



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

***Piattaforma per la gestione real-time della sicurezza nei cantieri durante i
lavori di trivellazione***

*Platform for real-time management of safety in construction sites during
drilling works*

Relatore

Prof. Ing. Alessandro Carbonari

Candidato

Matteo De Cata

Correlatori

Prof. Ing. Massimo Vaccarini

Prof. Ing. Berardo Naticchia

a.a. 2018/2019

Sommario

Introduzione	4
LA GESTIONE DELLA SICUREZZA NEI CANTIERI EDILI.....	6
1.1 Le figure professionali per la gestione della sicurezza	7
1.1.1 Il committente	7
1.1.2 Il responsabile dei lavori	8
1.1.3 Datore di lavoro	9
1.1.4 Direttore tecnico.....	11
1.1.5 Responsabile del servizio di prevenzione e protezione (RSPP)	13
1.1.6 Maestranze	14
1.1.7 Rappresentante dei Lavoratori per la Sicurezza (RLS).....	15
1.1.8 Coordinatori della sicurezza.....	15
1.1.8.1 Coordinatore della sicurezza in fase di progettazione (CSP).....	16
1.1.8.2 Coordinatore della sicurezza in fase di esecuzione (CSE).....	17
1.1.9 Direttore dei lavori	18
1.2 Costi per la sicurezza	20
1.2.1 Costi per la mancata sicurezza	20
1.2.2 Costi della sicurezza.....	25
1.3 Il rischio	34
1.3.1 Definizione di rischio, pericolo e danno	34
1.3.1.1 Valutazione del rischio, prevenzione e protezione	36
1.3.1.2 Metodi di analisi del rischio.....	40
OBIETTIVO.....	45
2.1 Piattaforma per la gestione della sicurezza	46
2.1.1 Architettura della piattaforma	46
2.1.2 Sensori di localizzazione UWB	49

2.1.3 Sistemi di acquisizione dati.....	52
2.1.4 Ambiente di simulazione virtuale	53
2.1.4.1 Interfaccia grafica e pannelli.....	54
2.1.4.2 GameObject	57
2.1.4.3 Interazioni tra gli oggetti.....	58
2.4 Modellazione della scena	61
2.4.1 Rete Bayesiana.....	61
2.4.1.1 Componente qualitativa	62
2.4.1.2 Componente quantitativa	63
2.4.1.3 Dipendenza ed indipendenza nelle reti bayesiane.....	64
2.4.1.4 Inferenze nelle reti bayesiane.....	66
2.4.1.5 Inferenza esatta	67
2.5 Integrazione rete bayesiana nella scena	68
CASO STUDIO	71
3.1 Pali di fondazione.....	71
3.2 Logica di gestione del modello	72
3.2.1 Creazione dell'ambiente virtuale	73
3.2.2 Modellazione della scena	76
3.2.2.1 Analisi del modello da impatto lineare	77
3.2.2.2 Analisi del modello da impatto rotazionale	94
4.1 Determinazione dell'area di monitoraggio	104
4.2 Simulazioni delle probabilità d'impatto.....	121
4.2.1 Simulazioni delle probabilità d'impatto lineare.....	124
4.2.2 Simulazioni delle probabilità d'impatto rotazionale.....	128
4.2 Risultati delle simulazioni	130
CONCLUSIONI	134
BIBLIOGRAFIA	136

Introduzione

La sicurezza nei cantieri edili sta avendo sempre più un ruolo principale nel settore delle costruzioni, di fatto è tra i primi posti per quanto riguarda l'elevata frequenza del tasso di infortuni preceduto solamente dal settore minerario e da quello della lavorazione del legno. Nel settore delle costruzioni il ramo dell'edilizia registra congiuntamente al settore dei trasporti il più alto indice di infortuni mortali, mediamente 2 al giorno, circa il 60% del totale generale del settore. Tale costo posto a carico della collettività è stato stimato dall'INAIL pari a circa il 3% del PIL (prodotto interno lordo) nazionale di cui circa un quinto è il costo del solo settore delle costruzioni.

Nell'affrontare tale problema, si è stabilito di approfondire come, attualmente, viene eseguito il sistema di gestione e monitoraggio della sicurezza, considerando le figure responsabili, gli strumenti e le prescrizioni normative messe in pratica dal D.lgs. 81/08.

Con l'innovazione tecnologica tutti i settori industriali, compreso quello delle costruzioni, hanno subito un processo di trasformazione, spostandosi verso una nuova dimensione, quella digitale. Questo mutamento, comunemente chiamato "quarta rivoluzione industriale", sulla scia delle precedenti rivoluzioni industriali, ha iniziato ad influenzare in primis il settore del manifatturiero, da sempre più ricettivo ai cambiamenti, e negli ultimi anni sta irrompendo anche in quello delle costruzioni. La caratteristica di questa rivoluzione è quella di importare il digitale nel settore delle costruzioni intrecciandolo con la natura materica; affinché ciò avvenga, sono necessarie un insieme di tecnologie in grado di 'connettere' la realtà con la dimensione digitale, ma è altresì necessario predisporre sistemi e piattaforme in grado di ricevere dati ed informazioni "real-time".

In questo lavoro di tesi, si è focalizzata l'attenzione sullo sviluppo piattaforma per la gestione il controllo real-time della sicurezza nel settore delle costruzioni. L'obiettivo della piattaforma è quello di valutare scenari di rischio attuali e futuri in relazioni ai dati in entrata forniti dalla rete di sensori. La piattaforma sarà composta da molte parti: reti dei sensori, allarmi, sistemi di comunicazione dati, ambiente virtuale ecc., che permetteranno di riprodurre uno scenario di rischio tale da poterlo monitorare in tempo reale.

Lo studio ha portato all'individuazione degli strumenti e delle tecniche che più sarebbero state utili al fine del nostro lavoro. Individuate le tecniche e gli strumenti che nella discussione della tesi andremo ad approfondire, si è fatta una forte analisi sul come rappresentare e valutare il rischio attraverso le reti Bayesiane. Si è quindi sviluppata una rete decisionale per l'individuazione del rischio di impatto, rischio normato e da rispettare in qualunque situazione di cantiere ci si trovi. La rete decisionale è stata poi implementata in un ambiente di simulazione dinamica.

Nei capitoli finali verranno presentati il caso studio, le simulazioni svolte e i risultati ottenuti a conferma della bontà del lavoro eseguito.

LA GESTIONE DELLA SICUREZZA NEI CANTIERI EDILI

La gestione della sicurezza nelle costruzioni attualmente è trattata attraverso approccio programmatico che segue il quadro normativo vigente, che vede il D.lgs. 81/2008 come normativa di riferimento. In questo capitolo, verranno illustrato le figure professionali coinvolte nell'iter procedurale previsto dalla normativa. Mentre nel paragrafo 1.2 verranno illustrati i costi della sicurezza.

Nel capitolo 1.3 verranno brevemente descritti la stesura di un PSC, nel quale vengono individuati e valutati i rischi, questi vengono poi combinati tra loro per identificare le possibili interferenze e successivamente vengono definite le misure di prevenzione e protezione necessarie (per garantire il rispetto delle prescrizioni da normativa) ed i relativi costi. Sarà poi compito del CSE verificare i POS, garantire il coordinamento tra le imprese esecutrici, far applicare il PSC e modificarlo nel caso in cui siano necessarie varianti in corso d'opera.

Si può affermare che i limiti dell'approccio programmatico risiedano proprio in questa seconda fase, cioè la fase esecutiva. Essendo il processo costruttivo caratterizzato da forti aleatorietà, ed essendo il cantiere un ambiente dinamico risulta complicato monitorare, con le classiche figure professionali coinvolte, la gestione della sicurezza in cantiere e soprattutto risulta complicato aggiornarla in tempo reale.

Queste problematiche ci hanno portato a studiare lo stato dell'arte il quale ci ha suggerito un possibile approccio differente che sopperisca a questi limiti, il quale verrà descritto nel capitolo 2.

1.1 Le figure professionali per la gestione della sicurezza

Nel processo edilizio molte figure professionali sono coinvolte dal nuovo impianto normativo del T.U. 81/2008 nelle responsabilità per la tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori. L'entità del cantiere, il numero di imprese che vi lavorano e la tipologia delle lavorazioni sono i parametri a cui la normativa fa riferimento per definire gli obblighi a cui sono assoggettate le varie figure che rientrano nel processo delle lavorazioni da eseguirsi.

1.1.1 Il committente

Il committente e il responsabile dei lavori sono figure cardine del processo edilizio. Il T.U. 81/2008 ne indica in modo chiaro funzioni e responsabilità. Il committente è colui per il quale viene realizzata un'opera edile. L'art. 89 del T.U. lo definisce con chiarezza.

D.Lgs. 81/2008 - **Art. 89** - Definizione

committente: il soggetto per conto del quale l'intera opera viene realizzata, indipendentemente da eventuali frazionamenti della sua realizzazione. Nel caso di appalto di opera pubblica, il committente è il soggetto titolare del potere decisionale e di spesa relativo alla gestione dell'appalto;

Nel caso di opere private il committente dunque è colui che di proprio paga le opere e per le opere pubbliche il committente non è il Sindaco, l'assessore, la giunta o ancora il Consiglio Comunale, ma il dirigente titolare del potere decisionale e di spesa. Al committente la normativa attribuisce significative responsabilità nelle scelte operative necessarie nella realizzazione di opere edili. La norma ha però tenuto conto delle conseguenze di tali attribuzioni, introducendo la figura del responsabile dei lavori.

La norma ha previsto che il committente possa spogliarsi di gran parte delle proprie responsabilità nominando un responsabile dei lavori (che può essere il progettista o il direttore dei lavori) che prenderà quasi tutte le decisioni in capo al committente, assumendosene anche la responsabilità. Il responsabile dei lavori nomina il Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione (CSP) e il Coordinatore per la Sicurezza in fase di Esecuzione (CSE), quando dovuto, sempre in relazione agli obblighi conferitigli dal committente. Il committente, o il responsabile dei lavori, comunica alle imprese affidatarie ed esecutrici e ai lavoratori autonomi il nominativo dei coordinatori per la sicurezza. Tali nominativi devono essere indicati anche nel cartello di cantiere. Il committente e/o il responsabile dei lavori, nominato il CSE, può passare alla fase di affidamento dei lavori a un'impresa.

L'affidamento dei lavori non può avvenire solo sulla base dell'offerta economicamente più conveniente. La normativa impone infatti che il committente e/o il responsabile dei lavori accerti l'idoneità tecnico-professionale dell'impresa che ha presentato l'offerta. Per verificare l'idoneità tecnica professionale, il committente dovrà chiedere alle imprese esecutrici una dichiarazione sull'organico medio annuo e sul contratto collettivo di lavoro applicato ai dipendenti, gli estremi delle denunce dei lavoratori fatte a INPS, INAIL e Casse Edili e trasmettere all'amministrazione competente, prima dell'inizio dei lavori, il nominativo delle imprese esecutrici dei lavori e la documentazione. Nel caso di lavori privati, assenza del permesso di costruire e importo dei lavori inferiore a € 100 000, la verifica dell'idoneità dell'impresa viene semplificata e si considera soddisfatta mediante la presentazione da parte dell'impresa del certificato di iscrizione alla Camera di Commercio, Industria e Artigianato e del Documento Unico di Regolarità Contributiva (DURC), corredato da autocertificazione in ordine al possesso degli altri requisiti previsti dall'Allegato XVII del T.U.

Il committente o il responsabile dei lavori sono tenuti unicamente alla verifica che il CSP e il CSE eseguano correttamente i propri compiti. Se il coordinatore omette le sue funzioni, il committente o il responsabile dei lavori devono dimostrare di avere adempiuto agli obblighi di verifica con la necessaria diligenza.

1.1.2 Il responsabile dei lavori

D.Lgs. 81/2008 - **art. 89**

responsabile dei lavori: soggetto incaricato, dal committente, della progettazione o del controllo dell'esecuzione dell'opera; tale soggetto coincide con il progettista per la fase di progettazione dell'opera e con il direttore dei lavori per la fase di esecuzione dell'opera. Nel campo di applicazione del Decreto Legislativo 12 aprile 2006, n. 163, e successive modificazioni, il responsabile dei lavori è il responsabile unico del procedimento RUP.

Il committente in sintesi può incaricare un soggetto per la progettazione o per il controllo dell'esecuzione dell'opera. Risulta chiaro che durante la fase di progettazione dell'opera il responsabile dei lavori coincide con il progettista e durante la fase di esecuzione dell'opera il responsabile dei lavori coincide con il direttore dei lavori.

Il responsabile dei lavori ha anche il compito di predisporre la notifica preliminare di cui all'art. 90 del T.U., prima dell'inizio dei lavori.

Per i lavori pubblici sia nella fase di progettazione sia in quella di esecuzione il responsabile dei lavori è sempre il Responsabile Unico del Procedimento (RUP). Responsabile Unico del Procedimento (RUP) - Tecnico nominato dalle Amministrazioni Pubbliche nell'ambito del proprio organico sotto la cui diretta responsabilità e vigilanza sono eseguite le fasi di progettazione, affidamento ed esecuzione di ogni singolo lavoro pubblico appaltato. Gli obblighi del RUP coincidono con quelli del committente e sono elencati all'art. 90 del D.Lgs. 81/2008.

1.1.3 Datore di lavoro

L'impresa si può definire come un'attività economica professionalmente organizzata al fine della produzione o dello scambio di beni o servizi. Questa definizione è desumibile dalla definizione di "imprenditore" riportata all'art. 2082 del Codice Civile. Il T.U. 81/2008 art. 2 comma 1 lettera c) la definisce come «il complesso della struttura organizzata dal datore di lavoro pubblico o privato».

Le responsabilità di un'impresa in materia di sicurezza sono molto complesse e riguardano tutte le figure aziendali, compreso il Consiglio di amministrazione e il management. Incidenti occorsi recentemente in grandi fabbriche hanno evidenziato questo aspetto, forse in parte sottovalutato dalle aziende stesse.

In tali questioni hanno assunto importanza rilevante quelle legate alla delega delle funzioni inerenti alla sicurezza da parte del datore di lavoro. Anche in questo caso il miglior riferimento è il T.U.

D.Lgs. 81/2008 - **art. 16**,

La delega di funzioni da parte del datore di lavoro, ove non espressamente esclusa, è ammessa con i seguenti limiti e condizioni:

- a) *che essa risulti da atto scritto recante data certa;*
- b) *che il delegato possenga tutti i requisiti di professionalità ed esperienza richiesti dalla specifica natura delle funzioni delegate;*
- c) *che essa attribuisca al delegato tutti i poteri di organizzazione, gestione e controllo richiesti dalla specifica natura delle funzioni delegate;*
- d) *che essa attribuisca al delegato l'autonomia di spesa necessaria allo svolgimento delle funzioni delegate.*

e) che la delega sia accettata dal delegato per iscritto.

D.Lgs. 81/2008 - **art. 17**,

Il datore di lavoro non può delegare le seguenti attività:

- a) la valutazione di tutti i rischi con la conseguente elaborazione del documento previsto dall'articolo 28;*
- b) la designazione del responsabile del servizio di prevenzione e protezione dai rischi.*

In sintesi, per la sicurezza il datore di lavoro è colui che ha il potere di decidere e di investire denaro per adempiere agli obblighi di sicurezza. Nelle aziende, in assenza di deleghe specifiche e formali, è il Presidente del Consiglio di amministrazione. Il datore di lavoro può delegare solo una parte delle proprie responsabilità riguardo alla sicurezza, così come previsto dall'art. 16 del T.U., mentre non può delegare le responsabilità di cui all'art. 17 del T.U. L'azienda, ai sensi del Capo III del T.U., deve istituire il servizio di prevenzione e protezione. A tal fine l'azienda individua i responsabili e gli addetti dei servizi di prevenzione e protezione, che possono essere interni o anche esterni all'azienda. Il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione (RSPP) provvede ad assolvere i compiti di cui all'art. 33 del T.U. Il servizio di prevenzione e protezione aziendale, introdotto già dalla L. 626/94 e recepito nel T.U., è finalizzato essenzialmente a individuare i fattori di rischio aziendale e nel cantiere, a valutarne la portata e a stabilire conseguentemente le misure protettive per la sicurezza e la salute dei lavoratori.

Il datore di lavoro è anche tenuto a istituire un servizio di formazione e informazione dei lavoratori. Infine, il datore di lavoro deve aver istituito un servizio aziendale per la gestione delle emergenze. Tutto ciò richiede che le emergenze vengano previste e che tutti siano informati sulle proprie incombenze quando esse si verificano. Dunque, anche in questo caso occorre organizzazione, formazione e informazione. Infine, il datore di lavoro deve nominare un medico competente aziendale. Questa figura, introdotta dalla L. 626/94, ha il compito di effettuare la sorveglianza sanitaria mediante accertamenti preventivi e periodici. La sorveglianza deve essere fatta in maniera attiva, con visite sia ai lavoratori sia agli ambienti di lavoro per certificarne la salubrità.

L'impresa affidataria, o appaltatore, è l'impresa titolare del contratto di appalto con il committente. L'impresa affidataria si avvale di proprie maestranze, ma può anche avvalersi del lavoro di imprese esecutrici, o subappaltatore, e/o di lavoratori autonomi. Ogni impresa esecuttrice, prima di iniziare i lavori, deve redigere e consegnare all'impresa affidataria un Piano Operativo di Sicurezza (POS) che

descrive le modalità di gestione della propria attività in sicurezza. Il datore di lavoro dell'impresa affidataria deve verificare la congruenza dei POS delle imprese esecutrici rispetto al proprio, trasmettere tutti i POS al coordinatore in fase di esecuzione, coordinare gli interventi finalizzati all'attuazione delle misure generali di sicurezza e verificare che le imprese esecutrici o i lavoratori autonomi abbiano i requisiti di idoneità tecnico-professionale richiesti in relazione ai lavori loro affidati.

1.1.4 Direttore tecnico

Il direttore tecnico di cantiere è la persona che per conto dell'appaltatore gestisce il cantiere. Questo ruolo può essere svolto sia da un dipendente dell'impresa sia da un professionista esterno, con specifico e formale incarico. La figura del direttore tecnico di cantiere non va confusa con quella del direttore dei lavori. Il direttore tecnico di cantiere è determinante nella qualificazione dell'impresa di cui al D.P.R. 25 gennaio 2000, n. 34. Questo decreto infatti, lega le caratteristiche tecniche che deve avere il direttore tecnico alla qualificazione dell'Impresa.

D.P.R. 34/2000 – art. 26,

1. La direzione tecnica è l'organo cui competono gli adempimenti di carattere tecnico-organizzativo necessari per la realizzazione dei lavori. La direzione tecnica può essere assunta da un singolo soggetto, eventualmente coincidente con il legale rappresentante dell'impresa, o da più soggetti.

2. I soggetti ai quali viene affidato l'incarico di direttore tecnico sono dotati, per la qualificazione in categorie con classifica di importo superiore alla IV, di laurea in ingegneria, in architettura, o altra equipollente, di diploma universitario in ingegneria o in architettura o equipollente, di diploma di perito industriale edile o di geometra; per le classifiche inferiori è ammesso anche il possesso del diploma di geometra e di perito industriale edile o di equivalente titolo di studio tecnico, ovvero di requisito professionale identificato nella esperienza acquisita nel settore delle costruzioni quale direttore di cantiere per un periodo non inferiore a cinque anni da comprovare con idonei certificati di esecuzione dei lavori attestanti tale condizione.

3. I soggetti designati nell'incarico di direttore tecnico non possono rivestire analogo incarico per conto di altre imprese qualificate; essi producono una dichiarazione di unicità di incarico. Qualora il direttore tecnico sia persona diversa dal titolare dell'impresa, dal legale rappresentante, dall'amministratore e dal socio, deve essere dipendente dell'impresa stessa o in possesso di contratto d'opera professionale regolarmente registrato. Per i lavori che hanno ad oggetto beni immobili

soggetti alle disposizioni in materia di beni culturali e ambientali e per gli scavi archeologici, la direzione tecnica è affidata a soggetto in possesso di laurea in conservazione di beni culturali o in architettura e, per la qualificazione in classifiche inferiori alla IV, anche a soggetto dotato di esperienza professionale acquisita nei suddetti lavori quale direttore di cantiere per un periodo non inferiore a cinque anni da comprovare con idonei certificati di esecuzione dei lavori attestanti tale condizione rilasciati dall'autorità preposta alla tutela dei suddetti beni [...].

Il direttore tecnico di cantiere, come già citato, è il diretto responsabile del processo tecnico, economico e produttivo di un cantiere edile. Il direttore di cantiere ricopre un ruolo di elevata responsabilità. Le sue attività principali riguardano la progettazione operativa e la gestione di tutte le attività di cantiere, sia quelle realizzate dai suoi dipendenti sia da eventuali subappaltatori. Egli assicura inoltre l'adeguato rispetto delle norme di sicurezza e verifica che sia costantemente aggiornata anche la contabilità relativa all'avanzamento dei lavori.

Questa figura professionale svolge gran parte del suo lavoro direttamente in cantiere. Può lavorare come dipendente o come libero professionista, rapportandosi continuamente con il committente, oltre che con i tecnici e maestranze (capisquadra, operai, elettricisti ecc.).

Art. 6. *«Disciplina e buon ordine dei cantieri» L'appaltatore, tramite il direttore di cantiere assicura l'organizzazione, la gestione tecnica e la conduzione del cantiere.*

La direzione del cantiere è assunta dal direttore tecnico dell'impresa o da altro tecnico formalmente incaricato dall'appaltatore. Rispetto ai piani di sicurezza, componente centrale in materia, il direttore tecnico deve collaborare alla predisposizione del piano operativo di sicurezza (POS), anche alla luce del PSC del committente, ovvero del piano sostitutivo di sicurezza (PSS) del singolo cantiere.

Spesso il direttore tecnico è affiancato da altre figure professionali, il preposto. Il Preposto cura con continuità l'esecuzione e lo svolgimento dei lavori, controlla l'efficacia delle misure di sicurezza adottate, sovrintende il magazzino e fornisce assistenza alle imprese esecutrici. Il preposto è una delle figure fondamentali per la sicurezza nei cantieri edili. Egli è la persona a diretto contatto con le maestranze e quindi quello che in tempo reale può gestire le diverse situazioni presenti nel cantiere e fare in modo che gli operai si attengano alle misure di sicurezza. Risulta chiaro come il preposto deve semplicemente assicurarsi in modo continuo ed efficace che il lavoratore segua le disposizioni di sicurezza impartite ed eventualmente utilizzi gli strumenti di protezione prescritti; egli deve effettuare tale controllo direttamente, cioè personalmente e senza intermediazione di altri; tuttavia «ciò non significa che il preposto non possa allontanarsi dal luogo nel quale opera il lavoratore, né dedicarsi

anche ad altri compiti di sorveglianza o di lavoro» (Cassazione Penale sez. IV, 5 novembre 1987, Grotti).

1.1.5 Responsabile del servizio di prevenzione e protezione (RSPP)

Il Responsabile del Servizio di Prevenzione e Protezione (RSPP) è la persona, con capacità e requisiti professionali, incaricata dal datore di lavoro per l'individuazione e valutazione dei rischi e delle relative misure di sicurezza. Può essere persona esterna all'impresa. Egli provvede al controllo sistematico dell'attuazione di quanto previsto dal piano operativo per la sicurezza. Il responsabile del servizio di prevenzione e protezione deve essere nominato previa consultazione dell'RLS/RLST. L'RSPP deve essere segnalato all'ASL e alla Direzione Provinciale del Lavoro, allegando curriculum professionale e requisiti. L'RSPP deve:

- collaborare all'analisi e valutazione dei rischi;
- elaborare misure di prevenzione e protezione in relazione alla specificità dei luoghi di lavoro;
- definire procedure di sicurezza per le varie fasi lavorative;
- proporre programmi di formazione e informazione dei lavoratori;
- partecipare alle riunioni periodiche di prevenzione e protezione indette dal datore di lavoro in società che occupino più di 15 dipendenti;
- fornire ai lavoratori le informazioni relative ai rischi individuati, alle misure da adottare, alle procedure di gestione delle emergenze.



1.1 -Schema-Figure aziendali attive in un cantiere edile.

1.1.6 Maestranze

L'impresa esecutrice si avvale per i lavori di propri lavoratori dipendenti. Questi devono essere regolarmente assunti, formati e informati sulle loro competenze e responsabilità. Non devono essere impiegati nemmeno momentaneamente per lavorazioni diverse da quelle contrattuali e comunque per le quali non siano stati formati né informati. Per maestranze si intende il complesso dei lavoratori che lavorano in un'azienda, in un'impresa. Ogni lavoratore deve prendersi cura della propria salute e sicurezza e di quella delle altre persone presenti sul luogo di lavoro, su cui possono ricadere gli effetti delle sue azioni [fig. 5]. Non sempre i lavoratori edili sono scrupolosi nell'utilizzo dei Dispositivi di Protezione Individuali (DPI) quali caschi e cinture di sicurezza, e delle protezioni collettive. Ogni lavoratore deve pretendere dall'azienda di poter lavorare in sicurezza, ma deve anche farsi parte attiva del sistema sicurezza. Il T.U. ha recepito questa necessità, attribuendo agli operai precise responsabilità (art. 20):

- contribuire all'adempimento degli obblighi previsti a tutela della salute e sicurezza;
- osservare le disposizioni e le istruzioni impartite ai fini della protezione collettiva e individuale;
- utilizzare correttamente le attrezzature di lavoro, le sostanze e i preparati pericolosi, i mezzi di trasporto e i dispositivi di sicurezza;
- utilizzare in modo appropriato i dispositivi di protezione messi a loro disposizione e non rimuovere o modificare senza autorizzazione i dispositivi di sicurezza o di segnalazione o di controllo;
- partecipare ai programmi di formazione e di addestramento organizzati dal datore di lavoro;
- sottoporsi ai controlli sanitari previsti dal T.U.;
- non compiere di propria iniziativa operazioni o manovre non di competenza o che possono compromettere la sicurezza propria o degli altri;
- esporre una tessera di riconoscimento con foto, generalità e indicazione del datore di lavoro.

1.1.7 Rappresentante dei Lavoratori per la Sicurezza (RLS)

La L. 626/94, recepita nel T.U., ha istituito la figura del Rappresentante dei Lavoratori per la Sicurezza (RLS), eletto dai lavoratori o designato dalle organizzazioni sindacali (in questo caso è denominato Rappresentante dei Lavoratori per la Sicurezza in ambito Territoriale (RLST), che affianca il CSP e il CSE e rappresenta gli interessi dei lavoratori. Il rappresentante dei lavoratori ha questi compiti:

- dà parere consultivo sulla valutazione dei rischi, sulle misure di prevenzione e protezione da adottare, sulle modalità organizzative per la formazione e informazione dei lavoratori, sulla designazione degli addetti al servizio di prevenzione e protezione;
- segnala al datore di lavoro i rischi individuati e controlla l'effettiva predisposizione delle misure di prevenzione e sicurezza;
- se valuta insufficienti le misure di prevenzione, fa ricorso alle autorità competenti (organi di vigilanza).

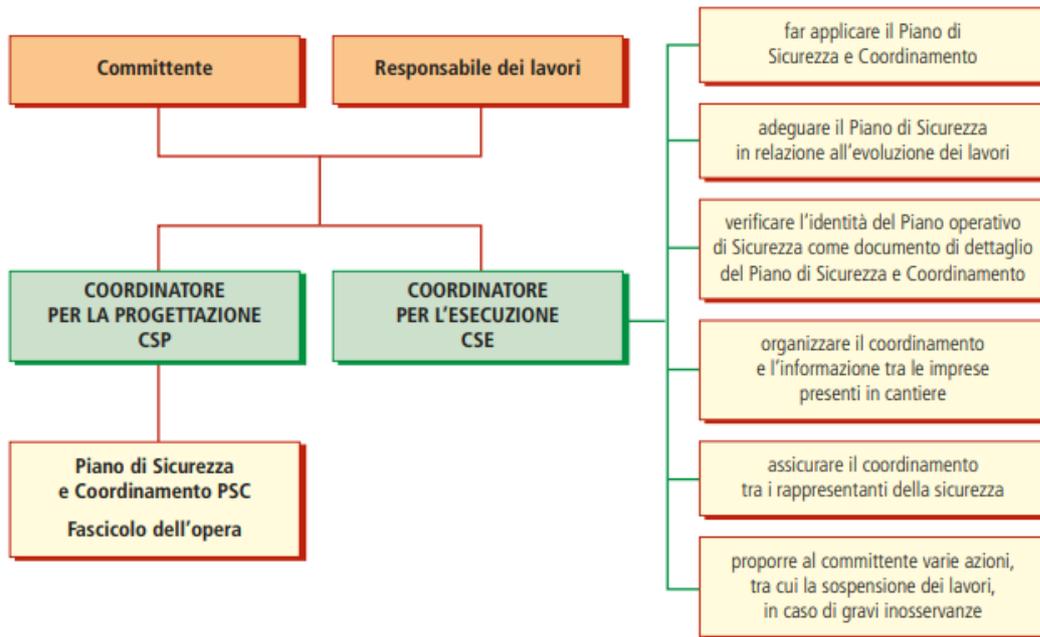
Il rappresentante dei lavoratori per la sicurezza in ogni caso non deve mai essere oggetto di alcun pregiudizio e/o forzatura da parte del datore di lavoro ed è tutelato dalla legge per le rappresentanze sindacali. Il datore di lavoro deve anzi agevolare i suoi compiti, rispettando i tempi necessari e fornendo i mezzi necessari per l'esercizio delle sue funzioni.

1.1.8 Coordinatori della sicurezza

Come abbiamo visto, il committente o il responsabile dei lavori, nei cantieri in cui è prevista la presenza, anche non contemporanea, di più imprese esecutrici, designa:

- il coordinatore della sicurezza per la progettazione dell'opera (CSP), contestualmente all'affidamento dell'incarico di progettazione;
- il coordinatore della sicurezza per l'esecuzione dei lavori (CSE), prima dell'affidamento dei lavori.

Il T.U. sottolinea che il coordinatore per l'esecuzione dei lavori non può essere il datore di lavoro dell'impresa esecutrice, né un suo dipendente, né il responsabile del servizio di prevenzione e protezione, dallo stesso designato.



1.2 -Schema-Figure professionali partecipanti ad un processo edilizio.

1.1.8.1 Coordinatore della sicurezza in fase di progettazione (CSP)

Il Coordinatore della Sicurezza in fase di Progettazione (CSP) svolge i compiti di progettazione e pianificazione delle misure di sicurezza sin dalla fase di progettazione: collabora con il progettista (quando le due figure non coincidono) per integrare le scelte progettuali e di impostazione del cantiere con le scelte che riguardano la salute e la sicurezza del lavoro nelle fasi di esecuzione dell'opera e nell'uso e nella manutenzione della stessa. È un professionista al quale viene dato l'incarico di valutare, già in fase di progetto, che l'opera da costruire abbia caratteristiche tali da poter essere realizzato applicando le norme di sicurezza.



1.3 – Schema- Coordinatore della sicurezza

Il CSP, durante la progettazione dell'opera e comunque prima della richiesta di presentazione delle offerte, deve redigere il Piano di Sicurezza e di Coordinamento (PSC) e determinare i costi della sicurezza.

Per stendere il PSC deve:

- individuare, analizzare e valutare i rischi; (Cap. 2 Il rischio – valutazione del rischio)
- decidere le procedure, gli apprestamenti e le attrezzature atti a garantire il rispetto delle norme per la prevenzione degli infortuni e la tutela della salute dei lavoratori;
- stimare i costi della sicurezza;
- individuare le prescrizioni da correlare alla criticità di fasi di lavoro contemporanee;
- individuare misure per ovviare alla presenza simultanea di più imprese o lavoratori autonomi.

Il CSP deve, inoltre, predisporre il fascicolo tecnico dell'opera, che comprende tutti gli atti e le informazioni utili per poter effettuare in sicurezza modificazioni all'opera successivamente al suo completamento. Il fascicolo non viene redatto nei casi di lavori di manutenzione ordinaria.

1.1.8.2 Coordinatore della sicurezza in fase di esecuzione (CSE)

Il committente e/o il responsabile dei lavori designa il Coordinatore della Sicurezza in fase di Esecuzione (CSE) sempre quando in cantiere è prevista la presenza di più imprese, indipendentemente dall'importo dei lavori. Il CSE è un tecnico con competenze specifiche in materia di sicurezza nei cantieri. Ha le stesse caratteristiche del CSP. Viene designato dal committente prima dell'affidamento dei lavori e opera, durante la loro esecuzione, per garantire il coordinamento e l'informazione tra i diversi soggetti presenti nel cantiere. Prima dell'inizio dei lavori al CSE vengono trasmessi i POS delle imprese esecutrici; il CSE ne valuta la compatibilità con il PSC e richiede modifiche e integrazioni. Se lo ritiene opportuno adegua il PSC in base a eventuali proposte delle imprese. Il CSE verifica, in cantiere, con azioni di coordinamento e controllo, l'applicazione del PSC da parte delle imprese esecutrici e dei lavoratori autonomi, aggiorna in corso d'opera eventuali procedure e verbalizza quanto rilevato durante i controlli periodici. Organizza il coordinamento tra imprese e lavoratori autonomi con diverse azioni:

- verifica le gerarchie e le responsabilità, i compiti e le competenze delle imprese e dei lavoratori autonomi operanti in cantiere;

- promuove incontri periodici direttamente con i tecnici e i lavoratori per informarli sul PSC e sugli eventuali aggiornamenti delle procedure;
- verbalizza ogni determinazione assunta e concordata con le imprese ed i lavoratori;
- verifica che i lavoratori siano stati informati dalle imprese sugli adeguamenti concordati.

Spetta al CSE segnalare al committente o al responsabile dei lavori le eventuali inosservanze alle disposizioni di sicurezza, proponendo la sospensione dei lavori, l'allontanamento delle imprese o dei lavoratori autonomi dal cantiere, o la risoluzione del contratto. Nel caso in cui il committente o il responsabile dei lavori non adottino alcun provvedimento in merito, il CSE deve comunicare l'inadempienza all'Azienda Sanitaria Locale e alla Direzione Provinciale del Lavoro territorialmente competenti. In caso di grave pericolo, il CSE deve sospendere i lavori fino alla verifica degli avvenuti adeguamenti effettuati dalle imprese interessate.

Art 131 – *«Il direttore di cantiere e il coordinatore della sicurezza in fase di esecuzione, ciascuno nell'ambito delle proprie competenze, vigilano sull'osservanza dei piani di sicurezza»*

1.1.9 Direttore dei lavori

Il Direttore dei Lavori (DL) è il soggetto designato dal committente per controllare la corretta esecuzione dei lavori; in particolare a lui spetta la direzione e la supervisione dei lavori per accertarne la regolare esecuzione e per il collaudo. È una figura di particolare importanza nella realizzazione delle opere pubbliche. Oltre che con il committente, il direttore dei lavori si relaziona con il progettista, il responsabile della sicurezza, il direttore di cantiere, il direttore operativo e l'ispettore di cantiere (se presenti) e con le maestranze. Il direttore dei lavori svolge molteplici attività prima, durante e dopo la fine dei lavori:

- dirige e controlla sotto l'aspetto tecnico, contabile e amministrativo la corretta esecuzione dei lavori, nel rispetto del contratto d'appalto e dei suoi allegati;
- cura che i lavori siano eseguiti a regola d'arte e in conformità al progetto e al contratto d'appalto;
- verifica periodicamente il possesso e la regolarità da parte dell'appaltatore della documentazione prevista dalle leggi in materia di obblighi nei confronti dei dipendenti;
- dialoga con il CSP e il CSE;

- sospende i lavori su ordine del committente o del responsabile dei lavori e dietro segnalazione del CSE;
- consente la sospensione delle singole lavorazioni nel caso in cui si riscontri un pericolo grave e immediato per i lavoratori.

La norma prevede che la sicurezza nel cantiere possa essere esclusa dall'incarico di direttore dei lavori (art. 151 del regolamento). Se così avviene, essa sarà a carico del committente, del responsabile dei lavori e del CSE. Nei lavori pubblici, se il direttore dei lavori non possiede i requisiti per poter svolgere il ruolo di CSE, allora il committente o il responsabile dei lavori nominano un direttore operativo con il ruolo di coordinatore per la sicurezza. Per le opere pubbliche le funzioni del direttore dei lavori sono definite dagli artt. 147, 148, 149 e 150 del D.P.R. 207 del 2010, che costituisce il nuovo regolamento per i lavori pubblici. In relazione alla complessità dell'opera da realizzare, è prevista la costituzione di un ufficio direzione lavori, composto dal direttore dei lavori e da uno o più suoi assistenti:

- il direttore operativo
- l'ispettore di cantiere.

È da sottolineare il fatto che, comunque, la responsabilità compete al direttore dei lavori, che si avvale della collaborazione di questi assistenti. Queste figure vigilano durante l'esecuzione dell'opera per accertarne la regolare esecuzione e per il collaudo, non hanno responsabilità nel campo della sicurezza del cantiere.

1.2 Costi per la sicurezza

1.2.1 Costi per la mancata sicurezza

Il tema sul costo della sicurezza è un aspetto ostico da gestire data la sua delicatezza e difficoltà, ma in egual modo un aspetto da non sottovalutare. Di fatto è stato analizzato nel dettaglio dal progetto SeCANTE a cura di Cristina Artolomei, Samuela Felicioni, Daniele Ganapini (NUOVAQUASCO).

Dall'analisi effettuata sono emersi diversi spunti:

Uno studio Eurostat del 2010 mette in luce come, nel corso degli ultimi 12 mesi, il 3,2% della forza lavoro dei 27 Paesi Membri sia stato coinvolto da un infortunio sul lavoro (circa 6,9 milioni di lavoratori) e l'8,6% abbia riportato un problema di salute legato al lavoro: non meno di 1 lavoratore europeo su 10 è ogni anno coinvolto da un infortunio sul lavoro o da un problema di salute connesso all'attività lavorativa svolta. Gli infortuni e le malattie professionali, derivanti da una scarsa o assente prevenzione e sicurezza nei luoghi di lavoro, comportano costi rilevanti per le aziende. Nonostante questa sia una realtà indiscutibile in particolare per le piccole imprese, dove il peso finanziario degli incidenti sul lavoro può essere considerevole non è comunque facile convincere i responsabili decisionali della "rendita" economica di condizioni lavorative più salubri. Un modo efficace per provare a cambiare la situazione, può consistere nell'effettuare stime economico-finanziarie, in grado di fornire una visione realistica dei costi complessivi degli infortuni e dei danni derivati da una mancata sicurezza, e di conseguenza, l'insieme dei vantaggi derivanti dalla loro prevenzione. Secondo l'Organizzazione Internazionale del Lavoro (ILO) il costo totale degli infortuni sul lavoro ammonta a circa il 4% del PIL mondiale (ILO, 2006), mentre l'Agenzia Europea per la Salute e Sicurezza sul lavoro stima che oscilli fra il 2,6 e il 3,8% del PIL degli Stati Membri. Come riferisce il rapporto Benosh, la stima relativa all'incidenza tra il 2 e il 4% degli infortuni sul lavoro e delle malattie professionali sul PIL viene confermata anche da altre fonti: lo conferma uno studio olandese secondo il quale i costi di infortuni, malattie e lunghi periodi di assenza rappresentano il 3% del PIL nazionale; lo conferma altresì uno studio del Ministero degli Affari Sociali e della Salute finlandese secondo il quale tale costo nel 2000 è stato circa di 2.000 miliardi di euro, il 2% del PIL. Il costo medio di un infortunio con almeno tre giorni di assenza si attesta sui 6.900€; lo attesta, infine, uno studio spagnolo, a cura del sindacato, secondo il quale il costo totale annuo si aggira sui 12 miliardi di euro, circa 1,72% del PIL.

Entrando nel merito dell'Italia, l'INAIL ha calcolato che a metà anni '90 il costo totale degli infortuni sul lavoro ammontasse a 55 mila miliardi di lire; dopo circa 10 anni ha utilizzato una nuova

metodologia (che tiene conto anche degli infortuni in itinere, del lavoro nero e del danno biologico) per stimare un costo minimo di 45 miliardi di euro (circa il 3% del PIL nazionale). Il Rapporto Italia 2010 realizzato annualmente da Eurispes conferma che gli infortuni sul lavoro costano circa 40 miliardi di euro l'anno: calcolando che nel 2008 gli infortuni sul lavoro sono stati 837.940 e considerando che ogni infortunio costa circa 50 mila euro, Eurispes giunge alla conclusione che i costi economici e sociali abbiano superato i 43 miliardi di euro (2,8% del PIL relativo all'anno 2008). Sulla base di questi calcoli, una riduzione del 10% degli infortuni porterebbe ad un "risparmio" di circa 4,4 miliardi di euro mentre, con una riduzione del solo 1% il risparmio sarebbe comunque di 438 milioni di euro. Diversi sono gli studi condotti sia a livello internazionale che nazionale sul tema dei costi relativi alla mancata sicurezza ma la loro definizione e stima non ha, ad oggi, trovato una versione condivisa. Il tema risulta difatti molto complesso ed articolato. Tali costi devono infatti essere analizzati da diversi punti di vista poiché la mancanza di sicurezza impatta contemporaneamente sui lavoratori infortunati, sulle aziende, sulla società, comportando tuttavia specifiche e diverse conseguenze economiche: i costi non sono equamente distribuiti fra questi tre gruppi e, inoltre, la percezione dell'evento è diversa a seconda del gruppo al quale si fa riferimento. In generale si possono distinguere tre macrosistemi di costi, in base a chi è chiamato a supportarli: si può parlare di costi per il lavoratore, di costi dell'impresa e di costi sociali, intendendo con questi ultimi quei costi non sostenuti direttamente dalle imprese responsabili, ma che ricadono sulla collettività, dunque a carico del Paese, spesso nel medio e lungo periodo e la cui stima è estremamente complessa. Alcuni studi ritengono che il 76% del costo medio di un infortunio sul lavoro viene sostenuto dalla società, il 13% dall'infortunato e l'11% dall'azienda. L'Australian Industry Commission invece divide i costi più equamente: circa il 30% viene sostenuto dal lavoratore e dalla famiglia, il 40% dall'azienda, il 30% dalla società. Tuttavia, gli autori affermano che la spesa a carico della società aumenta con la gravità dell'evento: può diventare del 40% o diminuire fino al 10% per eventi meno gravi. I costi degli infortuni meno gravi sono invece sostenuti maggiormente dall'impresa. Essi possono essere inoltre classificati in diverse modalità, per cui nella letteratura analizzata si rintracciano diversi criteri di definizione, anche sovrapponibili:

- costi economici (ad es. i danni e il mancato guadagno)
- non economici (ad es. i "costi" per il danneggiamento di valori e quelli emotivo/morale),
- fissi (ad es. il premio assicurativo)
- variabili (ad es. i rimborsi per i danni in base alla gravità dell'evento)
- interni (ad es. che gravano sull'azienda)

- esterni (ad es. salari persi e tempo speso dall'infortunato)
- diretti (ad es. quelli che rientrano nel bilancio dell'azienda come le spese legali e il premio assicurativo)
- indiretti (ad es. l'interruzione della produzione e il dover selezionare ed assumere dei lavoratori in sostituzione).

In merito a questi ultimi, in letteratura si ritiene che la dimensione dei costi indiretti è in relazione inversa alla gravità dell'infortunio: meno grave è l'infortunio, maggiore sarà il rapporto dei costi indiretti su quelli diretti (4,5 volte maggiore). Inoltre, gli oneri di natura indiretta non sono facilmente identificabili e conteggiati in un bilancio aziendale.

- Costi d'impresa

Molte imprese hanno scarsa conoscenza dei costi legati agli infortuni ed alle malattie professionali, spesso non hanno le risorse né il tempo per calcolarli, a volte manca l'esperienza e al momento scarseggiano anche strumenti di valutazione snelli ed adattabili al contesto aziendale, soprattutto per le imprese di piccole e medie dimensioni. Eppure, in letteratura numerosi studi mettono in luce come le conseguenze di infortuni e malattie professionali da un lato aumentino i costi per l'azienda che li subisce, dall'altro ne diminuiscano i ricavi. L'aumento dei costi è principalmente legato al tempo di lavoro non produttivo e non riguarda solo i giorni di assenza della vittima (il cui salario è parzialmente rimborsato dal sistema assicurativo) ma anche il tempo speso per fronteggiare immediatamente l'infortunio o per l'adozione di misure di riorganizzazione dell'attività produttiva. Spesso questi tempi rimangono nascosti e non vengono associati all'evento che genera tali costi (l'infortunio o la malattia professionale), rendendo difficile una loro quantificazione economica. L'utilizzo del linguaggio dei costi potrebbe essere un modo per parlare il linguaggio aziendale e dimostrare l'impatto finanziario degli infortuni e delle malattie professionali potrebbe essere una leva per il cambiamento. A tal proposito l'Inail ha stimato che il totale dei costi a carico dell'impresa può essere fino a 7 volte superiore rispetto a quello rappresentato dal solo premio assicurativo ed individua nella prevenzione il principale strumento di riduzione degli infortuni e delle malattie professionali. Le aziende dovrebbero percepire le attività di prevenzione non puramente come costi ma, piuttosto, come investimenti: il guadagno in termini economici è, infatti, quasi sempre superiore all'impegno finanziario delle attività di prevenzione. Si ritiene infatti che una buona strategia di prevenzione possa comportare un guadagno anche fino a 12 volte superiore all'investimento fatto; inoltre l'azienda potrebbe beneficiarne anche in termini di rendimento (produzione ed efficienza) dovuto ad una

migliore qualità produttiva, minor numero di assenze per malattia, meno danni e rischi di responsabilità civile, riduzione dei premi assicurativi, migliore immagine aziendale in termini di affidabilità e notorietà. Inoltre, un recente studio europeo ha monitorato oltre 300 imprese di quindici Paesi rilevando che ogni euro speso dall'azienda per attività di prevenzione comporta un rientro economico medio di 2,2 euro. la formazione sulla sicurezza, i check up medici preventivi, i costi iniziali, organizzativi e di investimento, etc. Le attività di prevenzione impattano positivamente tutti gli ambiti di un'azienda, miglioramento dell'immagine aziendale e della motivazione e soddisfazione dei dipendenti in primis. Diverse sono le tipologie di criteri di catalogazione utilizzate per semplificare la comprensione del tema, a volte comprendenti voci di costo sovrapponibili fra loro che, in alcuni casi si riflettono in parte anche sulla società:

- Costi diretti e costi indiretti

Forse la parte più utilizzata da chi si occupa di sicurezza, pone l'accento sul fatto che non tutti i costi sono visibili; i costi diretti rappresentano la punta dell'iceberg e sono visibili, quelli indiretti sono nascosti sotto la superficie. C'è chi ha calcolato un rapporto 1:4 ma in realtà è un rapporto difficilmente generalizzabile in quanto fortemente connesso a diversi fattori quali la gravità dell'evento, il tipo di industria, etc. I costi diretti sono associati in modo univoco all'oggetto di costo considerato quale l'infortunio o la malattia professionale; di seguito alcuni esempi:

- Spese ospedaliere, consulti medici, riabilitazione, medicinali.
- Integrazione dei salari per la quota non coperta da assicurazioni.
- Danni subiti dai mezzi di produzione (macchinari, attrezzature, edifici, veicoli).
- Valore della produzione per le interruzioni causate dall'incidente.
- Sanzioni varie ed azioni di rivalsa.
- Perdita di produttività del lavoratore infortunato dopo il suo ritorno al lavoro.

I costi indiretti non vengono definiti secondo un rapporto di univocità ed è necessario ricorrere ad un metodo di allocazione. Alcuni esempi:

- Riduzione della produttività della forza lavoro dovuta all'infortunio.
- Costi degli straordinari necessari a recuperare il tempo perso a seguito dell'incidente e dell'assenza del lavoratore infortunato.

