

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laura Magistrale

Studio degli effetti del distanziamento sociale mediante modelli di simulazione ad eventi discreti



Relatori:

Dott.ssa Giulia Bruno

Prof. Franco Lombardi

Ing. Alberto Faveto

Candidato:

Alessandro Peripoli 265023

Anno Accademico 2020/2021

Sommario

1	Stato dell'Arte.....	1
1.1	Contesto.....	1
1.1.1	Modalità di contagio	2
1.1.2	Efficacia dei provvedimenti	2
1.1.3	Rischio di contagio negli ambienti chiusi: esempi concreti.....	4
1.1.4	Soluzioni esplorate per monitorare il distanziamento	5
1.2	La simulazione ad eventi discreti.....	7
1.2.1	Simulazione: generalità	7
1.2.2	Simulazione ad eventi discreti.....	8
1.2.3	Costruzione di un modello di simulazione	10
1.2.4	Analisi degli input	12
1.2.5	Verifica e validazione del modello	13
1.2.6	Analisi degli output	14
1.3	Strumenti statistici per l'analisi degli output.....	15
1.3.1	Statistica descrittiva e inferenza statistica	15
1.3.2	Il teorema del limite centrale.....	16
1.3.3	Test t di Student per il confronto di medie campionarie	18
1.3.4	D di Cohen come stima dell'effect size	20
1.3.5	Regressione lineare	21
1.4	Utilizzo della simulazione per stimare il rischio di contagio e per valutare gli effetti del distanziamento fisico.....	21
1.4.1	Airbone Infection Risk Calculator (AIRC)	21
1.4.2	Valutazione degli effetti dei provvedimenti di distanziamento	23
1.4.3	Utilizzo della simulazione ad eventi discreti per analizzare il rispetto del distanziamento interpersonale in ambiente universitario.....	24
2	Modello	26
2.1	Inquadramento del problema e definizione degli obiettivi.....	26
2.2	Raccolta dati sul sistema reale	27
2.3	Realizzazione del modello in FlexSim.....	30
2.3.1	Creazione dell'ambiente di simulazione 3D	30

2.3.2	Process Flow della lezione completa.....	31
2.3.3	Lezione in aula.....	35
2.3.4	Intervallo	41
2.3.5	Personale di passaggio nel corridoio.....	43
2.4	<i>Studio di prossimità</i>	<i>45</i>
2.4.1	Modulo Agent System.....	45
2.4.2	Definizione degli Agent	47
2.5	<i>Come raccogliere i dati dal modello</i>	<i>49</i>
2.5.1	Statistic Collector	49
2.5.2	Calculated Table	51
2.6	<i>Verifica e validazione del modello</i>	<i>53</i>
3	Analisi del modello	55
3.1	<i>Premesse.....</i>	<i>55</i>
3.1.1	Indicatori di rischio.....	55
3.1.2	Campioni di dati	56
3.1.3	Codice Matlab per l'elaborazione dei dati e la raccolta dei campioni	57
3.2	<i>Risultati del modello per raggio di prossimità di 1 metro.....</i>	<i>58</i>
3.2.1	Analisi per categoria di agenti	58
3.2.2	Distribuzioni campionarie	64
3.2.3	Contatti tra soli studenti	68
3.3	<i>Risultati del modello per raggio di prossimità di 2 metri.....</i>	<i>69</i>
4	Campagna sperimentale	71
4.1	<i>Pianificazione.....</i>	<i>71</i>
4.1.1	Test parametrici per confrontare gli indicatori di rischio ricavati da scenari diversi	71
4.2	<i>Incidenza delle macchinette del caffè nel corridoio.....</i>	<i>73</i>
4.2.1	Analisi dello scenario.....	73
4.2.2	Effetto della presenza delle macchinette del caffè sugli indicatori	73
4.3	<i>Scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico.....</i>	<i>75</i>
4.3.1	Analisi dello scenario per raggio di prossimità pari a 1 metro	75

4.3.2	Analisi dello scenario per raggio di prossimità pari a 2 metri	79
4.4	<i>Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro</i>	<i>82</i>
4.4.1	Criterio di studio.....	82
4.4.2	Regolamentazione delle uscite dall'aula	83
4.4.3	Utilizzo alternato di sedie nel corridoio e lavandini	85
4.4.4	Code distanziate	87
4.4.5	Fase di registrazione.....	89
4.4.6	Fase di registrazione con obbligo di mantenimento della distanza di sicurezza durante la coda d'attesa	91
4.4.7	Riduzione del numero di studenti in aula	93
4.4.8	Dimezzamento degli studenti e obbligo di sedersi a banchi alternati	95
4.4.9	Incidenza di tutti i provvedimenti	97
4.5	<i>Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto dei 2 metri</i>	<i>98</i>
4.5.1	Nessun provvedimento di distanziamento: contatti tra soli studenti.....	98
4.5.2	Dimezzamento degli studenti e obbligo di sedute alternate	99
4.5.3	Efficacia degli altri provvedimenti.....	101
4.6	<i>Incidenza del numero di studenti.....</i>	<i>103</i>
5	Conclusioni	106
5.1	<i>Riepilogo dei risultati.....</i>	<i>106</i>
5.1.1	Rischio di contagio nell'ambiente in cui non sono applicati i provvedimenti di distanziamento.....	110
5.1.2	Efficacia dei singoli provvedimenti.....	112
5.2	<i>Limiti del modello e possibili sviluppi.....</i>	<i>115</i>
6	Appendice.....	117
6.1	<i>Codice Matlab.....</i>	<i>117</i>
7	Bibliografia e Sitografia.....	124

Indice delle Figure

Figura 1.1: Rischio di trasmissione del virus SARS-CoV-2 in diversi contesti e per vari tempi di occupazione [10].	4
Figura 1.2: Intervalli di fiducia [27].	17
Figura 1.3: Valutazione dell'effetto sulla base del valore della D di Cohen [28][29].	20
Figura 2.1: Planimetria dell'intero piano in cui è situato il laboratorio LEP.	28
Figura 2.2: Disposizione dei banchi nell'aula.	28
Figura 2.3: Layout del laboratorio LEP ricostruito in ambiente FlexSim.	31
Figura 2.4: Arrivals.	32
Figura 2.5: Process flow dell'intera lezione di laboratorio.	33
Figura 2.6: Logica pull-push per sincronizzare i token (process flow separato).	34
Figura 2.7: Process flow completo della lezione in aula.	36
Figura 2.8: Ramo relativo all'attività "rivolgere una domanda all'assistente".	36
Figura 2.9: Ramo relativo all'attività "andare ai servizi".	37
Figura 2.10: Ramo principale.	38
Figura 2.11: Configurazione del blocchetto Release Token Bathroom.	39
Figura 2.12: Configurazione del blocchetto Release token Question.	40
Figura 2.13: Process flow completo dell'intervallo.	41
Figura 2.14: Attività svolte durante l'intervallo.	42
Figura 2.15: Configurazione blocchetto Decide.	43
Figura 2.16: Process Flow completo relativo al personale di passaggio nel corridoio.	43
Figura 2.17: Configurazione blocchetto Create Patient.	44
Figura 2.18: Attività svolte dal personale di passaggio nel corridoio.	44
Figura 2.19: Ingombro e raggio di prossimità di un Agent.	45
Figura 2.20: Configurazione delle proprietà del Proximity Agent System.	45
Figura 2.21: Gli agenti coinvolti in un contatto sono colorati di rosso.	46
Figura 2.22: Configurazione proprietà HeatMap.	47
Figura 2.23: Simulazione in stadio avanzato. In rosso i luoghi dove il contatto è avvenuto frequentemente.	47
Figura 2.24: Creazione agente e attivazione del comportamento.	48
Figura 2.25: Quando gli studenti sono in bagno il Proximity Agent System viene sospeso.	49
Figura 2.26: Sezione Event dello Statistic Collector.	50
Figura 2.27: Sezione Columns dello Statistic collector.	50
Figura 2.28: Tabella di output dello Statistic Collector.	51

Figura 2.29: Calculated Table.....	52
Figura 2.30: Diagrammi realizzati con FlexSim.	52
Figura 3.1: Diagramma a barre dell'indicatore "Tempo totale a contatto" per ciascun agente della simulazione.....	59
Figura 3.2: Diagramma a barre dell'indicatore "Numero di contatti ravvicinati" per ciascun agente della simulazione.....	59
Figura 3.3: Diagramma a barre dell'indicatore "Durata media contatto" per ciascun agente della simulazione. Ogni valore medio è affiancato dalla relativa deviazione standard.	60
Figura 3.4: Diagramma a barre dell'indicatore "Numero agenti per t=80%" per ciascun agente della simulazione.....	61
Figura 3.5: Diagramma a barre dell'indicatore "Tempo di contatto per coppia" per ciascun agente della simulazione.....	61
Figura 3.6: Diagrammi a barre relativi agli indicatori di rischio per ciascuna categoria.	63
Figura 3.7: Tempo totale a contatto considerando tutti gli agenti: box-plot, istogramma di frequenza, test di normalità.	65
Figura 3.8: Numero di contatti ravvicinati considerando tutti gli agenti: box-plot, istogramma di frequenza, test di normalità.	65
Figura 3.9: Numero agenti per t = 80% considerando tutti gli agenti: box-plot, istogramma di frequenza, test di normalità.	66
Figura 3.10: Tempo di contatto per coppia considerando tutti gli agenti: box-plot, istogramma di frequenza, test di normalità.	67
Figura 3.11: Diagrammi a barre relativi agli indicatori di rischio per ciascuna categoria.	70
Figura 4.1: Effetto della presenza delle macchinette del caffè sugli indicatori di rischio relativamente ai contatti al di sotto di 1 metro di distanza.....	74
Figura 4.2: Diagrammi a barre relativi agli indicatori di rischio per ciascuna categoria.	76
Figura 4.3: Efficacia dei provvedimenti di distanziamento sui vari indicatori di rischio.	78
Figura 4.4: Diagrammi a barre relativi agli indicatori di rischio per ciascuna categoria.	80
Figura 4.5: Efficacia dei provvedimenti di distanziamento sui vari indicatori di rischio relativamente ai contatti al di sotto dei 2 metri e limitatamente alla categoria degli studenti.....	81
Figura 4.6: Efficacia del provvedimento "regolamentazione delle uscite" sui vari indicatori di rischio.	84
Figura 4.7: Efficacia del provvedimento "sedie nel corridoio e lavandini alternati" sui vari indicatori di rischio.	86
Figura 4.8: Efficacia del provvedimento "code distanziate" sui vari indicatori di rischio.	88
Figura 4.9: Efficacia del provvedimento "registrazione iniziale" sui vari indicatori di rischio.	90

Figura 4.10: Efficacia del provvedimento "registrazione con coda distanziata" sui vari indicatori di rischio.	92
Figura 4.11: Efficacia del provvedimento "riduzione del numero di studenti" sui vari indicatori di rischio.	94
Figura 4.12: Efficacia del provvedimento "banchi alternati" sui vari indicatori di rischio.	96
Figura 4.13: Efficacia di tutti i provvedimenti di distanziamento sugli indicatori di rischio.	98
Figura 4.14: Efficacia del provvedimento "ridurre il numero di studenti e usare banchi alternati" sui vari indicatori di rischio per raggio di prossimità pari a 2 metri.	100
Figura 4.15: Efficacia dei provvedimenti di distanziamento sugli indicatori di rischio relativamente ai contatti al di sotto dei 2 metri.	102
Figura 4.16: Rette di regressione che esprimono l'andamento degli indicatori di rischio al variare del numero di studenti fino a un massimo di 40.	104
Figura 4.17: Rette di regressione che esprimono l'andamento degli indicatori di rischio quando il numero di studenti varia tra 40 e 80.	105
Figura 5.1: Diagrammi a barre degli indicatori di rischio per ciascuna categoria e per entrambi i raggi di prossimità analizzati.	108
Figura 5.2: Efficacia dei provvedimenti di distanziamento nei confronti dei contatti al di sotto di 1 metro.	111
Figura 5.3: Efficacia dei provvedimenti di distanziamento nei confronti dei contatti al di sotto di 2 metri.	111
Figura 5.4: Diagrammi a barre che esprimono come variano gli indicatori di rischio in seguito all'applicazione dei singoli provvedimenti di distanziamento.	114

Indice delle Tabelle

Tabella 2.1: Distribuzioni di probabilità che modellano le durate delle attività e relativi parametri. ...29	29
Tabella 2.2: Distribuzioni di probabilità che modellano il tempo che intercorre tra eventi indipendenti.30	30
Tabella 3.1: Indicatori di rischio per categoria calcolati come media degli indicatori per ogni singolo agente. Gli indici fanno riferimento a un raggio di prossimità di 1 metro.62	62
Tabella 3.2: Tempo totale a contatto; parametri delle distribuzioni normali relative alle varie categorie.64	64
Tabella 3.3: Numero di contatti ravvicinati; parametri delle distribuzioni normali relative alle varie categorie.65	65
Tabella 3.4: Numero agenti per $t = 80\%$, parametri delle distribuzioni normali relative alle varie categorie.66	66
Tabella 3.5: Tempo di contatto per coppia; parametri delle distribuzioni normali relative alle varie categorie.66	66
Tabella 3.6: Numero di coppie coinvolte in contatti prolungati al di sotto di un metro di distanza; parametri delle distribuzioni normali.67	67
Tabella 3.7: Modello in cui vengono considerati solo i contatti tra gli studenti; parametri delle distribuzioni normali degli indicatori di rischio.68	68
Tabella 3.8: Indicatori di rischio per categoria calcolati come media degli indicatori per ogni singolo agente e per un raggio di prossimità di 2 metri.69	69
Tabella 3.9: Numero di coppie coinvolte in contatti prolungati al di sotto di 2 metri di distanza; parametri delle distribuzioni normali.70	70
Tabella 4.1: Scenario dove non sono presenti le macchinette del caffè nel corridoio; parametri delle distribuzioni normali. Gli indicatori fanno riferimento al caso che considera tutti gli agenti della simulazione e un raggio di prossimità di 1 metro.73	73
Tabella 4.2: Test parametrici di confronto tra lo scenario in cui non sono presenti macchinette del caffè e lo scenario in cui sono invece presenti.74	74
Tabella 4.3: Indicatori di rischio per categoria nello scenario in cui non sono applicati i provvedimenti di distanziamento fisico e che considera un raggio di prossimità di 1 metro.76	76
Tabella 4.4: Scenario dove non sono applicati provvedimenti di distanziamento; parametri delle distribuzioni normali. Gli indicatori fanno riferimento al caso che considera tutti gli agenti della simulazione.77	77

Tabella 4.5: Test parametrici per il confronto dello scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento con lo scenario in cui sono previsti. Si sono considerati gli indicatori relativi a tutti gli agenti della simulazione.	78
Tabella 4.6: Indicatori di rischio per categoria nello scenario in cui non sono applicate i provvedimenti di distanziamento fisico e che considera un raggio di prossimità di 2 metri.....	79
Tabella 4.7: Numero di coppie che si mantengono al di sotto dei 2 metri di distanza per oltre 15 minuti nello scenario in cui non vengono applicati provvedimenti di distanziamento.	80
Tabella 4.8: Confronto dello scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento con lo scenario in cui sono previsti, relativamente alla sola categoria degli studenti e raggio di 2 metri.....	81
Tabella 4.9: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario dove non sono applicati provvedimenti di distanziamento e che considera soltanto i contatti tra gli studenti.....	83
Tabella 4.10: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come unica misura anti-contagio la regolamentazione delle uscite.	83
Tabella 4.11: Test parametrico per valutare l'efficacia di regolamentare la fase di uscita dall'aula....	84
Tabella 4.12: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come unica misura anti-contagio l'utilizzo alternato di sedie nel corridoio e lavandini.	85
Tabella 4.13: Test parametrico per valutare l'efficacia di utilizzare in modo alternato le sedie nel corridoio e i lavandini.	86
Tabella 4.14: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come unica misura anti-contagio l'obbligo di mantenimento della distanza durante le code d'attesa.....	87
Tabella 4.15: Test parametrico per valutare l'efficacia dell'obbligo di mantenere il distanziamento nelle code d'attesa.	88
Tabella 4.16: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come unica misura anti-contagio la fase di registrazione all'inizio della lezione.	89
Tabella 4.17: Test parametrico per valutare l'efficacia del provvedimento che introduce la fase di registrazione all'inizio della lezione.....	90
Tabella 4.18: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come misura anti-contagio la fase di registrazione all'inizio della lezione con l'obbligo di mantenimento della distanza di sicurezza durante la coda d'attesa.	91
Tabella 4.19: Test parametrico per valutare l'efficacia del provvedimento che introduce la fase di registrazione all'inizio della lezione con l'obbligo di mantenimento della distanza di sicurezza durante l'attesa.....	92
Tabella 4.20: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come unica misura anti-contagio il dimezzamento degli studenti in aula.	93

Tabella 4.21: Test parametrico per valutare l'efficacia del provvedimento di dimezzare gli studenti all'interno dell'aula.....	94
Tabella 4.22: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui sono applicate come misure anti-contagio il dimezzamento degli studenti nell'aula e l'obbligo di sedersi a banchi alterni.....	95
Tabella 4.23: Test parametrico per valutare l'efficacia del provvedimento di disporre gli studenti in banchi alternati.	96
Tabella 4.24: Test parametrico per valutare l'efficacia di tutti i provvedimenti di distanziamento combinati nello scenario in cui vengono considerati i soli contatti tra studenti.....	97
Tabella 4.25: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui non è applicata nessuna misura di prevenzione, e che considera i soli contatti tra studenti e un raggio di prossimità di 2 metri.	99
Tabella 4.26: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui sono applicate come misure anti-contagio il dimezzamento degli studenti nell'aula e l'obbligo di sedersi a banchi alternati.	99
Tabella 4.27: Test parametrico per valutare l'efficacia di ridurre gli studenti e disporli a banchi alternati relativamente ai contatti al di sotto dei 2 metri.....	100
Tabella 4.28: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui sono applicati tutti i provvedimenti di distanziamento e che considera solo i contatti tra studenti e un raggio di prossimità di 2 metri.	101
Tabella 4.29: Test parametrico per valutare l'efficacia dei provvedimenti di distanziamento relativamente ai contatti entro i 2 metri.....	102
Tabella 5.1: Riepilogo degli indicatori di rischio per ciascuna categoria di agenti e considerando un raggio di prossimità di 1 e 2 metri.....	108
Tabella 5.2: Riepilogo degli indicatori di rischio per ciascuna categoria di agenti e considerando un raggio di prossimità di 1 e 2 metri nel modello nel quale sono sospesi i provvedimenti di distanziamento fisico.	110
Tabella 5.3: Efficacia dei singoli provvedimenti relativamente ai contatti al di sotto di un metro. Il modello di riferimento considera i soli contatti tra gli studenti.....	113

Abstract

A più di un anno di distanza dal primo caso in Italia di SARS-CoV-2 il distanziamento fisico è entrato a far parte della quotidianità di ogni cittadino. La domanda che spesso ci si pone è quale sia il rischio di contagiarsi all'interno di un ambiente chiuso, e quanto siano efficaci i provvedimenti di natura non farmacologica: utilizzare un modello di simulazione ad eventi discreti è un valido strumento per rispondere a queste domande.

Il lavoro di tesi mira a valutare gli effetti del distanziamento fisico in un ambiente universitario, in particolare un laboratorio del Politecnico di Torino.

Dopo aver svolto un'analisi preliminare del sistema reale e aver formulato le opportune ipotesi, si è passati all'implementazione del modello di simulazione. Questo è stato sviluppato utilizzando il software FlexSim, sfruttando l'ambiente *Health Care* e lo strumento del *Process Flow*.

Come primo passo si è riprodotto l'ambiente del laboratorio, dopodiché si è associata ad esso una logica di controllo per descrivere lo svolgimento di una lezione, prestando particolare attenzione ad includere tutti i provvedimenti necessari ad evitare i contatti troppo ravvicinati tra gli studenti. Non ci si è limitati ad analizzare la sola lezione frontale in aula, ma si è incluso nello studio anche l'intervallo e la presenza di altro personale di passaggio nel corridoio del piano dove è situato il laboratorio.

Attraverso il modulo *Agent System* è stato poi introdotto un raggio di prossimità, grazie al quale è stato possibile monitorare i contatti a distanza ravvicinata, individuando l'istante della simulazione in cui la distanza di sicurezza viene violata.

I dati raccolti da numerose replicazioni del modello sono stati rielaborati con l'intento di individuare degli indicatori che permettano di valutare in quale misura il distanziamento fisico viene realmente rispettato, e che consentano di quantificare il pericolo rappresentato da un soggetto infetto all'interno dell'aula. I valori degli indicatori che si sono ottenuti raffigurano un ambiente nel quale i contatti ravvicinati sono molto limitati; pertanto le misure di distanziamento fisico rendono il laboratorio un ambiente a basso rischio di contagio.

L'analisi è proseguita effettuando un confronto dei risultati ottenuti con quelli ricavati da uno scenario dove non sono previsti provvedimenti di distanziamento; questo ha permesso di comprendere la reale efficacia delle misure introdotte. Le stesse misure sono state analizzate nel dettaglio anche singolarmente, dedicando una particolare attenzione al numero di studenti che occupano l'aula.

Il lavoro svolto è servito per illustrare come la simulazione ad eventi discreti possa essere un utile strumento per lo studio del distanziamento sociale. Non è stato possibile validare empiricamente le ipotesi alla base del modello, pertanto i risultati estrapolati sono solo indicativi del sistema reale, ma comunque significativi per stimare il rischio di contagio all'interno di un ambiente universitario.

Capitolo 1

Stato dell'Arte

1.1 Contesto

Dopo più di un anno di convivenza con il virus SARS-CoV-2, la popolazione ha ormai preso familiarità con le manovre di prevenzione non farmacologica introdotte dal governo al fine di limitare il contagio. Il virus presenta una letalità elevata per le fasce più anziane della popolazione (mortalità del 10,23% nel gruppo di età compreso tra i 60-69 anni, e che sale fino al 19,03% per la fascia 80-89) [1], dunque in un paese come l'Italia, dove il numero di over 65 raggiunge quasi i 14 milioni di persone [2], il rispetto di tali misure è di importanza fondamentale.

La tematica è particolarmente attuale, e destinata a rimanere tale ancora a lungo: un'analisi condotta dai ricercatori di Harvard e pubblicata su *Science* poco dopo l'inizio della pandemia, prevede che le misure di distanziamento fisico potrebbero protrarsi in forma intermittente fino al 2022 [3]. L'analisi da loro condotta presenta numerose incertezze, molte delle quali giustificate dalla natura precoce delle simulazioni e previsioni svolte, e dai limiti autoimposti al fine di semplificare il modello di studio: in particolare l'efficacia del vaccino e l'incidenza dell'immunità contratta dopo essere guariti dal virus sono incognite ancora inesplorate e tutte da verificare. In tutte le simulazioni svolte viene però evidenziato il beneficio comportato dai provvedimenti di natura non farmacologica, ovvero un appiattimento della curva dei contagi: il picco viene allontanato nel tempo, ma notevolmente ridimensionato. La diffusione del contagio viene quindi contenuta evitando il collasso delle strutture ospedaliere.

Le prime misure di contenimento introdotte prevedevano: isolamento personale, tracciamento dei contatti tramite applicazioni appositamente sviluppate, quarantene mirate, restrizioni sui viaggi, chiusura di scuole, università e luoghi di aggregazione, cancellazione di ogni sorta di evento. Sono misure drastiche, ma ritenute inevitabili, anche a costo dei molti sacrifici che queste comportano.

Dopo un primo momento in cui queste misure sono state applicate in modo rigido e senza eccezione, è seguita una fase di riapertura, nella quale la vita ha ripreso in modo più regolare, ma non senza l'impiego di nuovi provvedimenti ai quali tutti i cittadini si sono lentamente (e faticosamente) abituati; l'utilizzo delle mascherina è ormai abitudine giornaliera, così come il distanziamento interpersonale nei luoghi pubblici, gli ingressi scaglionati negli ambienti chiusi, i posti limitati nei

mezzi di trasporto. E così, per rimanere al passo con le norme in costante aggiornamento, ogni attività ha cominciato a riorganizzarsi prendendo i necessari provvedimenti.

1.1.1 Modalità di contagio

Capire le modalità di diffusione del virus è fondamentale in via preliminare per capire le forme di prevenzione più adeguate ad evitare il contagio.

Innanzitutto, è necessario distinguere i droplet dall'aerosol. Con il primo termine ci si riferisce alle particelle più pesanti che possono raggiungere l'interlocutore a breve distanza. Con aerosol si intendono invece le particelle di dimensioni più piccole e che rimangono sospese in aria più a lungo. Le modalità di contagio riconosciute dagli organi di sanità si possono ricondurre a due modalità: nel primo caso il contagio avviene tramite le goccioline di saliva emesse dai soggetti infetti che si depositano negli occhi, bocca o naso degli interlocutori; in alternativa il contagio può avvenire tramite la respirazione di aerosol infetto espirato da una persona positiva e che rimane sospeso nell'ambiente quando questo non viene ventilato.

Particolari condizioni poi acuiscono il rischio: urlare o cantare ad esempio aumenta di 50 volte la produzione di particelle emesse, e se la loro concentrazione nell'ambiente chiuso si fa rilevante, il contagio diventa molto probabile, anche a svariati metri di distanza dal positivo che le ha emesse e anche dopo diversi minuti [5].

Vengono invece esclusi i contagi dovuti a contatto con superfici contaminate, nonostante nelle prime fasi dell'epidemia fossero additate come potenziali cause. Su questo tema ha fatto pressione la rivista *Nature*, evidenziando come le ingenti risorse stanziare per sanificare i luoghi pubblici dovrebbero invece essere sfruttate per fronteggiare il problema laddove può essere combattuto: ovvero con la costruzione di sistemi di ventilazione e di ricambio dell'aria [6].

Da ciò si comprende la natura dei provvedimenti di distanziamento imposti: mascherina e distanziamento fisico permettono di proteggersi dai droplet, ma è fondamentale che queste misure siano affiancate da un frequente ricambio d'aria al fine di contrastare la trasmissione aerea delle goccioline più fini.

1.1.2 Efficacia dei provvedimenti

Sono numerosi gli studi che evidenziano l'efficacia dei provvedimenti di prevenzione non farmacologica [7]: mascherine, distanziamento interpersonale, e occhiali di protezione. Quest'ultimo,

difficile da imporre in un ambiente pubblico, è invece fondamentale nell'ambiente ospedaliero dove i medici si mantengono a contatto con pazienti infetti per molte ore del giorno.

Le modalità di utilizzo di mascherine facciali e occhiali di protezione sono ineccepibili, più delicato è invece il discorso che riguarda il distanziamento fisico; la domanda che sorge spontanea è quale sia la distanza che non deve essere violata per essere certi di non contrarre il virus. La risposta al quesito non è semplice, né tantomeno univoca.

Fin dalle prime fasi dell'epidemia si è individuato un range di 1-2 metri come distanza indicativa di sicurezza, basandosi fondamentalmente sugli studi relativi alla volatilità delle particelle emesse per via orale: nel paragrafo precedente si è già osservato come le particelle più piccole rimangano nell'aria per diverso tempo, mentre il peso delle particelle più grandi faccia sì che queste si depositino a una distanza più ravvicinata rispetto alla fonte.

È stato dimostrato come non esista una relazione lineare tra rischio di trasmissione del virus e distanza interpersonale: ad esempio l'*Environmental and Modelling Group* (EMG) stima che il rischio ad 1 metro di distanza da un soggetto infetto sia dalle 2 alle 10 volte maggiore che a 2 metri [8], inoltre il rischio aumenta con l'aumentare del tempo di esposizione, sebbene valutare le probabilità di trasmissione del virus in relazione al tempo di esposizione non sia affatto semplice.

Da uno studio commissionato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità e pubblicato su *The Lancet* [7], emerge come il rischio di trasmissione si attesti al 12,8% per distanze inferiori a un metro, passando al 2,6% per distanze superiori. Tale rischio si dimezza a 1,3% quando la distanza con il soggetto infetto si porta a due metri.

Relativamente al tempo di esposizione le linee guida suggeriscono 15 minuti come tempo necessario per contagiarsi, e il *Centres for Disease Control and Prevention* sottolinea come questo tempo non sia da intendersi come continuativo, ma cumulato anche in diversi contatti ravvicinati più brevi [9].

Sulla base delle informazioni raccolte, N. Jones dell'Oxford University propone delle linee guide che classificano il rischio di contagio in relazione al diverso contesto riconducibile a pochi casi specifici [10]. Si può notare come un ambiente poco affollato dove tutti indossano la mascherina e rispettano il distanziamento fisico il rischio sia molto lieve, sia al chiuso che all'aperto e indipendentemente dal grado di ventilazione. La situazione si aggrava rapidamente se le mascherine non vengono utilizzate e quando i contatti diventano prolungati. Ovviamente è molto influente anche il grado di affollamento dell'ambiente, e non è secondario neppure il tono di voce mantenuto dalle persone (da cui dipende la quantità di particelle emesse).

Type and level of group activity	Low occupancy			High occupancy		
	Outdoors and well ventilated	Indoors and well ventilated	Poorly ventilated	Outdoors and well ventilated	Indoors and well ventilated	Poorly ventilated
Wearing face coverings, contact for short time						
Silent	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Speaking	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Shouting, singing	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Wearing face coverings, contact for prolonged time						
Silent	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Speaking	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Shouting, singing	Low	Low	Low	Low	Low	Low
No face coverings, contact for short time						
Silent	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Speaking	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Shouting, singing	Low	Low	Low	Low	Low	Low
No face coverings, contact for prolonged time						
Silent	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Speaking	Low	Low	Low	Low	Low	Low
Shouting, singing	Low	Low	Low	Low	Low	Low

Risk of transmission
Low Medium High

* Borderline case that is highly dependent on quantitative definitions of distancing, number of individuals, and time of exposure.

Figura 1.1: Rischio di trasmissione del virus SARS-CoV-2 in diversi contesti e per vari tempi di occupazione [10].

1.1.3 Rischio di contagio negli ambienti chiusi: esempi concreti

Il rischio di contrarre il virus in un ambiente chiuso è elevato, e alcuni esempi concreti ne sono la dimostrazione. Questi stessi esempi sono inoltre utili per comprendere l'importanza del rispetto delle forme di prevenzione. L'articolo "*Transmission of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 During Long Flight*" [11], pubblicato sulla rivista *Emerging Infectious Diseases*, offre un'accurata ricostruzione del focolaio originatosi sul volo di linea VN54 in partenza da Londra il primo marzo 2020 e diretto ad Hanoi (Vietnam). La passeggera identificata come probabile caso 1 di questo focolaio è una donna di 27 anni, che al momento dell'imbarco presentava lievi sintomi influenzali e che si è rivelata positiva pochi giorni dopo l'atterraggio. Dopo aver rintracciato buona parte dei 217 passeggeri e averli sottoposti a tampone, è stata accertata la positività di altre 15 persone: 14 passeggeri e un membro dell'equipaggio. Risalendo dunque al posto in cui ciascun positivo era seduto si è notato che il 63% (13/21) dei passeggeri che viaggiavano in business class (la stessa del caso 1) è stato contagiato; inoltre di questi 13, ben 12 persone erano sedute vicino alla donna identificata come caso 1; è stato possibile affermare che quest'ultima complessivamente ha infettato il 92% dei viaggiatori seduti a meno di 2 file di distanza da lei.

L'affidabilità dei dati raccolti è avvalorata dal fatto che Vietnam e Regno Unito al tempo contavano un numero di positivi accertati molto contenuto, è molto probabile allora che i passeggeri fossero negativi al momento dell'imbarco e non abbiano contratto il virus nel paese di destinazione, cioè che siano effettivamente stati contagiati nel corso del volo aereo.

È doveroso sottolineare che ai primi di marzo l'uso della mascherina non solo non era obbligatorio, ma neppure raccomandato per coloro che provenivano dall'Europa, pertanto è auspicabile che nessuno la indossasse.

A valle di questo studio è dunque possibile constatare la facilità con cui il virus si propaga in un ambiente chiuso in assenza di forme di prevenzione: l'uso della mascherina non può essere omesso, ma deve essere anche affiancato da una riduzione dei posti a sedere al fine di aumentare il distanziamento tra i passeggeri in modo sensibile; nel cluster in questione infatti, il contagio è dilagato senza ostacoli in business class, dove i posti sono già di per sé comodamente distanziati.

Un'analisi simile e altrettanto significativa è stata svolta da un team di ricercatori cinesi esaminando i dati raccolti su una linea cinese ad alta velocità [12]. Lo studio prende in considerazione 2300 passeggeri infetti e le circa 72 mila persone che sono venute a contatto con essi. I risultati dell'analisi illustrano come il rischio sia maggiore per la persona seduta a fianco di un passeggero infetto lungo la stessa fila, pari cioè al 3,5%. Più basso invece il rischio per una persona seduta davanti al passeggero positivo, ma a cui dà le spalle, che è invece dell'1,5%. Il rischio di contagio decresce rapidamente allontanandosi orizzontalmente (la probabilità scende dell'1,6% per ogni colonna di distanza) e, contrariamente a quanto si potrebbe aspettare, meno rapidamente aggiungendo file di distanza (0.045% per ogni fila in più). Un altro aspetto sottolineato da questa indagine riguarda la durata del viaggio: la probabilità di contagiarsi aumenta rapidamente al passare delle ore, e dopo due ore di permanenza nello stesso ambiente, persino una distanza interpersonale di 2,5 metri potrebbe non essere più sufficiente qualora non venga eseguito un massiccio ricambio dell'aria nell'ambiente. Ancora una volta lo studio mette in evidenza l'importanza di aumentare la distanza delle sedute con la conseguente limitazione dei posti totali a disposizione.

Per comprendere al meglio queste statistiche è necessario sottolineare come non tutti gli infetti siano ugualmente contagiosi: l'80% dei contagi deriva dal 20% dei casi, motivo per cui si parla comunemente di "superdiffusori" [13]: anzianità, elevato indice di massa corporea e alte cariche virali rendono il soggetto maggiormente predisposto a contagiare, sono infatti queste tutte caratteristiche che portano a produrre maggiori quantità di droplet respiratori [14].

1.1.4 Soluzioni esplorate per monitorare il distanziamento

Di fronte al problema di affrontare una riapertura in sicurezza le attività devono dimostrarsi in grado di garantire il rispetto del distanziamento minimo per evitare il contagio. Questo implica non soltanto una riorganizzazione degli spazi e dei lavori, ma richiede anche dei sistemi per verificare che

le forme precauzionali vengano effettivamente rispettate. Le soluzioni esplorate in tal senso sono numerose, originali e innovative.

Nel vasto panorama di soluzioni disponibili molte sfruttano la tecnologia *Real Time Locating System* (RTLS), ovvero una localizzazione in tempo reale delle persone nell'area monitorata. Nella pratica permettono di tracciare la posizione e gli spostamenti delle persone, assicurandosi che esse non siano mai a una distanza inferiore a quella prevista. Ad esempio, il software *SieTrace* di Siemens [15] elabora i dati raccolti da dei transponder indossabili e invia un segnale di avvertimento ogni qual volta la distanza minima di sicurezza viene violata. I dati forniti in tempo reale vengono rielaborati per individuare eventuali "hotspot", ovvero aree ad alto rischio di contatto. In questo modo si possono evitare provvedimenti su grande scala (magari superflui) a favore di opere focalizzate sulle sole aree ad alto rischio.

Sistemi come questi, tuttavia, richiedono la creazione di un'infrastruttura di per sé costosa e presuppongono canoni di pagamento, oltre a diverse complessità legate alla gestione della privacy.

Un'altra soluzione simile prevede l'utilizzo di strumenti indossabili interconnessi tra loro tramite tecnologia Bluetooth o a banda larga, tali da rilevare quando due persone si avvicinano oltre un certo limite, emettendo un segnale sonoro o un allarme vibrante avvertono l'utente di aumentare la distanza. Tutti gli eventi di allarme sono salvati all'interno della memoria del dispositivo (in modo anonimo) e a loro volta scaricati in un database; in questo modo è possibile ottenere una mappatura dei contatti ed eventualmente segnalare se un dipendente è entrato in contatto con una persona positiva. Appartiene a questa categoria il *Safe Distancing Assistant* di Pathfindr [16].

Questa soluzione ha il vantaggio di assicurare il rispetto della privacy, poiché non prevede alcun tipo di tracciamento del dipendente relativamente alla sua posizione assoluta, ma acquisisce informazioni limitatamente alla sua posizione relativa rispetto agli altri utenti. Inoltre, non richiedono alcuna infrastruttura fisica da attuare, risultando quindi una risorsa economica.

Altra soluzione ancora sono i sistemi di video-analisi che analizzano in tempo reale le immagini, calcolando il numero di persone in un ambiente e la distanza interpersonale.

Infine, il problema può essere affrontato attraverso una simulazione. Questo tipo di approccio, che è quello sperimentato in questo progetto di tesi, prende le distanze da quelli appena elencati in quanto, piuttosto che risolvere il problema direttamente sul campo, tenta di precederlo, andando cioè a valutare un layout tale per cui il distanziamento venga garantito senza bisogno di intervenire in un secondo momento. Un'analisi ad eventi discreti permette di analizzare la problematica individuando la soluzione più vantaggiosa, rielaborando tutte le informazioni a disposizione. I vari software hanno dovuto riadattarsi a tale esigenza implementando nuove funzionalità in merito al distanziamento sociale, così da testare nuovi scenari e opportune strategie di mitigazione. Tra questi Siemens,

FlexSim, MassMotion, hanno incluso nuovi set di norme comportamentali per analizzare e simulare la vicinanza tra gli utenti. Approcci di questo tipo non si limitano ad analizzare l'ambito aziendale e produttivo, ma si possono applicare a qualsiasi ambito sociale.

Sfruttare una simulazione offre numerosi vantaggi:

- È una soluzione economica in quanto non richiede infrastrutture particolari.
- Permette di analizzare rapidamente numerosi scenari individuando quello più adeguato. È pertanto estremamente flessibile.
- Evita problematiche connesse alla privacy.

1.2 La simulazione ad eventi discreti

1.2.1 Simulazione: generalità

In una simulazione si realizza una riproduzione del comportamento di un sistema. Una simulazione può sfruttare un modello concreto oppure un modello astratto; quest'ultima soluzione trova largo impiego nell'ambito della progettazione di sistemi stocastici. La simulazione è uno strumento potente in quanto permette di analizzare i sistemi più complessi, introducendo il carattere aleatorio delle fonti di incertezza, inoltre è in grado di studiare situazioni che non potrebbero essere sperimentate fisicamente.

I vantaggi offerti da una simulazione sono:

- Flessibilità nella progettazione;
- Possibilità di analizzare la stocasticità e variabilità del modello in analisi;
- Possibilità di realizzare rappresentazioni accurate e realistiche dei processi;
- Fungere da supporto in ambito decisionale e operativo;
- Aumentare la conoscenza del sistema reale permettendone una più profonda comprensione;
- Possibilità di studiare la reattività del sistema al modificarsi delle variabili;
- Prevedere il comportamento del sistema anche in condizioni lontane da quelle di normale funzionamento.

Allo stesso tempo non va però dimenticato che:

- La simulazione è un'approssimazione della realtà, pertanto i risultati non sono risposte esatte, ma tanto più accurate quanto più è fedele il modello sviluppato;
- L'analisi degli output può essere anche molto complessa, e quindi imprecisa, talvolta fuorviante. Ancora una volta è fondamentale una realizzazione adeguata del modello;
- Implementare il modello può essere laborioso, è importante quindi svolgere un bilancio tra costi e benefici: il dispendio di risorse potrebbe essere tale da non giustificare i vantaggi offerti.

Il primo passo per svolgere una simulazione consiste nel realizzare un modello adeguato: questo deve essere sufficientemente complesso da descrivere il sistema in analisi, ma allo stesso tempo deve rimanere il più semplice possibile, non deve cioè introdurre complicazioni eccessive e non necessarie. È infine fondamentale chiarire le ipotesi di partenza sulle quali si fonda il modello e i suoi limiti di utilizzo.

I modelli di simulazione possono essere classificati nel seguente modo:

- *Modelli continui*: la variabile si modifica con continuità
- *Modelli discreti*: la variabile si modifica in precisi istanti di tempo.

