

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELLA SICUREZZA CIVILE E
INDUSTRIALE

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza Civile e Industriale

**Il rischio macchine nell'era Industria 4.0:
robot collaborativi, nuove possibilità e nuovi rischi**

Relatore: Ing. Lorenzo Baraldo
Correlatore: Ing. Luca Reppelle

Laureando: PAOLO GIACOMINI

ANNO ACCADEMICO 2018 – 2019

Riassunto

L'innovazione, si sa, non aspetta, e nel campo industriale è sempre ben accolta quando rende possibile migliorare produzione e condizione dei lavoratori.

Il mondo industriale è oggi impegnato nella sua quarta rivoluzione, chiamata anche Industria 4.0, la quale mira a realizzare impianti produttivi autonomi nelle funzioni e capaci di cooperare con altri impianti condividendo una fitta rete di informazioni.

In questo quadro si collocano i robot collaborativi, chiamati anche *cobot* in gergo, ovvero dei manipolatori di dimensioni ridotte, in genere, rispetto ai comuni robot industriali, poiché pensati per condividere lo stesso spazio lavorativo con le persone per svolgere operazioni ripetitive e faticose.

Per poter affiancare a una persona una tale tecnologia occorre ridurre al minimo i rischi che potrebbero sorgere da questo tipo di collaborazione.

Lo scenario da analizzare passa da uomo e macchina vicini ma separati a uomo e macchina vicini e a contatto.

Alla luce di questa novità con il presente lavoro si è cercato di capire se le attuali metodologie di analisi del rischio sono adatte alle applicazioni collaborative, quali sono gli aspetti non ancora considerati e, se esistono, come parametrizzarli, per poter costruire uno strumento di analisi su misura per una tecnologia così nuova e così interessante.

Indice

INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1	5
1.1 Un po' di storia	5
1.2 Conosciamo meglio i robot	11
1.3 Fuori dalla gabbia: i robot collaborativi	18
1.4 Nuovi rischi	23
1.5 Diffusione dei robot collaborativi	25
1.6 Panorama normativo di riferimento	26
CAPITOLO 2	33
2.1 Analisi dei rischi	33
2.2 Come analizzare i rischi legati ai robot collaborativi?	44
2.3 Considerazioni sullo stato attuale	45
CAPITOLO 3	47
3.1 Un metodo di analisi su misura per i robot collaborativi	47
3.1.1 <i>Identificazione dei pericoli</i>	48
3.1.2 <i>Analisi e valutazione dei rischi</i>	56
3.2 Rafforzare l'analisi	67
CAPITOLO 4	69
4.1 I casi	69
4.1.1 <i>Operazioni celle e layout</i>	69
4.2 Identificazione dei pericoli	72
4.3 Analisi dei rischi	75
4.4 Confronto	90

CONCLUSIONI	103
BIBLIOGRAFIA	107

Introduzione

Il presente lavoro di tesi è nato con lo scopo di analizzare un aspetto relativamente nuovo nel campo industriale, ovvero la robotica collaborativa nel quadro dell'Industria 4.0.

L'iniziale interesse per questo argomento è nato durante l'attività di tirocinio curricolare, durante il quale è stato possibile apprendere e avere un quadro generale di quella che è la quarta rivoluzione industriale.

Il panorama tecnologico che caratterizza tale rivoluzione è costituito da diversi temi molto interessanti, come realtà virtuale e realtà aumentata, manutenzione predittiva e *Internet of Things* o IoT, il quale rappresenta il legante di quell'interconnessione tra le apparecchiature essenziale per l'autonomia dei processi che distingue l'Industria 4.0.

Per ovvi motivi non è stato possibile approfondire tutti questi argomenti, quindi in seguito a una riflessione sulla base degli interessi personali e dei consigli ricevuti è stata scelta la robotica collaborativa come *fil rouge* del lavoro di tesi qui presentato.

I *cobot* possono essere analizzati sotto molti punti di vista, sociale, economico, tecnologico, ma, coerentemente con il percorso di laurea magistrale seguito, l'argomento verrà sviscerato nell'ottica della sicurezza macchine, per quanto riguarda i pericoli introdotti dai robot collaborativi, il miglior modo per individuarli e i parametri specifici per definire i rischi conseguenti.

Prima di descrivere l'articolazione del presente elaborato è necessario fin da subito chiarire un concetto, che comunque verrà ripetuto in seguito, che ha originato il lavoro di analisi qui presentato, ovvero che in un'applicazione collaborativa, a differenza della tradizionale robotica industriale, uomo e robot condividono lo stesso spazio di lavoro, definito *collaborative workspace*.

Questa commistione di aree di competenza comporta una variazione nello studio e nella realizzazione della sicurezza, che mai può essere carente, sia nei mezzi che nell'organizzazione.

In questo scenario di condivisione degli spazi non è più possibile ritenere inaccettabile qualsiasi tipo di urto; dunque occorre considerare tollerabile il contatto uomo-macchina e stabilire delle soglie di accettabilità.

Qui sta la grande differenza con la robotica tradizionale; l'incolumità dell'operatore non è più garantita da barriere fisiche (la classica segregazione delle isole robotizzate) ma da software e sensori affidabili che monitorano costantemente le posizioni reciproche di operatore e robot, limitando in caso di necessità forza, coppia e velocità di quest'ultimo, garantendo una adeguata distanza tra i due o provvedendo a un arresto di sicurezza.

Prima di addentrarci nel cuore del problema è il caso descrivere brevemente come sarà organizzato il testo.

La tesi si articolerà in quattro capitoli principali, di cui il primo riassumerà l'evoluzione della robotica industriale, dai primi manipolatori degli anni '60 fino ai giorni nostri, ponendo l'accento sul passaggio dai grandi manipolatori a quelli più piccoli dedicati alla collaborazione con l'uomo, i principi alla base di tale tecnologia e una panoramica generale sull'utilizzo e la diffusione dei robot collaborativi a livello internazionale e un piccolo focus sulla situazione italiana.

Sempre nel primo capitolo vi sarà una voce dedicata ai riferimenti normativi pertinenti all'argomento.

Al secondo capitolo sarà dedicata una dissertazione a livello teorico delle principali metodologie di analisi del rischio dedicate all'ambito della sicurezza macchine per poi stringere il campo visivo sulle metodologie attualmente più utilizzate per analizzare i rischi legati ai robot collaborativi.

Questo servirà a fare il punto sulla situazione attuale, in modo da evidenziare quali aspetti andrebbero sviluppati e considerati per costruire una tecnica di analisi valida per le applicazioni collaborative.

Nel terzo capitolo, a partire dalle evidenze sottolineate nel precedente, verrà presentata una tecnica di analisi dei rischi concepita per studiare i robot collaborativi, descrivendo nel dettaglio quali parametri, che contribuiscono a definire il livello di rischio, andranno valutati.

La metodologia inoltre terrà conto delle differenti tipologie di collaborazione previste.

Nel quarto capitolo infine si applicherà la metodologia per testarne l'utilità, l'efficacia e la chiarezza.

A chiusura di quanto fatto verranno presentate delle conclusioni che conterranno delle riflessioni finali sul lavoro svolto e possibili sviluppi futuri o ulteriori studi che si potrebbero fare sulla base dei parametri e dei risultati ottenuti.

Capitolo 1

Questo primo capitolo sarà utile a inquadrare l'argomento della presente tesi prima di arrivare al cuore del problema.

Nello specifico si delineeranno i contorni del tema partendo da una descrizione storica dell'automazione industriale, che sarà il punto di partenza per il focus sui robot industriali, i quali rappresentano una tecnologia che rende possibile l'automazione dei processi.

Dopo una carrellata delle tappe storiche della robotica industriale, verranno dedicate alcune righe alla definizione del concetto di robot industriale e per presentare quali sono le caratteristiche e le tipologie principali di manipolatori.