- Costo delle attività di indagine, compilazione di verbali e rapporti con le autorità di controllo.
- Costi di retraining e di recruiting nel caso in cui al lavoratore infortunato venga modificata la mansione o venga sostituito.
- Costi assicurati e costi non assicurati

L' Inail tutela tutti coloro che svolgono un lavoro retribuito alle dipendenze di un datore di lavoro, gli artigiani, i lavoratori autonomi dell'agricoltura, i lavoratori che svolgono attività di collaborazione coordinata e continuativa. Il lavoratore è tutelato contro i danni fisici ed economici che derivano da infortuni e malattie causati dall'attività lavorativa, e il datore di lavoro viene esonerato dalla responsabilità civile conseguente l'evento lesivo subito dai propri dipendenti ad eccezione dei casi in cui, in sede penale o in sede civile, sia riconosciuta la sua responsabilità per reato commesso con violazione delle norme di prevenzione e igiene sul lavoro. È bene ricordare, infatti, che carenze della sicurezza e l'accadimento di infortuni possono portare ad incrementi dei premi assicurativi o alla cessazione della copertura assicurativa. Tra i costi non assicurati possiamo citare anche il costo del tempo perso da altri lavoratori, il costo delle spese non assicurate relative a servizi medici, il costo di un periodo di formazione per un lavoratore in sostituzione. La struttura tariffaria Inail prevede, infine, una riduzione del premio assicurativo per le aziende considerate "virtuose", nonché una serie di incentivi per la realizzazione di interventi in materia di salute e sicurezza sul lavoro (art. 11 d. lgs. 81/08 e s.m.i.). Inoltre, quando si verifica un infortunio, l'azienda deve sostenere i seguenti costi:

- 4 gg di franchigia
- 40% della retribuzione dal 5 al 91 giorno
- 25% della retribuzione dal 92 al 122 giorno
- Sanzioni, prescrizioni, azione di rivalsa e spese legali.

Costi palesi e costi nascosti La prima tipologia di costi è caratterizzata dal fatto che sono sostenuti in parte dal datore di lavoro ed in parte dalla collettività e sono:

- costo per l'assenza dell'infortunato, in quanto egli viene ugualmente retribuito;
- costo per la riparazione o la sostituzione di impianti e macchinari eventualmente danneggiatisi nell'incidente.

1.2.2 Costi della sicurezza

È con i cantieri temporanei o mobili che sono nati i costi per la sicurezza che sono compresi nell'importo totale dei lavori ed individuano la parte del costo dell'opera da non assoggettare a ribasso nelle offerte delle imprese esecutrici. L'art. 100 rimanda direttamente alla lettura dell'Allegato XV per la definizione dei contenuti minimi dei Piani di Sicurezza. Si parla al plurale di piani perché in esso vengono indicati i contenuti minimi sia del P.S.C. che del P.O.S., ma poi è nel punto 4 dove vengono indicati quali devono essere i costi per la sicurezza da stimare nel P.S.C. È opportuno evidenziare un aspetto importante che si evince dalla lettura attenta dell'Allegato XV, punto 4 (punto 4.1.1) e che fa da "comune denominatore" a tutti i punti comprese nell'elenco dei costi per la sicurezza che, obbligatoriamente debbono essere computati, se pertinenti con le opere da realizzare: tutti i costi elencati nelle lettere a), b), c), d), e), f) e g) del punto 4.1.1 sono, di fatto, riconducibili alle interferenze che possono essere presenti in più attività lavorative e quindi al necessario coordinamento delle stesse. Non a caso ci si riferisce a "più attività lavorative" e non a "più imprese", perché lo stesso Allegato XV, nel punto 2.3 precisa che:

Allegato XV, D.lgs. 81/08 – Punto 2.3

Il Coordinatore per la Progettazione effettua l'analisi delle interferenze tra le lavorazioni, anche quando sono dovute alle lavorazioni di una stessa impresa o alla presenza di lavoratori autonomi. Quindi, le interferenze tra fasi lavorative individuate in fase di progettazione (rilevabili nel P.S.C. anche dal "Cronoprogramma dei lavori") debbono evidenziare soprattutto i potenziali rischi che, essendo impropri (cioè che possono anche transitare da una lavorazione all'altra, potrebbero non essere analizzati poi completamente nei P.O.S. dell'impresa affidataria e/o delle altre ditte coinvolte nell'esecuzione dei lavori.

Questo significa che il legislatore ha voluto evidenziare, precisamente al punto 4 dell'Allegato XV, che i costi per la sicurezza da stimare riconducibili al "Committente dell'opera da realizzare" sono soprattutto quelli che potenzialmente e presumibilmente possono transitare da un'attività lavorativa all'altra e che quindi, come tali, non sono riconducibili alla stretta competenza delle singole imprese, ma debbono essere considerati "Apprestamenti, Misure preventive e Protettive, Procedure, Impianti e Servizi, Misure di Coordinamento, ecc." di natura collettiva, in pratica nel cantiere (e quindi in tutta l'area in cui si estenderanno le attività logistiche e lavorative) sono possibili due tipi di interferenze di cui dovrà preoccuparsi il Committente (attraverso l'elaborazione del P.S.C. e quindi anche dei relativi costi per la sicurezza):

- le interferenze di attività derivanti dalla presenza di più imprese nella stessa area di lavoro (macro-fasi lavorative);
- le interferenze derivanti dall'esecuzione di fasi lavorative eseguite da più squadre di lavoratori (della stessa impresa o di più imprese).

Tornando all'Allegato XV. 4, che di seguito andremo brevemente ad analizzare, il legislatore ha voluto evidenziare quali sono i rischi ed i conseguenti costi per la sicurezza che il Committente deve fare propri.

4.1. – Stima dei costi della sicurezza

4.1.1. Ove è prevista la redazione del PSC ai sensi del Titolo IV, Capo I, del presente decreto, nei costi della

sicurezza vanno stimati, per tutta la durata delle lavorazioni previste nel cantiere, i costi:

- a) degli apprestamenti previsti nel PSC;*
- b) delle misure preventive e protettive e dei dispositivi di protezione individuale eventualmente previsti nel PSC per lavorazioni interferenti;*
- c) degli impianti di terra e di protezione contro le scariche atmosferiche, degli impianti antincendio, degli impianti di evacuazione fumi;*
- d) dei mezzi e servizi di protezione collettiva;*
- e) delle procedure contenute nel PSC e previste per specifici motivi di sicurezza;*
- f) degli eventuali interventi finalizzati alla sicurezza e richiesti per lo sfasamento spaziale o temporale delle lavorazioni interferenti;*
- g) delle misure di coordinamento relative all'uso comune di apprestamenti, attrezzature, infrastrutture, mezzi e servizi di protezione collettiva.*

4.1.2. Per le opere rientranti nel campo di applicazione del D.lgs. n. 163 del 12 aprile 2006 e successive modifiche e per le quali non è prevista la redazione del PSC ai sensi del Titolo IV, Capo I del presente decreto, le amministrazioni appaltanti, nei costi della sicurezza stimano, per tutta la durata delle lavorazioni previste nel cantiere, i costi delle misure preventive e protettive finalizzate alla sicurezza e salute dei lavoratori.

4.1.3. La stima dovrà essere congrua, analitica per voci singole, a corpo o a misura, riferita ad elenchi prezzi standard o specializzati, oppure basata su prezziari o listini ufficiali vigenti nell'area

interessata, o sull'elenco prezzi delle misure di sicurezza del committente; nel caso in cui un elenco prezzi non sia applicabile o non disponibile, si farà riferimento ad analisi costi complete e desunte da indagini di mercato. Le singole voci dei costi della sicurezza vanno calcolate considerando il loro costo di utilizzo per il cantiere interessato che comprende, quando applicabile, la posa in opera ed il successivo smontaggio, l'eventuale manutenzione e l'ammortamento.

4.1.4. I costi della sicurezza così individuati, sono compresi nell'importo totale dei lavori, ed individuano la parte del costo dell'opera da non assoggettare a ribasso nelle offerte delle imprese esecutrici.

4.1.5. Per la stima dei costi della sicurezza relativi a lavori che si rendono necessari a causa di varianti in corso d'opera previste dall'articolo 132 del D.lgs. n. 163 del 12 aprile 2006 e successive modifiche, o dovuti alle variazioni previste dagli articoli 1659, 1660, 1661 e 1664, secondo comma, del Codice civile, si applicano le disposizioni contenute nei punti 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3. I costi della sicurezza così individuati, sono compresi nell'importo totale della variante, ed individuano la parte del costo dell'opera da non assoggettare a ribasso.

4.1.6. Il direttore dei lavori liquida l'importo relativo ai costi della sicurezza previsti in base allo stato di avanzamento lavori, previa approvazione da parte del coordinatore per l'esecuzione dei lavori quando previsto.

Sempre Nell'Allegato XV al punto 1, comma 1, del D.lgs. 81/2008 viene inserito un elenco indicativo e non esaustivo degli elementi essenziali utili alla definizione dei contenuti del P.S.C., ovvero vengono elencati come “apprestamenti”:

- ponteggi, trabattelli, ponti su cavalletti, impalcati, parapetti, andatoie, passerelle, armature delle pareti degli scavi, gabinetti, locali per lavarsi, spogliatoi, refettori, locali di ricovero e di riposo, dormitori, camere di medicazione, infermerie, recinzioni di cantiere.

Possiamo dire che la norma ci fornisce “un elenco indicativo e non esaustivo” utile alla definizione degli apprestamenti e quindi, applicando alla lettera il punto a), dovremmo computare nei costi per la sicurezza tutti gli apprestamenti compresi nell'elenco di cui sopra. I D.P.I. vanno computati come costi per la sicurezza solo se il C.S.P. li prevede per poter operare in sicurezza in caso di lavorazioni interferenti. Rientrano nei principali Dispositivi di Protezione Individuale:

- D.P.I.: elmetto in ABS, guanti da lavoro, scarpa alta, tuta completa, cuffia antirumore, tappi otoprotettori;

- D.P.I. speciali: o cinture di sicurezza (UNI ENE 361, ecc.); o sistema anticaduta a funzionamento automatico (UNI EN 360, ecc.); o linea vita fissa (funi in acciaio inox e cursore per attacco fune di trattenuta); o moschettoni di sicurezza, ecc.; o semi maschere con filtri combinati per polveri, gas e vapori, complete di ricambi (UNI ENE 140); o visiera ribaltabile/occhiali di sicurezza; o altri dispositivi complementari, ecc.

Ad esempio, possiamo considerare il coordinamento tra attività in cantiere dove il C.S.P., per motivi specifici di sicurezza, richiede:

- la presenza di un operatore per il coordinamento a terra delle interferenze tra due o più gru;
- la presenza di un operatore per il coordinamento della movimentazione dei carichi sospesi, legata al sorvolo di area esterne al cantiere;
- la presenza di un operatore per il coordinamento manuale del traffico di zona per operazioni di ripristino pavimentazioni di strade esistenti, di allacci di impianti alle reti urbane, ecc.

Il principio è sempre lo stesso già citato. Se le procedure sono state introdotte nel P.S.C. per specifici motivi di sicurezza, è giusto che vengano pagate dal Committente perché saranno sicuramente dei costi aggiuntivi a quelli di stretta competenza di una singola impresa.

Come abbiamo già accennato, il concetto di incomprimibilità dei costi per la sicurezza è stato recepito in Italia per la prima volta nei cantieri temporanei o mobili. Il legislatore nel D.lgs. 81/2008 e, soprattutto, con la successiva integrazione introdotta con il D.lgs. 106/2009, ha poi esteso questo principio di incomprimibilità dei costi inserendolo anche tra gli obblighi connessi ai contratti d'appalto o d'opera o di somministrazione (art. 26, Titolo I, D.lgs. 81/08).

Ricordiamo che, a differenza del Titolo IV che è applicato anche nella sfera del privato (in quanto "Direttiva Cantieri"), il Titolo I tratta esclusivamente disposizioni generali comuni a tutte le attività lavorative che si svolgono fuori dalle mura domestiche.

L'interpretazione dell'art. 26 è di fondamentale importanza per arrivare ad una corretta stima dei costi per la sicurezza per qualsiasi tipo di lavoro. Infatti, possiamo affermare che il Titolo I rappresenta l'ultimo sforzo fatto dal legislatore per indicare, in maniera univoca, come interpretare e stimare tutti quei costi che possono e debbono essere attribuiti al datore di lavoro committente, sia nel Titolo I che nel Titolo IV. Innanzitutto il legislatore vuole evidenziare che è un datore di lavoro Committente (art. 26, comma 1) quello che affida "... lavori, servizi e forniture all'impresa appaltatrice o a lavoratori autonomi all'interno della propria azienda ...", in pratica lo stesso soggetto che nel Titolo IV è chiamato semplicemente Committente (... soggetto per conto del quale l'intera opera viene realizzata,

indipendentemente da eventuali frazionamenti della sua realizzazione ...) e, come tale, "... fornisce agli stessi soggetti (cioè, all'impresa appaltatrice o ai lavoratori autonomi) dettagliate informazioni sui rischi specifici esistenti nell'ambiente in cui sono destinati ad operare e sulle misure di prevenzione e di emergenza adottate in relazione alla propria attività". In pratica, il "datore di lavoro Committente" dà attuazione a quest'obbligo attraverso un documento che nel Titolo I è chiamato D.U.V.R.I., mentre nel Titolo IV è chiamato P.S.C., documento più articolato e dettagliato, ma il principio è lo stesso. Stessa analogia con il Titolo IV la vediamo anche nel comma 2 dell'art. 26, cooperazione e coordinamento dei datori di lavoro ivi compresi i subappaltatori. Nel Titolo IV le prescrizioni sono riportate nell'art. 95 (Misure generali di tutela) e nell'art. 96 (Obblighi dei datori di lavoro, dei dirigenti e dei preposti). Nel comma 3, viene introdotto l'obbligo per il datore di lavoro Committente di promuovere la cooperazione ed il coordinamento dei datori di lavoro e dei subappaltatori che contrattualmente operano all'interno della propria azienda, attraverso l'elaborazione di un Documento Unico di Valutazione dei Rischi da Interferenze (D.U.V.R.I.).

Il contenuto di questo nuovo documento è riconducibile al Piano di Sicurezza e di Coordinamento (P.S.C.) previsto nel Titolo IV. Con l'introduzione del Testo Unico, possiamo affermare che tali documenti (D.U.V.R.I. e P.S.C.) diventano quindi fondamentali per la stipula dei contratti e per la gestione dei lavori. Il legislatore specifica che il documento, D.U.V.R.I. o P.S.C., deve essere parte integrante del contratto di appalto e va adeguato in funzione dei lavori. L'aspetto che bisogna sottolineare è che nel D.U.V.R.I. (e nel contratto) devono essere riportati anche i costi per la sicurezza riconducibili al Committente. Occorre infatti tenere presente che nel D.U.V.R.I. (come nel P.S.C.), le disposizioni previste dal legislatore non si applicano ai rischi specifici propri dell'attività delle imprese appaltatrici e dei singoli lavoratori autonomi. Nell'art. 26, viene specificato che il datore di lavoro Committente redige il D.U.V.R.I. recante una valutazione dei rischi relativi alla tipologia della prestazione che potrebbero potenzialmente derivare dall'esecuzione del contratto. Non a caso viene inserita la parola "potenzialmente" alla quale si fa riferimento anche per la stima dei costi per la sicurezza in occasione di P.S.C. Infatti, i costi per la sicurezza dei quali dobbiamo redigere la stima devono riferirsi appunto ai rischi che "potenzialmente e presumibilmente" sono riconducibili al datore di lavoro Committente, perché possono derivare "dall'esecuzione del contratto" e non dai "rischi specifici propri dell'attività delle imprese appaltatrici o dei singoli lavoratori autonomi".

Titolo I, D.lgs. 81/08 **art. 26**, comma 5.

Nei singoli contratti di subappalto, di appalto e di somministrazione, anche qualora in essere al momento della data di entrata in vigore del presente decreto, di cui agli articoli 1559, ad esclusione dei contratti di somministrazione di beni e servizi essenziali, 1655, 1656 e 1677 del Codice civile(N),

devono essere specificamente indicati a pena di nullità ai sensi dell'articolo 1418(N) del Codice civile i costi delle misure adottate per eliminare o, ove ciò non sia possibile, ridurre al minimo i rischi in materia di salute e sicurezza sul lavoro derivanti dalle interferenze delle lavorazioni. I costi di cui al primo periodo non sono soggetti a ribasso. Con riferimento ai contratti di cui al precedente periodo stipulati prima del 25 agosto 2007 i costi della sicurezza del lavoro devono essere indicati entro il 31 dicembre 2008, qualora gli stessi contratti siano ancora in corso a tale data. A tali dati possono accedere, su richiesta, il rappresentante dei lavoratori per la sicurezza e gli organismi locali delle organizzazioni sindacali dei lavoratori comparativamente più rappresentative a livello nazionale.

Dunque, sono soltanto ed esclusivamente questi i costi per la sicurezza che il datore di lavoro Committente deve stimare ed inserire nel proprio D.U.V.R.I. Anche se stiamo parlando di costi per la sicurezza da stimare nel Titolo I (D.U.V.R.I.), il collegamento con quelli del Titolo IV (P.S.C.) e con l'Allegato XV. 4 (Stima dei costi per la sicurezza) dello stesso D.lgs. 81/2008 è evidentissimo. E' sufficiente anche ricordare la definizione data all'impresa affidataria nel Titolo IV (art. 89, comma 1, lett. D): impresa titolare del contratto d'appalto con il Committente che, nell'esecuzione dell'opera appaltata, può avvalersi di imprese subappaltatrici o di lavoratori autonomi ... omissis", per confermare che anche questo rapporto di lavoro è riconducibile agli obblighi connessi ai contratti d'appalto o d'opera o di somministrazione regolamentati dall'art. 26 nel Titolo I. Infine, per principio, non è pensabile che il legislatore abbia voluto introdurre nello stesso decreto, due procedure diverse per dare attuazione allo stesso obbligo riconducibile allo stesso soggetto:

- datore di lavoro Committente (art. 26, Titolo I);
- Committente (art. 89, Titolo IV).

Fino ad ora abbiamo visto quali sono i costi per la sicurezza che debbono essere computati nei P.S.C. e/o nei D.U.V.R.I. In sintesi, si è cercato di chiarire:

- cosa deve essere stimato dal Committente (Titolo IV – “Cantieri temporanei o mobili”);
- cosa deve essere stimato dal datore di lavoro Committente (Titolo I, art. 26 – “Obblighi connessi ai contratti d'appalto”);

Abbiamo inoltre visto che non tutti i costi per la sicurezza debbono essere stimati nei P.S.C. e/o nei D.U.V.R.I., ma solamente quelli riferiti ai rischi che “potenzialmente e presumibilmente” sono riconducibili al Committente o al datore di lavoro Committente, perché possono derivare “dall'esecuzione del contratto” e non dai “rischi specifici propri dell'attività delle imprese appaltatrici o dei singoli lavoratori autonomi”.

I datori di lavoro delle imprese devono stimare sia in adempimento al Titolo I che al Titolo IV del D.lgs. 81/2008). Con “... costi della sicurezza afferenti all’esercizio dell’attività svolta da ciascuna impresa” si intendono gli oneri aziendali della sicurezza afferenti all’esercizio dell’attività svolta da ciascun operatore economico detti anche, in giurisprudenza piuttosto che in dottrina, costi ex lege, costi o oneri propri, costi da rischi specifici o costi aziendali necessari per la risoluzione dei rischi specifici propri dell’appaltatore.

Tali costi propri sono relativi a due fattori determinanti:

- alle misure per la gestione del rischio dell’impresa;
- alle misure operative per i rischi legati alle lavorazioni e alla loro contestualizzazione, aggiuntive rispetto a quanto già previsto nel P.S.C. e comunque riconducibili alle spese generali.

Detti oneri aziendali sono contenuti nella quota parte delle spese generali prevista dalla norma vigente (art. 32 del D.P.R. 207/2010 e s.m.i.) e non sono riconducibili ai costi stimati per le misure previste al punto 4 dell’Allegato XV del D.L.gs. 81/2008 . In caso di appalto a carattere pubblico, l’impresa dovrà indicare in sede di offerta (pena la nullità), su richiesta del bando di gara, gli oneri economici che vengono impiegati al fine di adempiere esattamente agli obblighi di sicurezza sul lavoro, al duplice scopo di assicurare la consapevole formulazione dell’offerta con riguardo ad un aspetto nevralgico e di consentire al Committente/Stazione appaltante la relativa valutazione della congruità dell’importo destinato alla sicurezza. Questo significa che il datore di lavoro Committente (nel Titolo I) o il Committente (nel Titolo IV) quando verifica l’offerta dell’impresa non deve valutarne la congruità limitandosi al solo costo del lavoro offerto, ma deve estendere la verifica anche alla valutazione della congruità dei relativi oneri per la sicurezza che la stessa impresa sostiene.

È necessario iniziare ricordando l’art. 15 del D.lgs. 81/2008 e s.m.i. che stabilisce quali sono le misure generali di tutela che ogni “datore di lavoro” deve applicare nella propria azienda. Questo perché ogni misura necessaria per la tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori nei luoghi di lavoro, ha sempre un costo.

Titolo I, D.lgs. 81/08 **art. 15** – Misure generali di tutela

1. Le misure generali di tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori nei luoghi di lavoro sono:

a) la valutazione di tutti i rischi per la salute e sicurezza;

b) la programmazione della prevenzione, mirata ad un complesso che integri in modo coerente nella prevenzione le condizioni tecniche produttive dell'azienda nonché l'influenza dei fattori dell'ambiente e dell'organizzazione del lavoro;

1. l'eliminazione dei rischi e, ove ciò non sia possibile, la loro riduzione al minimo in relazione alle conoscenze acquisite in base al progresso tecnico;

2. il rispetto dei principi ergonomici nell'organizzazione del lavoro, nella concezione dei posti di lavoro, nella scelta delle attrezzature e nella definizione dei metodi di lavoro e produzione, in particolare al fine di ridurre gli effetti sulla salute del lavoro monotono e di quello ripetitivo;

e) la riduzione dei rischi alla fonte;

f) la sostituzione di ciò che è pericoloso con ciò che non lo è, o è meno pericoloso;

g) la limitazione al minimo del numero dei lavoratori che sono, o che possono essere, esposti al rischio;

h) l'utilizzo limitato degli agenti chimici, fisici e biologici sui luoghi di lavoro;

i) la priorità delle misure di protezione collettiva rispetto alle misure di protezione individuale;

l) il controllo sanitario dei lavoratori;

m) l'allontanamento del lavoratore dall'esposizione al rischio per motivi sanitari inerenti la sua persona e l'adibizione, ove possibile, ad altra mansione;

n) l'informazione e formazione adeguate per i lavoratori;

o) l'informazione e formazione adeguate per dirigenti e i preposti;

p) l'informazione e formazione adeguate per i rappresentanti dei lavoratori per la sicurezza;

q) le istruzioni adeguate ai lavoratori;

r) la partecipazione e consultazione dei lavoratori;

s) la partecipazione e consultazione dei rappresentanti dei lavoratori per la sicurezza;

t) la programmazione delle misure ritenute opportune per garantire il miglioramento nel tempo

dei livelli di sicurezza, anche attraverso l'adozione di codici di condotta e di buone prassi;

u) le misure di emergenza da attuare in caso di primo soccorso, di lotta antincendio, di

evacuazione dei lavoratori e di pericolo grave e immediato;

v) l'uso di segnali di avvertimento e di sicurezza;

z) la regolare manutenzione di ambienti, attrezzature, impianti, con particolare riguardo ai dispositivi di sicurezza in conformità alla indicazione dei fabbricanti.

3. Le misure relative alla sicurezza, all'igiene ed alla salute durante il lavoro non devono in nessun caso comportare oneri finanziari per i lavoratori.

Tutte queste misure generali di tutela sono a carico di ogni datore di lavoro che conduce una qualsiasi attività imprenditoriale, nella quale sia presente almeno un dipendente.

Nel comma 2 dell'art. 15, non a caso viene precisato che tutti gli oneri finanziari relativi a queste misure di sicurezza durante il lavoro non possono assolutamente essere riversate dal datore di lavoro a carico dei propri lavoratori.

Le voci riportate in tabella rappresentano due componenti fondamentali degli oneri aziendali per la sicurezza:

- gestionale: relativa alle misure per la gestione della sicurezza in attuazione del disposto di cui all'art. 15 del D.Lgs. 81/2008;
 - gli oneri gestionali della sicurezza annui sostenuti dal datore di lavoro in attuazione della normativa vigente in materia, a prescindere dai singoli e specifici appalti (es.: spese sostenute per le visite mediche, formazione ed informazione di base dei lavoratori, ecc.);
- operativo: relativa alle misure per i rischi legati alle lavorazioni e alla loro contestualizzazione, in attuazione del disposto di cui all'art. 95 del D.Lgs. 81/2008, nonché dell'art. 32, comma 4, lettere e) ed o) del D.P.R. 207/2010.
 - gli oneri operativi rappresentativi di tutte le spese relative alle misure di prevenzione e protezione connesse allo specifico appalto (es.: formazione integrativa necessaria agli stessi lavoratori, alcuni D.P.I. particolari, attrezzatura di lavoro, apprestamenti, ecc.).

1.3 Il rischio

1.3.1 Definizione di rischio, pericolo e danno

Il rischio nelle attività lavorative è sempre presente, in percentuali maggiori o minori a seconda dei casi. Per far in modo di eliminarlo, o quantomeno ridurlo al minimo, bisognerebbe individuarne i pericoli presenti nell'ambiente di lavoro e i soggetti che possono essere coinvolti.

Un'attenta valutazione del rischio si basa innanzitutto sulla conoscenza dei concetti base di **rischio**, **pericolo** e **danno**, che possono essere confusi, anche se la norma fornisce definizioni chiare e distinte.

D.Lgs n. 81/2008

- **Pericolo** - Proprietà o qualità intrinseca di un determinato fattore avente il potenziale di causare danni.
- **Rischio** - Probabilità di raggiungimento del livello potenziale di danno nelle condizioni di impiego o di esposizione a un determinato fattore o agente oppure alla loro combinazione.

I rischi possono essere “rischi graduati” nel caso in cui si può stabilire una relazione di proporzionalità tra livelli di esposizione ed effetti (danni) sull'individuo. Mentre, se gli effetti sull'individuo non possono essere determinati in modo proporzionale ai livelli di esposizione come avviene, per esempio per le sostanze cancerogene e sensibilizzanti, si è in presenza di cosiddetti “rischi stocastici”.

I rischi vengono normalmente classificati in funzione delle loro tipologie, rischi possono essere:

- Rischi per la sicurezza
- Rischi per la salute
- Rischi trasversali
- Rischi convenzionali
- Rischi specifici
- Grandi rischi

Il **pericolo** essendo una proprietà intrinseca non legata a fattori esterni, può essere definito come fattore di rischio, tale fattore è associato ad ogni tipologia di rischio precedentemente elencata. Quindi per ogni tipologia di rischio avremo dei fattori di rischio associati.

L'esposizione al rischio può avere come conseguenza un danno più o meno grave per il lavoratore. Il **“danno”** può essere definito come “lesione o alterazione dello stato di salute del lavoratore per l'esposizione ad un determinato pericolo”, intendendo per “salute” lo stato di completo benessere fisico, mentale e sociale, non consistente solo in una ‘assenza di malattia o d’infermità’.

Nel caso in cui si riscontri la presenza di rischi che possano causare danni gravi al lavoratore, è necessario effettuare una programmazione degli interventi al fine di garantire lo stato di benessere, in modo da poterli pianificare affinché sia possibile ridurre o eliminare i rischi con effetti reversibili.

Le probabilità che si verifichi un danno sono correlate alla frequenza e alla durata dell'esposizione al rischio da parte del lavoratore, che può dipendere da:

- La necessità di accesso alla zona pericolosa
- La natura dell'accesso
- Il tempo trascorso nella zona pericolosa
- Il numero delle persone che hanno esigenza di accesso
- La frequenza di accesso

Inoltre, la possibilità di evitare o di limitare un danno è funzione:

- Della persona che opera con la sua esperienza e formazione
- della velocità con la quale si manifesta l'evento pericoloso;
- della consapevolezza del rischio del lavoratore;

- della possibilità umana di evitare o limitare il danno

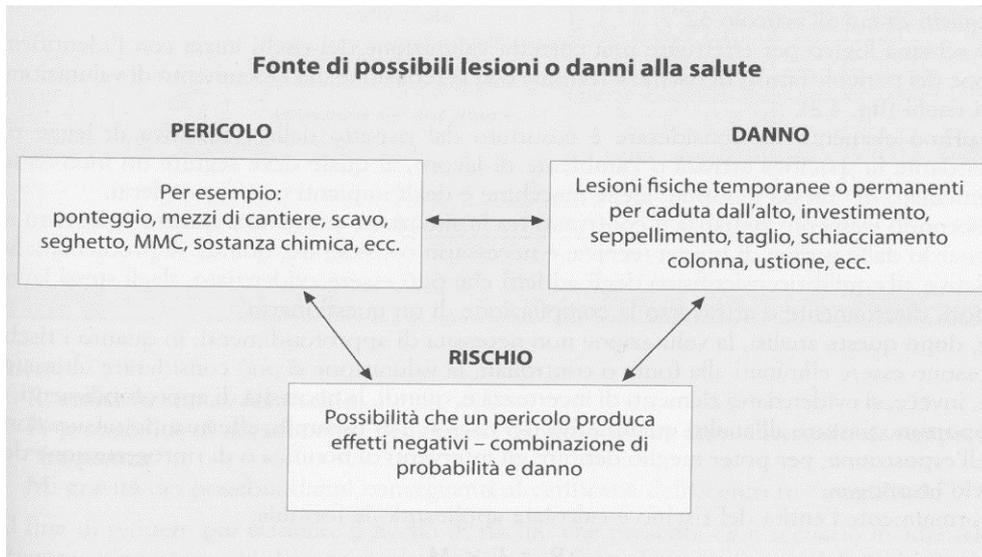


Figura 1.4 – Definizione di rischio, danno e pericolo

1.3.1.1 Valutazione del rischio, prevenzione e protezione

Individuati tutti i rischi presenti nell'ambiente di lavoro, si può procedere con la fase successiva, cioè la valutazione dei rischi.

La “valutazione dei rischi” è definita come la valutazione globale e documentata di tutti i rischi per la salute e sicurezza dei lavoratori presenti nell'ambito dell'organizzazione in cui essi presentano la propria attività, finalizzata a individuare le adeguate misure di prevenzione e di protezione e a elaborare il programma delle misure atte a garantire il miglioramento nel tempo dei livelli di salute e sicurezza.

Nella fase di valutazione e gestione del rischio devono partecipare tutte le figure presenti nel processo costruttivo. Partendo dal datore di lavoro, dai dirigenti, dai preposti, dalla figura del responsabile del servizio di prevenzione e protezione RSPP, gli addetti al servizio e dal medico competente.

Un ulteriore contributo in tale fase deve essere fornito anche dai lavoratori che devono segnalare le necessità che si presentano, tramite il responsabile dei lavoratori per la sicurezza, al fine di migliorare le condizioni di sicurezza e di salute dell'ambiente di lavoro. Quindi, la procedura tradizionale, secondo la quale i lavoratori operano soltanto con controllo delle misure predisposte dal Datore di lavoro viene superata.

La logica nell'effettuare una corretta valutazione dei rischi prevede inizialmente l'identificazione dei pericoli/fattori di rischio e si conclude con la redazione del Documento di valutazione dei rischi. Il

primo elemento da considerare è costituito dal rispetto della normativa di legge riguardante la specifica attività o l'ambiente di lavoro, al quale deve eseguire un intervento immediato di "messa a norma" delle macchine e degli impianti non rispondenti.

Il secondo elemento riguarda il confronto tra la situazione presente e quanto è previsto al riguardo delle norme di buona tecnica.

Una volta ultimata l'analisi essa può ritenersi conclusa nel caso in cui la valutazione non necessita di approfondimenti, in quanto i rischi possono essere eliminati alla fonte o controllati. In caso contrario se durante l'analisi si evidenziano elementi di incertezza e, quindi, occorrono approfondimenti, è opportuno passare all'analisi quantitativa del rischio, per esempio, effettuando misurazioni dell'esposizione, per poter meglio definire gli interventi di bonifica riprogettazione del ciclo lavorativo.

L'entità del Rischio è calcolata applicando la formula:

$$R = P \times M$$

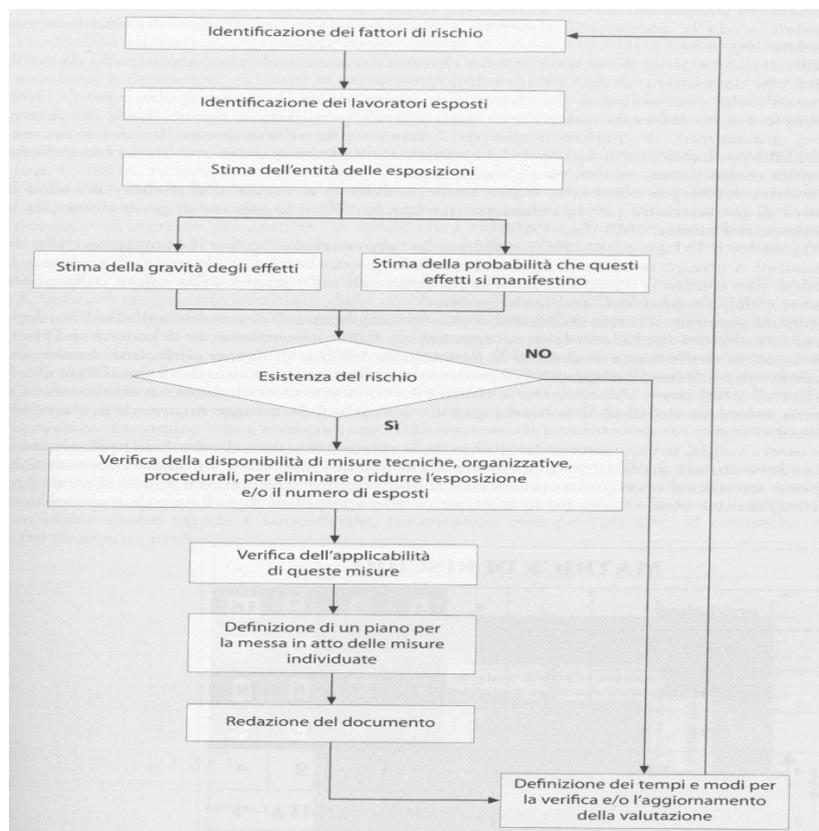


Figura 1.5 Identificazione dei fattori di rischio

Dove:

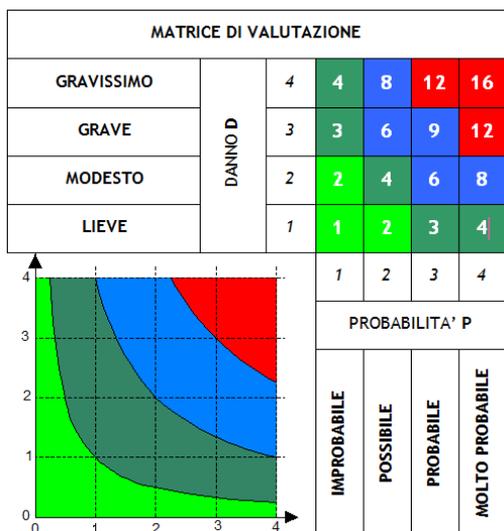
R: Entità del rischio;

P: probabilità di accadimento dell'evento dannoso in un certo intervallo di tempo

M: gravità dei possibili danni conseguenti al verificarsi dell'evento (o magnitudo)

Per evidenziare in maniera marcata il livello di rischio, vengono utilizzate le “matrici di rischio”, che sono rappresentazioni grafiche che illustrano l'entità dei rischi derivanti dall'accadimento di eventi incidentali utilizzando colorazioni diverse, in modo da diversificare i vari rischi a seconda della loro importanza in modo da non ricorrere ad una valutazione quantitativa.

Le attività svolte per eliminare, o perlomeno ridurre al minimo, il rischio “R” sono le misure di prevenzione per la riduzione del fattore “F” e le misure di protezione per la riduzione del fattore “M”.



Frequenza di Accadimento	Categorie di gravità			
	I Catastrofico	II Critico	III Marginale	IV Trascurabile
(A)Frequente	1A	2A	3A	4A
(B)Probabile	1B	2B	3B	4B
(C)Occasionale	1C	2C	3C	4C
(D)Remota	1D	2D	3D	4D
(E)Improbabile	1E	2E	3E	4E

Tabella 1. 3: Matrice di rischio

Indice di rischio(HRI)	Criteri di azione
I	Inaccettabile
II	Indesiderabile(giudizio del management)
III	Accettabile, controllo
IV	Accettabile, monitoraggio

Tabella 1. 4: Determinazione dell'indice di rischio

Il D.Lgs n. 81/2008 definisce la “prevenzione” come il complesso delle disposizioni o misure necessarie anche secondo la particolarità del lavoro, l’esperienza e la tecnica, per evitare o diminuire i rischi professionali nel rispetto della salute della popolazione dell'integrità dell'ambiente esterno. Le misure generali di tutela stabiliscono che, in successione, è necessario agire, subito dopo la valutazione dei rischi, con la programmazione della prevenzione, la riduzione dei rischi alla fonte, la sostituzione o almeno alla limitazione dell'uso di agenti pericolosi, è solo successivamente adottare i dispositivi di protezione collettiva e individuale, a significare che le misure di protezione che servono a ridurre le conseguenze del danno costituiscono l'estrema soluzioni utilizzabile soltanto quando è impossibile attuare misure di prevenzione efficace.

La valutazione del rischio deve essere effettuata considerando tutte le fasi lavorative, e non solamente quelle legate alla fase produttiva, ad esempio le operazioni di manutenzione, le attività nei depositi di stoccaggio e nei vani tecnici.

Nel settore delle costruzioni, la valutazione di rischio specifica di un cantiere è contenuta nel “Piano operativo di sicurezza”, e bisogna tener conto anche dell’eventuale presenza di individui esterni (fornitori, visitatori, rappresentanti) che vi accedono. In tal caso, è necessario verificare se è possibile “eliminare il rischio”.

Uno strumento utile, al datore di lavoro e ai suoi collaboratori, per individuare i fattori di rischio consiste nell’utilizzo delle check list o liste di controllo. Possono essere utili nella predisposizione del documento di valutazione dei rischi, in quanto permette di non trascurare situazioni pericolose sconosciute e di verificare la conformità di ambienti, attrezzature di lavoro e macchine.

E’ opportuno suddividere l’ambiente di lavoro in “aree operative omogenee” in modo che le check list vengano applicate in maniera esauriente poiché sono strutturate secondo fattori di rischio e, per poterle applicare in modo esaustivo, è opportuno suddividere il complesso dell’ambiente di lavoro in “aree operative omogenee”. L’inconveniente nell’utilizzo di questo strumento di valutazione è che, essendo generalmente molto dettagliato, e riportando condizioni di pericolo che molto spesso non sono assolutamente presenti nell’ambiente di lavoro sotto esame, può indurre l’utilizzatore a un’analisi molto rapida e superficiale, e portarlo a trascurare così pericoli che, al contrario, sono effettivamente presenti.

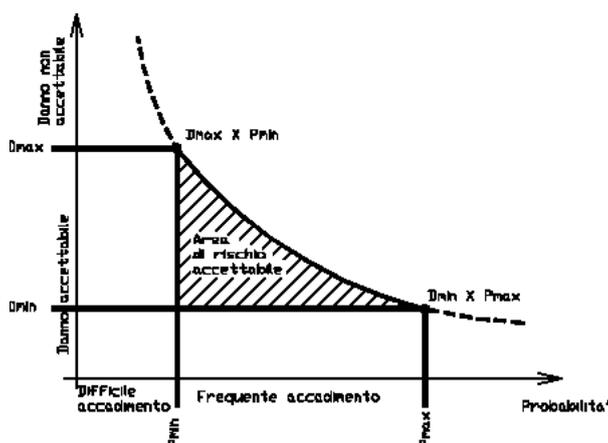


Figura 1.6 – Grafico rappresentante la probabilità di rischio di un’area lavorativa

Il percorso di Valutazione dei rischi e della redazione del relativo documento, può essere riassunto nei seguenti punti:

- identificazione dei fattori di rischio
- identificazione dei lavoratori esposti
- stima dell'entità delle esposizioni
- stima della gravità degli effetti dovuti all'esposizione
- stima della probabilità che gli effetti si manifestino
- verifica della disponibilità delle misure da adottare
- verifica dell'applicabilità delle misure
- definizione di un piano di intervento
- verifica dell'idoneità delle misure
- redazione del documento
- verifica e aggiornamento della valutazione

1.3.1.2 Metodi di analisi del rischio

Possiamo suddividere i metodi di valutazione del rischio in due tipi:

- Metodo induttivo: viene ipotizzato il guasto di un componente e successivamente si analizzano e identificano gli eventi che tale guasto potrebbe causare;
- Metodo deduttivo: viene ipotizzato l'evento finale per risalire agli eventi che potrebbero causarlo.

Un' ulteriore classificazione dei metodi di analisi riguarda:

- Metodi quantitativi: si basano sull'analisi quantitativa del rischio $R = f(P,D)$, in cui:
 - la funzione f può assumere una forma anche complessa, che tenga conto della maggior parte dei parametri che intervengono nella nascita e nello sviluppo del rischio, quali: fattore umano, materiali, macchina, processo e ambiente;
 - vengono considerati, oltre alla probabilità di accadimento e gravità del danno, anche altri fattori quali: estensione del danno, frequenza e durata di esposizione, possibilità di evitare o limitare il danno, ecc.

Questo metodo di valutazione viene effettuato quando si vuole valutare in maniera dettagliata la conoscenza del rischio, trascurando la soggettività del valutatore.

- **Metodi qualitativi:** tali modelli non utilizzano espressioni matematiche del tipo $R=f(P, D)$ per valutare i diversi rischi, ma effettuano un'analisi qualitativa verificando la conformità alle norme vigenti (leggi, decreti o norme di buona tecnica). Il punto di arrivo è un giudizio qualitativo della situazione che si sta valutando.
- **Metodi semi-quantitativi (o semi-qualitativi):** si basano su un'analisi quantitativa, in cui il rischio è $R = f(P, D)$, ma con approccio leggermente semplificato. I dati a disposizione sono quelli rilevati al momento dell'indagine ed i parametri di confronto sono quelli che prescrivono le norme tecniche, dipendenti sempre dalla probabilità di accadimento e del danno conseguente.
- **Metodi multi-criterio:** consentono di prendere in considerazione contemporaneamente diversi fattori attraverso la formulazione del problema decisionale in una struttura gerarchica. Essi senza perdere di rigore quantitativo e senza ridurre i fattori di analisi coinvolti, mantengono una visione sintetica della percezione del rischio. Un approccio di questo tipo appare in grado di fornire una metodologia flessibile e di facile comprensione con cui analizzare i pericoli e le loro cause e definire conseguentemente delle azioni correttive congruenti.

Anche se i vari metodi di valutazione differiscono tra loro, per scopo, completezza ed utilizzo, tutti presentano gli stessi step logici articolandosi in tre passi principali:

- 1) **Identificazione dei pericoli:** si individuano in modo sistematico tutti i pericoli legati all'attività in esame ed i fattori di rischio connessi (in questa fase si usano prevalentemente check-list, dati storici sugli incidenti, casi simili ecc.).
- 2) **Valutazione del rischio:** si stima il rischio per ogni pericolo individuato; questa fase comprende anche il giudizio sul grado di accettabilità del rischio stesso.
- 3) **Definizione delle priorità degli interventi correttivi:** i pericoli vengono ordinati per valori di rischio decrescenti e per tutti i casi in cui tale livello risulta inaccettabile si individuano azioni correttive adeguate, prescrizioni.

In termini analitici il Rischio viene sempre definito come funzione della probabilità di accadimento e della magnitudo (severità del danno) relativi al singolo pericolo attraverso l'espressione:

$$R = f(M, p)$$

- R: magnitudo del rischio
- M: magnitudo del danno potenziale
- p: probabilità di accadimento del danno

In relazione alla tipologia di rischio da analizzare R è esprimibile in forma quantitativa, semi-quantitativa o, in alcuni casi, soltanto qualitativa.

1) IDENTIFICAZIONE DEI FATTORI DI RISCHIO;

Questo step ha come scopo individuare tutti gli aspetti delle fasi di lavoro che possono essere fonte di pericolo; a supporto di questa fase si possono utilizzare le liste di controllo (check list), in cui vengono elencati potenziali fattori di rischio (ad es. rumore, sostanze pericolose, contatti elettrici, ecc.) e di analizzarli mediante una lista che passi in rassegna le questioni più importanti relative alla sicurezza. Le liste sono caratterizzate da versatilità d'uso, semplicità e facilità di aggiornamento nella trattazione dei dati. La loro stesura deve tener conto di una serie di riferimenti:

- richieste specifiche della normativa in vigore
- standard internazionali di buona tecnica
- rispondenza al “buon senso” sotto il profilo tecnico-ingegneristico
- standard e leggi specifiche di settori e/o settori particolari

2) VALUTAZIONE DEL RISCHIO

Identificati i fattori di rischio connessi con l'utilizzo della macchina si procede alla valutazione del rischio stesso. La misura del rischio associata a ciascun pericolo è espressa tramite la:

$$R = f(D, A)$$

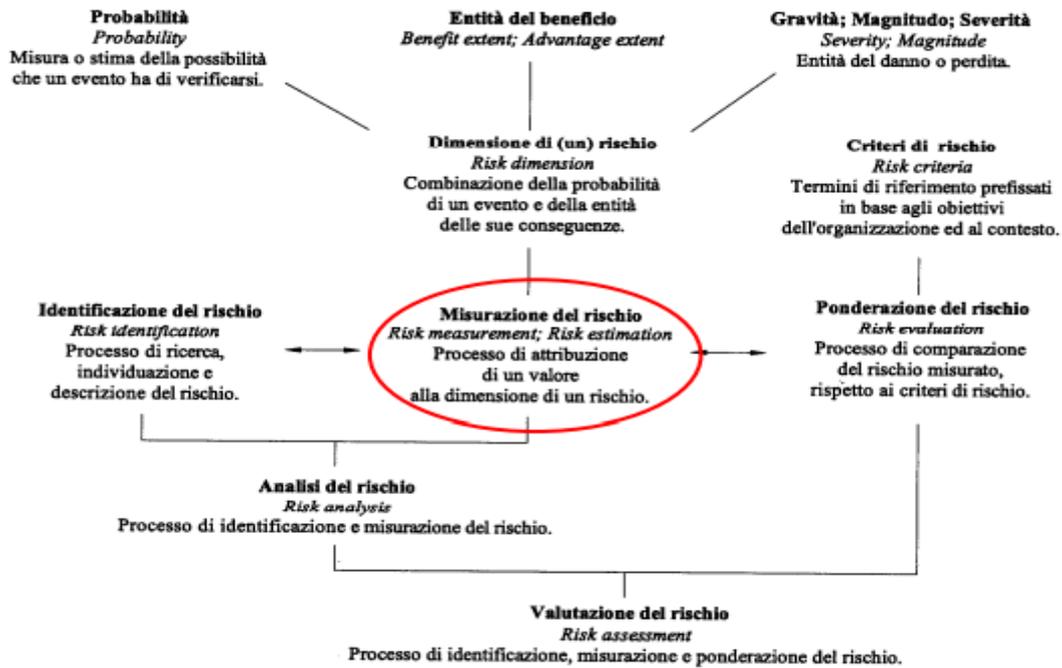


Figura 1.7 – Misurazione del rischio

dove:

- R = magnitudo del rischio
- D = severità del danno
- A = probabilità di accadimento del danno

La differenziazione tra i simboli D, A e quelli M, p precedentemente introdotti. Essi pur esprimendo gli stessi concetti mettono in evidenza che le modalità di determinazione di D e A tengono conto della specifica tipologia di rischio in esame.