Un'altra classificazione vede:

- *Modelli statici*: rappresentano il sistema in un preciso istante di tempo.
- *Modelli dinamici*: descrivono il sistema nella sua evoluzione temporale.

Infine, si distinguono:

- *Modelli deterministici*: non presentano componenti di natura probabilistica.
- *Modelli stocastici*: sono soggetti ad aspetti di carattere aleatorio.

[18][19][20][21][22].

1.2.2 Simulazione ad eventi discreti

In una simulazione ad eventi discreti il sistema reale è rappresentato con un modello discreto, dinamico e stocastico. Il sistema trova rappresentazione nella sua evoluzione temporale, dove le variabili assumono un valore che si modifica istantaneamente in momenti ben definiti del tempo e corrispondenti a specifici eventi. Un approccio di questo tipo permette di analizzare sistemi anche molto complessi. Gli oggetti che popolano la simulazione sono elementi distinti e dotati di caratteristiche proprie, questi prendono il nome di *token*.

La successione degli eventi avviene sulla base di una distribuzione di probabilità che deve essere opportunamente valutata sulla base delle informazioni a disposizione. Allo stesso modo anche le durate degli eventi e delle attività sono campionate attraverso una distribuzione probabilistica.

All'interno di un modello si individuano i seguenti elementi costituenti:

- Le *variabili di stato*: descrivono la condizione in cui si trova il sistema. Nel caso specifico di una simulazione ad eventi discreti queste assumono valori discreti e non continui.
- Gli *eventi*: sono gli accadimenti che producono il cambiamento del valore di una o più variabili di stato.
- Le *entità*: sono i singoli elementi all'interno del sistema complesso, caratterizzate da specifici *attributi* che le qualificano. Possono essere dinamiche o statiche.
- Le *risorse* sono gli elementi del modello che prestano un servizio alle entità.
- Le *attività* sono le operazioni di durata nota (normalmente in input). Un *ritardo* è invece un tempo imposto dalla simulazione come risultato di una certa situazione.

Per realizzare simulazioni ad eventi discreti si ricorre a software appositi chiamati simulatori. Alcuni sono più generali, altri più specifici per determinati settori. Questi simulatori consentono di costruire un programma di simulazione attraverso menù grafici e tool intuitivi, normalmente non è necessario ricorrere alla programmazione se non nei casi specifici. Di solito i linguaggi di programmazione di questi software sono linguaggi proprietari appositamente sviluppati e quindi perfettamente aderenti al campo di applicazione di destinazione del software, nonostante siano meno flessibili di quelli più conosciuti.

Caratteristiche che non possono mancare in un buon software di simulazione sono:

- Semplicità di modellazione con buon grado di dettaglio al fine di evitare perdite di informazioni o eccessive semplificazioni;
- Capacità di analisi: il simulatore deve permettere di svolgere analisi approfondite, memorizzare una grossa mole di dati, rielaborarli per restituire gli output desiderati.
- Esecuzione: un software di simulazione deve permettere di replicare una simulazione molte volte, andando a impostare anche diversi scenari;
- Animazione: il punto di forza di un simulatore è la possibilità di offrire animazioni intuitive che fungano da supporto per l'implementazione del modello.

[18][19][20][21][22]

1.2.2.1 FlexSim

Il simulatore utilizzato in questo progetto di tesi è FlexSim. Questo software sfrutta strumenti avanzati di visualizzazione 3D che facilitano la comprensione del modello e la sua realizzazione: permette infatti di trascinare gli oggetti direttamente nell'ambiente e farli interagire. Quando la simulazione è in svolgimento un'animazione consente di monitorare il regolare svolgimento delle attività.

Ad una libreria già molto vasta si aggiunge la possibilità di personalizzazione, in alternativa è anche possibile importare direttamente il disegno CAD. Le logiche di simulazione possono essere implementate direttamente nell'ambiente 3D, ma per realizzare i modelli più complessi si ricorre al *Process Flow*, nel quale viene sfruttata la logica a blocchi: ad ogni blocco corrisponde una specifica attività presa in carico dai token. La logica implementata nel *Process Flow* può essere in seguito accoppiata al modello 3D. Il software permette anche di integrare routine per svolgere attività non standardizzate, per far ciò è richiesta la conoscenza del linguaggio specifico *FlexScript*.

FlexSim monitora in automatico moltissimi dati statistici, che possono essere visualizzati in diagrammi, grafici o tabelle. Presenta inoltre uno strumento di ottimizzazione avanzata per confrontare diversi scenari analizzando le soluzioni più convenienti.

Punto di forza del software è la possibilità di offrire numerosi moduli che si adattano alle esigenze del caso, nello specifico di questa tesi è stato fatto ampiamente uso del modulo *HealthCare*. Questo, ideato per l'ambiente ospedaliero, può adattarsi a contesti anche molto diversi. In questo modulo le persone che popolano la simulazione non agiscono come parti di un impianto di produzione, ma vengono guidati dal relativo *Patient Flow* come token della simulazione. Il modulo è ottimizzato per essere intuitivo, con diverse attività già preimpostate [23].

Questo simulatore è stato utilizzato in modo massiccio per questo lavoro di tesi, e nei successivi capitoli si richiameranno più volte le sue funzioni, cercando di essere esaustivi nei passi da seguire, soprattutto quelli più delicati. Per approfondire le funzionalità del software si rimanda al manuale ufficiale di FlexSim, disponibile in rete e periodicamente aggiornato [24].

1.2.3 Costruzione di un modello di simulazione

Il modello di riferimento per una simulazione non può essere perfettamente fedele alla realtà che si propone di rappresentare, poiché ciò richiederebbe un dispendio eccessivo in termini di tempo e risorse. D'altra parte, il modello non può neppure essere esageratamente semplificato, altrimenti i risultati che fornisce risulterebbero poco interessanti. È chiaro allora che la soluzione migliore consiste in una via di mezzo, non troppo complessa, ma neanche affetta da eccessive semplificazioni.

È possibile individuare le seguenti fasi che caratterizzano il processo di formulazione di un modello di simulazione:

- Come primo passo si va a inquadrare il problema da analizzare. È importante definire già in questa fase i KPI che si desidera monitorare, chiarendo fin da subito quali sono gli obiettivi dell'analisi. Questo è fondamentale per evitare di trascurare dettagli significativi, ma anche per individuare quegli aspetti che invece non forniscono un valore aggiunto alla simulazione, e invece la complicano inutilmente, e che pertanto dovranno essere trascurati.
- Si procede dunque con la raccolta dei dati riguardanti il sistema. Con questi si intendono le informazioni di natura strutturale, come layout, dimensioni degli ambienti o degli oggetti, capacità delle risorse, quantità coinvolte. Sempre in questa fase si devono stimare le distribuzioni di probabilità delle quantità coinvolte, processo spesso complicato. Normalmente vengono derivate da processi simili o formulate sulla base di ipotesi ben argomentate (e poi verificate).
- A questo punto si passa alla formulazione del modello in sé: partendo da un modello di massima si va poi ad affinarlo con un dettaglio sempre maggiore, tenendo sempre a mente il sistema reale di riferimento che si vuole simulare, che deve essere scomposto minuziosamente in tutte le sue singole attività (da analizzare separatamente).
- Scelto quindi il simulatore più adatto al problema si può implementare il modello in formato informatico. Durante questa fase di modellazione, il progetto concettuale diventa tangibile e ciò permette di correggere le imperfezioni che immediatamente saltano all'occhio.
- Il programma implementato nel simulatore deve essere verificato, bisogna cioè assicurarsi che questo funzioni correttamente. Alla verifica segue poi la validazione, il processo con cui si stabilisce se il modello ricalca effettivamente in modo fedele il comportamento del sistema reale (limitatamente all'uso che se ne vuole fare). Verifica e validazione sono eseguiti in modo iterativo durante tutta fase di realizzazione del modello.
- Si passa dunque alla pianificazione della campagna sperimentale, a cui segue una raccolta dei dati attraverso numerosi run della simulazione. In questa fase è anche necessario stabilire la lunghezza della simulazione e il numero di repliche necessarie per raggiungere la precisione voluta; precisione che ovviamente aumenta all'aumentare delle repliche.
- I dati raccolti vengono elaborati ed analizzati. Il modello viene messo alla prova con i diversi scenari che si ottengono modificando i valori delle variabili in input e studiando come varia la risposta del sistema. È in questa fase che si possono constatare la potenza e l'utilità del processo di simulazione, e a seconda dell'obiettivo, si potrà valutare:
 - La sensitività del sistema ai cambiamenti;

- Il valore ottimale di una variabile che permette di ottimizzare uno specifico KPI;
 - La risposta del sistema ad una particolare modifica di un valore in input;
 - La presenza di colli di bottiglia;
 - Il tasso di utilizzo delle risorse;
 - L'incidenza di una variabile.
- Come ultimo passo si devono presentare le conclusioni: le informazioni raccolte vengono raggruppate e quindi diffuse.

[18][19][20][21][22]

1.2.4 Analisi degli input

Se la simulazione ha natura stocastica è necessario individuare le distribuzioni di probabilità che regolano le attività. Se possibile queste devono essere dedotte da dati empirici raccolti sul campo attraverso uno dei seguenti metodi:

1. I dati empirici vengono utilizzati direttamente nella simulazione.
2. I dati vengono sfruttati per generare una distribuzione empirica.
3. A partire dai dati raccolti si individua la distribuzione teorica che meglio li rappresenta. Attraverso i test di ipotesi è necessario verificare che la distribuzione scelta sia effettivamente rappresentativa dei dati.

Il primo metodo non viene utilizzato poiché richiederebbe un grande quantitativo di dati, spesso non disponibili. Tra il secondo e il terzo approccio è preferibile il terzo, infatti le distribuzioni empiriche possono presentare irregolarità, sono limitate al campo di misurazioni svolte, e sono meno flessibili di quelle teoriche. Di seguito si elencano le principali famiglie di distribuzioni e il loro relativo ambito di impiego:

- *Normale*: utilizzata per modellare la distribuzione di un processo che può essere pensato come la somma di un certo numero di sotto processi.
- *Esponenziale*: modella il tempo che intercorre tra due eventi indipendenti oppure quello di un processo senza memoria. È una distribuzione altamente variabile.
- *Weibull*: descrive il tempo di rottura dei componenti.
- *Poisson*: modella il numero di eventi indipendenti che si verificano in un determinato intervallo di tempo.
- *Triangolare*: modella un processo per il quale è possibile distinguere un massimo e un minimo.

- *Uniforme*: descrive processi assolutamente imprevedibili, ogni evento è ugualmente probabile.

Quando non si dispone di dati empirici è necessario basarsi su procedure euristiche che si affidano all'intuito del progettista del modello, che si suppone possieda una conoscenza approfondita del sistema. Questi dovrà stimare non soltanto il tipo di distribuzione, ma anche i parametri che la caratterizzano.

[19][21].

1.2.5 Verifica e validazione del modello

Nel processo di *verifica* l'obiettivo è quello di comprendere se il programma realizzato "è corretto", cioè che sia completo e coerente in ogni sua parte. In particolare, la coerenza deve essere verificata sotto due profili:

- Consistenza: il modello non deve presentare contraddizioni logiche interne.
- Validità algoritmica: l'algoritmo alla base del modello deve essere appropriato.

Con la *validazione* invece si cerca di capire se il modello realizzato rispecchia adeguatamente il comportamento del corrispettivo sistema reale.

Al termine del processo di verifica e validazione sarà possibile affermare che i risultati ottenuti dalle configurazioni "What-if" della simulazione sono effettivamente una proiezione veritiera di quello che succederebbe realmente in tali condizioni.

Si tenga presente che, poiché potrebbe essere complicato verificare il modello complessivo, si può anche procedere con una sua scomposizione in sotto-modelli, ciascuno dei quali verificato separatamente. Le tecniche utilizzate per eseguire la verifica di un modello sono numerose (il seguente elenco non è esaustivo):

1. Animazione: il modello viene analizzato attraverso un'osservazione minuziosa dell'animazione fornita dal simulatore;
2. Comparazione con i risultati di modelli risolvibili in via analitica;
3. Si valuta il comportamento del modello nelle sue condizioni estreme;
4. Si confrontano gli eventi che accadono nell'ambiente di simulazione con quelli che si verificano nel sistema reale;
5. Si confrontano i risultati ottenuti dal modello con dati raccolti in precedenza sul campo;
6. Si variano contemporaneamente molteplici variabili per assicurarsi che il modello rimanga stabile;
7. Si modifica una certa variabile e si verifica che le conseguenze prodotte sul modello coincidano con quelle che realmente produrrebbero nel sistema di riferimento;

8. Test di continuità: si effettuano molteplici run con valori leggermente diversi dei parametri. Ogni variazione consistente degli output deve essere studiata;
9. Simulazioni casuali: si replicano numerosi run della simulazione per verificare che le uscite siano effettivamente dipendenti dalle variabili in ingresso;
10. Test di consistenza: si esegue la simulazione con una velocità molto bassa al fine di poter appurare che ogni attività venga svolta adeguatamente.

Tra i vari test si distinguono quelli soggettivi, effettuati da chi conosce a fondo il funzionamento del sistema reale, e quelli oggettivi, ottenuti da un'analisi di dati concreta.

Prima di poter sfruttare un modello per l'analisi, è necessario assicurarsi che esso sia valido. Questo, infatti, per quanto possa essere fedele al sistema reale, è comunque una sua approssimazione, e in quanto tale presenta dei limiti. Tanto più il modello sarà fedele tanto più saranno affidabili i risultati ottenuti andando a variare i parametri di processo: affidabilità del sistema "As-is" si traduce in affidabilità del sistema "What-if". Si tenga presente che un modello deve essere validato limitatamente all'uso che se ne vuole fare.

Per validare le singole componenti del modello, come ad esempio le distribuzioni di probabilità in input, si sfruttano tecniche quantitative simili a quelle utilizzate per il processo di verifica. La parte più delicata, però, riguarda la validazione degli output della simulazione. Per far ciò è necessario studiare il sistema reale per un certo intervallo di tempo, raccogliendo i dati relativi ai parametri di performance che si vogliono studiare. Dopodiché si configura il modello in modo tale che rispecchi il sistema nella configurazione analizzata, quindi si confrontano gli output della simulazione con i risultati raccolti sul sistema reale sfruttando le tecniche statistiche.

I disallineamenti tra realtà e modello possono essere molteplici, così come le cause che ne sono responsabili. Ciascuno di questi però può essere ricondotto a un errore commesso in fase di progettazione ed è pertanto correggibile, anche se nella pratica potrebbe essere irrisolvibile in quanto richiederebbe un dispendio eccessivo. Normalmente si possono ricondurre ad omissioni di aspetti invece rilevanti, oppure ad assunzioni non valide.

Il processo di verifica e validazione è un processo iterativo: viene protratto e reiterato fintanto che il risultato non è giudicato soddisfacente e sufficientemente accurato [19][25].

1.2.6 Analisi degli output

Una volta che un modello di simulazione si è dimostrato affidabile può essere utilizzato per raccogliere dei risultati che possano poi essere studiati. I dati di output ricavati da un singolo run della simulazione non sono però stime affidabili del comportamento del modello reale. Infatti, in una

simulazione si sfruttano osservazioni casuali derivate da numerose distribuzioni di probabilità, pertanto i risultati di una singola replicazione sono soltanto realizzazioni particolari di parametri che possono avere anche una varianza molto grande. Tuttavia, poiché i risultati di molteplici replicazioni sono indipendenti e identicamente distribuiti, possono essere sfruttati i metodi statistici tradizionali per l'analisi dei dati, si suppone cioè che questi si distribuiscano con un pattern statistico realistico.

Quando è possibile definire un evento che determina la fine della simulazione, si parla di *simulazione con terminazione*. Per questo tipo di sistemi, ovviamente, non è necessario individuare una lunghezza della replica tale da garantire risultati significativi, a differenza di quanto accade per le *simulazioni senza terminazione*.

Normalmente nei sistemi con terminazione si stima il valore del parametro di interesse calcolando una media sulle n replicazioni e affiancando il risultato con il relativo livello di fiducia.

Bisogna sfruttare un numero di repliche sufficientemente elevato da fornire risultati con la precisione desiderata; normalmente si procede in maniera iterativa fintanto che l'errore massimo che si ottiene con un certo livello di fiducia non è ritenuto accettabile, in alternativa si lavora con un certo numero di repliche prefissato.

[18][21].

1.3 Strumenti statistici per l'analisi degli output

Attraverso il simulatore è possibile raccogliere i risultati in output relativi alle varie replicazioni condotte; questi dati devono essere elaborati con i metodi statistici al fine di estrapolare i risultati desiderati. Nei successivi paragrafi si descrivono i principali strumenti statistici utilizzati in questa tesi.

1.3.1 Statistica descrittiva e inferenza statistica

La statistica descrittiva comprende l'insieme dei metodi che riguardano la raccolta, l'esposizione e la sintesi dei dati. Con statistica inferenziale si intende invece quella branca delle scienze statistiche che mira a trarre conclusioni riguardanti l'intera popolazione basandosi sull'analisi di un suo sottoinsieme, denominato campione. Solitamente, infatti, la popolazione è troppo ampia per poter essere studiata nella sua totalità, sarà allora necessario concentrare l'analisi su un suo sottogruppo che ne sia rappresentativo. Affinché un campione sia rappresentativo dell'intera popolazione è necessario che venga estratto in modo completamente casuale, infatti ogni criterio di scelta porta

inavvertitamente a sbilanciare il campione rendendolo poco significativo per lo studio dell'intera popolazione.

In statistica si ha spesso a che fare con una grande quantità di dati, per questo motivo si utilizzano grandezze che sintetizzano i dati: media, mediana o moda (parametri di posizione) e varianza e deviazione standard (parametri di variabilità).

Tra le molte tipologie di diagrammi statistici per la visualizzazione dei dati è molto utilizzato il box plot: dopo aver ordinato i dati in ordine crescente si sovrappone un rettangolo delimitato dal primo e quarto quartile e diviso dalla mediana (il primo quartile è il 25-esimo percentile, ovvero il valore dei dati maggiore del 25% di tutti i dati). Una linea orizzontale va dal minimo al massimo costituendo i cosiddetti “baffi”; di solito la lunghezza dei baffi viene limitata nella lunghezza, così da visualizzare valori troppo estremi sottoforma di soli punti.

Normalmente quando si svolge un esperimento si individua una variabile di interesse che racchiude al suo interno le informazioni di cui si ha bisogno. Tale variabile prende il nome di variabile aleatoria, e ai suoi valori numerici viene associata una legge di probabilità che esprime una misura della loro tendenza a presentarsi. Le variabili aleatorie possono essere discrete oppure, più frequentemente, continue; in questo secondo caso è conveniente organizzare i risultati in più classi definite su intervalli visualizzabili su istogrammi o diagrammi a barre.

La probabilità che una variabile aleatoria assuma un valore compreso in un certo intervallo si calcola integrando la funzione densità di probabilità in tale intervallo.

[26][27].

1.3.2 Il teorema del limite centrale

Tra le varie distribuzioni di probabilità teoriche un'importanza fondamentale è ricoperta dalla distribuzione normale, caratterizzata da una forma a campana simmetrica: il 68,26% delle osservazioni distano dalla media meno di una deviazione standard, mentre il 95,4% distano non più di 2 deviazioni standard. Questa distribuzione ricorre frequentemente nella teoria della probabilità per via del suo ruolo nel *teorema del limite centrale*: sia data una popolazione infinita di media μ e deviazione standard σ da cui vengono estratti in modo casuale campioni di numerosità n sufficientemente grande; la distribuzione delle medie campionarie tende a distribuirsi normalmente con media $\mu_{\bar{x}} = \mu$ e deviazione standard $\sigma_{\bar{x}} = \sigma/\sqrt{n}$. In termini pratici il teorema afferma che le medie campionarie calcolate su campioni sufficientemente grandi (almeno 30 elementi) tendono a disporsi secondo una distribuzione normale, anche se tali campioni sono estratti da popolazioni che non sono normali.

Attraverso questo teorema si definisce il concetto di livello di fiducia; sulla base di quanto appena affermato si può dire che:

$$P\left(\mu - z_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \bar{x} \leq \mu + z_{\alpha} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \cong 1 - \alpha$$

Da cui deriva l'equazione che definisce l'intervallo di confidenza della media della popolazione.:

$$P\left(\bar{x} - z_{\alpha} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + z_{\alpha} \frac{s}{\sqrt{n}}\right) \cong 1 - \alpha$$

Si noti che, non essendo nota la deviazione standard della popolazione, si è usata quella campionaria. Il parametro z_{α} può essere ricavato dalle tabelle caratteristiche della distribuzione normale.

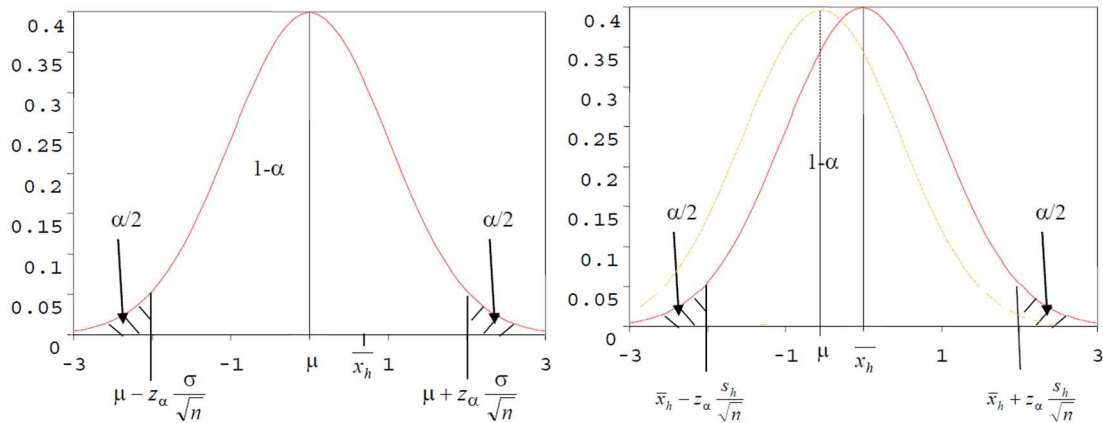


Figura 1.2: Intervalli di fiducia [27].

Ad esempio, il 95% dei dati ricade nell'intervallo:

$$\mu - 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \bar{x} \leq \mu + 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Da cui si può definire l'intervallo di fiducia al 95%:

$$\bar{x} - 1,96 \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + 1,96 \frac{s}{\sqrt{n}}$$

Quando si stima un parametro, questo viene affiancato dal relativo livello di fiducia che esprime la probabilità definita a priori che l'intervallo calcolato contenga il valore vero della popolazione.

[26][27].

1.3.3 Test t di Student per il confronto di medie campionarie

Un test delle ipotesi è un metodo utilizzato in statistica per prendere decisioni sulla base di dati sperimentali. Nello specifico il test t viene utilizzato per confrontare le medie di due campioni e stabilire quanto accuratamente la differenza delle media campionarie rispecchi una differenza tra le medie delle due popolazioni. Ovviamente il test può essere applicato in modo efficace solo nel caso in cui la variabile che si vuole controllare sia quantitativa, e che pertanto abbia senso individuarne una media, e che la variabile indipendente che distingue i due campioni che si vogliono confrontare sia qualitativa e dicotomica: in questo modo sarà possibile attribuire a tale variabile la responsabilità di due risultati differenti. Per applicare il test in modo rigoroso è inoltre necessario verificare tre condizioni:

1. I campioni che si vogliono confrontare devono essere indipendenti ed estratti in modo casuale dalla popolazione.
2. Le popolazioni da cui sono estratti i campioni si distribuiscono normalmente.
3. I due gruppi che si vogliono confrontare non devono presentare valori anomali.

L'ipotesi iniziale che si vuole verificare, detta ipotesi nulla (H_0), è che le medie delle due popolazioni da cui sono tratti i campioni siano uguali; l'ipotesi (H_1), che ne è il completamento logico, è che le medie siano invece diverse tra di loro. È doveroso sottolineare che l'ipotesi nulla non viene *accettata*, ma *non rifiutata*: non si sta affermando che sia necessariamente vera, ma soltanto che i dati raccolti sono coerenti con questa.

Un test t presenta diverse forme a seconda che la varianza campionaria sia uguale o diversa, pertanto in via preliminare è opportuno eseguire un test f di confronto delle varianze di due popolazioni di cui si conoscono le varianze campionarie.

$$\begin{aligned}
 H_0: \sigma_x^2 &= \sigma_y^2 & H_1: \sigma_x^2 > \sigma_y^2 \\
 \chi_x^2 &= \frac{(n_x-1) \cdot s_x^2}{\sigma_x^2} & \chi_y^2 &= \frac{(n_y-1) \cdot s_y^2}{\sigma_y^2} \\
 F_{xy} &= \frac{\chi_x^2}{(n_x-1)} \cdot \frac{(n_y-1)}{\chi_y^2} = \frac{s_x^2}{s_y^2} \cdot \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2} & s_x^2 > s_y^2
 \end{aligned}$$

La statistica F segue la distribuzione di Snodcor o Fischer con gdl: $v_x = n_x - 1$; $v_y = n_y - 1$

$$p(F_{xy} \leq F_{\alpha, v_x, v_y}) = p\left(\frac{s_x^2}{s_y^2} \cdot \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2} \leq F_{\alpha, v_x, v_y}\right) = 1 - \alpha$$

Introducendo l'ipotesi nulla: $p\left(\frac{s_x^2}{s_y^2} \cdot \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2} \leq F_{\alpha, v_x, v_y}\right) = 1 - \alpha$

Si avrà che con il livello di fiducia $(1 - \alpha)$:

$$F_{xy} = \frac{s_x^2}{s_y^2} \leq F_{\alpha, v_x, v_y} \quad \text{allora non rifiuto } H_0 : \sigma_x^2 = \sigma_y^2$$

$$F_{xy} = \frac{s_x^2}{s_y^2} > F_{\alpha, v_x, v_y} \quad \text{allora rifiuto } H_0 : \sigma_x^2 > \sigma_y^2$$

A questo punto si può procedere con il *test t*.

$$H_0 : \mu_x = \mu_y \quad H_1 : \mu_x > \mu_y \text{ (due code)}$$

- Varianza uguale nelle due popolazioni e nota:

$$t = t_x - t_y = \frac{(\bar{x} - \bar{y}) - (\mu_x - \mu_y)}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}}}$$

Introducendo l'ipotesi nulla:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{\sigma \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}}}$$

La statistica segue la distribuzione t di Student con gdl: $v = n_x + n_y - 2$

Si avrà che con il livello di fiducia $(1 - \alpha)$:

$$|t| > t_{\alpha, v} \quad \text{allora : } \mu_x > \mu_y$$

- Varianza stimata uguale nelle due popolazioni:

$$s_p^2 = \frac{(n_x - 1)s_x^2 + (n_y - 1)s_y^2}{n_x + n_y - 2} \quad t = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{s_p \sqrt{\frac{1}{n_x} + \frac{1}{n_y}}}$$

- Varianza stimata diversa nelle due popolazioni:

$$t = \frac{(\bar{x} - \bar{y})}{\sqrt{\frac{s_x^2}{n_x} + \frac{s_y^2}{n_y}}} \quad \nu = \frac{\left(\frac{s_x^2}{n_x} + \frac{s_y^2}{n_y}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_x^2}{n_x}\right)^2}{n_x - 1} + \frac{\left(\frac{s_y^2}{n_y}\right)^2}{n_y - 1}} - 2$$

Per una più immediata lettura del risultato del test solitamente si osserva il valore del p-value che rappresenta la probabilità di ottenere una differenza tra le medie di ampiezza almeno pari a quella osservata nel campione quando l'ipotesi nulla è vera. Se il valore del p-value è inferiore a un certo valore di soglia, detto significatività del test (solitamente 5%), allora si può rifiutare l'ipotesi nulla e affermare che la differenza osservata tra le medie è significativa.

[26][27].

1.3.4 D di Cohen come stima dell'effect size

Una volta che è stato appurato che la differenza tra due medie è significativa si procede con il quantificare tale differenza per comprendere se è accompagnata da un reale interesse pratico. Tra le varie misure dell'effect size si è deciso di affidarsi alla D di Cohen, che quantifica la differenza sulle medie sulla base delle varianze delle popolazioni.

$$d = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\sqrt{\frac{\sigma_2^2 + \sigma_1^2}{2}}}$$

Tanto più questo indice risulta elevato tanto più l'effetto risulta marcato. È lo stesso Cohen a fornire delle linee guide per valutare la dimensione di un effetto basandosi sul valore numerico ottenuto [28].

<i>Effect Size</i>	<i>D di Cohen</i>
Molto piccolo	0,01
Piccolo	0,20
Medio	0,50
Grande	0,80
Molto grande	1,20
Enorme	2,0

Figura 1.3: Valutazione dell'effetto sulla base del valore della D di Cohen [28][29].

1.3.5 Regressione lineare

Un problema frequente in statistica consiste nel ricercare la relazione che intercorre tra due variabili: con l'analisi di regressione si formula un modello che stimi l'andamento della variabile dipendente, cioè la risposta, in funzione di quella indipendente, la variabile di ingresso.

Per un certo valore in ingresso x_i si avrà a disposizione una risposta y_i , un valore medio stimato con il modello $y_{i,stimato} = h(x_i)$ e un errore (o residuo) dato dalla differenza tra il valore reale della risposta e quello stimato.

Nel metodo di regressione ai minimi quadrati i parametri del modello vengono ipotizzati minimizzando la somma degli errori al quadrato per ciascun dato del campione a disposizione.

Come indicatore della bontà di un modello di regressione si utilizza il coefficiente di correlazione:

$$R^2 = \frac{\sum (y_{i,stimato} - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

Un modello di regressione è tanto più preciso quanto più il coefficiente di correlazione si avvicina al valore unitario.

[26][27].

1.4 Utilizzo della simulazione per stimare il rischio di contagio e per valutare gli effetti del distanziamento fisico

1.4.1 Airbone Infection Risk Calculator (AIRC)

Il dipartimento di ingegneria Civile e Meccanica dell'università di Cassino ha implementato un tool chiamato "Airbone Infection Risk Calculator" (AIRC) [17] con il quale è possibile stimare il rischio di trasmissione aerea in ambienti chiusi. Il tool si basa su un modello teorico sviluppato sotto la direzione del prof. Giorgio Buonanno [30][31]; in questo si delinea un metodo per calcolare la concentrazione di *quanti* nel tempo sotto determinate condizioni di emissione e rimozione, e il conseguente rischio di infezione di una persona esposta (con *quanto* si intende la quantità di droplet trasportati dall'aria sufficiente per contagiare il 63% delle persone sensibili).

Il tool si propone di rispondere a due domande:

1. Qual è il rischio di contagio associato alla permanenza prolungata in un ambiente?

2. Qual è il numero di occupanti massimo per garantire un indice di trasmissibilità (R_0) minore di 1?

Lo strumento richiede come input:

- Le dimensioni della stanza;
- Informazioni relative al *Infectious Viral Removal Rate (IVRR)* che tiene conto del grado di ventilazione nell'ambiente (nelle istruzioni sono forniti valori consigliati), cioè il livello di rimozione di particelle contagiose;
- Numero di occupanti positivi al virus e quindi contagiosi. È possibile indicare se questi si mantengono nell'ambiente per tutta la durata della simulazione oppure per un tempo limitato;
- Quantità di particelle infette già presenti nell'ambiente all'inizio della simulazione (funzione utile nel caso in cui si voglia considerare una simulazione come successiva ad una precedente);
- Tempo di esposizione dei soggetti a rischio;
- Attività svolta dall'occupante infetto. Il sistema prevede sei diverse attività già preimpostate, ciascuna delle quali associata ad un certo grado di emissione di droplet e aerosol.

Il ventaglio di risultati generati come output è piuttosto vasto ed esaustivo: la probabilità di essere contagiati rimanendo esposti per tutta la durata della simulazione o solo per una sua frazione, il tempo di esposizione necessario per avere lo 0,1% e l'1% di probabilità di infettarsi, il numero massimo di persone che possono occupare la stanza per ottenere un indice di trasmissibilità minore di 1. Sono inoltre proposte diverse ipotesi per valutare come questo rischio si modifichi quando gli occupanti non utilizzano la mascherina.

Il modello presenta dei limiti, primo tra tutti si è assunto che le particelle infette si distribuiscano in modo istantaneo uniformemente in tutto lo spazio a disposizione, diversamente da quello che accade nella realtà, dove invece, per ovvi motivi, si ha una concentrazione maggiore vicino al soggetto che le emette.

Nel manuale d'uso del tool [32] sono proposti diversi casi concreti che vengono analizzati attraverso questo strumento.

Viene analizzato ad esempio un cluster creatosi in Slovenia in un campo da squash, dove tutte e cinque le persone coinvolte contrassero il virus. Secondo i risultati ottenuti tramite il modello avrebbero dovuto contagiarsi solo il 40 % delle persone che hanno giocato per 60 minuti nello stesso ambiente con la persona infetta, pertanto meno di 5 persone (che sono il 100% del totale). I risultati sono però coerenti se si assume che il giocatore infetto fosse un "superdiffusore", in grado cioè di

1.4 – Utilizzo della simulazione per stimare il rischio di contagio e per valutare gli effetti del distanziamento fisico

emettere quantitativi di droplet superiori alla media, in tal caso infatti la percentuale di contagio calcolata da AIRC sale al 98%.

Applicando AIRC ad un ambiente scolastico è possibile vedere come l'utilizzo dei giusti provvedimenti abbassi concretamente le probabilità che il virus si propaghi [33]. Nell'analisi si è assunto che gli studenti mantengano sempre il distanziamento minimo che eviti il contagio su breve distanza. Si immagini di avere un'aula con 30 studenti dove il professore è positivo a SARS-CoV-2. Se le finestre sono chiuse e il professore non indossa la mascherina il rischio individuale di contagio è del 14%, nella peggiore delle ipotesi 18 studenti saranno contagiati. Se tutti indossassero la mascherina la probabilità cala drasticamente all'1,3%, un risultato simile si ottiene aprendo periodicamente le finestre per avere un buon ricambio d'aria. A livello di ventilazione, tenendo conto che in periodo invernale le finestre non possono rimanere costantemente aperte, la soluzione migliore è quella offerta da una ventilazione meccanica che offre un ricambio d'aria consistente, anche se non tutte le aule dispongono di questa strumentazione.

Aiuta ad abbassare le probabilità di contagio l'utilizzo del microfono da parte del professore: a parità di altre condizioni il suo utilizzo porta la probabilità di contagio individuale a 1,6%. Combinando l'utilizzo di mascherina, apertura delle finestre ogni 10 minuti e utilizzo di mascherine, la probabilità di contagiarsi scende allo 0,8% con un indice di trasmissione del virus prossimo a 1.

AIRC non è l'unico tool implementato, un'alternativa è ad esempio quello sviluppato dal professor José Luis Jiminéz dell'università del Colorado [34]. Questo tool è ottimizzato per svariate situazioni standard ed è particolarmente intuitivo per studiare i benefici introdotti dall'utilizzo delle varie forme di prevenzione.

1.4.2 Valutazione degli effetti dei provvedimenti di distanziamento

Ambienti come ospedali, cliniche private, università, scuole presentano un grosso vantaggio: quello di poter monitorare il numero di accessi e pertanto prendere le dovute precauzioni affinché le norme vengano rispettate. Per questo motivo si prestano bene ad un'analisi ad eventi discreti, potendo infatti formulare ipotesi solide sulle quali basare il modello.

Sfruttando la simulazione ad eventi discreti, nello studio "*Impact of the COVID-19 pandemic on the workflow of an ambulatory endoscopy center: an assessment by discrete event simulation*" [35] vengono studiate le conseguenze prodotte dalle forme di prevenzione non farmacologica in una clinica di endoscopia privata.

L'obiettivo è quello di comprendere e quantificare le limitazioni alla produttività e le problematiche che sorgono in relazione ai limiti imposti dalla legge, che distruggono il workflow

1.4 – Utilizzo della simulazione per stimare il rischio di contagio e per valutare gli effetti del distanziamento fisico

tradizionale con un impatto significativo sul numero di pazienti, il personale coinvolto, i tempi di processo e quindi anche l'attesa dei clienti.

Come primo passo è stato realizzato il modello 3D della clinica, modellando i vari ambienti, dopodiché sono stati definiti gli indicatori di performance: tempo totale medio di permanenza del paziente nella struttura, tempi medi di attesa nell'atrio, percentuali medie di tempo trascorso per compiere ciascuna delle fasi previste dalla visita, ritardi, percentuale di impiego dello staff, indicatori di natura finanziaria per monitorare i costi. Per quanto riguarda gli input del modello si sono specificati tutti i tempi necessari per svolgere le singole mansioni, le quantità di attrezzature disponibili, i costi richiesti e altri ancora.

Ai fini di ottenere un modello realistico e spendibile, sono state riprodotte in modo molto dettagliato tutte le fasi seguite da un paziente nella clinica, e messe poi a confronto con le modifiche subite a causa delle stringenti norme anti-covid. Oltre alla compilazione di un questionario è necessario eseguire un test molecolare, accompagnato da uno screening di temperatura e sintomi. Il tutto viene svolto in un'area isolata e appositamente allestita, mentre l'uscita è separata dall'ingresso. È inoltre prevista una fase di profonda igienizzazione delle postazioni al termine della visita.

A livello statistico sono state sfruttate distribuzioni triangolari centrate sul valore più probabile, mentre per definire il susseguirsi degli aventi si è optato per una distribuzione esponenziale.

Ogni simulazione riguarda un'intera giornata lavorativa. Nello studio si precisa inoltre che i dati stocastici utilizzati sono in linea con quelli rilevati dal reparto qualità in due trimestri, dunque convalidati internamente con ulteriori set di dati relativi a 50 pazienti.

I risultati ottenuti dalle simulazioni evidenziano un aumento del tempo di processo significativo, e dunque anche di attesa, accompagnato da un incremento dei costi del 42% per paziente. Per quanto riguarda il tempo medio di permanenza del paziente, questo viene quasi raddoppiato. Si è inoltre constatata la possibilità di ridurre le tempistiche, ma a discapito di un ulteriore aumento dei costi.

1.4.3 Utilizzo della simulazione ad eventi discreti per analizzare il rispetto del distanziamento interpersonale in ambiente universitario

La simulazione può essere sfruttata come strumento sia predittivo del contagio, che di analisi degli effetti prodotti dalle norme di distanziamento sul normale svolgimento delle attività. Si evidenzia però come nel tool descritto sia posto, sottoforma d'ipotesi, il rispetto della distanza interpersonale che impedisce il contagio da droplet respiratori, al fine di concentrarsi sulle probabilità di contagio da aerosol infetto. Il rispetto del distanziamento fisico, tuttavia, non è assolutamente scontato: ci sono infatti situazioni, spesso transitorie, in cui il distanziamento è difficile da mantenere.

1.4 – Utilizzo della simulazione per stimare il rischio di contagio e per valutare gli effetti del distanziamento fisico

Il progetto di tesi in questione si propone allora di sfruttare la simulazione ad eventi discreti per analizzare approfonditamente se, e in che misura, le distanze di sicurezza sono effettivamente rispettate, al fine di analizzare il rischio di contagio dovuto ai contatti ravvicinati. Nello specifico si è deciso di analizzare l'ambiente scolastico/universitario, un luogo spesso additato come responsabile di molti focolai.

Appurato che le probabilità di contagio da aerosol sono del tutto contenute nel momento in cui si prendono gli opportuni provvedimenti di ricambio dell'aria, si desidera ora stabilire se le misure di natura non farmacologica previste siano sufficienti a rendere l'aula universitaria un ambiente sicuro per quanto riguarda i contatti a distanza ridotta.

La scelta di analizzare l'ambiente dell'aula universitaria è motivata dal fatto che questo è un settore conosciuto e familiare, le assunzioni pertanto sono giustificate dall'esperienza diretta e quindi affidabili, soprattutto nell'ottica di uno studio che si è basato perlopiù su ipotesi euristiche, non avendo a disposizione dati empirici raccolti direttamente sul campo. Questa decisione ha anche semplificato la fase di reperimento di informazioni a livello di layout strutturale dell'ambiente da modellare.

