229,24	268,01	251,95	217,11	220,57	229,24	268,01	251,95	217,11	220,57	229,24	268,01	251,95	217,11	220,57
8,5	173,24	263,49	193,76	240,39	226,72	219,52	255,604	248,69	269,14	285,73	221,7	252,76	248,69	269,14	285,73	221,7	252,76	248,69	269,14	285,73	221,7	252,76
9	174,69	268,42	215,66	249,2	227	226,994	259,104	250,03	270,24	285,8	223,6	265,85	250,03	270,24	285,8	223,6	265,85	250,03	270,24	285,8	223,6	265,85
9,5	177,36	275,6	234,7	254	242,7	236,872	261,402	256,91	270,53	286,38	224,1	269,09	256,91	270,53	286,38	224,1	269,09	256,91	270,53	286,38	224,1	269,09
10	178,61	291,56	244,32	257,97	250,42	244,576	268,47	263,06	278,43	286,42	242,76	271,68	263,06	278,43	286,42	242,76	271,68	263,06	278,43	286,42	242,76	271,68
10,5	183,46	304,68	251,9	258,38	253,72	250,428	277,78	278,7	299,12	287,54	249,42	274,12	278,7	299,12	287,54	249,42	274,12	278,7	299,12	287,54	249,42	274,12
11	188,7	306,08	258,42	258,87	254,66	253,346	291,16	291,43	302,28	296,2	271	294,89	291,43	302,28	296,2	271	294,89	291,43	302,28	296,2	271	294,89
11,5	203,5	321,84	271,48	259,86	257,17	262,77	300,272	291,43	302,28	296,2	271	294,89	291,43	302,28	296,2	271	294,89	291,43	302,28	296,2	271	294,89
12	213,8	344,34	276,64	270,3	261,91	273,398	304,962	307,28	302,32	296,2	281,22	314,34	307,28	302,32	296,2	281,22	314,34	307,28	302,32	296,2	281,22	314,34
12,5	215,53	353,92	281,64	283,97	265,87	280,186	310,724	317,89	306,37	299,94	284,17	316,44	317,89	306,37	299,94	284,17	316,44	317,89	306,37	299,94	284,17	316,44
13	219,43	353,92	282,49	286,17	266,04	281,61	318,392	320,41	321,86	299,94	291,73	319,68	320,41	321,86	299,94	291,73	319,68	320,41	321,86	299,94	291,73	319,68
13,5	226,84	368,92	282,49	286,24	266,77	286,252	327,16	321,49	331,35	311,69	300,91	326,52	321,49	331,35	311,69	300,91	326,52	321,49	331,35	311,69	300,91	326,52
14	237,93	375,71	282,5	287,8	269,56	290,7	332,458	322,47	337,16	323,44	322,86	329,87	322,47	337,16	323,44	322,86	329,87	322,47	337,16	323,44	322,86	329,87
14,5	247,33	382,03	282,51	287,85	275,54	295,052	338,9	331	345,9	327,8	335,87	330,16	331	345,9	327,8	335,87	330,16	331	345,9	327,8	335,87	330,16
15	259,19	393,69	282,51	287,9	275,58	299,774	341,948	332,54	360,97	332,16	348,46	335,61	332,54	360,97	332,16	348,46	335,61	332,54	360,97	332,16	348,46	335,61