L'aspetto più importante, in questo stadio dell'analisi, è l'oggettivazione della misura del rischio che spesso è affidata a valutazioni meramente qualitative e fortemente dipendenti dalla sensibilità del valutatore. Di conseguenza:

- primo passo riguarda l'identificazione dei parametri che influenzano D e A.
- Il secondo passo consiste nel calcolo di D e A, in funzione dei valori assunti dai parametri che li influenzano.
- Il terzo passo prevede l'identificazione del legame funzionale f che consentirà la stima quantitativa del rischio R .

3) SELEZIONE DELLE MISURE DI SICUREZZA

Una volta valutati il rischio e stabilita la priorità degli interventi da attuare, la riduzione del rischio può avvenire considerando due criteri. Una volta a ridurre le probabilità di accadimento del danno (prevenzione) e l'altra a limitarne le conseguenze (protezione).

Ciò nonostante la scelta relativa al tipo di intervento da effettuare dovrà seguire rigorosamente la successiva sequenza logica:

- eliminazione del pericolo
- riduzione del pericolo
- riduzione del rischio alla fonte
- gestione ottimale della situazione pericolo
- protezione personale
- informazione-formazione

In generale, quindi, dovranno essere privilegiate quelle misure che consentono la riduzione del rischio alla fonte. Per i pericoli che non possono essere eliminati o sufficientemente ridotti si dovrà ricorrere alle "protezioni" (ripari o dispositivi di sicurezza).

OBIETTIVO

L'approccio utilizzato per la gestione della sicurezza nelle costruzioni attualmente è quello programmatico, come descritto nel capitolo 1. In tale approccio si possono riscontrare dei limiti, dato che gli ambienti di lavoro sono molto complessi. Infatti data la loro natura dinamica, il coinvolgimento di numerose risorse e componenti di fornitura, l'interazione tra il personale lavorativo, merce ed energia, risulta difficoltoso gestire la sicurezza nelle costruzioni. Inoltre, in alcuni casi i piani di sicurezza sono soggetti ad errori dovuti a giudizi soggettivi da parte di coloro che prendono le decisioni. Infine un ulteriore limite da prendere in considerazione consiste nel non identificare tempestivamente nuovi rischi nel caso in cui vengano effettuate modifiche durante la fase esecutiva, data la complessità delle costruzioni.

Come si è potuto notare, i limiti dell'approccio programmatico si riscontrano non tanto nella fase di pianificazione e programmazione, bensì nella fase esecutiva. Infatti data la forte aleatorietà dei processi costruttivi e la complessità delle costruzione risulta complicato monitorare la gestione della sicurezza, ed inoltre aggiornare i dati in tempo reale.

Quindi prendendo in considerazione le problematiche dell'approccio programmatico, bisogna considerare ulteriori approcci al di migliorare la gestione della sicurezza. Uno di questi consiste nell'approccio proattivo in tempo reale, infatti come descritto da Teizer: *“l'approccio proattivo in tempo reale offre al lavoratore una seconda possibilità nel caso in cui le pratiche di sicurezza dovessero fallire”*. Quindi nasce la necessità di riprodurre il tempo reale in modo da poter fare previsioni in avanti che possano ridurre il numero di incidenti, e raccogliere informazioni in modo da apportare modifiche nella gestione della sicurezza, così che questa aumenti.

L'obiettivo di questa tesi si incentra nella ricerca di una gestione proattiva della sicurezza della sicurezza attraverso la creazione di una piattaforma digitale. Nei paragrafi seguenti verranno spiegate le metodologie scelte per la creazione della piattaforma e le motivazioni di tali scelte.

2.1 Piattaforma per la gestione della sicurezza

In base a quanto detto precedentemente, si è deciso di sviluppare l'approccio real-time basandoci sulla creazione di un'architettura di una piattaforma per il controllo real-time della gestione della sicurezza.

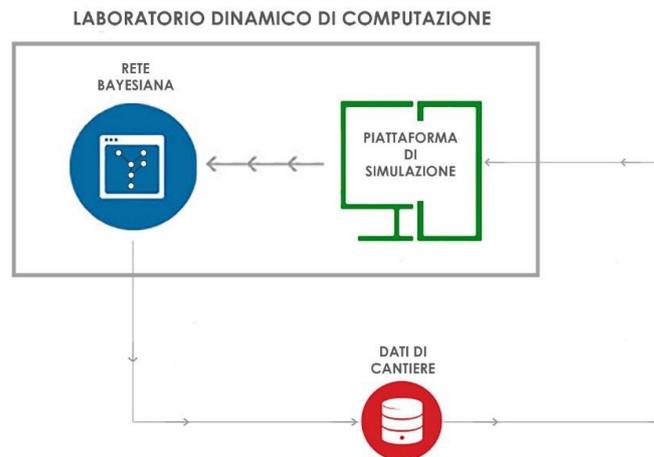


Figura 2.1 – Schema di una piattaforma digitale

2.1.1 Architettura della piattaforma

L'architettura della piattaforma, come mostrato in figura, è costituita dai seguenti componenti:

- 1) Sistemi di sensoristica, installati nel cantiere reale in grado di fornire dati ed informazioni. La tecnologia utilizzata si basa su sensori UWB che permettono di rilevare la localizzazione all'interno del cantiere. Tali sensori raccoglieranno dati e informazioni del cantiere necessarie ad alimentare il sistema di valutazione del rischio.
- 2) Sistema di acquisizione dati, in cui i dati dei sensori arrivano in un database per poi essere trasferiti alla piattaforma nel quale fare la simulazione.
- 3) Laboratorio dinamico computazionale, nel quale viene svolta una simulazione dinamica del processo costruttivo alimentata da sensori che raccolgono dati che arrivano dal cantiere reale. Il laboratorio dinamico di computazione è completato dall'implementazione di sistemi di calcolo, nello specifico si è valutato lo scenario di rischio sfruttando una rete bayesiana.
- 4) Elementi secondari, il sistema sarà composto da questi ultimi i quali mi permettono di aumentare le potenzialità e funzioni della piattaforma. Una rete di allarmi, installati in

cantiere, che permette all'operatore in cantiere di percepire il pericolo sarà sicuramente il primo degli elementi secondari da inserire nella architettura della piattaforma.

Il lavoro di tesi si è concentrato nello sviluppo del laboratorio dinamico computazionale nelle sue due configurazioni principali:

- modellazione della valutazione dello scenario di rischio
- modellazione del processo costruttivo

Nella costruzione del modello di valutazione sono stati affrontati diversi problemi, essi in questo caso sono strettamente legati alla sicurezza, che come tale, non può essere rappresentata come un modello statico. Il problema, che ci siamo posti, è stato, creare uno spazio in cui sia possibile modellare la specifica situazione di cantiere, quindi creare un modello che rappresenti la situazione reale da simulare e/o gestire. Il modello deve rappresentare una situazione dinamica che cambia nel tempo in termini di variabili fisiche geometriche e temporali, così da poter valutare un qualsiasi rischio in tempo reale. L'elaborazione di schemi di analisi automatica del rischio real-time, in un cantiere, non può essere delineata con dei semplici if-then-else perché risulterebbero poco rappresentativi in qualsiasi situazione di cantiere. L'analisi spaziale è più complicata e va trattata con la discretizzazione dello spazio, cosa che il modello BIM non ci permette di fare, da questa valutazione è stata evidente la necessità di optare per una piattaforma di simulazione dinamica dove è possibile lavorare per discretizzazione del tempo e dello spazio. Il BimServer può essere il data-base di partenza da dove è possibile estrarre le informazioni geometriche della scena di cantiere, e non la piattaforma di implementazione del modello. Il lavoro fatto ha portato allo sviluppo di un modello di valutazione del rischio real-time per la gestione della sicurezza, in una fase critica come quella del monitoraggio del rischio. Mentre per la fase di progetto è più importante individuare i possibili rischi, per la fase di monitoraggio è fondamentale controllarli ed evitare, così, che non si attui una situazione di rischio.

In questa fase il focus del processo riguarda la costruzione di regole generali a partire dai dati osservati. Da un punto di vista generale si possono distinguere tecniche per lo studio dell'*interdipendenza* da quelle utilizzate per lo studio della *dipendenza*. Una ulteriore distinzione riguarda il tipo di variabili utilizzate per descrivere il fenomeno oggetto di studio: *variabili qualitative* o *variabili quantitative*. Lo studio dell'interdipendenza per variabili di tipo qualitativo si avvale di tecniche quali l'analisi delle corrispondenze o i modelli log lineari. Tecniche di questo tipo vengono impiegate nei progetti di segmentazione comportamentale della clientela, definizione di nuovi prodotti, costruzione della scheda cliente o della scheda agenzia. L'analisi di dipendenza riguarda lo studio di una variabile rispetto ad altre variabili considerate esplicative. Anche in questo caso i

modelli possono essere impiegati a seconda della natura delle variabili considerate: nel caso di variabili categoriche, ad esempio, modelli logit; nel caso di variabili quantitative, modelli di regressione lineare o logistica, a seconda della natura della variabile dipendente. Tecniche di analisi delle dipendenze vengono impiegate nei progetti di costruzione di scoring system o di valutazione del potenziale a livello di singolo cliente o a livello di area territoriale. Questo tipo di modellistica è piuttosto tradizionale. In genere la possibilità di capire a fondo i modelli e soprattutto la trasparenza degli stessi portano ad una preferenza nel loro utilizzo rispetto a metodi più complessi e di più difficile analisi. In molti casi però considerazioni sullo spazio delle variabili, sulla dimensione del problema, sulla complessità del modello esplicativo sottostante portano alla necessità di utilizzare altro tipo di modellistica: reti neurali, alberi decisionali, algoritmi genetici. Si tratta di modelli che trattano diverse tipologie di variabili e che hanno il pregio di funzionare anche quando la dimensione del problema è decisamente ampia. Sono proprio gli avanzamenti tecnologici recenti che hanno reso possibile l'impiego di queste tecniche, destinate a diventare una parte fondamentale del bagaglio degli attrezzi dell'analista. Alle nuove tecnologie è legato il concetto di training o learning che deriva direttamente dal campo dell'intelligenza artificiale del machine learning. Con esso si intende quella fase della costruzione del modello dove il modello stesso (tramite un algoritmo di apprendimento) apprende le informazioni contenute nel *training dataset* – un particolare sottoinsieme dei dati preparati ai passi precedenti. Se si tratta della costruzione di un modello predittivo, il training dataset, conterrà tutte variabili necessarie per le predizioni, dette variabili *indipendenti*, e la variabile che contiene il risultato, detta *variabile dipendente o target*. L'apprendimento in cui si conosce anche il risultato viene detto *supervised learning* (apprendimento supervisionato), come il caso del fraud detection e del risk management.

Sulla base di quanto detto si è scelto di modellare la valutazione del rischio attraverso una rete bayesiana. La Rete Bayesiana, è una tecnica di inferenza probabilistica, ed è stata la parte dove è stato speso più tempo, vista l'enorme potenzialità del dislocamento di conoscenza, mentre il modello if-then-else è stato scartato, come già detto, essendo poco rappresentativo nel gestire un problema come il rischio. La rete stessa poi dovrà essere alimentata da sensori, telecamere e sistemi che individuano dati utili alla rete in real-time. L'alimentazione real-time della rete ci permette di accedere alle informazioni in un tempo strettamente utile così da prevenire il rischio ma più che prevenire il rischio, ci si è concentrati sull'inosservanza della norma. Prevenire una possibile inosservanza della norma significa mantenersi ad una certa probabilità di rischio limite, molto bassa, che dallo stesso legislatore è stata considerata accettabile. La rete sarà l'elemento che assisterà l'operatore nelle operazioni di cantiere, e nello stesso tempo facendo inferenza probabilistica del rischio attiverà gli Alert in situazioni di probabile inosservanza della norma. Tutto ciò mi permette di

creare un Supervisore per l'identificazione in tempo reale delle situazioni di rischio basate su piattaforma virtuale. Nel capitolo successivo verrà trattato l'ambiente virtuale nella sua complessità, verranno indicati come sarà configurato l'ambiente virtuale in relazione alle esigenze sopra descritte.

2.1.2 Sensori di localizzazione UWB

La localizzazione di personale operativo, macchinari e attrezzature è la fase primaria per effettuare una simulazione di una scena reale. Infatti tale processo permette di conoscere e monitorare in tempo reale la posizione di ogni componente presente all'interno di una fase costruttiva in modo da poterne individuare i rischi che tale fase presenta nelle dinamiche di cantiere.

I rischi legati ad una fase esecutiva possono prevedere:

- Lesioni con attrezzature
- Lesioni con macchinari
- Urto con attrezzature a terra e attrezzature sospese
- Urto con macchinari
- Investimento
- Caduta di materiale dall'alto

Quindi come si può notare dai probabili rischi sopra elencati, la conoscenza della posizione dei soggetti coinvolti durante le dinamiche di cantiere è di fondamentale importanza nella prevenzione del rischio.

La procedura di localizzazione prevede tre fasi:

- 1 Osservazione del segnale
- 2 Estrazione della posizione tramite i parametri del segnale
- 3 Stima delle coordinate

Tale procedura può essere condotta utilizzando diverse tecniche, tra cui quelle più utilizzate sono:

- ToA Time of arrival (tempo di arrivo)
- TDoA Time difference of arrival (differenza tra i tempi di arrivo)
- DoA Direction of arrival (direzione di arrivo)
- RSS Received signal strength (ricezione di segnali potenti)

La tecnologia ToA misura direttamente la distanza mettendo in relazione il tempo di percorrenza del segnale con la corrispettiva velocità di propagazione. Ciò rileva direttamente la distanza tra trasmettitore e ricevitore.

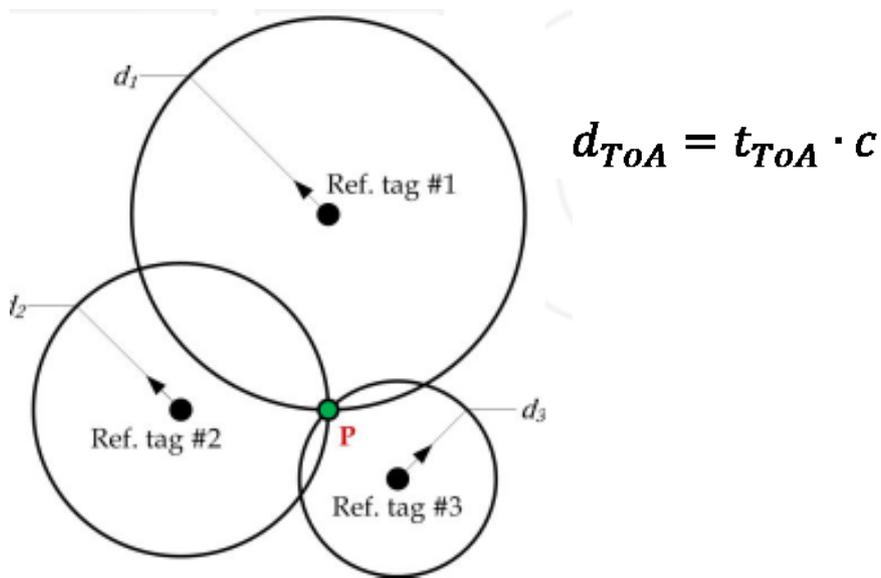


Figura 2.2 – Rappresentazione tecnologia ToA

La tecnologia TDoA invece misura le differenze in termini di tempo nella ricezione di segnali in punti di riferimento, anziché misurare direttamente il tempo di percorrenza tra trasmettitore e ricevitore. Infatti la marca temporale del segnale trasmesso dall'oggetto da localizzare è sconosciuta, ma vengono determinate le differenze di tempo sui ricevitori sincronizzati.

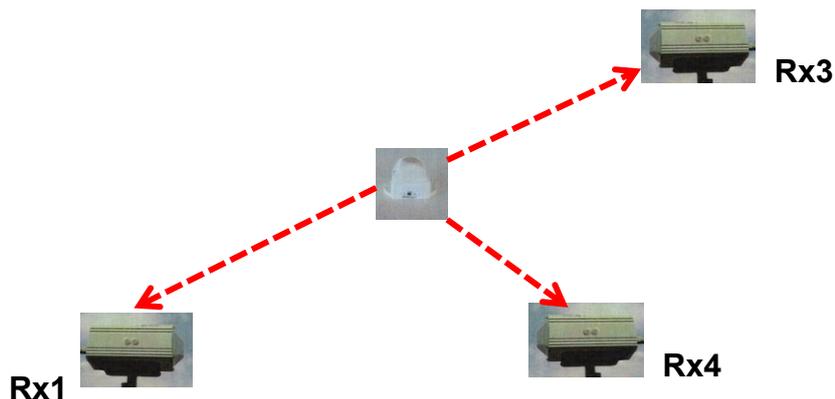


Figura 2.3 – Rappresentazione tecnologia TDoA

La differenza con la ToA consiste nel fatto che il TDoA non necessita di sincronizzazione tra ricevitore e trasmettitore. Tuttavia le stazioni di riferimento devono essere sincronizzate. Un metodo di posizionamento che supporta il TDoA è la laterazione iperbolica. Tale tecnica consiste nel considerare solo due ricevitori e un nodo mobile, e pensare a quest'ultimo come uno dei punti appartenenti ad un'iperbole.

L'iperbole nel TDoA è il luogo dei punti ai quali il nodo mobile appartiene, così che la distanza con ciascun fuoco (rappresentato dai ricevitori) è costante. Il punto d'intersezione che si trova nell'area monitorata, restituirà la posizione del nodo mobile.

La tecnica del TDoA viene utilizzata dai ricevitori UWB che sono costituiti da impulsi brevi, in cui ogni tag invia ripetutamente un pacchetto d'impulsi UWB e ogni ricevitore utilizza un rivelatore d'impulsi corti altamente sensibile per misurare il momento in cui un pacchetto di tag arriva alla sua antenna. Alcuni impulsi potrebbero andare persi, ma se il sistema è sovradeterminato, l'hub può calcolare la posizione del nodo mobile fino a quando la differenza tra il numero totale di ricevitori e i ricevitori che non inviano letture non è inferiore al numero minimo di letture necessarie per stimare la posizione.



Figura 2.4 – Sensore UWB

L'utilizzo del UWB nel nostro caso è necessario per rilevare informazioni dall'ambiente reale. La procedura di utilizzo di tale tecnologia consiste nel disporre su un soggetto dei trasmettitori, i tag, in modo da poterne rilevare la posizione attraverso l'utilizzo di ricevitori, le ancore, disposti lungo il perimetro dell'ambiente sperimentale, nel nostro caso il DC3. Man mano che il soggetto si sposta sulla zona di sperimentazione, le ancore aggiornano la posizione del soggetto in tempo reale.

Tali informazioni verranno trasmesse all'ambiente di simulazione, Unity, il quale basandosi sui dati input sarà in grado di fornire dati in output in modo da poter simulare le dinamiche di uno scenario in tempo reale.

Quindi tale tecnologia è utile per migliorare la gestione della sicurezza nei cantieri, in quanto è in grado di rilevare ed aggiornare informazioni sulle dinamiche lavorative in tempo reale, così da poter ridurre eventuali rischi durante un processo costruttivo.

2.1.3 Sistemi di acquisizione dati

I dati raccolti dai sensori UWB dovranno successivamente essere trasferiti nell'ambiente di simulazione. Per fare ciò viene utilizzato un protocollo di messaggistica, chiamato MQTT (MQ Telemetry Transport), estremamente semplice e leggero, progettato per dispositivi vincolati e reti a bassa larghezza di banda, alta latenza o inaffidabili. I principi di progettazione sono di minimizzare la larghezza di banda della rete e i requisiti delle risorse del dispositivo, cercando anche di garantire un'adeguata affidabilità dei dati consegnati.

Tali dati tramite il protocollo MQTT vengono trasferiti ad un tool di flow-based programming per l'internet of things che permette il collegamento reciproco di diversi dispositivi con sensori ed attuatori. Il tool utilizzato è NodeRed, uno strumento di programmazione basato sul flusso, sviluppato dal team Emerging Technology Services di IBM e ora parte della JS Foundation.

Inventato da J. Paul Morrison negli anni '70, la programmazione basata sul flusso è un modo per descrivere il comportamento di un'applicazione come una rete di scatole nere o "nodi". Ogni nodo ha uno scopo ben definito; riceve alcuni dati, utilizza quei dati e poi li trasmette. La rete è responsabile del flusso di dati tra i nodi.

È un modello che si presta molto bene a una rappresentazione visiva e lo rende più accessibile a una più ampia gamma di utenti. Se qualcuno può scomporre un problema in passaggi discreti, può

guardare un flusso e avere un'idea di ciò che sta facendo; senza dover comprendere le singole righe di codice all'interno di ciascun nodo.

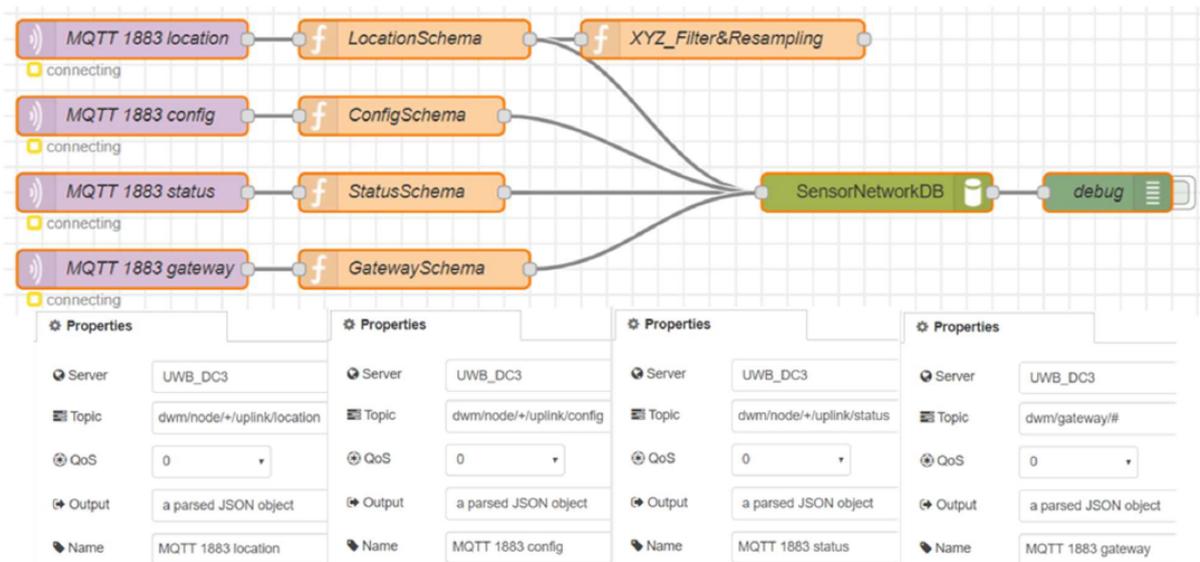


Figura 2.5 – Nodered flow-based programming

Node-RED è costituito da un runtime basato su Node.js a cui si punta un browser Web per accedere all'editor di flusso. All'interno del browser crei la tua applicazione trascinando i nodi dalla tua tavolozza in un'area di lavoro e inizi a collegarli insieme.

I dati raccolti da nodered vengono inviati in un database, Arango.js, dove verranno trascritti in json per essere immagazzinati in ArangoDB dove verranno trascritti successivamente in C++ per poter essere elaborati dalla ambiente d simulazione virtuale, Unity.

2.1.4 Ambiente di simulazione virtuale

Lo strumento utilizzato per la creazione dell'ambiente di simulazione virtuale è **Unity**. Un software di gaming utilizzato principalmente per la creazione di videogiochi 2D e 3D, ma anche per visualizzazioni architettoniche e animazioni 3D in tempo reale. La caratteristica principale del software è che si tratta di un *integrated development environment*, ovvero un ambiente di sviluppo integrato, all'interno del quale è possibile sviluppare il codice sorgente, gestendo e quindi di fatto controllando il funzionamento del programma stesso. I linguaggi di programmazione utilizzati da questa piattaforma sono: *C#*, *Javascript* e *Boo*; in questo caso è stato usato *C#*, essendo mediamente

il più comune. Nei prossimi sotto paragrafi saranno analizzate le componenti base del software, e le caratteristiche principali alla base del suo funzionamento.

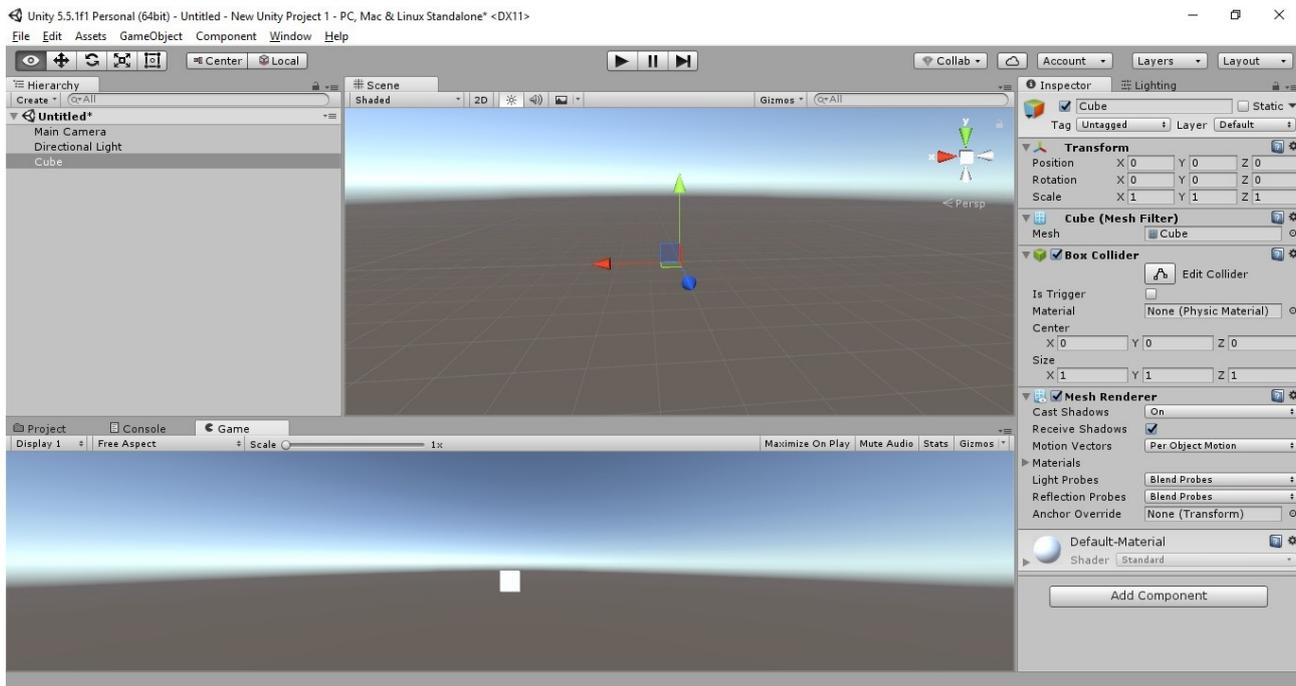


Figura 2.6 – Software Unity

2.1.4.1 Interfaccia grafica e pannelli

L'interfaccia di Unity è formata da pannelli, che possono essere posizionati a piacimento all'interno semplicemente trascinando le etichette che ne mostrano il nome. I pannelli principali per utilizzare il software sono:

- Pannello Project
- Scene View
- Pannello Hierarchy
- Pannello Inspector
- Game View

Il pannello project visualizza tutti i file presenti nel progetto, chiamati *asset*. Un asset è la rappresentazione di qualsiasi oggetto che può essere utilizzato nel progetto; può provenire da file creati al di fuori del software, come un altro modello 3D, un file audio, un'immagine ecc. Nella parte sinistra della figura 3.1 è possibile vedere la struttura delle cartelle del progetto organizzate in ordine gerarchico; quando una di queste è selezionata, il suo contenuto è mostrato nella parte destra del

pannello. La Scene view, chiamata anche “Scena”, rappresenta l’ambiente di simulazione dove verranno visualizzati tutti gli oggetti appartenenti alla scena.

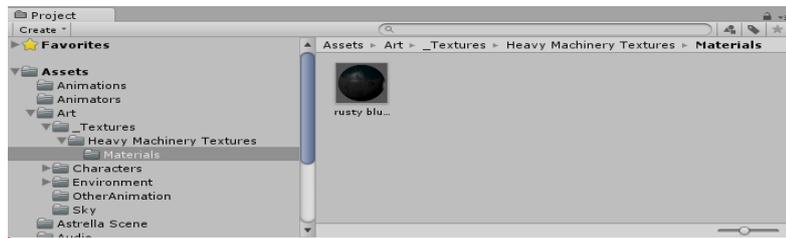


Figura 2.7 – Pannello Project

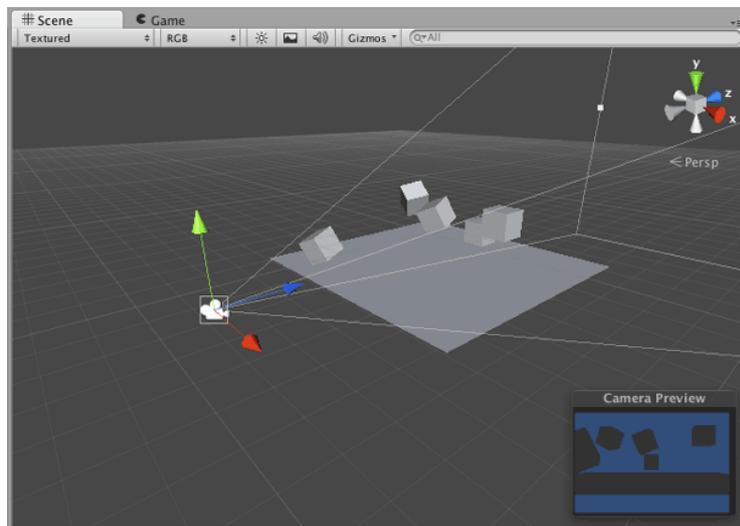


Figura 2.8 – Scene view

Al centro della Scena è visualizzata una griglia, che permette di orientarsi nello spazio 3D e di capire qual è il piano di base; tutti gli oggetti che non hanno una rappresentazione fisica (come ad esempio le luci, le camere ecc) vengono visualizzati all’interno della scena tramite icone, i cosiddetti *Gizmo*, che possono essere nascoste o ridimensionate a piacimento. Per “navigare” nella scena sono disponibili tre comandi principali: *pan*, cliccando e trascinando con il tasto centrale, *zoom*, tramite la rotellina, e *orbit*, tenendo premuto Alt e trascinando con il tasto sinistro. Per spostare ed editare i GameObject, invece, bisogna usare la “transform toolbar” presente in alto a sinistra:



Figura 2.9 – Transform toolbar

Andando da sinistra verso destra nella figura precedente vi sono: ‘pan’, ‘trasla oggetto’, ‘scala oggetto’ e “seleziona oggetto”. Il pannello Hierarchy contiene la lista di tutti i GameObject presenti nella Scena: se gli oggetti sono aggiunti o rimossi nella Scena, parallelamente appariranno o scompariranno nel pannello.



Figura 2.10 – Pannello Hierarchy

Il pannello Inspector mostra informazioni dettagliate riguardanti pressoché qualsiasi cosa nell’Editor di Unity, compresi i GameObject, gli Asset e i materiali, permettendo di vedere tutti i *component*, e modificandone funzionalità e proprietà. Cliccando su “Add Component” inoltre, è possibile aggiungere diverse funzionalità da poter attribuire ad un oggetto, senza necessità di scrivere script per le funzionalità di base. Tuttavia lo *scripting* rappresenta una parte fondamentale dello sviluppo dei modelli in Unity, poiché permette di personalizzare le funzionalità di un oggetto uscendo dagli schemi predefiniti dei vari componenti. Gli script, così come i componenti pre-impostati, sono aggiunti a ciascun oggetto tramite il comando “add component”.

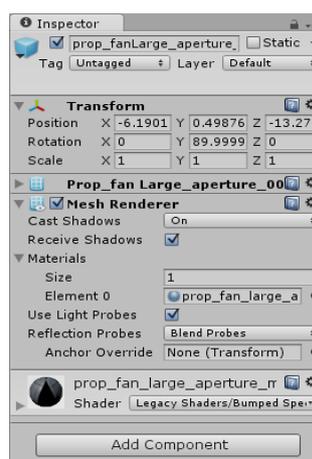


Figura 2.11 – Pannello Inspector

In ultimo, la Game View è la finestra dove è renderizzato ciò che la Camera (assumibile letteralmente ad una videocamera) posta all’interno della Scena registra. Per permettere la renderizzazione, e quindi

di fatto mostrare quello che rappresenta il lavoro di simulazione esecutivo, bisogna accedere alla “Play Mode”, tramite il primo pulsante presente nella toolbar in alto al centro della finestra del programma; è anche possibile stoppare il play mode, tramite il pulsante centrale.



Figura 2.12 – Playmode toolbar

2.1.4.2 GameObject

Quasi tutti gli oggetti che vengono visualizzati in Unity sono dei *GameObject*, identificati con un nome, delle proprietà di base e posizionati all’interno della scena. Gli oggetti all’interno della scena hanno proprietà diverse tra loro, che sono definite dai componenti, che possono essere aggiunte o rimosse dai GameObject e vengono mostrati nel pannello Inspector.

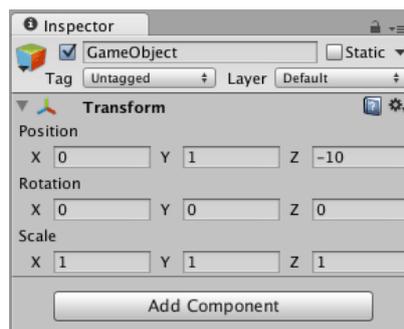


Figura 2.13 – Informazioni base nel pannello Inspector (Transform)

Nella prima casella di testo c’è il nome del GameObject, che può essere editato a piacimento, a sinistra c’è una checkbox che permette di rendere l’oggetto attivo. Gli oggetti inattivi non sono visibili all’interno della scena così come vengono rese inattive tutte le loro funzionalità, mentre a sinistra del nome dell’oggetto c’è la casella “Static” che rende l’oggetto immobile all’interno della scena. Nella riga sottostante si possono assegnare tag e definire i “layer” in cui si trova l’oggetto. Al di sotto dei layer e dei tag si trova il “Transform”, che caratterizza l’oggetto fornendogli una posizione, una rotazione e una scala all’interno della scena 3D. L’icona dell’ingranaggio sulla destra del componente permette di resettare i suoi valori, di rimuoverlo, di spostarlo su e giù nella lista per comodità, ma anche di copiare le informazioni che poi è possibile incollare successivamente su un altro GameObject.

2.1.4.3 Interazioni tra gli oggetti

Nell'ambiente Unity gli oggetti sono caratterizzati da vettori 3D, che possono indicare:

- ✓ La Posizione
- ✓ La Velocità
- ✓ La Dimensione
- ✓ Lo Spostamento
- ✓ La Rotazione

Una volta definiti i vettori che caratterizzano gli oggetti nell'ambiente Unity, è possibile definire le interazioni che possono avvenire tra i vari oggetti. Una prima interazione da analizzare è quella delle “collisioni”, cioè le interazioni, statiche e dinamiche, che si vengono a creare tra gli oggetti, le quali possono essere modellate seguendo le stesse leggi del mondo fisico. Alla base delle collisioni in Unity si trova il componente *Collider*, che è la classe base dalla quale ereditano tutti i vari tipi di collider, ognuno dei quali ha una forma diversa: a. e. *BoxCollider*, *SphereCollider* e così via, a seconda della forma dell'oggetto. I collider non devono per forza corrispondere come forma alla reale geometria dell'oggetto; per una collisione che invece necessita di un maggior grado di dettaglio è necessario usare il *MeshCollider*, che invece di utilizzare una semplice forma geometrica calcola l'effettiva geometria dell'oggetto considerato. Una volta applicato un componente Collider ad un GameObject esso inizia a rilevare le collisioni con altri Collider nella scena, e invierà a tutti gli script tre eventi: *OnCollisionEnter*, *OnCollisionExit*, *OnCollisionStay* (da notare che se un oggetto non deve collidere con altri è consigliato rimuovere eventuali Collider, per evitare calcoli inutili). Il primo evento “*OnCollisionEnter*”, rileva le collisioni, e avviene nel frame in cui la collisione è iniziata; il secondo, “*OnCollisionExit*”, viene attivato nel frame in cui finisce la collisione. Il terzo, “*OnCollisionStay*”, gestisce ciò che accade durante la collisione. Una versione speciale di Collider è rappresentata dai *Trigger*, deputati alla creazione di oggetti non tangibili, di cui però si vogliono comunque rilevare le collisioni. È il caso, ad esempio, delle cosiddette “aree interruttore”, in cui appena un oggetto vi entra, succede qualcosa. Per creare un trigger è necessario spuntare la casella *Is trigger* nell'Inspector di un qualunque collider; essi non emettono i tre eventi appena descritti (*OnCollisionEnter*, *OnCollisionExit*, *OnCollisionStay*), ma una versione speciale chiamata: *OnTriggerEnter*, *OnTriggerExit* e *OnTriggerStay*. Questi messaggi funzionano in modo simile agli altri, ma posseggono un parametro che non è di tipo *Collision*, ma *Collider*, ovvero il collider che ha toccato l'oggetto; per questo motivo contengono meno informazioni, e sono anche più leggeri da calcolare delle loro controparti *OnCollision*. È importante notare che gli oggetti mossi mediante il loro componente *Transform*, (quindi modificando la *Transform.position*, la *Transform.Translate*, oppure

la *Transform.rotate*) non generano i messaggi riguardanti la fisica che serve per gestire le collisioni. In altre parole, un oggetto mosso solo dalla Transform compenetrerà altri Collider come se non ci fosse stata alcuna collisione. Per ricevere i messaggi, quindi, è necessario aggiungere un altro componente, che permetta agli oggetti di rispettare le leggi della fisica: il *Rigidbody*. Gli oggetti che possiedono solo un Collider sono definiti “collider statici”, perché a seguito di un urto non si spostano; questa caratteristica va bene per piattaforme camminabili, pavimenti o muri. Per quanto riguarda personaggi, macchinari ed altri oggetti in movimento è necessaria quindi l’aggiunta del *Rigidbody*, che permette di ricevere urti da altri collider, e di muoversi a seguito di spinte reali (ad esempio *rigidbody.ApplyForce* oppure *rigidbody.ApplyTorque*), e non modificando solamente la Transform.

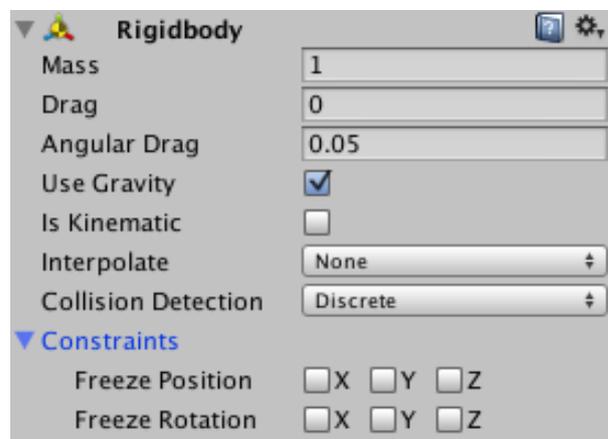


Figura 2.14 – Componente Rigidbody nel pannello Inspector

Il *rigidbody* dà all’oggetto anche altre proprietà, come la possibilità di seguire la gravità verso il basso, avere un attrito (*friction*) nelle collisioni con gli altri oggetti, ed una resistenza al movimento (in Unity chiamata *drag*), che può essere usata per molti scopi, fra cui ad esempio simulare il limite di velocità che gli oggetti hanno in situazioni reali di attrito con l’aria; affinché la simulazione risulti veritiera, tuttavia, è importante controllare che la scala dei vari oggetti sia realistica. Una volta applicato un *Rigidbody* ad un oggetto, entrando nella modalità *PlayMode*, esso inizierà a cadere per effetto della gravità: questo comportamento si può eliminare togliendo la spunta alla casella *Use Gravity*. Affinché l’oggetto si muova a seguito di un input, ci sono alcune funzioni della classe *Rigidbody* che applicano una spinta all’oggetto; quanto la spinta influenzi l’oggetto e di quanto lo smuova è una risultante di diversi fattori: la sua massa, il suo *drag* (questi primi due si trovano fra le proprietà nell’Inspector), il suo attrito statico o dinamico (che sono proprietà del *Physic Material*, analizzato in seguito). Fra le proprietà del *rigidbody* c’è anche la possibilità di limitare il movimento, tramite i *Constraints*, che nel pannello Inspector sono rappresentati da sei caselline che permettono di bloccare movimento e

rotazione dell'oggetto nei tre assi. L'opzione *Is Kinematic*, se spuntata, consente al rigidbody di "esistere" nel mondo fisico, ma di non essere influenzato da forze, vincoli o collisioni, permettendo di creare quindi un oggetto completamente controllato dall'animazione. La funzione più importante relativa al rigidbody è *AddForce*, che accetta due parametri: uno fondamentale, che indica direzione e forza della spinta (un vettore forza), ed uno di tipo *ForceMode*, che indica al motore fisico come trattare la spinta. Una spinta fisica infatti può essere di due tipi: "impulsiva", istantanea come ad esempio un salto, oppure "continua", come un trascinamento, o il motore di un'auto; può inoltre tenere conto della massa, per un risultato fisico più realistico, oppure no. Un'altra funzione analoga a quella appena descritta è *AddTorque*, che permette di operare sulle rotazioni, applicando quindi una spinta di rotazione, che influenza il corpo in base alle caratteristiche che possiede (massa, baricentro ecc).

2.4 Modellazione della scena

Una volta creato l'ambiente di simulazione virtuale, bisogna modellare la scena. Per far ciò ci serviamo di uno strumento di inferenza probabilistica, la Rete Bayesiana, che permette di simulare una scenario di rischio durante una fase lavorativa.

2.4.1 Rete Bayesiana

Le Reti Bayesiane forniscono un modello per le distribuzioni di probabilità, le caratteristiche che le rendono un modello utile per agenti intelligenti sono:

- Compattezza della rappresentazione
- Causalità in primo piano
- Dotato di una Semantica

Per gli agenti intelligenti, la rete bayesiana rappresenta la loro conoscenza (Ambiente, Agente, Rete Bayesiana) In base agli stimoli dell'ambiente, l'agente interroga la rete bayesiana per dedurre qual'è l'azione più idonea.

Questi modelli grafici risultano particolarmente efficienti nell'affrontare problematiche caratterizzate da incertezza e complessità, in quanto combinano le proprietà della teoria della probabilità con quella della teoria dei grafi. La probabilità misura l'incertezza dei dati osservati mentre la teoria dei grafi crea una struttura dati coerente con il contesto analizzato e fornendo un'interfaccia intuitiva attraverso cui i ricercatori di molte discipline possono interagire con il problema oggetto di studi. Generalmente, si dispone di un modello M , descritto dall'insieme delle variabili X , e delle dipendenze dirette, V , esistenti tra coppie di elementi di X . Il modello di rete Bayesiana è rappresentato da un grafo G , $GM(X, V)$ dove M e G sono strettamente correlati, in quanto la topologia del grafo riflette alcune delle proprietà intrinseche nel modello, come appunto le dipendenze o indipendenze tra le variabili oggetto di studio.

Le reti Bayesiane sono modelli grafici basati sulle probabilità utilizzati per descrivere ed analizzare situazioni in condizioni di incertezza. La struttura di una rete Bayesiana è definita a partire da due componenti principali: i **nodi**, che rappresentano le variabili casuali, gli **archi** diretti che evidenziano le **dipendenze probabilistiche** tra le variabili (Korb and Nicholson, 2011). Nello specifico, una rete

Bayesiana, spesso indicata con BN dall'inglese Bayesian network, è definita nel seguente modo (Pourret et al., 2008):

- Si considerino n variabili casuali X_1, X_2, \dots, X_n , un **grafo aciclico diretto** con n nodi numerati e si supponga che il nodo i del grafo sia associato alla variabile X_i . Il grafo è una rete Bayesiana, che rappresenta le variabili X_1, X_2, \dots, X_n , se:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa(X_i))$$

dove $Pa(X_i)$ denota l'insieme dei genitori del nodo X_i , ovvero tutte le variabili tali che nel grafo esiste un **arco diretto** da ciascuna di queste al nodo i . Una rete Bayesiana è generalmente indicata con $BN = (G, P)$ dove G rappresenta la struttura e P la distribuzione di probabilità.

2.4.1.1 Componente qualitativa

Una rete bayesiana viene identificata a partire dalla definizione della sua struttura in termini di grafo (Krieg, 2001). Un grafo, indicato con $G(N, A)$, è un set di nodi N , o vertici, connessi da un insieme di archi A che possono essere o meno direzionati. La struttura viene spesso indicata con $G = (N, A)$ ed è definita da un insieme di nodi, N , rappresentante le variabili casuali da analizzare, ed un insieme di archi, A , indicanti le relazioni di dipendenza tra i nodi del grafo. Poiché l'insieme N rappresenta esattamente l'insieme X delle variabili del sistema, nel contesto delle BN spesso la nozione assume la forma $G = (X, A)$.

Bisogna interpretare con cautela le relazioni di dipendenza, sia dirette che indirette. Intuitivamente la presenza di un arco tra due nodi indica una relazione diretta tra le variabili corrispondenti mentre l'assenza di un collegamento significa che le variabili, all'interno di questo specifico modello, sono considerate indipendenti. Si noti che è stato utilizzato il termine "relazioni di dipendenza" invece che "relazioni causali"; questa precisazione è indispensabile poiché la causalità è difficile da giustificare nella maggior parte dei casi (Scutari and Denis, 2015).

Nel modello, le variabili casuali sono identificate dall'etichetta del nodo corrispondente e possono essere categoriali, discrete o continue. Le prime sono descritte all'interno di insieme contenente un numero finito di elementi mentre le variabili continue possono assumere uno degli infiniti valori compresi all'interno del proprio dominio. In ogni istante, un generico nodo della rete, X_i , può assumere in modo mutualmente esclusivo uno degli stati appartenenti al dominio in cui è definito. Nel seguito della tesi verranno considerate solo variabili categoriali o discrete, caratterizzate cioè da un numero finito di valori. La struttura di una rete Bayesiana utilizza la metafora della famiglia per

descrivere le relazioni gerarchiche tra gli elementi del grafo: un nodo è detto genitore (parent) di un figlio (child) se esiste un arco diretto che colleghi il primo al secondo. Un'estensione di questa terminologia identifica, prendendo un generico nodo X_i , l'insieme dei discendenti (descendants) come tutti i nodi che possono essere raggiunti attraverso un percorso diretto partendo da X_i , e gli antenati (ancestor), come l'insieme formato dai nodi da cui si può raggiungere X_i attraverso un percorso diretto (Faltin et al., 2007).

Un nodo senza genitori è definito radice (root) mentre un nodo senza figli prende il nome di foglia (leaf); ogni altro nodo è classificato come intermedio (intermediate). L'unico vincolo strutturale impone che all'interno della rete non ci siano cicli diretti, ovvero che non sia possibile partire da un nodo e ritornarvi semplicemente seguendo la direzione degli archi (Korb and Nicholson, 2011). Per questo motivo le BNs appartengono alla categoria dei grafi aciclici diretti o directed acyclic graph (DAG) 2. Il vincolo dell'aciclicità è necessario, poiché:

- la probabilità congiunta non sarebbe fattorizzabile come prodotto di probabilità condizionate in presenza di cicli.
- qualunque sia il numero e la natura delle dipendenze tra le variabili, esiste almeno una struttura aciclica adatta a rappresentare l'oggetto (Pourret et al., 2008).
- si garantisce che nessun nodo possa essere il suo stesso ascendente o discendente.