Capitolo 2

Modello

2.1 Inquadramento del problema e definizione degli obiettivi

L'obiettivo di questo studio è verificare se, e in quale misura, il distanziamento fisico viene rispettato all'interno di un'aula universitaria. Come si è visto, infatti, è possibile evitare che il virus si diffonda tramite aerosol prendendo i giusti provvedimenti:

- Il professore che tiene la lezione deve utilizzare il microfono;
- Tutti gli occupanti dell'ambiente devono indossare una mascherina chirurgica;
- L'ambiente dev'essere adeguatamente arieggiato attraverso ad un frequente ricambio d'aria.

È però indispensabile che queste misure siano affiancate dal continuo mantenimento della distanza interpersonale. Il modello che si desidera implementare deve allora monitorare il distanziamento reciproco mantenuto dalle persone che occupano l'ambiente del laboratorio, mappando tutti i contatti che si realizzano al di sotto di una certa distanza minima durante la lezione in laboratorio.

Nello specifico si dovranno ricavare degli indicatori che permettano di quantificare il rischio connesso alla violazione della distanza di sicurezza:

- Il numero di volte in cui uno studente entra a contatto ravvicinato con un qualsiasi altro occupante dell'aula;
- Il tempo totale in cui uno studente rimane a contatto ravvicinato con altri studenti;
- Il tempo medio di durata dei contatti;
- Il tempo medio di contatto per ciascuna coppia di studenti.

Dopo aver individuato i parametri di controllo si passerà a valutare l'efficacia di ciascuna regola di distanziamento introdotta: ogni provvedimento sarà analizzato singolarmente mettendone in evidenza i benefici sui parametri di controllo. Inoltre, rimuovendo tutte le misure di natura non farmacologica, sarà possibile analizzare una normale lezione universitaria prima della pandemia, per comprendere la reale portata dei benefici introdotti dalle misure di distanziamento.

Per rendere questi confronti agevoli si intuisce fin d'ora l'importanza di realizzare un modello nel quale i vari provvedimenti di distanziamento possano essere sospesi agevolmente.

2.2 Raccolta dati sul sistema reale

Tra i vari ambienti a disposizione all'interno del Politecnico di Torino, la scelta è ricaduta sul laboratorio informatico LEP, al primo piano del Dipartimento di Ingegneria Gestionale e della Produzione (DIGEP).

Il modello è strettamente connesso all'aula effettivamente modellata, ma, laddove possibile, è stato generalizzato, potrà essere quindi riadattato efficacemente a qualsiasi aula universitaria.

Si è deciso di considerare una lezione standard così strutturata:

- Prima lezione frontale di 75 minuti.
- Intervallo di 15 minuti.
- Seconda lezione frontale di 75 minuti.

Nel corso della lezione gli studenti possono rivolgere domande agli assistenti di laboratorio, oppure recarsi ai servizi. Durante l'intervallo possono semplicemente attendere al loro posto, o in alternativa, andare in bagno, rimanere nel corridoio oppure prendere un caffè.

Infine, è realistico immaginare che mentre si tiene la lezione nell'aula, professori, studenti, dottorandi, tecnici, attraversino periodicamente il corridoio del piano in cui si trova il laboratorio.

In fase preliminare si sono reperite le planimetrie del laboratorio LEP. Dopodiché si sono misurate le dimensioni dei banchi, quindi se n'è studiata attentamente la disposizione nell'aula secondo le indicazioni fornite. Il numero totale di posti disponibili in aula è 41, ma in condizioni di pieno regime il numero può salire fino a 80, disponendo due studenti per banco.

I provvedimenti che sono stati previsti per sfavorire i contatti ravvicinati sono:

- Il numero di studenti effettivamente presenti a lezione è stato dimezzato, quindi non più di 20 persone possono partecipare alla lezione.
- Gli alunni nell'aula devono sedersi lasciando sempre un banco vuoto di distanza tra loro (si veda pianta in Figura 2.2).
- Anche le sedie nel corridoio, i lavandini e le macchinette del caffè devono essere utilizzate in modo alternato.
- Si è previsto un ingresso degli studenti in aula regolato da una fase di registrazione: ciascuno attende il proprio turno ordinatamente, igienizza le mani, e firma il modulo delle presenze alla cattedra. Si è notato, infatti, che l'ingresso in aula è accompagnato da un elevato numero di contatti a causa del modo caotico in cui le persone entrano nel laboratorio.
- È stato raddoppiato il numero delle uscite, utilizzando anche quelle che danno verso l'esterno, di norma non sfruttate. Ogni studente deve servirsi della porta a lui più vicina.

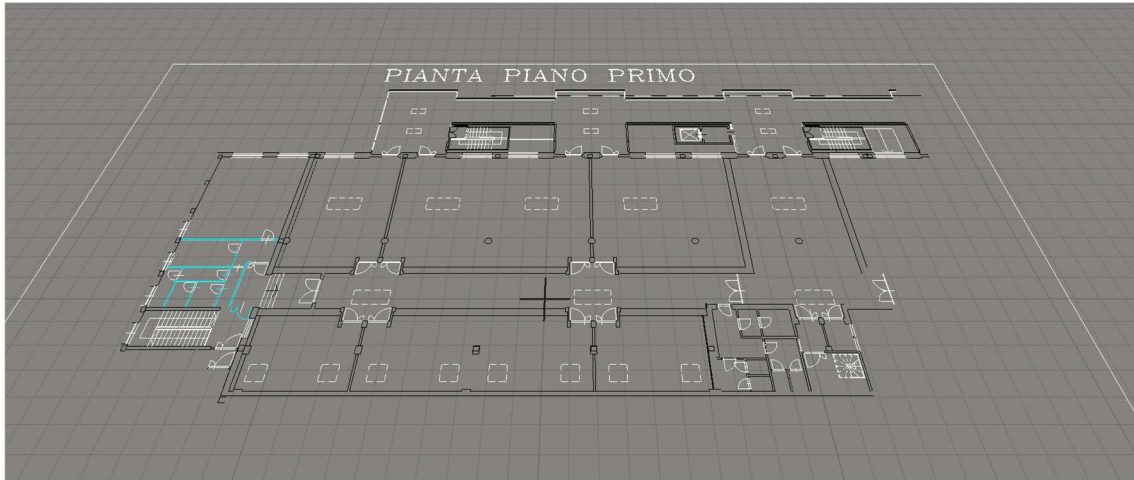


Figura 2.1: Planimetria dell'intero piano in cui è situato il laboratorio LEP.

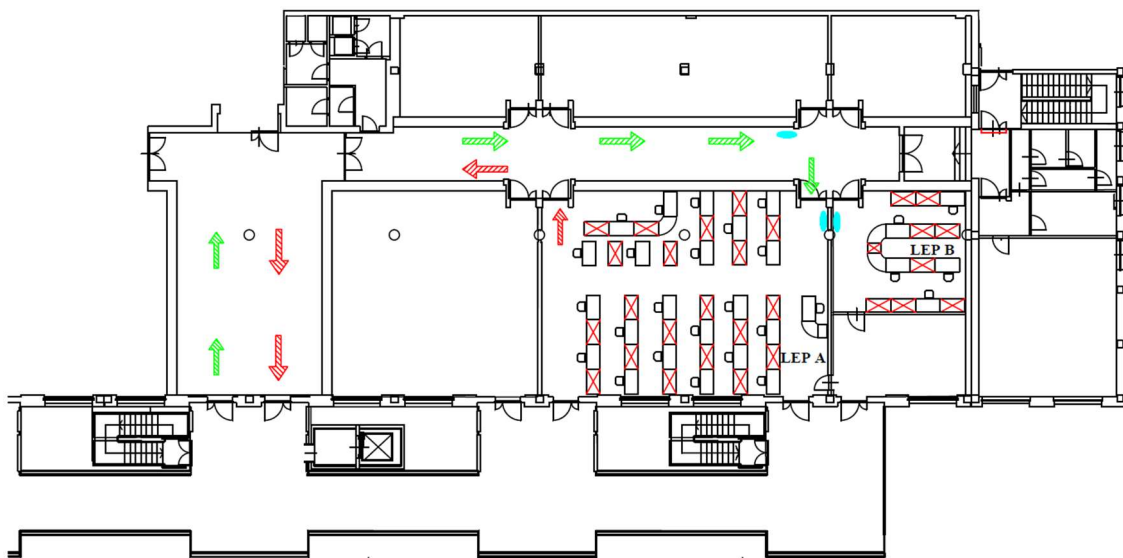


Figura 2.2: Disposizione dei banchi nell'aula.

A questo punto si è passati ad individuare le distribuzioni di probabilità alla base delle attività del modello.

È doveroso precisare che questo studio di tesi è stato intrapreso a pandemia già inoltrata, questo ha impedito di effettuare una raccolta di dati empirici da rielaborare. Poiché in letteratura non sono stati rinvenute informazioni al riguardo, le forme delle distribuzioni di probabilità e i relativi parametri sono stati scelti arbitrariamente affidandosi all'esperienza pratica.

La logica di fondo che ha guidato la scelta è stata quella di utilizzare delle distribuzioni di probabilità i cui parametri potessero facilmente essere rilevati in una reale raccolta dati sul campo. Questo, nel concreto, si è tradotto in distribuzioni triangolari e distribuzioni uniformi per modellare la durata delle attività, in questo caso è infatti possibile individuare un valore massimo e uno minimo. Si è optato invece per una distribuzione esponenziale per modellare il tempo che intercorre tra eventi indipendenti, come ad esempio due diverse domande rivolte agli assistenti. L'unico parametro in ingresso richiesto da questo tipo di distribuzione è la media. In questo caso, infatti, il dato effettivamente raccogliabile è il numero di volte che l'evento si verifica. Conoscendo allora il numero di studenti in aula e la durata della lezione, è possibile calcolare la media della distribuzione esponenziale:

$$media = \frac{(totale\ studenti) \cdot (durata\ lezione)}{(n^{\circ}\ ripetizioni\ evento)}$$

Ancora una volta, non disponendo di dati empirici, si è dovuta svolgere un'assunzione: il numero di volte che un evento si verifica è pari ad una percentuale ragionevole degli studenti. Si evidenzia che il tempo medio calcolato in questo modo non è il tempo che intercorre tra due domande qualsiasi, ma è il tempo medio che intercorre tra due domande rivolte da una stessa persona. Come si vedrà in seguito, infatti, ogni token segue il suo personale percorso all'interno del flusso logico implementato.

Per quanto riguarda la media della distribuzione che definisce ogni quanto introdurre un agente che attraversa il corridoio, si è invece ipotizzato un tempo medio plausibile perché si verifichi tale l'evento.

<i>Attività</i>	<i>Distribuzione</i>	<i>Durata minima</i>	<i>Durata massima</i>	<i>Moda</i>
Domanda all'assistente	Uniforme	2 minuti	5 minuti	/
WC	Uniforme	1 minuto	2 minuti	/
Lavandino	Uniforme	10 secondi	15 secondi	/
Macchinetta del caffè	Trinagolare	50 secondi	60 secondi	55 secondi
Relax intervallo	Triangolare	3 minuti	8 minuti	5,5 minuti
Registraz. e igienizzaz. mani	Uniforme	5 secondi	7 secondi	/

Tabella 2.1: Distribuzioni di probabilità che modellano le durate delle attività e relativi parametri.

<i>Evento</i>	<i>Distribuzione</i>	<i>Media distribuzione</i>
Tempo medio tra due domande	Esponenziale	66,7 minuti
Tempo medio WC	Esponenziale	333,3 minuti
Tempo medio passaggio di un agente nel corridoio	Esponenziale	7 minuti

Tabella 2.2: Distribuzioni di probabilità che modellano il tempo che intercorre tra eventi indipendenti.

2.3 Realizzazione del modello in FlexSim

È questa la parte più pratica, nella quale il modello vero e proprio prende vita in FlexSim. Il procedimento seguito si articola in più fasi.

2.3.1 Creazione dell'ambiente di simulazione 3D

Le planimetrie, disponibili in formato DWG, sono state importate direttamente in FlexSim tramite gli strumenti del Toolbox. La planimetria appare nell'ambiente 3D con le sue dimensioni reali, in questo modo è possibile affidarsi ad essa per ricalcare l'ambiente del laboratorio in maniera fedele. Dopo aver delineato i muri dell'aula, si è passati a disporre i banchi nel numero adeguato e dimensione reale. Lo stesso è stato fatto con le porte, le sedie nel corridoio, i WC, i lavandini, le macchinette del caffè. Si sono anche posizionati nell'ambiente il professore e gli assistenti, considerati come risorse fisse della simulazione con cui gli studenti possono interagire; quest'ultimi invece verranno generati sottoforma di token nel momento in cui inizia la simulazione. Si precisa inoltre che d'ora in avanti si utilizzerà il termine "agenti" per riferirsi ai soggetti che popolano l'ambiente di simulazione.

La logica che guida gli spostamenti su FlexSim prevede che una persona, nel portarsi verso la propria destinazione, segua sempre il percorso più breve. È possibile introdurre dei percorsi preferenziali che attraggono l'agente modificandone leggermente il percorso, ma il sistema in questo senso appare piuttosto rigido.

Le varie entità che popolano l'ambiente della simulazione, se non diversamente indicato, vengono attraversate dagli agenti. Per evitare che questo accada si ricorre allora al sistema A^* *Navigation*: di volta in volta che gli oggetti vengono trascinati nel 3D devono essere aggiunti al sistema A^* *Navigation*, in questo modo vengono considerati con il loro ingombro, definendo un ostacolo al

movimento degli agenti. Quando un oggetto è stato correttamente inserito nel sistema si colora di blu alla base.

Per agevolare le fasi successive è opportuno riunire in gruppi oggetti simili, così che possano essere trattati tutti contemporaneamente, senza dover di volta in volta selezionarli singolarmente. Questo può essere fatto in più modi: direttamente dal 3D dell'oggetto, selezionando **Object Groups > Add To New Groups**, oppure dagli strumenti del Toolbox dopo aver creato un nuovo gruppo e aggiungendo l'oggetto con il sistema di campionamento. È importante sottolineare che devono essere aggiunti al gruppo soltanto gli oggetti effettivamente utilizzati, tralasciando banchi, sedie, lavandini che non possono essere impiegati per via delle norme di distanziamento fisico. Al termine di questo processo il layout del laboratorio appare come in Figura 2.3.



Figura 2.3: Layout del laboratorio LEP ricostruito in ambiente FlexSim.

2.3.2 Process Flow della lezione completa

Per implementare la logica del modello si è fatto uso dello strumento del process flow. Come prima cosa è stato creato un *patient flow*, il quale genera in automatico due process flow connessi tra loro: il primo, denominato *Arrivals*, che gestisce gli arrivi dei token nella simulazione (cioè gli studenti), e un secondo dove viene implementata la logica che ciascuno di essi dovrà eseguire. Ogni studente, visibile sul modello 3D durante la simulazione, è connesso in modo univoco ad un token del process flow, ed esegue le istruzioni dettate dal token che attraversa il flusso logico implementato.

Per quanto riguarda gli arrivi in aula si è immaginato che tutti gli studenti entrassero nel laboratorio contemporaneamente all'inizio della lezione, questa è infatti la condizione più realistica osservata nel sistema reale.

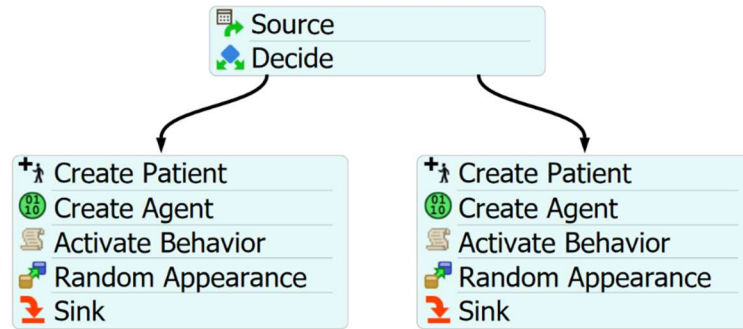


Figura 2.4: Arrivals.

Il blocchetto *Source* genera un token, che viene poi accoppiato ad un agente della simulazione attraverso il blocchetto *Create Patient*. All'interno di questo blocchetto è necessario specificare il luogo di creazione dell'agente, si sono quindi previsti due rami in modo che gli studenti venissero creati in modo casuale in entrambe le porte del corridoio (l'attività *Decide* va configurata con **Send Token To > Random Connector**). Nel blocchetto *Source* è anche necessario impostare il numero di token che verranno generati, cioè il numero di studenti che partecipano alla lezione. Per quanto riguarda le altre attività visibili in Figura 2.4, queste verranno discusse nel paragrafo 2.4.

Il fulcro del modello è costituito dal process flow principale che guida le attività degli studenti, la cui ossatura è visibile in Figura 2.5.

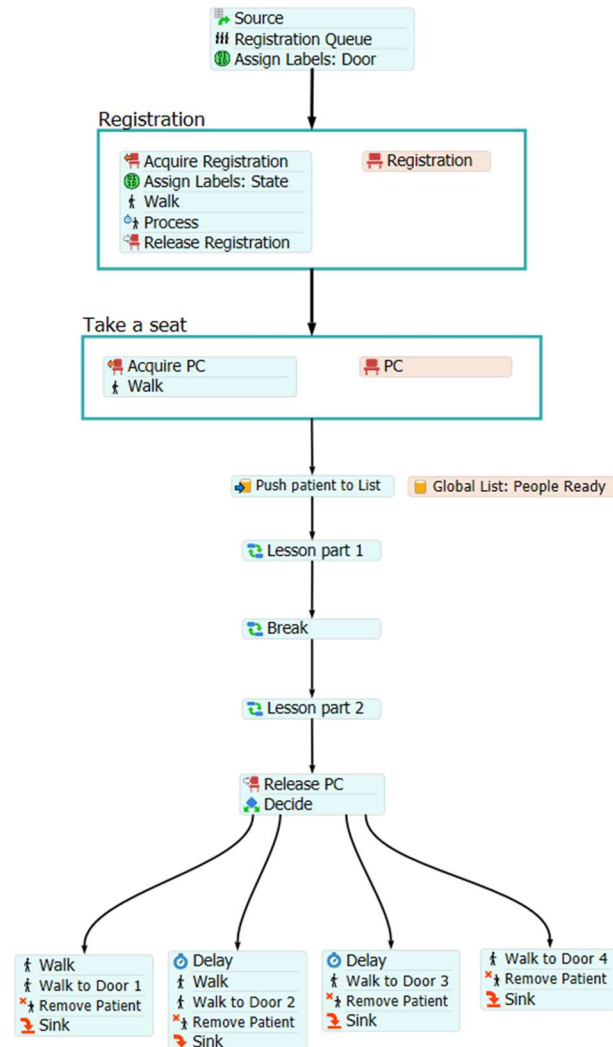


Figura 2.5: Process flow dell'intera lezione di laboratorio.

Per accedere all'aula ogni studente si mette ordinatamente in coda (attività *Wait in Line* della libreria) dove attende il proprio turno prima per entrare; dunque si porta fino alla cattedra del professore dove igienizza le mani e firma la presenza. Questa sezione coincide nel process flow di Figura 2.5 con il sottogruppo “Registration”, presente nella libreria come *activity set* già preimpostata sotto il nome di *Walk then Process*.

Dopo aver effettuato la registrazione, lo studente va a sedere nel banco dove trascorrerà l'intera lezione. All'interno del blocchetto *Location Resource* (qui denominato “PC”) si deve selezionare l'intero gruppo “ComputerDescks” (il gruppo relativo alle postazioni a sedere nel laboratorio), in questo modo ogni token acquisirà un generico PC tra quelli disponibili nel gruppo in modo casuale

(l'acquisizione del gruppo avviene campionando un singolo PC dell'ambiente 3D, che a sua volta suggerisce l'opzione di selezione dell'intero gruppo).

Prima che inizi la lezione vera e propria si deve attendere che tutti gli studenti abbiano preso posto. Per far ciò si è sfruttata la funzione *List*. L'utilizzo delle liste è uno dei molti metodi con cui si possono sincronizzare i token in FlexSim: quando un token raggiunge il blocchetto *Push to List* questo viene spinto nella lista corrispondente (qui chiamata "Global List: People Ready"). Il blocchetto *pull to list* (Figura 2.6) spingerà i token fuori dalla lista solo quando conterà un numero di token accumulati nella lista pari al numero di studenti (Figura 2.6): solo a questo punto il process flow primario potrà proseguire.

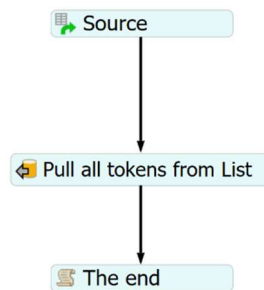


Figura 2.6: Logica pull-push per sincronizzare i token (process flow separato).

Il flusso logico procede dunque con le due lezioni frontali da 75 minuti, separate dall'intervallo di 15 minuti. Poiché queste macro-attività sono piuttosto elaborate, si è deciso di isolarle dal flusso principale al fine di conferire una maggiore leggibilità al modello. Quando i token entrano nei blocchetti *Run Sub Flow* vengono dirottati all'interno di un sotto-processo separato. Solo quando quest'ultimo sarà concluso (e questo sarà sancito da un blocchetto *Finish*) il token potrà proseguire nel flusso principale. I due sotto processi in questione sono descritti dettagliatamente nei capitoli 2.3.3 e 2.3.4.

Conclusa la lezione i token rilasciano la risorsa PC e gli studenti si apprestano ad uscire attraverso la porta che è a loro più prossima. Per individuare l'uscita effettivamente più vicina si sono sfruttati i *trigger*. L'aula può essere divisa in quattro parti, ciascuna di esse associata ad una uscita, numerata per comodità da 1 a 4. Entrando nella finestra delle proprietà del banco si è aggiunto un trigger *On entry*, e si è impostato il trigger in modo tale che ogni qual volta quel banco viene acquisito da un agente della simulazione, viene aggiornato il valore dell'etichetta denominata "Door" con il valore corrispondente all'uscita più vicina al banco stesso (l'etichetta "Door" deve essere già stata creata, inizialmente con un valore zero. In Figura 2.5 questa viene creata tramite un blocchetto *Assign Labels*

poco dopo che il token è stato generato). Naturalmente questa procedura viene ripetuta per ogni banco dell'aula. Se questa operazione è stata svolta correttamente, selezionando un qualsiasi studente durante la simulazione, si noterà che su di esso è presente l'etichetta "Door" con un valore compreso tra 1 e 4.

A questo punto sarà immediato guidare ogni studente verso l'uscita corretta (parte finale di Figura 2.5): un blocchetto *Decide* è stato configurato con l'opzione **Connector By Case**, in questo modo, a seconda dell'etichetta trascritta sull'agente, il token sceglierà quale dei quattro percorsi disponibili percorrere, ognuno dei quali corrisponde ad un'uscita diversa.

Si possono notare anche dei blocchetti *Delay*, introdotti per creare un ritardo che disaccoppia le uscite, al fine di evitare i contatti ravvicinati che si avrebbero nel corridoio centrale nel caso in cui tutti gli studenti si alzassero contemporaneamente.

2.3.3 Lezione in aula

In Figura 2.7 è riportato il sotto-processo relativo alla sola lezione in aula. La funzione *Split* suddivide ogni token che l'attraversa in tanti token secondari quanti sono i connettori che vede in uscita (in questo caso 3), ogni token secondario procederà su uno dei 3 flussi:

- Il ramo principale;
- Il ramo relativo all'attività "rivolgere una domanda all'assistente";
- Il ramo relativo all'attività "andare ai servizi".

Il blocchetto *Split* va configurato con la funzione **Create As > Child Tokens**, in questo modo si avrà che il token che segue il ramo principale è il token Parent, mentre quelli che procedono nei due rami secondari sono i token Children. Sempre nella finestra di configurazione bisogna anche assicurarsi di spuntare soltanto l'opzione **Copy Label to Tokens on Create**, che fa in modo che su ogni token Child siano copiate le etichette del token Parent al momento della sua creazione, ma il token Child non è invece in grado di scrivere informazioni sul token Parent.

Il sistema impostato in questo modo fa sì che i processi siano indipendenti tra loro: il ramo principale detta la durata della lezione, nel frattempo i token Children percorrono in modo ciclico i due loop fintanto che la lezione prosegue. Con questo sistema si potrà verificare qualsiasi combinazione di eventi, infatti uno stesso studente potrà andare in bagno e rivolgere domande più volte e in qualsiasi ordine, e questa è senza dubbio la condizione più realistica.

Nei paragrafi seguenti si analizzano nel dettaglio i rami relativi alle attività citate.

Lesson

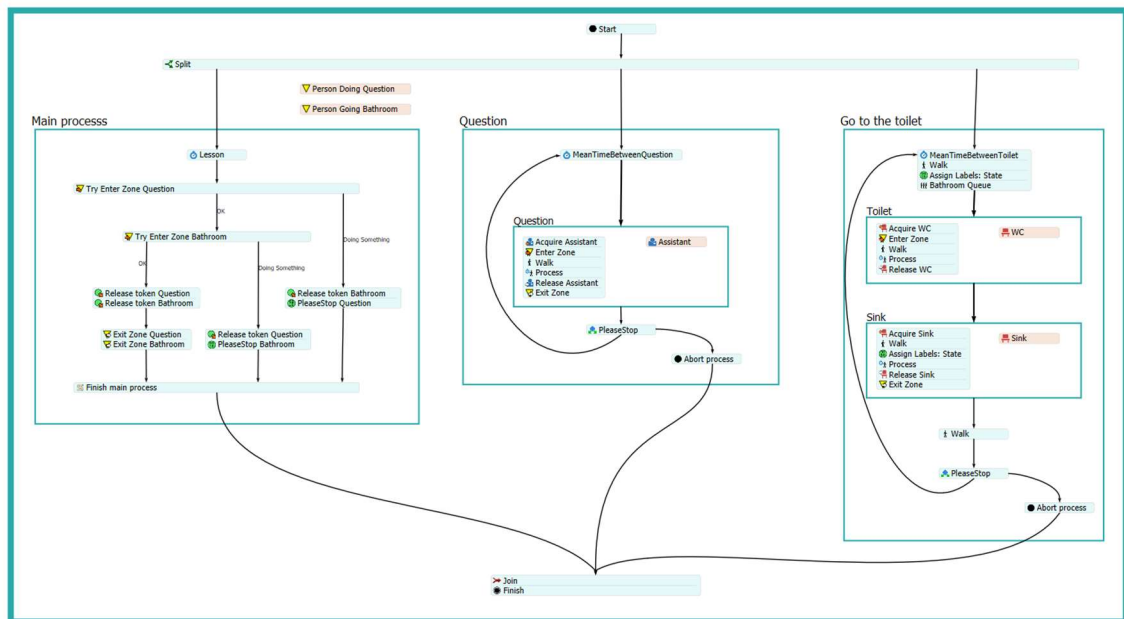


Figura 2.7: Process flow completo della lezione in aula.

2.3.3.1 Attività “Rivolgere una domanda all’assistente”

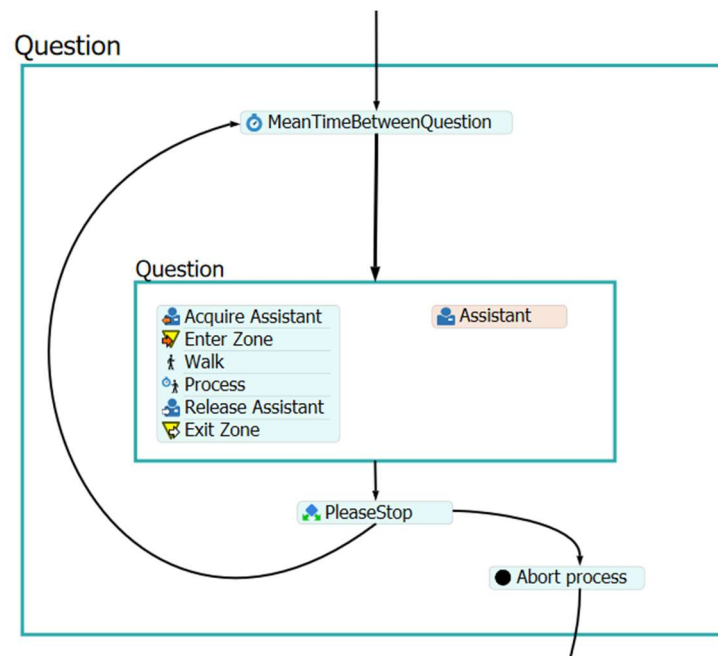


Figura 2.8: Ramo relativo all’attività “rivolgere una domanda all’assistente”.

Il token secondario attende in un blocchetto *Delay* denominato “MeanTimeBetweenQuestion”, configurato con una distribuzione di probabilità esponenziale con la media indicata in Tabella 2.2. Questo blocchetto determina ogni quanto lo studente rivolge una domanda.

Per definire l’attività vera e propria si è sfruttato l’*activity set* chiamato *Process with Staff*. Lo studente che vuole rivolgere la domanda acquisisce l’assistente e questi, se disponibile, si recherà direttamente al banco dello studente dove chiarirà i suoi dubbi. Per ottenere ciò alla voce **Destination** del blocchetto *Walk* (Figura 2.8) si deve scrivere **patient.Locations[1]** (essendo questo un *patient flow* ci si riferisce agli agenti con il termine “patient”). Nel blocchetto *Staff* si deve invece campionare l’intero gruppo relativo agli assistenti di laboratorio.

Il blocchetto *Process*, invece, determina la durata della domanda e va configurato con la distribuzione corrispondente di Tabella 2.1. Si precisa che più studenti possono mettersi in coda per richiedere chiarimenti all’assistente, che soddisferà una alla volta tutte le richieste in ordine di coda.

Al termine di questo processo, il token incontra un blocchetto *Decide* che lo riporta nuovamente all’inizio del ramo, creando in questo modo un loop che verrà interrotto solo al termine della lezione (il modo in cui viene interrotto è descritto in seguito).

2.3.3.2 Attività “andare ai servizi”

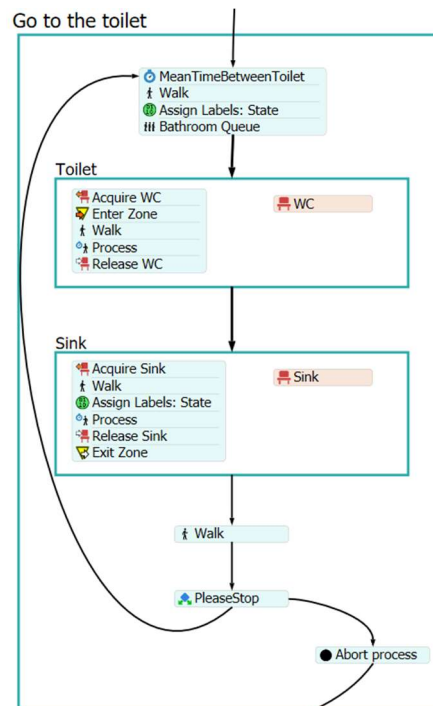


Figura 2.9: Ramo relativo all’attività “andare ai servizi”.

Uno studente che deve andare ai servizi si alza dal suo posto e cammina fino ai bagni, dove si mette in coda, in attesa del proprio turno. Se il bagno è libero viene acquisita la risorsa WC, la durata del processo è ancora una volta impostata secondo Tabella 2.1. L'agente si porta quindi ai lavandini e infine ritorna al suo posto. Affinché lo studente ritorni effettivamente al posto che occupava in precedenza, alla voce **Destination** dell'ultimo blocchetto *Walk* (Figura 2.9) si deve scrivere **patient.Locations[1]**.

Come accaduto anche per l'attività precedentemente analizzata, il token incontra infine un blocchetto *Decide* che lo riporta nuovamente all'inizio del ramo creando un loop.

2.3.3.3 Ramo principale

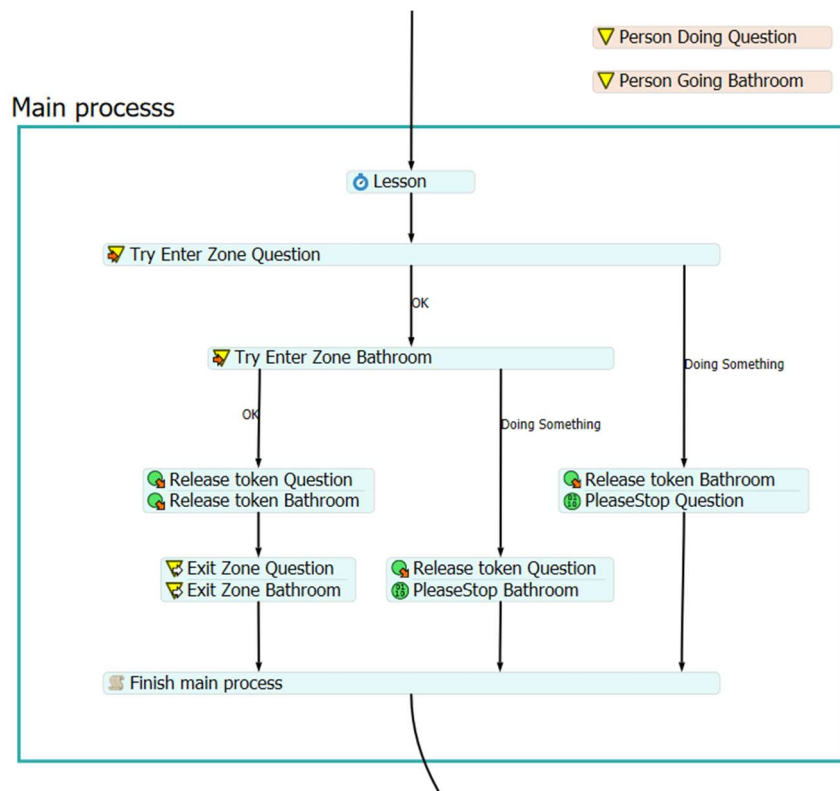


Figura 2.10: Ramo principale.

Il token Parent che entra nel ramo primario trova un blocchetto *Delay* (denominato "Lesson") dove è impostata una durata fissa di 75 minuti. Al termine di questo tempo, ovvero quando la lezione è giunta al termine, lo stesso token Parent ha il compito di rilasciare i rispettivi token Children che si trovano nei rami secondari. Se questa operazione non venisse svolta si genererebbero delle situazioni

assurde nel momento in cui il token Parent prosegue nel ramo primario, infatti si avrebbero più token connessi allo stesso agente che comandano attività che vanno in contraddizione.

Allo scadere dei 75 minuti è possibile che alcuni studenti siano in attesa che un assistente si liberi (l’acquisizione è già avvenuta), oppure potrebbero essere coinvolti una domanda proprio in quel momento; altri ancora, invece, potrebbero essere ai servizi; la maggior parte di loro però non sarà coinvolta in nessuna attività. Tutti i token secondari devono allora essere rimossi al termine dei 75 minuti, ad eccezione di quelli relativi a studenti che in quel preciso istante stanno fisicamente svolgendo la domanda o sono ai servizi, che potranno ovviamente concludere la loro attività (e in questo caso sarà il token padre ad attenderli).

Per far ciò si è sfruttata l’attività di FlexSim *Zone* che, come suggerisce il nome, permette di creare una zona. Si definiscono due blocchetti *Zone* denominati “Person Doing Question” e “Person Going Bathroom”, nella cui finestra di configurazione va spuntata l’opzione **Use Max Conter** impostando contenuto pari a 1. L’accesso e l’uscita a queste zone si collocano nei rami secondari come mostrato in Figura 2.8 e in Figura 2.9. Nello specifico si faccia caso a come il blocchetto *Enter Zone* sia posto dopo il blocchetto di acquisizione della risorsa.

Si segua ora il flusso logico del ramo principale eseguito da ogni singolo token Parent. Il token Parent entra nel blocchetto denominato “Try Enter Zone Question”, cerca cioè di entrare nella zona corrispettiva, nella quale però, avendo spuntato l’opzione del contenuto massimo pari a 1, ci sarà a disposizione un solo posto: o per il token Parent o per il token Child. Se la zona è occupata significa che in quel momento lo studente è impegnato in una domanda (quindi il token Child è dentro alla zona), il token Parent segue il percorso del connettore “Doing Something”. Per far sì che questo accada alla voce **On Wait Time Fired** del blocchetto “Try Enter Zone Question” va aggiunta la funzione **Release Token > “Doing Something”** (cioè il nome del connettore verso cui si vuol dirottare il token). Il token incontra ora un blocchetto *Release Token* con il quale il token secondario nel ramo “andare ai servizi” viene rilasciato (se lo studente sta svolgendo una domanda di sicuro non sarà in bagno). Il blocchetto va configurato come in Figura 2.11.

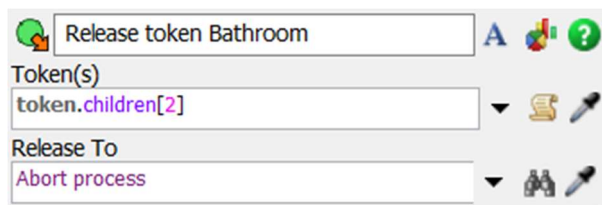


Figura 2.11: Configurazione del blocchetto *Release Token Bathroom*.

Il token Child sul ramo dell'attività "andare ai servizi" allora, indipendentemente dalla sua posizione nel ramo, viene dirottato nel blocchetto "Abort Process" di Figura 2.9, il loop di questo token è allora stato interrotto.

Subito dopo, il token Parent incontra un blocchetto *Assign Labels* grazie al quale viene assegnata un'etichetta denominata "Please Stop" al token Child dello studente che sta svolgendo la domanda. In questo modo quando attraverserà l'attività *Decide* in figura Figura 2.8 (qui denominata "PleaseStop"), questa lo spingerà nel blocchetto "Abort Process" interrompendo il loop anche nel ramo "rivolgere una domanda all'assistente" (il blocchetto *Decide* è configurato con la funzione **Conditional Decide**, grazie alla quale un token si muove verso un connettore a seconda del valore di una certa etichetta).

Nel caso in cui, invece, la zona "Person Doing Question" sia libera, sicuramente lo studente non sta rivolgendo una domanda, allora il token Parent procede nel connettore denominato "OK", trovando subito il blocchetto che verifica se quello studente si trova ai servizi. In caso affermativo, proseguirà per il percorso "Doing Something" che prevede gli stessi campi appena analizzati: il token sul ramo "rivolgere una domanda all'assistente" viene rilasciato, mentre quello sul ramo "andare ai servizi" vedrà comparire un'etichetta "Please Stop". Il blocchetto *Release Token* è configurato ora nel modo seguente:

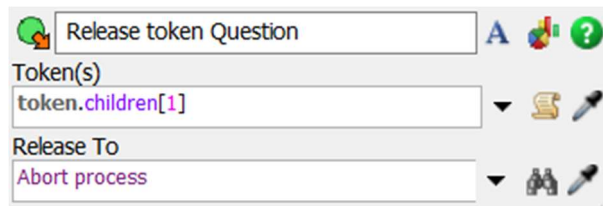


Figura 2.12: Configurazione del blocchetto *Release token Question*.

Se anche la zona "Person Going Bathroom" risulta libera significa che lo studente non sta né rivolgendo una domanda e non è neppure ai servizi. Entrambi i token Children relativi a quello studente vengono rilasciati, il token Parent esce dalla zona e il processo termina. I token Parent e i token Children rilasciati si riuniscono nel blocchetto *Join*, e la simulazione può procedere con l'intervallo. Ovviamente questo processo viene eseguito da ciascun token.

2.3.4 Intervallo

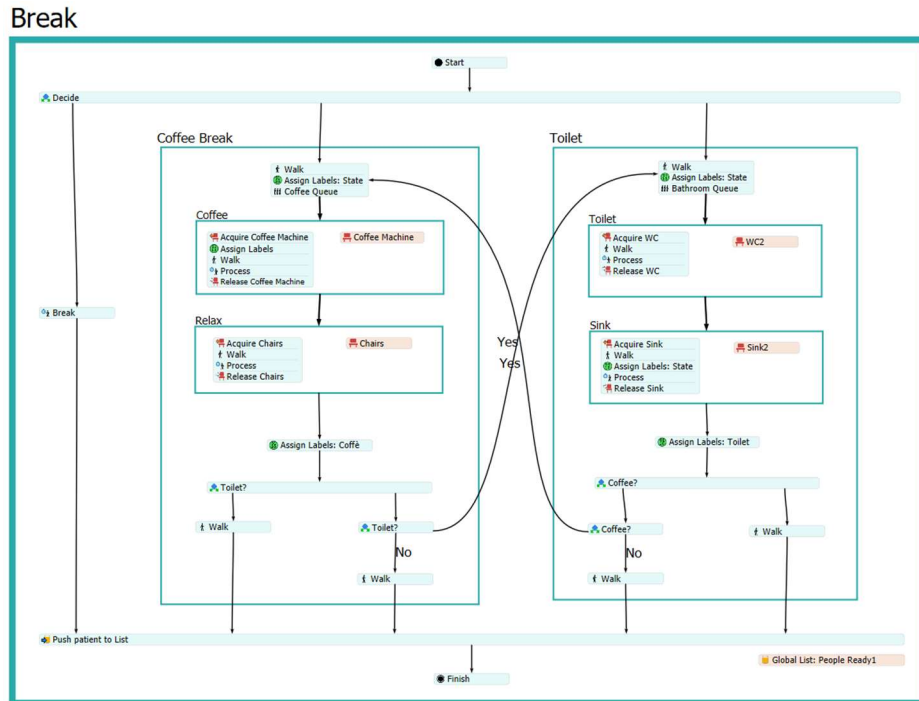


Figura 2.13: Poces flow completo dell'intervallo.