Tabella A.11 - Metodo1_area SAFE

• **Area CLEAR**

Metodo 1: AREA CLEAR

minuto	VISSER					media_VISSER	media_MCDM	MCDM												
	prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5			prova_1	prova_2	prova_3	prova_4	prova_5								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	34,2	46,09	9,7	26,8	28,24	29,006	30,316	34,57	46,37	19,49	27,8	23,35								
1	50,88	59,09	23,91	48,92	39,34	44,428	47,562	62,23	55,26	31,56	47,72	41,04								
1,5	69,39	70,6	52,43	60,46	65,92	63,76	64,252	84,13	62,19	55,44	58,41	61,09								
2	84,88	89,76	63,79	72,62	84,85	79,18	79,232	94,44	70,48	71,44	77,37	82,43								
2,5	87,33	103,29	69,41	90,01	100,58	90,124	92,452	107,5	81,7	92,22	85,72	95,12								
3	100,94	103,29	78,2	97,39	116,3	99,224	99,934	117,89	86,91	104,72	91,87	98,28								
3,5	100,94	118,04	82,52	100,52	128,82	106,168	111,812	128,68	108,6	122,55	98,01	101,22								
4	105,88	132	88,79	109,26	131,78	113,542	120,502	136,7	117,52	130,42	101,93	115,94								
4,5	108,32	139,66	89,35	124,15	134,64	119,224	131,768	140,58	142,32	143,48	103,98	128,48								
5	112,52	142	98,73	134,47	138,82	125,308	142,346	144,13	164,34	152,23	108,23	142,8								
5,5	117,88	159,97	112,84	144,79	143,3	135,756	158,48	153,03	181,56	172,15	128,82	156,84								
6	122,76	172,54	124,94	165,64	147,01	146,578	172,716	171,04	206,75	180,4	142,05	163,34								
6,5	127,96	181,32	137,63	172,75	167,63	157,458	184,096	175,59	232,25	189,38	156,43	166,83								
7	136,76	193,49	137,63	173,42	178,34	163,928	192,162	187,23	235,38	199,96	168,57	169,67								
7,5	149,92	205,06	153,8	173,8	184,47	173,41	199,852	190,64	235,62	211,26	176,97	184,77								
8	156,4	214,76	164,9	182,95	185,43	180,888	205,548	192,05	235,62	222,56	183,27	194,24								
8,5	159,8	232,35	179,4	191,49	186,31	189,87	215,64	206,35	238,84	235,45	186,6	210,96								
9	163,09	237,76	193,78	199,4	186,66	196,138	220,178	207,06	238,85	237,44	191,23	226,31								
9,5	171,06	249,65	208,7	212,55	198,68	208,128	224,73	220,7	239,05	237,9	195,67	230,33								
10	172,5	257,22	210,76	216,53	204,91	212,384	230,396	223,78	244,79	237,96	209,01	236,44								
10,5	173,83	271,76	224,76	217,38	213,36	220,218	238,542	232,12	265,03	238,43	219,08	238,05								
11	180,97	272,49	232,04	217,66	215,83	223,798	251,024	243,75	270,14	243,91	240,48	256,84								
11,5	193,76	283,88	239,35	218,17	220,13	231,058	256,342	254,99	270,33	243,91	243,72	268,76								
12	199,13	307,16	241,77	224,78	225,72	239,712	260,696	262,76	275,21	245,38	248,17	271,96								
12,5	203,63	316	243,96	242,52	227,96	246,814	264,99	265,81	289,4	245,38	252,4	271,96								
13	207,24	320	246,09	246	228,12	249,49	271,192	267,5	298,3	250,16	258,91	281,09								
13,5	218,01	331,12	246,09	246,35	228,24	253,962	276,916	270,91	303,1	254,94	272,53	283,1								
14	225,83	337,21	246,1	247,36	234,66	258,232	282,1	271,04	315,13	257,12	283,55	283,66								
14,5	232,93	347,9	246,1	247,44	234,92	261,858	288,534	279,45	327,16	258,21	293,04	284,81								
15	238,76	356,48	246,1	247,51	234,99	264,768	290,512	282,65	331,66	259,29	294,15	284,81								