A differenza dei grafi non diretti, i DAG riescono a rappresentare, in modo molto flessibile, un'ampia varietà di indipendenze probabilistiche (Krieg, 2001).

2.4.1.2 Componente quantitativa

Le reti Bayesiane sono annoverate tra i modelli probabilistici in virtù del fatto che le relazioni intercorrenti tra le variabili sono quantificate specificando, per ogni nodo, una distribuzione di probabilità condizionata (Korb and Nicholson, 2011). Queste distribuzioni sono rappresentate attraverso tabelle che prendono il nome di tabella di probabilità condizionata o conditional probability table (CPT) definite come segue (Krieg, 2001).

Tabella di probabilità condizionata CPT: Per ogni variabile X_i , con n nodi genitori (Y_1, Y_2, \dots, Y_n), la CPT è indicata con $P(X_i | Y_1, Y_2, \dots, Y_n)$ e contiene la probabilità associata ad ogni possibile combinazione tra gli stati di X_i e di tutti i suoi genitori.

La definizione della tabella di probabilità avviene in modi diversi a seconda del tipo di nodo:

- Intermedio o foglia: per ogni combinazione degli **stati** dei **genitori** di un generico nodo X_i , la tabella indica la probabilità condizionata che X_i assuma uno dei valori contenuti nel proprio dominio.
- Radice: non avendo genitori, la tabella rappresenta la probabilità a priori associata ad ogni stato assunto dalla variabile. Questa è una probabilità marginale e non condizionata, poiché l'insieme dei genitori di un nodo radice è vuoto.

Utilizzando la regola del prodotto (chain rule) è possibile determinare la distribuzione di probabilità congiunta (joint probability distribution) dei nodi dell'intera BN. Essa è calcolata come prodotto delle probabilità condizionate e marginali di tutti i nodi (Krieg, 2001).

Definizione (Distribuzione di probabilità congiunta). Per una rete Bayesiana definita sull'insieme delle variabili $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ la distribuzione di probabilità congiunta delle rete è definita come:

$$P(X) = P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | P_a(X_i))$$

dove $P_a(X_i)$ indica l'insieme dei genitori del nodo X_i .

La distribuzione di probabilità congiunta può essere dunque fattorizzata e scomposta nelle singole distribuzioni di probabilità locale, ognuna delle quali coinvolge un nodo della rete e l'insieme dei suoi genitori. Dal punto di vista dell'efficienza computazionale, all'aumentare del numero dei genitori di un nodo, cresce anche la dimensione della tabella di probabilità condizionata e di conseguenza la potenza di calcolo richiesta per l'analisi. Ad esempio: in una rete booleana, dove ciascun nodo può assumere al massimo due valori, ad una variabile con n genitori è associata una TPC con 2^{n+1} probabilità.

2.4.1.3 Dipendenza ed indipendenza nelle reti bayesiane

Caratteristica fondamentale di una BN è la capacità di catturare e rappresentare le relazioni che intercorrono tra le variabili del sistema analizzato. Per questo motivo è indispensabile far chiarezza sui concetti rispettivamente di dipendenza e indipendenza al loro interno. Il concetto di d-separation viene introdotto come criterio grafico per identificare le indipendenze che sussistono tra le variabili data la struttura della rete. Per comprenderne al meglio il significato è necessario definire la nozione di percorso bloccato. Per far ciò bisogna definire le possibili relazioni all'interno di reti definite su insiemi di tre variabili (Krieg, 2001):

Connessioni seriali (serial connections): nella Figura 2.3a è rappresentata una rete formata da tre nodi in cui X influisce su Y che a sua volta influisce su Z. In questa situazione si crea un'indipendenza condizionata, poiché:

$$P(Z | X \wedge Y) = P(Z | Y) \equiv X \perp Z | Y$$

Quest'uguaglianza indica che la probabilità di Z sapendo che X e Y si sono verificati è uguale a quella che si otterrebbe sapendo che solo Y si è verificato; inizializzando Y ad un qualche valore, conoscere X non ha alcuna influenza sulla probabilità di Z. Questa relazione di indipendenza condizionata è indicata come $X \perp Z | Y$.

Connessioni divergenti (diverging connections): in una v-structure (Figura 2.3b), il processo di inferenza può essere compiuto o su un qualsiasi nodo figlio conoscendo lo stato del genitore o sul parent conoscendo lo stato di uno dei nodi child. Nel caso in cui sia data un'evidenza sul genitore, il flusso delle informazioni tra i nodi figli è bloccato e la probabilità dei singoli stati di un nodo figlio non è influenzata in alcun modo dalle evidenze riscontrate per gli altri figli:

$$P(Z | X \wedge Y) = P(Z | Y) \equiv X \perp Z | Y$$

Conoscere lo stato del genitore Y instaura dunque una relazione di indipendenza condizionata tra i figli X e Z.

Connessioni Convergenti (converging connections): la struttura ad effetti comuni, rappresentata nella Figura 2.3c, descrive la situazione in cui più variabili producano uno stesso effetto. I genitori sono marginalmente dipendenti se non si hanno evidenze sul figlio mentre in caso contrario diventano condizionalmente indipendenti (o d-connected): e

$$P(Z | X \wedge Y) = P(X | Y) \equiv X \perp Z | Y$$

Dopo aver analizzato questi tre tipi di connessione, si può definire il concetto di dseparazione, elemento indispensabile per la definizione e l'identificazione delle indipendenze in una rete Bayesiana (Pearl, 1995).

2.4.1.4 Inferenze nelle reti bayesiane

Le reti Bayesiane sono dei modelli statistici concepiti per essere dinamici nel tempo permettendo l'integrazione di nuove informazioni relative al fenomeno oggetto di studio. Dopo aver definito la struttura della rete sull'insieme dei nodi $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ e aver quantificato l'incertezza attraverso la stima dei parametri $P(X_i | P_a(X_i))$, è possibile aggiornare la componente quantitativa della rete attraverso il calcolo delle probabilità a posteriori sui nodi, cioè le probabilità aggiornate delle variabili quando si ottengono nuove informazioni sul sistema. Questo processo si definisce come inferenza probabilistica (o belief updating). Definizione 2.21 (Evidenza). Sia E un sottoinsieme di variabili di X che assume complessivamente lo stato e ($x_i = e_i$ con $x_i \in X$ e $e_i \in e$), e viene detta evidenza e si riferisce a qualsiasi nuova informazione sia osservata ed introdotta nel modello. Durante l'analisi di un fenomeno, le informazioni raccolte possono avere caratteristiche diverse che necessitano di essere tenute in considerazione e trattate in modo adeguato. Affermare che un nodo X_i sia stato osservato trovarsi in un preciso stato e_i rappresenta un'informazione certa, $P(X_i = e_i) = 1$, che prende il nome di evidenza specifica (hard evidence). Al contrario, quando si esclude che una variabile assuma uno o più valori, si parla di evidenza negativa; dire che X_i non si trova nello stato e_i equivale a dire che la $P(X_i = e_i) = 0$. Nella pratica, spesso le informazioni non sono precise e quindi incorporano un certo grado di incertezza. Quando un'osservazione non è in grado di identificare direttamente lo stato di una variabile ma può solo darne un'indicazione probabilistica, prende il nome di evidenza virtuale (Korb and Nicholson, 2011). La capacità poi di poter compiere ragionamenti di diversa natura è uno dei motivi per cui le reti Bayesiane sono considerate degli strumenti flessibili. Quattro sono le logiche (Figura 2.4) utilizzabili nelle BN (Korb and Nicholson, 2011). A seconda di quali siano i nodi in cui si inserisce l'evidenza nel modello (evidence node) e quali invece quelli su cui compiere inferenza (query node), si distinguono i ragionamenti in:

- **Diagnostico** (bottom-up): l'evidenza riguarda un effetto o sintomo (Z) e si cerca di ragionare in termini di cause (X, Y, W).
- **Predittivo** (top-down): pervengono nuove informazioni riguardanti le cause (X o Y) e si vuole determinare, seguendo la direzione degli archi, i nuovi parametri riguardanti gli effetti (W, Z).
- **Inter causale** (explaining away): logica alla base delle v-structure in cui si ragiona sulle cause reciproche che hanno un effetto comune; in questo caso, anche se inizialmente le cause sono indipendenti, entrare in possesso di informazioni riguardanti l'effetto (W) ed una causa (Y) permette di modificare la probabilità a posteriori associata alle altre cause (X).

- **Combinato:** ogni combinazione delle precedenti forme di ragionamento.

L'inferenza probabilista consiste dunque nella propagazione di un'informazione su alcuni nodi all'interno della rete Bayesiana per stimarne gli effetti sulle altre variabili (Sucar, 2015).

Definizione. Probabilità a posteriori - Belief. Data una BN con n nodi, per ogni variabile X_i data l'evidenza e , la probabilità a posteriori che X_i assuma lo stato x_i è definita come:

$$Bel(X_i = x_i), P(x_i | e)$$

Il vettore contenente le probabilità a posteriori per ogni possibile stato di X_i si indica con $Bel(X_i)$ (Krieg, 2001). La capacità di adattarsi ogni qual volta sopraggiungano nuove informazioni è sicuramente una delle caratteristiche più importanti delle reti Bayesiane. Conoscere le leggi che determinano la propagazione delle evidenze nel modello consente di calcolare le variazioni che subiranno le probabilità delle singole variabili. A seconda del tipo di struttura, esistono in letteratura metodologie per l'inferenza probabilistica esatta o approssimata. Per aggiornare le reti più semplici è sufficiente applicare ripetutamente il teorema di Bayes mentre per reti con un grado di complessità strutturale elevato esistono algoritmi approssimati per il calcolo delle probabilità a posteriori.

2.4.1.5 Inferenza esatta

La velocità e l'efficienza del processo d'inferenza dipendono da fattori come la struttura della rete, il numero di connessioni per ogni nodo, la collocazione delle evidenze e dei nodi query, ecc. Se il carico computazionale richiesto per l'elaborazione del passaggio di informazioni può essere gestito senza commettere errori allora l'inferenza si dice esatta o certa.

2.5 Integrazione rete bayesiana nella scena

La modellazione della scena viene creata attraverso l'utilizzo di un software, Hugin, in cui vengono stabiliti i vari nodi della rete con le relative caratteristiche e collegati tra loro seguendo la logica precedentemente descritta. Nell'ambiente di simulazione, non è possibile importare direttamente la rete, poiché Unity utilizza un linguaggio di programmazione basato su codici, come descritto nel paragrafo 2.1.4.

L'implementazione della rete all'interno della scena avviene tramite la scrittura della stessa in codice, utilizzando un tool di programmazione (Visual Studio), in cui viene creato uno script che descrive tutte le caratteristiche della rete in un linguaggio di programmazione compatibile con Unity, in questo caso C#.

Di seguito viene illustrato un frammento dello script della rete all'interno dell'ambiente di simulazione.

```
// Update is called once per frame
void Update()
{
    // BN nodes
    // Geometry and Speed nodes
    BayesianNode node1 = new BayesianNode("lin_dist", new string[] { "0-2", "2-4", "4-6", "6-9", "9-12", "12-15" }, new double[] { 0.16, 0.16, 0.16, 0.16, 0.16, 0.16 });
    BayesianNode node2 = new BayesianNode("dri_lin_speed", new string[] { "0.1-0.4", "0.4-0.8", "0.8-1.2" }, new double[] { 0.33, 0.33, 0.33 });
    BayesianNode node3 = new BayesianNode("mut_vis", new string[] { "see_each_other", "driver_sees_worker", "worker_sees_driver", "not_see_each_other" }, new double[] { 0.25, 0.25, 0.25, 0.25 });
    BayesianNode node4 = new BayesianNode("angle_dw", new string[] { "0-0.785", "0.785-2.355", "2.355-3.14" }, new double[] { 0.33, 0.33, 0.33 });
    BayesianNode node5 = new BayesianNode("dri_ang_speed", new string[] { "0.001-0.125", "0.125-0.25", "0.25-0.375", "0.375-0.5" }, new double[] { 0.25, 0.25, 0.25, 0.25 });

    // Time nodes
    BayesianNode node6 = new BayesianNode("lin_col_time", new string[] { "0-3", "3-5", "5-10", "10-20", "20-500" }, new double[] { 0.37439999999999996, 0.25120000000000001, 0.29120000000000001, 0.00001832,
    BayesianNode node7 = new BayesianNode("w_rea_time", new string[] { "0.001-1.5", "1.5-3", "3-4.5" }, new double[] { 0.7, 0.2, 0.1, 0.33, 0.33, 0.33, 0.7, 0.2, 0.1, 0.00001, 0.00001, 0.99999 }, node3);
    BayesianNode node8 = new BayesianNode("d_rea_time", new string[] { "0.001-1.5", "1.5-3", "3-4.5" }, new double[] { 0.33, 0.33, 0.33, 0.7, 0.2, 0.1, 0.7, 0.2, 0.1, 0.00001, 0.00001, 0.99999 }, node3);
    BayesianNode node9 = new BayesianNode("rot_col_time", new string[] { "0.001-3", "3-5", "5-10", "10-50", "50-1000" }, new double[] { 0.30079999999999996, 0.20480000000000007, 0.24480000000000007, 0.20

    // Comparison nodes
    BayesianNode node10 = new BayesianNode("comp", new string[] { "0.001-1.5", "1.5-3", "3-4.5" }, new double[] { 0.99999, 0.00001, 0.00001, 0.00001, 0.99999, 0.00001, 0.00001, 0.00001, 0.99999, 0.00001,

    // Probability nodes
    BayesianNode node11 = new BayesianNode("lin_col_prob", new string[] { "false_state", "true_state" }, new double[] { 0.7504, 0.2496, 0.99999, 0.00001, 0.99999, 0.00001, 0.99999, 0.00001, 0.99999, 0.00
    BayesianNode node12 = new BayesianNode("rot_col_prob", new string[] { "false_state", "true_state" }, new double[] { 0.7504, 0.2496, 0.99999, 0.00001, 0.99999, 0.00001, 0.99999, 0.00001, 0.99999, 0.00
    BayesianNode node13 = new BayesianNode("col_prob", new string[] { "false_state", "true_state" }, new double[] { 0.584, 0.41599999999999997, 0.7504, 0.24960000000000002, 0.7504, 0.24960000000000002, 0.

    // BN definition and features
    BayesianNetwork network = new BayesianNetwork(node1, node2, node3, node4, node5, node6, node7, node8, node9, node10, node11, node12, node13);
    VariableElimination ve = new VariableElimination(network);

    // Read from game objects distance and find the interval
    lin_dist = gameObject.GetComponent<GameObjectsDistance>().Distance;
    if (lin_dist <= 2)
    {
        lin_dist_string = "lin_dist=0-2";
    }
    if (lin_dist > 2 && lin_dist <= 4)
    {
        lin_dist_string = "lin_dist=2-4";
    }
}
```

Figura 2.15 – Primo frammento codice c#

```

// Read from game objects distance and find the interval
lin_dist = gameObject.GetComponent<GameObjectsDistance>().Distance;
if (lin_dist <= 2)
{
    lin_dist_string = "lin_dist=0-2";
}
if (lin_dist > 2 && lin_dist <= 4)
{
    lin_dist_string = "lin_dist=2-4";
}
else if (lin_dist > 4 && lin_dist <= 6)
{
    lin_dist_string = "lin_dist=4-6";
}
else if (lin_dist > 6 && lin_dist <= 9)
{
    lin_dist_string = "lin_dist=6-9";
}
else if (lin_dist > 9 && lin_dist <= 12)
{
    lin_dist_string = "lin_dist=9-12";
}
else if (lin_dist > 12 && lin_dist <= 15)
{
    lin_dist_string = "lin_dist=12-15";
}

// Read from get speed and find the interval
dri_lin_speed = gameObject.GetComponent<GetSpeed>().Speed;
if (dri_lin_speed <= 0.4)
{
    dri_lin_speed_string = "dri_lin_speed=0.1-0.4";
}
else if (dri_lin_speed > 0.4 && dri_lin_speed <= 0.8)
{
    dri_lin_speed_string = "dri_lin_speed=0.4-0.8";
}
else if (dri lin speed > 0.8 && dri lin speed <= 1.2)

```

Figura 2.16 – Secondo frammento codice c#

```

// Read from get speed and find the interval
dri_lin_speed = gameObject.GetComponent<GetSpeed>().Speed;
if (dri_lin_speed <= 0.4)
{
    dri_lin_speed_string = "dri_lin_speed=0.1-0.4";
}
else if (dri_lin_speed > 0.4 && dri_lin_speed <= 0.8)
{
    dri_lin_speed_string = "dri_lin_speed=0.4-0.8";
}
else if (dri_lin_speed > 0.8 && dri_lin_speed <= 1.2)
{
    dri_lin_speed_string = "dri_lin_speed=0.8-1.2";
}

// Read from mutual visibility manager
mut_vis_string = "mut_vis=" + gameObject.GetComponent<MutualVisibilityManager>().mut_vis_string;

// Read from get angle
angle_dw = gameObject.GetComponent<GetAngle>().Angle;
if (angle_dw <= 0.785)
{
    angle_dw_string = "angle_dw=0-0.785";
}
else if (angle_dw > 0.785 && angle_dw <= 2.355)
{
    angle_dw_string = "angle_dw=0.785-2.355";
}
else if (angle_dw > 2.355 && angle_dw <= 3.14)
{
    angle_dw_string = "angle_dw=2.355-3.14";
}

// Read rotation speed
if (Driller.GetComponent<Piling_Rig_Driller>().isRotating == true)
{
    dri_ang_speed_string = "dri_ang_speed=0.25-0.375";
}
else

```

Figura 2.17 – Terzo frammento codice c#

```

// Read rotation speed
if (Driller.GetComponent<Piling_Rig_Driller>().isRotating == true)
{
    dri_ang_speed_string = "dri_ang_speed=0.25-0.375";
}
else
{
    dri_ang_speed_string = "dri_ang_speed=0.001-0.125";
}

// Run inference given evidences
double[] lin_probability = ve.Infer("lin_col_prob", lin_dist_string, dri_lin_speed_string, mut_vis_string);
double[] rot_probability = ve.Infer("rot_col_prob", mut_vis_string, angle_dw_string, dri_ang_speed_string);
double[] probability = ve.Infer("col_prob", lin_dist_string, dri_lin_speed_string, mut_vis_string, angle_dw_string, dri_ang_speed_string);

// Process output
lin_col_prob = lin_probability[1] * 100;
rot_col_prob = rot_probability[1] * 100;
col_prob = probability[1] * 100;
}

void OnGUI()
{
    // Set canvas
    GUI.Box(new Rect((3 * Screen.width / 4) - 10, 10, Screen.width / 4, 25), "Linear Collision Probability: " + Math.Round(lin_col_prob, 2) + "%/100,00 ");
    GUI.Box(new Rect((3 * Screen.width / 4) - 10, 40, Screen.width / 4, 25), "Rotational Collision Probability: " + Math.Round(rot_col_prob, 2) + "%/100,00 ");
    GUI.Box(new Rect((3 * Screen.width / 4) - 10, 70, Screen.width / 4, 25), "Collision Probability: " + Math.Round(col_prob, 2) + "%/100,00");

    GUI.skin = skin_lin_col_prob;
    if (Math.Round(lin_col_prob) != 0)
    {
        GUI.Box(new Rect((3 * Screen.width / 4) - 10, 10, Screen.width / 4 * ((float)lin_col_prob / 100), 25), "");
    }

    GUI.skin = skin_rot_col_prob;
    if (Math.Round(rot_col_prob) != 0)
    {
        GUI.Box(new Rect((3 * Screen.width / 4) - 10, 40, Screen.width / 4 * ((float)rot_col_prob / 100), 25), "");
    }
}

```

Figura 2.18 – Quarto frammento codice c#

CASO STUDIO

Il caso di studio utilizzato in questo lavoro di tesi è una palificata di pali trivellati, sulla quale si sono effettuati i lavori di gestione del controllo della sicurezza, mediante la piattaforma. Di seguito è riportato un estratto della pianta strutturale di inizio scavo:

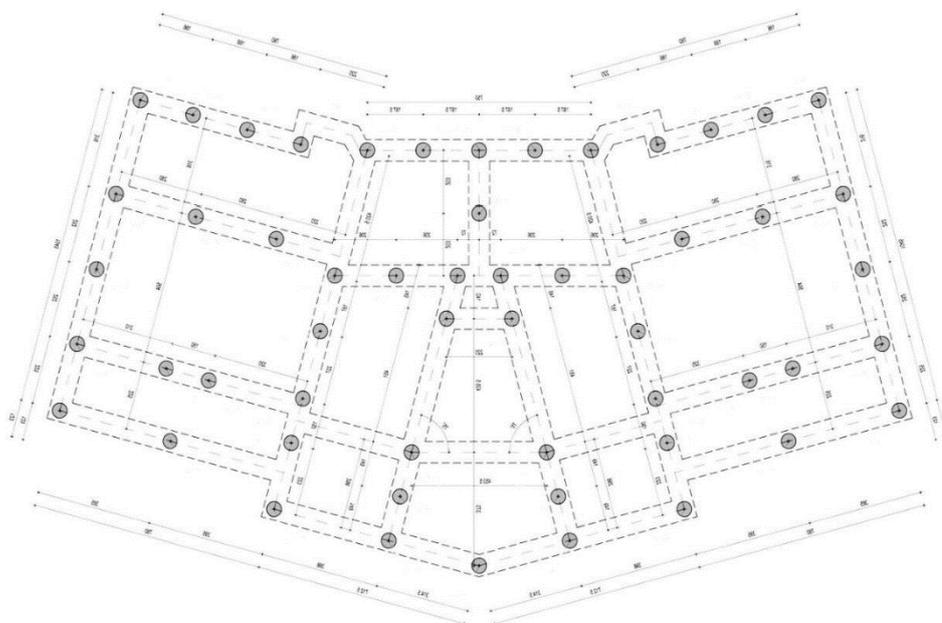


Figura 3.1– Pianta strutturale di inizio scavo

Si tratta quindi di cinquantacinque pali: ciascun palo ha un diametro di 50 cm, ed una profondità di 15m.

3.1 Pali di fondazione

Il palo di fondazione è un tipo di fondazioni che rientra nella categoria delle fondazioni indirette, in quanto arrivano a consistenti quote di profondità. Le fondazioni indirette sono in grado di trasmettere una parte non trascurabile del carico verticale per attrito, lungo la loro superficie laterale, oltre che per pressione sul piano di appoggio. Un altro vantaggio è quello di ridurre i cedimenti a lungo termine potendo sfruttare la resistenza degli strati di terreno profondi, superando quindi eventuali terreni soffici e inadatti, falde o cavità.

La metodologia di posa della fondazione ne determina la suddivisione in due categorie principali:

- a. *Pali infissi* (o senza asportazione di terreno): sono pali ottenuti per infissione, senza aver a priori asportato o perforato il terreno. La battitura può essere realizzata mediante battitura o

applicazione di pressione statica, oppure per vibrazione alla punta. Fanno parte di questa categoria i pali in legno, i pali in metallo, ed anche quelli in calcestruzzo.

- b. *Pali trivellati* (o con asportazione di terreno): sono ottenuti per perforazione del terreno e successiva estrazione di un volume più o meno uguale al volume del palo da realizzare. Sono realizzati con questa tipologia soprattutto i pali in calcestruzzo, gettati in opera con casseforme infisse per trivellazione.

La tipologia di pali che è stata scelta dal progettista, e quindi ripresa in questo lavoro di tesi, è quella dei *pali trivellati*; le lavorazioni che sono necessarie per realizzarli possono essere riassunte sostanzialmente di tre fasi principali:

1. Trivellazione;
2. Posa della gabbia di armatura;
3. Getto del calcestruzzo.

Nei successivi paragrafi sarà presa in considerazione la prima lavorazione, quella della trivellazione

3.2 Logica di gestione del modello

In questo paragrafo è introdotta quella che può essere definita come la logica di gestione del modello di simulazione. A seguito di quanto analizzato nelle sezioni precedenti, è evidente come sia necessario individuare una logica di alto livello per formalizzare e quindi di fatto poter in seguito realizzare un ambiente di simulazione virtuale. La tendenza dell'industria di volgere verso una digitalizzazione di tutti i settori porta come primo problema quello di ricercare una piattaforma adeguata dove sviluppare l'ambiente di simulazione che "ricalchi" quello reale. In questo lavoro di tesi è stata scelta la piattaforma di gaming *Unity* che, come analizzato in dettaglio nel paragrafo 3.2, presenta la fondamentale caratteristica di poter integrare multi modelli ed avere quindi un vero e proprio ambiente di simulazione integrato.

3.2.1 Creazione dell'ambiente virtuale

Data la complessità che caratterizza un cantiere, e quindi la difficoltà e la conseguente impossibilità nel riprodurre una fase lavorativa reale, si è optato di effettuare una simulazione all'interno di un laboratorio facente parte dell'Università Politecnica delle Marche, il DC3 (Digital Construction Capability Centre).

La prima fase è stata quella di creare un modello BIM del laboratorio in Revit. Il BIM “**Building Information Modeling**” ovvero Modello di Informazioni di un Edificio. Il NIBS (National Institutes of Building Science) definisce il **BIM** come la “*rappresentazione digitale di caratteristiche fisiche e funzionali di un oggetto*”.



Figura 3.2 – Modello BIM in Unity del DC3

Occorre chiarire che il BIM va inteso come una metodologia operativa e non come uno strumento. Il BIM può essere immaginato come un processo di:

- programmazione
- progettazione
- realizzazione
- manutenzione

di una costruzione che utilizza un modello informativo, ossia un modello che ne contiene tutte le informazioni che riguardano il suo intero ciclo di vita, dal progetto alla costruzione, fino alla sua demolizione e dismissione.

Una caratteristica fondamentale della metodologia BIM è la collaborazione tra le diverse figure interessate nelle diverse fasi del ciclo di vita di una struttura, al fine di inserire, estrarre, aggiornare o modificare le informazioni nel modello. Ad esempio, il progettista architettonico definisce le forme, le geometrie fino ad arrivare al modello 3D; il progettista strutturale definisce gli elementi della struttura (travi, pilastri, pareti, fondazioni, ecc.), ecc..

Successivamente il modello BIM dovrà essere importato nel software Unity, ma il passaggio diretto potrebbe causare errori o perdita delle informazioni. Quindi si necessita di un formato standard che consenta l'interoperabilità e l'interscambio in modo sicuro, l'IFC.

L'IFC, dunque, è un particolare formato di dati che consente l'interscambio di un modello informativo senza perdita o distorsione di dati o informazioni.

Si tratta di un formato file aperto, neutrale, non controllato da singoli produttori software, nato per facilitare l'interoperabilità tra i vari operatori.

L'IFC è stato progettato per elaborare tutte le informazioni dell'edificio, attraverso l'intero suo ciclo di vita, dall'analisi di fattibilità fino alla sua realizzazione e manutenzione, passando per le varie fasi di progettazione e pianificazione.

L'architettura IFC basa la propria struttura su:

- semantica
- relazioni
- proprietà

Gli elementi sono pensati per descrivere i componenti di un edificio, come ad esempio: impianti, spazi, zone, arredo, elementi strutturali (pilastri, travi, pareti, solai, etc.), includendo le proprietà specifiche di ogni oggetto.

Grazie a questa suddivisione ad ogni oggetto è possibile associare determinate grandezze come ad esempio:

- forma
- costo
- richiesta di manutenzione

- posizione
- prestazione energetica
- connessioni con altri oggetti
- sicurezza
- caratteristiche fisiche e meccaniche

Tutti questi dati sono in genere codificati su uno dei tre formati disponibili:

- .ifc: formato di file predefinito basato sullo standard ISO-STEP
- .ifcxml: codifica basata sul linguaggio XML
- .ifczip: archivio compresso di uno di questi formati, che possono contenere anche materiale aggiuntivo, come PDF o immagini

Dopo aver importato il modello BIM in Unity, la fase successiva riguarda la modellazione degli agenti che dovranno interagire nella simulazione.

In questo lavoro di tesi si è deciso di far interagire un operatore con un Driller meccanico in modo da poterne valutare la probabilità di investimento lineare e rotazionale durante la realizzazione di pali di fondazione.

Gli agenti appartenenti alla scena sono:

- Operatore
- Driller
- Pali

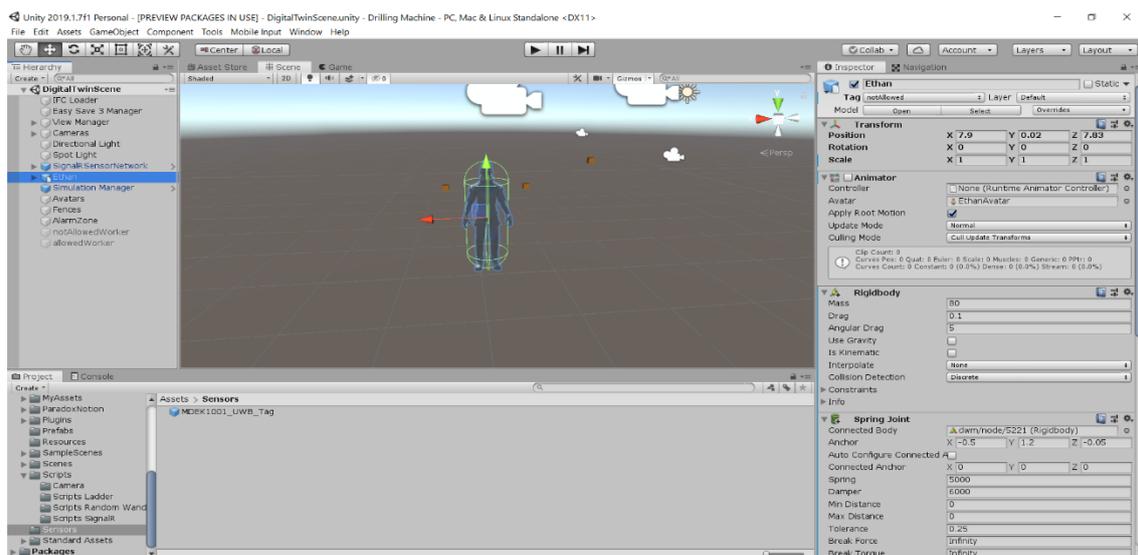


Figura 3.3 – Operatore virtuale in Unity

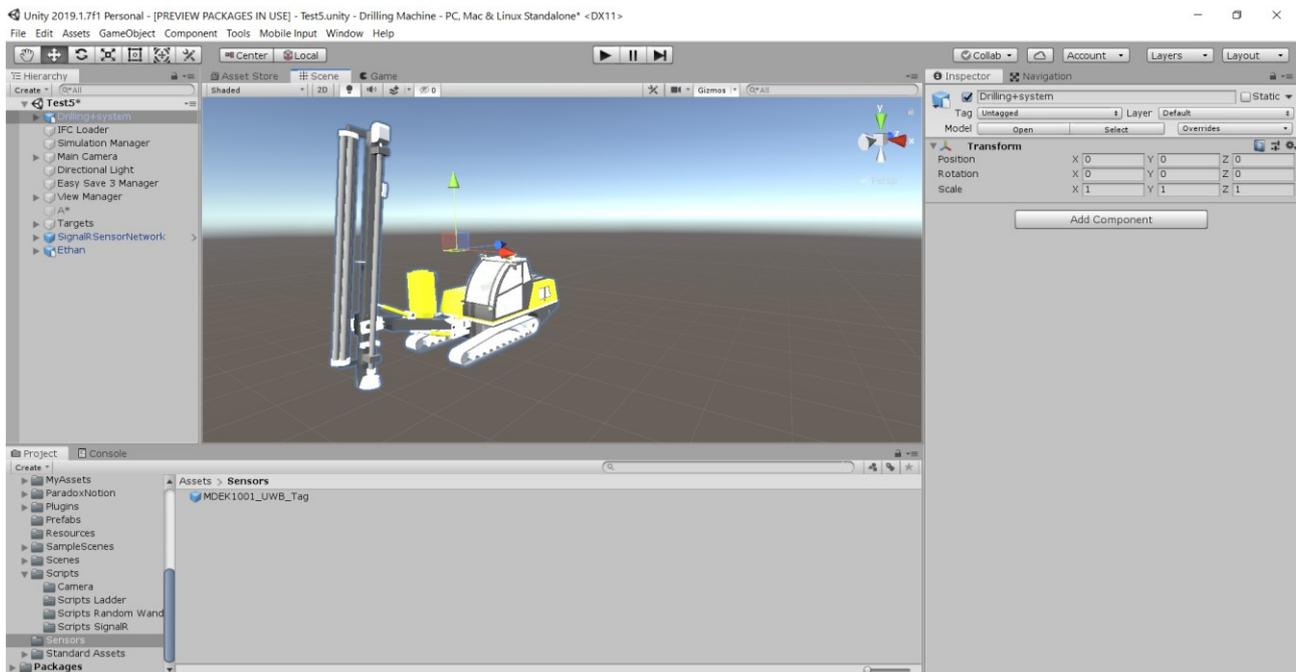


Figura 3.4 – Driller virtuale in Unity

3.2.2 Modellazione della scena

Per modellare uno scenario di rischio si è deciso di sviluppare una rete bayesiana, che mi permette di stabilire la possibilità di accadimento di un incidente durante una fase lavorativa, nel nostro caso la trivellazione di un palo di fondazione. Durante la fase di trivellazione si optato di analizzare le probabilità d'investimento tra operatore e macchinario, in linea specifica: investimento lineare e investimento rotazionale. Tale scenario è stato sviluppato mettendo in relazione la possibilità che i due agenti, nel nostro caso operatore e macchinario, siano in grado di individuarsi l'un l'altro. Partendo da questo stato, successivamente si è messo in relazione il tempo di reazione del macchinario e dell'operatore con i rispettivi tempi d'impatto rotazionali e lineari. La Rete Bayesiana, è una tecnica di inferenza probabilistica, ed è stata la parte dove è stato speso più tempo, vista l'enorme potenzialità del dislocamento di conoscenza, mentre il modello if-then-else è stato scartato, essendo poco rappresentativo nel gestire un problema come il rischio. La rete stessa poi dovrà essere alimentata da sensori, telecamere e sistemi che individuano dati utili alla rete in real-time. L'alimentazione real-time della rete ci permette di accedere alle informazioni in un tempo strettamente utile così da prevenire il rischio ma più che prevenire il rischio, ci si è concentrati sull'inosservanza della norma. Prevenire una possibile inosservanza della norma significa mantenersi ad una certa probabilità di rischio limite, molto bassa, che dallo stesso legislatore è stata considerata accettabile. La rete sarà l'elemento che assisterà l'operatore nelle operazioni di cantiere, e nello stesso

tempo facendo inferenza probabilistica del rischio potrà attivare gli alert in situazioni di probabile inosservanza della norma. Si è quindi andata a sviluppare una rete bayesiana che mi permette di definire se vi è la possibilità di accadimento di un incidente nelle fasi di realizzazione di un palo, nello specifico nelle fasi di trivellazione. Nella figura 3.29 è indicata la rete nella sua interezza.

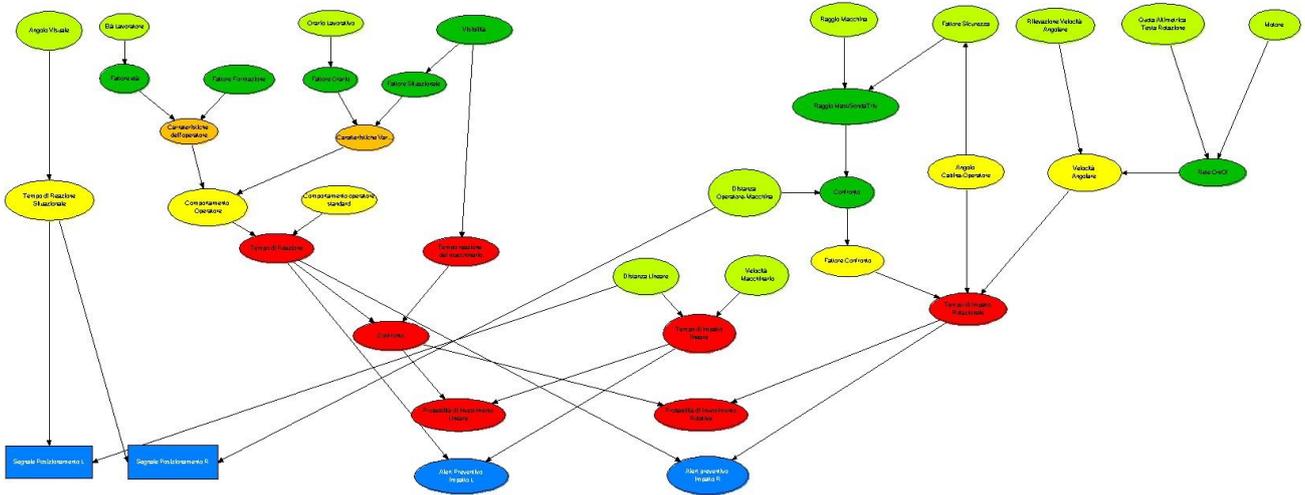


Figura 3.5 – Rete bayesiana complessiva

3.2.2.1 Analisi del modello da impatto lineare

Di seguito è stata analizzata la rete nelle sue componenti mettendo in evidenza le interazioni che ci sono tra i nodi dipendenti e indipendenti e la verifica delle relazioni stesse.

- COMPONENTE 1

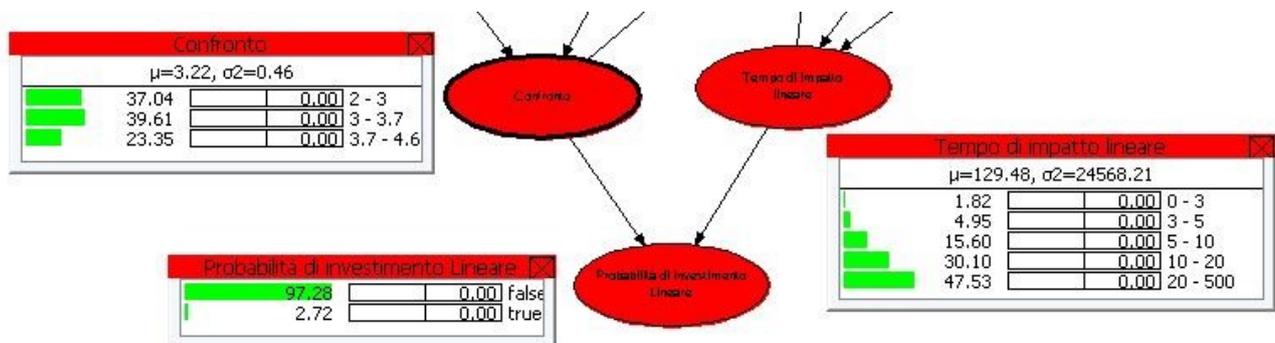


Figura 3.6 – Primo componente rete bayesiana

▪ CARATTERISTICHE:

La possibilità che l'operatore sia soggetto ad un eventuale investimento viene definito attraverso una relazione tra il Tempo di reazione dell'operatore a terra e il tempo di reazione dell'operatore sul macchinario tramite il nodo Confronto. Tale nodo identificherà il valore massimo tra i nodi genitori, in questo caso Tempo di reazione dell'operatore a terra e tempo di reazione dell'operatore sul macchinario, per poi confrontarlo con il tempo d'impatto lineare. Il confronto permetterà di stabilire la probabilità d'investimento lineare, in cui lo stato "false" indica l'impossibilità di un investimento, mentre lo stato "true" indica la possibilità d'investimento. In entrambi i nodi i tempi vengo inseriti in valori di intervalli ricavati da un lavoro di tesi precedenti, nel quale si è studiata la trattazione dei dati, il quale ha messo in evidenza che gli intervalli scelti permettono di alleggerire i carichi computazionali affidati alla rete bayesiana.

▪ VERIFICA:

Verranno trattati due casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi tempo di reazione e di impatto lineare, e sarà indicato come variano le possibilità di investimento.

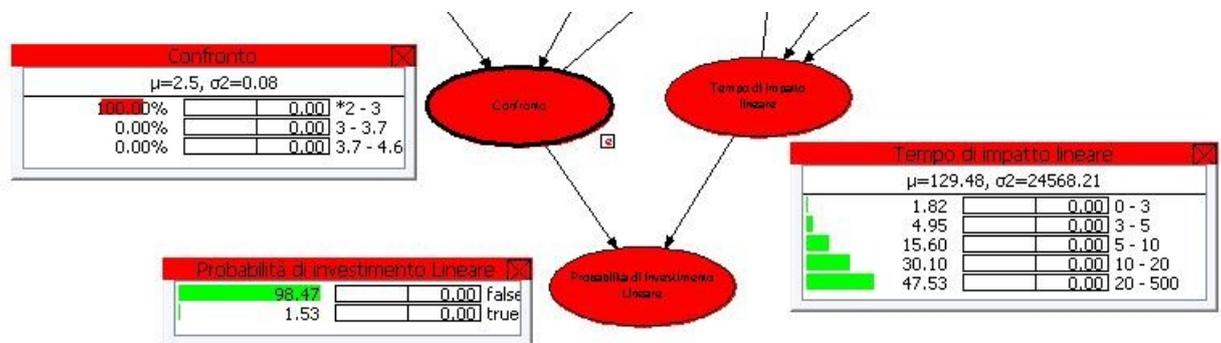


Figura 3.7 – Primo componente, verifica caso 1

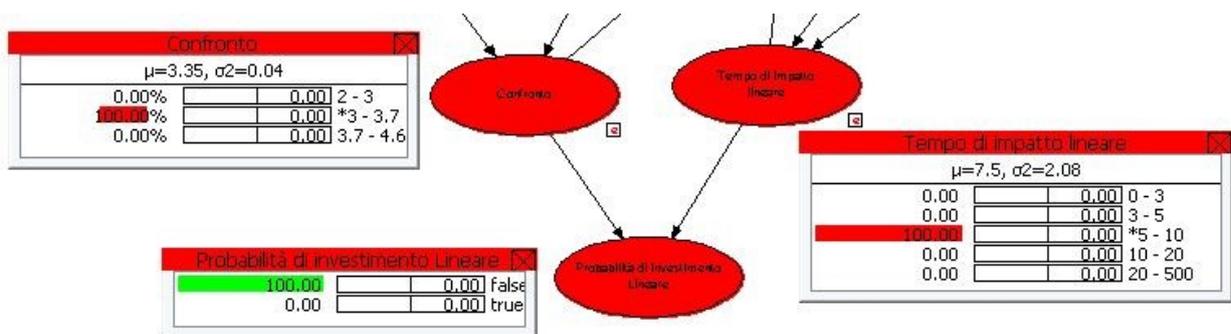


Figura 3.8 – Primo componente, verifica caso 2

- COMPONENTE 2

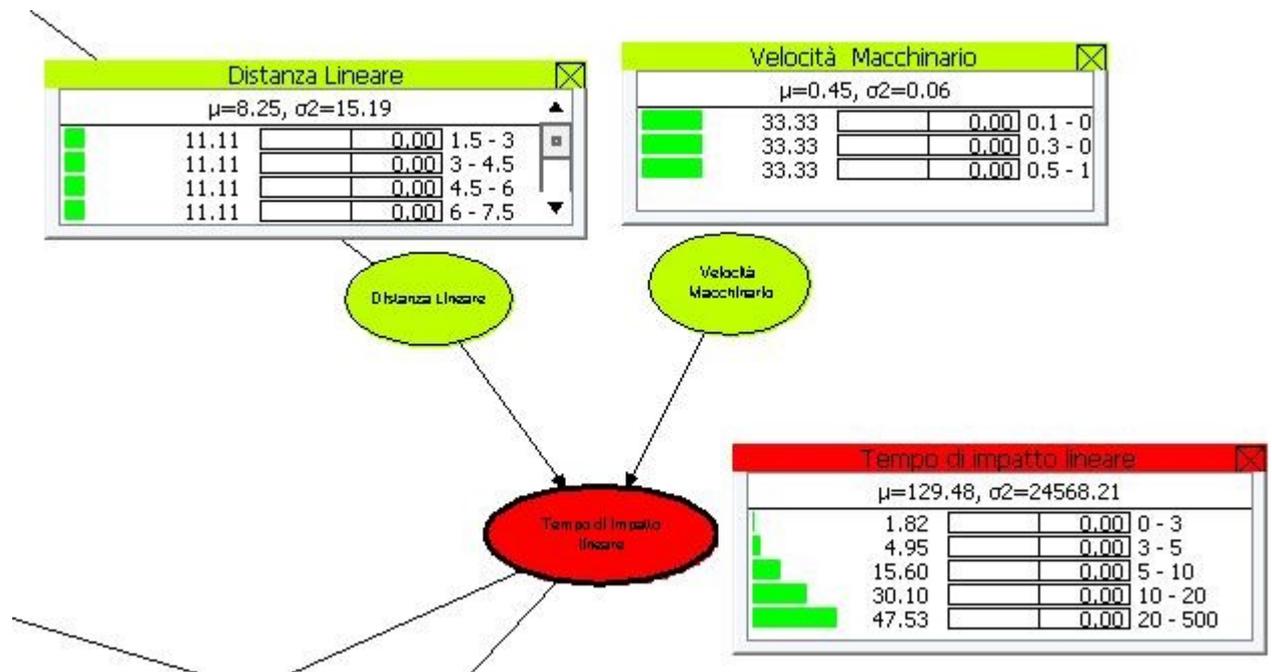


Figura 3.8 – Secondo componente rete bayesiana

▪ CARATTERISTICHE:

Il tempo di impatto lineare viene determinato attraverso la distanza lineare e la velocità del macchinario, secondo la relazione: “tempo di impatto lineare = [velocità macchinario * 1 / (distanza lineare)]”. Nel nodo velocità del macchinario vengono inseriti valori di intervalli ricavati da un lavoro di tesi precedente nel quale si sono studiate le caratteristiche di un macchinario, mentre per il nodo distanza lineare, i dati ottenuti derivano da simulazione effettuate in laboratorio.

▪ VERIFICA :

Verranno trattati due casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi distanza lineare e velocità macchinario, e sarà indicato come il tempo di impatto lineare varia.