Da questo si passerà poi ai robot collaborativi, i quali rappresentano una declinazione più flessibile dei classici robot industriali, descrivendone le peculiarità, gli impieghi e la diffusione nell'industria.

Dello spazio verrà dedicato alla trattazione dei cobot dal punto di vista dei nuovi rischi da essi introdotti per la sicurezza degli operatori.

Una sezione sarà poi redatta allo scopo di delineare il quadro normativo a cui devono fare riferimento fabbricanti e utilizzatori di robot collaborativi, per chiarire obblighi e supporti in merito alla questione del rischio macchine, ponendo l'accento sull'importanza dell'analisi del rischio.

1.1 Un po' di storia

L'idea di automatizzare i processi sgravando le persone da compiti faticosi e logoranti e ottenendo al tempo stesso prodotti di qualità costante affonda le proprie radici fin dalla prima rivoluzione industriale, avvenuta nel XVIII secolo.

Invenzioni come la macchina a vapore e l'introduzione di fonti di energia diverse da quella naturale hanno portato a un fiorente sviluppo dei settori tessile e siderurgico.

Un esempio di macchina automatizzata di questo periodo è il telaio Jacquard (Figura 1.1), ovvero un semplice telaio a cui era accoppiata una macchina per comandare il movimento di ogni singolo filo di ordito.

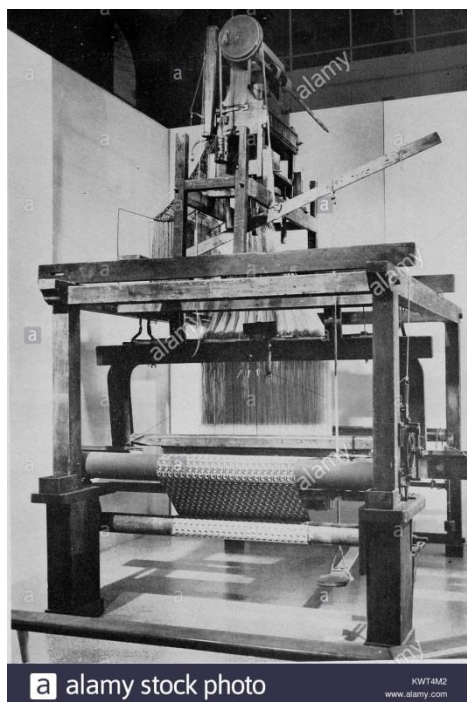


Figura 1.1 telaio di Jacquard

Il suo funzionamento, che si basava sull'utilizzo di schede forate per attuare i movimenti, consentiva la realizzazione di trame complesse alla presenza di un solo operatore alla macchina.

Nel corso degli anni si è assistito all'avvento di altre rivoluzioni industriali; la seconda è collocata temporalmente tra la seconda metà del XIX e l'inizio del XX secolo e vide l'introduzione dell'elettricità, del motore a scoppio e quindi del petrolio.

La terza rivoluzione industriale infine avvenne nel secondo dopoguerra e i suoi elementi distintivi furono l'informatica e l'energia atomica.

Oggi siamo in quella che viene chiamata quarta rivoluzione industriale o Industria 4.0 che mira alla realizzazione di contesti produttivi autonomi e interconnessi, creando reti manifatturiere composte da fabbriche che non solo realizzano i propri prodotti senza necessità di intervento umano, ma capaci anche di interfacciarsi con altre aziende per lo scambio di semilavorati o risorse.

Alla base di questo vi sono elementi fondamentali quali l'automazione delle linee produttive e la gestione dei cosiddetti *big data* che permette la comunicazione tra le macchine e l'*internet of things*. L'interconnessione permette l'autonomia dei macchinari non solo per quanto riguarda la produzione, ma anche il mantenimento degli stessi apparecchi attraverso la manutenzione predittiva, ovvero la capacità dei macchinari di stabilire, attraverso algoritmi creati tramite il *machine learning*, quando un componente della macchina stia per rompersi, e quindi cambiarlo prima che il guasto avvenga, ottimizzando costi, risorse e garantendo una migliore continuità della produzione.

Parlando di automazione si parla anche di robotica, la quale tuttavia non è una novità per i contesti produttivi, i quali sono permeati da robot industriali, con ottimi risultati, da diversi decenni.

Tuttavia, non è stata l'industria a partorire né l'idea né la stessa parola *robot*.

Tali origini vanno ricercate nella letteratura.

La parola deriva dal ceco *robota* che significa schiavo o lavoratore forzato, coniata nel 1920 dallo scrittore e drammaturgo Karel Čapek per il dramma utopico fantascientifico R.U.R. per indicare automi antropomorfi che si ribellano al loro padrone.

Forse le premesse non sono delle migliori in quanto il concetto di robot ha una accezione negativa e ricopre il ruolo di antagonista del genere umano.

La situazione si ribalta negli anni '40, sempre in campo letterario, con Isaac Asimov che introduce le tre leggi della robotica che pongono i robot al servizio dell'uomo (robot positronici) e rendendoli incapaci di arrecare danno.

Le tre leggi, di grande importanza culturale e storica sono le seguenti:

- *Un robot non può recar danno a un essere umano né può permettere che a causa del proprio mancato intervento un essere umano riceva danno;*
- *Un robot deve obbedire agli ordini impartiti dagli esseri umani purché tali ordini non contravvengano alla prima legge;*
- *Un robot deve proteggere la propria esistenza purché questo non contrasti con la prima e la seconda legge*

Ricordando altre opere letterarie e cinematografiche successive come *Blade Runner*, *Metropolis* si nota come questi generi abbiano percorso di molto i tempi, presentando un'idea di robot che permea l'immaginazione delle persone le quali associano al termine robot quasi sempre una macchina antropomorfa, praticamente indipendente rispetto all'essere umano.

La realtà avanza più lentamente, seppur con traguardi ragguardevoli, ma è ancora lontana dagli orizzonti dipinti sul grande schermo o descritti sulle pagine dei libri.

Comunque, anche se diversi nelle forme, nelle mansioni e nel livello tecnologico i robot, dalla loro prima introduzione nel mondo industriale, vantano una crescente diffusione, in un'ampia gamma di ambiti; dai diversi settori industriali alla ricerca, dalle missioni spaziali al giardinaggio e, immancabilmente, nel settore militare.

Ripercorriamo ora la storia dei robot nel mondo dell'industria.

La prima tappa del percorso è fissata nel 1961, anno in cui in uno stabilimento della *General Motors* di Trenton, nel New Jersey, venne introdotto il primo robot industriale, l'*Unimate* (Figura 1.2), un braccio robotico dedicato a compiti di saldatura sulle scocche delle auto (Figura.1.3).



Figura 1.2 Braccio robotizzato Unimate della Unimation

Ovviamente fu un successo immediato, poiché i volumi di produzione aumentarono più del doppio rispetto a qualsiasi altro impianto di produzione automobilistico esistente all'epoca.

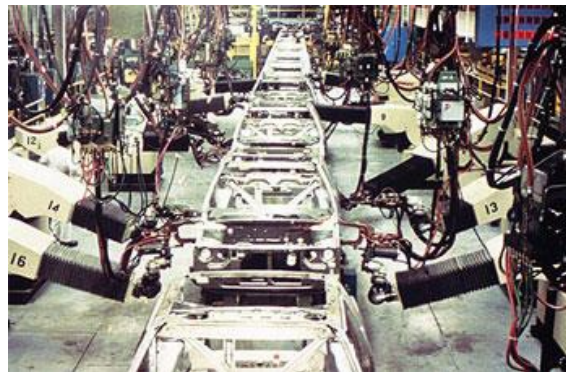


Figura 1.3 Linea di assemblaggio robotizzata dotata di modelli Unimate dedicati a compiti di saldatura

Per capire il motivo del successo di questa invenzione è utile spendere due righe per spiegarne le caratteristiche.