Il sotto-processo relativo all'intervallo prevede tre rami distinti, gli studenti vengo distribuiti su questi rami tramite un blocchetto *Decide*. Per ottenere una distribuzione casuale, quest'ultimo va configurato con **Sent Token To > Random Connector**.

Il primo ramo è relativo a quegli studenti che durante l'intervallo rimangono semplicemente seduti al loro posto, il blocchetto *Process* è configurato con un tempo fisso e pari alla durata dell'intervallo, cioè 15 minuti. Gli altri due rami fanno riferimento alle attività “prendere un caffè” e “andare ai servizi”.

Tutti i token in uscita da questi rami si riuniscono nel blocchetto “Push Token to List” con cui si sincronizzano tutti i token prima dell'inizio della lezione sfruttando lo stesso metodo già descritto (Figura 2.6).

2.3.4.1 Attività svolte durante l'intervallo

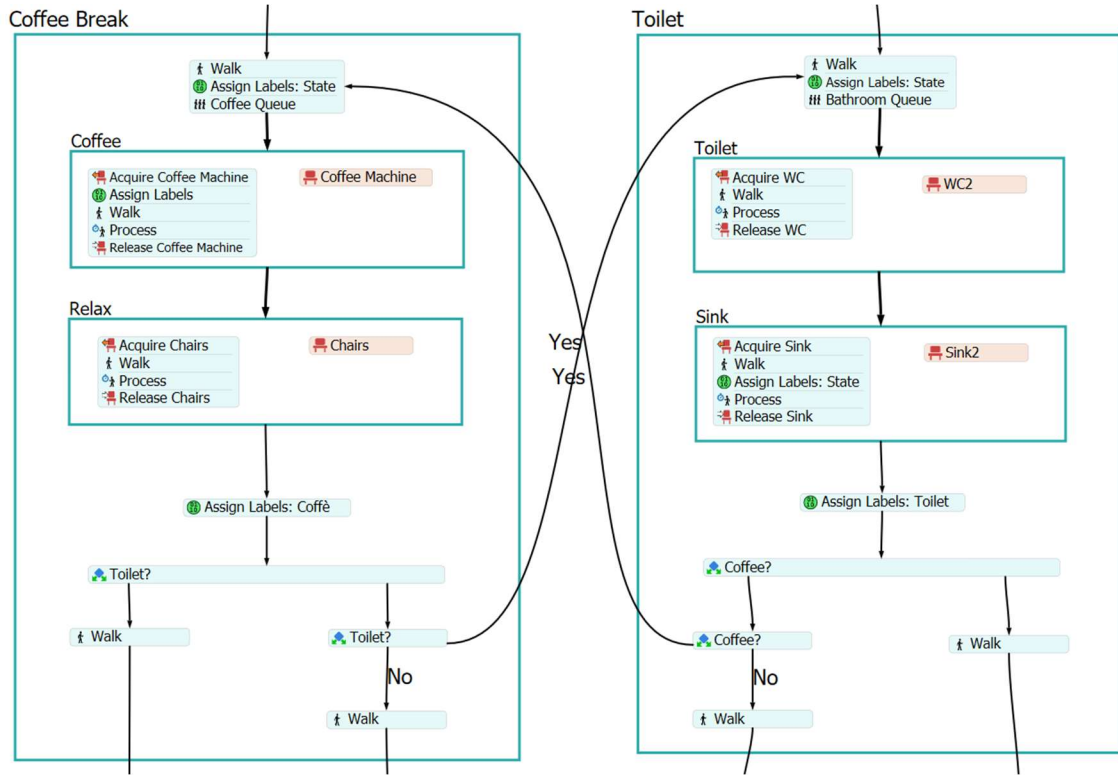


Figura 2.14: Attività svolte durante l'intervallo.

In questo caso non è necessario ricorrere a una distribuzione di probabilità che descriva ogni quanto un evento si verifica, è infatti sensato supporre che, non appena comincia l'intervallo, gli studenti che devono andare ai servizi si mettano direttamente in coda, così come quelli che devono prendere un caffè si dirigano immediatamente verso le macchinette.

Il process flow dei due rami in questione è abbastanza lineare, ed è illustrato in Figura 2.14. Si noti che dopo aver preso il caffè gli studenti trascorrono del tempo a rilassarsi sulle sedie del corridoio. Naturalmente le durate di ciascuna attività rispecchiano le assunzioni svolte, elencate in Tabella 2.1.

Si è sfruttata l'attività *Decide* per includere anche il caso in cui uno studente che ha preso il caffè vada poi anche in bagno e viceversa: un connettore riporta il token all'inizio del ramo desiderato. Il blocchetto *Assign Labels* al termine di ciascuno dei due rami assegna un'etichetta al token che segnali che quello studente è già andato ai servizi o che ha già preso il caffè, in questo modo si evita che uno studente che è già andato in bagno ci torni di nuovo oppure che uno studente che ha già bevuto il caffè ne prenda un secondo. Le attività "Toilet?" e "Coffee?" distribuiscono infatti i token in modo adeguato a seconda che questi presentino o meno le etichette citate.

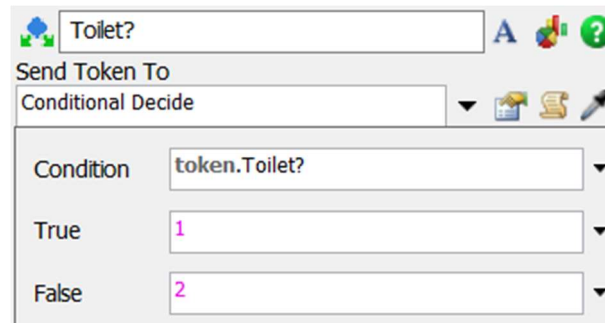


Figura 2.15: Configurazione blocchetto Decide.

2.3.5 Personale di passaggio nel corridoio

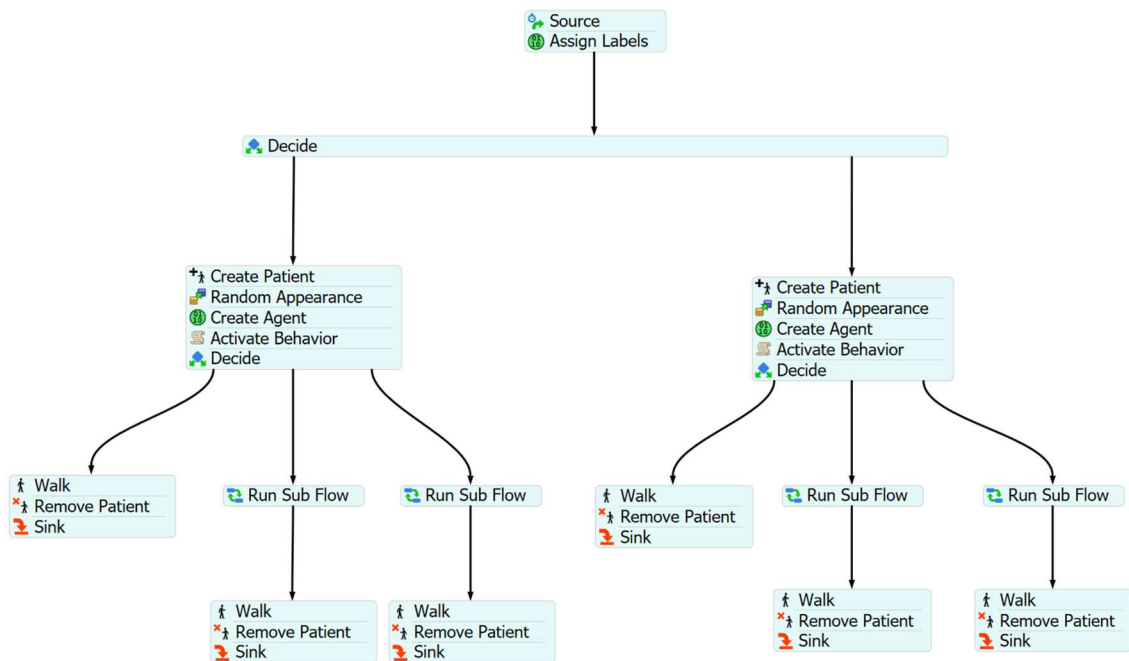


Figura 2.16: Process Flow completo relativo al personale di passaggio nel corridoio.

Il blocchetto Source genera un token secondo la distribuzione di probabilità ipotizzata in Tabella 2.2. Poiché gli ingressi nel corridoio sono due, si avranno due rami perfettamente identici, con l'unica differenza della porta di ingresso nella quale l'agente viene creato, e la porta dalla quale esce.

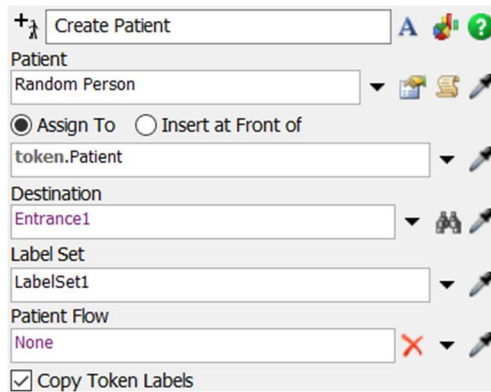


Figura 2.17: Configurazione blocchetto Create Patient.

Dopodiché, sempre in maniera casuale grazie all'attività *Decide*, l'agente potrà semplicemente attraversare il corridoio, oppure andare ai servizi, oppure prendere un caffè, per poi lasciare la simulazione. Anche in questo caso si è sfruttata la funzione del *Run Sub Flow* per separare queste attività e conferire leggibilità al modello.

In Figura 2.18 si può osservare il dettaglio delle attività svolte dal personale di passaggio, realizzate in modo identico a quelle già implementate nel process flow principale.

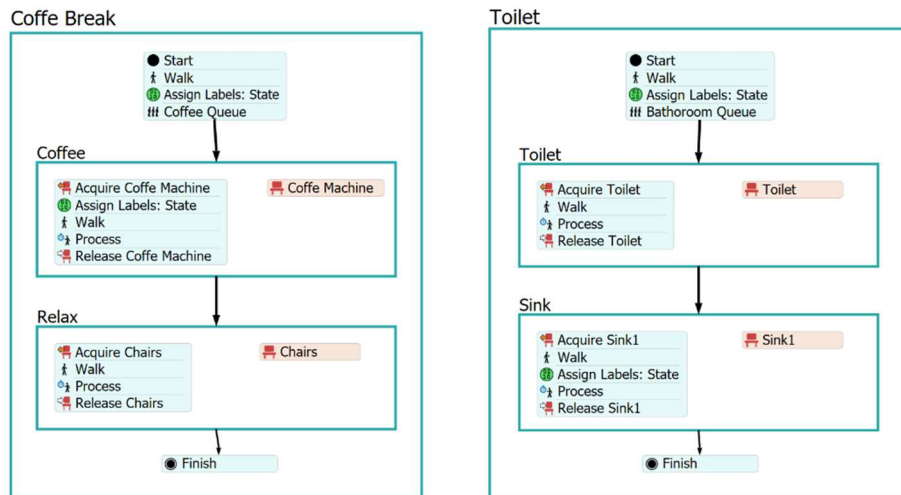


Figura 2.18: Attività svolte dal personale di passaggio nel corridoio.

2.4 Studio di prossimità

2.4.1 Modulo Agent System

Per effettuare lo studio di prossimità si è sfruttato il modulo *Agent System*, implementato da FlexSim durante la pandemia, proprio con l'intento di fornire uno strumento per monitorare i contatti tra il personale nelle aziende.

Dal toolbox si è inserito un *Proximity Agent System*, il quale introduce un raggio di prossimità della dimensione voluta attorno a coloro che vengono riconosciuti come “Agent” (in linguaggio FlexSim si parla di *Agent* e di *Neighbor*). Il software prevede che ogni agente occupi un volume di ingombro ben definito con la forma di un parallelepipedo.

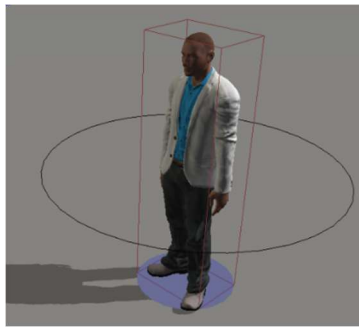


Figura 2.19: Ingombro e raggio di prossimità di un Agent.

Il sistema è in grado di individuare quando un raggio di prossimità di un Agent interseca il volume di ingombro di un suo Neighbor, andando così a rilevare il contatto.

Il *Proximity Agent System* è stato configurato nel seguente modo:

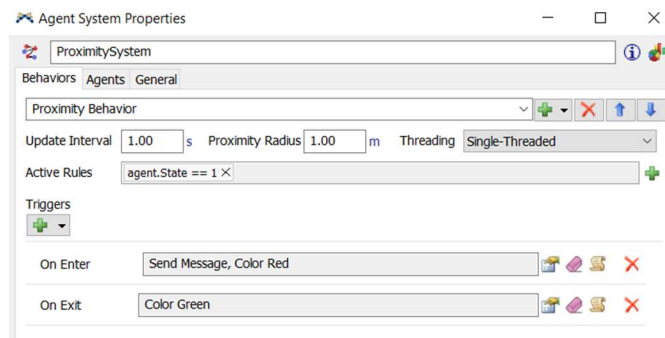


Figura 2.20: Configurazione delle proprietà del Proximity Agent System.

Si sottolineano i seguenti aspetti:

- In Figura 2.20 il raggio di prossimità è stato impostato della dimensione di 1 metro, ma, come si vedrà in seguito, sarà indagato anche il caso in cui questo venga aumentato a 2 metri.
- È prevista una regola alla voce **Active Rules**: il sistema di rilevamento dei contatti è attivo solo quando l'Agent presenta l'etichetta "State" con valore pari a 1, è sospeso in tutti gli altri casi. Come vedremo a breve, infatti, è necessario sospendere questo studio in alcune situazioni.
- Sono stati introdotti due *trigger* di colorazione dell'Agent, uno in entrata e l'altro in uscita. Per dare una maggiore immediatezza di visualizzazione si è fatto in modo che l'agente si colori di rosso quando il suo raggio di prossimità viola il volume di ingombro di un vicino (**On Entry > Color Red**); si colori invece di verde quando il contatto termina (**On Exit > Color Green**). Grazie a questo accorgimento si avrà che tutti gli agenti che sono impegnati in un contatto sono colorati di rosso, quelli invece che si trovano ad una distanza superiore a quella minima da qualunque altro vicino sono colorati di verde.

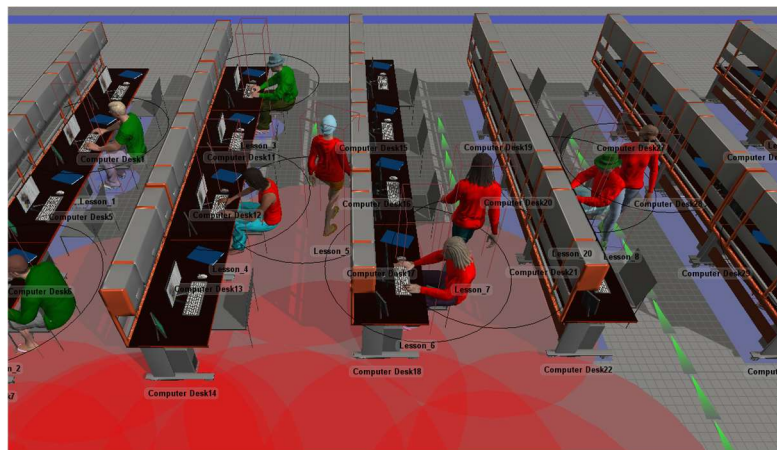


Figura 2.21: Gli agenti coinvolti in un contatto sono colorati di rosso.

- In corrispondenza di *On Entry* è stato introdotto un ulteriore *trigger* del tipo *Send Message*: **agent.object** manda il messaggio, mentre **Model.find("HeatMap")** ne è il destinatario. Ogni volta che un agente entra a contatto con un suo vicino viene mandato un messaggio ad un oggetto della simulazione denominato "HeatMap" (può essere un qualsiasi oggetto, in questo caso un piano). Questo oggetto introdotto appositamente nel 3D, viene configurato in modo tale che, quando riceve un messaggio in ingresso colori di rosso la mesh in corrispondenza del punto nell'ambiente dove il contatto è avvenuto. Per fare in modo che questo accada si ricorre ancora una volta ai trigger.

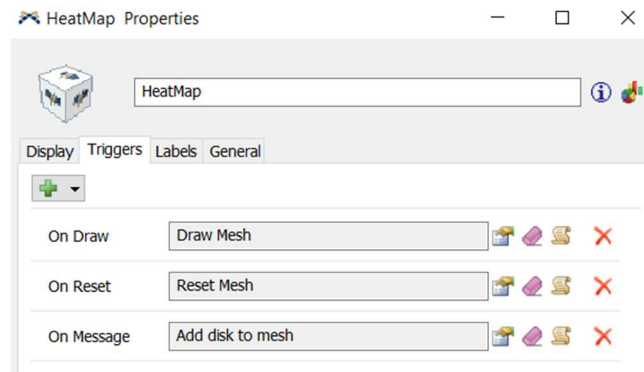


Figura 2.22: Configurazione proprietà HeatMap

Lo strumento “HeatMap” implementato è molto utile per valutare eventuali “punti caldi” dove il contatto avviene frequentemente, sono questi i punti dove bisognerà prestare attenzione ed eventualmente prendere provvedimenti.



Figura 2.23: Simulazione in stadio avanzato. In rosso i luoghi dove il contatto è avvenuto frequentemente.

2.4.2 Definizione degli Agent

Per poter effettuare lo studio di prossimità bisogna ora indicare a chi sono gli elementi della simulazione che devono essere individuati come Agent, e dunque monitorati nei contatti. Inserire gli assistenti all’interno del *Proximity Agent System* è molto semplice, poiché questi sono considerati risorse fisse. Si può fare direttamente dalla finestra delle proprietà del *Proximity Agent System*, nella sezione **Agents**, attraverso il sistema di campionamento.

Non è altrettanto immediato introdurre gli studenti; questi infatti vengono generati dal process flow, prima sottoforma di token, poi convertito in studente nel 3D attraverso la funzione *Create Patient*. In riferimento alla figura Figura 2.4 nella quale gli studenti vengono fisicamente creati, si devono associare due blocchetti fondamentali. Un blocchetto *Assign Labels* per fare in modo che lo studente venga considerato un'Agent del *Proximity Agent System* implementato, e un blocchetto *Custom Code* con il quale il comportamento viene effettivamente attivato nella simulazione (**Control > Agent System > Activate Behavior**).

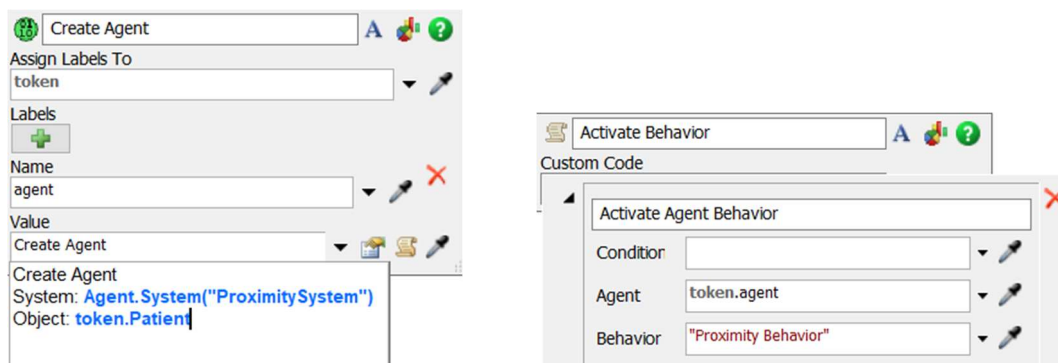


Figura 2.24: Creazione agente e attivazione del comportamento.

Affinché si attivi lo studio di prossimità è necessario verificare un'ultima condizione, dovuta alla regola introdotta in precedenza: l'agente deve presentare un valore dell'etichetta "State" pari a 1. All'inizio della fase di registrazione (Figura 2.5) si introduce allora un blocchetto *Assign Labels* in cui ad ogni token viene assegnata questa etichetta di valore unitario.

Il raggio di prossimità non è in grado di valutare la presenza di un ostacolo (come ad esempio un muro) per cui se due studenti si trovassero entro un metro di distanza, ma da lati opposti di un muro, il contatto verrebbe comunque registrato. In particolare, il problema si presenta quando due studenti sono al WC: i servizi hanno una dimensione molto ridotta, per cui quando due studenti sono in bagni diversi sono molto vicini in linea d'aria, ma in realtà la situazione non presenta nessun rischio di contagio, essendo questi separati da un muro. Prima di entrare in bagno, allora, si aggiornerà a zero il valore dell'etichetta "State", sospendendo così il *Proximity Agent System*, per poi riportarlo a 1 quando lo studente esce dalla stanza (si veda Figura 2.9).

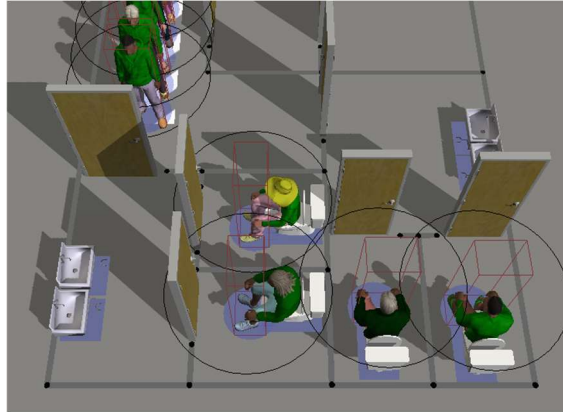


Figura 2.25: Quando gli studenti sono in bagno il Proximity Agent System viene sospeso.

C'è un'altra occasione in cui il conteggio dei contatti ravvicinati viene sospeso: cioè quando gli studenti sono in coda ad attendere il loro turno per andare in bagno, o per prendere il caffè oppure per entrare in aula. In FlexSim non è possibile infatti ordinare agli studenti di mantenersi a distanza mentre sono in coda, ma in una situazione realistica è sensato immaginare che questi riescano tranquillamente a mantenere il distanziamento tra di loro, oltre al fatto che, dandosi le spalle, il rischio risulta ulteriormente ridotto. Le stesse etichette che annullano e riattivano il *Proximity Agent System* si ritrovano anche davanti a qualsiasi coda (si veda ad esempio Figura 2.9 oppure Figura 2.14).

2.5 Come raccogliere i dati dal modello

Il modello è a questo punto concluso, ma ancora non si è detto nulla sul modo in cui questo possa essere utilizzato per raccogliere le informazioni necessarie a ricavare gli indicatori introdotti nel paragrafo 2.1.

2.5.1 *Statistic Collector*

Per raccogliere i dati dalla simulazione si è sfruttato lo strumento di FlexSim chiamato *Statistic Collector*, con il quale si produce una tabella che allo scorrere della simulazione si aggiorna a seconda dei dati che raccoglie. Nello specifico in questa tabella si vogliono appuntare tutti i contatti ravvicinati e gli agenti che ne sono coinvolti.

Dopo aver creato uno *Statistic Collector* dal Toolbox questo dovrà essere configurato. Innanzitutto, nella sezione **Events** della finestra delle proprietà bisogna indicare qual è l'evento da monitorare, cioè

l'istante di inizio del contatto, e l'istante in cui termina. Per aggiungere questo evento bisogna campionarlo direttamente dall'albero dei dati (al quale si accede tramite l'icona **Data tree view**): **model > Tools > ProximitySystem > variables > behaviors > Proximity Behavior**. Si selezionino entrambe le voci *On Enter Proximity* e *On Exit Proximity*.

Alla voce *Row Value(s)* si scriva `[[data.agent, data.neighbor]]`.

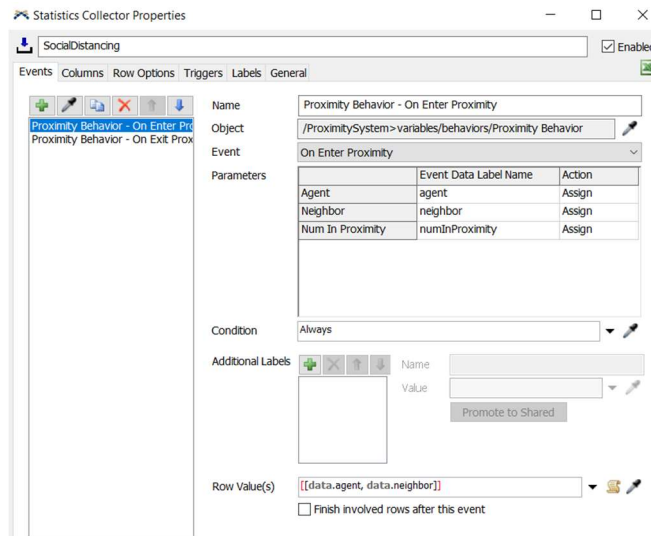


Figura 2.26: Sezione Event dello Statistic Collector.

A questo punto si passa alla sezione **Columns**, nella quale si indicano effettivamente i dati di interesse che si leggeranno nelle colonne della tabella. Si prevedono cinque colonne denominate: *Object*, *Neighbor*, *EnterTime*, *ExitTime*, *Duration*. Queste devono essere configurate nel modo che segue:

Name: Object Row Add Value: ID of Event Data Label Value Event Value: ID of Event Data Label Value	Name: Neighbor Row Add Value: ID of Event Data Label Value Event Value: ID of Event Data Label Value
Name: EnterTime Row Add Value: None Event Value: Model.time	Name: ExitTime Row Add Value: None Event Value: Model.time
Name: Duration Row Add Value: None Event Value: time() - data.row.enterTime	

Figura 2.27: Sezione Columns dello Statistic collector.

Nella colonna *Object* si registra il nome dell'agente coinvolto nel contatto, nella colonna *Neighbor* il nome del vicino, nella colonna *EnterTime* l'istante della simulazione in cui l'agente entra a contatto con il vicino, in quella *ExitTime* l'istante in cui esce dal contatto. Dalla differenza di questi due valori, colonna *Duration*, si ottiene la durata effettiva del contatto. Al termine della simulazione la tabella prodotta dallo *Statistic Collector* conterrà la mappatura di tutti i contatti che si sono verificati nel corso della simulazione e gli agenti che ne sono coinvolti; tale tabella denominata “*Social Distancing*” si presenta come in Figura 2.28.

SocialDistancing				
Object	Neighbor	EnterTime	ExitTime	Duration
agents/4	agents/7	8.00	9.00	1.00
agents/4	agents/5	8.00	9.00	1.00
agents/7	agents/5	17.00	18.00	1.00
agents/7	agents/6	17.00	18.00	1.00
agents/5	agents/6	26.00	27.00	1.00
agents/5	agents/3	26.00	27.00	1.00
agents/6	agents/3	34.00	35.00	1.00
agents/5	agents/7	36.00	37.00	1.00
agents/7	agents/5	36.00	39.00	3.00
agents/3	agents/8	42.00	43.00	1.00
agents/3	agents/6	53.00	55.00	2.00
agents/6	agents/3	53.00	55.00	2.00
agents/6	agents/8	61.00	64.00	3.00
agents/8	agents/6	61.00	64.00	3.00
agents/9	agents/10	128.00	129.00	1.00
agents/6	agents/9	140.00	141.00	1.00
agents/9	agents/6	140.00	141.00	1.00
agents/8	agents/9	143.00	144.00	1.00
agents/9	agents/8	143.00	144.00	1.00
agents/11	agents/12	147.00	148.00	1.00
agents/6	agents/10	150.00	151.00	1.00
agents/10	agents/6	150.00	151.00	1.00
agents/6	agents/11	157.00	159.00	2.00

Figura 2.28: Tabella di output dello *Statistic Collector*.

2.5.2 Calculated Table

I dati raccolti relativi ai contatti che si sono verificati durante la simulazione devono essere rielaborati per ottenere gli indicatori desiderati. Come si vedrà in seguito l'elaborazione viene svolta sfruttando un codice Matlab opportunamente sviluppato; ciò nonostante anche in FlexSim è possibile eseguire un'elaborazione dei dati. Si descrive qui come sfruttare le informazioni della tabella prodotta dallo *Statistic Collector* per ricavare alcuni indicatori caratteristici del modello; per far ciò si sfrutta un altro strumento di FlexSim per l'analisi dei dati avanzata chiamato *Calculated Table*.

In fase di configurazione è necessario indicare la tabella primaria che si vuole rielaborare (in questo caso quella prodotta dallo *Statistic collector* denominata “*SocialDistancing*”), dopodiché si passa a definire il metodo di aggregazione dei dati:

The screenshot shows the 'Metrics' configuration window. It contains three sections, each for a different metric:

- Metric Name:** TotalTime
- Metric Layout:** Add a new column for this metric
- Aggregation:** Sum of Duration
- Metric Name:** ProximityCount
- Metric Layout:** Add a new column for this metric
- Aggregation:** Count of Duration
- Metric Name:** AvgTimeInProximity
- Metric Layout:** Add a new column for this metric
- Aggregation:** Average of Duration

Figura 2.29: Calculated Table

Nella colonna *TotalTime* si sommano le durate dei contatti, nella colonna *ProximityCount* si conteggiano invece i contatti, mentre dalla media delle durate si ottiene il tempo medio per contatto, (colonna *AvgTimeInProximity*).

Dal momento che si è interessati a conoscere questi parametri per ciascun agente della simulazione preso singolarmente, nella sezione **Partitions/Sorting** si indica la partizione *Object (Single Column > Partition)*. Introducendo questa partizione il sistema valuterà gli indici per ogni diverso *Object* (ovvero per ogni agente).

Infine, si possono realizzare dei diagrammi, associati ai valori calcolati tramite la *Calculated Table*, in questo modo salterà subito all’occhio quali agenti si trovano in una situazione di maggior rischio.

Interessante anche l’istogramma nel quale i vari contatti vengono raggruppati a seconda della loro durata (come prevedibile i contatti più frequenti sono quelli di durata molto breve).

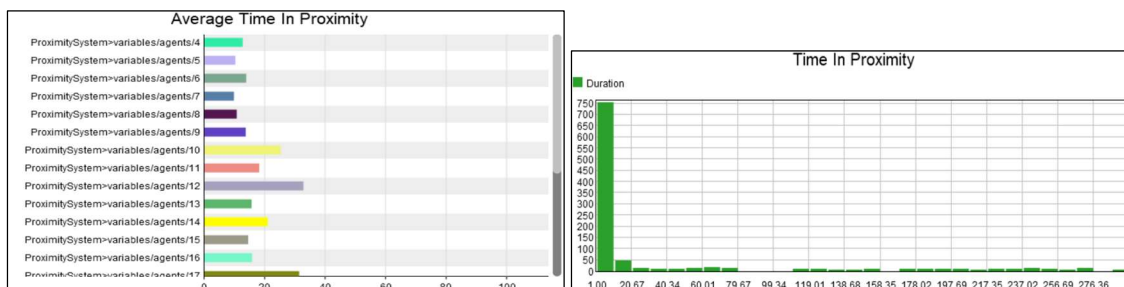


Figura 2.30: Diagrammi realizzati con FlexSim.

2.6 Verifica e validazione del modello

Per verificare la coerenza e consistenza del modello si è fatto ampiamente uso dell'ambiente d'animazione di FlexSim. Questo è stato fatto in maniera iterativa durante tutto il processo di modellazione: di volta in volta che una macro-attività veniva aggiunta al Process flow, si andava a sincerarsi che essa venisse svolta nel modo corretto nell'ambiente 3D.

Una volta ultimato il modello è stato più volte analizzato con test di consistenza facendolo scorrere lentamente nelle fasi più critiche e assicurandosi che non sorgessero contraddizioni interne; una particolare attenzione è stata dedicata al rilascio dei loop, il nodo più delicato del processo.

Non è stato possibile verificare le assunzioni svolte in fase di progettazione direttamente sul campo, ma si è constatato come queste fossero rispettate all'interno dell'ambiente di simulazione. È necessario precisare che per quanto riguarda la frequenza con cui una domanda viene rivolta a un assistente, l'ipotesi si mantiene verificata fintanto che non aumenta eccessivamente il numero di domande per studente. Una domanda, infatti, introduce un certo ritardo nella distribuzione (pari al tempo della domanda stessa), ritardo comunque poco rilevante se rapportato alla durata dell'intera simulazione. Se però il numero di domande per studente aumenta eccessivamente, il ritardo potrebbe diventare più consistente e non più trascurabile.

Si sono svolti test di sensitività per assicurarsi che gli output reagissero correttamente a una variazione dei parametri di input: si è provato ad esempio ad impostare il raggio di prossimità dell'*Agent System* su valori molto grandi, registrando un conseguente incremento elevato degli indicatori che valutano la frequenza dei contatti; al contrario impostando il raggio di prossimità su un valore molto piccolo si ottiene una riduzione vistosa degli stessi indicatori. Si è anche provato a disattivare le varie label che governano i comportamenti degli agenti della simulazione, assicurandosi che le conseguenze di tali modifiche fossero coerenti.

Infine, per valutare la stabilità del modello, si è provato a variare numerosi parametri constatando come questo non produca nessun tipo di contraddizione.

Il processo è stato protratto in modo iterativo durante tutto il processo di modellazione, calibrando di volta in volta i parametri nel modo più adeguato al fine di generare un modello che ricalcasse nel modo più fedele possibile la lezione in laboratorio.

Non è stato possibile ricorrere al sistema reale per effettuare la validazione degli output; questo fa sì che i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale siano solo indicativi e non stime del tutto attendibili di quello che accadrebbe nella realtà. Ad ogni modo i risultati sono comunque interessanti per valutare il rispetto del distanziamento fisico all'interno di un'aula universitaria.

Per confrontare gli output del modello con quelli del sistema reale si potrebbe ricorrere, ad esempio, ai sistemi di tracciamento dei contatti elencati nel paragrafo 1.1.4. Prendendo un'aula popolata da pochi studenti, ai fini di rendere l'indagine più agile possibile, si monitorano i contatti che li vedono coinvolti su un certo intervallo di tempo, procedendo poi con il ricavare i relativi indicatori di rischio. A questo punto si configura il modello in modo tale che ricalchi fedelmente questa configurazione del sistema reale e si effettua una raccolta dati su un numero sufficientemente elevato di replicazioni della simulazione. Si esegue quindi un confronto tra i risultati ottenuti dal modello di simulazione con quelli raccolti sul campo, constatando così se gli output della simulazione sono stime fedeli di quello che accade realmente. Ovviamente i risultati non possono sovrapporsi perfettamente, ma devono essere accettabili entro un certo livello di fiducia. Qualora questo non dovesse verificarsi sarà necessario procedere con una ricalibrazione dei parametri di input.

Una volta che il modello è stato validato potrà essere sfruttato per effettuare indagini più complesse e approfondite su scenari anche molto distanti da quello analizzato in fase di validazione, fiduciosi che i risultati ottenuti siano stime reali di quello che accadrebbe realmente.

Capitolo 3

Analisi del modello

3.1 Premesse

In questo capitolo si discutono i risultati ottenuti dal modello descritto nel Capitolo 2. L'analisi procederà su due fronti: verranno analizzati separatamente i casi in cui il raggio di prossimità è posto a 1 metro, così da valutare soltanto i contatti più ravvicinati, e verranno proposti gli indicatori caratteristici del modello anche nel caso in cui questo venga aumentato a 2 metri.

Le indagini portate avanti terranno conto delle varie categorie di agenti che popolano la simulazione: studenti, assistenti di laboratorio e personale di passaggio nel corridoio.

Il sistema analizzato è un sistema con terminazione, non è quindi necessario individuare una lunghezza adeguata della simulazione, in quanto questa coincide con la durata della lezione stessa.

Sono state svolte 1000 replicazioni, un numero sufficientemente elevato da garantire risultati affidabili.

3.1.1 Indicatori di rischio

Si sono individuati degli indici, denominati “indicatori di rischio”, che quantificano il rischio di contagio connesso allo specifico scenario che di volta in volta viene analizzato attraverso le simulazioni.

- *Tempo totale a contatto*: con questo indicatore si indica il tempo complessivo in cui un agente rimane a contatto ravvicinato con tutti gli altri agenti della simulazione. Si ottiene sommando le durate di tutti i contatti ravvicinati che coinvolgono tale agente.
- *Numero di contatti ravvicinati*: conteggia il numero effettivo di contatti cui un agente è sottoposto, indipendentemente dalla loro durata.
- *Durata media contatto*: è il rapporto tra il tempo totale a contatto e il numero di contatti.
- *Numero agenti per $t = 80\%$* : è il numero di agenti con cui uno studente trascorre l'80% del suo tempo totale a contatto. Si è notato infatti che, mediamente, uno studente concentra la maggior parte del suo tempo a contatto con una cerchia ristretta di studenti. Questo indice rispecchia

anche il numero probabile di persone che un soggetto positivo è potenzialmente in grado di infettare.

- *Tempo di contatto per coppia*: è il tempo medio di contatto che uno studente trascorre con un singolo agente tra quelli con cui concentra l'80% del suo tempo totale.
- *Numero coppie $t > x$ minuti*: indica quante coppie di agenti della simulazione si mantengono al di sotto della distanza minima di sicurezza per un tempo prolungato (3, 10 o 15 minuti a seconda dei vari casi).

Tali indicatori vengono calcolati dapprima per ogni singolo agente della simulazione, dalla media su tutti gli agenti si ottiene l'indice di rischio del modello; svolgendo invece la media considerando soltanto una certa categoria di agenti si individua un indicatore caratteristico di quella specifica famiglia.

3.1.2 Campioni di dati

Gli indicatori ottenuti tramite un'unica replicazione della simulazione sono del tutto inaffidabili, poiché soggetti a una grande variabilità dovuta alla natura aleatoria dei parametri di input del modello, non sono quindi stime attendibili del rischio nel sistema reale. Per ottenere allora dei risultati validi è necessario effettuare molte replicazioni, raccogliendo così dei campioni dai quali è possibile stimare degli indicatori realistici. Con campione si intende un vettore di n elementi, dove n è il numero di replicazioni eseguite, e tale per cui ogni termine coincide con il valore dell'indicatore medio ottenuto dall' n -esima replicazione. Ad esempio, il campione relativo all'indicatore *tempo totale a contatto* è un vettore di mille termini, il primo termine è il tempo totale a contatto medio ottenuto nella prima replicazione, il secondo termine è il tempo totale medio ricavato nella seconda replicazione e così via.

Se il numero di replicazioni è sufficientemente elevato è realistico immaginare che le varie misurazioni si distribuiscano normalmente attorno ad un valore medio e con una certa dispersione: la media di tale distribuzione può essere considerata una stima attendibile dell'indicatore analizzato nel modello; tale stima sarà tanto più probabile quanto meno sono dispersi i dati del campione studiato.

Alla luce di tutto ciò, di volta in volta che si analizzano gli indicatori di un diverso scenario del modello, vengono forniti anche i parametri statistici della distribuzione normale che caratterizza il campione di dati raccolto per quello specifico indicatore.

A livello pratico con FlexSim è possibile eseguire diverse replicazioni di uno stesso scenario attraverso lo strumento chiamato *Experimenter*.