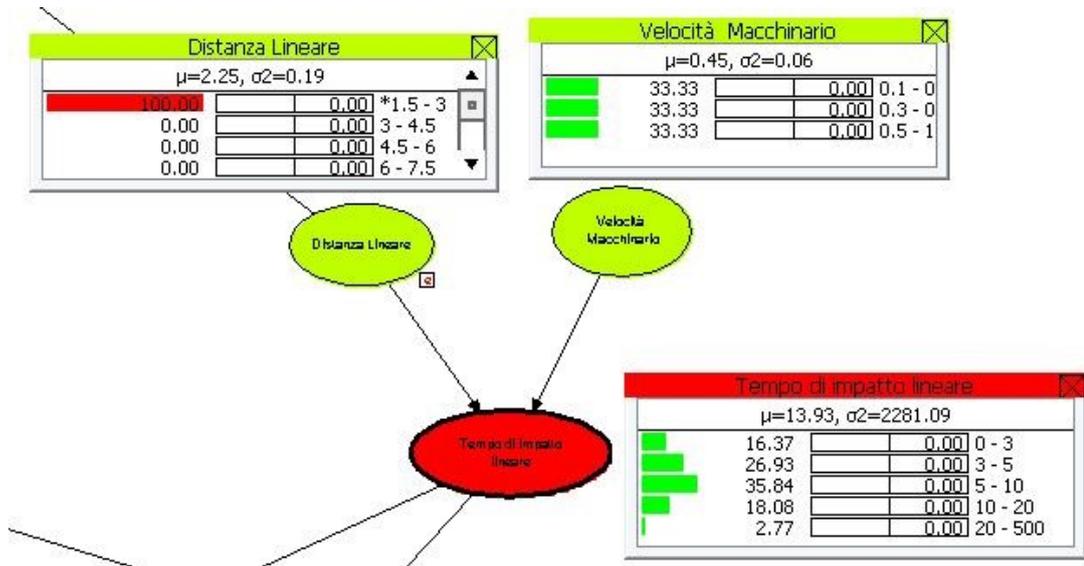


Figura 3.9 – Secondo componente, verifica caso 1

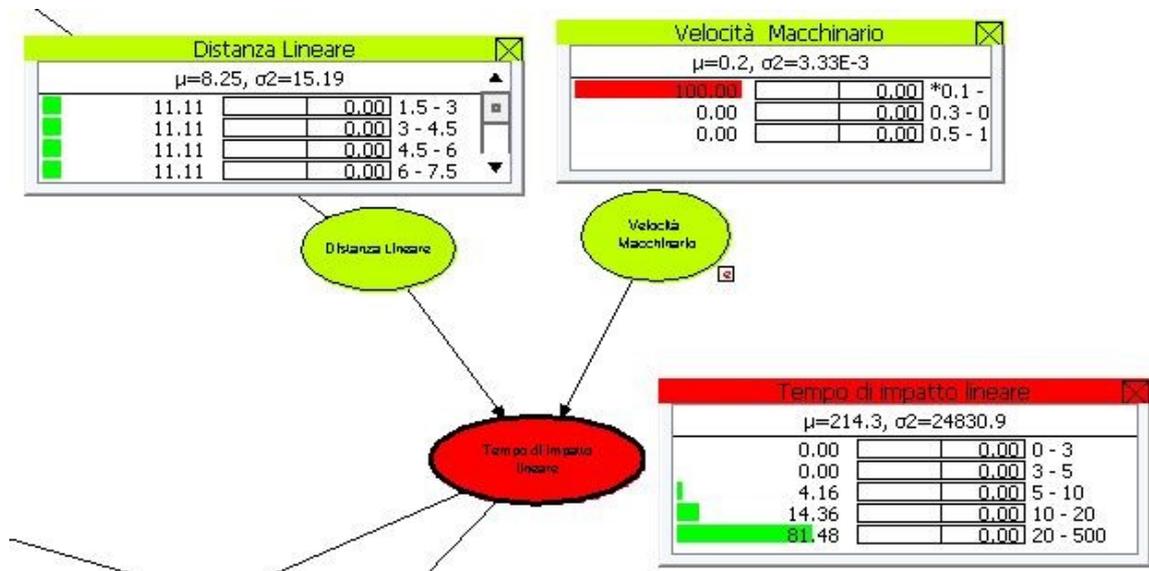


Figura 3.10 – Secondo componente, verifica caso 2

- COMPONENTE 3

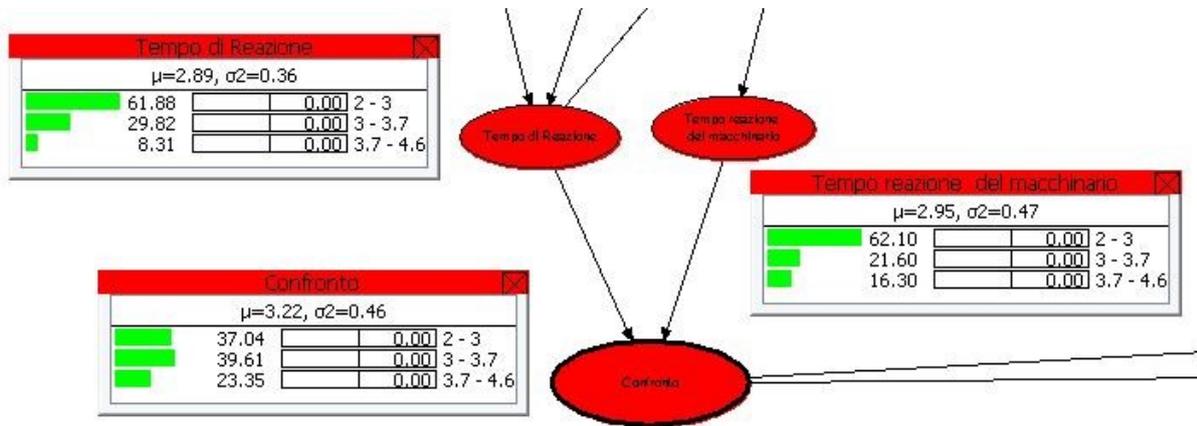


Figura 3.11 – Terzo componente rete bayesiana

▪ CARATTERISTICHE:

Il nodo confronto viene determinato attraverso il tempo di reazione dell'operatore e il nodo tempo di reazione dell'operatore sul macchinario, secondo la relazione: "tempo di reazione = max [tempo di reazione dell'operatore; tempo di reazione dell'operatore sul macchinario]". In entrambi i nodi vengo inseriti valori di intervalli ricavati da un lavoro di tesi precendete nel quale si è studiata la trattazione dei dati, il quale ha messo in evidenza che gli intervalli scelti permettono di alleggerire i carichi computazionali affidati alla rete bayesiana .

▪ VERIFICA :

Verranno trattati due casi specifici,imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi genitrori, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.

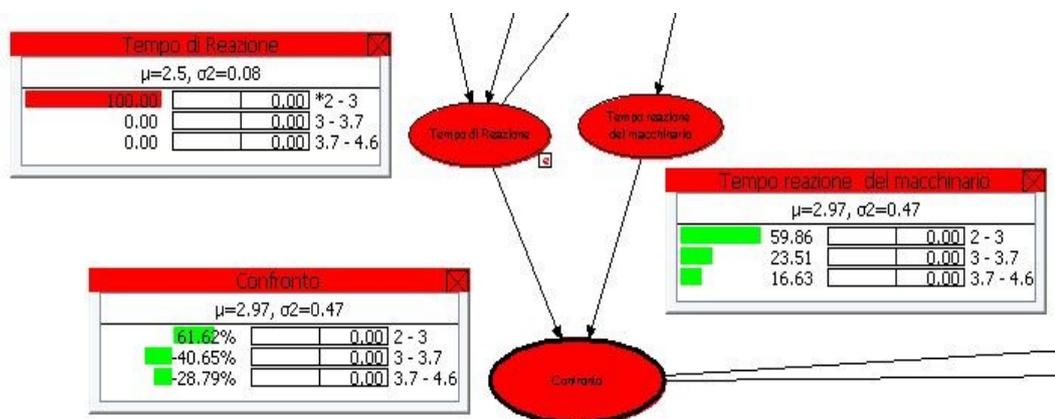


Figura 3.12 – Terzo componente, verifica caso 1

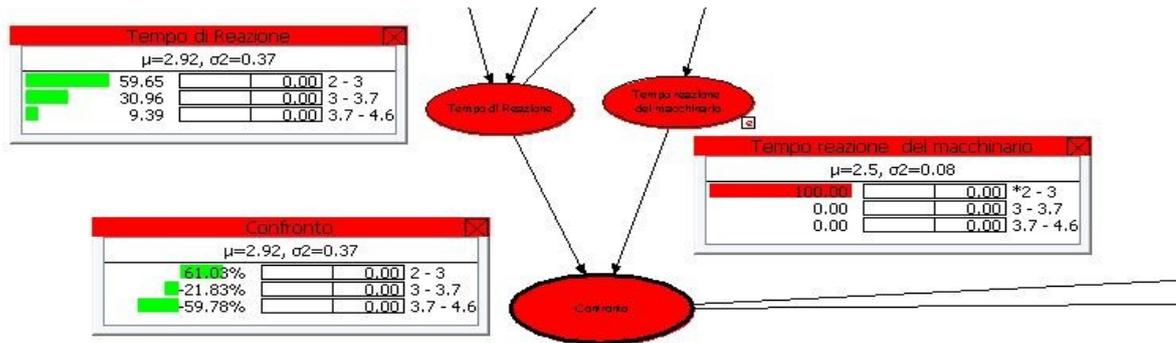


Figura 3.13 – Terzo componente, verifica caso 1

- COMPONENTE 4

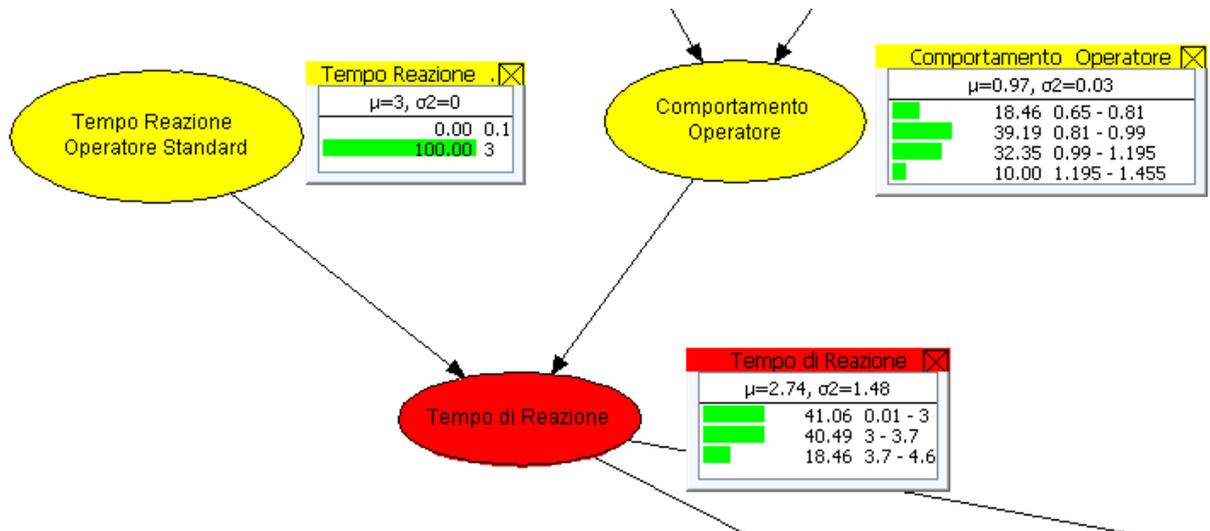


Figura 3.14 – Quarto componente

▪ CARATTERISTICHE:

Il tempo reazione viene determinato attraverso il tempo di reazione standard dell'operatore, il quale ha un unico possibile stato cioè 3 secondi che è stato definito dopo un studio della letteratura, e il nodo comportamento dell'operatore, secondo la relazione: "tempo di reazione = [tempo di reazione * 1 / (comportamento operatore)]". Il nodo comportamento operatore definisce un coefficiente, che come vedremo successivamente, valuta i fattori ambientali e specifici dell'operatore. In entrambi i nodi vengono inseriti valori di intervalli ricavati da un lavoro di tesi precedente nel quale si è studiata

la trattazione dei dati, il quale ha messo in evidenza che gli intervalli scelti permettono di alleggerire i carichi computazionali affidati alla rete bayesiana .

▪ VERIFICA:

Verranno trattati casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi genitori, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.

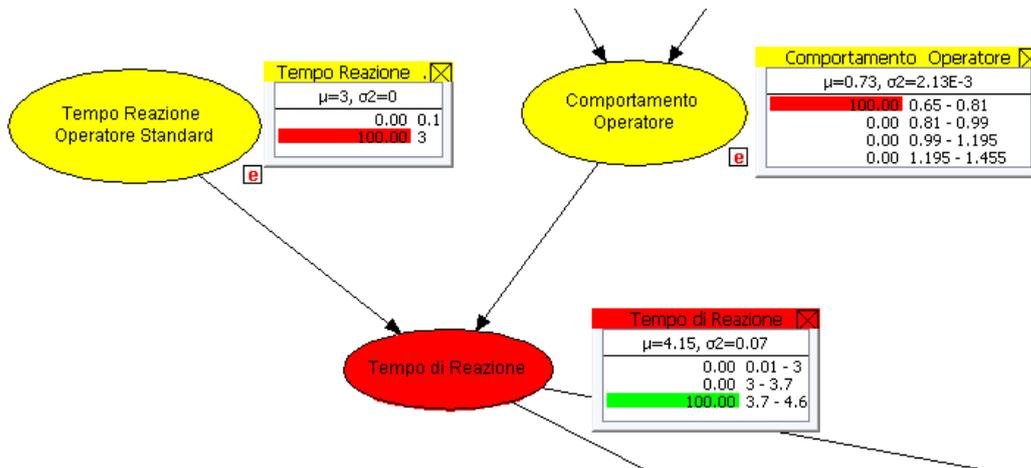


Figura 3.14 – Quarto componente, verifica caso 1

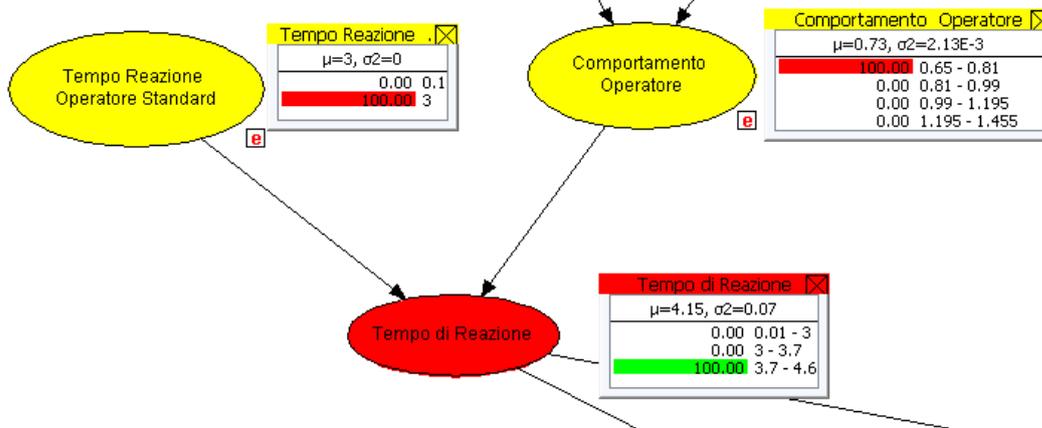


Figura 3.15 – Quarto componente, verifica caso 2

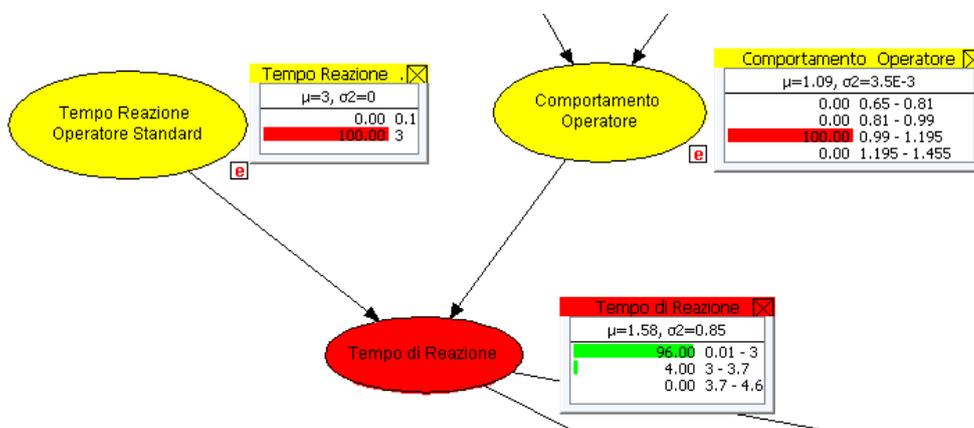


Figura 3.16 – Quarto componente, verifica caso 3

- COMPONENTE 5

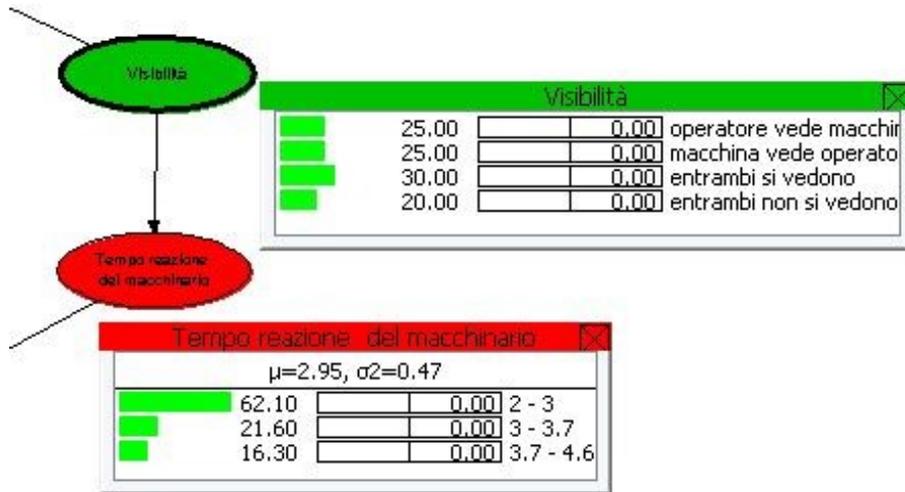


Figura 3.17 – Quinto componente

▪ CARATTERISTICHE:

Il nodo Tempo reazione del macchinario dipende dal nodo visibilità, in cui sono stati inseriti i quattro casi precedentemente descritti [operatore vede il macchinario, macchinario vede operatore, entrambi si vedono, entrambi non si vedono].

▪ VERIFICA:

Verranno trattati due casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati del nodo genitore, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.

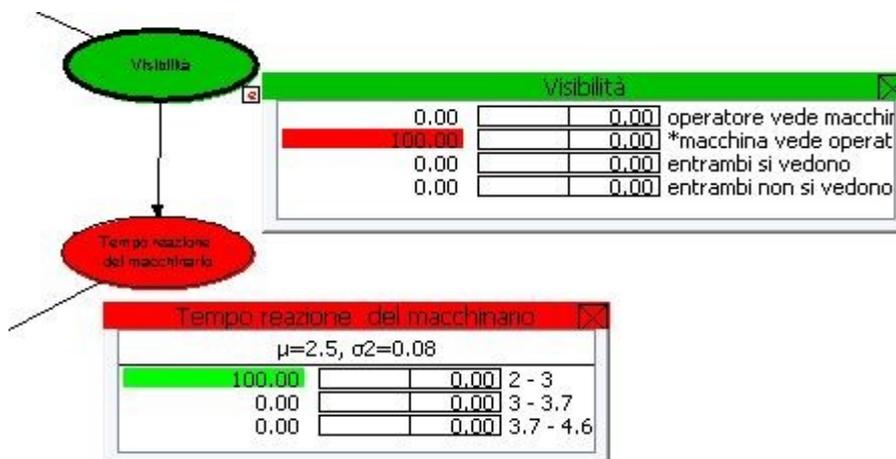


Figura 3.18 – Quinto componente, verifica caso 1

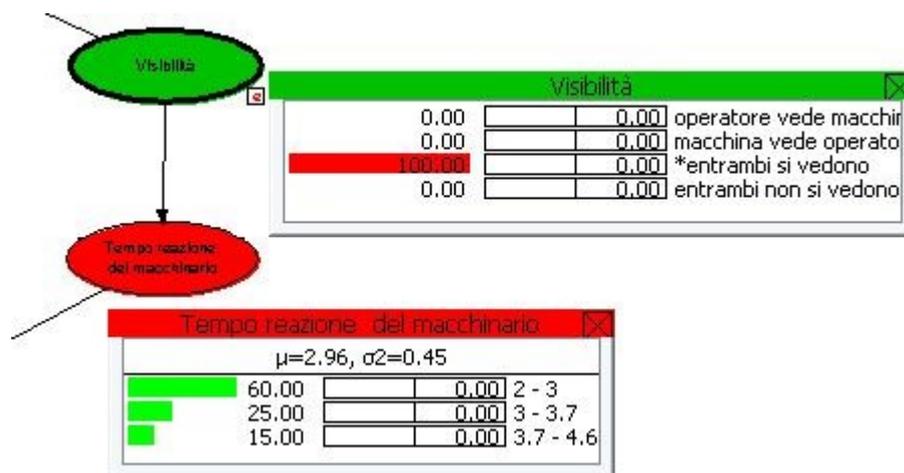


Figura 3.19 – Quinto componente, verifica caso 2

- COMPONENTE 6

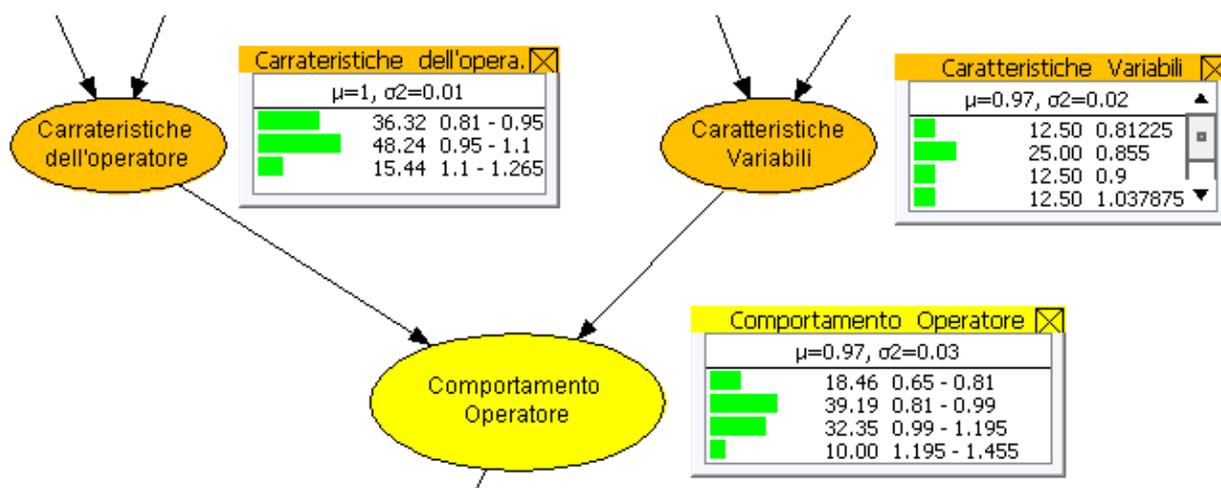


Figura 3.20– Sesto componente rete bayesiana

▪ CARATTERISTICHE:

Il nodo comportamento operatore viene determinato attraverso la relazione (moltiplicativa) tra il nodo caratteristiche dell'operatore e il nodo Comportamento dell'operatore. Entrambi i nodi definisco un coefficiente che come vedremo successivamente valuta fattori ambientali e specifici dell'operatore. In entrambi i nodi vengo inseriti valori di intervalli ricavati da un lavoro di tesi precendete nel quale si

è studiata la trattazione dei dati, il quale ha messo in evidenza che gli intervalli scelti permettono di alleggerire i carichi computazionali affidati alla rete bayesiana .

▪ VERIFICA:

Verranno trattati casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi genitori, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.

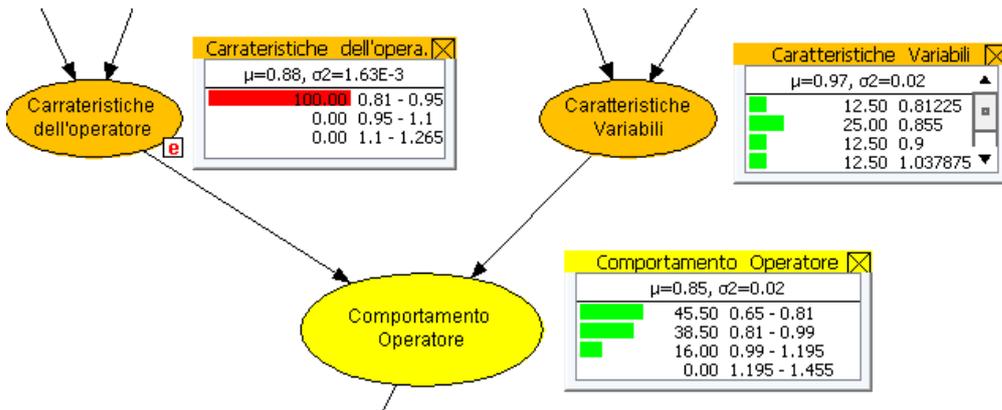


Figura 3.21 – Sesto componente, verifica caso 1

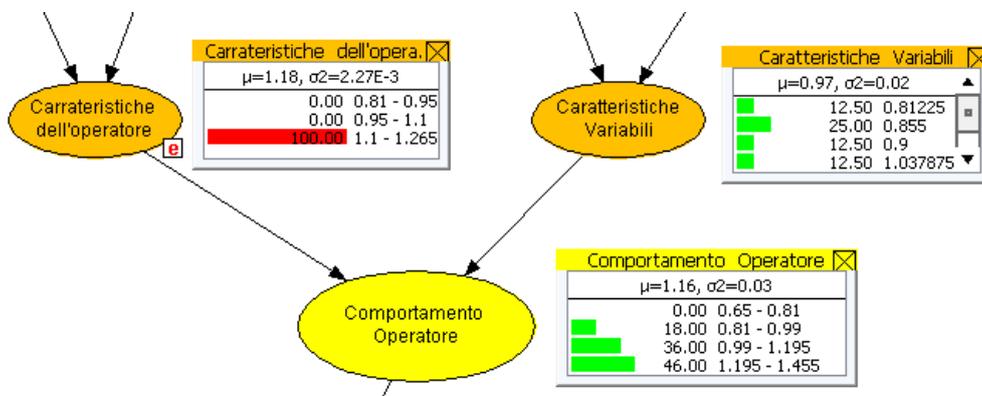


Figura 3.22 – Sesto componente, verifica caso 2

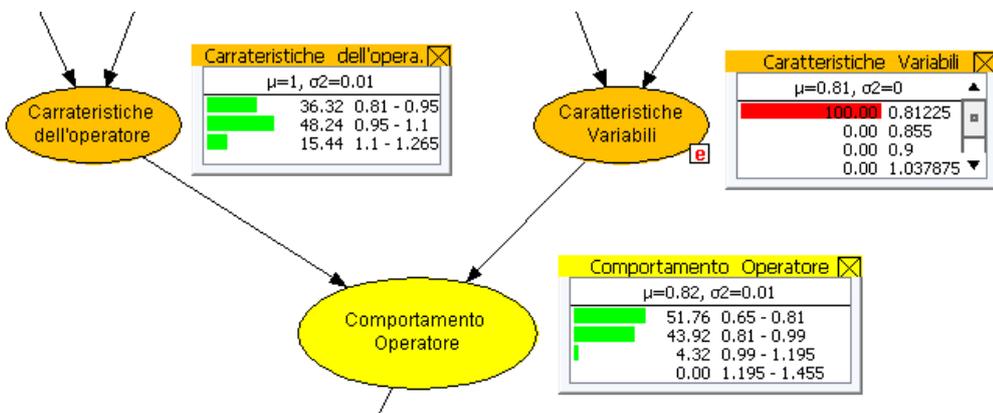


Figura 3.23 – Sesto componente, verifica caso 3

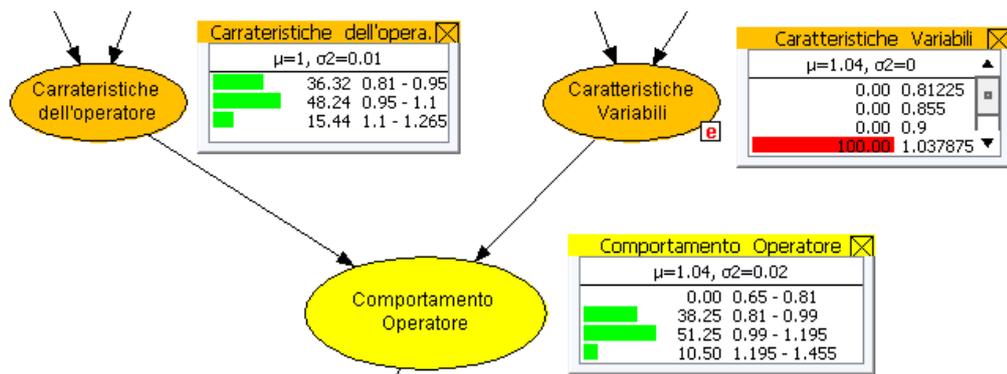


Figura 3.24 – Sesto componente, verifica caso 4

- COMPONENTE 7

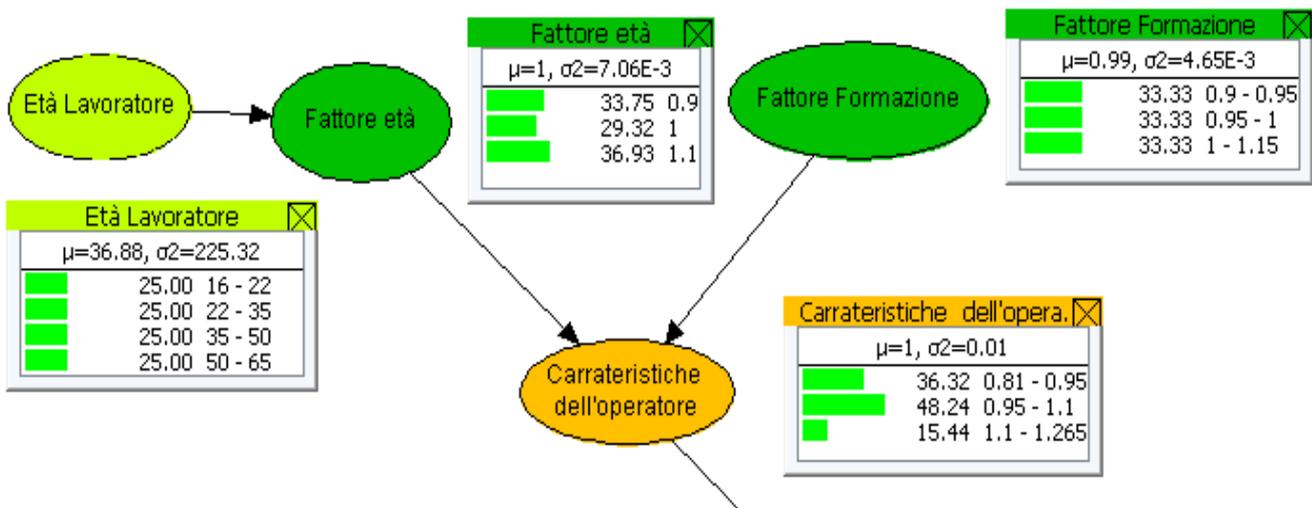


Figura 3.25 – Settimo componente rete bayesiana

▪ DESCRIZIONE:

In questo caso più che un semplice frammento si va a studiare un piccolo sotto modello che appartiene alla rete, gli stati che definisco il coefficiente delle caratteristiche dell'operatore viene definito in funzione di due nodi: il nodo fattore di formazione e il nodo fattore di età. La definizione dei coefficienti che definisco i possibili stati dei nodi è stata definita attraverso uno studio della letteratura, che ci ha permesso di comprendere come questi fattori possano influenzare il tempo di reazione di un operatore, in maniera sintetica risulta immediato comprendere come maggiore sarà il grado di formazione dell'operatore minore sarà il suo tempo di reazione in quanto riesce ad avere una miglior percezione del rischio. Nel frammento è presente anche il nodo età del lavoratore che mi

definisce i coefficienti che definisco i possibili stati del nodo fattore età ,anche in questo caso risulta chiaro come un operatore giovane o anziano risulti svantaggiato rispetto un operatore di età media pagando rispettivamente di esperienza e condizione fisica anche in questo caso la definizione dei coefficienti che definisco i possibili stati dei nodi è stata definita attraverso uno studio della letteratura,che ci ha permesso di comprendere come questi fattori possano influenzare il tempo di reazione di un operatore.

- VERIFICA:

Verranno trattati casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi genitorri, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.

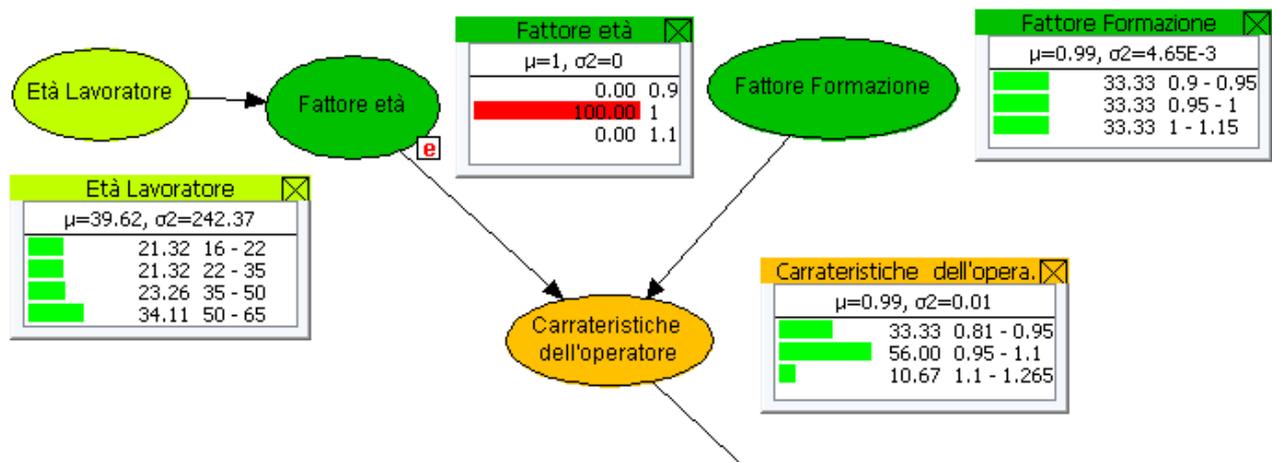


Figura 3.26 – Settimo componente, verifica caso 1

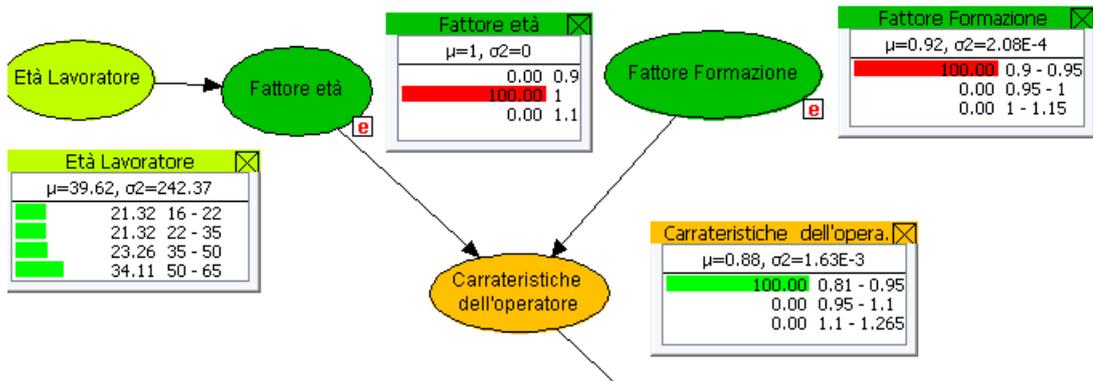


Figura 3.27 – Settimo componente, verifica caso 2

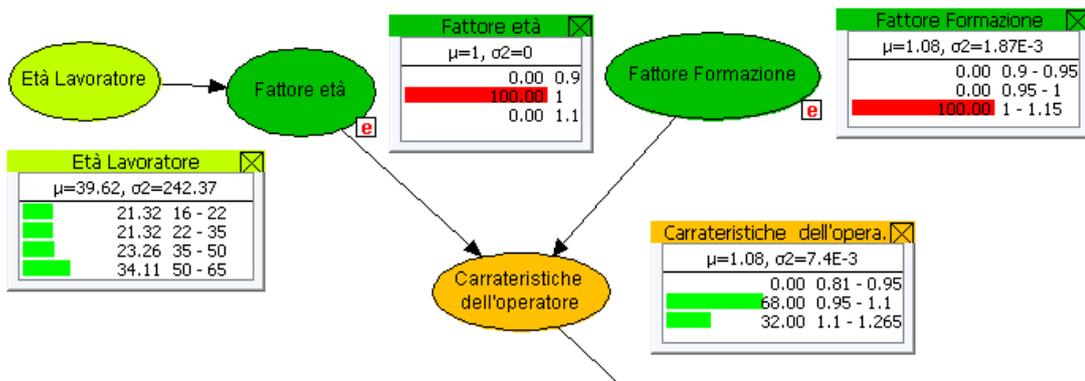


Figura 3.28 – Settimo componente, verifica caso 3

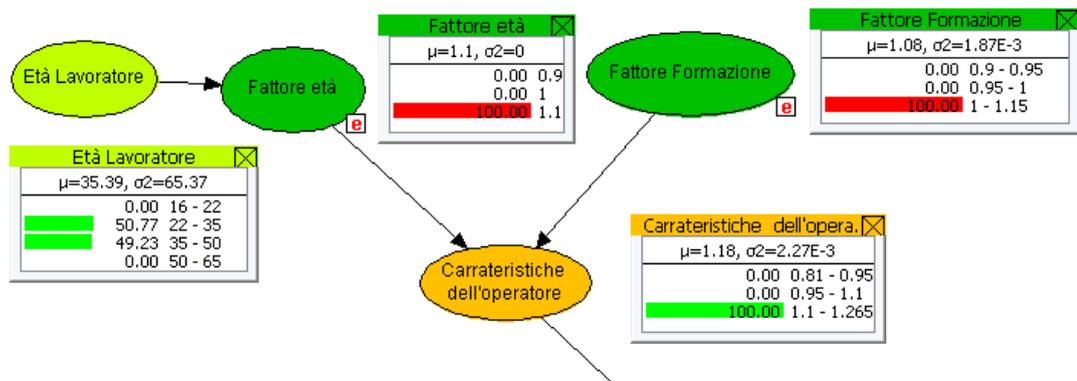


Figura 3.29 – Settimo componente, verifica caso 4

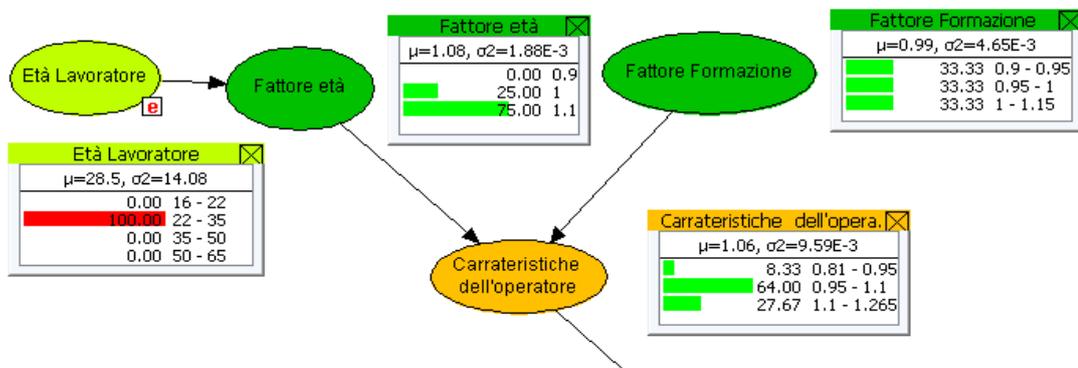


Figura 3.30 – Settimo componente, verifica caso 5

- COMPONENTE 8

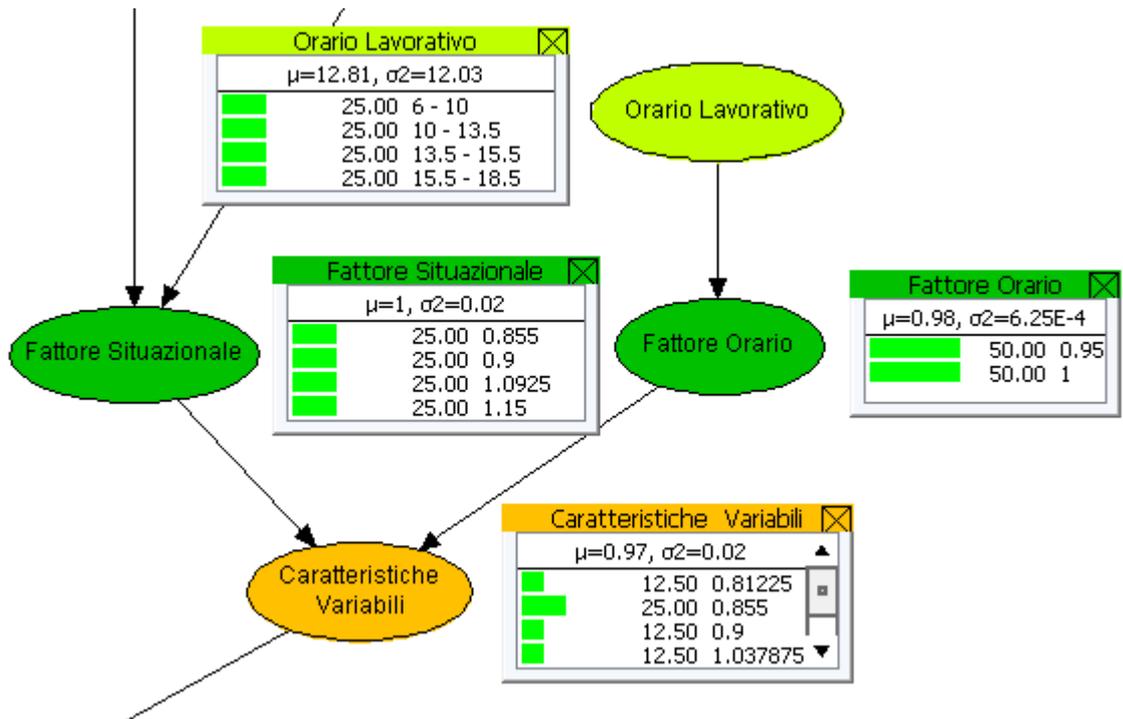


Figura 3.31 – Ottavo componente rete bayesiana

▪ DESCRIZIONE:

In questo caso più che un semplice frammento si va a studiare un piccolo sotto modello che appartiene alla rete, gli stati che definiscono il coefficiente delle caratteristiche variabili ambientali vengono definiti in funzione di due nodi: il nodo fattore situazionale e il nodo fattore orario. La definizione dei coefficienti che definiscono i possibili stati dei nodi è stata definita attraverso uno studio della letteratura, che ci ha permesso di comprendere come questi fattori possano influenzare il tempo di reazione di un operatore, in maniera sintetica risulta immediato comprendere che maggiore sarà la possibilità che l'operatore assuma alcolici e maggiore sarà il rischio per lo stesso. Il fattore orario è influenzato quindi dal nodo orario di lavoro, considerando che negli intervalli di orario che dalle 6-10 e 13.5-15.5 è maggiore la possibilità che l'operatore abbia assunto alcool. Anche in questo caso la definizione dei coefficienti che definiscono i possibili stati dei nodi è stata definita attraverso uno studio della letteratura, che ci ha permesso di comprendere come questi fattori possano influenzare il tempo di reazione di un operatore.

▪ VERIFICA:

Verranno trattati casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi genitori, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.