L'idea dell'*Unimate* risale ancora al 1954, quando l'inventore George Devol depositò un brevetto per un braccio meccanico.

Tuttavia, questo progetto sarebbe rimasto sulla carta se non fosse stato per il fortunato incontro tra Devol e Joseph Engelberger due anni più tardi a un party.

Engelberger, all'epoca direttore della *Consolidated Controls Corp.* e avido lettore dei racconti di Isaac Asimov, capì subito le enormi potenzialità dell'invenzione di Devol, illustrandole alla propria compagnia in modo da ottenere i fondi necessari a finanziare lo sviluppo del progetto sotto il nome della neonata *Unimation*.

Il primo prototipo venne così presentato al mondo e, come già anticipato, nel 1961 l'*Unimate* serie 1900 divenne il primo braccio robotizzato prodotto in massa destinato all'automazione industriale (Figura 1.4).

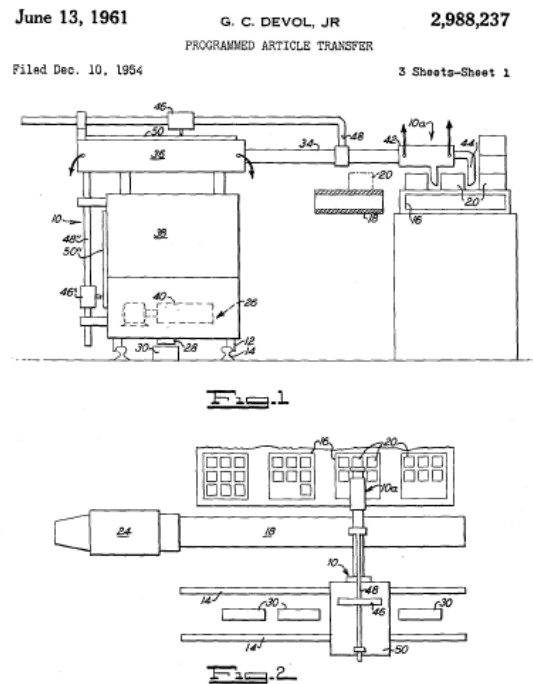


Figura 1.4 Immagine tratta dal brevetto del braccio robotizzato depositato originariamente da George Devol nel 1954

Il robot eseguiva passo per passo delle istruzioni registrate su un tamburo magnetico che coordinavano i movimenti sui 6 assi sui quali poteva muoversi il braccio, unitamente a *encoder* rotativi.

Le azioni erano eseguite da attuatori idraulici che permettevano di manipolare velocemente carichi fino a circa 250 kg.

La macchina aveva un peso complessivo di 1575 kg ed era costituita da un basamento in acciaio e da un braccio in alluminio, per un'altezza di 152 cm e una lunghezza di 400 cm.

L'immediato successo di questa tecnologia portò a una serie di concessioni di costruzione su licenza in Europa e in Asia, in particolare nel 1969, presso la giapponese *Kawasaki* che si occupò della produzione dell'*Unimate* per il segmento asiatico del mercato.

Dai laboratori della *Unimation* nel 1979 nacque l'erede di questo primo robot, il *PUMA* ovvero *Programmable Universal Machine for Assembly* (Figura 1.5), il quale ebbe una grande diffusione nell'industria.

Questo manipolatore è molto più simile ai moderni robot industriali che siamo abituati a vedere rispetto al suo predecessore.

In particolare, il *PUMA* venne prodotto nelle serie 200, 500 e 700, differenti per dimensioni e compiti ma uguali nel design.

Infatti, tutte e tre le serie erano composte da un braccio meccanico a 6 assi, con 3 assi che formavano un polso sferico.



Figura 1.5 Le tre serie dei robot PUMA, ovvero la 200, la 600 e la 750, insieme all'unità di controllo

Le capacità di carico variavano dai circa 2 kg della serie 200 fino a 20 kg della serie 700, destinata infatti alle linee di assemblaggio con compiti di verniciatura e saldatura.

I robot hanno costituito una parte fondamentale nell'automazione delle linee di produzione, svolgendo compiti faticosi, ripetitivi, pericolosi e che richiedono precisione al posto dell'uomo.

Come ogni nuova macchina introdotta in una realtà produttiva, anche i grandi manipolatori comparsi negli anni rappresentano una fonte di rischio per l'uomo.

Urti, schiacciamento, malfunzionamenti, caduta dei carichi sono alcuni scenari che possono causare danni o addirittura uccidere le persone che lavorano nelle vicinanze dei robot.

Per proteggere dunque gli operatori dai manipolatori questi sono stati segregati in quelle che vengono chiamate isole robotizzate (Figura 1.6), ovvero degli spazi delimitati da barriere e accessi dotati di interblocchi o rivelatori ottici all'interno dei quali operano i robot, singoli o in gruppi.

Le attività all'interno delle isole avvengono senza la presenza dell'essere umano, che ha funzioni di controllo da remoto, al sicuro, al di fuori dello spazio di lavoro, e si interrompono qualora vi sia un accesso da parte di un operatore.

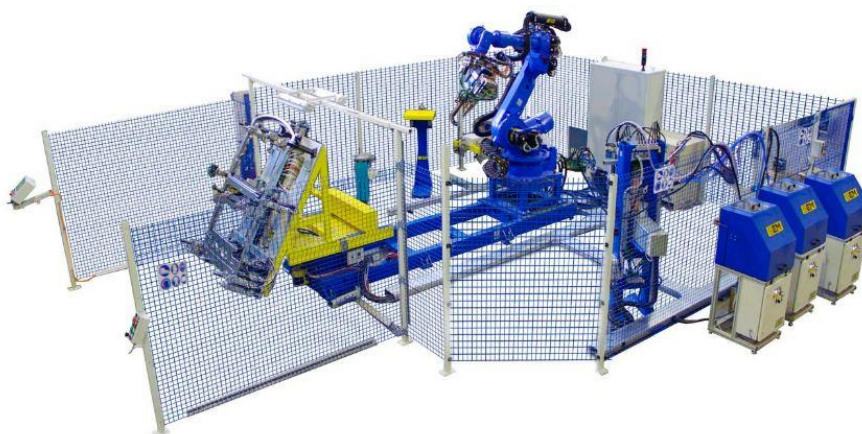


Figura 1.6 Esempio di isola robotizzata, con manipolatore delimitato da barriere fisiche che impediscono l'accesso delle persone

Le isole robotizzate possono comprendere parte di un processo di produzione o inglobare tutta la linea produttiva nelle applicazioni più grandi e complesse.

Il classico schema che prevede uomo e macchina separati è stato poi completamente stravolto nel 2009 dall'introduzione dei robot collaborativi, manipolatori molto simili ai loro predecessori ma caratterizzati da masse, ingombri, velocità e forze molto ridotti, pensati per collaborare con gli operatori umani lungo le linee di produzione, condividendo i medesimi spazi.

Uno dei pionieri di questo nuovo campo è stata *Universal Robots* (Figura 1.7) che da circa un decennio ha aperto la strada al settore del tutto nuovo dei robot collaborativi.



Figura 1.7 Esempio di collaborazione tra operatrice e braccio robotizzato *Universal Robots*, si nota la totale assenza di barriere fisiche tra persona e robot

L'azienda danese è arrivata per gradi all'elaborazione di questo tipo di manipolatori, comprendendo che i classici robot, costosi e ingombranti, non rendevano possibile l'automazione di linee con esigenze particolari come, ad esempio, quelle dell'industria alimentare.

1.2 Conosciamo meglio i robot

Prima di proseguire è utile, dopo un'infarinatura sull'evoluzione storica, descrivere cos'è un robot, da cosa è caratterizzato, le diverse tipologie e i compiti che può svolgere.