Tabella A.12 - Metodo1_area CLEAR

A.2 - Confronto tra metodi

A.2.1 - Strategia VISSER

minuto	Visser: A. FREE				Visser: A. SAFE				Visser: A. CLEAR			
	metodo 1	metodo 2	metodo 3	metodo 4	metodo 1	metodo 2	metodo 3	metodo 4	metodo 1	metodo 2	metodo 3	metodo 4
0	135,034	109,592	120,464	104,608	42,218	36,808	37,222	31,866	0	29,006	25,914	0
0,5	175,202	150,498	200,802	150,31	56,084	58,37	59,802	57,174	44,428	37,276	46,23	37,608
1	217,24	178,054	220,344	178,3	81,2	78,232	78,402	75,834	63,76	53,182	60,106	52,14
1,5	239,134	204,162	264,066	210,032	98,388	92,344	99,778	89,294	79,18	60,824	77,584	60,272
2	253,26	223,608	280,661	236,946	111,662	101,84	115,442	97,946	90,124	71,552	90,366	71,312
2,5	263,448	236,566	291,492	251,108	122,738	110,216	127,984	103,416	99,224	80,782	100,444	78,08
3	269,986	239,956	305,18	265,962	133,6	115,562	142,802	108,072	106,168	85,886	110,84	83,952
3,5	280,176	251,528	317,694	278,072	142,074	123,698	157,236	117,174	113,542	93,254	120,176	93,096
4	292,102	268,32	356,028	282,436	148,688	134,256	169,046	122,548	119,224	100,894	133,568	99,722
4,5	302,494	274,71	366,942	287,708	154,97	143,552	178,908	128,444	125,308	107,066	143,55	105,922
5	313,908	292,056	378,862	310,068	165,84	153,97	187,538	140,098	135,756	114,422	151,352	115,23
5,5	329,714	307,664	393,304	324,452	176,668	160,412	197,762	147,99	146,578	120,404	160,986	124,724
6	343,316	313,396	399,352	336,382	189,346	163,074	204,016	157,542	157,458	123,368	168,508	131,926
6,5	348,672	322,714	408,818	347,974	193,61	168,052	210,702	167,61	163,928	128,416	174,586	141,326
7	368,572	339,122	420,734	350,586	203,998	174,482	217,13	170,57	173,41	133,642	184,138	145,878
7,5	382,83	348,9	434,412	354,854	209,566	182,748	230,87	173,506	180,888	140,182	194,736	150,156
8	400,394	357,982	442,256	363,304	219,52	188,648	237,964	174,952	189,87	145,628	200,556	152,292
8,5	412,5	371,894	452,848	364,732	226,994	196,708	246,818	175,462	196,138	151,956	206,982	153,132
9	423,188	388,162	461,722	366,812	236,872	202,088	253,064	177,082	208,128	159,23	214,554	157,418
9,5	431,796	395,212	463,372	376,194	244,576	204,856	256,464	180,854	212,384	163,958	217,742	160,688
10	437,93	397,14	467,542	377,534	250,428	207,714	260,962	184,568	220,218	167,862	224,4	164,23
10,5	447,414	399,412	477,434	378,442	253,346	209,756	262,92	185,644	223,798	169,794	227,028	166,94
11	459,562	402,52	482,69	382,114	262,77	213,26	267,59	187,464	231,058	173,8	231,672	167,922
11,5	467,774	408,7	496,86	388,528	273,398	218,564	275,966	190,928	239,712	177,544	238,854	170,618
12	472,732	418,64	503,1	391,402	280,186	226,428	284,322	193,192	246,814	183,044	245,286	173,266
12,5	478,732	423,326	510,28	401,12	281,61	233,824	291,782	197,212	249,49	189,82	252,416	176,574
13	483,13	429,258	513,026	404,916	286,252	241,68	294,302	200,644	253,962	193,86	256,656	178,698
13,5	485,972	437,078	513,874	411,092	290,7	247,458	296,714	204,798	258,232	198,126	258,924	181,554
14	493,022	447,958	516,624	413,992	295,052	253,992	300,085	208,48	261,858	202,714	260,428	187,01
14,5	502,732	453,908	522,878	415,908	299,774	257,53	306,362	211,682	264,768	207,414	264,228	189,862