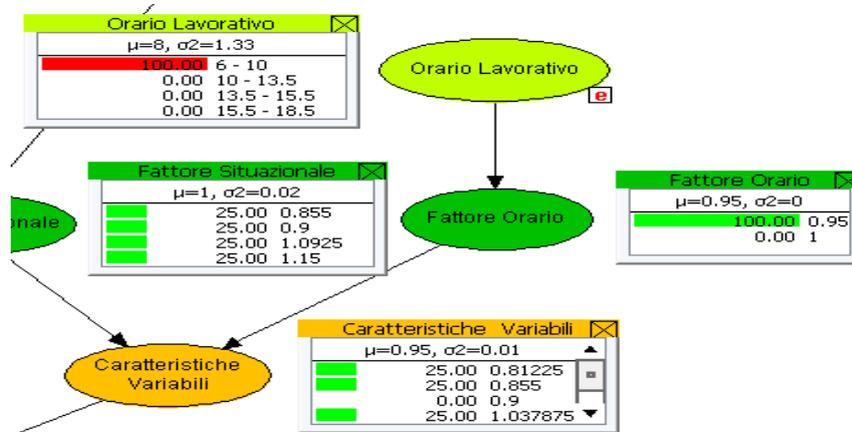


Figura 3.32 – Ottavo componente, verifica caso 1

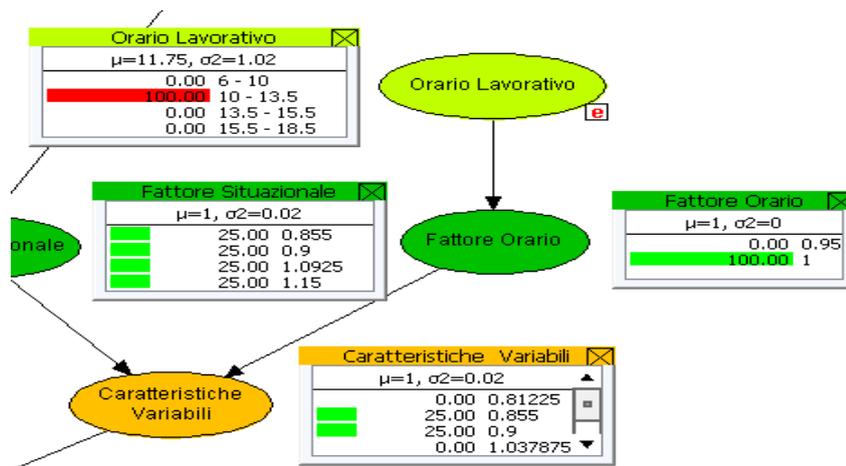


Figura 3.33 – Ottavo componente, verifica caso 2

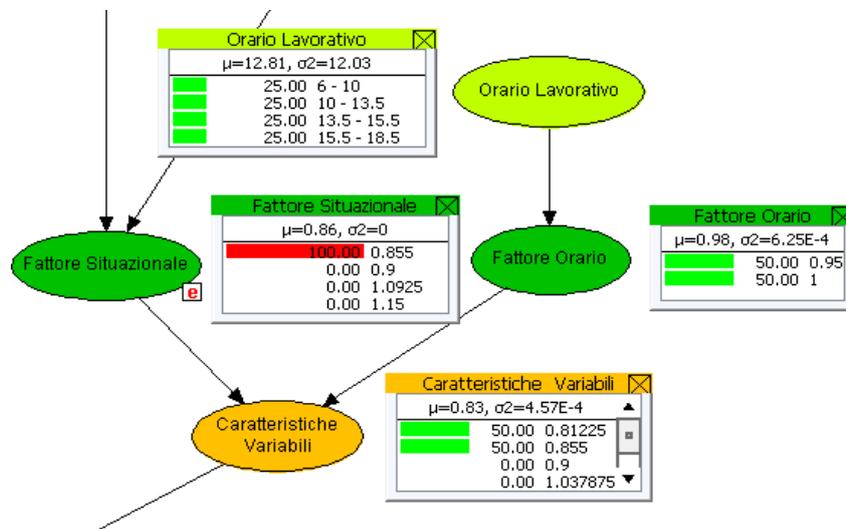


Figura 3.34 – Ottavo componente, verifica caso 3

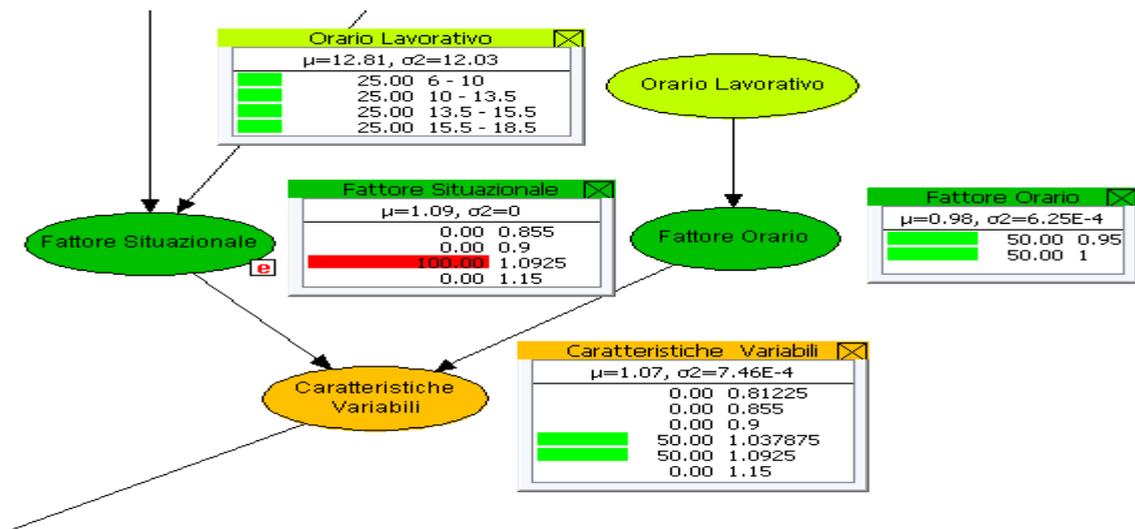


Figura 3.35 – Ottavo componente, verifica caso 4

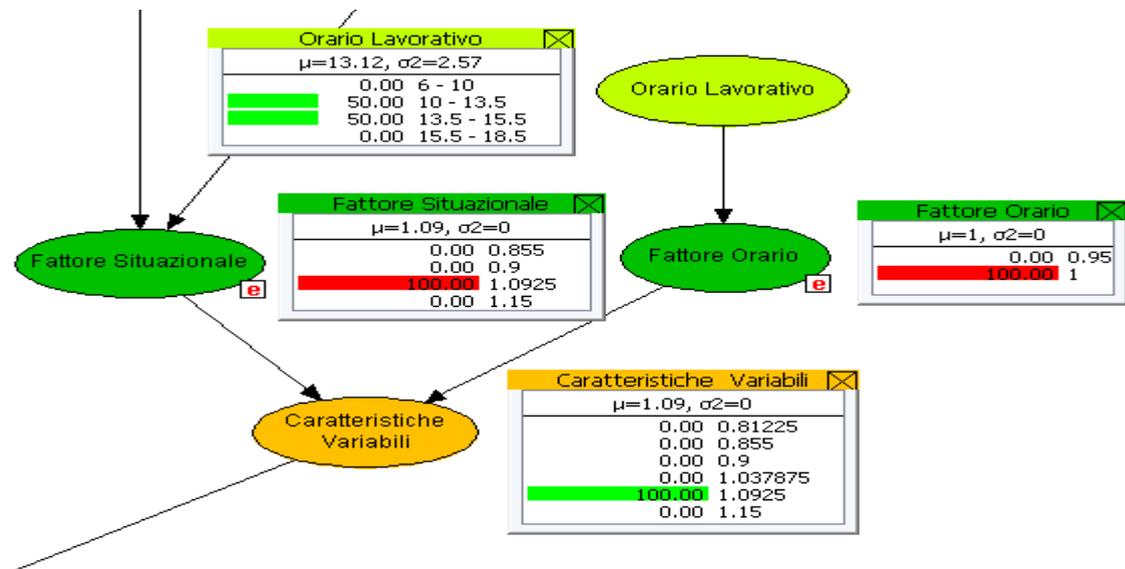


Figura 3.36 – Ottavo componente, verifica caso 5

- COMPONENTE 9

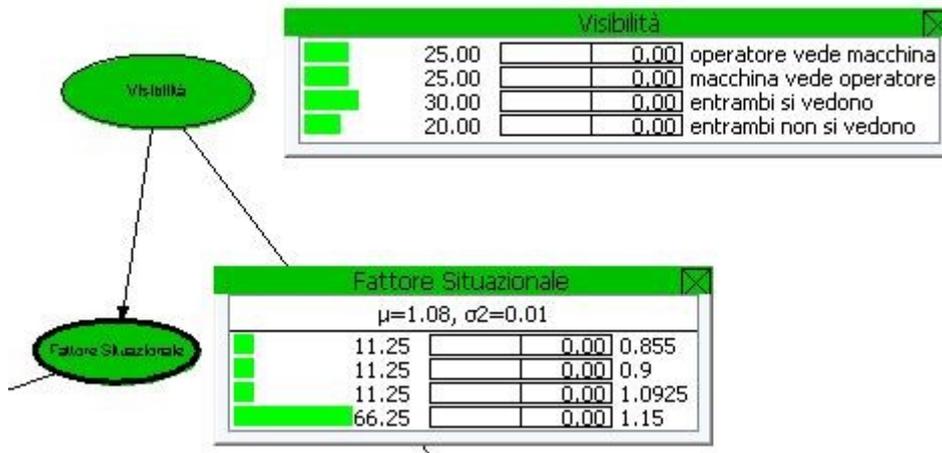


Figura 3.37 – Nono componente rete bayesiana

▪ DESCRIZIONE:

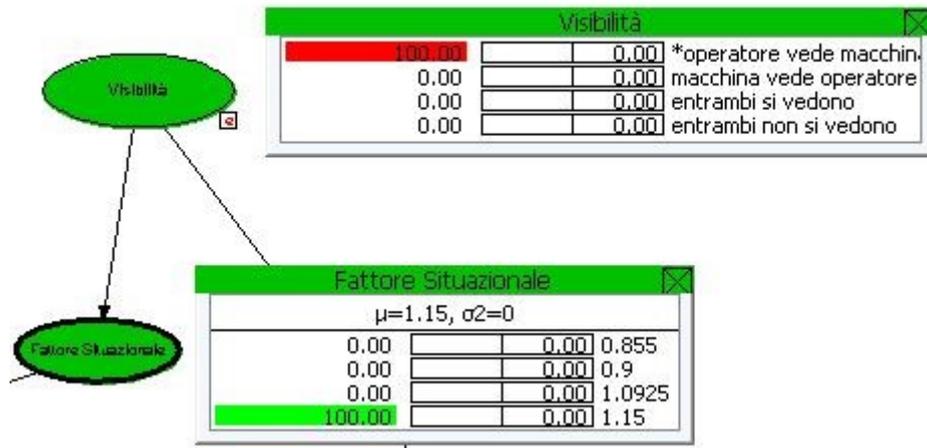
Il nodo fattore situazionale viene determinato attraverso il nodo visibilità caratterizzato da quattro condizioni:

1. operatore vede il macchinario,
2. operatore sul macchinario vede operatore a terra,
3. entrambi si vedono,
4. entrambi non si vedono.

I valori inseriti nel nodo fattore situazionale derivano da un lavoro di tesi precedente, mentre i valori del nodo visibilità sono stati ipotizzati a seconda delle quattro casistiche.

▪ VERIFICA DI SENSIBILITA':

Verranno trattati casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati del nodo genitor, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.



.Figura 3.38 – Nono componente, verifica caso 1

3.2.2.2 Analisi del modello da impatto rotazionale

Di seguito invece verrà analizzata la rete per frammenti mettendo in evidenza l'interazione che ci sono tra i nodi dipendenti e indipendenti e la sensibilità delle stesse relazioni.

- COMPONENTE 10

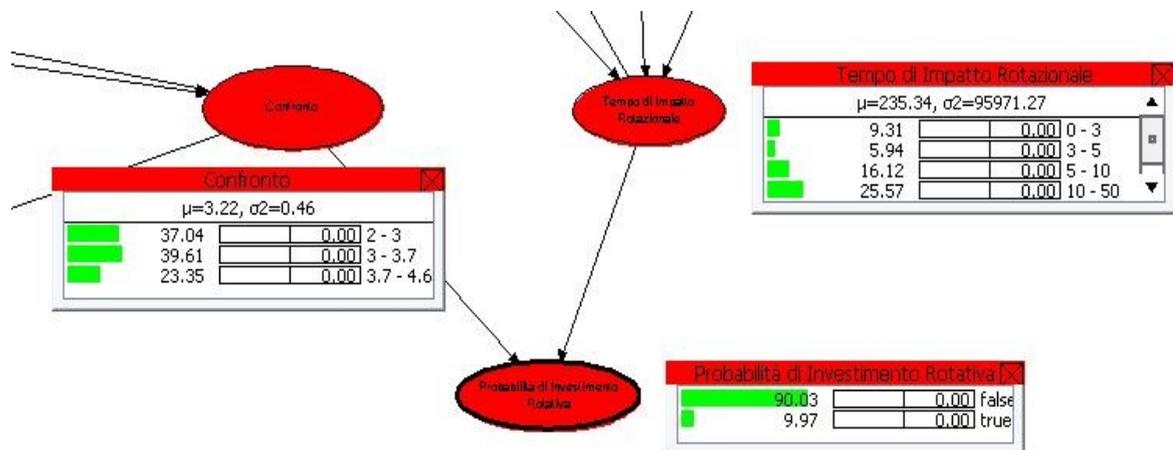


Figura 3.39 – Decimo componente rete bayesiana

▪ DESCRIZIONE:

Il fatto che l'operatore sia soggetto ad un possibile investimento rotazionale viene definito attraverso la relazione tra il nodo confronto ed il tempo di impatto rotazionale. In cui lo stato "false" indica l'impossibilità di investimento, mentre lo stato "true" indica la possibilità d'investimento. In entrambi i nodi sono stati inseriti valori di intervalli ricavati da un lavoro di tesi precedente, nel quale si è

studiata la trattazione dei dati, il quale ha messo in evidenza che gli intervalli scelti permettono di alleggerire i carichi computazionali affidati alla rete bayesiana.

▪ VERIFICA:

Verranno trattati due casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi tempo di reazione e di impatto, e sarà indicato come variano le possibilità di investimento.

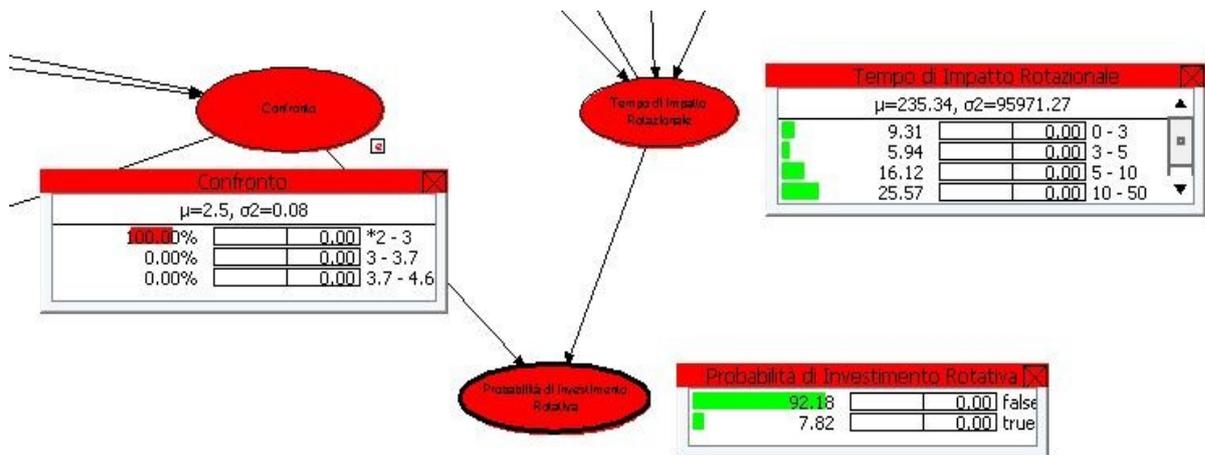


Figura 3.40 – Decimo componente, verifica caso 1

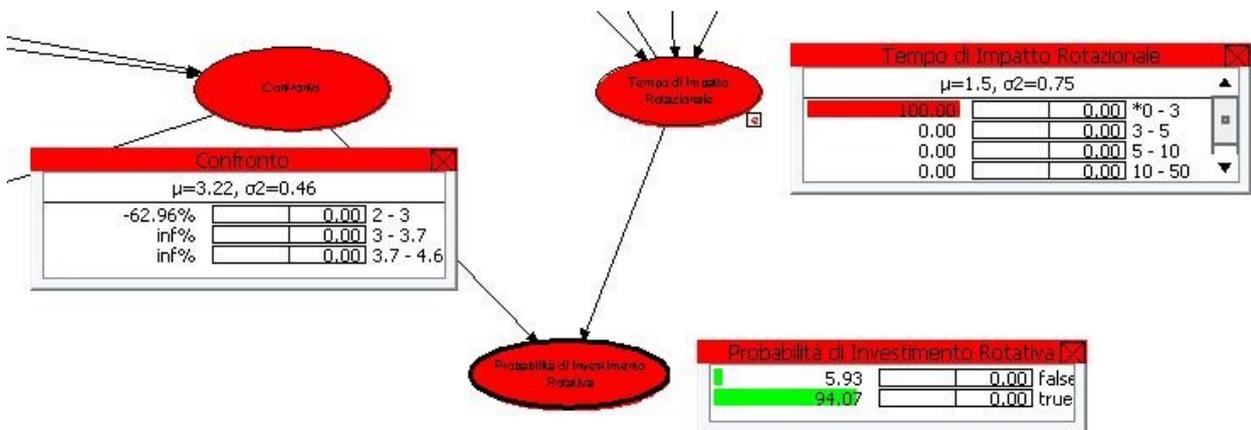


Figura 3.41 – Decimo componente, verifica caso 2

Per quanto concerne la spiegazione del nodo confronto si rimanda al paragrafo precedente 3.2.2.1 nello specifico ai frammenti di rete II, IV, V, VI, VII; in quanto i fattori che hanno una dipendenza con il tempo di reazione non variano rispetto alle modalità di investimento, che sia questo lineare o rotazionale.

- COMPONENTE 11

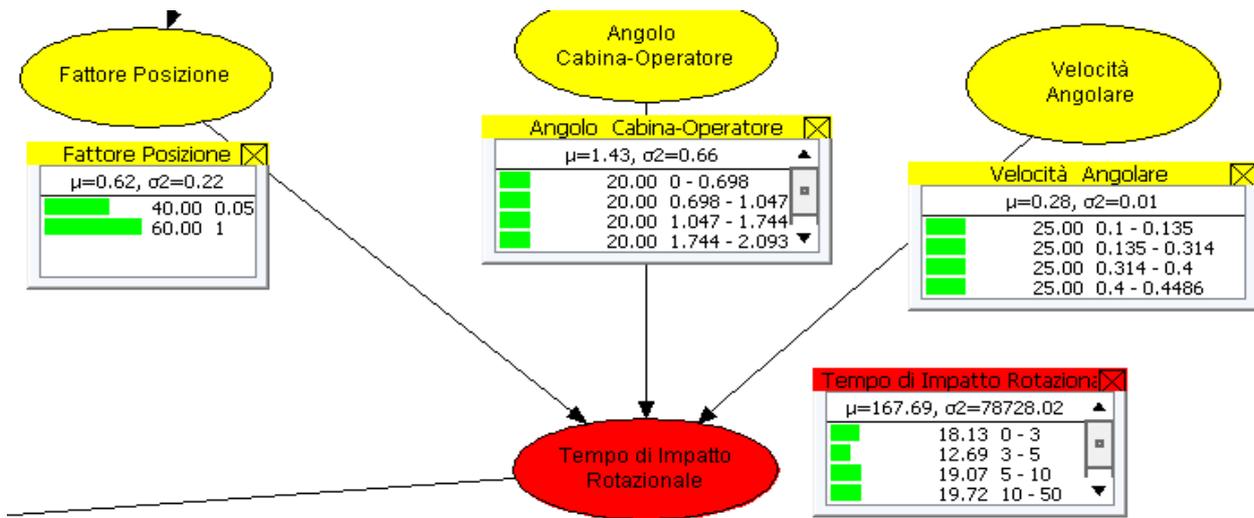


Figura 3.42 – Undicesimo componente rete bayesiana

▪ DESCRIZIONE:

Il tempo di impatto rotazionale viene determinato attraverso l'angolo sotteso alla retta che passa dal centro del macchinario e l'operatore, e la direttrice della cabina di comando, che viene definito nel nodo "Angolo cabina-operatore" e la velocità angolare, attraverso la relazione: "tempo di impatto rotazionale = [velocità angolare*1/(angolo Cabina-Operatore)]* Fattore posizione". In entrambi i nodi vengo inseriti valori di intervalli ricavati da un lavoro di tesi precedente il quale ha messo in evidenza che gli intervalli scelti permettono di alleggerire i carichi computazionali affidati alla rete bayesiana. Come già indicato nella relazione il tempo di impatto rotazionale viene moltiplicato per il fattore di posizione che prevede due stati possibili 0.05 o 1, il senso di tale fattore verrà illustrato nel prossimo frammento di rete bayesiana.

▪ VERIFICA:

Verranno trattati casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi genitori, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.

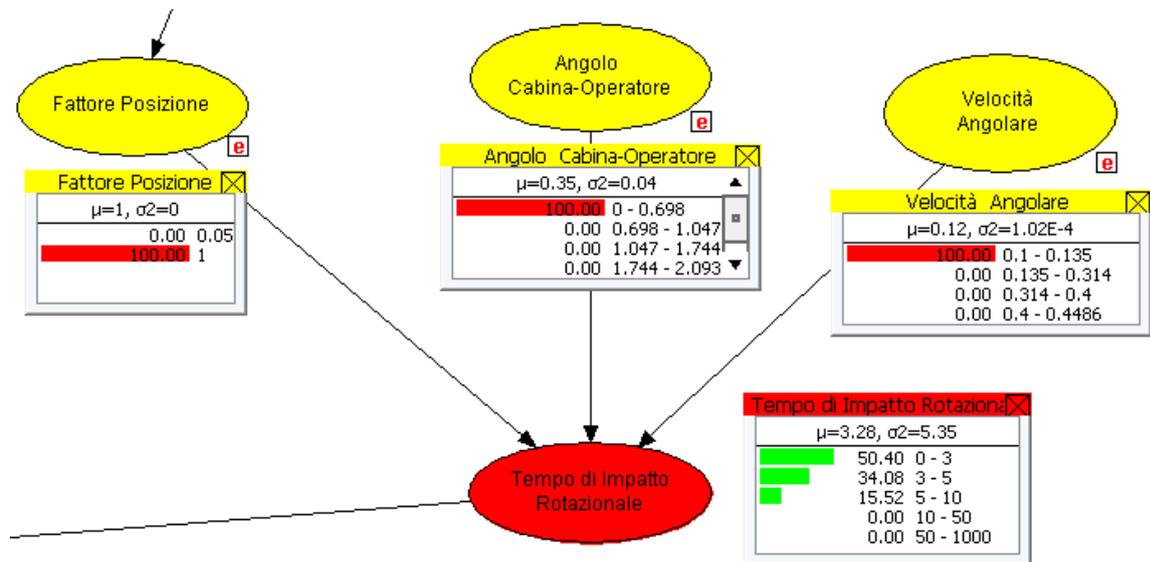


Figura 3.43 – Undicesimo componente, verifica caso 1

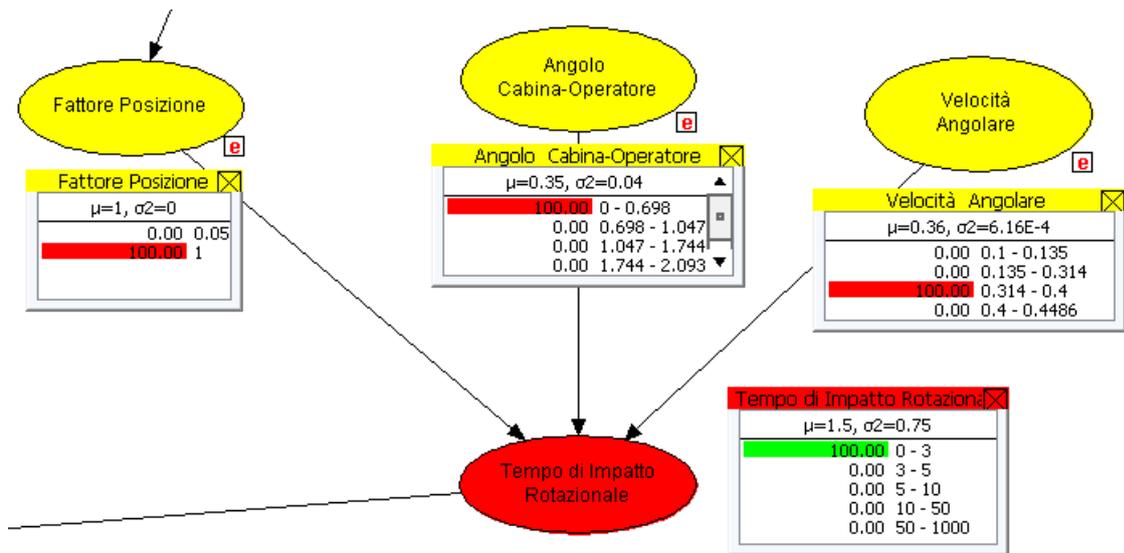


Figura 3.44 – Undicesimo componente, verifica caso 2

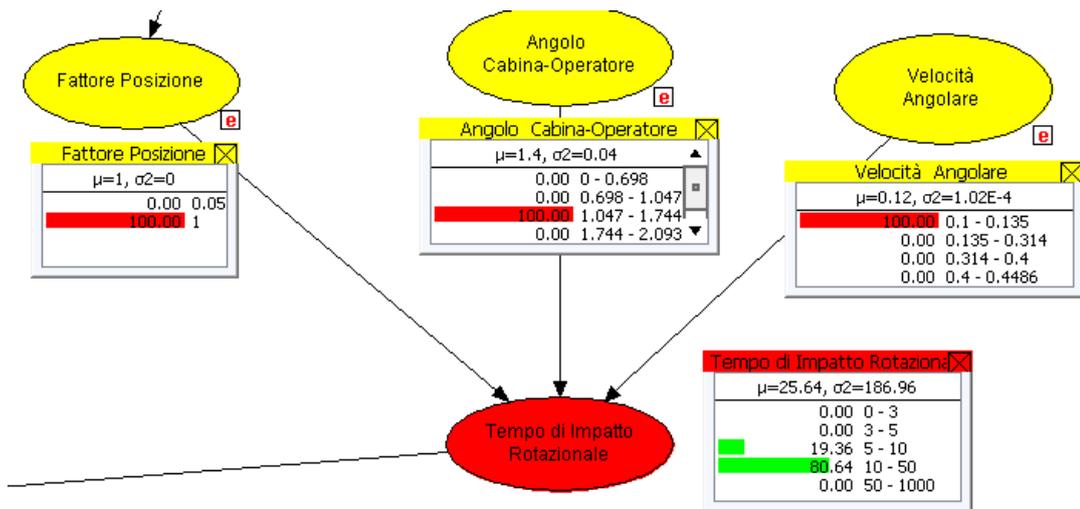


Figura 3.45 – Undicesimo componente, verifica caso 3

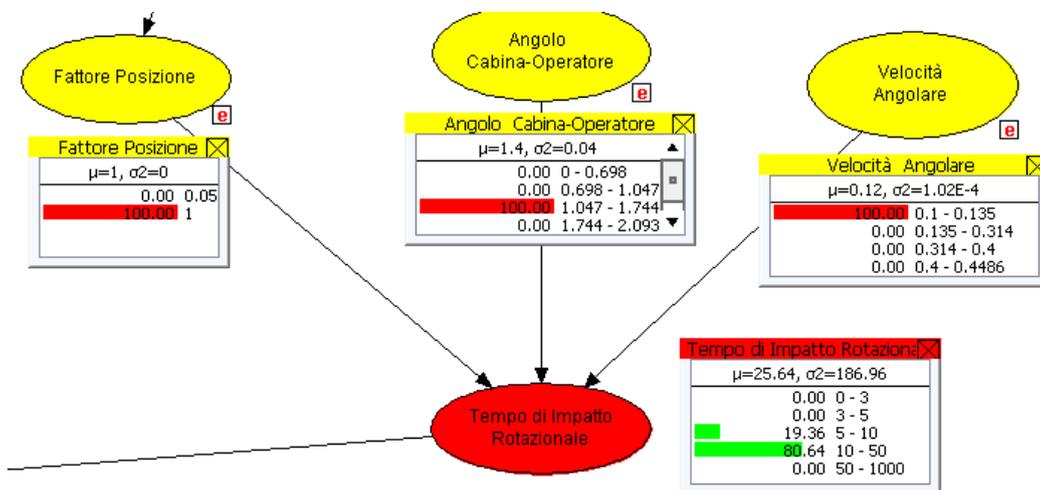


Figura 3.46 – Undicesimo componente, verifica caso 4

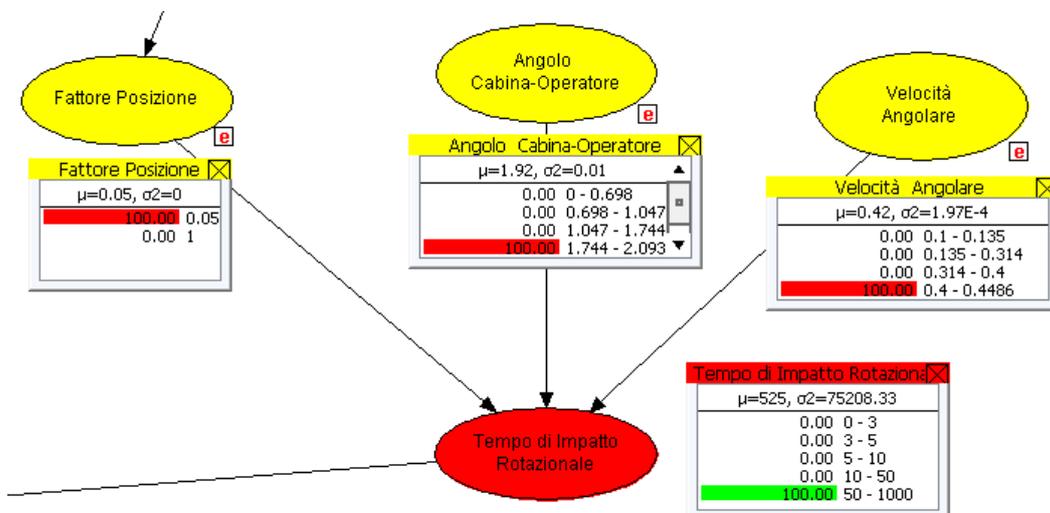


Figura 3.47 – Undicesimo componente, verifica caso 5

- COMPONENTE 12

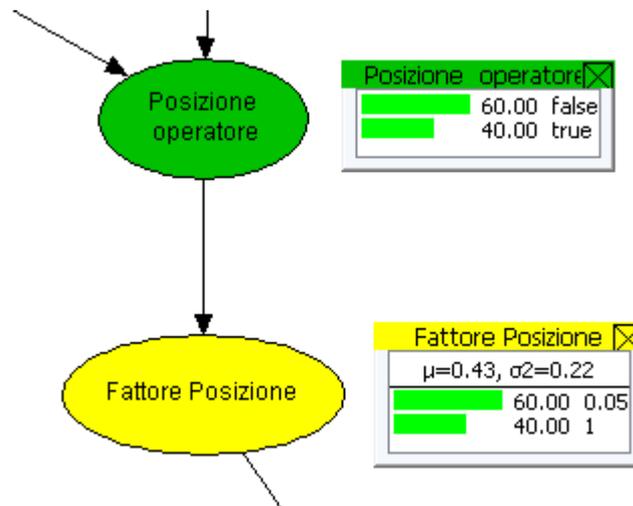


Figura 3.48 – Dodicesimo componente rete bayesiana

▪ DESCRIZIONE:

Il fattore Posizione prevede due stati possibili 1 o 0.05 e questi dipendono dallo stato del nodo posizione operatore, se il nodo posizione operatore si trova nello stato “false” allora lo stato associato nel fattore posizione è 0.05 ,se invece si troverà nello stato “true” lo stato del nodo fattore posizione sarà 1. Considerando che lo stato “false” del nodo posizione si verifica quando l’operatore non è all’interno del area quadrata di lato pari a $(2 * \text{raggio operativo totale})$, con baricentro nella cabina, questo implica che la rete considererà impossibile o comunque con un elevatissimo tempo di impatto la possibilità di un impatto rotazionale.

▪ VERIFICA:

Verranno trattati casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi genitorri, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.

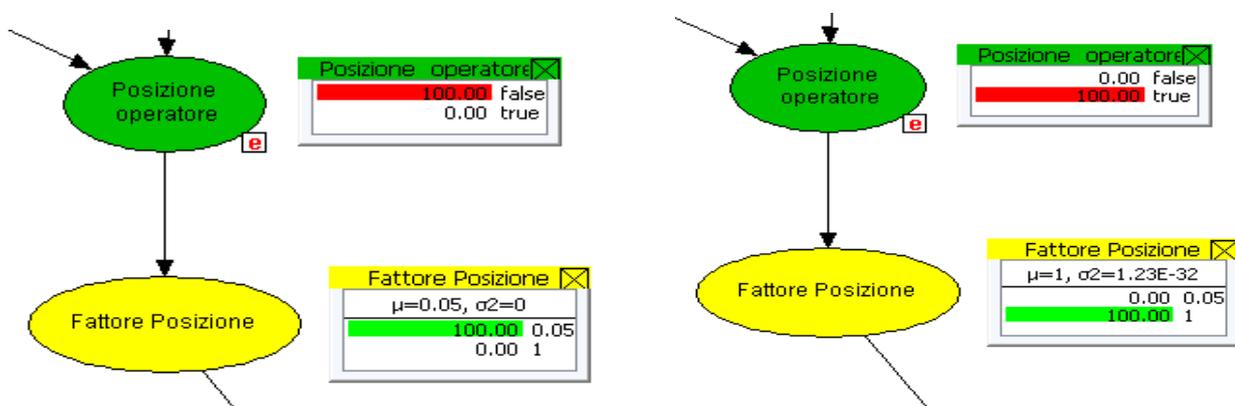


Figura 3.49 – Dodicesimo componente, verifica caso 1 e 2

- COMPONENTE 13

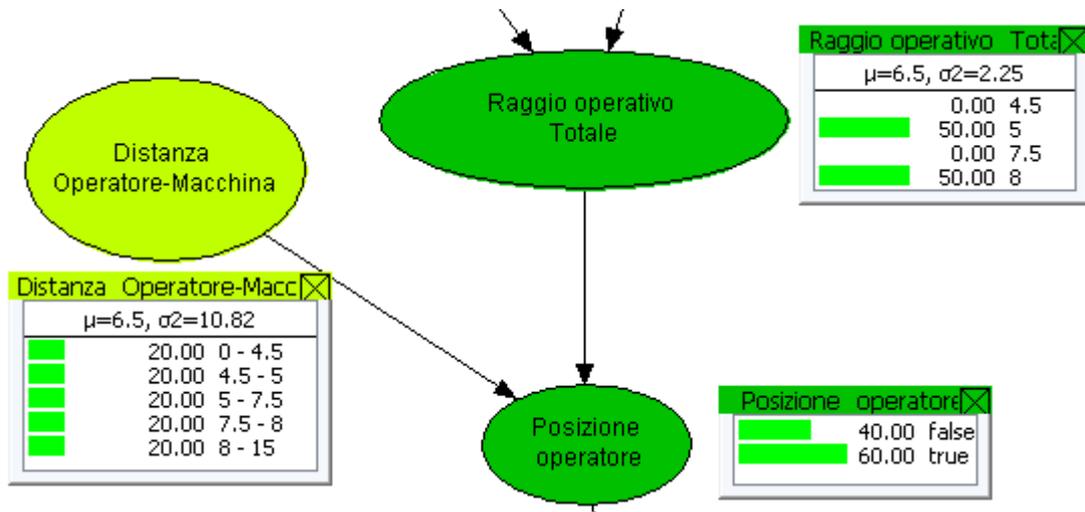


Figura 3.50– Tredicesimo componente rete bayesiana

▪ DESCRIZIONE:

Il nodo posizione, ammette due soli stati "true" e "false", tale nodo dipende dagli stati dei nodi distanza operatore –macchina e raggio operativo totale. La relazione prevede lo stato "false" nel caso in cui la distanza operatore-macchinario è maggiore del raggio operativo totale, nel caso in cui invece sia minore, lo stato del nodo posizione operatore si troverà su "true". Si può ribadire che se l'operatore si troverà nel raggio d'azione della sonda allora lo stato sarà true, il fattore posizione assumerà lo stato 1 e di conseguenza la rete calcolerà il tempo di impatto.

▪ VERIFICA DI SENSIBILITA':

Verranno trattati casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi genitori, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.

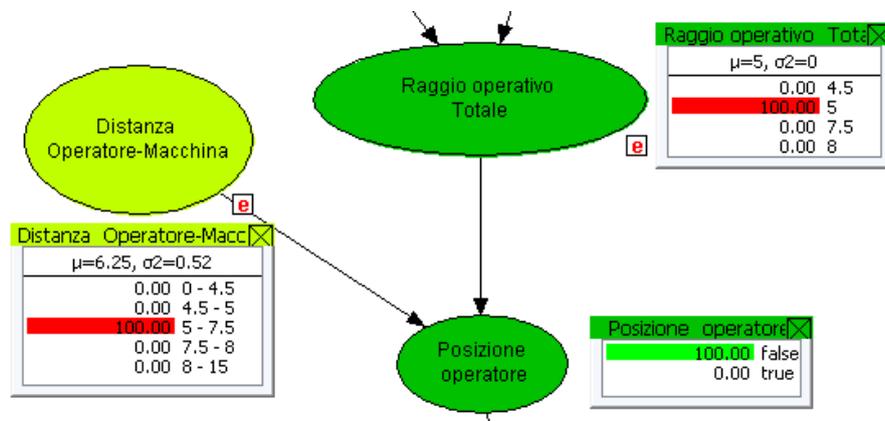


Figura 3.51 – Tredicesimo componente, verifica caso 1

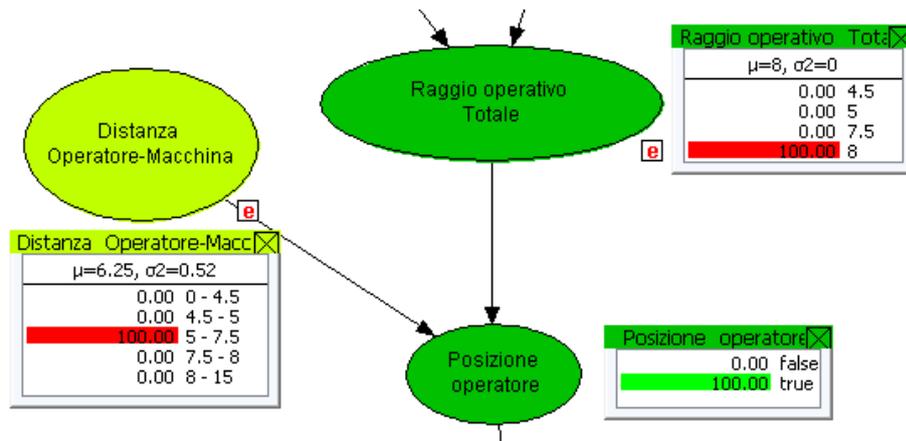


Figura 3.52 – Tredicesimo componente, verifica caso 2

- COMPONENTE 14

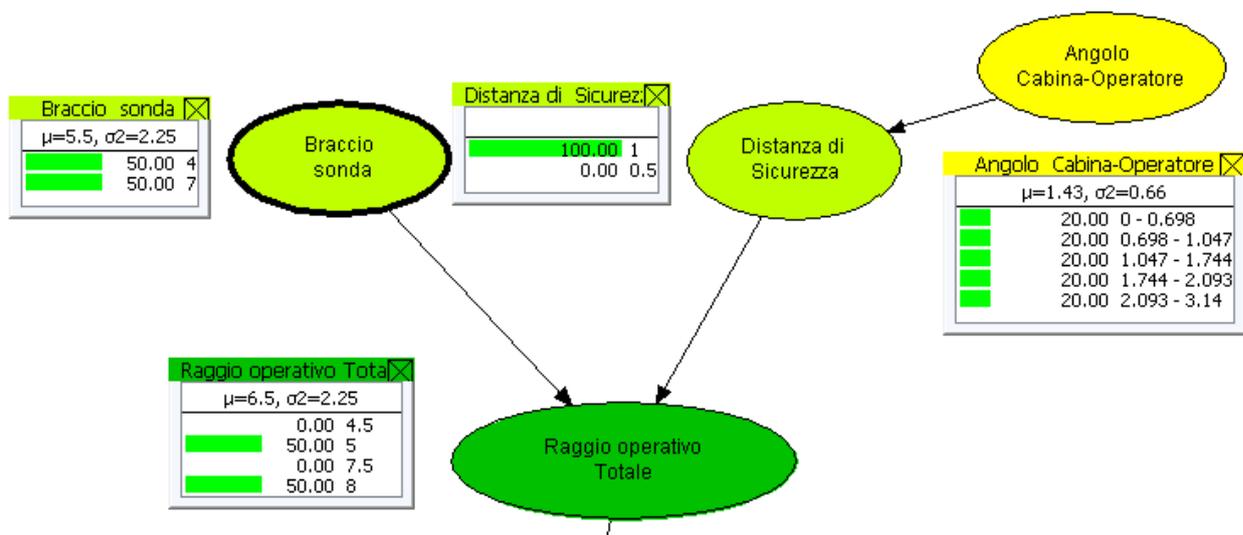


Figura 3.53 – Quattordicesimo componente rete bayesiana

▪ DESCRIZIONE:

In questo caso più che un semplice frammento si va a studiare un piccolo sotto modello che appartiene alla rete, gli stati che definiscono il raggio operativo totale sono dati dalla somma del braccio della sonda e la distanza di sicurezza che varia tra due possibili stati. 0.5 m o 1m . Dove questi sono funzione dello stato del nodo Angolo Cabina-Operatore ,se questo sarà minore o uguale a 1.047 pi greco allora la distanza sarà 1m altrimenti sarà 0.5 m. In questo caso come in altri il dominio del angolo giro è stato suddiviso in intervalli per limitare gli oneri computazionali.

- VERIFICA DI SENSIBILITA':

Verranno trattati casi specifici, imponendo una probabilità a priori dei dati dei nodi genitori, e sarà indicato come varierà lo stato del nodo dipendente.

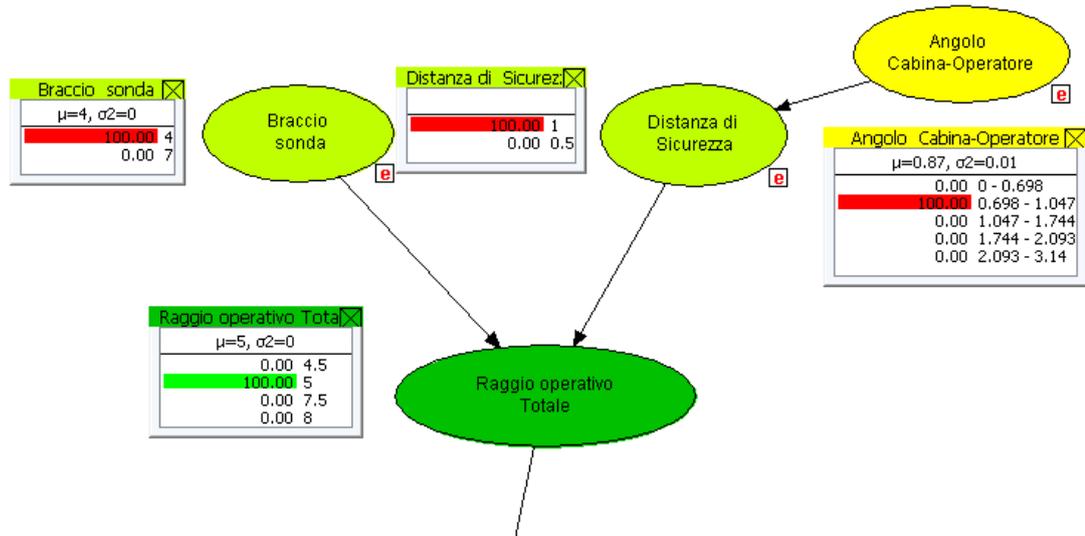


Figura 3.54 – Quattordicesimo componente, verifica caso 1

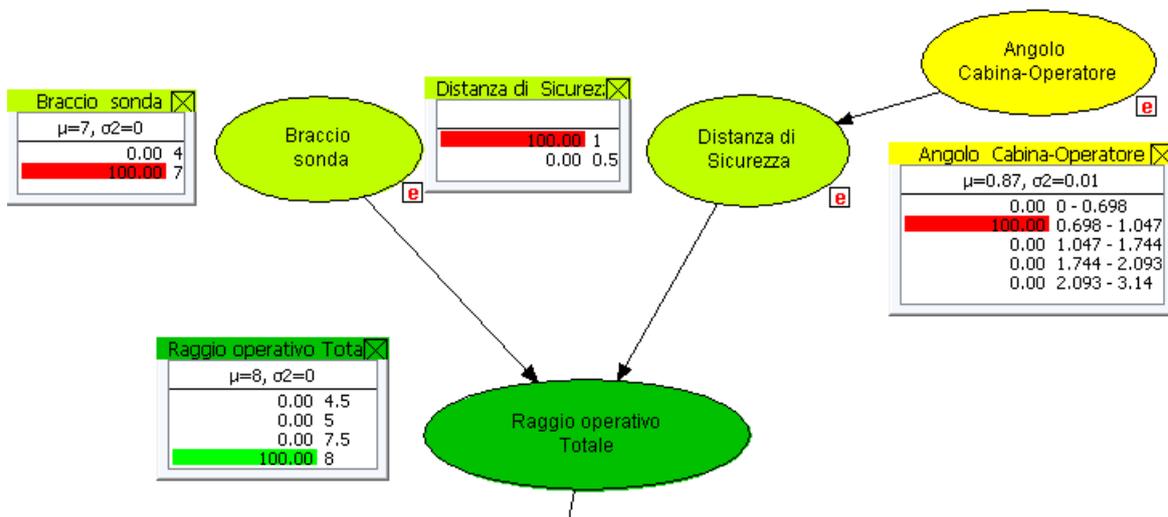


Figura 3.55 – Quattordicesimo componente, verifica caso 1

Di seguito vengono riportate i due sottomodelli della rete, cioè l'elaborazione dell'investimento per impatto lineare o dell'investimento per impatto rotativo con i rispettivi frammenti.

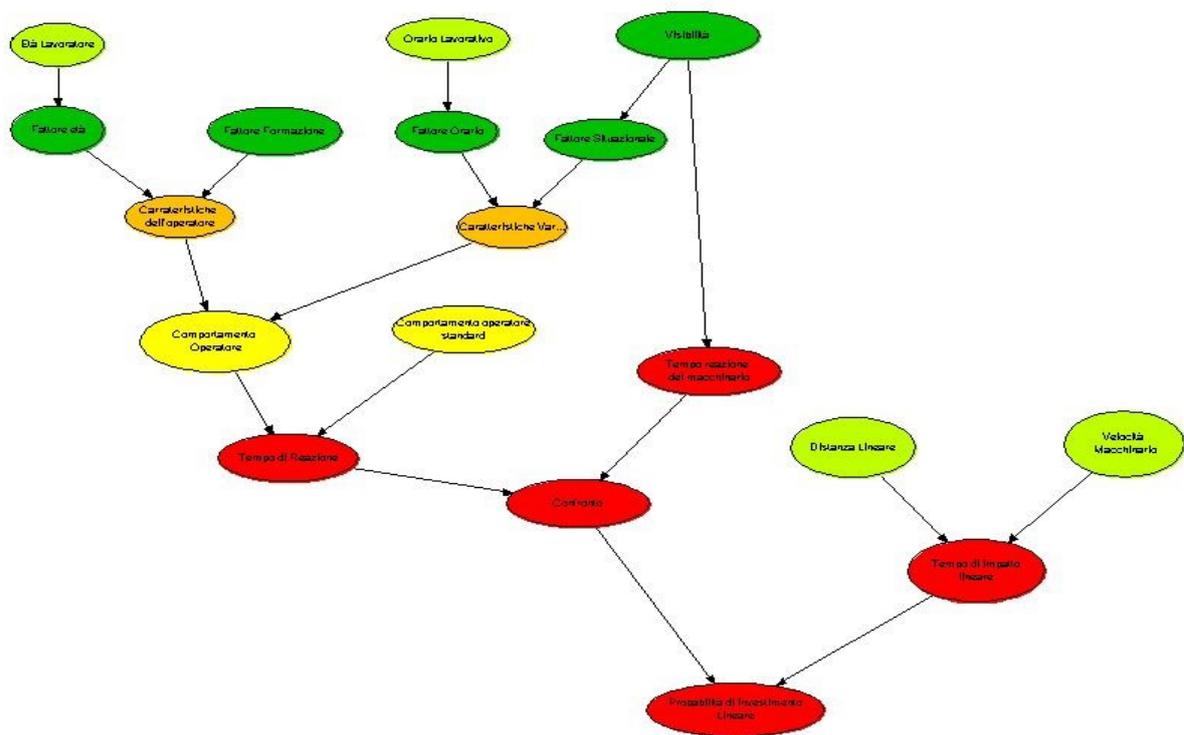


Figura 3.55 – Componente rete, impatto lineare

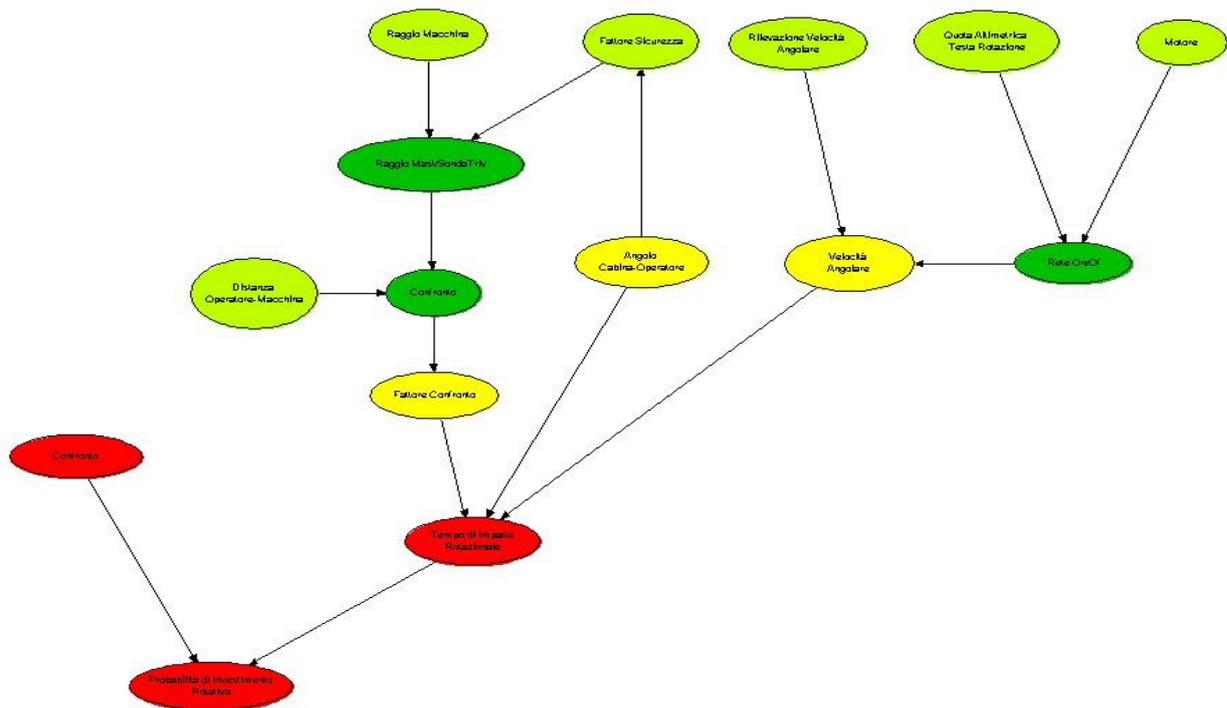


Figura 3.56 – Componente rete, impatto rotazionale

SIMULAZIONI

Data le complessità nella gestione della sicurezza descritta nei paragrafi precedenti, sono state effettuate delle simulazioni per determinare l'area di monitoraggio, così da valutare gli scostamenti tra l'ambiente reale e l'ambiente di simulazione per avere una maggiore accuratezza della localizzazione. Ciò ha permesso di determinare un range di valori riguardanti la distanza tra l'operatore e la macchina da permettere la valutazione dell'impatto lineare tra i due.