3.1.3 Codice Matlab per l'elaborazione dei dati e la raccolta dei campioni

Nel paragrafo 2.5.2 si è visto come ricavare gli indicatori di *tempo totale a contatto*, *numero di contatti ravvicinati* e *durata media contatto* per ogni singolo agente della simulazione e relativamente ad una singola replicazione. Sfruttando le proprietà dell'Experimenter è possibile condurre indagini anche complesse, individuando indicatori medi di molteplici replicazioni, tuttavia si è preferito rielaborare i dati attraverso un programma Matlab opportunamente sviluppato (il listato è riportato in Appendice).

Il codice richiede in input la mappatura completa di tutti i contatti che si sono realizzati in tutte le replicazioni effettuate e gli agenti che ne sono coinvolti. Dopo aver effettuato il numero di replicazioni desiderate attraverso l'Experimenter, le informazioni cercate possono essere prelevate direttamente da quest'ultimo (**View Results > Statistics Tabela > SocialDistancing**), che fornisce tutte le tabelle *Social Distancing* (descritta nel paragrafo 2.5.1) delle varie replicazioni, una di seguito all'altra.

È inoltre necessario indicare il numero di replicazioni effettuate e il numero di agenti che popolano la simulazione per ciascuna famiglia.

Il programma Matlab calcola tutti gli indicatori di rischio per ogni agente della simulazione in ogni singola replicazione. Per calcolare gli indicatori di *tempo totale a contatto*, *numero di contatti ravvicinati* e *durata media contatto* è sufficiente sfruttare le informazioni già contenute nella tabella di input; per determinare invece gli altri indicatori di rischio è necessario impostare uno studio per coppie di agenti. Dapprima sono state individuate tutte le possibili coppie di agenti della simulazione (un numero relativamente elevato, se si considera che queste sono tutte le combinazioni semplici che si possono avere con gli agenti che occupano l'aula). Per ciascuna coppia si è poi individuato il tempo totale di contatto; è chiaro che molte coppie non si incrociano per tutta la durata della simulazione, molte altre, invece, lo faranno solo per pochi secondi: calcolando il valore medio del tempo di contatto per coppia considerando la totalità delle coppie, si otterrà allora un valore molto basso.

Si è allora isolato per ogni studente il numero di persone con le quali quest'ultimo trascorre l'80% del suo tempo di contatto; dunque si è svolto il rapporto tra l'80% del tempo totale e il numero di persone con cui questo tempo viene trascorso, deducendo così l'indice di *tempo di contatto per coppia* cercato, molto più significativo di quello che fa riferimento alla totalità delle coppie possibili.

Infine, avendo a disposizione le informazioni relative a tutte le coppie, risulta molto semplice conteggiare le coppie che superano un certo tempo a contatto reciproco.

Una volta calcolati tutti gli indicatori per ciascun agente, il codice rielabora e raggruppa queste informazioni per fornire i campioni di dati per ogni indicatore. Si consideri, ad esempio, l'indicatore *tempo totale a contatto* e la categoria degli studenti. Su ogni replicazione è possibile svolgere la media

di tale indicatore considerando solo gli studenti, ottenendo così l'indicatore di tempo totale a contatto caratteristico di questa categoria e relativo ad una specifica replicazione. Ripetendo lo stesso procedimento per ciascuna replicazione, si ottiene il campione dell'indicatore *tempo totale a contatto* per la categoria degli studenti. Questo stesso procedimento viene ripetuto per ciascun indicatore e per tutte le famiglie di agenti: assistenti, studenti, personale di passaggio e tutti gli agenti della simulazione.

Una volta che si hanno a disposizione i campioni di dati, è possibile dedurre gli indicatori medi caratteristici del modello con un certo livello di fiducia e una certa dispersione.

Il codice fornisce anche gli indicatori medi su tutte le replicazioni relativi ad ogni agente della simulazione preso singolarmente.

3.2 Risultati del modello per raggio di prossimità di 1 metro

3.2.1 Analisi per categoria di agenti

Prima di illustrare gli indicatori di rischio medi per l'intero modello, è opportuno visualizzare gli stessi indicatori per ogni singolo agente della simulazione. Questo permette infatti di comprendere come gli stessi indici si distribuiscono tra le tre diverse “categorie” di agenti: assistenti, studenti e personale di passaggio nel corridoio. In questa prima analisi si considerano gli indici relativi a un raggio di prossimità di 1 metro.

Gli indici proposti nei diagrammi seguenti sono valori medi di mille replicazioni. L'indicatore *Durata media contatto*, essendo una media delle durate di tutti i contatti a cui l'agente è sottoposto, è affiancato dalla deviazione standard che ne indica la dispersione (anche questa calcolata come media delle deviazioni standard di mille replicazioni). Per questo motivo nel diagramma in Figura 3.3 si visualizza anche la deviazione standard dell'indicatore.

3.2 – Risultati del modello per raggio di prossimità di 1 metro

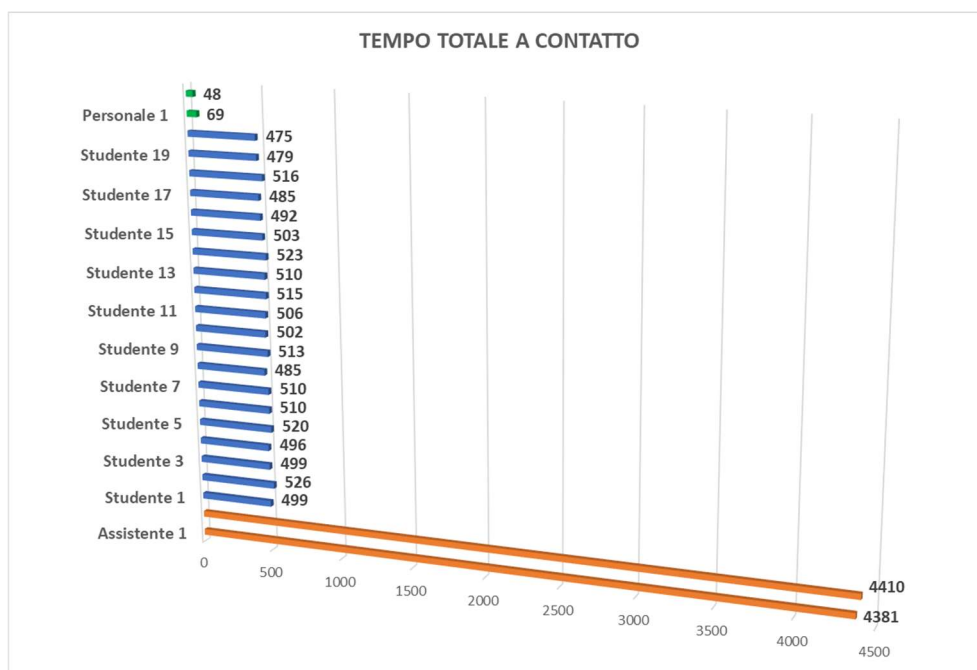


Figura 3.1: Diagramma a barre dell'indicatore "Tempo totale a contatto" per ciascun agente della simulazione.

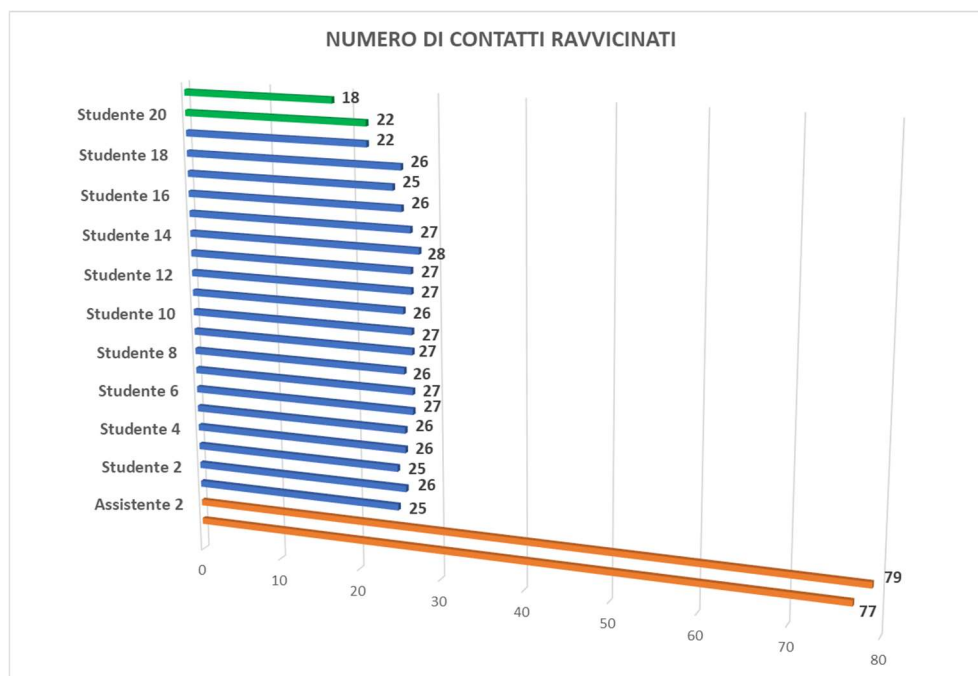


Figura 3.2: Diagramma a barre dell'indicatore "Numero di contatti ravvicinati" per ciascun agente della simulazione.

3.2 – Risultati del modello per raggio di prossimità di 1 metro

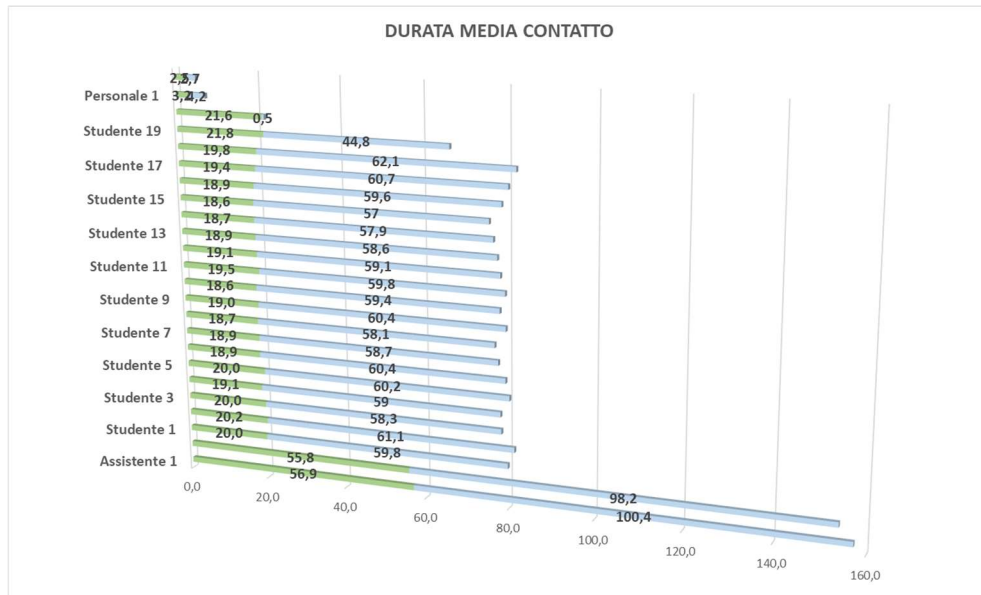


Figura 3.3: Diagramma a barre dell'indicatore "Durata media contatto" per ciascun agente della simulazione. Ogni valore medio è affiancato dalla relativa deviazione standard.

Appare evidente come l'indice che definisce la durata media dei contatti sia caratterizzato da una deviazione standard molto elevata, indicativo di una distribuzione con un alto grado di dispersione. Soffermendosi ad esempio sullo *studente 1*, questo è mediamente coinvolto in 25 contatti ravvicinati, la loro durata media è di 20,0 secondi, ma con una deviazione standard di 59,8 secondi. Ciò significa che solo in piccola percentuale i contatti avranno una durata pari alla media, la maggior parte avranno invece durata molto maggiore o molto minore di 20,0 secondi. Soprattutto nell'ottica in cui sono proprio i contatti più prolungati ad essere pericolosi, il valore medio in questione sottostima il rischio di contagio in modo inaccettabile.

Poiché un discorso simile può essere ripetuto per ciascun agente della simulazione, l'indice in questione risulta, di fatto, poco significativo. Alla luce di questo nelle successive indagini non verrà più analizzato, sostituito dal ben più eloquente indice di *tempo di contatto per coppia*.

3.2 – Risultati del modello per raggio di prossimità di 1 metro

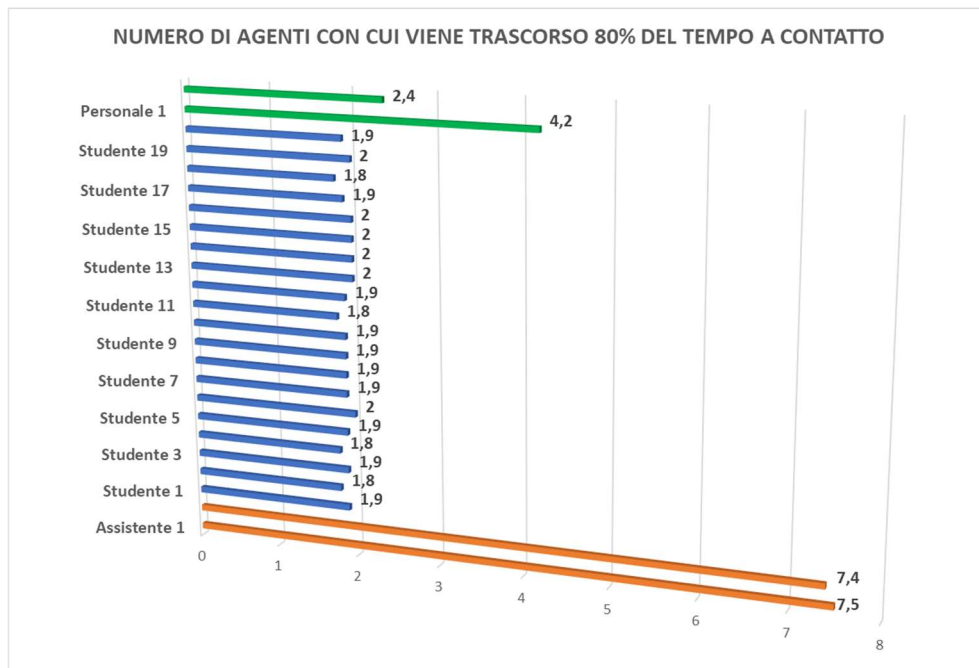


Figura 3.4: Diagramma a barre dell'indicatore "Numero agenti per $t=80\%$ " per ciascun agente della simulazione.

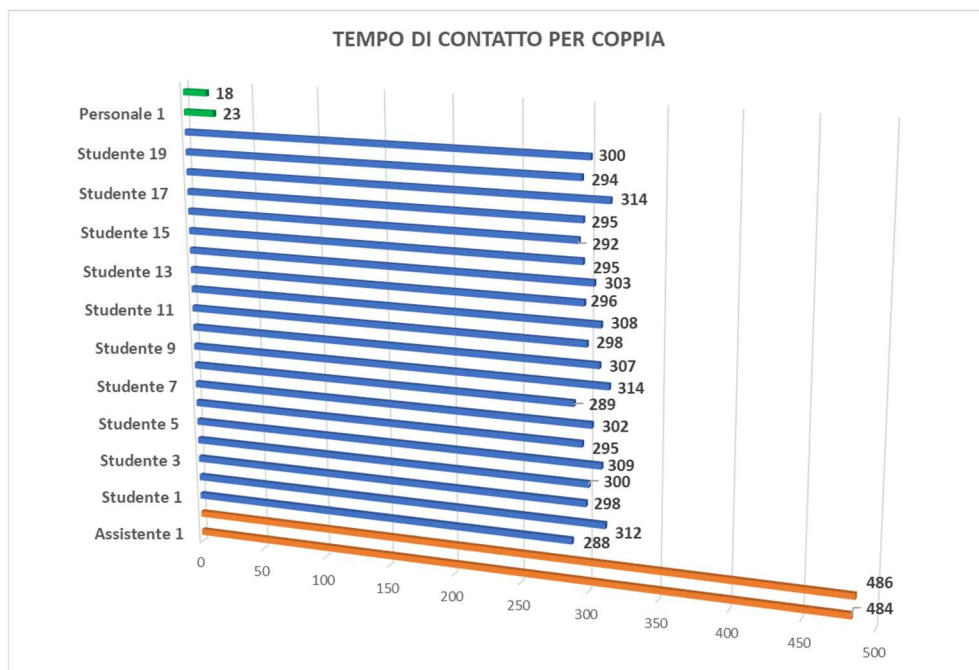


Figura 3.5: Diagramma a barre dell'indicatore "Tempo di contatto per coppia" per ciascun agente della simulazione.

3.2 – Risultati del modello per raggio di prossimità di 1 metro

Riprendendo l'esempio dello *studente 1*, questo trascorre l'80% del suo tempo totale di contatto con soli 1,9 studenti, con ciascuno dei quali rimane a contatto per 288 secondi.

Si tenga sempre presente che i valori numerici forniti fanno riferimento ad una media su mille replicazioni, per cui se si sfruttano i soli dati visualizzati nei diagrammi precedenti i risultati non sono perfettamente coerenti nel calcolo appena descritto (dividendo l'80% del tempo totale di contatto dello *studente 1* per 1,9 studenti, non si ottiene 288 secondi). Ovviamente il calcolo darebbe un risultato coerente se si considerasse la singola simulazione.

L'indice consente allora di capire il numero di persone che un agente positivo al virus sarebbe in grado di contagiare. Proseguendo con l'esempio analizzato, se lo *studente 1* fosse positivo al virus, soltanto 2 persone sarebbero effettivamente a rischio. In questo caso specifico tale rischio è comunque limitato, poiché con ciascuna di esse si mantiene al di sotto del metro di distanza per 288 secondi complessivi, poco meno di 5 minuti.

A questo punto è possibile calcolare la media degli indicatori, ai fini di individuare degli indici caratteristici dell'intero modello per ciascuna famiglia di agenti.

Nella raccolta dati che segue i dati sono stati convertiti in minuti.

Indicatori medi per categoria di agenti

<i>R=1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	
	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>
<i>Tutti gli agenti</i>	13,2	18,6	29,5	15,4	2,5	1,6	4,9	1,65
<i>Assistenti</i>	73,3	0,34	78,3	1,4	7,4	0	8,1	0,02
<i>Studenti</i>	8,4	0,24	25,9	1,6	1,9	0,1	5,0	0,14
<i>Personale di passaggio</i>	1,0	0,25	16,3	2,6	3,3	1,3	0,34	0,06

Tabella 3.1: Indicatori di rischio per categoria calcolati come media degli indicatori per ogni singolo agente. Gli indici fanno riferimento a un raggio di prossimità di 1 metro.

3.2 – Risultati del modello per raggio di prossimità di 1 metro

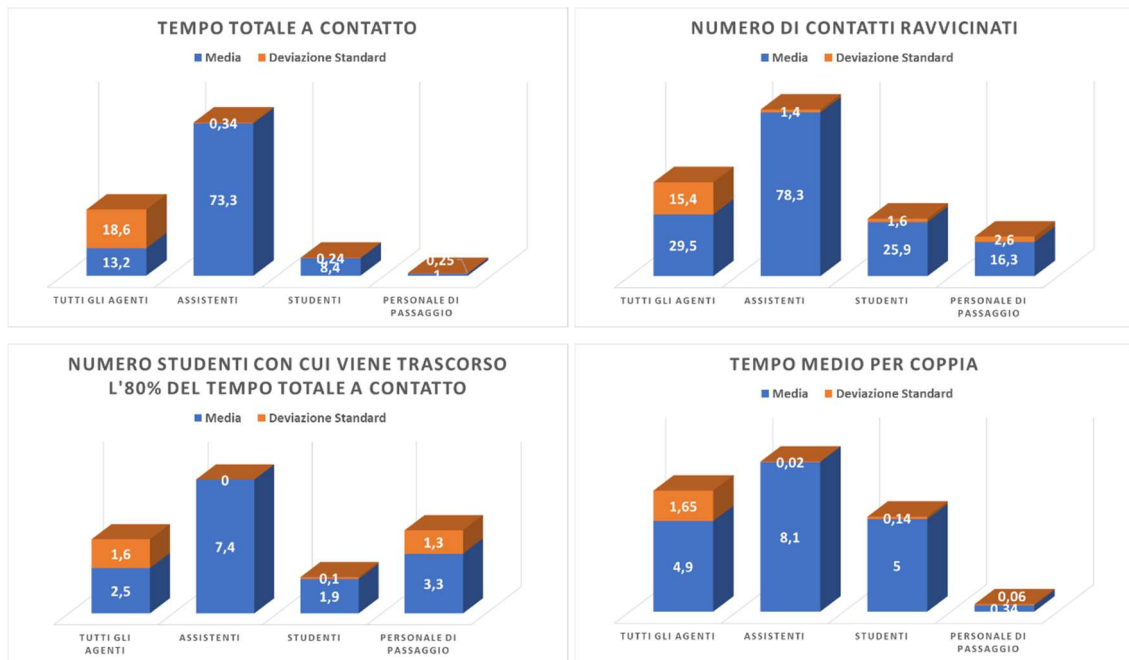


Figura 3.6: Diagrammi a barre relativi agli indicatori di rischio per ciascuna categoria.

Gli indicatori medi che considerano tutti gli agenti della simulazione sono piuttosto dispersi, ma sono comunque un parametro interessante per valutare il rischio intrinseco dell'ambiente analizzato e il rispetto dei provvedimenti, meno utili invece per valutare l'effettivo rischio di contagio. Conclusioni più concrete possono invece essere tratte se si osservano le righe che fanno riferimento alle singole categorie, in questo caso, infatti, la deviazione standard è molto contenuta, pertanto il valore medio costituisce una stima attendibile per quella specifica famiglia di agenti.

Nello specifico, gli assistenti rimangono a contatto ravvicinato inferiore a un metro con tutti gli studenti per un tempo totale pari a 73 minuti, distribuiti su oltre 78 contatti. Il valore elevato non sorprende affatto, se si considera che quest'ultimi trascorrono gran parte della lezione a rispondere alle domande degli studenti. Questi 73 minuti sono condensati su circa 7,4 studenti, con i quali si intrattengono al di sotto del metro di distanza per 8,1 minuti medi.

Relativamente al singolo studente, invece, questi si trova sottoposto a 8,4 minuti di contatto ravvicinato per circa 26 contatti medi. La maggior parte di essi sono trascorsi con soli 1,9 agenti, mentre il tempo medio per coppia è pari a 5 minuti.

Il personale che attraversa il corridoio è coinvolto invece in appena un minuto di tempo totale e 16,3 contatti. Complessivamente si trattiene maggiormente con altri 3,3 agenti, ma per un tempo molto breve di 0,34 minuti.

Nel complesso l'ambiente del laboratorio in cui sono previste misure di distanziamento fisico presente un rischio di contagio piuttosto contenuto; il maggior rischio, come prevedibile, è rappresentato dagli assistenti, ma anche nel loro caso si rimane ampiamente al di sotto dei 15 minuti normalmente indicati come necessari per determinare il contagio da coronavirus. Ad ogni modo, essendo gli assistenti dei dipendenti universitari, risulta più semplice monitorarne la salute sottoponendoli a periodici tamponi.

3.2.2 Distribuzioni campionarie

È già stato sottolineato come gli indicatori in Tabella 3.1 siano la media di tutti i valori ricavati attraverso mille replicazioni della simulazione. I valori proposti nel paragrafo precedente sono quindi una stima statistica che ha un certo livello di precisione.

Ogni replicazione produce un set di dati completo, pertanto, dopo aver eseguito 1000 replicazioni, per ogni indice di rischio si avrà un campione di mille termini. Tali campioni possono essere ricavati con il codice Matlab già descritto.

Avendo a che fare con campioni molto numerosi è plausibile che questi siano caratterizzati da una distribuzione normale dei dati. Per tale distribuzione è possibile definire il valore medio con il relativo livello di fiducia, la deviazione standard che ne caratterizza la dispersione, un valore minimo e uno massimo.

3.2.2.1 Tempo totale di contatto

<i>R=1 metro</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Tutti gli agenti</i>	13,1 < 13,2 < 13,3	1,9	5,9	19,2
<i>Assistenti</i>	72,6 < 73,3 < 74,0	11,2	30,9	104,7
<i>Studenti</i>	8,3 < 8,4 < 8,5	1,3	3,8	13,6
<i>Personale di passaggio</i>	0,9 < 1 < 1,1	1,8	0,0	16,5

Tabella 3.2: Tempo totale a contatto; parametri delle distribuzioni normali relative alle varie categorie.

3.2 – Risultati del modello per raggio di prossimità di 1 metro

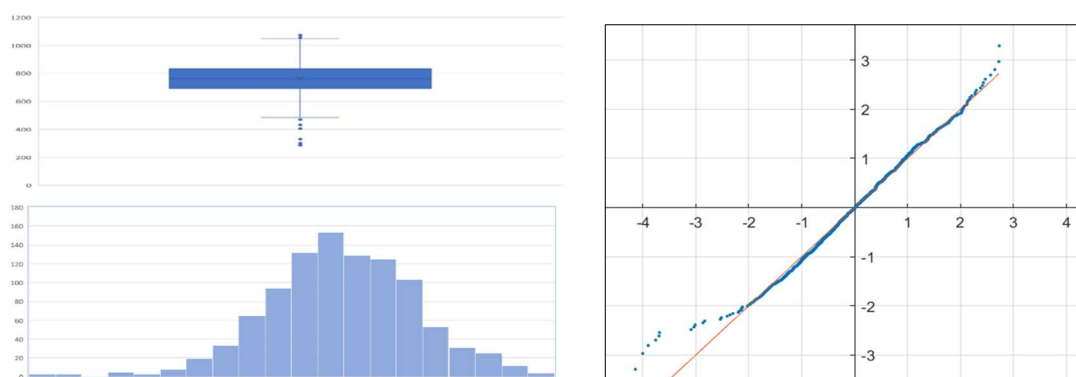


Figura 3.7: Tempo totale a contatto considerando tutti gli agenti: box-plot, istogramma di frequenza, test di normalità.

3.2.2.2 Numero di contatti ravvicinati

<i>R=1 metro</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Tutti gli agenti	29,3 < 29,5 < 29,7	3,6	13,5	40,8
Assistenti	77,5 < 78,3 < 79,1	12,6	30,5	113,5
Studenti	25,7 < 25,9 < 26,1	3,4	11,8	36,2
Personale di passaggio	15,8 < 16,3 < 16,8	8,0	1,0	59,0

Tabella 3.3: Numero di contatti ravvicinati; parametri delle distribuzioni normali relative alle varie categorie.

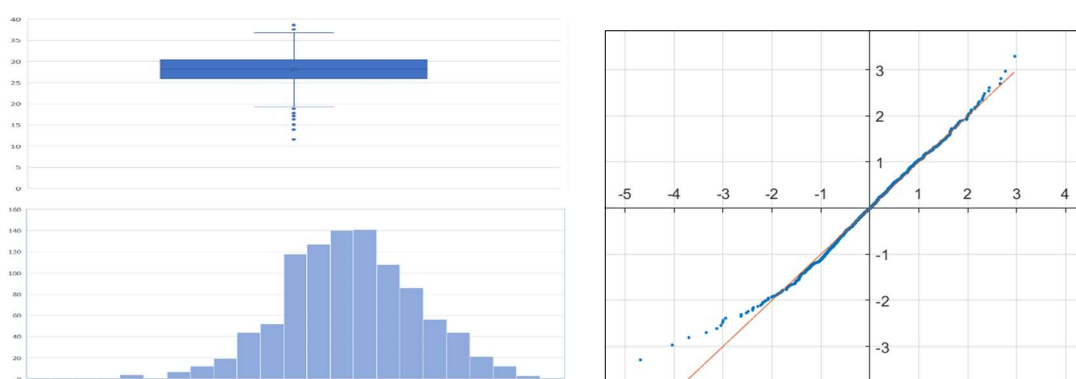


Figura 3.8: Numero di contatti ravvicinati considerando tutti gli agenti: box-plot, istogramma di frequenza, test di normalità.

3.2 – Risultati del modello per raggio di prossimità di 1 metro

3.2.2.3 Numero di agenti con cui viene trascorso l'80% del tempo totale a contatto

<i>R=1 metro</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Tutti gli agenti	2,47 < 2,49 < 2,51	0,4	1,7	3,8
Assistenti	7,3 < 7,4 < 7,5	1,0	4,5	10,5
Studenti	1,90 < 1,92 < 1,94	0,4	1,2	3,3
Personale di passaggio	3,2 < 3,3 < 3,4	1,8	1,0	10,5

Tabella 3.4: Numero agenti per $t = 80\%$, parametri delle distribuzioni normali relative alle varie categorie.

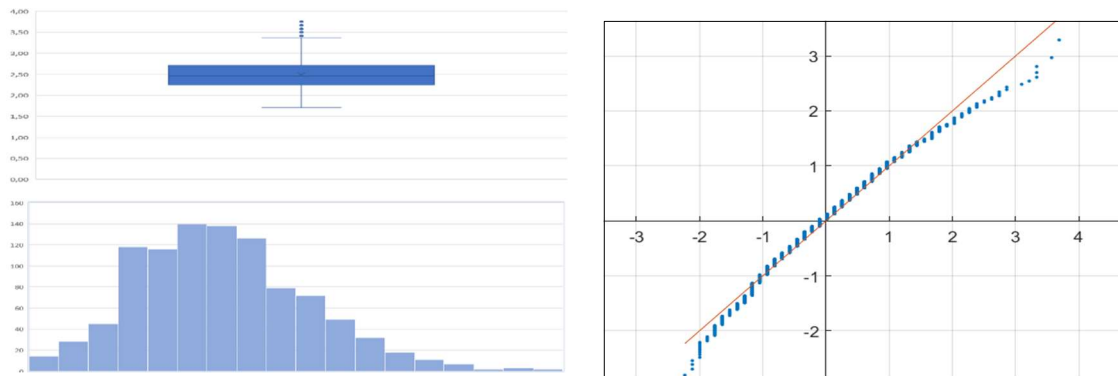


Figura 3.9: Numero agenti per $t = 80\%$ considerando tutti gli agenti: box-plot, istogramma di frequenza, test di normalità.

3.2.2.4 Tempo di contatto per coppia

<i>R=1 metro</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Tutti gli agenti	4,83 < 4,88 < 4,93	0,8	2,4	8,9
Assistenti	8,0 < 8,1 < 8,2	1,8	4,7	40,1
Studenti	4,9 < 5,0 < 5,1	0,1	0,8	2,3
Personale di passaggio	0,2 < 0,3 < 0,4	0,9	0,0	12,6

Tabella 3.5: Tempo di contatto per coppia; parametri delle distribuzioni normali relative alle varie categorie.

3.2 – Risultati del modello per raggio di prossimità di 1 metro

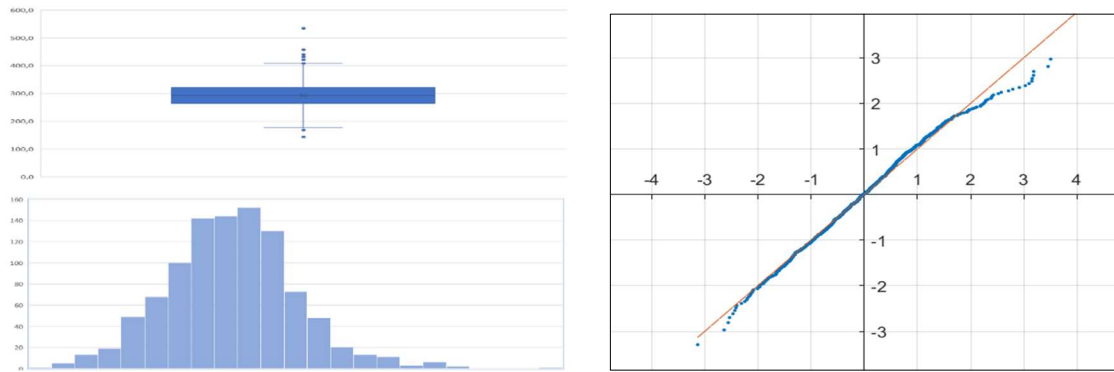


Figura 3.10: Tempo di contatto per coppia considerando tutti gli agenti: box-plot, istogramma di frequenza, test di normalità.

3.2.2.5 Numero di coppie coinvolte in contatti prolungati.

Come ultimo indicatore di rischio sono state conteggiate il numero di coppie di agenti della simulazione che superano un certo tempo limite cumulato al di sotto della distanza di 1 metro.

<i>Numero di coppie coinvolte in contatti prolungati</i>				
<i>R=1 metro</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>t > 3 min</i>	19,2 < 19,4 < 19,6	3,0	9,0	29,0
<i>t > 5 min</i>	11,5 < 11,7 < 11,9	2,6	2,0	20,0
<i>t > 10 min</i>	3,5 < 3,6 < 3,7	1,8	0,0	10,0
<i>t > 15 min</i>	0,7 < 0,8 < 0,9	0,8	0,0	4,0

Tabella 3.6: Numero di coppie coinvolte in contatti prolungati al di sotto di un metro di distanza; parametri delle distribuzioni normali.

Tenendo conto che il numero di possibili coppie è piuttosto elevato, (questo coincide con tutte le possibili combinazioni di tutti gli agenti della simulazione), è possibile affermare che il numero di coppie che rimangono a contatto per un tempo prolungato è decisamente contenuto: circa 19 coppie superano i 3 minuti, meno di 12 coppie superano i 5, solo 3,6 i 10 minuti e infine 0,8 coppie si mantengono ad una distanza inferiore a un metro per più di 15 minuti.

3.2.3 Contatti tra soli studenti

Si vuole ora valutare quanto gli studenti rimangono effettivamente a contatto tra di loro, senza considerare, quindi, i contatti che li vedono coinvolti con assistenti oppure con altro personale incontrato nel corridoio.

Dopo aver escluso dal *Proximity Agent System* gli assistenti e il personale di passaggio nel corridoio, si è ripetuta la raccolta dei dati su mille repliche, ottenendo delle distribuzioni campionarie di forma normale per gli indici di rischio. I parametri di tali distribuzioni sono raggruppati nella tabella seguente.

Indicatori di rischio considerando soltanto gli studenti

<i>R=1 metro</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Tempo totale a contatto [s]	60,5 < 62,9 < 65,3	37,6	12,7	293,4
Numero di contatti ravvicinati	16,8 < 17,0 < 17,2	3,0	7,4	26,2
Numero studenti per t=80%	4,56 < 4,6 < 4,64	0,6	2,7	6,3
Tempo di contatto per coppia [s]	20,0 < 21,1 < 22,2	17,0	2,6	110,8
Numero coppie t > 3 min	0,3 < 0,4 < 0,5	1,2	0,0	11,0

Tabella 3.7: Modello in cui vengono considerati solo i contatti tra gli studenti; parametri delle distribuzioni normali degli indicatori di rischio.

I risultati di Tabella 3.7 consentono di affermare che i contatti al di sotto di 1 metro tra soli studenti sono praticamente assenti. Nel corso dell'intera lezione, uno studente viola la distanza di sicurezza di 1 metro per poco più di un minuto per appena 17 contatti medi. Questo implicherebbe che uno studente si trattiene a contatto con un altro studente per massimo 20 secondi complessivi, sempre assumendo che le regole di distanziamento siano rispettate.

A questo punto è possibile dedurre che uno studente non rappresenta un pericolo per un altro studente, ma è invece potrebbe essere in grado di contagiare un assistente. Poiché in Tabella 3.1 si era

detto che uno studente si intrattiene per circa 5 minuti con quasi 2 agenti della simulazione, si comprende come questi due agenti siano effettivamente i due assistenti di laboratorio.

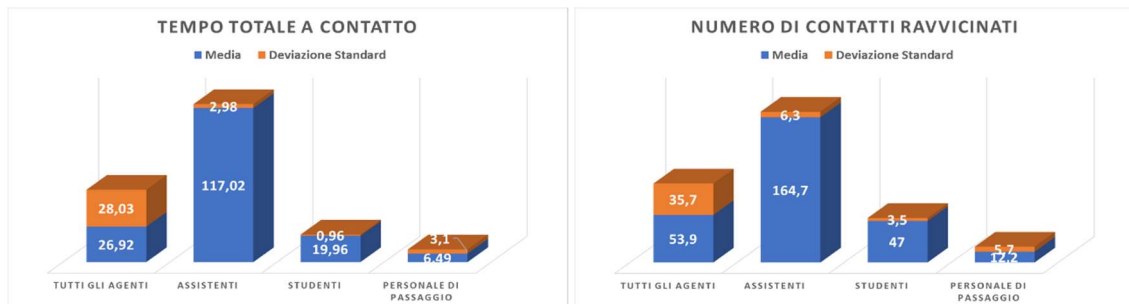
3.3 Risultati del modello per raggio di prossimità di 2 metri

La stessa indagine è stata ripetuta aumentando il raggio di prossimità ad un valore di 2 metri, in questo modo viene rilevato un contatto ogniqualvolta un agente si porta ad una distanza inferiore a 2 metri rispetto ad un altro agente. I risultati, raggruppati per categoria, sono riassunti nella tabella che segue.

Indicatori medi per categoria di agenti

<i>R=2 metri</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	
	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>
<i>Tutti gli agenti</i>	26,92	28,03	53,9	35,7	3,4	1,8	6,50	1,47
<i>Assistenti</i>	117,02	2,98	164,7	6,3	9,3	0,1	10,33	0,06
<i>Studenti</i>	19,96	0,96	47,0	3,5	3,0	0,1	6,40	0,36
<i>Personale di passaggio</i>	6,49	3,10	12,2	5,7	2,2	0,7	3,65	1,07

Tabella 3.8: Indicatori di rischio per categoria calcolati come media degli indicatori per ogni singolo agente e per un raggio di prossimità di 2 metri.



3.3 – Risultati del modello per raggio di prossimità di 2 metri



Figura 3.11: Diagrammi a barre relativi agli indicatori di rischio per ciascuna categoria.

L'aver raddoppiato la distanza considerata minima per la tutela dell'individuo ha l'ovvia conseguenza di produrre un aumento vistoso degli indicatori di rischio, si deve però tenere a mente che il rischio di essere contagiati diminuisce quando la distanza aumenta, sono richiesti quindi tempi maggiori per avere un contagio. Un assistente si mantiene a una distanza inferiore ai due metri con tutti gli altri agenti per quasi due ore, distribuite su oltre 160 contatti complessivi. Di questo tempo la gran parte è concentrato su 9,3 persone con cui si intrattiene per poco più di 10 minuti.

Per quanto riguarda gli studenti, l'aumento del raggio di prossimità ha sicuramente aumentato gli indicatori, ma la situazione rimane tutt'altro che preoccupante: non più di 20 minuti di contatto totali a studente, concentrati su 3 studenti e un tempo medio per coppia di 6,4 minuti.

Facendo un bilancio complessivo le misure di distanziamento sono efficaci non soltanto nei confronti dei contatti più ravvicinati al di sotto del metro, ma garantiscono anche un numero di contatti entro i 2 metri assolutamente controllato per tutte le categorie.

Anche in questo caso è stato rilevato il numero di coppie che si mantengono al di sotto della distanza di 2 metri per un tempo prolungato.

Numero di coppie che rimangono a contatto prolungato

<i>R=2 metri</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Numero coppie				
<i>t > 15 min</i>	2,64 < 2,87 < 3,10	1,7	0,0	8,0
Numero coppie				
<i>t > 20 min</i>	0,62 < 0,74 < 0,86	0,9	0,0	3,0

Tabella 3.9: Numero di coppie coinvolte in contatti prolungati al di sotto di 2 metri di distanza; parametri delle distribuzioni normali.

Capitolo 4

Campagna sperimentale

4.1 Pianificazione

In questo capitolo si analizzano diverse varianti del modello presentato nel Capitolo 2, ai fini di valutare l'efficacia e l'importanza dei provvedimenti di distanziamento. Nello specifico si stimerà il rischio di contagio nella situazione in cui le misure di distanziamento vengano sospese, portando poi l'analisi sui singoli provvedimenti, i quali verranno studiati singolarmente attraverso dei test parametrici con l'intento di evidenziarne l'efficacia. Una particolare attenzione verrà dedicata al provvedimento di riduzione del numero di studenti in aula, essendo quest'ultima la misura che più impatta sul regolare svolgimento dell'attività universitaria.