Iniziamo subito citando la definizione di robot data dal *Robot Institute of America*:

“Il robot è un manipolatore multifunzionale riprogrammabile, progettato per muovere materiali, parit, attrezzi o dispositivi specialistici attraverso vari movimenti programmati, per l'esecuzione di diversi compiti”.

Queste macchine trovano applicazione in quelle attività che sono contraddistinte dalle 4 *D*, ovvero:

- *Dull*: stupido;
- *Dirty*: sporco;
- *Difficult*: difficile;
- *Dangerous*: pericoloso

Dunque, i principali campi di utilizzo sono le lavorazioni ad alte temperature, come fusione, stampaggio, trattamento termico e forgiatura, diverse tipologie di saldatura, trattamenti con materiali tossici come la verniciatura, o l'utilizzo di collanti e sigillanti.

Inoltre, i robot trovano applicazioni in operazioni di taglio, pulitura, carico, scarico, assemblaggio, imballaggio, misure, ispezioni e prove.

Per dare un quadro generale i *robot*, o meglio la robotica industriale si inserisce in quel mondo che è l'automazione industriale, la quale è formata da tre livelli:

- Automazione rigida o monoscopo: tipica di una realtà produttiva distinta da un solo tipo di lavorazione e da alti volumi produttivi. Per automatizzare tutta la catena di lavoro si impiegano macchinari di tipo *special purpose*;
- Automazione programmabile: è tipica di una fabbrica orientata alla produzione di piccoli e medi lotti di manufatti con caratteristiche variabili. Questo consente di diversificare la gamma di prodotti finiti grazie a un sistema di automazione programmabile che permette di modificare le operazioni da eseguire;
- Automazione flessibile: rappresenta l'evoluzione del livello precedente poiché permette la produzione di lotti variabili di prodotti diversi eliminando i tempi morti dovuti alla riprogrammazione delle operazioni tra un lotto e l'altro.

La robotica industriale trova dunque applicazione negli ultimi due livelli, date le caratteristiche di programmabilità e flessibilità.

I robot, in virtù del vasto orizzonte di impiego, contano le forme più variegata, tuttavia vi sono degli elementi caratteristici ricorrenti, ovvero aste rigide o *links* collegate da giunti. Una estremità è collegata con una base mentre all'estremità libera vengono agganciati utensili o dispositivi specifici per la funzione.

I movimenti vengono realizzati tramite attuatori comandati da una unità di controllo che elabora informazioni ricevute tramite sensori

Partendo da questi elementi si possono elaborare diverse architetture, ognuna delle quali presenta delle peculiarità che la rendono vantaggiosa nel settore di impiego.

Partiamo dallo schema più semplice, ovvero il manipolatore cartesiano (Figura 1.8).

Si tratta di un robot costituito da tre giunti prismatici, che consentono quindi lo scorrimento delle aste ad essi collegate. Ad ogni grado di libertà del giunto è associato un grado di libertà cartesiano.

In parole povere gli spostamenti consentiti sono solo di tipo traslazionale, il che rende questo manipolatore molto rigido meccanicamente.

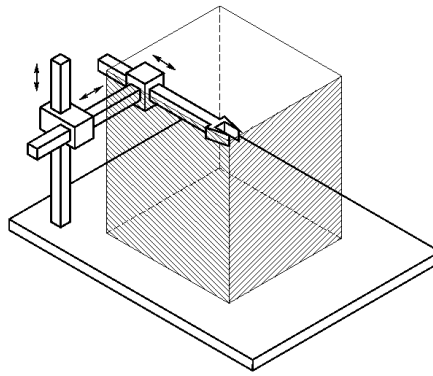


Figura 1.8 Schema di robot cartesiano

Una seconda alternativa è rappresentata dal manipolatore a portale (Figura 1.9), che condivide l'utilizzo dei giunti prismatici come il precedente ed è dedicato alla movimentazione di grossi carichi.

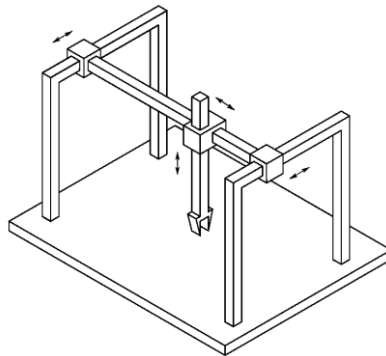


Figura 1.9 Schema di manipolatore a portale

La terza architettura disponibile è quella del manipolatore cilindrico (Figura 1.10), che è costituito da due giunti prismatici e un giunto rotoidale alla base.

In questo caso le coordinate non sono più cartesiane ma cilindriche.

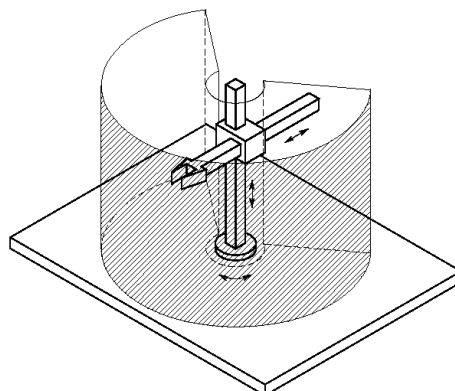


Figura 1.10 Schema di manipolatore cilindrico

Aggiungendo un secondo giunto rotoidale otteniamo un manipolatore sferico (Figura 1.11), e dunque le posizioni di un punto del manipolatore non saranno più cilindriche ma sferiche.

Questa architettura conferisce una discreta rigidità meccanica.

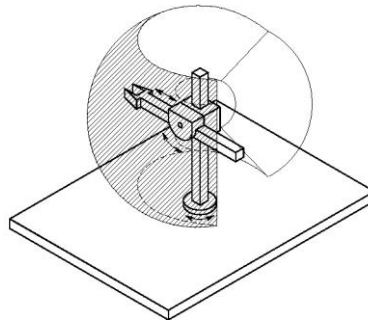


Figura 1.11 Schema di manipolatore sferico

Le ultime due tipologie di manipolatori sono le più conosciute e anche le più adatte ad applicazioni collaborative, quindi verranno approfondite maggiormente.

Per primo vediamo il manipolatore SCARA (Figura 1.12) ovvero *Selective Compliance Assembly Robot Arm*.

Si tratta di un robot di semplice struttura, particolarmente apprezzato nelle operazioni di assemblaggio.

È caratterizzato da una cedevolezza selettiva, poiché la pinza montata all'estremità è rigida nei confronti di spostamenti verticali, mentre può essere mossa in orizzontale.

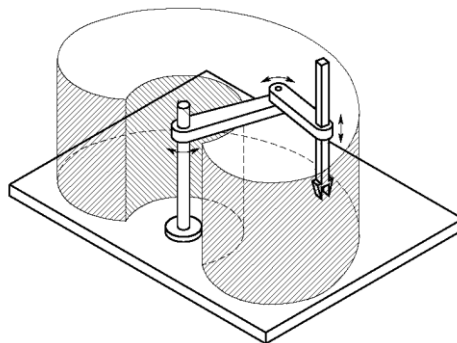


Figura 1.12 Schema di manipolatore di tipo SCARA

Costruttivamente il robot è formato da due elementi rigidi, detti *link*, collegati tra loro tramite giunti rotoidali che permettono gli spostamenti nel piano $x-y$ e da un terzo elemento collegato tramite accoppiamento prismatico che consente la traslazione verticale.

Talvolta la pinza può essere connessa a un terzo giunto rotoidale, in modo che il suo orientamento sia indipendente rispetto a quello dei primi due componenti.

Infine, vediamo l'ultima architettura, forse anche la prima a cui si pensa, ovvero il manipolatore antropomorfo (Figura 1.13).