4.1 Determinazione dell'area di monitoraggio

La prima prova riguarda quindi stabilire l'area da monitorare per effettuare la simulazione. La prova è stata effettuata nel laboratorio DC3 dell'Università politecnica delle Marche, dove sono stati installati dei sensori UWB, che rilevano in tempo reale la posizione di un oggetto.

La rete di sensori è stata disposta lungo il perimetro del DC3, dove sono stati posizionati cinque ricevitori, chiamati ancore, che rilevano la posizione in tempo reale di due trasmettitori, chiamati tag, che si muovono all'interno del laboratorio, come mostrato in figura 4.1.

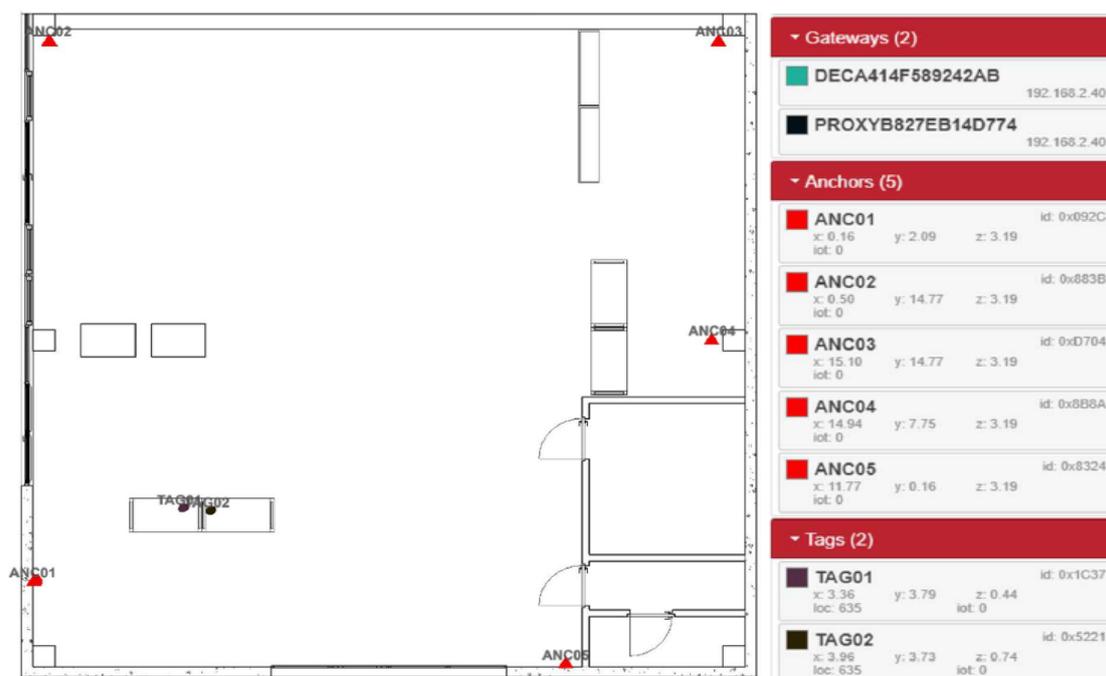


Figura 4.1 – Rappresentazione in pianta del DC3

Successivamente è stato delineato un perimetro, considerando dieci punti di riferimento, necessari per determinare le coordinate al fine di valutare l'accuratezza della localizzazione.

Di seguito verranno illustrate le misurazioni rilevate nei vari punti delimitanti il perimetro e verranno confrontate con le misurazioni rilevate dai sensori.

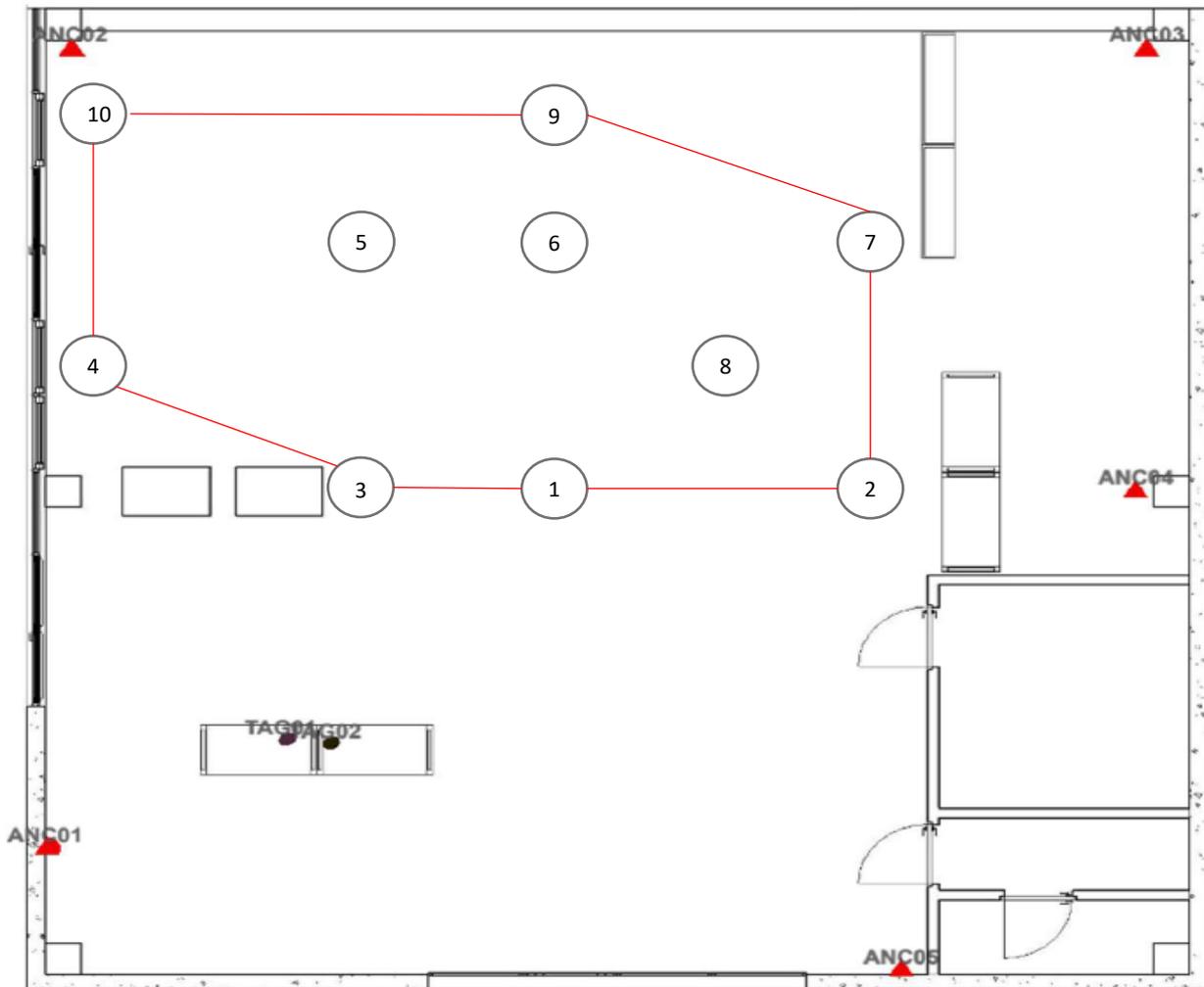


Figura 4.2 – Posizione dei punti di riferimento

I valori reali di ogni punto sono stati ottenuti tramite l'utilizzo di un distanziometro laser, in cui il valore delle x rilevato dal distanziometro è stato incrementato di 10 cm in relazione all'eccentricità tra il punto di misurazione e il baricentro del punto di riferimento. Mentre per la misurazione delle y, è stata considerata la misura totale del laboratorio lungo l'asse y a cui è stata sottratta la misura rilevata con il distanziometro laser e incrementata di 10 cm in relazione all'eccentricità.

REALE	x	y
1	7,81	8,08
2	11,47	8,04
3	3,99	8,12
4	2,08	9,75
5	4,06	11,78
6	7,81	11,79
7	11,47	11,73
8	9,61	9,8
9	7,81	13,93
10	2,08	13,51

Figura 4.3 – Misure reali rilevate con distanziometro laser

Mentre per quanto riguarda i valori dei sensori è stata effettuata una media dei valori rilevati dai trasmettitori in un intervallo di tempo pari a 30 secondi, in cui ogni tag trasmetteva un valore al trasmettitore ogni 10 secondi, per ogni punto di riferimento.

I valori delle x e delle y trasmessi dal tag 1c37, sono stati determinati considerando i valori rilevati in un intervallo di 30 secondi per ogni punto di riferimento. Dai valori rilevati, nel range di tempo considerato, si è ottenuto un valore medio sia per le x che per le y relativa al sensore 1c37 per ogni punto di riferimento.

1	nodeName	sequence	valueTime	x	y	z
2	dwm/node/1c37	837	2019-10-04T08:35:00.907Z	7,783314	7,745029	1,326494
3	dwm/node/1c37	838	2019-10-04T08:35:01.051Z	7,745091	7,751216	1,28669
4	dwm/node/1c37	839	2019-10-04T08:35:01.150Z	7,713238	7,777774	1,253072
5	dwm/node/1c37	840	2019-10-04T08:35:01.251Z	7,68726	7,79736	1,192692
6	dwm/node/1c37	841	2019-10-04T08:35:01.350Z	7,652773	7,813386	1,176829
7	dwm/node/1c37	842	2019-10-04T08:35:01.451Z	7,630529	7,823807	1,220013
8	dwm/node/1c37	844	2019-10-04T08:35:01.651Z	7,605233	7,818261	1,247409
9	dwm/node/1c37	845	2019-10-04T08:35:01.750Z	7,603849	7,814081	1,265911
10	dwm/node/1c37	846	2019-10-04T08:35:01.851Z	7,594012	7,809114	1,281822
11	dwm/node/1c37	847	2019-10-04T08:35:01.907Z	7,604364	7,812495	1,252904
12	dwm/node/1c37	848	2019-10-04T08:35:02.052Z	7,622374	7,803499	1,293775
13	dwm/node/1c37	849	2019-10-04T08:35:02.150Z	7,626479	7,795256	1,304193
14	dwm/node/1c37	850	2019-10-04T08:35:02.251Z	7,64104	7,786914	1,348669
15	dwm/node/1c37	851	2019-10-04T08:35:02.307Z	7,647413	7,793361	1,344185
16	dwm/node/1c37	852	2019-10-04T08:35:02.407Z	7,652878	7,779129	1,352099
17	dwm/node/1c37	853	2019-10-04T08:35:02.550Z	7,655582	7,776007	1,364182
18	dwm/node/1c37	854	2019-10-04T08:35:02.651Z	7,649032	7,774607	1,343008
19	dwm/node/1c37	855	2019-10-04T08:35:02.753Z	7,645106	7,775372	1,318811
20	dwm/node/1c37	856	2019-10-04T08:35:02.851Z	7,645912	7,772218	1,258317
21	dwm/node/1c37	857	2019-10-04T08:35:02.951Z	7,645885	7,767054	1,268115

1c37	x	y
1	7,688146	7,788872

1c37	x	y
1	7,688146	7,788872
2	11,59927	7,769355
3	4,107866	7,424367
4	2,314431	9,456338
5	4,644153	11,34413
6	7,852694	11,52342
7	11,63751	11,17066
8	9,810968	9,514181
9	7,892403	13,60463
10	2,178716	13,13141

Figura 4.4 – Range di valori relativi alla localizzazione del tag 1c37

I valori delle x e delle y trasmessi dal tag 5221, sono stati determinati considerando i valori rilevati in un intervallo di 30 secondi per ogni punto di riferimento. Dai valori rilevati, nel range di tempo

considerato, si è ottenuto un valore medio sia per le x che per le y relativa al sensore 5221 per ogni punto di riferimento.

8008	dwm/node/5221	837	2019-10-04T08:35:00.950Z	7,710954	7,424819	1,190355
8009	dwm/node/5221	838	2019-10-04T08:35:01.008Z	7,698534	7,405396	1,134046
8010	dwm/node/5221	839	2019-10-04T08:35:01.107Z	7,704927	7,401776	1,10637
8011	dwm/node/5221	840	2019-10-04T08:35:01.207Z	7,743354	7,395226	1,209539
8012	dwm/node/5221	841	2019-10-04T08:35:01.307Z	7,733092	7,385034	1,147152
8013	dwm/node/5221	842	2019-10-04T08:35:01.407Z	7,728512	7,369677	1,103184
8014	dwm/node/5221	843	2019-10-04T08:35:01.507Z	7,767885	7,368444	1,25916
8015	dwm/node/5221	844	2019-10-04T08:35:01.607Z	7,788261	7,369042	1,356679
8016	dwm/node/5221	845	2019-10-04T08:35:01.707Z	7,814137	7,36888	1,389051
8017	dwm/node/5221	846	2019-10-04T08:35:01.807Z	7,832715	7,36594	1,407438
8018	dwm/node/5221	847	2019-10-04T08:35:01.953Z	7,842698	7,368343	1,392739
8019	dwm/node/5221	849	2019-10-04T08:35:02.107Z	7,834957	7,327972	1,29103
8020	dwm/node/5221	850	2019-10-04T08:35:02.207Z	7,832502	7,317625	1,255743
8021	dwm/node/5221	851	2019-10-04T08:35:02.350Z	7,828751	7,294135	1,23123
8022	dwm/node/5221	852	2019-10-04T08:35:02.454Z	7,833889	7,302743	1,200465
8023	dwm/node/5221	853	2019-10-04T08:35:02.508Z	7,825774	7,310148	1,167967
8024	dwm/node/5221	854	2019-10-04T08:35:02.607Z	7,816329	7,308449	1,139882

5221	x	y
1	7,915954	7,364043

5221	x	y
1	7,915954	7,364043
2	11,64727	7,543858
3	4,119086	7,750151
4	2,043515	9,586644
5	4,387248	11,50188
6	7,735222	11,40996
7	11,28261	11,01742
8	9,352024	9,611916
9	7,633683	13,37922
10	1,985283	13,25819

Figura 4.5 – Range di valori relativi alla localizzazione del tag 5221

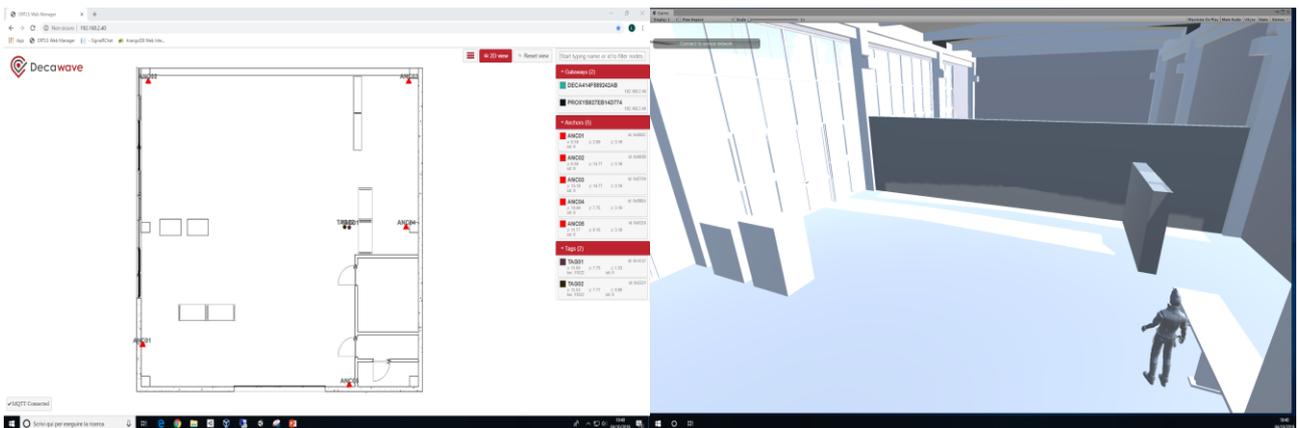
Data l'eccentricità di ogni tag rispetto al baricentro del punto di riferimento, è stato calcolato il punto medio, sia per le x che per le y, facendo una media delle x e delle y rilevate dal tag 1c37 e dal tag 5221.

P.to medio	x	y
1	7,80205	7,576457
2	11,62327	7,656607
3	4,113476	7,587259
4	2,178973	9,521491
5	4,5157	11,42301
6	7,793958	11,46669
7	11,46006	11,09404
8	9,581496	9,563048
9	7,763043	13,49193
10	2,081999	13,1948

Figura 4.5 – Valori del punto medio del sistema UWB

Di seguito verrà illustrata e documentata la fase di rilevazione delle coordinate all'interno del laboratorio.

PUNTO 2



Misura Reale:

x = 11,47 m

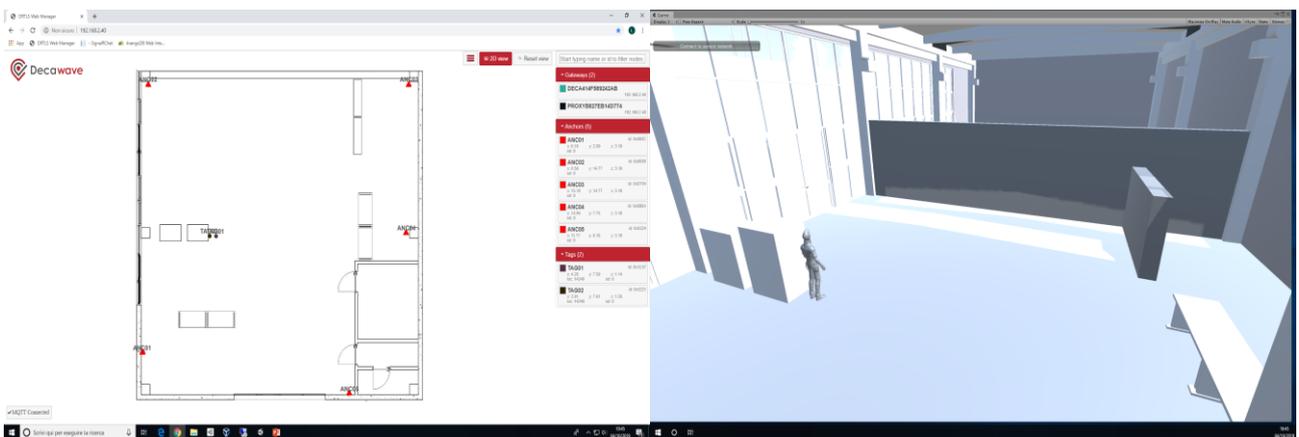
y = 8,04 m

Misura UWB:

x = 11,62 m

y = 7,66 m

PUNTO 3



Misura Reale:

$$x = 3,99 \text{ m}$$

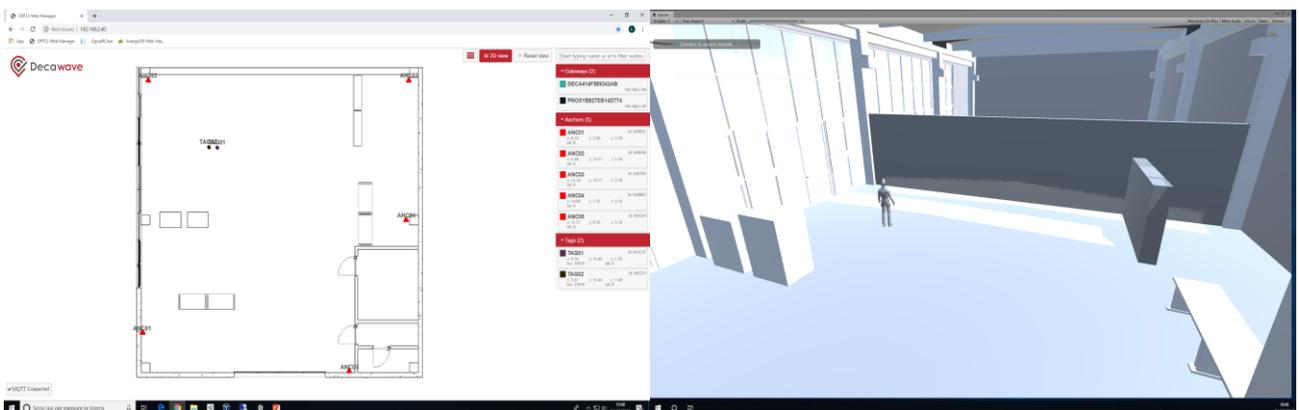
$$y = 8,12 \text{ m}$$

Misura UWB:

$$x = 4,11 \text{ m}$$

$$y = 7,59 \text{ m}$$

PUNTO 5



Misura Reale:

$$x = 4,06 \text{ m}$$

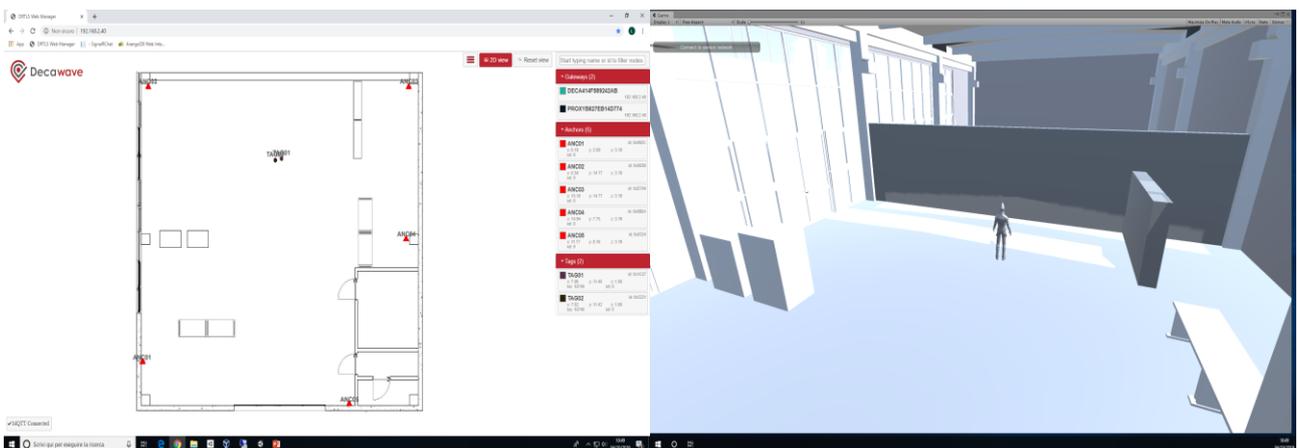
$$y = 11,78 \text{ m}$$

Misura UWB:

$$x = 4,51 \text{ m}$$

$$y = 11,42 \text{ m}$$

PUNTO 6



Misura Reale:

$$x = 7,81 \text{ m}$$

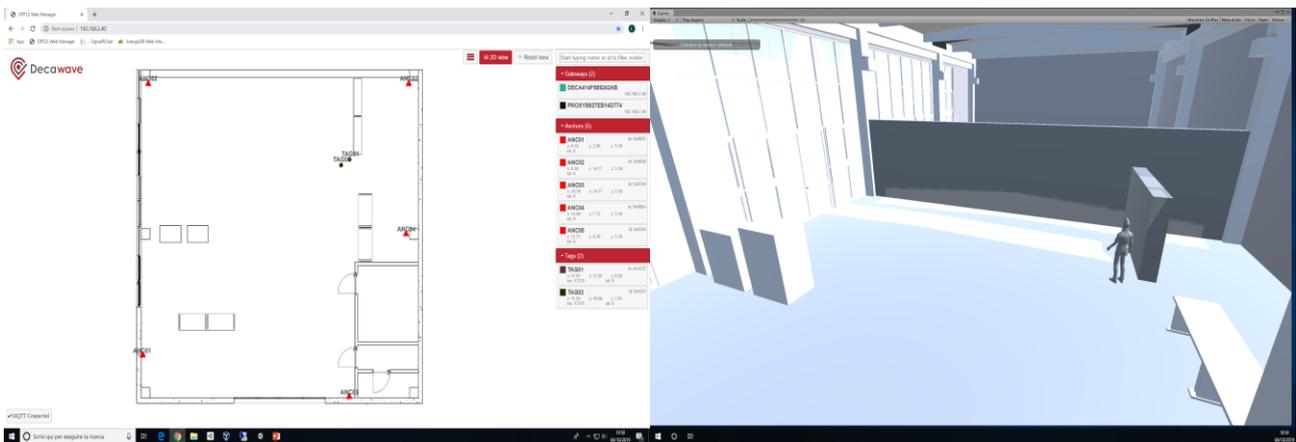
$$y = 11,78 \text{ m}$$

Misura UWB:

$$x = 7,79 \text{ m}$$

$$y = 11,47 \text{ m}$$

PUNTO 7



Misura Reale:

x = 11,47 m

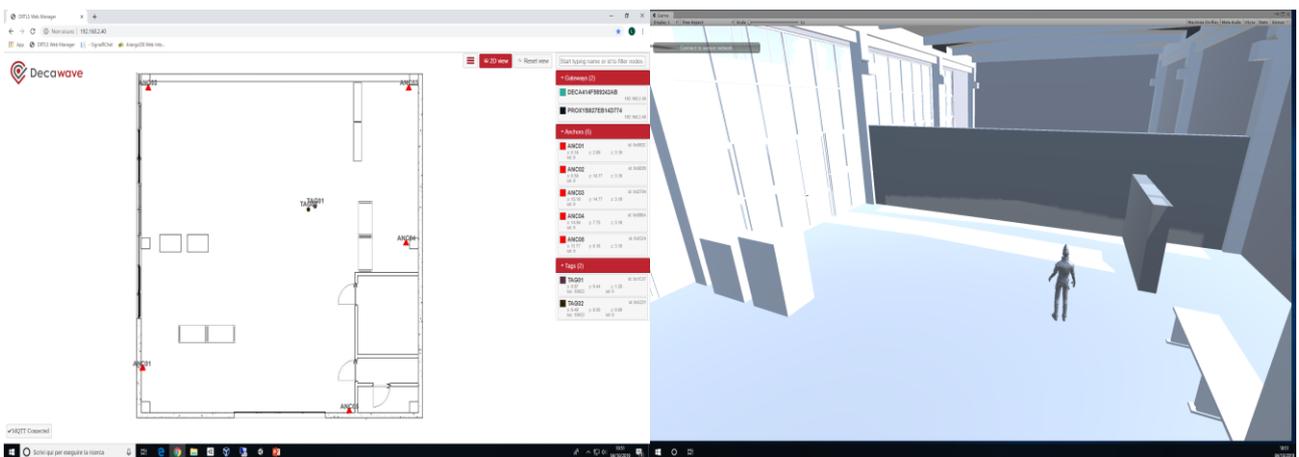
y = 11,73 m

Misura UWB:

x = 11,46 m

y = 11,09 m

PUNTO 8



Misura Reale:

x = 9,61 m

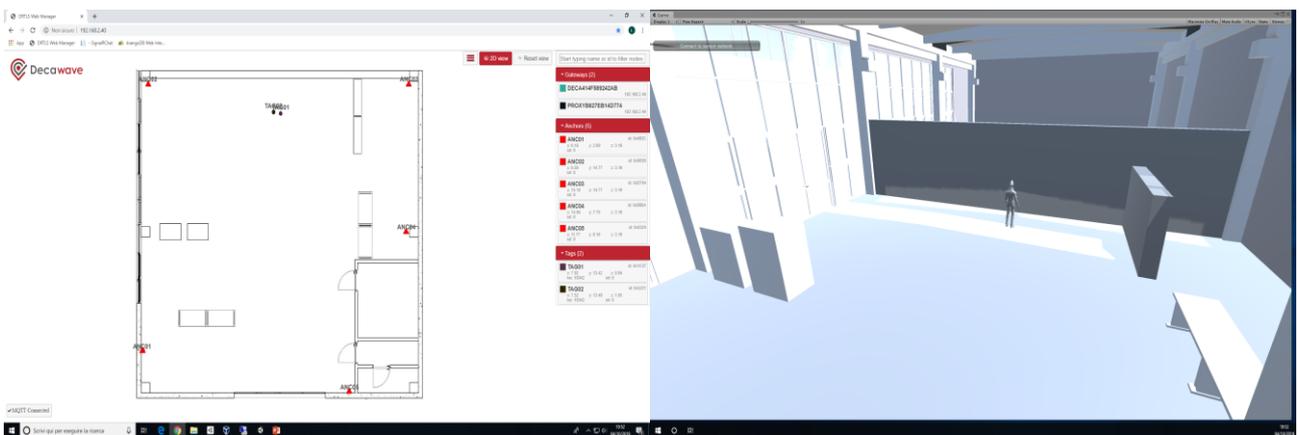
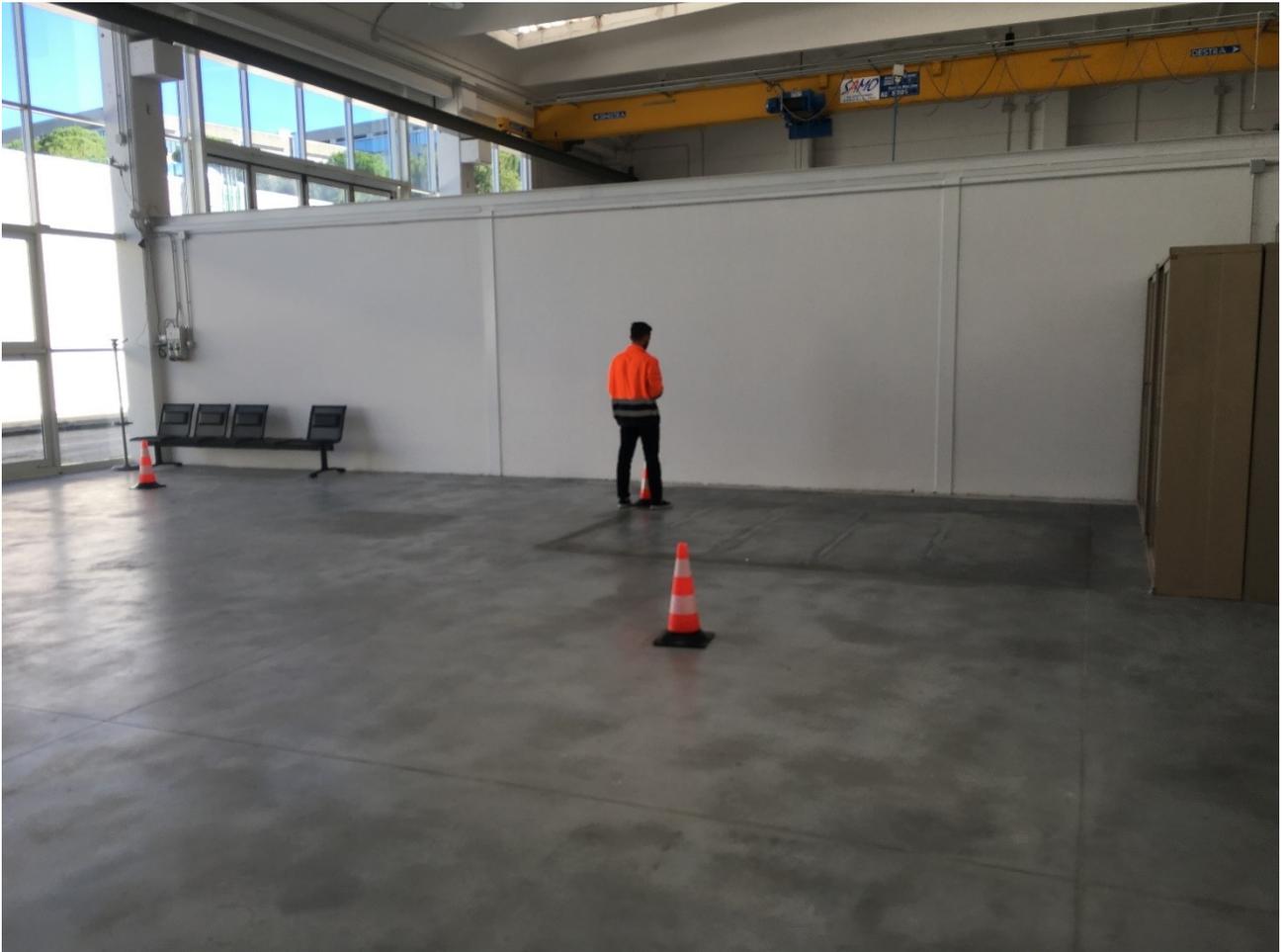
y = 9,80 m

Misura UWB:

x = 9,58 m

y = 9,56 m

PUNTO 9



Misura Reale:

$$x = 7,81 \text{ m}$$

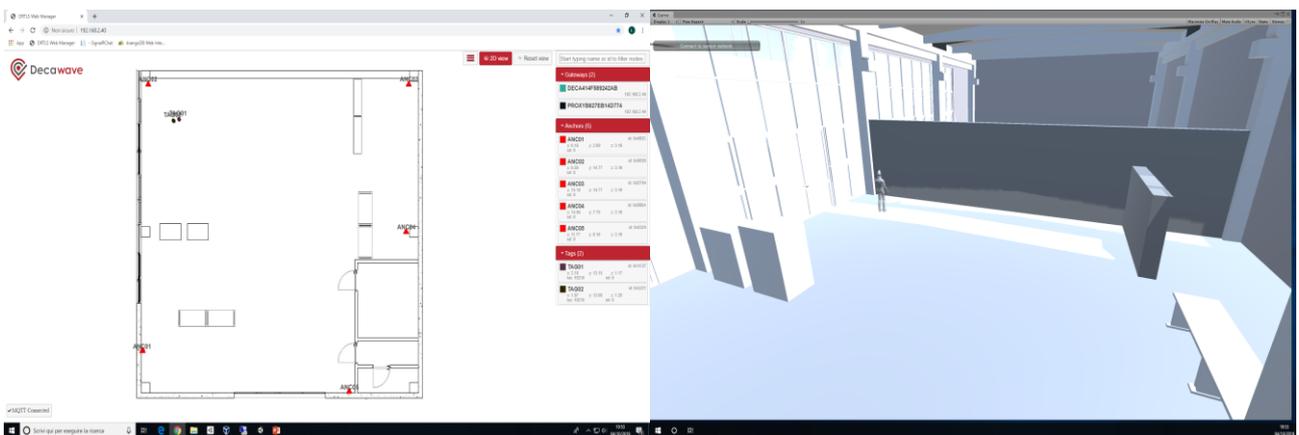
$$y = 13,93 \text{ m}$$

Misura UWB:

$$x = 7,76 \text{ m}$$

$$y = 13,49 \text{ m}$$

PUNTO 10



Misura Reale:

$x = 2,08 \text{ m}$

$y = 13,51 \text{ m}$

Misura UWB:

$x = 2,08 \text{ m}$

$y = 13,19$

Determinate le coordinate dei punti presi come riferimento, si è calcolato il modulo dell'errore relativo alla differenze tra le posizioni reali e le posizioni rilevate dagli UWB.

VALORE REALE	X	Y
1	7,81 m	8,08 m
2	11,47 m	8,04 m
3	3,99 m	8,12 m
4	2,08 m	9,75 m
5	4,06 m	11,78 m
6	7,81 m	11,78 m
7	11,47 m	11,73 m
8	9,61 m	9,8 m
9	7,81 m	13,93 m
10	2,08 m	13,51 m

VALORE UWB	X	Y
1	7,80 m	7,58 m
2	11,72 m	7,66 m
3	4,11 m	7,59 m
4	2,18 m	9,52 m
5	4,51 m	11,42 m
6	7,79 m	11,47 m
7	11,46 m	11,09 m
8	9,58 m	9,56 m
9	7,76 m	13,49 m
10	2,08 m	13,19 m

SCOST	VALORE
1	0,503605
2	0,412895
3	0,546863
4	0,249022
5	0,578885
6	0,32371
7	0,636037
8	0,23866
9	0,440581
10	0,315204

Figura 4.6 – Valori di scostamento tra le misure reali e le misure UWB

Calcolati i valori degli errori tra le coordinate reali e le coordinate rilevate dai sensori, si è calcolato il valore medio dell'errore e il valore massimo:

MEDIA ERRORE
0,42 m
MAX ERRORE
0,64 m

Figura 4.7 – Valore medio e massimo dell'errore

Dal valore medio dell'errore e dal valore massimo è possibile stabilire che lo scostamento tra le coordinate reali e le coordinate rilevate dai sensori è circa 0,50 m, quindi è possibile affermare che l'area analizzata è monitorabile al fine da ottenere dati, relativi alla localizzazione, accurati per poter effettuare un monitoraggio della zona in tempo reale.

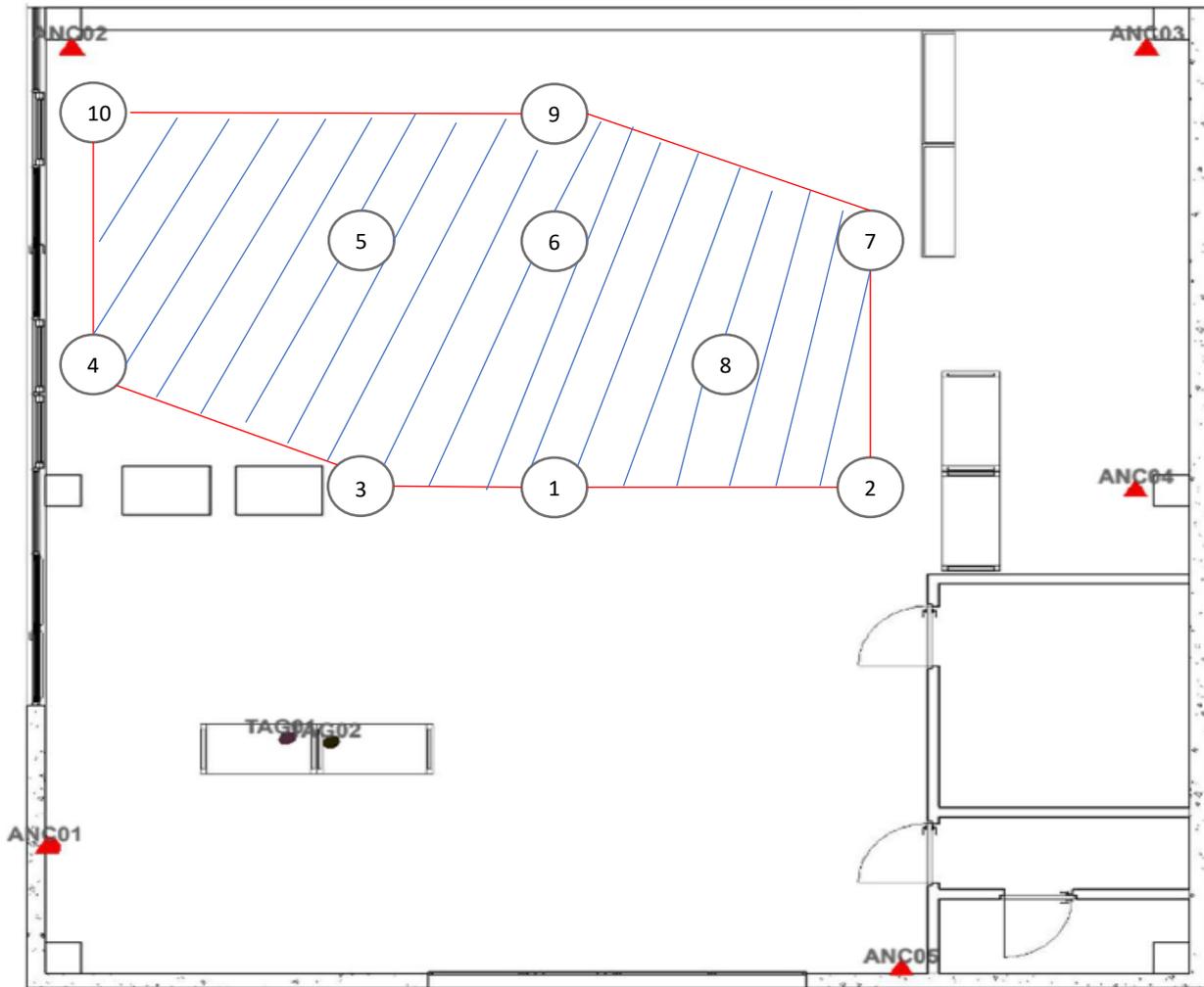


Figura 4.8 – Determinazione dell'area monitorabile

Stabilita l'accuratezza dei dati ottenuti dai sensori, si è potuto definire il range di valori relativi alla distanza lineare tra l'operatore e il macchinario che sono stati inseriti all'interno della rete bayesiana nel nodo "Distanza lineare". Di fatto è stato considerato un intervallo di 1,50 m tra una distanza e l'altra.

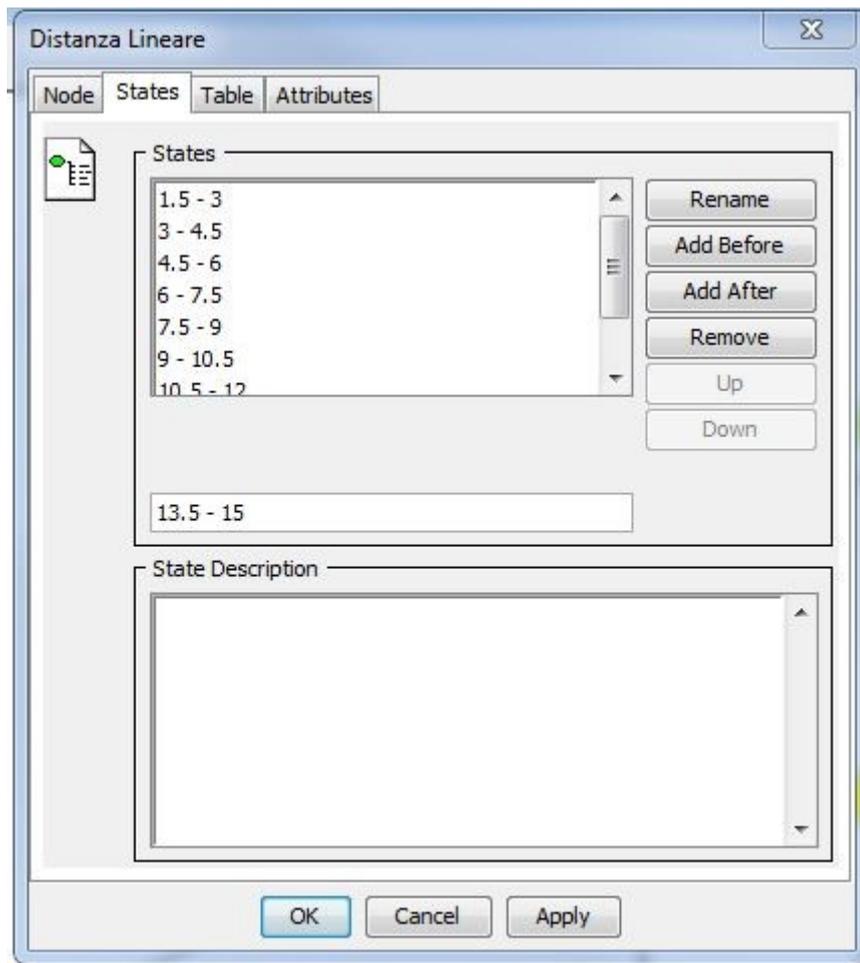


Figura 4.9 – Range relativo al nodo Distanza Lineare nella rete bayesiana

4.2 Simulazioni delle probabilità d'impatto

La seconda simulazione riguarda la verifica della rete all'interno dell'ambiente di simulazione, nel caso particolare sono state verificate la probabilità d'impatto lineare e la probabilità d'impatto rotazionale. Sono state effettuate prove nel laboratorio DC3, in cui si è simulato uno scenario di rischio relativo alla fase lavorativa di trivellazione di pali di fondazione.

All'interno del laboratorio DC3, quindi nell'ambiente reale, i pali sono stati rappresentati con dei coni posizionati in punti prestabiliti, dove un operatore reale accessoriato di tag di localizzazione si spostava verso ogni palo e la rete di sensori ne aggiornava la posizione nell'ambiente virtuale (Fig 4.10)

Mentre nell'ambiente virtuale, Unity, sono presenti un operatore virtuale che simula gli spostamenti dell'operatore reale nel laboratorio aggiornandone di conseguenza la posizione, un driller, e i rispettivi pali.

La movimentazione del driller all'interno della scena virtuale è stata effettuata da un altro operatore, che tramite un controller (joystick), direzionava il driller verso ogni palo (Fig 4.12)

Nella scena in Unity, in alto a destra sono state posizionate le reti che danno indicazioni sulle probabilità d'impatto lineare e rotazionale, dove a seconda dei casi si spegneranno se la probabilità d'impatto è pari a 0, in caso contrario si accenderanno se la probabilità d'impatto aumenta (Fig. 4.13)

Quindi in questa simulazione è stata verificata la probabilità d'impatto lineare tra operatore e driller, nei casi in cui l'operatore è vigile dell'avvicinamento del driller, il caso in cui quest'ultimo è vigile della presenza dell'operatore durante l'avvicinamento e il caso in cui nessuno dei due è vigile della posizione dell'altro.

L'altra verifica effettuata riguarda la probabilità d'impatto rotazionale tra l'operatore e il braccio meccanico del driller, quest'ultimo è vigile della posizione dell'operatore e il caso in cui entrambi sono vigili della posizione dell'altro.