Tabella A.13 - Strategia VISSER

A.2.2 - Strategia MCDM

minuto	MCDM: A. FREE				MCDM: A. SAFE				MCDM: A. CLEAR			
	metodo 1	metodo 2	metodo 3	metodo 4	metodo 1	metodo 2	metodo 3	metodo 4	metodo 1	metodo 2	metodo 3	metodo 4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	149,034	124,218	133,346	104,608	45,084	38,318	40,07	31,866	30,316	22,242	28,114	17,216
1	189,22	154,836	187,004	150,31	64,574	58,688	57,044	57,174	47,562	38,908	42,824	37,608
1,5	226,934	182,576	223,792	178,3	83,196	78,322	80,82	75,834	64,252	51,748	60,288	52,14
2	251,56	208,71	243,152	210,032	99,438	92,028	101,186	89,294	79,232	60,662	76,404	60,272
2,5	259,562	236,092	266,74	236,946	110,062	103,732	114,563	97,946	92,452	72,092	87,75	71,312
3	281,742	250,956	280,798	251,108	120,586	111,83	126,396	103,416	99,934	81,766	96,518	78,08
3,5	293,218	256,958	297,86	265,962	132,104	116,368	140,396	108,072	111,812	87,958	106,278	83,952
4	311,038	266,382	336,082	278,072	141,75	124,474	152,876	117,174	120,502	96,99	122,332	93,096
4,5	335,968	282,378	350,38	282,436	153,01	132,77	165,666	122,548	131,768	103,392	135,494	99,722
5	349,088	298,19	368,556	287,708	166,48	145,438	177,62	128,444	142,346	111,324	147,248	105,922
5,5	378,556	320,48	383,216	310,068	188,876	156,094	192,756	140,098	158,48	119,84	157,936	115,23
6	393,878	332,79	409,95	324,452	204,646	164,756	210,54	147,99	172,716	128,228	171,71	124,724
6,5	406,564	340,09	424,212	336,382	217,34	169,514	227,072	157,542	184,096	133,084	184,078	131,926
7	423,976	359,068	436,438	347,974	227,098	178,12	231,524	167,61	192,162	140,386	189,132	141,326
7,5	435,696	369,694	440,817	350,586	237,376	185,786	235,361	170,57	199,852	146,79	194,246	145,878
8	442,162	375,64	448,944	354,854	242,074	191,362	240,662	173,506	205,548	152,412	199,806	150,156
8,5	458,95	385,496	473,116	363,304	255,604	195,708	247,104	174,952	215,64	157,878	206,752	152,292
9	464,784	399,014	482,08	364,732	259,104	201,274	252,554	175,462	220,178	163,252	210,72	153,132
9,5	471,056	403,572	494,54	366,812	261,402	206,302	264,076	177,082	224,73	167,508	221,294	157,418
10	480,9	412,622	502,742	376,194	268,47	211,346	274,006	180,854	230,396	170,456	227,352	160,688
10,5	495	418,72	514,99	377,534	277,78	218,144	283,188	184,568	238,542	175,926	238,014	164,23
11	510,618	427,39	520,68	378,442	291,16	225,326	289,482	185,644	251,024	180,356	244,822	166,94
11,5	518,514	432,832	528,476	382,114	300,272	231,016	292,698	187,464	256,342	184,414	246,926	167,922
12	526,41	445,968	531,688	388,528	304,962	233,058	298,368	190,928	260,696	188,172	254,164	170,618
12,5	531,498	451,558	546,05	391,402	310,724	234,862	307,472	193,192	264,99	192,014	260,564	173,266
13	536,184	457,326	550	401,12	318,392	240,458	312,126	197,212	271,192	197,408	263,698	176,574
13,5	543,166	461,456	553,182	404,916	327,16	245,96	315,326	200,644	276,916	202,372	267,108	178,698
14	550,38	467,406	559,036	411,092	332,458	249,79	321,22	204,798	282,1	204,884	271,922	181,554
14,5	560,006	481,862	564,088	413,992	338,9	256,056	327,758	208,48	288,534	210,742	276,42	187,01
15	563,752	490,706	566,494	415,908	341,948	262,426	330,268	211,682	290,512	215,248	280,074	189,862

Tabella A.14 - Strategia MCDM

Appendice B:

***MANUALE
D'INSTALLAZIONE E
D'USO***

B.1 – Installazione

Per poter utilizzare UvARescue2009 è necessario prima di tutto installare Unreal Tournament 2004, USARSim, Image Server e WSS; una volta installati tutti i componenti necessari, si può passare ad installare il controllore. Le seguenti istruzioni sono per i S.O. Microsoft Windows, tuttavia le prestazioni migliori si hanno su Microsoft Windows XP in quanto Unreal Tournament può portare a problemi di compatibilità con versioni di Windows successive a XP.

1- UNREAL TOURNAMENT 2004

E' necessario comprare il videogioco per intero. Per installarlo inserire il DVD e seguire le semplici istruzioni che compaiono a video. La directory in cui installare il gioco è "C:\UT2004".

Prima di procedere all'installazione di USARSim, occorre installare la patch ufficiale del gioco (versione numero 3369) reperibile dal sito di Unreal Tournament: <http://www.unrealtournament2003.com/news/viewbd8c.html?id=2988>.

2- USARSIM

USARSim e i componenti necessari si possono reperire dal sito sourceforge.net attraverso il link <http://sourceforge.net/projects/usarsim/files/>. Vi sono molte versioni di USARSim rilasciate per Unreal Tournament; in questa guida si fa riferimento alla versione 3.1.

- scaricare l'eseguibile "USARSimFull_3.1.zip";
- installare l'eseguibile in C:\UT2004 seguendo gli step e sostituendo eventualmente i file già presenti qualora richiesto;
- scaricare ed installare sempre in C:\UT2004 due eseguibili: "AAA_MapBaseFiles_V3.1.zip" e "DM-RoboCup06Worlds_V3.1.zip" esattamente in questo ordine: il primo contiene dei file necessari al secondo eseguibile che contiene le mappe;
- sempre dal sito cui sopra seguire il percorso "Tools/3.1" e scaricare il file "ImageSrv_3.1.zip";
- estrarre la cartella ImageSrv ed incollarla in C:\UT2004.
- Dal sito http://sourceforge.net/scm/?type=cvs&group_id=145394 scaricare il tool WSS. La cartella contenente l'eseguibile può essere messa in qualunque

path;

- installare Visual Studio 2005 o superiore.