4.1.1 Test parametrici per confrontare gli indicatori di rischio ricavati da scenari diversi

Per confrontare diversi scenari del modello si è fatto uso di test parametrici: f test e t test. Se si modifica una certa variabile è possibile che si registrino delle variazioni sugli indici caratteristici; grazie al test è possibile stabilire se questa variazione è dovuta al caso, oppure se è una reale conseguenza della variabile che distingue uno scenario dall'altro.

Per una maggiore chiarezza si consideri, ad esempio, il confronto tra i due seguenti scenari: il caso in cui gli studenti effettuano la registrazione iniziale e il caso in cui questa non viene effettuata. La variabile in esame coincide con la presenza della fase di registrazione, e si desidera indagarne il reale effetto sugli indicatori di rischio. Dopo aver eseguito la raccolta dati e averli rielaborati con il codice Matlab descritto nel paragrafo 3.1.3, si hanno a disposizione due campioni di dati per ciascun indicatore di rischio: il primo relativo allo scenario in cui la fase di registrazione è presente, il secondo relativo allo scenario in cui invece è assente.

A questo punto per ciascun indicatore di rischio si esegue un test di confronto dei campioni raccolti dai due scenari in esame. Prima di procedere è però necessario verificare che tutte le condizioni

richieste siano rispettate; per evitare inutili ripetizioni, si segnala come tutte queste condizioni siano verificate in ogni test effettuato in seguito:

1. Le scale delle unità di misura degli indicatori di rischio sono razionali e quantitative, per ognuno di essi è infatti possibile definire una media.
2. La variabile indipendente di cui si vuole valutare l'effetto è qualitativa e dicotomica in tutti gli scenari che sono stati analizzati (fase di registrazione presente o assente, obbligo di mantenere le distanze in coda d'attesa oppure libertà di violare il metro di distanza, e così via).
3. I due campioni sono indipendenti e sono estratti casualmente dalle popolazioni. Questi sono infatti ricavati da due scenari in cui è stata modificata una variabile, per cui, sebbene l'ossatura del modello sia comunque molto simile, il pattern temporale dei contatti sarà completamente diverso: questi avverranno in momenti diversi, in locazioni diverse e tra persone diverse.
4. I campioni presentano pochi valori anomali. In tutti i test che sono stati eseguiti la numerosità dei campioni è molto elevata, pertanto gli outliers incidono poco sui valori medi; inoltre non è possibile risalire alla causa che li ha provocati. Alla luce di questo si è deciso comunque di includerli nel controllo.
5. Le popolazioni hanno distribuzione normale. Questo può essere verificato eseguendo un test di normalità. Anche nei casi in cui l'andamento si discosti da quello normale, il test ha comunque validità grazie alla numerosità molto elevata del campione (teorema centrale del limite).

Si passa a questo punto al controllo vero e proprio sulla media. Questo richiede che venga effettuato un f test preliminare di confronto di varianze, le conclusioni di quest'ultimo permettono di individuare la forma corretta del t test che deve essere utilizzata: t test per campioni con uguale varianza oppure t test per campioni con varianza diversa.

Il p-value ottenuto come risultato del t test va confrontato con la significatività, posta pari al 5% in tutti i test eseguiti, concludendo così se le medie delle due popolazioni da cui sono stati tratti i campioni sono realmente diverse; nel concreto permettono di capire se quel determinato fattore che si sta analizzando ha un effetto significativo sull'indicatore di rischio in analisi.

Nei casi in cui è stata appurata una reale differenza della media, è stata calcolata la D di Cohen così da quantificare l'effetto di quel fattore sull'indicatore di rischio in questione.

4.2 Incidenza delle macchinette del caffè nel corridoio

4.2.1 Analisi dello scenario

Si vuole ora indagare come influisce sugli indicatori la presenza delle macchinette del caffè nel corridoio. Si è allora modificato leggermente il modello descritto nel capitolo 2, escludendo la presenza delle macchinette e aggiornando adeguatamente il process flow. Si sono raccolti i dati di mille replicazioni e si sono ottenuti i campioni relativi ai vari indicatori statistici. I parametri di tali campioni sono riassunti in Tabella 4.1. I risultati fanno riferimento ad un raggio di prossimità di 1 metro.

<i>Scenario in cui sono non presenti le macchinette del caffè</i>				
<i>R=1 metro</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Tempo totale a contatto [min]</i>	12,30 < 12,41 < 12,52	1,89	4,66	17,95
<i>Numero di contatti ravvicinati</i>	26,3 < 26,5 < 26,7	3,2	11,7	36,7
<i>Numero studenti per t=80%</i>	2,43 < 2,45 < 2,47	0,3	1,7	4,5
<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	4,86 < 4,91 < 4,96	0,78	2,55	8,92
<i>Numero coppie t > 3 min</i>	18,6 < 18,8 < 20,0	2,8	9,0	27,0

Tabella 4.1: Scenario dove non sono presenti le macchinette del caffè nel corridoio; parametri delle distribuzioni normali. Gli indicatori fanno riferimento al caso che considera tutti gli agenti della simulazione e un raggio di prossimità di 1 metro.

4.2.2 Effetto della presenza delle macchinette del caffè sugli indicatori

La variabile dicotomica analizzata è “presenza di macchinette del caffè nel corridoio”, variabile che, ovviamente, è presente in sole due modalità: macchinette del caffè assenti e macchinette del caffè presenti. Poiché sono verificate tutte le condizioni elencate nel paragrafo 4.1.1 è possibile procedere con il test parametrico.

4.2 – Incidenza delle macchinette del caffè nel corridoio

Macchinette del caffè										
<i>R=1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 3 minuti</i>	
<i>Macchinette del caffè?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	12,77	13,18	27,7	29,5	2,45	2,49	4,91	4,88	18,8	19,4
<i>Dev. St. (σ)</i>	1,89	1,93	3,2	3,6	0,3	0,4	0,78	0,79	2,8	3,0
<i>N° osservazioni</i>	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
<i>Test f: p-value</i>	0,23		2,7E-5		0,35		0,27		0,01	
	$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 < \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 < \sigma_2$	
<i>Test t: p-value</i>	1,3E-6		1,9E-31		0,002		0,20		1,3E-05	
	$\mu_1 < \mu_2$		$\mu_1 < \mu_2$		$\mu_1 < \mu_2$		$\mu_1 = \mu_2$		$\mu_1 < \mu_2$	
<i>D di Cohen</i>	0,21		0,53		0,13		/		0,19	

Tabella 4.2: Test parametrici di confronto tra lo scenario in cui non sono presenti macchinette del caffè e lo scenario in cui sono invece presenti.

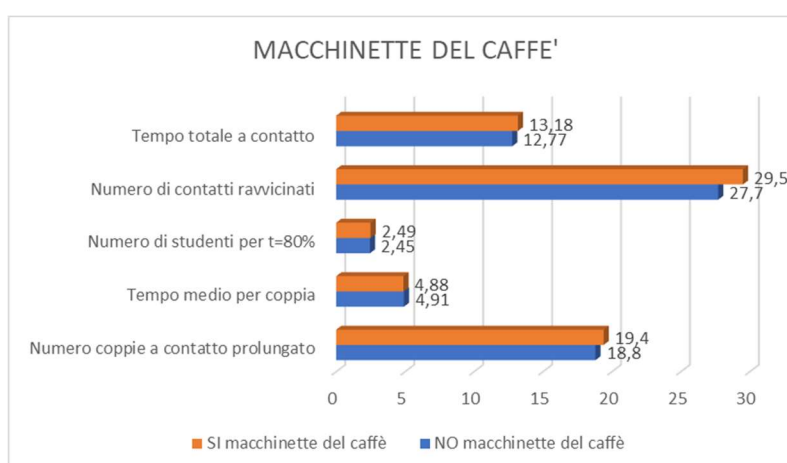


Figura 4.1: Effetto della presenza delle macchinette del caffè sugli indicatori di rischio relativamente ai contatti al di sotto di 1 metro di distanza.

Per quanto riguarda l'indicatore di *tempo totale a contatto* si registra un leggero aumento: una D di Cohen di 0,21 attesta un piccolo effetto su questo indice. L'aumento del numero di contatti è leggermente più incisivo, caratterizzato da una *effect size* di 0,5. Il numero di persone con cui l'agente intrattiene la maggior parte dei contatti, cioè il numero di persone potenzialmente contagiate da un agente infetto rimane praticamente immutato. La presenza delle macchinette non ha nessun effetto sul *tempo medio di contatto per coppia* che si attesta in entrambi gli scenari intorno ai 5 minuti. Infine, anche il numero di coppie che superano i 3 minuti a contatto rimane sostanzialmente immutato.

Complessivamente la presenza delle macchinette del caffè nel corridoio ha un effetto molto ridotto sugli indici di rischio riassuntivi del modello relativi ai contatti ravvicinati al di sotto di 1 metro (considerando gli indicatori globali relativi a tutti gli agenti della simulazione). Tutto ciò ovviamente, sempre nell'assunzione che le norme di distanziamento siano effettivamente rispettate, nello specifico, gli studenti devono mantenere la distanza di sicurezza in coda, mentre attendono il loro turno per prendere il caffè, e le macchinette non devono essere posizionate troppo vicine tra di loro.

4.3 Scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico

4.3.1 Analisi dello scenario per raggio di prossimità pari a 1 metro

Per quantificare i benefici apportati dai provvedimenti di distanziamento fisico, è stato implementato un altro modello, sulla falsa riga di quello già realizzato, andando a sospendere le misure prese per sfavorire i contatti ravvicinati. Lo scenario così ottenuto descrive allora una semplice lezione di laboratorio prima della pandemia.

4.3 – Scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico

Indicatori medi per categoria di agenti

<i>R=1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per $t = 80\%$</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	
	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>
Tutti gli agenti	31,1	40,6	76,8	39,1	5,2	2,8	5,1	1,9
Assistenti	216,3	2,1	224,5	4,3	17,4	0,01	10,0	0,1
Studenti	24,6	7,5	75,6	23,4	4,8	1,0	5,3	1,6
Personale di passaggio	3,4	2,6	15,0	11,7	3,0	1,6	1,0	0,6

Tabella 4.3: Indicatori di rischio per categoria nello scenario in cui non sono applicati i provvedimenti di distanziamento fisico e che considera un raggio di prossimità di 1 metro.

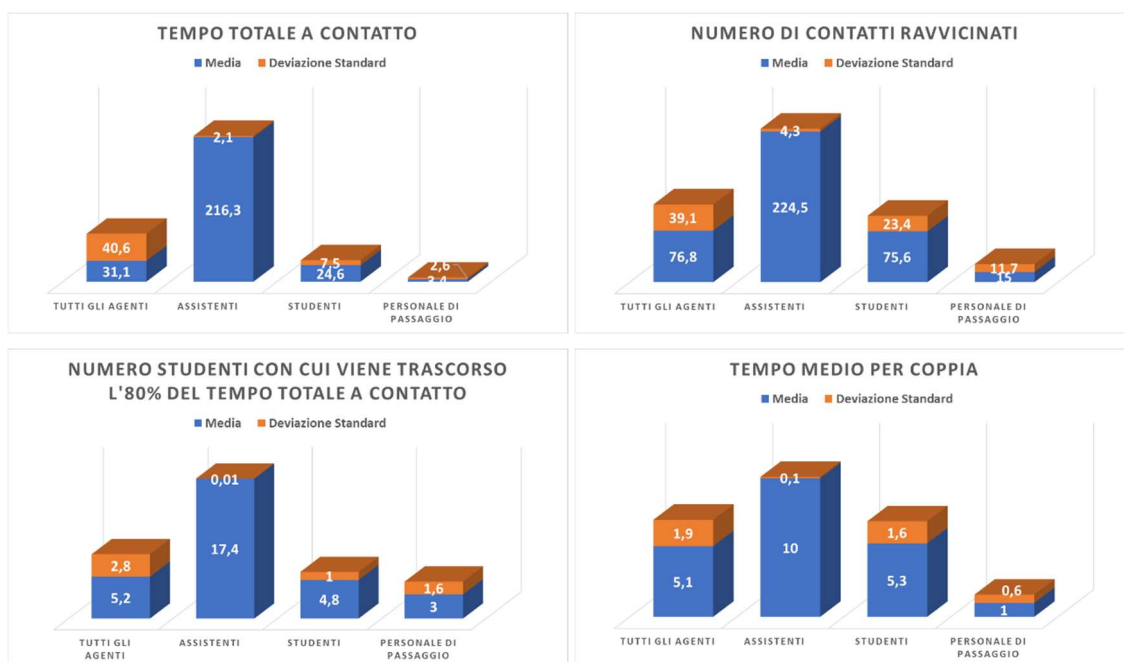


Figura 4.2: Diagrammi a barre relativi agli indicatori di rischio per ciascuna categoria.

4.3 – Scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico

In una lezione in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico la situazione è più drammatica in termini di pericolo di contagio. In particolare, gli assistenti si trovano coinvolti in moltissimi contatti. Mediamente rimangono ad una distanza inferiore al metro per 10 minuti con 17,4 studenti; se quindi un assistente dovesse essere positivo, il rischio che contagi una buona parte di questi 17 studenti non è trascurabile.

Anche limitatamente alla categoria degli studenti la situazione porta con sé un rischio più marcato: oltre 24 minuti di tempo totale distribuito su 75 contatti. Con circa 5 agenti si intrattengono per oltre 5 minuti medi. La situazione è invece decisamente meno rischiosa per il personale di passaggio nel corridoio del laboratorio.

4.3.1.1 Confronto con lo scenario in cui sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico: tutti gli agenti della simulazione

<i>Distribuzioni campionarie ($R = 1\text{ m}$)</i>				
<i>Nessun provvedimento di distanziamento</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Tempo totale a contatto [min]</i>	30,50 < 31,12 < 31,74	4,47	1,52	40,83
<i>Numero di contatti ravvicinati</i>	75,8 < 76,8 < 77,8	7,1	22,7	91,3
<i>Numero studenti per $t=80\%$</i>	5,1 < 5,2 < 5,3	0,6	4,1	9,7
<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	4,98 < 5,10 < 5,22	0,88	0,12	9,59
<i>Numero coppie $t > 3\text{ min}$</i>	81,9 < 83,7 < 85,5	13,2	2,0	114,0
<i>Numero coppie $t > 10\text{ min}$</i>	14,7 < 15,2 < 15,7	3,9	0,0	27,0
<i>Numero coppie $t > 15\text{ min}$</i>	3,9 < 4,2 < 4,5	1,9	0,0	10,0

Tabella 4.4: Scenario dove non sono applicati provvedimenti di distanziamento; parametri delle distribuzioni normali. Gli indicatori fanno riferimento al caso che considera tutti gli agenti della simulazione.

4.3 – Scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico

Nessun provvedimento di distanziamento

<i>R = 1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 10 minuti</i>	
<i>Distanziamento?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	31,12	13,18	76,8	29,5	5,2	2,49	5,10	4,88	15,2	3,6
<i>Dev. St. (σ)</i>	4,47	1,93	7,1	3,6	0,1	0,4	0,88	0,79	3,9	1,8
<i>N° osservazioni</i>	200	1000	200	1000	200	1000	200	1000	200	1000
<i>Test f: p-value</i>	3,9E-71		7,7E-44		1,9E-24		1E-04		1,2E-60	
	$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$	
<i>Test t: p-value</i>	9E-130		3E-178		2E-148		1,8E-4		8E-105	
	$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$	
<i>D di Cohen</i>	-5,21		-8,43		-5,67		-0,28		-3,83	

Tabella 4.5: Test parametrici per il confronto dello scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento con lo scenario in cui sono previsti. Si sono considerati gli indicatori relativi a tutti gli agenti della simulazione.

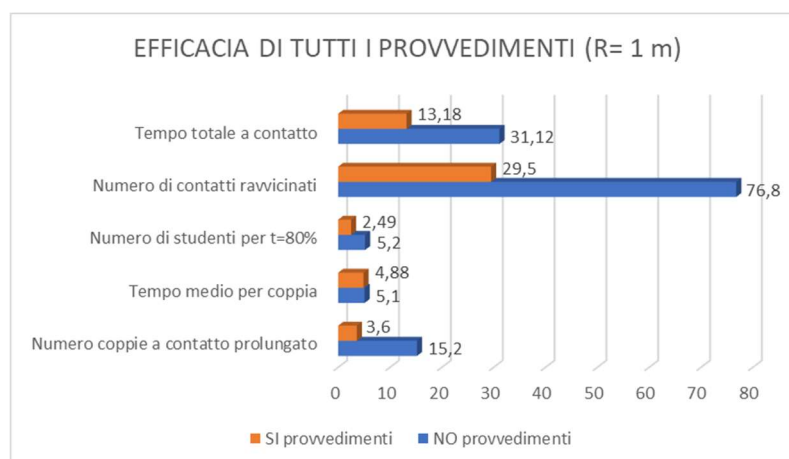


Figura 4.3: Efficacia dei provvedimenti di distanziamento sui vari indicatori di rischio.

4.3 – Scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico

I risultati del t test sono piuttosto scontati, molto più interessante invece l'informazione della D di Cohen, grazie alla quale è possibile quantificare i benefici comportati dall'introduzione dei provvedimenti di distanziamento.

In particolare, si nota una consistente riduzione del tempo totale a contatto, ancora più marcata la riduzione del numero di contatti ravvicinati. Non si registra, invece, una differenza sostanziale dell'indice di *tempo medio per coppia*, anche se il numero di agenti coinvolti in contatti prolungati è più che raddoppiato.

Si registra infine un aumento consistente del numero di coppie che rimangono a contatto per più di 10 minuti che, nel caso in cui non fossero applicati provvedimenti di distanziamento si attesta intorno a 15.

4.3.2 Analisi dello scenario per raggio di prossimità pari a 2 metri

<i>Indicatori medi per categoria di agenti</i>								
<i>R = 2 metri</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	
	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>	<i>Media</i>	<i>Dev. St.</i>
<i>Tutti gli agenti</i>	368,5	169,0	117,8	67,9	3,8	4,2	103,2	39,9
<i>Assistenti</i>	507,5	5,3	394,8	17,3	23,0	0,12	17,7	0,2
<i>Studenti</i>	397,8	173,4	113,9	33,8	2,8	0,8	117,7	37,0
<i>Personale di passaggio</i>	6,5	5,1	18,0	13,9	3,6	1,9	1,3	0,7

Tabella 4.6: Indicatori di rischio per categoria nello scenario in cui non sono applicate i provvedimenti di distanziamento fisico e che considera un raggio di prossimità di 2 metri.

4.3 – Scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico

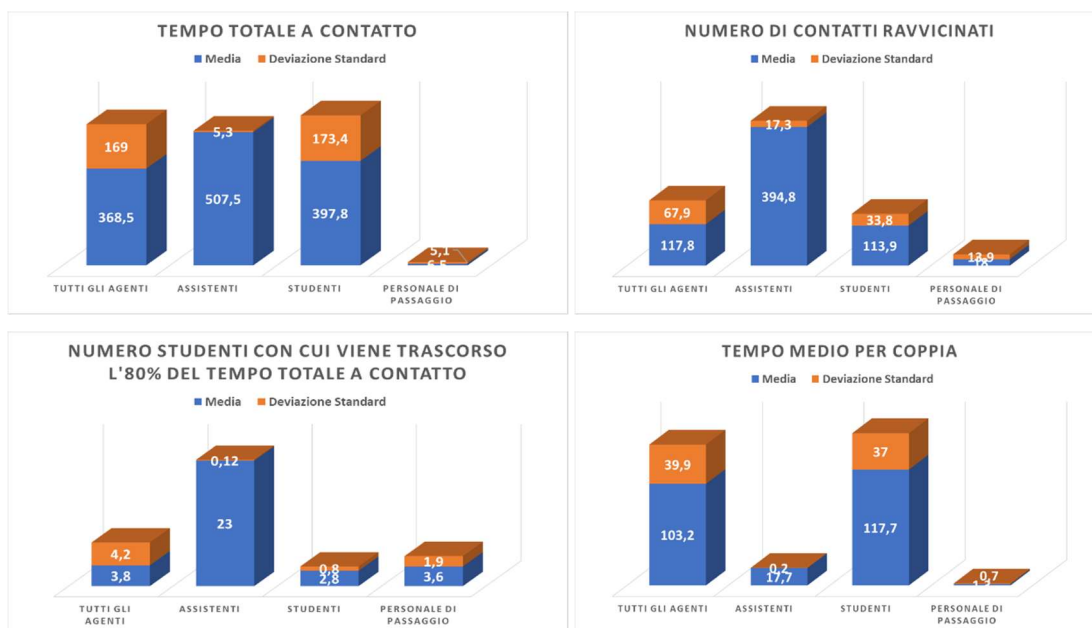


Figura 4.4: Diagrammi a barre relativi agli indicatori di rischio per ciascuna categoria.

I risultati mettono in evidenza una situazione assolutamente insostenibile: nell'ambiente in cui non vengono applicate misure di prevenzione la distanza di 2 metri viene violata di continuo. Gli assistenti si mantengono al di sotto dei 2 metri con 23 studenti per un tempo medio di quasi 18 minuti. La situazione è ancora più inaccettabile se si osserva la categoria degli studenti. Un generico studente, infatti, rimane a contatto con 2,8 studenti per 117,7 minuti. Un valore così elevato si spiega pensando alle dimensioni dei banchi dell'aula, che, pur essendo piuttosto spaziosi, non garantiscono un distanziamento interpersonale superiore ai 2 metri.

Per concludere, se nell'ambiente non venissero applicate misure di distanziamento fisico il rischio di contagio risulterebbe elevato.

Numero di coppie coinvolte in contatti prolungati ($R = 2\text{ m}$)

Nessun provvedimento di distanziamento	Media (intervallo di confidenza 95%)	Deviazione Standard	Min	Max
Numero coppie				
$t > 15\text{ min}$	76,81 < 78,03 < 79,25	8,6	0,0	91,0

Tabella 4.7: Numero di coppie che si mantengono al di sotto dei 2 metri di distanza per oltre 15 minuti nello scenario in cui non vengono applicati provvedimenti di distanziamento.

4.3 – Scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico

4.3.2.1 Confronto con lo scenario in cui sono applicati provvedimenti di distanziamento fisico: solo studenti

A questo punto si possono confrontare i risultati appena ottenuti con quelli che si erano registrati nel caso in cui fossero applicati provvedimenti di distanziamento. Qui di seguito viene illustrato il confronto relativo alla categoria degli studenti.

Nessun provvedimento di distanziamento

<i>R=2 metri</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 15 minuti</i>	
	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	397,75	19,96	113,9	47,0	2,83	2,95	117,70	6,40	78,0	2,87
<i>Dev. St. (σ)</i>	43,17	3,66	11,3	5,5	0,7	0,5	13,45	1,34	8,6	1,7
<i>N° osservazioni</i>	190	200	190	200	190	200	190	200	190	200
<i>D di Cohen</i>	-12,33		-7,53		0,20		-11,65		-12,11	

Tabella 4.8: Confronto dello scenario in cui non sono applicati provvedimenti di distanziamento con lo scenario in cui sono previsti, relativamente alla sola categoria degli studenti e raggio di 2 metri.

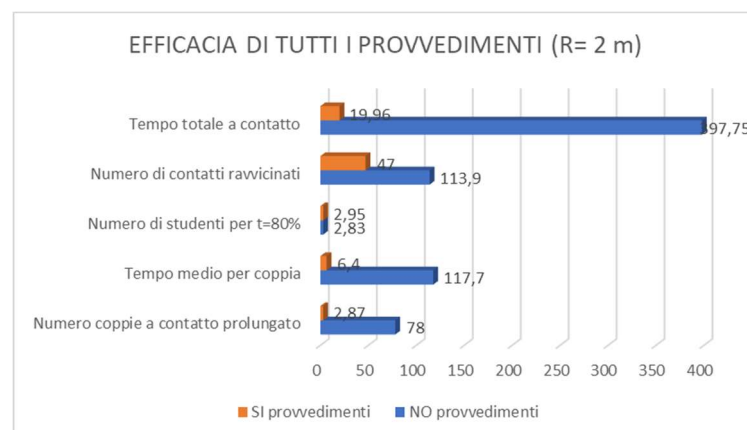


Figura 4.5: Efficacia dei provvedimenti di distanziamento sui vari indicatori di rischio relativamente ai contatti al di sotto dei 2 metri e limitatamente alla categoria degli studenti.

Il valore molto elevato della D di Cohen mette in evidenza in modo inequivocabile il beneficio dei provvedimenti di distanziamento. La portata dei benefici introdotti è palese se si osserva il diagramma a barre proposto in Figura 4.5.

4.4 Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

4.4.1 Criterio di studio

Ogni singolo provvedimento di distanziamento è stato analizzato singolarmente per assicurarsi che questo contribuisca concretamente a ridurre i contatti a distanza ravvicinata. Per far ciò si è impostato lo studio nel seguente modo: partendo dallo scenario in cui non è prevista nessuna norma di distanziamento fisico, di volta in volta si è introdotto solo un provvedimento, procedendo poi con i test parametrici di confronto per ciascun indicatore e calcolando il relativo *effect size*.

Si è notato come i provvedimenti di distanziamento fisico non comportino nessun beneficio nei contatti che coinvolgono gli assistenti; intuitivamente questo si spiega considerando che il loro tempo a contatto è pari alla somma delle durate delle domande alle quali rispondono durante la lezione, e questo non viene ridotto in seguito all'applicazione delle misure anti-contagio. Alla luce di questo si è deciso di considerare nei successivi test di confronto solamente i contatti che coinvolgono gli studenti, sospendendo dunque dall'*Agent System* assistenti e personale nel corridoio. Infine, si è deciso di condurre l'analisi considerando un raggio di prossimità di 1 metro.

Di seguito si riassumono i parametri statistici dei campioni raccolti, e che saranno utilizzati come primo termine di confronto per tutti i test eseguiti.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

Distribuzioni campionarie (R =1 m)				
Nessun provvedimento di distanziamento	Media (intervallo di confidenza 95%)	Deviazione Standard	Min	Max
Tempo totale a contatto [min]	13,33 < 13,56 < 13,79	3,73	1,64	49,72
Numero di contatti ravvicinati	60,5 < 61,0 < 61,4	7,0	22,6	80,3
Numero studenti per t=80%	8,27 < 8,31 < 8,35	0,7	6,6	11,0
Tempo di contatto per coppia [min]	2,17 < 2,23 < 2,28	0,80	0,13	7,80
Numero coppie t > 3 min	29,6 < 30,2 < 30,8	9,6	0,0	57,0

Tabella 4.9: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario dove non sono applicati provvedimenti di distanziamento e che considera soltanto i contatti tra gli studenti.

4.4.2 Regolamentazione delle uscite dall'aula

Distribuzioni campionarie (R =1 m)				
Regolamentazione delle uscite dall'aula	Media (intervallo di confidenza 95%)	Deviazione Standard	Min	Max
Tempo totale a contatto [min]	13,10 < 13,31 < 13,52	3,39	1,64	26,84
Numero di contatti ravvicinati	55,5 < 55,9 < 56,2	6,0	22,6	77,9
Numero studenti per t=80%	7,82 < 7,86 < 7,90	0,7	6,3	11,0
Tempo di contatto per coppia [min]	2,20 < 2,25 < 2,30	0,81	0,13	7,83
Numero coppie t > 3 min	28,8 < 30,1 < 31,4	9,6	0,0	57,0

Tabella 4.10: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come unica misura anti-contagio la regolamentazione delle uscite.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

Regolamentazione delle uscite										
<i>R = 1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 3 minuti</i>	
<i>Uscite regolamentate?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
Media (μ)	13,56	13,31	61,0	55,9	8,3	7,9	2,23	2,25	30,2	30,1
Dev. St. (σ)	3,73	3,39	7,0	6,0	0,7	0,7	0,80	0,81	9,6	9,6
N° osservazioni	1000	1000	1000	1000	200	200	200	200	200	200
Test f: p-value	0,0016		2,9E-07		0,35		0,44		0,49	
	$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$	
Test t: p-value	0,055		2,5E-64		8,2E-11		0,39		0,48	
	$\mu_1 = \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 = \mu_2$		$\mu_1 = \mu_2$	
D di Cohen	/		-0,79		-0,66		/		/	

Tabella 4.11: Test parametrico per valutare l'efficacia di regolamentare la fase di uscita dall'aula.

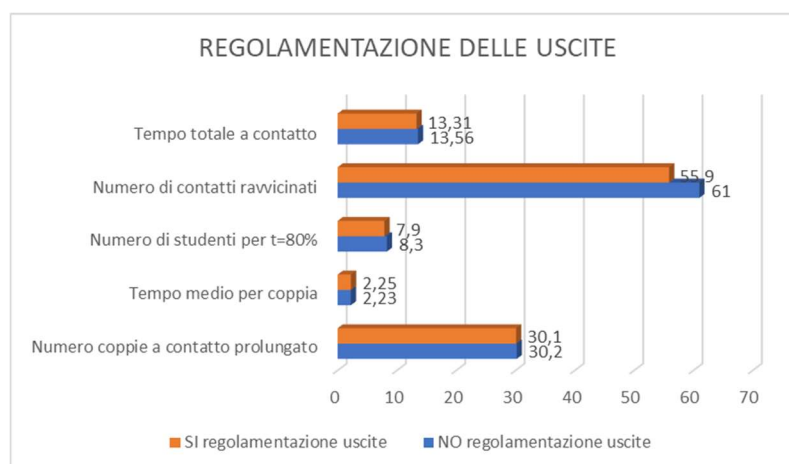


Figura 4.6: Efficacia del provvedimento "regolamentazione delle uscite" sui vari indicatori di rischio.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

La prima misura analizzata è la regolamentazione delle uscite. Al fine di ridurre i contatti si è deciso di raddoppiare il numero delle uscite dall’aula, indirizzando gli studenti ad uscire solamente dalla porta a loro più prossima. Inoltre, gli studenti lasciano il loro posto in momenti distinti.

Quello che si rileva attraverso il test di confronto è che la misura non ha alcun effetto sul tempo totale a contatto, sul tempo di contatto per coppia, e neppure riduce il numero di coppie che rimangono a contatto per un tempo più prolungato. Ha invece un tiepido effetto sul numero di contatti per agente, e sul numero di studenti con cui uno studente intrattiene la maggior parte del suo tempo a contatto.

Nel complesso il provvedimento in esame non introduce benefici sostanziali in termini di prevenzione.

4.4.3 Utilizzo alternato di sedie nel corridoio e lavandini

<i>Distribuzioni campionarie (R =1 m)</i>				
<i>Utilizzo alternato di sedie e lavandini</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Tempo totale a contatto [min]</i>	11,88 < 12,04 < 12,26	3,60	1,64	28,64
<i>Numero di contatti ravvicinati</i>	58,9 < 60,2 < 60,6	6,3	22,6	79,0
<i>Numero studenti per t=80%</i>	8,93 < 8,98 < 9,03	0,8	6,7	11,0
<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	1,96 < 2,02 < 2,08	0,98	0,13	7,85
<i>Numero coppie t > 3 min</i>	24,9 < 26,2 < 27,5	9,1	0,0	52,0

Tabella 4.12: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come unica misura anti-contagio l'utilizzo alternato di sedie nel corridoio e lavandini.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

Utilizzo alternato di sedie nel corridoio e lavandini										
<i>R = 1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 3 minuti</i>	
<i>Utilizzo alternato di sedie e lavandini?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	13,56	12,04	61,0	60,2	8,3	9,0	2,23	2,02	30,2	26,2
<i>Dev. St. (σ)</i>	3,73	3,60	7,0	6,3	0,7	0,8	0,80	0,98	9,6	9,1
<i>N° osservazioni</i>	1000	1000	1000	1000	200	200	200	200	200	200
<i>Test f: p-value</i>	0,13		0,0006		0,053		0,003		0,22	
	$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 < \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$	
<i>Test t: p-value</i>	1,7E-20		0,006		1E-17		0,01		1,4E-05	
	$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 < \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$	
<i>D di Cohen</i>	-0,42		-0,11		0,89		-0,23		-0,42	

Tabella 4.13: Test parametrico per valutare l'efficacia di utilizzare in modo alternato le sedie nel corridoio e i lavandini.

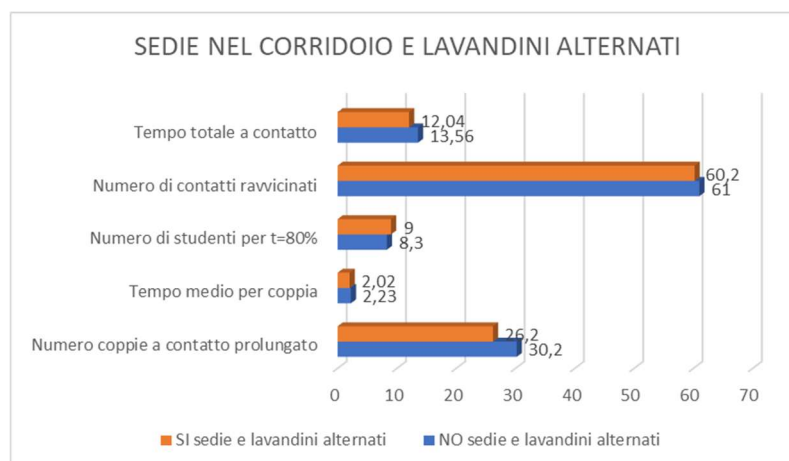


Figura 4.7: Efficacia del provvedimento "sedie nel corridoio e lavandini alternati" sui vari indicatori di rischio.

Il provvedimento di usare in modo alternato le sedie nel corridoio e i lavandini porta con sé una discreta riduzione del tempo totale a contatto per studente, e una riduzione più contenuta del numero di contatti. Ha invece un effetto negativo sul numero di studenti con cui viene trascorso l'80% del tempo totale a contatto che aumentano da 8,3 a 9, tuttavia si riscontra una riduzione del tempo medio per coppia per un *effect size* di 0,23. Infine, si registra una riduzione delle coppie che rimangono a contatto per più di tre minuti.

Concludendo, anche questo provvedimento ha un'incidenza piuttosto limitata sugli indicatori di rischio.

4.4.4 Code distanziate

<i>Distribuzioni campionarie (R =1 m)</i>				
<i>Code distanziate</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Tempo totale a contatto [min]</i>	9,41 < 9,53 < 9,65	1,87	1,64	17,69
<i>Numero di contatti ravvicinati</i>	57,7 < 58,0 < 58,4	6,1	22,6	77,9
<i>Numero studenti per t=80%</i>	8,29 < 8,34 < 8,39	0,8	6,4	11,0
<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	1,80 < 1,85 < 1,90	0,74	0,13	7,27
<i>Numero coppie t > 3 min</i>	20,1 < 20,9 < 21,7	5,4	0,0	36,0

Tabella 4.14: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come unica misura anti-contagio l'obbligo di mantenimento della distanza durante le code d'attesa.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

Code distanziate										
R = 1 metro	Tempo totale a contatto [min]		Numero contatti ravvicinati		Numero studenti per t = 80%		Tempo di contatto per coppia [min]		Numero coppie t > 3 minuti	
Code distanziate?	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI
Media (μ)	13,56	9,53	61,0	58,0	8,3	8,3	2,23	1,85	30,2	20,9
Dev. St. (σ)	3,73	1,87	7,0	6,1	0,7	0,8	0,80	0,74	9,6	5,4
N° osservazioni	1000	1000	1000	1000	200	200	200	200	200	200
Test f: p-value	3,7E-98		1,8E-06		0,11		0,13		2,1E-15	
	$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$	
Test t: p-value	2,1E-159		1,23E-23		0,37		5,7E-07		1,5E-28	
	$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 = \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$	
D di Cohen	-1,37		-0,45		/		-0,49		-1,19	

Tabella 4.15: Test parametrico per valutare l'efficacia dell'obbligo di mantenere il distanziamento nelle code d'attesa.

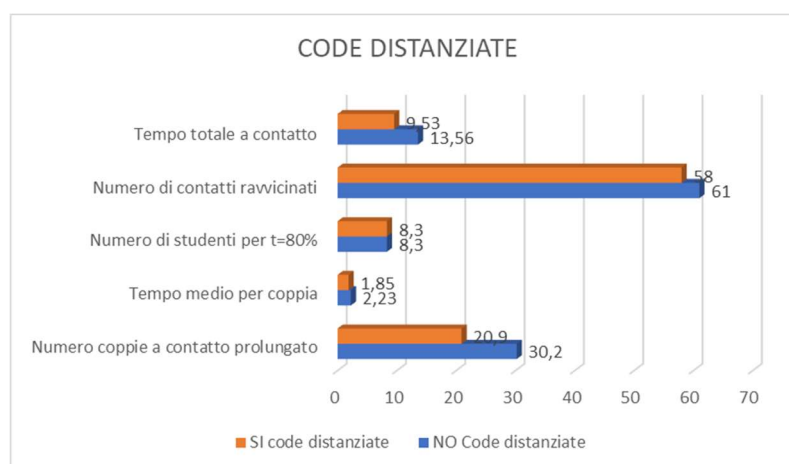


Figura 4.8: Efficacia del provvedimento "code distanziate" sui vari indicatori di rischio.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

L'obbligo di mantenere le distanze di sicurezza nelle code di attesa comporta una discreta riduzione di quasi tutti gli indicatori di rischio. Tale riduzione è molto marcata nell'indicatore di tempo totale a contatto, più contenuta nel numero effettivo di contatti. Sebbene il numero di persone con cui uno studente trascorre l'80% del tempo di contatto rimanga invariato, si ha una riduzione del tempo medio tra coppie di studenti. Il numero di coppie che rimangono a contatto per oltre 3 minuti si riduce da oltre 30 coppie a poco meno di 21.

4.4.5 Fase di registrazione

Distribuzioni campionarie ($R = 1\text{ m}$)				
Fase di registrazione	Media (intervallo di confidenza 95%)	Deviazione Standard	Min	Max
Tempo totale a contatto [min]	23,53 < 23,74 < 23,95	3,36	14,13	37,37
Numero di contatti ravvicinati	75,7 < 76,1 < 76,6	6,5	48,6	94,6
Numero studenti per $t=80\%$	5,76 < 5,78 < 5,80	0,3	5,0	6,8
Tempo di contatto per coppia [min]	3,47 < 3,52 < 3,57	0,75	2,69	9,54
Numero coppie $t > 3\text{ min}$	63,1 < 64,4 < 65,7	9,7	43,0	98,0

Tabella 4.16: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come unica misura anti-contagio la fase di registrazione all'inizio della lezione.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

Fase di registrazione										
<i>R = 1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 3 minuti</i>	
<i>Fase di registrazione?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	13,56	23,74	61,0	76,1	8,3	5,78	2,23	3,52	30,2	64,4
<i>Dev. St. (σ)</i>	3,73	3,36	7,0	6,5	0,7	0,3	0,80	0,75	9,6	9,7
<i>N° osservazioni</i>	1000	1000	1000	1000	200	200	200	200	200	200
<i>Test f: p-value</i>	0,0005		0,006		1,9E-22		0,14		0,48	
	$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$	
<i>Test t: p-value</i>	0		0		9E-135		7E-48		1E-125	
	$\mu_1 < \mu_2$		$\mu_1 < \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 < \mu_2$		$\mu_1 < \mu_2$	
<i>D di Cohen</i>	2,87		2,25		-4,56		1,66		3,55	

Tabella 4.17: Test parametrico per valutare l'efficacia del provvedimento che introduce la fase di registrazione all'inizio della lezione.

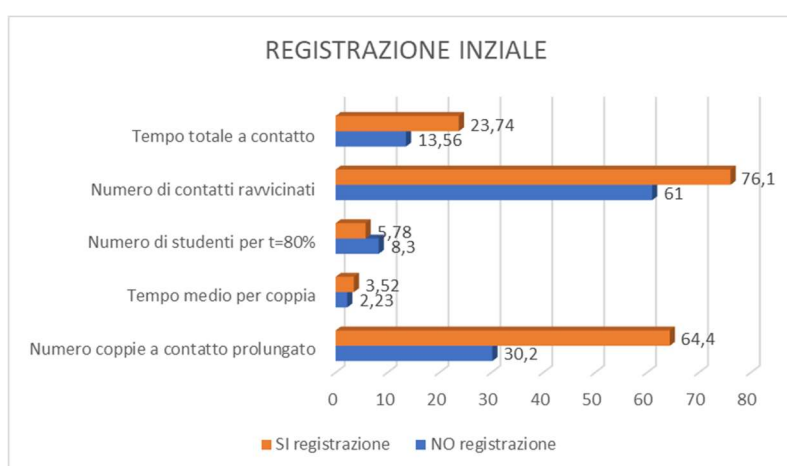


Figura 4.9: Efficacia del provvedimento "registrazione iniziale" sui vari indicatori di rischio.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

Osservando i risultati ottenuti, si constata come l'introduzione della fase di registrazioni non comporti alcun tipo di beneficio: il tempo totale a contatto tra gli studenti viene quasi raddoppiato, il numero di contatti aumenta, così come il tempo di contatto per coppia (sebbene concentrato su di un numero di studenti minore) e anche le coppie che mantengono un contatto superiore ai 3 minuti è più che raddoppiato.