Questo robot simula la conformazione di un braccio umano e infatti i suoi giunti, esclusivamente rotoidali, vengono comunemente identificati come spalla, gomito e polso.

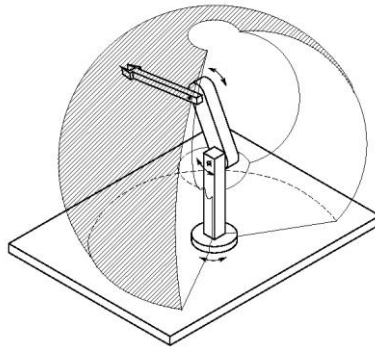


Figura 1.13 Schema di manipolatore antropomorfo

La rigidezza di questo schema dipende dalla sua configurazione. La macchina appoggia su una base ed esegue i compiti a cui è assegnata tramite uno specifico *end effector* fissato all'estremità libera.

I *cobot* di cui si parlerà avranno proprio questa struttura.

I robot descritti finora hanno una catena cinematica aperta, tuttavia questa può essere anche chiusa e in tal caso si parla di robot paralleli (Figura 1.14).

Questi robot sono molto complessi, ma garantiscono precisione e velocità e vantano molte architetture possibili.



Figura 1.14 Esempio di robot parallelo

Le principali tipologie di giunti sono:

- Giunti rotoidali, che permettono la rotazione attorno a un asse;
- Giunti prismatici, che permettono la traslazione in una direzione;
- Giunti elicoidali, che permettono rotazione e traslazione lungo un'elica;
- Giunti cilindrici, che consentono la rototraslazione attorno e lungo un asse;
- Giunti sferici, che permettono la rotazione attorno a un punto

La muscolatura del manipolatore è rappresentata dagli attuatori, i quali realizzano il movimento e l'interazione con l'ambiente.

Questi dispositivi possono essere di vario genere a seconda dell'applicazione a cui sono destinati. Esistono infatti attuatori elettrici, idraulici e pneumatici.

Oltre a una componente meccanica il robot prevede anche un'unità di governo, ovvero il cervello della macchina che comanda il manipolatore affinché esegua le azioni programmate.

Gli *input* ricevuti dall'unità di controllo non sono solo i comandi dati dall'operatore, ma anche una serie di informazioni necessarie a eseguire le azioni attese che vengono fornite da una serie di sensori che permettono al computer di stabilire la posizione nello spazio e l'orientamento del manipolatore, che cosa gli sta attorno ecc.

I sensori si dividono in due categorie, interni o propriocentrici oppure esterni o esteroцентриci.

I sensori interni provvedono a fornire dati cinematici come velocità, posizione e accelerazione, dati dinamici che riguardano forze e pressione e dati operativi come la pressione dei fluidi.

Quelli esterni registrano invece dati ambientali come luce e temperatura e dati su oggetti.

Su un robot trovano quindi applicazione sensori di rotazione, di posizione, di prossimità, di forza, tattili, di visione e audio.

Il controllo può essere strutturato in due tipologie:

- Controllo ad anello aperto: tale sistema presuppone che si conosca la legge con cui varia la grandezza di riferimento in funzione degli ingressi;
- Controllo ad anello chiuso (detto anche retroazione o *feedback*): può essere caratterizzato da regolatori o essere proporzionale.

La precisione di posizionamento dei robot è data da due parametri, la ripetitività, cioè la precisione con cui si ritorna in un determinato punto, e l'accuratezza, ovvero la precisione con cui si raggiunge il punto richiesto.

La ripetitività si valuta come il raggio della sfera dei punti raggiunti in più ripetizioni ed è influenzata dagli errori casuali.

L'accuratezza è la distanza tra il punto bersaglio e la media dei punti raggiunti ed è influenzata dagli errori sistematici.

La parte terminale di un manipolatore, che gli consente di afferrare i pezzi da lavorare è l'*end effector* o effettore finale, chiamato anche *end of arm tooling*.

Questo componente consente al robot di interagire con l'ambiente di lavoro e le sue caratteristiche variano a seconda della specifica operazione che deve eseguire.

Tali accessori possono essere distinti in due categorie, *gripper* (Figura 1.15), ovvero pinze, o altri dispositivi di presa che servono ad afferrare oggetti, e *tool* (Figura 1.16), cioè utensili che permettono di eseguire determinate lavorazioni, come taglio e saldatura.



Figura 1.15 Esempio di gripper, in particolare una pinza

A seconda della modalità di presa esistono più tipologie di *gripper*:

- *Impactive*: indica un tipo di presa classico con contatto diretto tra effettore e oggetto che viene stretto dalle pinze non appena queste lo toccano;
- *Ingressive*: in questo caso si penetra la superficie dell'oggetto con strutture a pettine o aghi per spostarlo, per esempio nel caso di tessuti o materiali analoghi;
- *Astrictive*: la presa viene realizzata applicando forze di suzione tramite il vuoto (*vacuum gripper*), oppure applicando forze magnetiche per materiali ferrosi;
- *Contigutive*: la presa avviene per contatto diretto per adesione tramite l'applicazione di collanti.

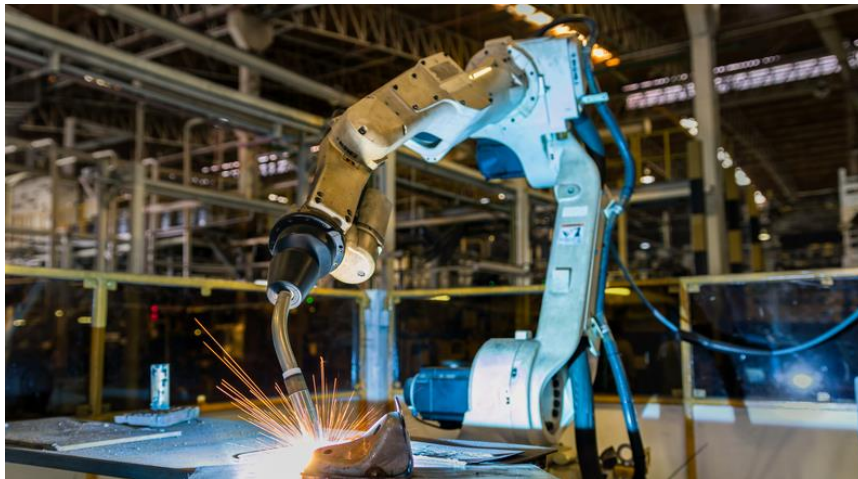


Figura 1.16 Esempio di manipolatore dotato di tool per la saldatura come end effector

I *gripper* sono i terminali più diffusi e i contesti in cui sono utilizzati sono quelli dell'assemblaggio, del *packaging*, pallettizzazione/depallettizzazione e *machine loading/unloading*.

Le pinze *multi-finger*, cioè a più dita, e parliamo quindi di *impactive gripper*, si suddividono a loro volta in due categorie, parallele e centriche.

Le pinze parallele sono costituite da due dita che si aprono e si chiudono lungo un singolo asse, mentre le pinze centriche prevedono tre dita che si chiudono attorno a un punto centrale.

Come il manipolatore, anche il *gripper* è caratterizzato da una capacità di carico, che limita il carico che il robot può movimentare.

Altri parametri specifici di questo tipo di *end effector* sono la *grip force*, ovvero la forza di presa che può essere regolata a seconda dell'oggetto, e la *gripper stroke*, cioè l'apertura delle dita che limita la dimensione degli oggetti movimentabili.

A seconda dell'architettura del robot cambiano i compiti a cui è assegnato, di conseguenza variano i rischi per gli operatori.

Non esiste un modello di manipolatore più pericoloso di un altro, ma alcuni rischi possono essere più rilevanti di altri.

I robot cartesiani, ad esempio, sono destinati alla movimentazione dei materiali, quindi è ragionevole prevedere il rischio di caduta di materiali, per un robot antropomorfo invece, destinato ad operazioni di saldatura, sarà maggiore il rischio di urto contro il braccio in movimento, o di bruciatura.