Figura 4.10 – Posizione dei pali all'interno del laboratorio DC3

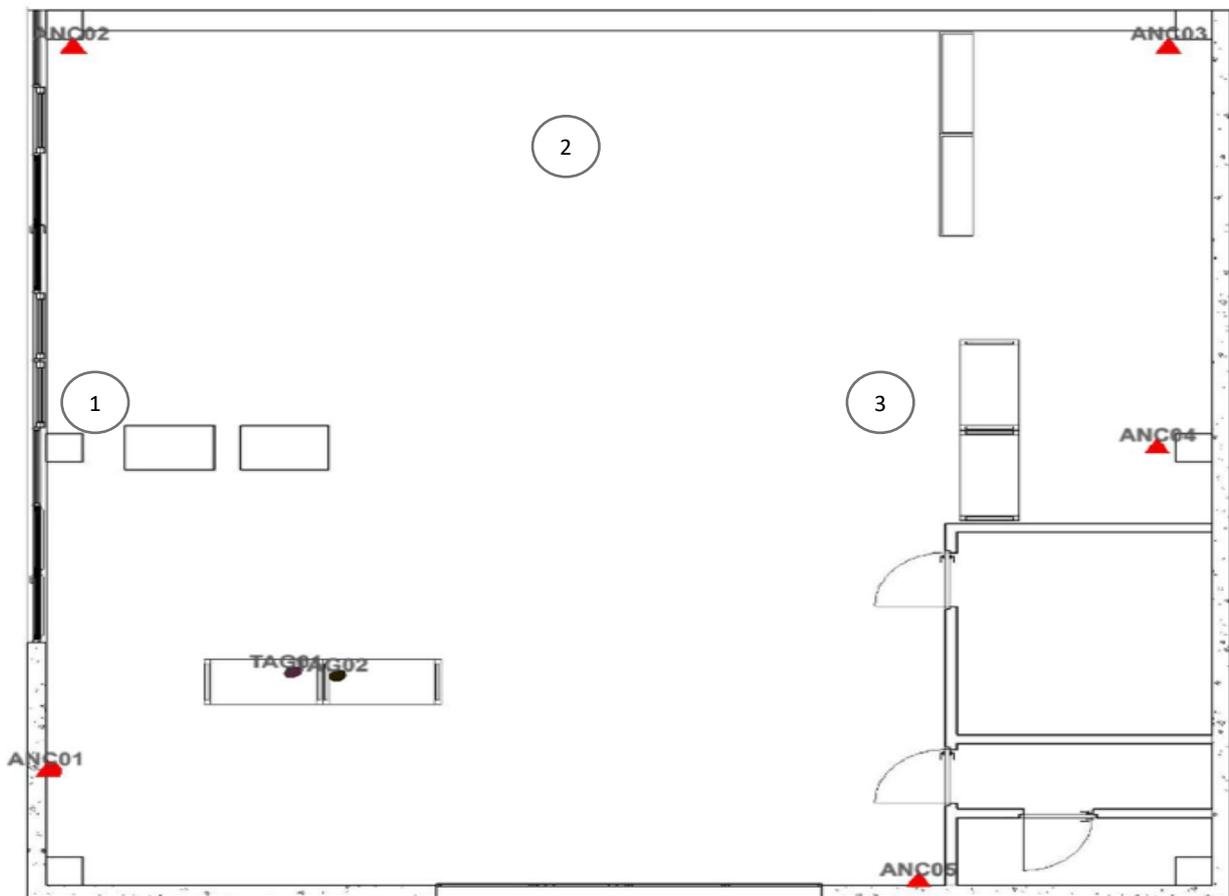


Figura 4.11 – Rappresentazione in pianta dei pali di riferimento per la simulazione

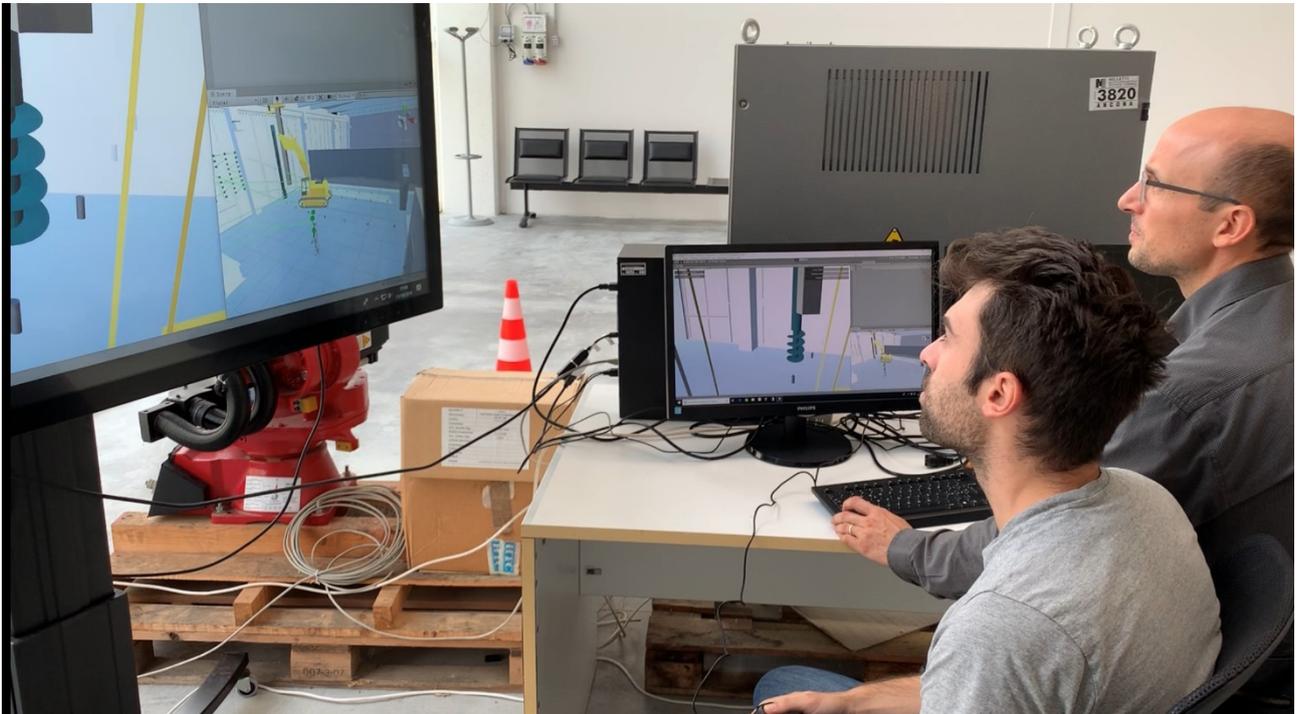


Figura 4.12 – Movimentazione del driller tramite controller all'interno della scena virtuale

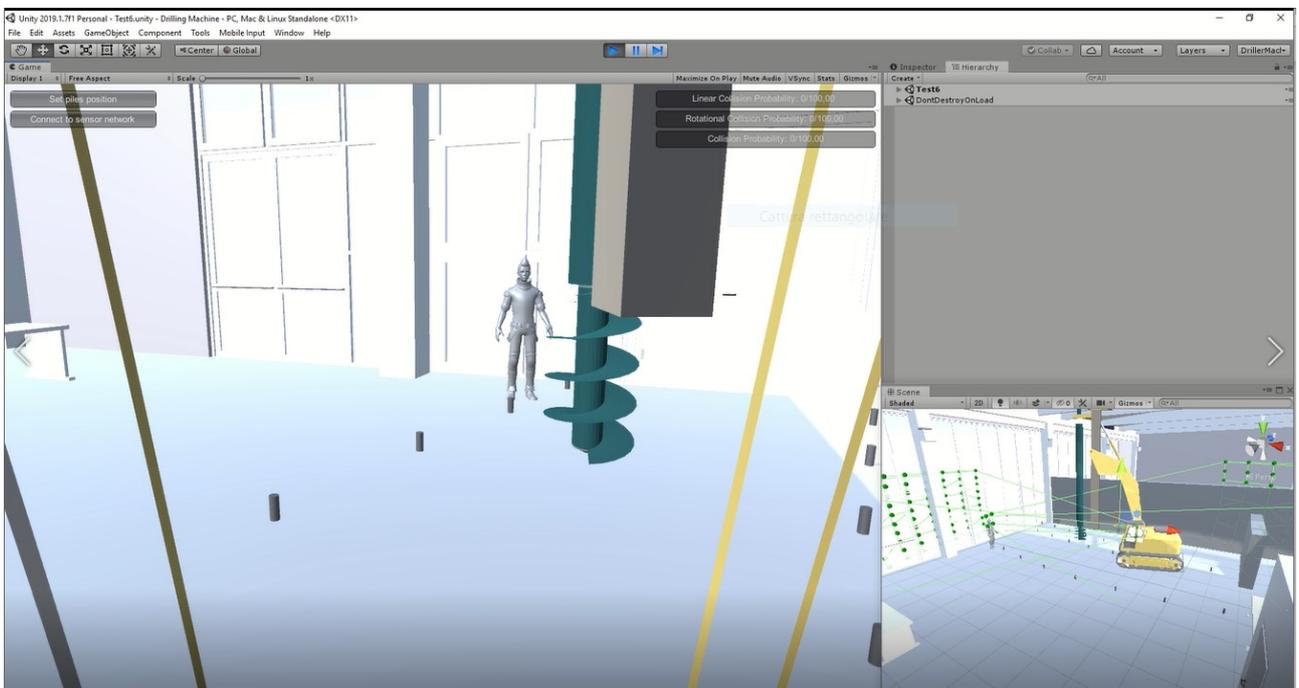


Figura 4.13 – Barre di probabilità d'impatto

4.2.1 Simulazioni delle probabilità d'impatto lineare

CASO: entrambi sono vigili della posizione dell'altro

1° PALO

Nel primo scenario, quando l'operatore è posizionato in prossimità del punto dove il driller effettuerà la trivellazione per la realizzazione del palo di fondazione, si può notare che ad una certa distanza la probabilità d'impatto è pari a 0, man mano che il driller si avvicina all'operatore la probabilità d'impatto lineare aumenta.

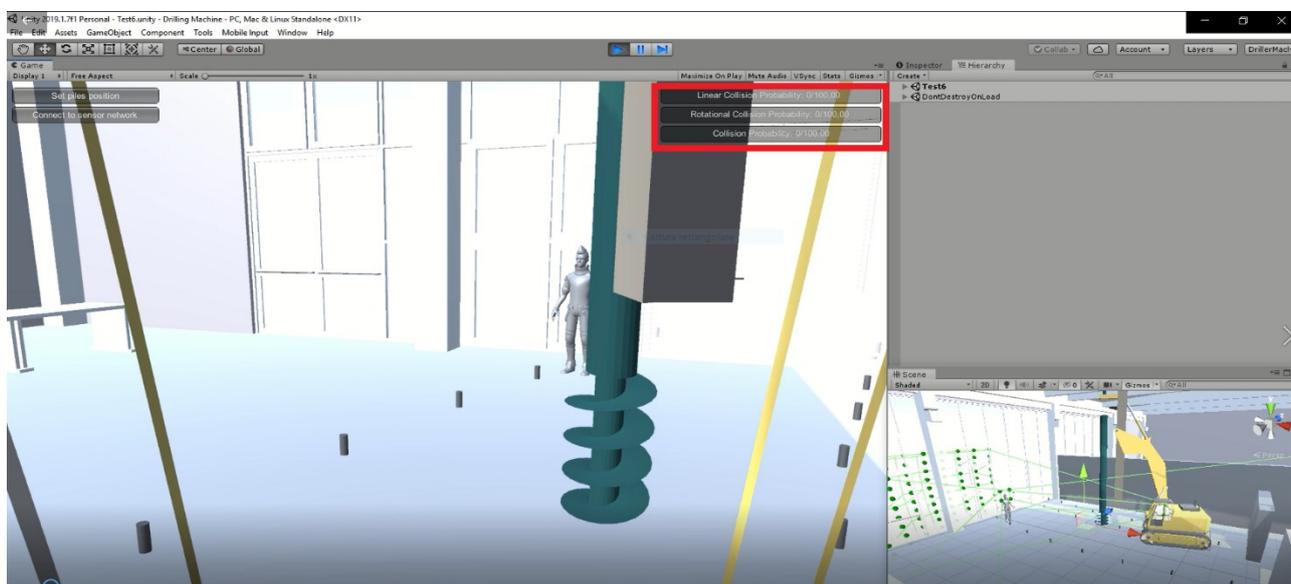


Figura 4.14 – Probabilità impatto lineare 1° palo

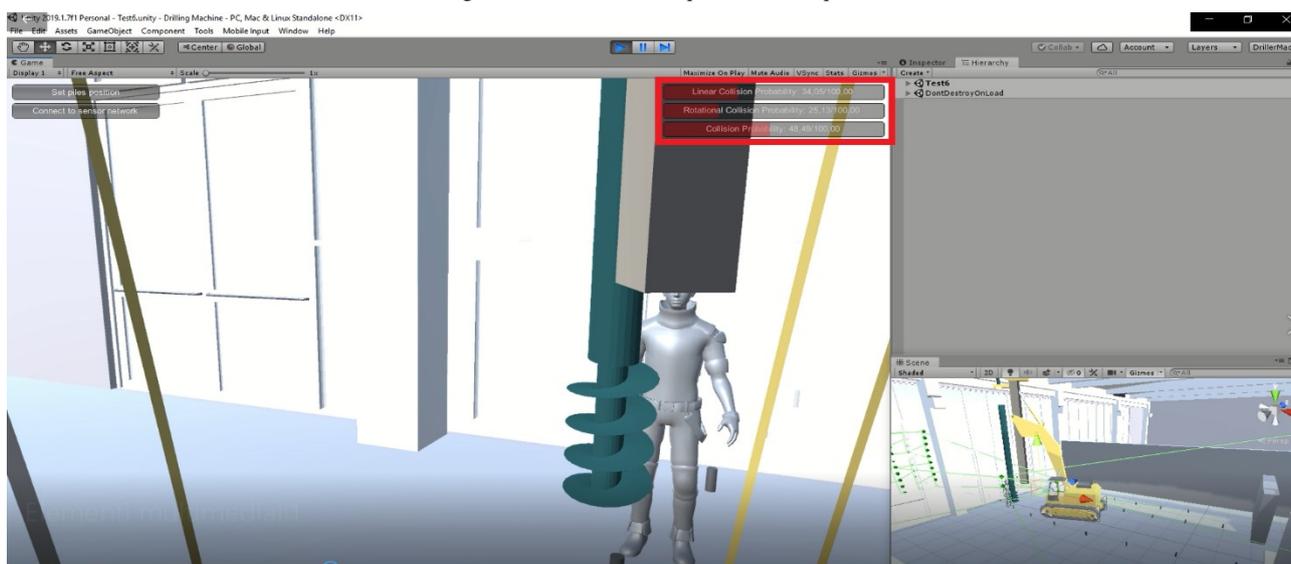


Figura 4.15 – Probabilità impatto lineare 1° palo

2° PALO

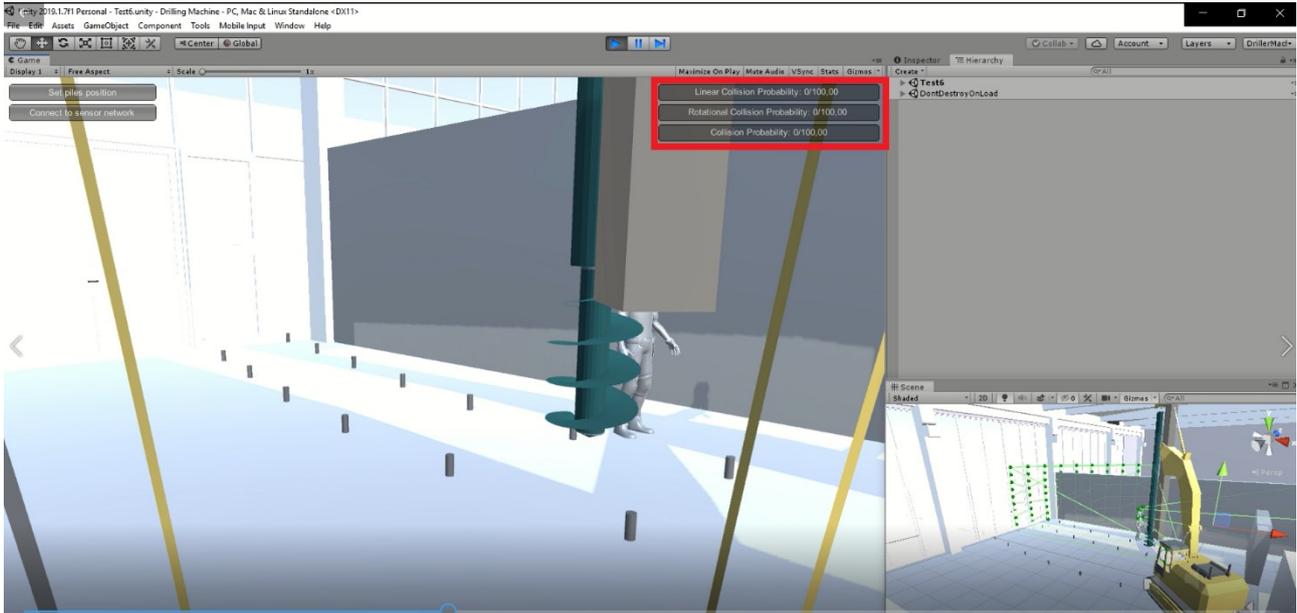


Figura 4.16 – Probabilità impatto lineare 2° palo

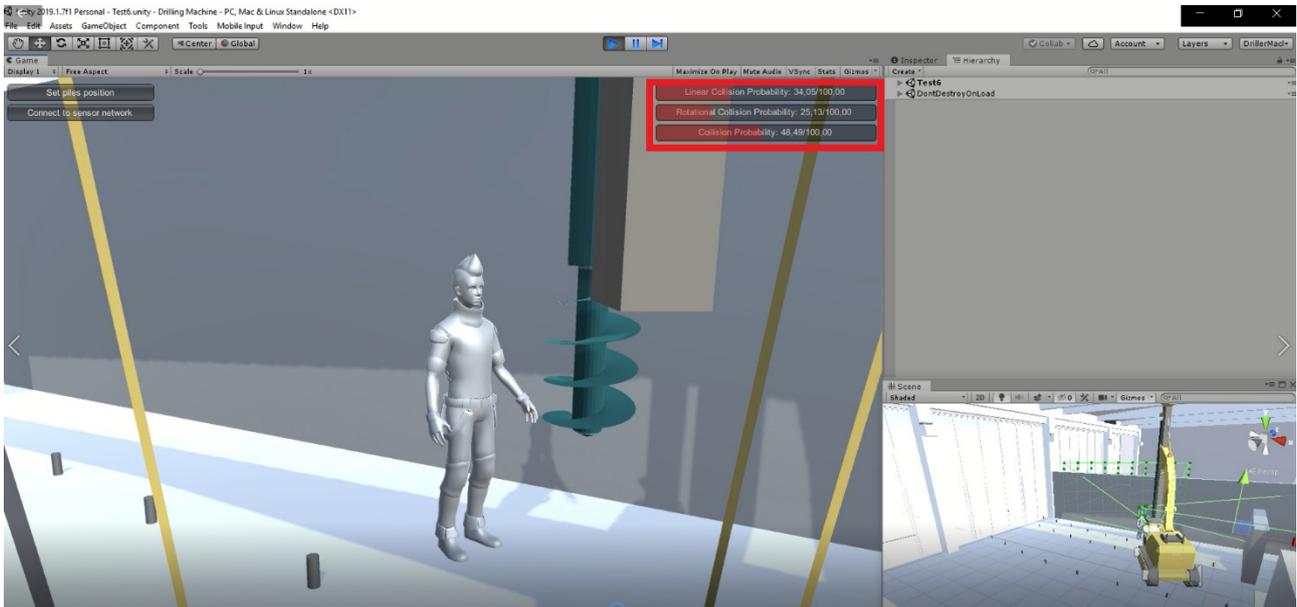


Figura 4.17 – Probabilità impatto lineare 2° palo

3° PALO

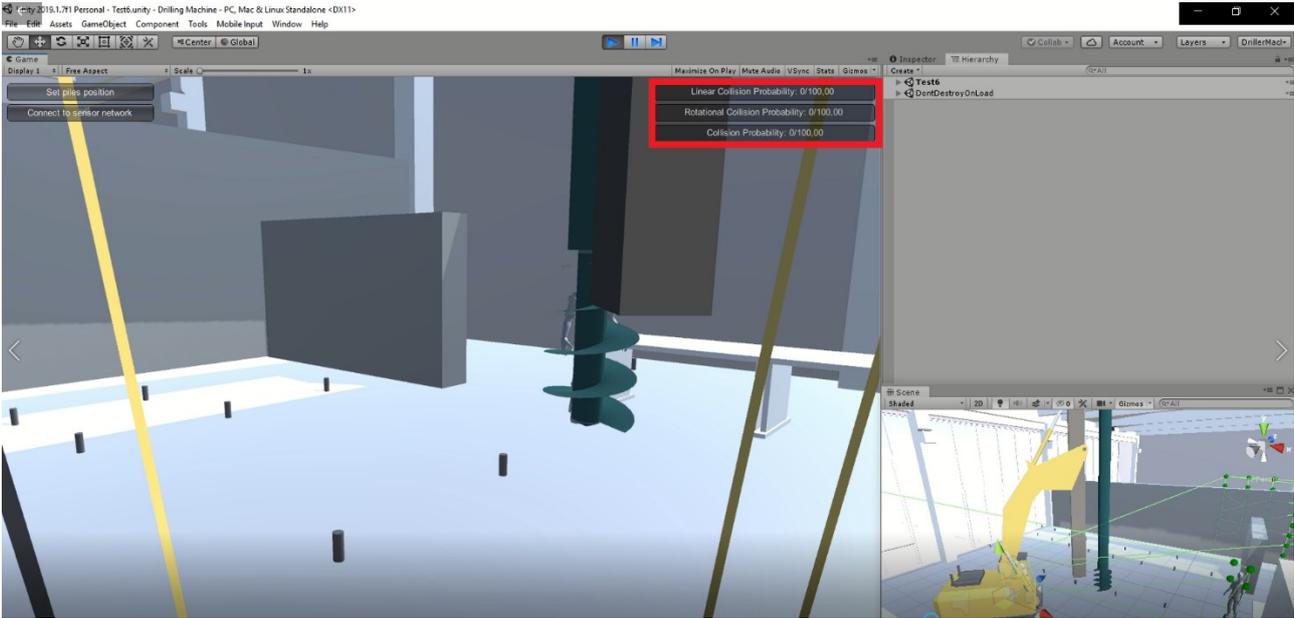


Figura 4.18 – Probabilità impatto lineare 1° palo

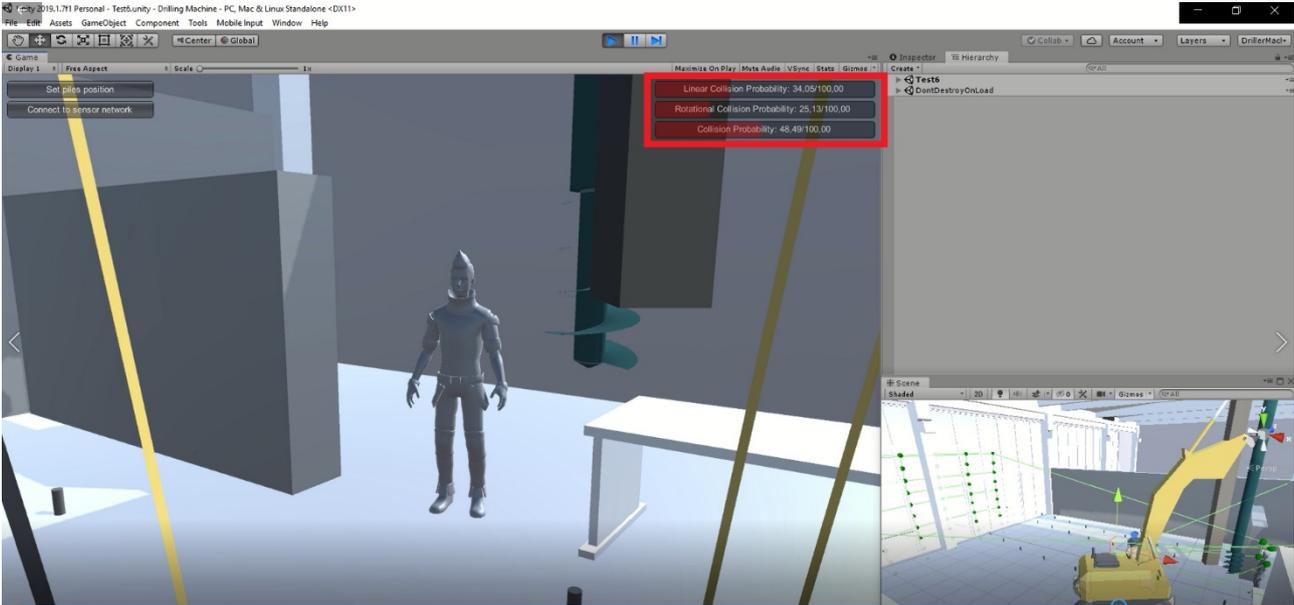


Figura 4.19 – Probabilità impatto lineare 1° palo

CASO: entrambi non sono vigili della posizione dell'altro

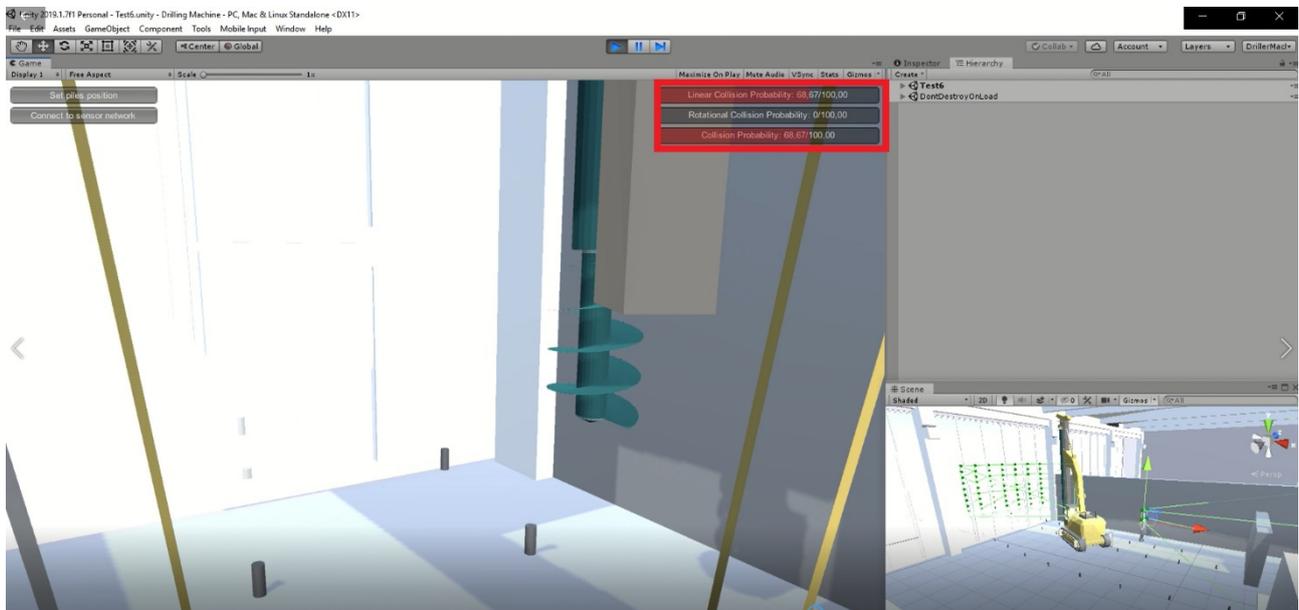


Figura 4.20 – Probabilità impatto lineare

CASO: driller vigile della posizione dell'operatore

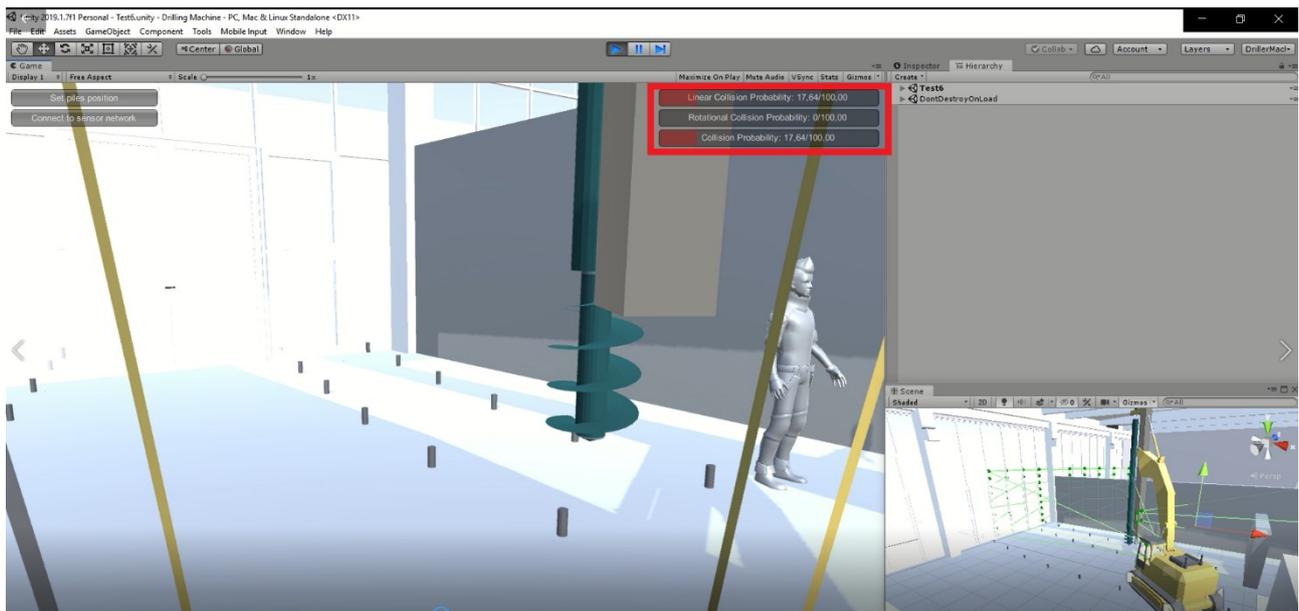


Figura 4.21 – Probabilità impatto lineare

4.2.2 Simulazioni delle probabilità d'impatto rotazionale

CASO: driller vigile della posizione dell'operatore

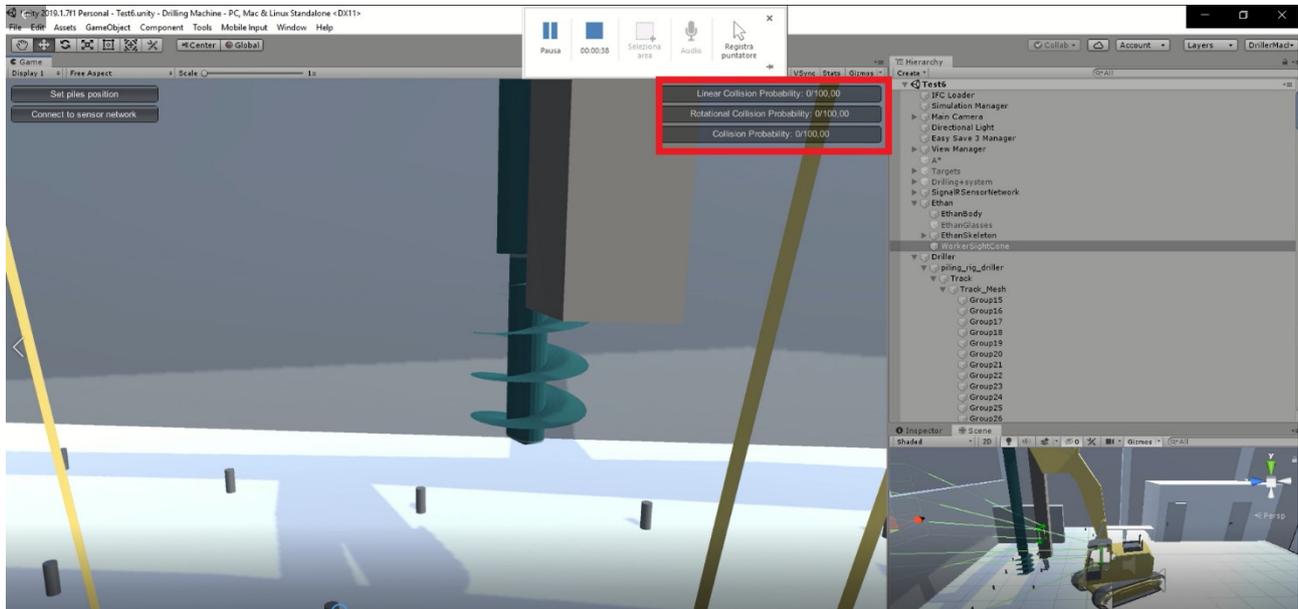


Figura 4.22 – Probabilità impatto rotazionale

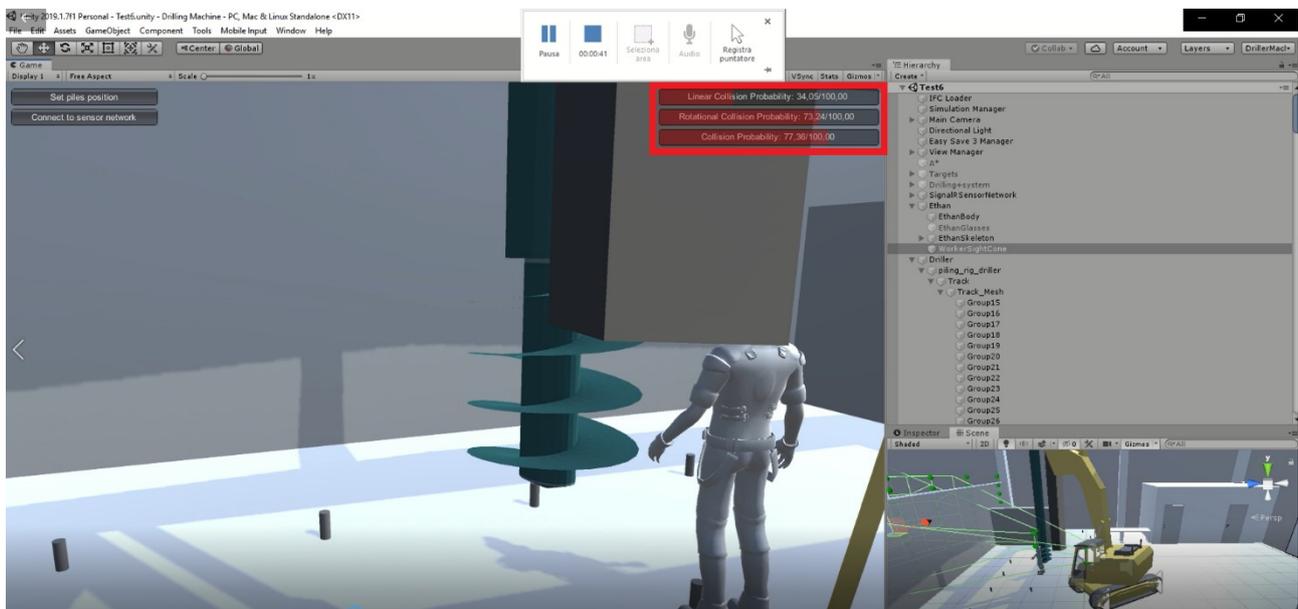


Figura 4.22 – Probabilità impatto rotazionale

CASO: entrambi non sono vigili della posizione dell'altro

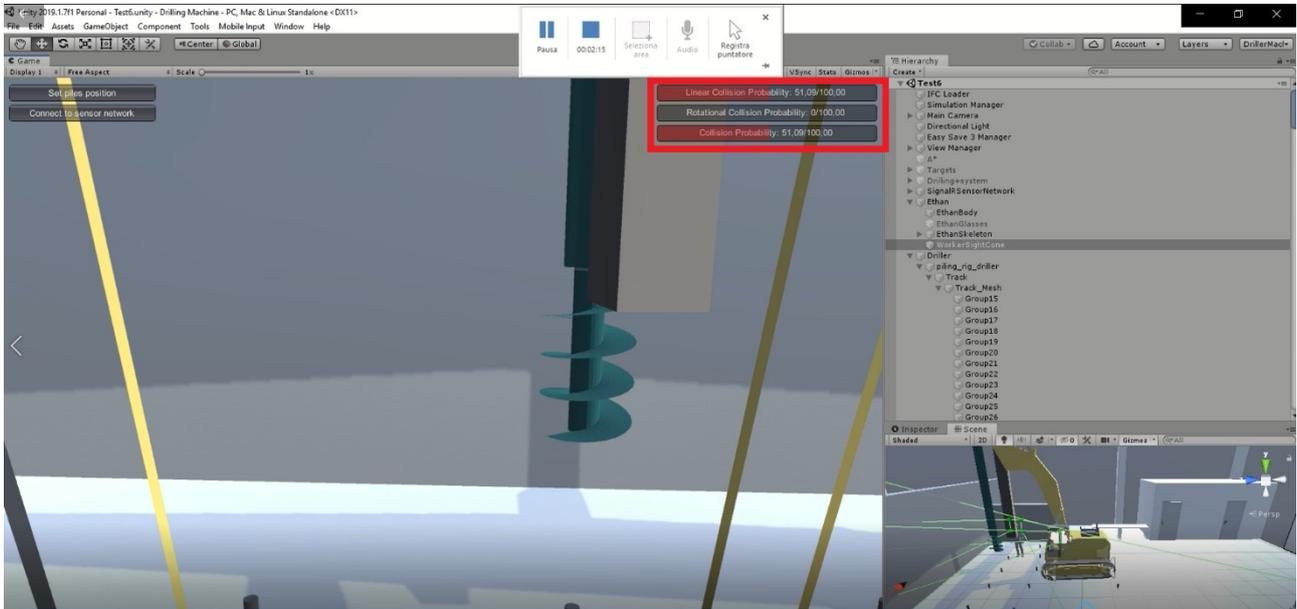


Figura 4.23 – Probabilità impatto rotazionale

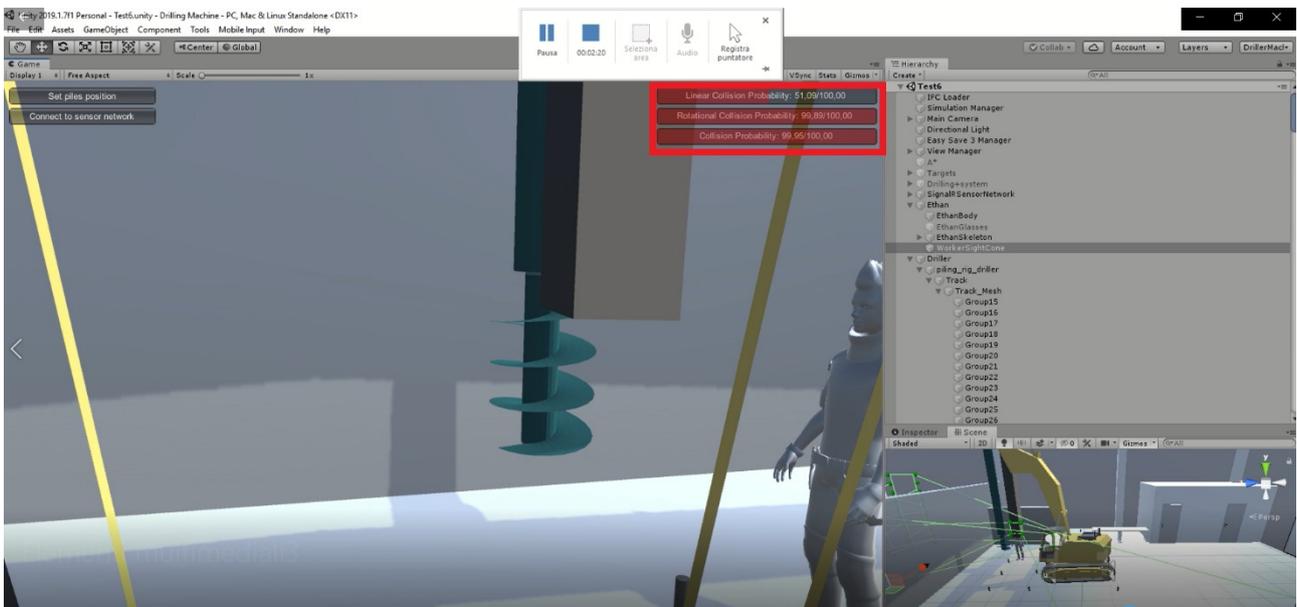


Figura 4.24 – Probabilità impatto rotazionale

4.2 Risultati delle simulazioni

In questo capitolo vengono riportati i risultati delle simulazioni effettuate in modo da valutare il funzionamento della rete nei due casi di rischio precedentemente descritti. Si andranno a confrontare le probabilità d’impatto, lineare e rotazionale, a seconda delle casistiche analizzate affinché possa essere dimostrata la funzionalità della piattaforma per la gestione real-time della sicurezza nei cantieri edili.

▪ Probabilità impatto lineare

Caso: entrambi sono vigili della posizione dell’altro

PALO 1

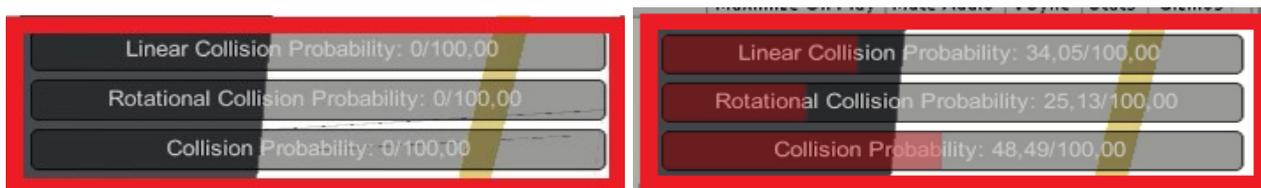


Figura 4.25 – Risultati della probabilità d’impatto lineare

Dalla simulazione effettuata sul primo palo si può notare come la probabilità d’impatto lineare aumenti man mano che il driller si avvicina all’operatore, infatti ad una certa distanza è 0, quando è in fase di avvicinamento aumenta, nel caso analizzato è pari al 34,05%. Tale probabilità non è molto elevata, ciò è dovuto al fatto che entrambi sono vigili della posizione dell’altro. Tale fattore va ad influire sul tempo di reazione di entrambi, il quale diminuisce, riducendo di conseguenza la probabilità d’impatto.

PALO 2



Figura 4.26 – Risultati della probabilità d’impatto lineare

Dalla simulazione effettuata sul secondo palo si può notare come la probabilità d’impatto lineare aumenti man mano che il driller si avvicina all’operatore, infatti ad una certa distanza è 0, quando è in fase di avvicinamento aumenta, nel caso analizzato è pari al 34,05%, si può notare che la probabilità in questo caso ha lo stesso valore del caso precedente, dato che la distanza tra driller e operatore è la stessa. Tale probabilità non è molto elevata, ciò è dovuto al fatto che entrambi sono vigili della posizione dell’altro. Tale fattore va ad influire sul tempo di reazione di entrambi, il quale diminuisce, riducendo di conseguenza la probabilità d’impatto.

PALO 3



Figura 4.27 – Risultati della probabilità d’impatto lineare

Dalla simulazione effettuata sul terzo palo si può notare come la probabilità d’impatto lineare aumenti man mano che il driller si avvicina all’operatore, infatti ad una certa distanza è 0, quando è in fase di avvicinamento aumenta, nel caso analizzato è pari al 34,05%, si può notare che la probabilità in questo caso ha lo stesso valore dei casi precedenti, dato che la distanza tra driller e operatore è la stessa. Tale probabilità non è molto elevata, ciò è dovuto al fatto che entrambi sono vigili della posizione dell’altro. Tale fattore va ad influire sul tempo di reazione di entrambi, il quale diminuisce, riducendo di conseguenza la probabilità d’impatto.

Caso: entrambi non sono vigili della posizione dell'altro



Figura 4.28 – Risultati della probabilità d’impatto lineare

Nel secondo caso analizzato si può notare come la probabilità d’impatto lineare sia maggiore rispetto a quelle del caso precedente. Ciò è dovuto al nodo visibilità della rete, infatti nel caso in cui entrambi non si vedono, aumenta i tempi di reazione d’impatto e di conseguenza ne aumenta la probabilità.

Caso: driller vigile della posizione dell'operatore



Figura 4.29 – Risultati della probabilità d’impatto lineare

Nel terzo caso analizzato si può notare come la probabilità d’impatto lineare sia inferiore rispetto a quella del caso precedente. Ciò è dovuto al nodo visibilità della rete, infatti nel caso in cui il driller è vigile della presenza dell’operatore, diminuisce il tempo di reazione d’impatto del driller e di conseguenza ne diminuisce la probabilità.

▪ Probabilità impatto rotazionale

Caso: driller vigile della posizione dell'operatore



Figura 4.30 – Risultati della probabilità d’impatto rotazionale

In questo caso si può notare come la probabilità d’impatto rotazionale aumenti man mano che l’angolo tra l’operatore e il braccio meccanico del driller diminuisce. In questo caso la probabilità d’impatto è pari al 73,24%.

Caso: entrambi non sono vigili della posizione dell'altro



Figura 4.31 – Risultati della probabilità d’impatto rotazionale

In questo caso si può notare come la probabilità d’impatto rotazionale sia maggiore del caso precedente, ciò dipende dal nodo visibilità, il quale nel caso in cui entrambi non si vedono, va ad influire sui tempi di reazione aumentandoli con conseguente aumento della probabilità d’impatto. In questo caso la probabilità d’impatto è pari al 99,89%.

CONCLUSIONI

La gestione della sicurezza nei cantieri edili, introdotto nella parte iniziale di questa tesi, risulta essere non di facile risoluzione a causa delle complessità che caratterizzano il settore delle costruzioni. Le informazioni riportate dagli studi del settore e dalle banche dati ci portano a riflettere e a cercare una soluzione, una metodologia o un'architettura dell'intera filiera che possa essere più efficace ed efficiente.

In questa tesi si è proposto lo sviluppo di una piattaforma per il controllo real-time della sicurezza, in modo da ottenere un monitoraggio costante e una decentralizzazione della valutazione del rischio. Tale modello permette una gestione real-time del rischio, decentralizzando le valutazioni e sfruttando l'AI (Artificial intelligence), permettere il coordinamento della sicurezza in tempo reale delle diverse fasi lavorative.

Tale sistema andrebbe a supporto di figure come il Coordinatore della sicurezza in fase di esecuzione, del direttore tecnico di cantiere e di tutte quelle figure che vanno a supporto degli stessi, come ad esempio il preposto.

La decentralizzazione consiste in un flusso di dati e informazioni, che attraverso una rete di sensori e un sistema di comunicazione, arriveranno dal cantiere. Di fatti in questa tesi gli sforzi si sono concentrati sulle funzionalità della rete di sensori, sulla configurazione dell'ambiente virtuale e sullo sviluppo di un modello decisionale tramite la rete bayesiana.

Nell'ambiente reale sono state effettuate simulazione per la verifica dell'accuratezza della localizzazione della rete di sensori, mentre nell'ambiente virtuale sono state effettuate simulazioni di un caso studio relativo ad una fase lavorativa all'interno di un cantiere. Queste simulazioni ci hanno confermato che la base di lavoro è solida, che la metodologia e l'architettura è strutturata, e che può essere implementata con l'obiettivo di creare un data base di valutatori di rischio che non sia specifico della singola lavorazione presa in esame, ma bensì che sia applicabile all'intero processo costruttivo. Si è quindi definito un metodo capace di garantire una gestione della sicurezza proattiva.

In conclusione il passo successivo, consiste nell'implementare la piattaforma e quindi individuare tutte le strumentazioni di rilevazione da applicare su tutti i soggetti che partecipano ad una fase lavorativa, analizzandone l'influenza che hanno su ogni fase operativa del processo costruttivo rispetto ad un altro e sulla rete decisionale, in modo da poter migliorare le valutazioni al fine di una maggiore gestione della sicurezza nei cantieri edili.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M.N. Vinodkumar, M. Bhasi / *Accident Analysis and Prevention* 42 (2010) 2082–2093 “Safety management practices and safety behaviour: Assessing the mediating role of safety knowledge and motivation”
- [2] Jochen Teizer, Ben S. Allread , Clare E. Fullerton , Jimmie Hinze; *Automation in Construction* 19 (2010) 630–640 “Autonomous pro-active real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system”
- [3] Bhargav Dave, Sylvain Kubler, Kary Främling, Lauri Koskela; *Automation in Construction* 61 (2016) 86–97 “Opportunities for enhanced lean construction management using Internet of Things standards”
- [4] M. De Grassi, B. Naticchia, A. Giretti, A. Carbonari, *Reti Bayesiane con applicazioni all’edilizia e alla gestione del territorio*, 2008.
- [5] Cristiana Bartolomei, Samuela Felicioni, Daniele Ganapini (nuovaquasco), progetto s&cante, stima dei costi della non sicurezza nel settore delle costruzioni, analisi dei dati e della letteratura nel panorama italiano e estero, aprile 2013
- [6] Marco Regis, November 17, 2016, *Introduzione alla statistica bayesiana*, Università degli studi di Torino e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare via P. Giuria 1, I-10125, Torino, Italy
- Dati INAIL, ANDAMENTO DEGLI INFORTUNI SUL LAVORO, edilizia e costruzioni in grigio, settembre 2017
- <https://unity3d.com>
- Unity User Manual (2018.2 beta)
- <https://nodered.org/>
- <https://www.decawave.com/>
- <http://mqtt.org/>
- <https://www.arangodb.com/>
- <https://visualstudio.microsoft.com/>