Questo risultato si spiega pensando che la fase di registrazione fa sì che tutti gli studenti che partecipano alla lezione debbano attendere in coda d'attesa per un tempo piuttosto prolungato prima di accedere all'aula. Se questa coda non è distanziata gli indici di rischio aumentano in modo consistente. Si è deciso allora di indagare se la fase di registrazione accoppiata con l'obbligo di mantenimento delle distanze di sicurezza durante l'attesa possa produrre un beneficio.

4.4.6 Fase di registrazione con obbligo di mantenimento della distanza di sicurezza durante la coda d'attesa

<i>Distribuzioni campionarie (R =1 m)</i>				
<i>Registrazione con coda distanziata</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Tempo totale a contatto [min]</i>	11,86 < 12,09 < 12,32	3,69	3,91	23,24
<i>Numero di contatti ravvicinati</i>	30,1 < 30,8 < 31,5	4,9	15,1	41,8
<i>Numero studenti per t=80%</i>	4,43 < 4,48 < 4,53	0,8	1,8	7,0
<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	2,09 < 2,13 < 2,17	0,61	0,92	6,32
<i>Numero coppie t > 3 min</i>	23,7 < 25,1 < 26,5	9,9	7	56

Tabella 4.18: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come misura anti-contagio la fase di registrazione all'inizio della lezione con l'obbligo di mantenimento della distanza di sicurezza durante la coda d'attesa.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

Fase di registrazione con coda distanziata

<i>R = 1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 3 minuti</i>	
<i>Registrazione con coda distanziata?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	13,56	12,09	61,0	30,8	8,3	4,5	2,23	2,13	30,2	25,1
<i>Dev. St. (σ)</i>	3,73	3,69	7,0	4,9	0,7	0,8	0,80	0,61	9,6	9,9
<i>N° osservazioni</i>	1000	1000	1000	1000	200	200	200	200	200	200
<i>Test f: p-value</i>	0,42		7,5E-05		0,16		5,1E-05		0,35	
	$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$	
<i>Test t: p-value</i>	1,9E-07		5,5E-229		9E-182		0,08		1,25E-07	
	$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 = \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$	
<i>D di Cohen</i>	-0,40		-5,00		-5,27		/		-0,52	

Tabella 4.19: Test parametrico per valutare l'efficacia del provvedimento che introduce la fase di registrazione all'inizio della lezione con l'obbligo di mantenimento della distanza di sicurezza durante l'attesa.

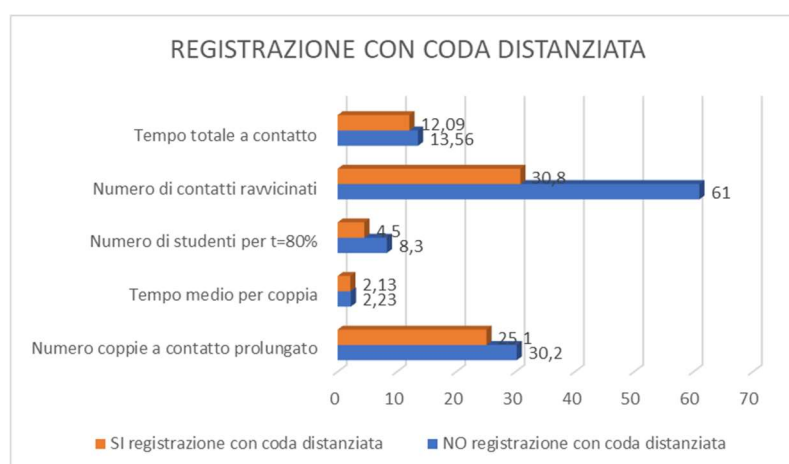


Figura 4.10: Efficacia del provvedimento "registrazione con coda distanziata" sui vari indicatori di rischio.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

Se si esegue una registrazione assicurandosi che le distanze di sicurezza vengano rispettate durante la coda di attesa, si registra un'evidente riduzione del rischio di contagio. In particolare, il numero di contatti per studenti praticamente si dimezza; questo dimostra come un ingresso disordinato in aula produca moltissimi contatti tra gli studenti, contatti che vengono evitati grazie ad un ingresso ordinato, regolato dalla fase di registrazione. Insieme al numero di contatti si riduce in modo significativo anche il numero di persone con cui uno studente intrattiene la maggior parte del suo tempo totale a contatto ravvicinato.

4.4.7 Riduzione del numero di studenti in aula

Distribuzioni campionarie ($R = 1\text{ m}$)				
Riduzione del numero di studenti	Media (intervallo di confidenza 95%)	Deviazione Standard	Min	Max
Tempo totale a contatto [min]	6,94 < 7,28 < 7,62	2,45	2,66	21,83
Numero di contatti ravvicinati	33,4 < 34,0 < 34,6	4,2	22,8	48,5
Numero studenti per $t=80\%$	4,62 < 4,68 < 4,74	0,4	3,6	5,8
Tempo di contatto per coppia [min]	1,85 < 1,99 < 2,13	1,04	0,62	13,26
Numero coppie $t > 3\text{ min}$	7,0 < 7,4 < 7,8	2,6	2,0	15,0

Tabella 4.20: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui è applicata come unica misura anti-contagio il dimezzamento degli studenti in aula.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

Riduzione del numero di studenti

<i>R = 1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 3 minuti</i>	
<i>Numero di studenti dimezzato?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	13,56	7,28	61,0	34,0	8,3	4,7	2,23	1,99	30,2	7,4
<i>Dev. St. (σ)</i>	3,73	2,45	7,0	4,2	0,7	0,4	0,80	1,04	9,6	2,6
<i>N° osservazioni</i>	1000	200	1000	200	200	200	200	200	200	200
<i>Test f: p-value</i>	2,7E-12		1,81E-17		1,9E-11		1,6E-4		2,4E-62	
	$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 < \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$	
<i>Test t: p-value</i>	2,5E-105		3,8E-256		1,7E-185		0,004		2,4E-87	
	$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$	
<i>D di Cohen</i>	-1,99		-4,68		-6,23		-0,26		-3,24	

Tabella 4.21: Test parametrico per valutare l'efficacia del provvedimento di dimezzare gli studenti all'interno dell'aula.

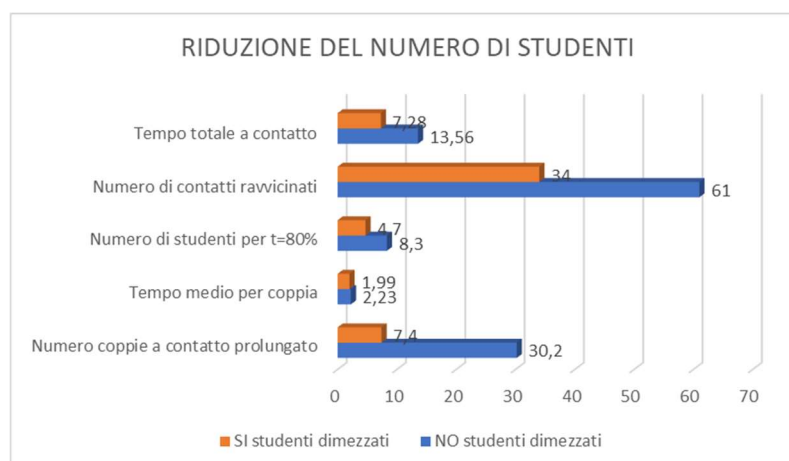


Figura 4.11: Efficacia del provvedimento "riduzione del numero di studenti" sui vari indicatori di rischio.

Come facilmente intuibile, dimezzare il numero degli studenti è la misura più efficace per ridurre il rischio di contagio, va però considerato che è anche la più impattante rispetto ad un regolare svolgimento di lezione: molti studenti infatti non possono fisicamente partecipare alla lezione in presenza.

Ridurre il numero di studenti da 40 a 20 ha quasi dimezzato i contatti per studente, oltre a ridurre sensibilmente il tempo totale a contatto. Anche il numero di studenti con cui un singolo agente intrattiene la maggior parte dei suoi contatti si è ridotto di molto, tuttavia la riduzione effettiva del tempo per coppia è abbastanza contenuta. Si registra anche un calo vistoso del numero di coppie sottoposte a contatti di durata maggiore ai 3 minuti.

4.4.8 Dimezzamento degli studenti e obbligo di sedersi a banchi alternati

Dimezzare il numero di studenti permette di introdurre un ulteriore provvedimento: ovvero l'obbligo di sedute alterne, così da aumentare la distanza interpersonale tra gli studenti durante la lezione. Per comprendere i benefici di tale provvedimento si esegue un confronto tra il modello in cui si applica come unica misura quella di dimezzare gli studenti, e il modello in cui viene aggiunto anche l'obbligo di disporsi in banchi alternati.

<i>Distribuzioni campionarie (R =1 m)</i>				
<i>Riduzione del numero di studenti e obbligo di sedersi a banchi alterni</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Tempo totale a contatto [min]</i>	6,46 < 6,75 < 7,04	2,12	2,25	14,03
<i>Numero di contatti ravvicinati</i>	28,1 < 28,6 < 29,1	3,9	17,3	41,0
<i>Numero studenti per t=80%</i>	4,29 < 4,35 < 4,41	0,4	3,1	6,0
<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	1,79 < 1,86 < 1,93	0,49	0,68	2,94
<i>Numero coppie t > 3 min</i>	6,9 < 7,3 < 7,7	2,5	2,0	15,0

Tabella 4.22: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui sono applicate come misure anti-contagio il dimezzamento degli studenti nell'aula e l'obbligo di sedersi a banchi alterni.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

Obbligo di sedersi a banchi alterni

<i>R = 1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 3 minuti</i>	
<i>Obbligo di sedersi a banchi alterni?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	7,28	6,75	34,0	28,6	4,7	4,35	1,99	1,86	7,4	7,3
<i>Dev. St. (σ)</i>	2,45	2,12	4,2	3,9	0,4	0,4	1,04	0,49	2,6	2,5
<i>N° osservazioni</i>	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
<i>Test f: p-value</i>	0,02		0,23		0,35		1,6E-24		0,414	
	$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$	
<i>Test t: p-value</i>	0,011		1E-34		9,1E-13		0,067		0,45	
	$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 = \mu_2$		$\mu_1 = \mu_2$	
<i>D di Cohen</i>	0,23		1,35		0,73		/		/	

Tabella 4.23: Test parametrico per valutare l'efficacia del provvedimento di disporre gli studenti in banchi alternati.

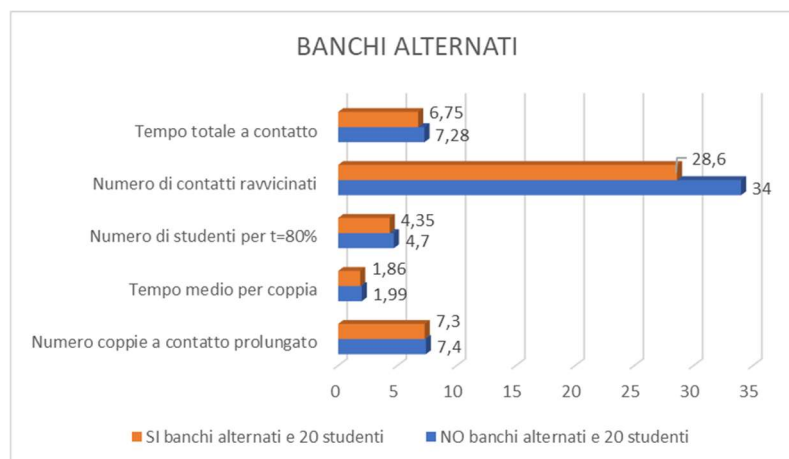


Figura 4.12: Efficacia del provvedimento "banchi alternati" sui vari indicatori di rischio.

4.4 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto di 1 metro

I benefici prodotti da tale provvedimento sono piuttosto limitati, sebbene non assenti. Questo dimostra come le sedute siano in realtà già di per sé distanziate a sufficienza per garantire la distanza di 1 metro. Tuttavia, come già sottolineato, non sono sufficienti a garantire il distanziamento di 2 metri.

4.4.9 Incidenza di tutti i provvedimenti

A questo punto si è osservato l'effetto positivo prodotto da tutti i provvedimenti applicati insieme. Le distribuzioni campionarie dello scenario in cui sono applicati tutti i provvedimenti di distanziamento e che considera soltanto i contatti tra gli studenti è già stato illustrato in Tabella 3.7 (qui i dati sono stati convertiti in minuti).

<i>Tutti i provvedimenti distanziamento</i>										
<i>R = 1 metro</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 3 minuti</i>	
<i>Provvedimenti?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	13,56	1,05	61,0	17,0	8,3	4,6	2,23	0,35	30,2	0,4
<i>Dev. St. (σ)</i>	3,73	0,67	7,0	3,0	0,7	0,6	0,80	0,28	9,6	1,2
<i>N° osservazioni</i>	1000	1000	1000	1000	200	1000	200	1000	200	1000
<i>Test f: p-value</i>	0		4,3E-147		0,012		1,4E-113		0	
	$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$	
<i>Test t: p-value</i>	0		0		6,8E-173		2,7E-84		1,7E-104	
	$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$	
<i>D di Cohen</i>	-4,68		-8,18		-5,62		-3,11		-4,34	

Tabella 4.24: Test parametrico per valutare l'efficacia di tutti i provvedimenti di distanziamento combinati nello scenario in cui vengono considerati i soli contatti tra studenti.

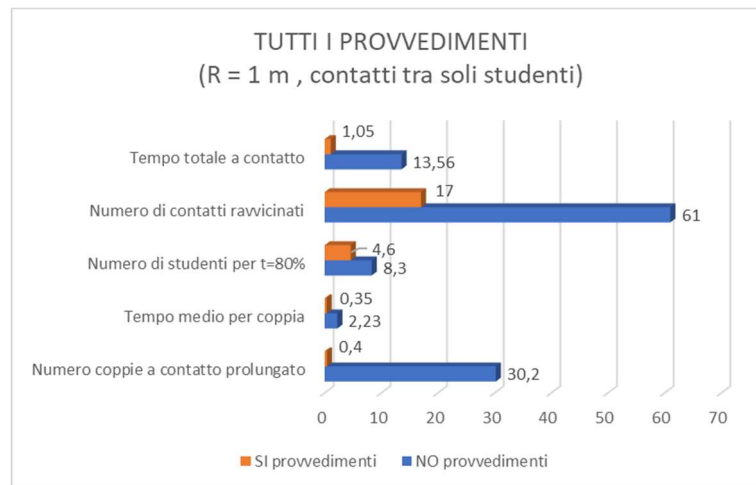


Figura 4.13: Efficacia di tutti i provvedimenti di distanziamento sugli indicatori di rischio.

La combinazione di tutti i provvedimenti di distanziamento fisico riduce in maniera vistosa i contatti tra studenti al di sotto di un metro, e con essi il rischio di contagio.

4.5 Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto dei 2 metri

4.5.1 Nessun provvedimento di distanziamento: contatti tra soli studenti

Come nei test precedenti anche ora si è deciso di considerare soltanto i contatti che avvengono tra gli studenti.

Distribuzioni campionarie (R =2 m)

<i>Nessun provvedimento di distanziamento</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
Tempo totale a contatto [min]	368,16 < 373,93 < 379,70	29,42	192,13	409,64
Numero di contatti ravvicinati	88,2 < 90,0 < 91,8	9,1	56,9	108,9

4.5 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto dei 2 metri

Numero studenti per $t=80\%$	2,21 < 2,24 < 2,27	0,1	2,0	2,7
Tempo di contatto per coppia [min]	101,27 < 102,84 < 104,61	8,53	51,61	114,34
Numero coppie $t > 5 \text{ min}$	74,9 < 77,0 < 79,1	10,8	56,0	103,0

Tabella 4.25: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui non è applicata nessuna misura di prevenzione, e che considera i soli contatti tra studenti e un raggio di prossimità di 2 metri.

4.5.2 Dimezzamento degli studenti e obbligo di sedute alternate

Come constatato, la causa principale degli indicatori molto elevati quando si aumenta il raggio di prossimità a due metri, in una condizione in cui non vengono applicati provvedimenti, sono le sedute eccessivamente ravvicinate. Questo può essere evidenziato valutando cosa accade nel momento in cui si introduce l'obbligo di sedute alternate, provvedimento che, per ovvie ragioni, deve essere accompagnato da una riduzione degli studenti in aula.

Distribuzioni campionarie ($R = 2 \text{ m}$)

Dimezzamento studenti e obbligo di sedute alterne	Media (intervallo di confidenza 95%)	Deviazione Standard	Min	Max
Tempo totale a contatto [min]	12,42 < 13,05 < 13,68	3,96	5,07	28,27
Numero di contatti ravvicinati	41,5 < 42,2 < 43,3	5,3	29,5	53,4
Numero studenti per $t=80\%$	5,01 < 5,07 < 5,13	0,4	4,1	6,0
Tempo di contatto per coppia [min]	1,81 < 1,89 < 1,97	0,52	0,78	4,55
Numero coppie $t > 5 \text{ min}$	8,6 < 9,2 < 9,8	3,7	1,0	19,0

Tabella 4.26: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui sono applicate come misure anti-contagio il dimezzamento degli studenti nell'aula e l'obbligo di sedersi a banchi alternati.

4.5 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto dei 2 metri

Dimezzamento degli studenti e obbligo di sedute alterne

<i>R=2 metri</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 5 minuti</i>	
<i>Dimezzamento degli studenti e obbligo di sedute alterne?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	373,93	13,05	90,0	42,2	2,24	5,07	102,84	1,89	77,0	9,2
<i>Dev. St. (σ)</i>	29,42	3,96	9,1	5,3	0,1	0,4	8,53	0,52	10,8	3,7
<i>N° osservazioni</i>	100	150	100	150	100	150	100	150	100	150
<i>D di Cohen</i>	-17,19		-6,37		10,11		-16,72		-8,39	

Tabella 4.27: Test parametrico per valutare l'efficacia di ridurre gli studenti e disporli a banchi alternati relativamente ai contatti al di sotto dei 2 metri.

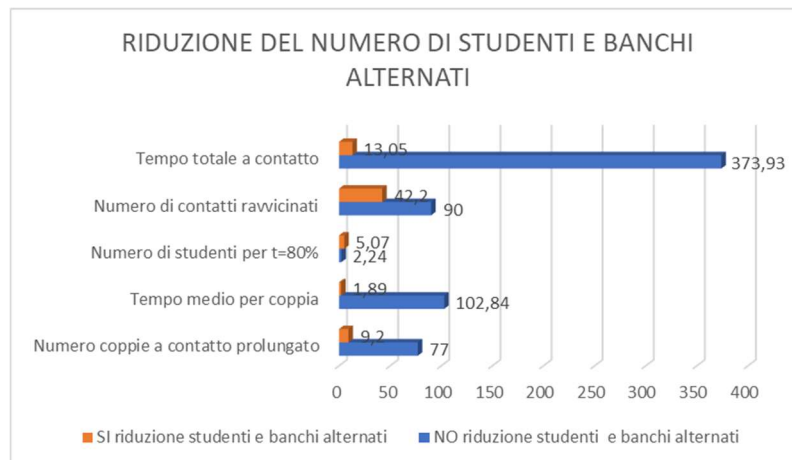


Figura 4.14: Efficacia del provvedimento "ridurre il numero di studenti e usare banchi alternati" sui vari indicatori di rischio per raggio di prossimità pari a 2 metri.

Il diagramma a barre in Figura 4.14 esplicita in modo chiaro l'efficacia di dimezzare gli studenti affiancata da una disposizione dei banchi alternata, relativamente ai contatti al di sotto dei 2 metri di distanza. Queste misure permettono infatti di allontanare gli studenti a sufficienza durante la lezione in aula.

4.5.3 Efficacia degli altri provvedimenti

Resta ora da indagare se anche gli altri provvedimenti siano validi per ridurre gli indicatori di rischio relativamente ai contatti ravvicinati entro i 2 metri. Si è confrontato allora il modello in cui si sono dimezzati gli studenti, ma non vengono presi ulteriori provvedimenti, con quello in cui, invece, sono introdotti tutti i provvedimenti.

<i>Distribuzioni campionarie (R =2 m)</i>				
<i>Tutti i provvedimenti di distanziamento</i>	<i>Media (intervallo di confidenza 95%)</i>	<i>Deviazione Standard</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Tempo totale a contatto [min]</i>	7,82 < 8,27 < 8,72	3,25	2,56	22,44
<i>Numero di contatti ravvicinati</i>	29,3 < 29,9 < 30,5	4,6	16,8	40,4
<i>Numero studenti per t=80%</i>	3,49 < 3,54 < 3,59	0,3	2,4	4,5
<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	1,77 < 1,90 < 2,03	0,91	0,55	11,54
<i>Numero coppie t > 5 min</i>	5,6 < 5,9 < 6,2	2,3	1,0	15,0

Tabella 4.28: Parametri delle distribuzioni normali nello scenario in cui sono applicati tutti i provvedimenti di distanziamento e che considera solo i contatti tra studenti e un raggio di prossimità di 2 metri.

4.5 – Efficacia dei singoli provvedimenti sui i contatti al di sotto dei 2 metri

Tutti i provvedimenti distanziamento

<i>R=2 metri</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per t = 80%</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie t > 3 minuti</i>	
<i>Provvedimenti?</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>	<i>NO</i>	<i>SI</i>
<i>Media (μ)</i>	13,05	8,27	42,2	29,9	5,07	3,54	1,89	1,90	9,2	5,9
<i>Dev. St. (σ)</i>	3,96	3,25	5,3	4,6	0,4	0,3	0,52	0,91	3,7	2,3
<i>N° osservazioni</i>	150	200	150	200	150	200	150	200	150	200
<i>Test f: p-value</i>	0,005		0,023		0,081		1,3E-12		3E-10	
	$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 = \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$		$\sigma_1 > \sigma_2$	
<i>Test t: p-value</i>	1,34E-27		5,8E-68		1,4E-134		0,45		1,8E-19	
	$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$		$\mu_1 = \mu_2$		$\mu_1 > \mu_2$	
<i>D di Cohen</i>	-1,32		-2,51		-4,36		/		-1,09	

Tabella 4.29: Test parametrico per valutare l'efficacia dei provvedimenti di distanziamento relativamente ai contatti entro i 2 metri.

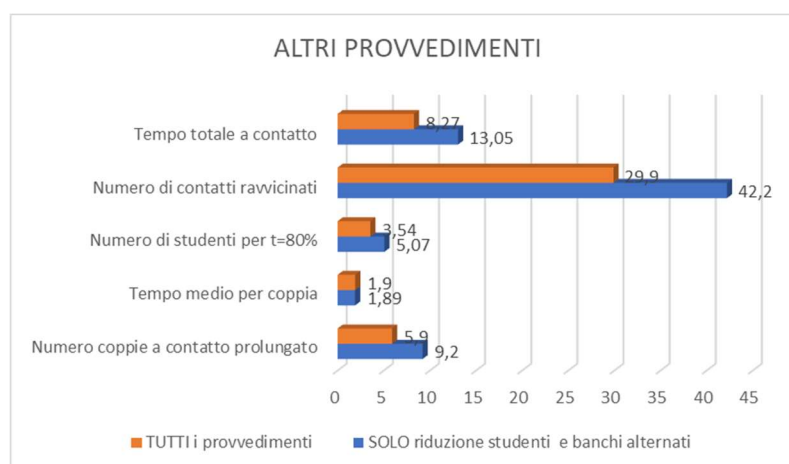


Figura 4.15: Efficacia dei provvedimenti di distanziamento sugli indicatori di rischio relativamente ai contatti al di sotto dei 2 metri.

Il test evidenzia come anche gli altri provvedimenti abbiano un impatto significativo sugli indicatori di rischio: l'effetto più marcato si ha sul numero di contatti e sul numero di persone con cui un agente trascorre la maggior parte del suo tempo totale a contatto.

4.6 Incidenza del numero di studenti

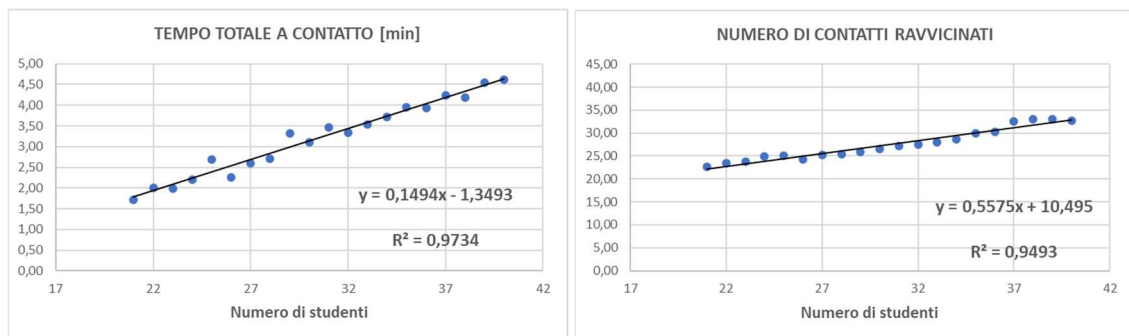
Si è appurato come l'applicazione dei provvedimenti di distanziamento all'interno di un'aula con venti studenti sfavorisca in modo efficace i contatti tra quest'ultimi, che rimangono a contatto reciproco per un tempo molto contenuto. Si vuole ora osservare fino a che punto possa aumentare il numero di studenti pur mantenendo questa condizione di sicurezza.

Per svolgere questo tipo di indagine si è allora eseguita un'analisi di regressione che descriva l'andamento degli indicatori di rischio al variare del numero di studenti che occupano l'aula, in uno scenario dove tutte le altre misure di distanziamento sono rispettate. Grazie a questa analisi di regressione è allora possibile vedere il numero di studenti massimo oltre il quale gli indicatori raggiungono valori preoccupanti.

Tramite l'*Experimenter* di FlexSim si sono allora impostati gli scenari che corrispondono ai diversi numeri di studenti, dopodiché ogni scenario è stato replicato più volte in modo da ottenere degli indici medi più affidabili. Una volta ricavati gli indicatori di rischio al variare del numero di studenti si è effettuata la regressione lineare.

Per svolgere questa analisi si è considerato lo scenario in cui vengono presi i provvedimenti di distanziamento, valutando però soltanto i contatti tra gli studenti e limitatamente ai contatti entro il metro di distanza.

Si sottolinea come in alcuni parametri l'andamento non sia lineare, per altri, invece, tale approssimazione è molto buona.



4.6 – Incidenza del numero di studenti

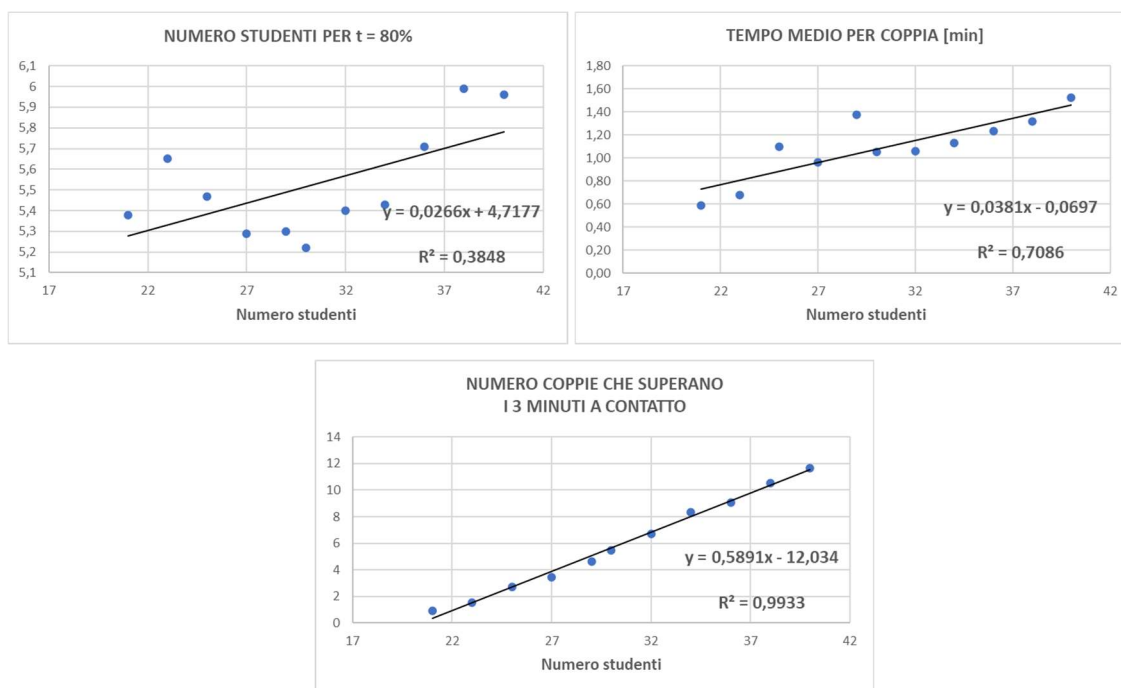


Figura 4.16: Rette di regressione che esprimono l'andamento degli indicatori di rischio al variare del numero di studenti fino a un massimo di 40.

L'analisi di regressione evidenzia che aumentando il numero di studenti in aula fino a 40 gli indicatori non raggiungono mai valori preoccupanti, questo permette di affermare che, anche se il numero di studenti in aula fosse portato a 40 e se le regole di distanziamento fossero rispettate, non si avrebbe un sensibile aumento dei contatti al di sotto di 1 metro di distanza tra gli studenti.

Si è già osservato, tuttavia, che se il numero di studenti aumenta oltre 20 non è possibile disporli in modo alternato, obbligandone alcuni a sedersi in banchi adiacenti; poiché le sedute non sono sufficienti a garantire una distanza interpersonale di due metri il rischio di contagio per studenti che occupano banchi vicini diventa consistente.

Come accennato, in condizioni normali l'aula può ospitare un massimo di 80 studenti, prevedendo anche due studenti per un'unica seduta. In queste condizioni gli indici raggiungono valori inaccettabili, e questo è dovuto al fatto che gli studenti vicini trascorrono la totalità della lezione ad una distanza inferiore al metro. I risultati sono coerenti poiché forniscono indicatori con valori prossimi alla durata della lezione.

4.6 – Incidenza del numero di studenti

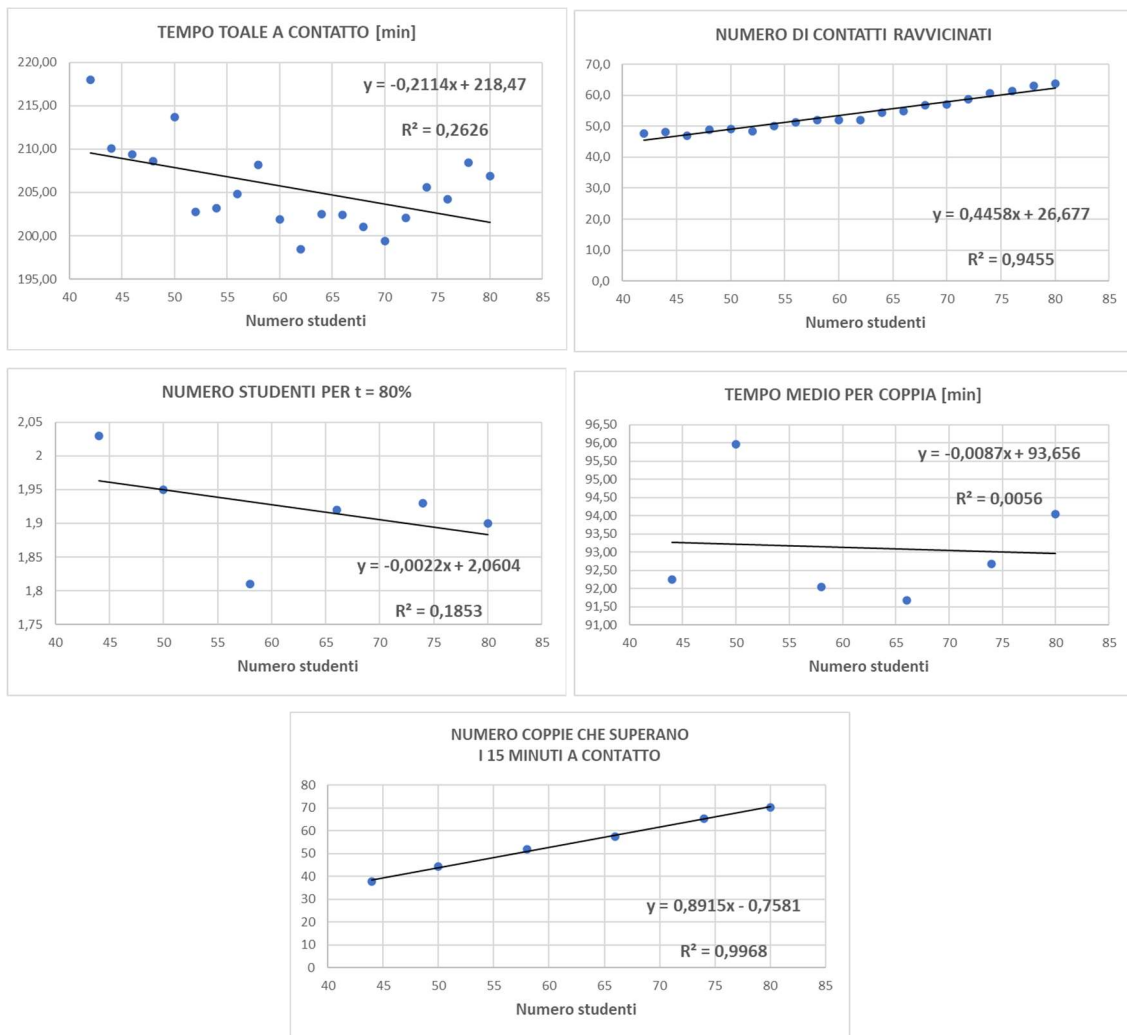


Figura 4.17: Rette di regressione che esprimono l'andamento degli indicatori di rischio quando il numero di studenti varia tra 40 e 80.

Capitolo 5

Conclusioni

5.1 Riepilogo dei risultati

Attraverso la simulazione ad eventi discreti è stato possibile studiare approfonditamente l'efficacia dei provvedimenti di distanziamento fisico all'interno di un'aula universitaria, verificando se il distanziamento interpersonale viene realmente rispettato, e valutando così il rischio di contagio da virus SARS-CoV-2 dovuto ai contatti a distanza ravvicinata.

Il sistema reale analizzato prevede due lezioni frontali da 75 minuti, separate da un intervallo della durata di 15 minuti, all'interno del laboratorio informatico LEP del Politecnico di Torino. Le misure di distanziamento introdotte sono:

- Dimezzamento del numero massimo di studenti che occupano l'aula.
- Gli studenti devono sedersi lasciando un posto libero di distanza tra di loro.
- Le sedie nel corridoio del piano e i lavandini in bagno possono essere utilizzati solo in modo alternato.
- L'ingresso degli studenti in aula è regolato da una fase di registrazione iniziale durante la quale gli studenti devono anche igienizzare le mani.
- Gli studenti durante le code d'attesa devono mantenere il distanziamento interpersonale.
- Il numero delle uscite è stato raddoppiato, ogni studente deve servirsi dell'uscita a lui più vicina.

Il modello implementato permette di individuare quando due agenti della simulazione si portano ad una distanza minore di una minima impostata. Rielaborando dunque le informazioni raccolte dal simulatore si sono individuati degli indici, denominati “indicatori di rischio”, grazie ai quali è possibile quantificare il rischio di contagio per contatti ravvicinati connesso al sistema in uno specifico scenario. Tali indicatori sono:

- *Tempo totale a contatto*: calcola il tempo complessivo in cui un agente si mantiene a distanza ravvicinata con tutti gli altri occupanti dell'ambiente. Formalmente si calcola come la somma delle durate di tutti i contatti ravvicinati che vedono coinvolto un certo agente.

- *Numero di contatti ravvicinati*: conteggia il numero effettivo di contatti che coinvolgono un agente, indipendentemente dalla loro durata.
- *Durata media contatto*: si calcola come rapporto tra il tempo totale a contatto e il numero di contatti. Si è deciso di tralasciare lo studio di questo indicatore a causa dell'eccessiva dispersione che lo caratterizza e che porterebbe a sottostimare il rischio; infatti i numerosi contatti brevi in cui un agente si trova coinvolto abbassano sensibilmente il valore della media.

L'indicatore di *tempo totale a contatto* accorpa al suo interno tutti i contatti intrattenuti con la totalità degli agenti della simulazione, ma non fornisce informazioni su come questi siano distribuiti. Tuttavia, è intuitivo, è ben diverso il caso in cui il tempo di contatto si distribuisce uniformemente su tutti gli studenti, piuttosto che si concentri invece in una cerchia più ristretta, ed è plausibile immaginare che sia proprio questa seconda condizione a verificarsi. Per tenere conto di ciò si dispone di altri due indici:

- *Numero di agenti con cui viene trascorso l'80% del tempo totale di contatto*: calcola il numero di persone con cui un agente si intrattiene per la quasi totalità del suo tempo totale a contatto, normalmente un numero di persone decisamente inferiore rispetto a tutti gli occupanti.
- *Tempo totale per coppia*: Si ottiene dividendo l'80% del tempo totale a contatto per il numero di agenti con cui questo viene trascorso.

L'analisi combinata di questi due indici permette di comprendere quante persone un agente positivo al virus è potenzialmente in grado di infettare. Infine, è anche possibile conteggiare il numero di coppie di agenti che si mantengono a contatto ravvicinato per un tempo cumulato prolungato, superiore ad un certo valore limite.

Per quanto riguarda la distanza considerata minima, al di sotto della quale il contatto venga effettivamente rilevato, l'analisi è stata condotta su due piani: dapprima si è posta pari a 1 metro, al fine di indagare i contatti più rischiosi; dopodiché lo studio è stato replicato impostando il raggio di prossimità su un valore di 2 metri, la distanza al di sopra della quale la probabilità di essere contagiati da un soggetto positivo è assolutamente ridotta.

I risultati della modello di simulazione permettono di affermare che, se tutte le regole di distanziamento fossero rispettate nel modo corretto, allora il rischio di contagio nell'aula universitaria sarebbe contenuto. Il discorso è valido, sebbene in misura diversa, per tutte le diverse categorie di agenti che popolano l'ambiente.

5.1 – Riepilogo dei risultati

Raggio di prossimità	Tempo totale a contatto [min]		Numero contatti ravvicinati		Numero studenti per $t = 80\%$		Tempo di contatto per coppia [min]	
	$R = 1\text{ m}$	$R = 2\text{ m}$	$R = 1\text{ m}$	$R = 2\text{ m}$	$R = 1\text{ m}$	$R = 2\text{ m}$	$R = 1\text{ m}$	$R = 2\text{ m}$
Tutti gli agenti	13,2	26,9	29,5	53,9	2,5	13,4	4,9	6,5
Assistenti	73,3	117,0	78,3	164,7	7,4	9,3	8,1	10,3
Studenti	8,4	20,0	25,9	47,0	1,9	3,0	5,0	6,4
Personale di passaggio	1,0	6,49	16,3	12,2	3,3	2,2	0,34	3,7

Tabella 5.1: Riepilogo degli indicatori di rischio per ciascuna categoria di agenti e considerando un raggio di prossimità di 1 e 2 metri.