Un discorso analogo vale per l'*end effector*, elemento non trascurabile dal momento che rende possibile l'esecuzione di un determinato compito e che quindi apporta dei pericoli propri al sistema robotizzato.

1.3 Fuori dalla gabbia: i robot collaborativi

Simili nell'aspetto e nel funzionamento ai loro cugini più anziani, i robot collaborativi o *cobot* (dalla contrazione dell'inglese *collaborative robots*), i protagonisti di questo elaborato, rappresentano una realtà piuttosto recente nel mondo industriale.

Si tratta di robot antropomorfi che, a differenza dei manipolatori classici, non devono essere per forza programmati per svolgere un compito, ma possono apprendere la sequenza di azioni da eseguire *work in progress*, memorizzando e replicando la sequenza, che gli viene mostrata dall'operatore con il quale il manipolatore collaborerà.

La peculiarità di queste macchine, alla quale è dovuto il loro nome, è che lavorano a stretto contatto con l'operatore condividendo gli stessi spazi, creando così un sistema uomo- macchina che non sono più divisi da barriere, fotocellule, porte, interblocchi etc.

La collaborazione avviene in quello che viene definito *collaborative workspace* (Figura 1.17), i cui limiti possono variare di volta in volta, a seconda delle attività da svolgere e dell'ambiente in cui il robot è integrato.

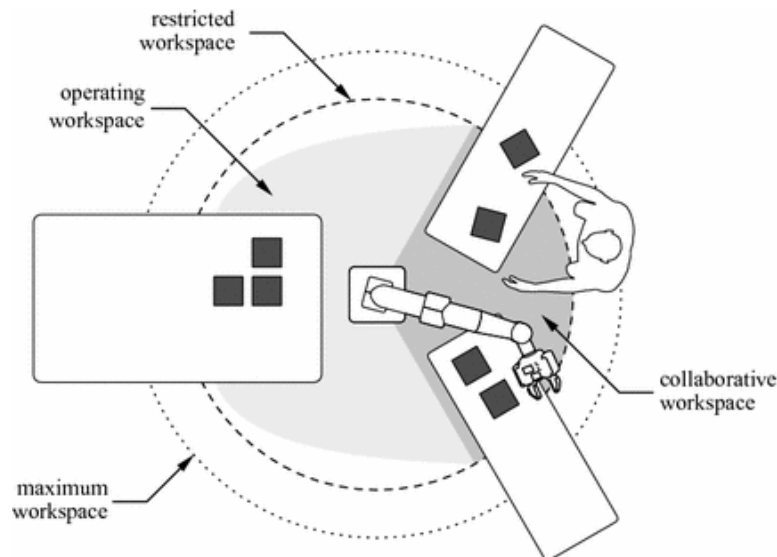


Figura 1.17 Rappresentazione schematica della distribuzione degli spazi in un'applicazione collaborativa, in cui viene evidenziata in grigio scuro l'area di lavoro collaborativo

In particolare, i robot collaborativi possono svolgere funzioni in collaborazione con l'uomo secondo quattro vie, indicate nelle specifiche norme di settore che verranno citate più avanti.

Queste quattro modalità (Figura 1.18) o *collaborative operations* sono:

- 1- *Safety rated monitored stop*: in questa modalità il robot arresta il proprio moto se l'operatore entra nello spazio collaborativo e non riprende il proprio lavoro fino a quando la persona non esce;
- 2- *Hand guiding*: il robot non si muove autonomamente, ma segue i movimenti impartiti da un operatore tramite un dispositivo di guida, solitamente a comando mantenuto, che si trova in prossimità del terminale del *cobot*;
- 3- *Speed and separation monitoring*: uomo e robot lavorano assieme all'interno del *collaborative workspace*, mantenendo una minima distanza di separazione che è funzione della velocità di lavoro del robot. Se la distanza uomo-robot scende sotto una certa soglia, quest'ultimo si arresta fino a quando la persona non si allontana;
- 4- *Power and force limiting*: questa modalità è l'unica in cui sono previsti urti tra operatore e robot, purché non si superino determinati valori di pressione, che tra l'altro possono anche fare parte della sequenza di operazioni da svolgere durante le attività. Affinché gli urti non comportino conseguenze per la salute della persona, forze e potenze in gioco vengono limitate.

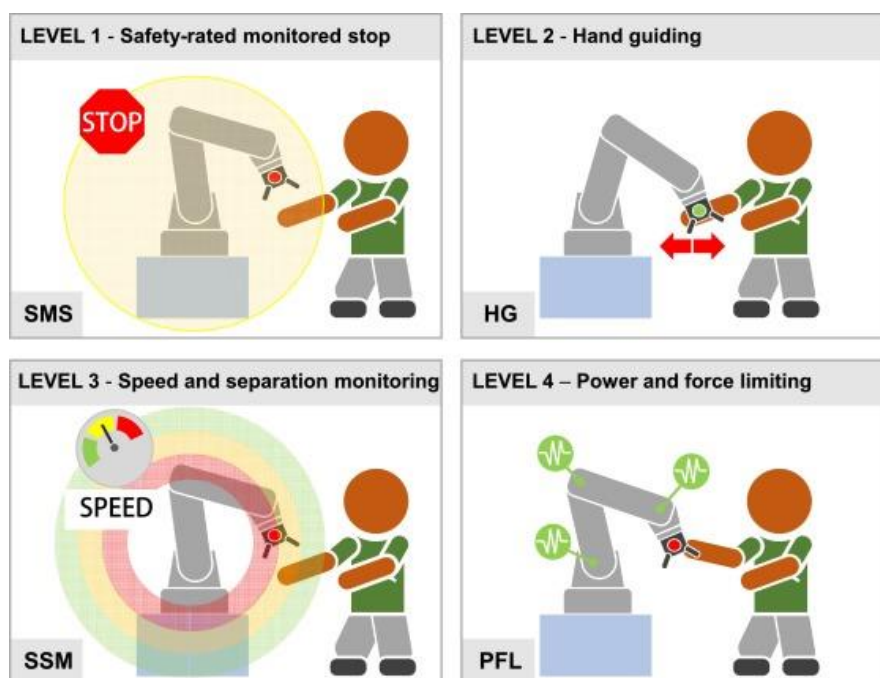


Figura 1.18 Immagine riassuntiva delle quattro modalità di collaborazione possibili

In uno scenario di questo genere è impossibile evitare qualsivoglia urto, dunque occorre limitarli, sia in numero che in intensità.

Lo scopo dei *cobot* è quello di unire le peculiarità di uomo e macchina; da una parte abbiamo la ripetitività, la precisione e l'instancabilità del robot, dall'altra la flessibilità l'esperienza e la capacità di risolvere i problemi dell'uomo.

L'operatore sarà dunque più concentrato sul lavoro che sta svolgendo e potrà controllarne meglio la qualità dal momento che le azioni logoranti, scomode e ripetitive verranno svolte in autonomia dal robot.

I manipolatori di questo tipo sono apparsi sulla scena industriale pochi anni fa e per certi versi rappresentano ancora una nicchia, soprattutto in realtà produttive come l'Italia, caratterizzata da piccole e medie imprese che non hanno risorse o conoscenze necessarie per investire in questi mezzi.

L'azienda che ha aperto la strada a questi robot e che ha legato il proprio nome a questa tecnologia è la *Universal Robots*.

Fondata nel 2005 a Odense, in Danimarca, la compagnia cominciò il proprio percorso da una semplice constatazione, i robot industriali fino a quel momento erano macchine pesanti, ingombranti e costose, inadatte a diversi settori produttivi, tra i quali l'industria alimentare e imprese piccole e medie che hanno particolari esigenze e che per motivi di risorse e tipologia di lavorazioni non possono dotarsi di un classico manipolatore.