3- UVARESCUE2009

Il controllore UvARescue2009 utilizzato in questa tesi si può scaricare dal sito www.jointrescueforces.eu seguendo il link "Download". Sempre sul sito sono fornite nel dettaglio tutte le informazioni necessarie per l'installazione; qui vengono riportati solamente i passi essenziali:

- scaricare il file .zip contenente il codice della versione 2007 (UvARescue2007.zip);
- estrarre i file contenuti nell'archivio in una cartella, per comodità nominarla per comodità AOJRF2008;
- dalla stessa pagina scaricare il file .zip della versione 2008 (AOJRF2008.zip);
- estrarre i file sempre nella cartella AOJRF2008 precedentemente rinominata, sostituendo tutti i file omonimi (quando richiesto) e rinominare la cartella in AOJRF2009;
- scaricare, sempre dalla stessa pagina, il file .zip della versione 2009 (AOJRF2009.zip);
- estrarre i file nella cartella AOJRF2009, sostituendo tutti i file;
- nella cartella AOJRF2009 eliminare il file "UvA Rescue.sln" e aprire "UvARescue.sln" (si tratta di un file Soluzione di Visual Studio) impostando UsarCommander come progetto d'avvio. A questo punto si aprirà Visual Studio e si è pronti per la compilazione; compilando in sequenza UsarLib, UsarClient e UsarCommander verranno generati due eseguibili: "UsarClient.exe" e "UsarCommander.exe".

Il primo si trova in `..\Usar\UsarClient\bin\Release`; il secondo in `..\Usar\UsarCommander\bin\Release`.

B.2 – Utilizzo

Dopo aver compilato si è pronti per mandare in esecuzione. La procedura da seguire è la seguente:

- è possibile eseguire in modalità debug (premendo il tasto F5) o lanciando direttamente l'eseguibile UsarCommander.exe dal path in cui è stato creato in fase di compilazione: verrà aperta l'interfaccia del controllore come mostrato in Figura 3.1.
- configurare ogni robot: premendo sul pulsante "+" verrà aggiunto un robot; premendo successivamente sul pulsante "ingranaggio" si aprirà la finestra Agent Configuration (Figura 3.3) per la configurazione delle caratteristiche. Spuntare l'opzione "Spawn from commander" solo per il robot ComStation. Salvare in un file .cfg (nella mia tesi si chiama AC.cfg) nella cartella `..\Usar\UsarClient\bin\Release`. La configurazione di ogni robot deve risiedere nello stesso file;
- configurare il team premendo sul pulsante "globo azzurro" in basso a destra: verrà aperta una form (Figura 3.4) nella quale andranno inseriti gli indirizzi IP e le porte del Localhost, dell'USARSim, dell'Image Serve e del WSS. Questo perché i quattro componenti potrebbero essere locati su macchine diverse. Le porte sono fissate a 3000 per l'USARSim, 5003 per l'Image Server e 50000 per il WSS. E' possibile definire in questa form il tempo di backup dei dati; nella mia tesi i dati sono stati raccolti ogni 30 secondi. Salvare infine la configurazione in un file .cfg (nella mia tesi si chiama TC.cfg) nella cartella `..\Usar\UsarClient\bin\Release`.
- Far partire la simulazione premendo sull'interfaccia del controllore il pulsante "V" verde. A questo punto si è pronti per inserire i robot nell'ambiente seguendo la procedura seguente:
 - Far partire l'Image Server "UT2004\ImageSrv\Release\ImageSrv.exe" impostando "UT Client Mode", "Port: 5003" e selezionando il nome di un file mappa di USARSim (o di Unreal): i file mappa si trovano nella cartella UT2004/maps ed hanno estensione ".ut2" che non va riportata. A fronte della richiesta di cercare "ut2003.exe", premere "Start" e selezionare "UT2004.exe" presente nella directory "UT2004/System";
 - Far partire il WSS impostando "listen on port": 50000" e premere "Start";
 - Aprire tanti prompt MS-DOS quanti sono i robot esploratori e

posizionarsi nella cartella in cui si trova UsarClient.exe e i due file di configurazione .cfg (AC.cfg e TC.cfg);

- In ognuno dei prompt digitare la seguente riga di comando:
“UsarClient.exe -n *nomeRobot* -ac AC.cfg -tc TC.cfg” dove *nomeRobot* è il nome dato al robot in fase di configurazione (es. Robot1) mentre AC.cfg e TC.cfg sono i nomi dei due file di configurazione (dei robot e del team). Prima di premere invio, eseguire il passo successivo;
- tornare sull'interfaccia del controllore e premere il pulsante “orologio” per far partire la simulazione vera e propria: compariranno dei pulsanti “fulmine”, uno per ogni robot: premerli uno di seguito all'altro a partire dal robot ComStation.
- Infine, tornare ai prompt di MS-DOS e premere invio.