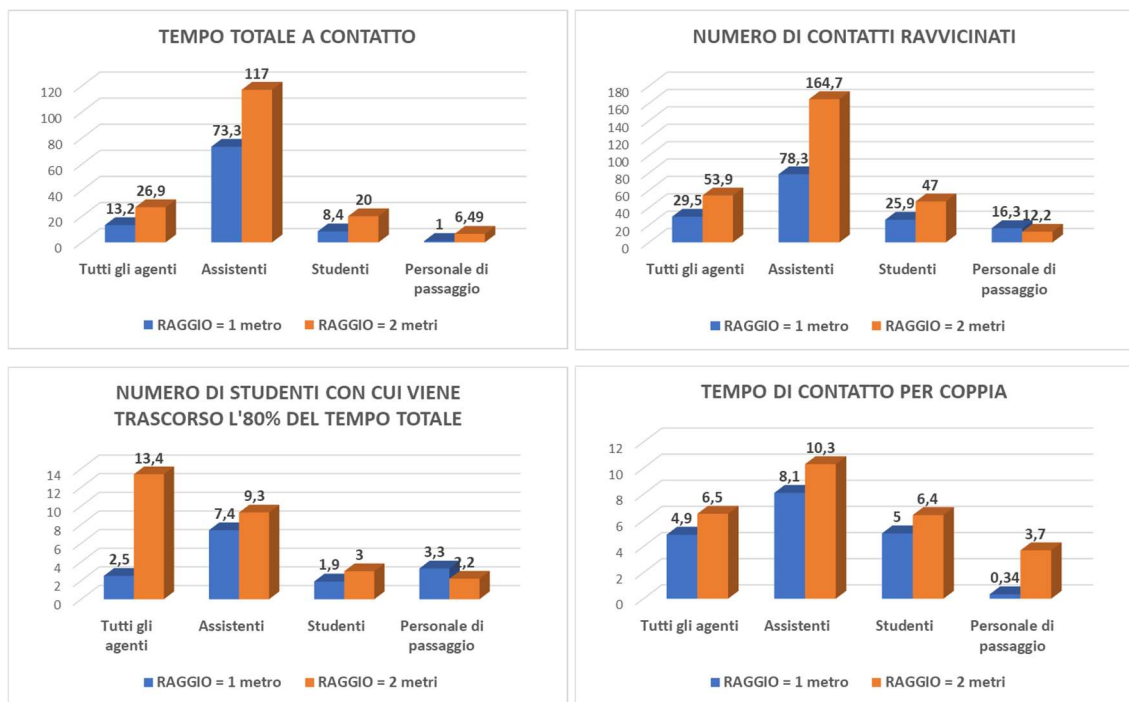


Figura 5.1: Diagrammi a barre degli indicatori di rischio per ciascuna categoria e per entrambi i raggi di prossimità analizzati.

I soggetti più a rischio sono gli assistenti di laboratorio, questi, infatti, si mantengono ad una distanza inferiore ad un metro con gli studenti per 73,3 minuti complessivi. La quasi totalità di questo tempo è condensato su circa 7 studenti, con ciascuno dei quali l'assistente si intrattiene per 8,1 minuti. Considerando invece un raggio di prossimità di due metri, il tempo totale a contatto sale a 117 minuti per 164 contatti. Con circa 9 studenti un assistente si mantiene al di sotto dei due metri di distanza per poco più di 10 minuti.

Considerando invece la categoria degli studenti, questi violano la distanza minima di un metro mediamente 26 volte e per un totale di 8,4 minuti, concentrati però in soltanto due agenti. Si è inoltre rilevato come questi due agenti siano gli assistenti a cui vengono rivolte le domande: i provvedimenti di distanziamento annullano quasi completamente i contatti tra studenti al di sotto di un metro.

Questi indici aumentano se si alza il raggio di prossimità a due metri, ma rimangono comunque su valori tutt'altro che preoccupanti.

Si è inserito nel modello anche la categoria che include il personale di passaggio nel corridoio, constatando come gli indicatori di rischio che li coinvolgono siano assolutamente irrilevanti.

Infine, si sono registrate solo 3,6 coppie che si mantengono ad una distanza inferiore al metro per oltre 10 minuti, 0,8 coppie per un tempo superiore ai 15 minuti. 2,87 coppie violano la distanza di 2 metri per oltre 15 minuti, 0,74 coppie per oltre 20 minuti.

Si sottolinea come tutti questi indici siano mediati su numerose repliche della stessa simulazione, questo li rende affidabili con un ottimo grado di precisione.

Nel complesso, l'ambiente del laboratorio in cui i provvedimenti di distanziamento sono rispettati è caratterizzato da un rischio di contagio contenuto: non soltanto i contatti ravvicinati al di sotto di 1 metro sono poco frequenti, ma viene rispettata efficacemente anche la distanza di sicurezza di 2 metri. Il maggior rischio, come prevedibile, è rappresentato dagli assistenti di laboratorio, che nel caso risultassero positivi potrebbero contagiare gli studenti, ma anche nel loro caso si è ampiamente al di sotto dei 15 minuti complessivi, tempo normalmente individuato come necessario per la trasmissione del virus. Inoltre, essendo gli assistenti dei dipendenti universitari, risulta semplice monitorarne la salute sottoponendoli a tamponi periodici.

Il modello che si è implementato permette anche di individuare le zone dell'aula dove i contatti sono più frequenti, ma i risultati in tal senso sono piuttosto prevedibili. Questi, infatti, sono concentrati sulla zona di passaggio centrale dell'aula, nel corridoio esterno del piano in prossimità delle sedie e davanti ai servizi.

5.1.1 Rischio di contagio nell'ambiente in cui non sono applicati i provvedimenti di distanziamento

Per quantificare la portata dei benefici introdotti dai provvedimenti di distanziamento fisico, si è provato a sospendere le misure anti-contagio, valutando così gli indicatori di rischio di una normale lezione di laboratorio prima della pandemia.

<i>Raggio di prossimità</i>	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per $t = 80\%$</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>	
	<i>R = 1 m</i>	<i>R = 2 m</i>	<i>R = 1 m</i>	<i>R = 2 m</i>	<i>R = 1 m</i>	<i>R = 2 m</i>	<i>R = 1 m</i>	<i>R = 2 m</i>
<i>Tutti gli agenti</i>	31,1	365,5	76,8	117,8	5,2	3,8	5,1	103,2
<i>Assistenti</i>	216,3	507,5	224,5	394,8	17,4	23,0	10,0	17,7
<i>Studenti</i>	24,6	397,8	75,6	113,9	4,8	2,8	5,3	117,7
<i>Personale di passaggio</i>	3,4	6,5	15,0	18,0	3,0	3,6	1,0	1,3

Tabella 5.2: Riepilogo degli indicatori di rischio per ciascuna categoria di agenti e considerando un raggio di prossimità di 1 e 2 metri nel modello nel quale sono sospesi i provvedimenti di distanziamento fisico.

I diagrammi che seguono mettono a confronto gli indicatori di rischio nel caso in cui i provvedimenti sono applicati, con quelli calcolati nel caso in cui sono stati sospesi. Questi rappresentano in modo eloquente l'aumento vistoso dei contatti dovuto alla rimozione delle norme di distanziamento.

5.1 – Riepilogo dei risultati

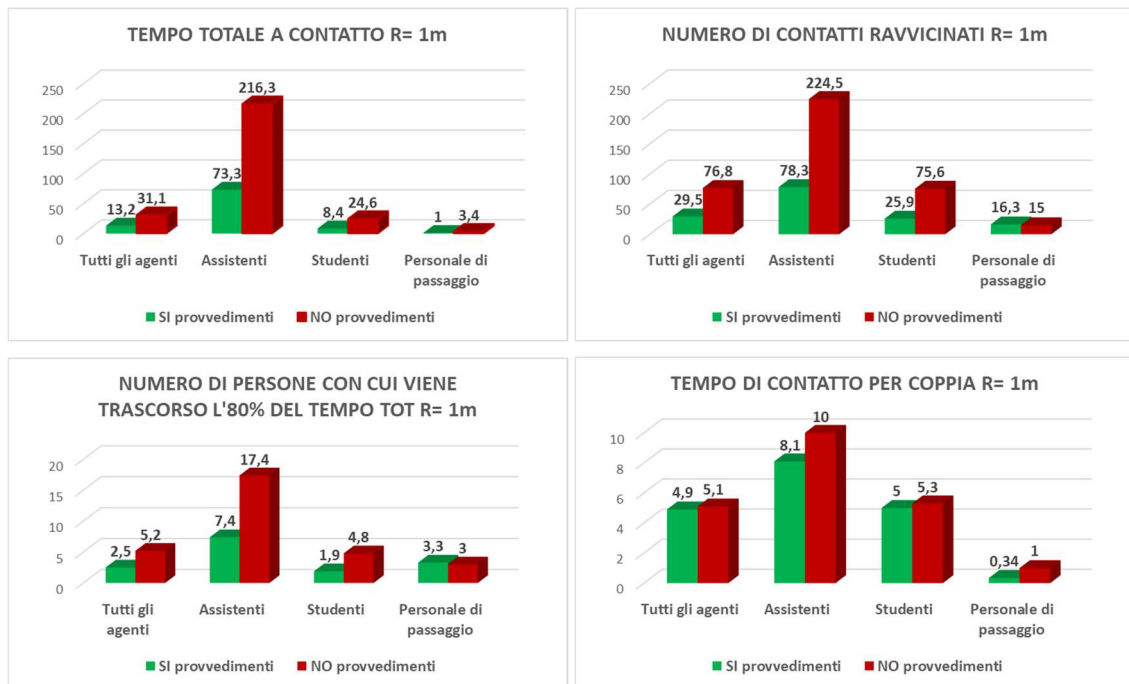


Figura 5.2: Efficacia dei provvedimenti di distanziamento nei confronti dei contatti al di sotto di 1 metro.

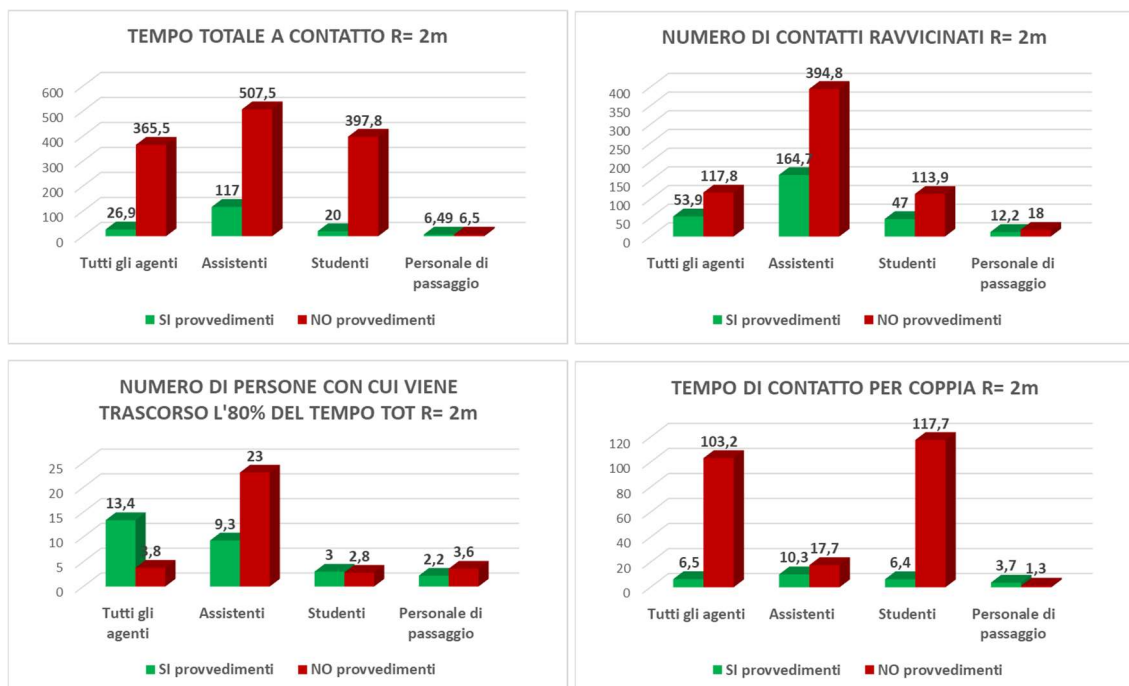


Figura 5.3: Efficacia dei provvedimenti di distanziamento nei confronti dei contatti al di sotto di 2 metri.

L'aumento vistoso degli indici è rappresentativo dell'efficacia dei provvedimenti di distanziamento: se questi non venissero applicati il rischio di contagio nell'aula diventerebbe significativo. I contatti al di sotto del metro di distanza aumentano sensibilmente (Figura 5.2), ma la reale portata del rischio di contagio si coglie osservando gli indicatori di rischio relativi ad un raggio di prossimità di due metri (Figura 5.3).

Un assistente si intrattiene con 23 studenti per 17,7 minuti medi, un tempo più che sufficiente per contagiarne una percentuale elevata. Uno studente, invece, si mantiene al di sotto dei due metri di distanza con quasi tre studenti per 117,7 minuti, un tempo che coincide con la quasi totalità della lezione frontale in aula. Questo è dovuto al fatto che le sedute non sono distanti a sufficienza da garantire una distanza interpersonale di due metri, nonostante la dimensione dei banchi sia comunque piuttosto ampia.

Pertanto, è possibile affermare che l'ambiente dove non sono applicate misure anti-contagio non è idoneo per svolgere una lezione in condizioni di sicurezza.

5.1.2 Efficacia dei singoli provvedimenti

A questo punto si è voluta indagare l'efficacia dei vari provvedimenti di distanziamento presi singolarmente. Si è partiti dallo scenario in cui non vengono prese misure anti-contagio e, di volta in volta, si è introdotta una singola misura di distanziamento. Si è allora verificato che tale misura comportasse un reale beneficio su ciascun indicatore di rischio. Come misura dell'effetto di tale beneficio si è poi calcolata la D di Cohen.

Dal momento che i provvedimenti mirano a sfavorire i contatti tra soli studenti, tale indagine è stata condotta considerando i contatti che avvengono soltanto tra di questi, sospendendo invece il conteggio relativo agli assistenti.

5.1 – Riepilogo dei risultati

Efficacia dei singoli provvedimenti ($R = 1$ metro)										
	<i>Tempo totale a contatto [min]</i>		<i>Numero contatti ravvicinati</i>		<i>Numero studenti per $t = 80\%$</i>		<i>Tempo di contatto per coppia [min]</i>		<i>Numero coppie $t > 3$ minuti</i>	
Nessun provvedimento	13,6		61,0		8,3		2,2		30,2	
Uscite regolamentate	13,6	+0	55,9	-5,1	7,9	-0,4	2,2	+0	30,2	+0
Utilizzo alternato di sedie e lavandini	12,0	-1,6	60,2	-0,8	9,0	+0,7	2,0	-0,2	26,2	-4,0
Code distanziate	9,5	-4,1	58,0	-3,0	8,3	+0	1,9	-0,3	20,9	-9,3
Registrazione	23,7	+10,1	76,1	+15,1	5,8	-2,5	3,5	+1,3	64,4	+34,2
Registraz. con coda distanziata	12,1	-1,5	30,8	-30,2	4,5	-3,8	2,2	+0	25,1	-5,1
Dimezzamento studenti	7,3	-6,3	34,0	-27,0	4,7	-3,6	2,0	-0,2	7,4	-22,8
Dimezzamento studenti e sedute alternate	6,8	-6,8	28,6	-32,4	4,4	-3,9	1,9	-0,3	7,3	-22,9
Tutti i provvedimenti	1,1	-12,5	17,0	-44,0	4,6	-3,7	0,4	-1,8	0,4	-29,8

Tabella 5.3: Efficacia dei singoli provvedimenti relativamente ai contatti al di sotto di un metro. Il modello di riferimento considera i soli contatti tra gli studenti.

5.1 – Riepilogo dei risultati

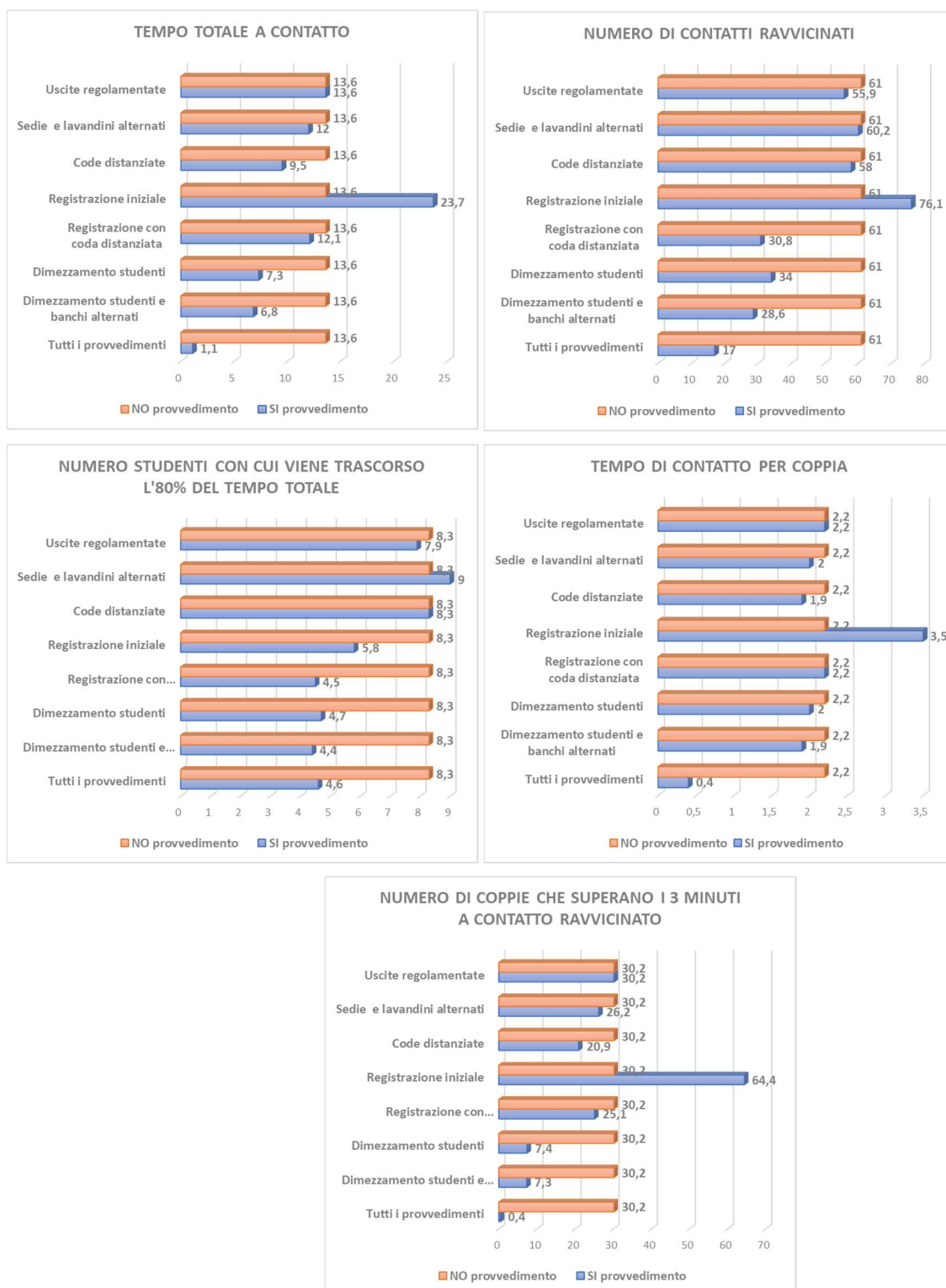


Figura 5.4: Diagrammi a barre che esprimono come variano gli indicatori di rischio in seguito all'applicazione dei singoli provvedimenti di distanziamento.

Ogni provvedimento comporta un beneficio, più o meno evidente, sugli indicatori di rischio: la loro somma produce uno scenario in cui il rischio che uno studente contagi un altro studente è praticamente assente, come è possibile osservare nell'ultima riga della Tabella 5.3.

Il provvedimento più efficace, come facilmente intuibile, consiste nel ridurre il numero degli studenti in aula, tuttavia è anche la misura che più incide rispetto a un regolare funzionamento dell'attività universitaria, perché costringe molti studenti a non poter partecipare alla lezione. Alla luce di questo si è indagato fino a che numero fosse possibile aumentare il numero di studenti pur mantenendo una condizione di sicurezza all'interno dell'aula.

Si è allora valutato l'andamento degli indicatori all'aumentare del numero degli studenti. L'analisi di regressione dimostra che, anche se il numero di studenti fosse portato a 40, gli indicatori di rischio manterrebbero valori accettabili quando si considera un raggio di prossimità di un metro, ma, come si è già sottolineato, aumentare il numero di studenti oltre 20 impedisce di distribuirli distanziati a sufficienza da garantire il distanziamento di due metri. Inoltre, il numero di studenti elevato affollerebbe eccessivamente l'ambiente, pertanto anche se fosse adeguatamente ventilato il rischio di contagio da aerosol diventerebbe consistente. Si può quindi concludere che il numero di studenti è bene che non salga al di sopra di 20.

5.2 Limiti del modello e possibili sviluppi

I risultati presentati sono frutto di un modello di simulazione che, in quanto tale, è un'approssimazione della realtà. Questo implica che i parametri ottenuti non sono risposte esatte, ma soltanto delle stime.

Il modello che si è implementato risulta piuttosto fedele al sistema reale, rendendolo uno strumento efficace; ciò nonostante presenta dei limiti intrinseci che non è stato possibile evitare.

Innanzitutto, si limita a valutare il rischio di contagio connesso ai contatti ravvicinati, non indagando la problematica dei contagi dovuti ad una scarsa ventilazione. Si è assunto infatti che l'ambiente sia arieggiato adeguatamente, con ricambio d'aria frequente anche di più volte nella stessa ora. L'ipotesi non appare inadeguata se si osserva il layout del laboratorio, tale da garantire questa condizione; inoltre, alla luce di quanto evidenziato nel paragrafo 1.4.1, l'ambiente può essere considerato sicuro sotto questo punto di vista.

In secondo luogo, il modello presuppone che le norme di distanziamento siano rispettate in modo meticoloso dagli studenti. Anche questa è un'ipotesi plausibile: un'indagine condotta su 18 mila

studenti di 14 diversi campus negli Stati Uniti evidenzia come le misure di prevenzione siano effettivamente rispettate da una percentuale molto alta degli universitari [36].

Il modello non considera inoltre l'eventualità di situazioni anomale rispetto alla lezione standard tradizionale.

È anche necessario tenere a mente che i risultati relativi al rischio di contagio fanno riferimento alla sola lezione di laboratorio (inclusiva dell'intervallo), ma non è contemplato cosa facciano gli studenti prima e dopo di essa, ad esempio se prendano mezzi di trasporto in compagnia di alcuni colleghi o semplicemente si intrattengano a parlare una volta terminata la lezione.

Il limite più grande, tuttavia, è l'assenza di dati di sperimentali da cui ricavare le distribuzioni in input al modello: questa tesi è stata infatti avviata a pandemia inoltrata, non è stato possibile recarsi sul campo per ricavare dati empirici, né tantomeno verificare le assunzioni studiando una lezione reale nel laboratorio. Sono però state formulate ipotesi opportunamente giustificate per delineare le distribuzioni di probabilità che sono state utilizzate.

Per concludere è doveroso ricordare nuovamente che il modello non è stato validato sul campo. Questo fa sì che gli indicatori ricavati sono solo indicativi, e non possono essere considerate stime affidabili e attendibili del rischio di contagio nell'ambiente reale a cui si riferisce il modello; tuttavia sono comunque conclusioni interessanti ai fini di valutare il rispetto del distanziamento fisico all'interno di un'aula universitaria.

I possibili sviluppi futuri di questa tesi prendono le mosse proprio dai limiti del modello: innanzitutto sarebbe necessario validare il modello, dopodiché si potrebbe procedere con l'ampliamento del caso in esame. Si potrebbe ad esempio ampliare l'analisi all'intero piano dove è situato il laboratorio LEP, includendo così nello studio anche i possibili contatti nel corridoio tra studenti di aule diverse; inoltre si potrebbero studiare eventuali scenari anomali nei quali il mantenimento delle distanze di sicurezza risulti particolarmente difficile da rispettare.

Appendice

6.1 Codice Matlab

```
clear all
close all
clc

%% Dati

% Numero di repliche svolte:
ReplicationsNumber = 1000;

% Numero di agenti della simulazione per ciascuna categoria:
Students = 20;
Assistants = 2;
PeopleInTheHall = 2;

AgentsNumber = Students + Assistants + PeopleInTheHall;

% Set di dati completo di tutte le repliche:
Data_tot = readmatrix('Dati','Range','A2:F715432');

Replication = Data_tot(:,1);      % Replicazione
Agent = Data_tot(:,2);           % Primo agente coinvolto nel contatto
Neighbor = Data_tot(:,3);        % Secondo agente coinvolto nel contatto
EnterTime = Data_tot(:,4);       % Istante di inizio contatto
ExitTime = Data_tot(:,5);        % Istante di fine contatto

index_0 = find(isnan(ExitTime));
ExitTime(index_0) = EnterTime(index_0) + 1;

Duration = ExitTime - EnterTime;
Data_tot = [Replication,Agent,Neighbor,EnterTime,ExitTime,Duration];

High_T_Couples_tot = [];
SingleAgent_tot = [];
```

```
Agents_results = [];  
  
%% Analisi dei dati  
  
for j = 1:ReplicationsNumber  
  
    % Set di dati singola replicazione  
    index_1 = find(Replication == j);  
    Data = Data_tot(index_1, 2:end);  
  
    Agent = Data(:,1);  
    Neighbor = Data(:,2);  
    EnterTime = Data(:,3);  
    ExitTime = Data(:,4);  
    Duration = ExitTime - EnterTime;  
  
    % Analisi dati singola replicazione  
    for i = 1:AgentsNumber  
        index_2 = find(Agent == i);  
  
        if isempty(index_2)  
            TotalTime = 0;  
            ContactsNumber = 0;  
            AvgDuration = 0;  
        else  
            TotalTime = sum(Duration(index_2));  
            ContactsNumber = length(index_2);  
            AvgDuration = TotalTime / ContactsNumber;  
        end  
  
        % Total: per ogni agente della simulazione individua il tempo totale  
        % di contatto, il numero totale dei contatti e la loro durata media  
        Total(i,:) = [i, TotalTime, ContactsNumber, AvgDuration, j];  
    end  
  
end  
  
%% ANALISI PER COPPIE DI AGENTI  
  
% Si individuano tutte le possibili coppie di agenti (sono le combinazioni  
semplici)
```

```
List = 1:1:(AgentsNumber);
Combinations = nchoosek(List,2);
M = [Agent, Neighbor];

% Per ogni coppia si trova il tempo totale a contatto e il numero di
% contatti
for i = 1:size(Combinations,1)
    index_3 = find(M(:,1) == Combinations(i,1) & M(:,2) == Combinations(i,2));

    if isempty(index_3)
        TotalTime = 0;
        ContactsNumber = 0;
    else
        TotalTime = sum(Duration(index_3));
        ContactsNumber = length(index_3);
    end

    Couples_results(i,:) = [Combinations(i,1), Combinations(i,2),TotalTime,...
        ContactsNumber];
end

% Numero di coppie che superano T secondi cumulati a contatto:
T = 900;
High_T_Couples = length(find(Couples_results(:,3) > T));

% Tempo totale medio in cui due agenti generici rimangono a contatto:
TTM_couples = mean(Couples_results(:,3));

% N.B: il tempo medio per coppia così calcolato è poco indicativo del reale
% rischio di contagio: un agente concentra la gran parte del suo tempo
% totale a contatto con una cerchia ristretta di persone

for i = 1:(AgentsNumber)

    index_4 = find(Couples_results(:,1) == i | Couples_results(:,2) == i);
    % Tempo di contatto dell'agente i-esimo con ciascun altro agente:
    Time_Proximity = [Couples_results(index_4,1), Couples_results(index_4,2),
        Couples_results(index_4,3)];
```

```

% Si ordinano le coppie per tempi di contatto decrescenti:
Time_Proximity = sortrows(Time_Proximity,3,'descend');

% Tempo totale di contatto dell'agente i-esimo:
TotalTime_i = sum(Time_Proximity(:,3));

Percentage = 0.8;
Count = 0;
j = 1;

while Count < Percentage * TotalTime_i
    Count = Count + Time_Proximity(j,3);
    j = j+1;
end

% ProximityAgents: numero di persone con cui ogni agente trascorre l'80% del
% suo tempo totale a contatto:
ProximityAgents(i,:) = [i, j-1];
end

for i = 1:(AgentsNumber)
    index_5 = find(Total(:,1) == i);

    TotalTime_80 = Percentage * Total(i,2);

    % Nel caso in cui ci siano agenti che hanno avuto solo contatti molto
    % brevi si immagina che abbiano avuto contatti solo con un altro agente.
    if ProximityAgents(i,2) == 0
        ProximityAgents(i,2) = 1;
    end

    S = ProximityAgents(i,2);
    % MeanTimeForCouple: tempo medio a contatto tra agenti che rimangono
    % a distanza ravvicinata per un tempo prolungato
    MeanTimeForCouple(i,:) = [i, TotalTime_80 / S];
end

% High_T_Couples_tot: numero di coppie che si mantengono a contatto per un tempo
% prolungato, risultati di tutte le replichezioni
High_T_Couples_tot = [High_T_Couples_tot; High_T_Couples];

```

```
% Indicatori per ciascun agente nella singola replicazione
SingleAgent = [Total(:,1), Total(:,2), Total(:,3), Total(:,4),...
               ProximityAgents(:,2), MeanTimeForCouple(:,2), Total(:,5)];

% Indicatori per ciascun agente in tutte le replicazioni
SingleAgent_tot = [SingleAgent_tot; SingleAgent];

% Indicatori medi considerando tutti gli agenti della simulazione
Mean_Agents = [mean(SingleAgent(:,2)), mean(SingleAgent(:,3)),...
               mean(SingleAgent(:,4)), mean(SingleAgent(:,5)),...
               mean(SingleAgent(:,6))];
Agents_results = [Agents_results; Mean_Agents];

end

%% Risultati medi per categorie di agenti

Assistants_results = [];
Students_results = [];
PeopleHall_results = [];

for j = 1:ReplicationsNumber

    index_6 = find(SingleAgent_tot(:,7) == j);
    Category = SingleAgent_tot(index_6, :);

    % Indicatori medi considerando solo gli assistenti:
    Assistants_rep = [];
    for i = 1 : Assistants
        index_7 = find(Category(:,1) == i);
        m1 = Category(index_7, :);
        Assistants_rep = [Assistants_rep; m1];
    end

    Mean_Assistants = [mean(Assistants_rep(:,2)), mean(Assistants_rep(:,3)),
                       mean(Assistants_rep(:,4)), mean(Assistants_rep(:,5)),
                       mean(Assistants_rep(:,6))];
    Assistants_results = [Assistants_results; Mean_Assistants];
end
```

```
% Indicatori medi considerando solo gli studenti:
Students_rep = [];
for i = (Assistants + 1) : (Assistants + Students)
    index_8 = find(Category(:,1) == i);
    m2 = Category(index_8,:);
    Students_rep = [Students_rep; m2];
end

Mean_Students = [mean(Students_rep(:,2)), mean(Students_rep(:,3)),
                 mean(Students_rep(:,4)), mean(Students_rep(:,5)),
                 mean(Students_rep(:,6))];
Students_results = [Students_results; Mean_Students];

% Indicatori medi considerando solo il personale di passaggio:
PeopleHall_rep = [];
for i = (Assistants + Students + 1) : (AgentsNumber)
    index_9 = find(Category(:,1) == i);
    m3 = Category(index_9,:);
    PeopleHall_rep = [PeopleHall_rep; m3];
end

Mean_PeopleHall = [mean(PeopleHall_rep(:,2)), mean(PeopleHall_rep(:,3)),
                  mean(PeopleHall_rep(:,4)), mean(PeopleHall_rep(:,5)),
                  mean(PeopleHall_rep(:,6))];
PeopleHall_results = [PeopleHall_results; Mean_PeopleHall];

end

%% Indicatori medi per singolo agente

SingleAgent_mean = [];

for i = 1:AgentsNumber
    index_10 = find(SingleAgent_tot(:,1) == i);

    AggregationAgent = SingleAgent_tot(index_10, :);
    TotalTimeforAgent = mean(AggregationAgent(:,2));
    ContactsForAgent = mean(AggregationAgent(:,3));
    AvgDurationForAgent = mean(AggregationAgent(:,4));
    ProximityAgentsForAgent = mean(AggregationAgent(:,5));
```

```
MeanTimeForCoupleForAgent = mean(AggregationAgent(:,6));

TotalForAgent = [i,TotalTimeforAgent, ContactsForAgent,
                 AvgDurationForAgent, ProximityAgentsForAgent,
                 MeanTimeForCoupleForAgent];

SingleAgent_mean = [SingleAgent_mean; TotalForAgent];

end

%% Riepilogo risultati

writematrix(SingleAgent_mean, 'RisultatiPerSingoloAgente.xlsx')

writematrix(High_T_Couples_tot, 'NumeroCoppieContattoProlungato.xlsx')
High_T_mean = mean(High_T_Couples_tot);

writematrix(Agents_results, 'Agenti.xlsx')
Agents_mean = [mean(Agents_results(:,1)), mean(Agents_results(:,2)), ...
               mean(Agents_results(:,3)), mean(Agents_results(:,4)), ...
               mean(Agents_results(:,5))];

writematrix(Assistants_results, 'Assistenti.xlsx')
Assistants_mean = [mean(Assistants_results(:,1)), mean(Assistants_results(:,2)),
                  mean(Assistants_results(:,3)), mean(Assistants_results(:,4)),
                  mean(Assistants_results(:,5))];

writematrix(Students_results, 'Studenti.xlsx')
Students_mean = [mean(Students_results(:,1)), mean(Students_results(:,2)),
                 mean(Students_results(:,3)), mean(Students_results(:,4)),
                 mean(Students_results(:,5))];

writematrix(PeopleHall_results, 'Personale.xlsx')
PeopleHall_mean = [mean(PeopleHall_results(:,1)), mean(PeopleHall_results(:,2)),
                  mean(PeopleHall_results(:,3)), mean(PeopleHall_results(:,4)),
                  mean(PeopleHall_results(:,5))];
```

Bibliografia e Sitografia

- [1] [Covid-19 - Anziani e persone fragili \(salute.gov.it\)](https://salute.gov.it/covid-19-anziani-e-persone-fragili) [Accessed: Jan. 2021]
- [2] [Indicatori demografici anno 2019 \(istat.it\)](https://istat.it/it/indicatori-demografici-anno-2019) [Accessed: Jan. 2021]
- [3] S. M. Kissler¹, C. Tedijanto², E. Goldstein², Y. H. Grad¹, M. Lipsitch², “Projecting the transmission dynamics of SARS-CoV-2 through the postpandemic period,” *Science*, Vol. 368, pp. 860-868, 2020.
- [4] R. M. Anderson, H. Heesterbeek, D. Klinkenberg, T.D. Hollingsworth, “How will country-based mitigation measures influence the course of the COVID-19 epidemic?,” *The Lancet*, Vol. 395, 2020.
- [5] K. A. Prather, L. C. Marr, R. T. Schooley, M. A. McDiarmid, M. E. Wilson, D. K. Milton, “Airborne transmission of SARS-CoV-2,” *Science*, Vol. 370, pp. 303-304, 2020.
- [6] D. Lewis, “COVID-19 rarely spreads through surfaces. So why we are still deep cleaning?,” *Nature*, Vol. 590, 2021.
- [7] D. K. Chu, P. Akl, S. Duda, K. Solo, S. Yaacoub, H. Schunemann, “Physical distancing, face mask, and eye protection to prevent person-to-person transmission of SARS-CoV-2 and COVID-19: a systematic review and meta-analysis,” *The Lancet*, Vol 395, pp 1973-1987, 2020.
- [8] [Transmission of SARS-CoV-2 and Mitigating Measures \(publishing.service.gov.uk\)](https://publishing.service.gov.uk/government/publications/transmission-of-sars-cov-2-and-mitigating-measures)
- [9] [Appendices | CDC](https://www.cdc.gov/media/releases/2020/s110120-covid-19-appendices.html) [Accessed: Feb. 2021]
- [10] N. Jones, Z. Quareshi, R. Temple, J. Larwood, T. Greenhalgh, L. Bourouiba, “Two metres or one: what is the evidence for physical distancing in covid-19?,” 2020.
- [11] N. C. Khanh, P. Q. Thai, H. Quach, N. H. Thi, P. C. Dinh, T. N. Duong, L. T. Q. Mai, N. D. Nghia, T. A. Tu, L. N. Quang, T. D. Quang, T. Nguyen, F. Vogt, D. D. Anh, “Transmission of SARS-CoV 2 During Long-Haul Flight,” *Emerging Infectious Disease*, Vol. 26, 2020.
- [12] M. Hu, H. Lin, J. Wang, C. Xu, A. J. Tatem, B. Meng, X. Zhang, Y. Liu, P. Wang, G. Wu, H. Xie, S. Lai, “Risk of Coronavirus Disease 2019 Transmission in Train Passengers: an Epidemiological and Modeling Study,” *Clinical Infectious Diseases*, Vol. 72, pp. 604–610, 2021.

- [13] D. Adam, P. Wu, J. Wong, E. Lau, T. Tsang, S. Cauchemez, G. Leung, B. Cowling, "Clustering and superspreading potential of severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) infections in Hong Kong," *Research Square*, 2020.
- [14] D. A. Edwardsa, D. Ausielloc , J. Salzmanb , T. Devlinb , R. Langerd, B. J. Beddingfielde, A. C. Fearse , L. A. Doyle-Meyerse , R. K. Redmanne , S. Z. Killeene , N. J. Manesse, C. J. Roye, "Exhaled aerosol increases with COVID-19 infection, age, and obesity," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 118, 2021.
- [15] [SieTrace | Apps and Digital Services for Process Industry | USA \(siemens.com\)](#)
- [16] [Safe Distancing Assistant — Pathfindr](#)
- [17] [Airborne Infection Risk Calculator - Università degli studi di Cassino e del Lazio Meridionale \(unicas.it\)](#) [Accessed: Feb 2021]
- [18] M. Roma, *Sistemi di servizio e simulazione*, 2019.
- [19] A. Torri, *Utilizzo della simulazione ad eventi discreti come strumento per l'analisi e il re-engineering dei processi sanitari*, 2015.
- [20] A. M. Law, W. D. Kelton, *Simulation modelig and analysis*. Mcgraw-hill, New York, 2000.
- [21] J. Banks, J. S. Carson, B. L. Nelson, D. M. Nicol, *Discrete-event system simulation*. Pearson, 1995.
- [22] T. Altiok, B. Melamed, *Simulation modelling and analysis with arena*. Elsevier, 2007.
- [23] [3D Simulation Modeling and Analysis Software | FlexSim](#) [Accessed: Feb. 2021]
- [24] [Welcome to FlexSim](#) [Accessed: Feb. 2021]
- [25] R. Sargent, "Verification e validation of simulation models," 2011.
- [26] S. M. Ross, *Probabilità e statistica per l'ingegneria e le scienze*. Apogeo, 2015.
- [27] M. Rossetto, *Sperimentazione e affidabilità delle costruzioni meccaniche*. Politecnico di Torino
- [28] J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Routledge, 1988.
- [29] S. Sawilowsky, "New effect size rules of thumb", *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 2009.
- [30] G. Buonanno, L. Stabile, L. Morawska, "Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment," *Environment International*, Vol 141, 2020.
- [31] G. Buonanno, L. Stabile, L. Morawska, "Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications," *Environment International*, 2020.

- [32] G. Buonanno, L. Stabile, L. Morawska, *Airbone Infection Risk Calculator User's Manual*, 2020. https://www.unicas.it/media/5200410/AIRC_v2.1_Users_Manual.pdf
- [33] [Quali sono i rischi di contagio da Coronavirus a scuola? - Corriere.it](#)
- [34] [COVID-19 Airborne Transmission Tool Available | CIRES \(colorado.edu\)](#) [Accessed: Feb. 2021]
- [35] A. Das, "Impact of the COVID-19 pandemic on the workflow of an ambulatory endoscopy center: an assessment by discrete event simulation," *Gastrointest Endosc*, 2020.
- [36] J. Elflein, "Percentage of college students following hygiene practices and social/physical distancing recommendations due to COVID-19 as of May 2020," *Healthy Minds Network*, 2020.