Nel 2009 arriva dunque sul mercato il primogenito di *Universal Robots*, lo UR5, un robot antropomorfo a 6 assi, del peso di soli 18 kg, una capacità di carico o *payload* di 5 kg e uno sbraccio di 85 cm.

L'innovazione è accolta favorevolmente e questo è dimostrato dalla rapida espansione dell'azienda, la quale estende la propria attività a tutta l'Europa nel 2010 e poi si inserisce nel mercato asiatico nel 2011 aprendo anche una propria sede in Cina.

Nel 2012 la *Universal Robots* apre una filiale anche negli Stati Uniti, a New York, e poi nel 2013 un'altra a Shangai, costituendo contestualmente una rete di distributori in Sud America e in Oceania.

Nel 2015 l'azienda viene acquisita per 285 milioni di dollari dalla americana *Teradyne*, fornitore leader di attrezzature di testing automatizzate per il controllo di semiconduttori, prodotti *wireless*, sistemi di *data storage* e sistemi elettronici complessi.

L'anno successivo la compagnia danese apre uffici locali a Nuova Delhi e a Bangalore, a Monaco, a Praga e a Torino.

Nel frattempo, la famiglia di prodotti offerti si amplia incontrando le richieste degli utilizzatori; nel 2012 viene lanciato UR10, il *cobot* più grande della serie UR, caratterizzato da un *payload* di 10 kg e uno sbraccio di 130 cm.

Nel 2015 viene lanciato l'UR3, il robot più compatto e flessibile, in grado di affiancare gli operatori nelle operazioni da banco e dotato di una capacità di carico di 3 kg.

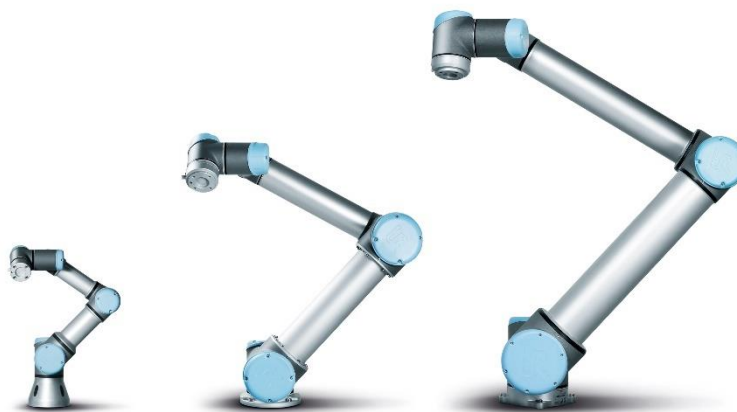


Fig 1.17 UR3, UR5, UR10 della *Universal Robots*

Con il tempo anche altre aziende produttrici hanno inserito nella loro offerta una gamma di robot collaborativi, tra le quali le giapponesi Omron e Fanuc, uno dei principali produttori a livello mondiale nel settore dell'automazione industriale, la tedesca Kuka, e poi ABB, Maxon.

In questo mercato, infine, opera anche l'italiana Comau, che con il suo AURA propone il robot collaborativo con capacità di carico e sbraccio superiori agli altri competitor.

Come già detto i robot collaborativi consentono di automatizzare molte attività con notevoli vantaggi, quindi a questo punto è opportuno descrivere qualche tipica applicazione.

Sul sito di Universal Robots è possibile leggere testimonianze di aziende, grandi e piccole, di diverse nazioni che hanno scelto di investire nella robotica collaborativa ricavandone vantaggi riscontrabili in breve tempo.

Un'azienda molto nota in nord Europa nel settore della produzione alimentare, ha conferito più di un robot collaborativo ad operazioni di fine linea quali confezionamento, etichettatura e pallettizzazione.

Il risultato è stato un incremento dei volumi produttivi, dovuto alla facilità di installazione dei *cobot*, anche in presenza di personale tecnico privo di esperienza in tale ambito, e alla facilità dei manipolatori installati, destinabili a più operazioni.

La semplicità di programmazione di queste macchine consente di intervenire facilmente in caso di problemi, riducendo i tempi di inattività.

In territorio nazionale, invece, un'azienda specializzata nella produzione di utensili per pulitura e sabbiatura ha investito nei robot collaborativi con altrettante soddisfazioni.

Nello specifico i *cobot* sono stati destinati ad operazioni di serraggio viti, soddisfacendo così diverse necessità, prima fra tutte ottenere un serraggio efficiente.

Relegando operazioni ripetitive e logoranti ai robot collaborativi è inoltre possibile destinare il personale ad attività di maggior valore aggiunto.

Questo concetto è molto chiaro nel prossimo esempio applicativo, che riguarda un'azienda svedese specializzata nella produzione di componenti e parti di ricambio in alluminio per il settore automobilistico, edilizia e costruzione di mobili.

In questo caso l'operazione da automatizzare era l'inserimento di 4 parti nella macchina a controllo numerico, attendere la fine della lavorazione, estrarle e ripetere il ciclo.

Si tratta di una serie di azioni ripetitive, faticose e logoranti. La soluzione è stata installare un robot collaborativo in ogni postazione CNC interessata realizzando una cella robotizzata.

Questa architettura consente a un solo operatore di gestire quattro postazioni contemporaneamente e di risparmiare fino a 500 ore di tempo nella produzione.

I vantaggi derivanti da queste macchine non si riflettono solamente sulla produzione, ma anche sulla sicurezza dei lavoratori, assicurando un miglioramento dell'ergonomia e della salute, trasferendo al robot dei rischi a cui è comunemente esposto il personale.

Come già accennato affiancando dei *cobot* agli operatori è possibile sollevarli da compiti ripetitivi,

che possono causare sforzi fisici eccessivi o strappi muscolari, con la persistenza di sintomi legati all'esecuzione di movimenti ripetuti quali gonfiore, dolore, crampi e un generico senso di debolezza.

Ancora l'impiego di *cobot* consente di sollevare gli operatori dai rischi legati all'uso di sostanze pericolose o dall'esposizione a fumi nocivi, come quelli rilasciati dalle operazioni di saldatura, che in caso di esposizione intensa possono causare irritazioni alle vie respiratorie e agli occhi, oltre a vertigini e nausea o, nei casi più gravi danni ai polmoni, ai reni, al sistema nervoso.

1.4 Nuovi rischi

La particolarità dei *cobot* di condividere il medesimo spazio di lavoro con le persone comporta senza dubbio dei vantaggi, come già discusso, ma ha anche delle ripercussioni in ambito di *safety*.

Infatti, se nelle celle robotizzate classiche persone e macchine sono fisicamente separate da barriere, nel caso di applicazioni collaborative non esiste alcun mezzo fisico che possa impedire eventuali urti tra una parte del robot, o un suo utensile o un oggetto sollevato e l'operatore che vi lavora a fianco.

Impedire qualsiasi genere di contatto è ovviamente impossibile, dunque in quest'ottica il contatto fisico tra uomo e macchina non è più escluso, ma consentito e regolato dal principio della limitazione dell'effetto sul corpo umano.

In tale direzione vengono eseguiti studi nell'Istituto Fraunhofer in Germania, allo scopo individuare i carichi massimi in caso di urto a cui l'operatore può essere sottoposto senza subire non solo lesioni, ma senza nemmeno provare dolore.

Qui è stato sviluppato un particolare test che si avvale dell'utilizzo di un pendolo, approvato da una commissione etica *ad hoc*. Questo strumento permette per la prima volta di effettuare delle collisioni con soggetti umani, per determinare il carico massimo sostenibile: in stretta collaborazione con i fisici dell'Ospedale Universitario Otto von Guericke, aree selezionate del corpo umano vengono colpite sistematicamente con variazioni di energia. La massa del pendolo, la velocità di collisione e la geometria dell'oggetto impattante subiscono variazioni durante i diversi test con i soggetti umani. Ogni test si conclude nel momento in cui un carico viene classificato come leggermente, moderatamente o fortemente doloroso.

D'altronde dato che il rischio dipende dalla probabilità di accadimento di un evento e dall'entità del danno che esso provoca, se non è possibile abbassare la prima oltre una certa soglia per ridurre il rischio di urto da persona e robot, allora occorre diminuire il più possibile l'effetto prodotto.

A tal proposito giocano un ruolo fondamentale le ridotte masse in movimento in un *cobot*, le linee morbide con assenza di spigoli o angoli vivi e la presenza di superfici di contatto meno rigide che assorbono parte dell'urto.

In aggiunta i *cobot* montano una varietà di sensori avanzati che monitorano costantemente la posizione reciproca tra i *link* e l'ambiente circostante e che limitano coppie e velocità in gioco nei processi in presenza di personale umano.

Nonostante l'eliminazione di protezioni fisiche, le numerose funzioni di sicurezza implementate nei *cobot* li rendono più sicuri dei classici robot industriali.

Tuttavia, il rischio *zero* non esiste e ritenere impossibile l'eventualità di un infortunio con questo tipo di macchina sarebbe un errore di valutazione.

Bisogna premettere che molto spesso gli incidenti scaturiscono dall'errore umano, piuttosto che da un malfunzionamento⁽¹⁾.

Inoltre, come emerge dagli *Safety and Health topics* elaborati dall'OSHA, cioè l'*Occupational Safety and Health Administration* americana, gli infortuni debilitanti o fatali che vedono coinvolti dei robot, e quindi a maggior ragione *cobot*, sono rari, e soprattutto non avvengono durante le normali lavorazioni di *routine*, ma piuttosto durante operazioni quali manutenzione, programmazione, *setup*, aggiustamenti o test.

Nelle applicazioni collaborative recenti studi hanno evidenziato che la sicurezza effettiva e quella percepita non sempre coincidono e questo gioca un ruolo non trascurabile nella diffusione di questa tecnologia.

Se da una parte vi è la garanzia della tutela della salute e sicurezza della persona affidata alle funzioni di sicurezza del robot, sviluppate su più livelli, dall'altra abbiamo la diffidenza nei confronti di una macchina che opera a pochi centimetri da noi in autonomia e non recintata.

Uno studio condotto presso la Carnegie Mellon University⁽²⁾ ha individuato nella prevedibilità dei movimenti del manipolatore un fattore chiave nella percezione di sicurezza che hanno le persone che operano insieme a robot collaborativi.

Dunque, l'inserimento di un *cobot* in una linea produttiva è necessariamente subordinato ad una approfondita analisi dei rischi condotta dal soggetto che vuole implementare questa tecnologia, e nel valutare i rischi si dovrà ovviamente tenere conto di questi nuovi aspetti.

Dal momento che i contatti sono ammessi si dovrà stabilire la massima intensità consentita, per limitarne la frequenza si dovrà ragionare sulla sequenza di operazioni svolta da operatore e robot, sull'organizzazione degli spazi, ottimizzando così l'applicazione collaborativa.

(1) Rivista Ambiente e Lavoro, Roobot e incidenti sul lavoro di Renata Borgato, 2017

(2) *Effects of robot motion on human-robot collaboration*, 2015 10th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), Anca D. Dragan, Shira Bauman, Jodi Forlizzi, Siddhartha S. Srinivasa, Carnegie Mellon University

A parità di modello di *cobot*, ogni situazione da analizzare è ovviamente diversa, in quanto funzione del lavoro che bisogna svolgere, e quindi delle velocità e delle coppie in gioco, degli spazi di lavoro, del tipo di *end effector* impiegato, delle dimensioni e della forma dei pezzi che vengono movimentati.

Da questo si evince che la sicurezza non viene raggiunta solo con misure preventive e protettive di natura tecnica, ma anche con misure organizzative.

Se condurre un'analisi dei rischi valida e oculata è un'operazione complessa per sistemi consolidati e noti, la complessità aumenta quando si va a studiare una tecnologia recente e che presenta pochissimi precedenti storici di errori da cui imparare. Si prefigura, dunque, la necessità di maggiori competenze e di strumenti specifici a supporto che aiutino i responsabili a valutare attentamente e con chiarezza ogni aspetto legato all'inserimento di un *cobot* in una realtà produttiva, in modo da massimizzare i benefici derivanti per i lavoratori, senza che questi siano esposti a rischi sottovalutati o trascurati.

Una metodologia di analisi del rischio specificatamente pensata per le applicazioni collaborative, che aiuti i datori di lavoro e i consulenti nel valutare i rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori derivanti dai *cobot* rappresenta di sicuro uno strumento valido, una solida base da cui prendere decisioni tecniche e organizzative allo scopo di automatizzare in modo sicuro ed efficiente determinate attività all'interno di un'azienda.

La resistenza nei confronti di questa tecnologia non è dovuta solo all'investimento economico necessario, il quale comunque si ripaga da solo in poco tempo come dimostrano molte esperienze, ma anche alla scarsa conoscenza, sia dei vantaggi, che dei rischi, legati ai robot collaborativi da parte delle molte piccole aziende italiane che le frena dall'investire in una tecnologia che è invece adatta a queste strutture produttive, che necessitano di strumenti facili e veloci da installare, utilizzare e che consentano una grande flessibilità.

1.5 Diffusione dei robot collaborativi

Questa tipologia di robotica costituisce un mercato in piena espansione, che punta molto sulle piccole e medie imprese, tanto che si stima per il 2021 un giro di 2 miliardi di dollari.

Stando ad un articolo di Industria Italiana del 4 febbraio 2019, i *cobot* costituiscono il 4.0 a portata di piccolo imprenditore, per lo più manifatturiero. Il fatto è che per i grandi apparati robotizzati di medie e grandi industrie, con tutti i loro sottosistemi, occorrono risorse e competenze difficilmente reperibili in piccole realtà. Con i *cobot* invece, c'è la possibilità, per le piccole aziende, di colmare il divario tra la produzione artigianale e quella automatizzata.

Secondo una analisi di “*Robotic Business Review*”, Universal Robots domina il mercato «con una quota poco inferiore al 50% delle revenue. Nessun altro vendor, peraltro, detiene ad oggi una quota superiore al 10%». Secondo l’azienda, altre statistiche attesterebbero che UR dispone di una quota superiore al 50%; comunque sia, attualmente UR mette in fila, in ordine di vendite, Fanuc, TechMan, Rethink Robotics, Aubo, Abb, Kawasaki, Kuka, Yaskawa, Precise Automation, Siasun, Staubli e altri. È un mercato ancora piccolo, rispetto a quello della robotica industriale: meno di 400 milioni di dollari nel 2017, e 600 milioni nel 2018. Ciò che c’è da rilevare è la crescita esplosiva, superiore al 50% in un anno.

Dunque, i *cobot* sono destinati ad erodere un po’ la fetta del mercato tradizionale; ma ciò non perché sostituiscano le macchine non collaborative, ma perché offrono nuove e diverse potenzialità in termini di automatizzazione dei processi.

1.6 Panorama normativo di riferimento

Datori di lavoro che scelgono di investire in applicazioni collaborative, così come i produttori di tali sistemi devono adempiere a precisi obblighi di legge per garantire la tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori.

Nel contesto della Comunità Europea, e in quello italiano nello specifico, da una parte i prodotti devono essere conformi alle direttive europee ad essi applicabili per poter essere immessi sul mercato, dall’altra chi mette questi prodotti al servizio dei propri lavoratori deve non solo assicurarsi di acquistare oggetti conformi, ma anche adottare tutte le misure tecniche e organizzative per diminuire il più possibile i rischi per la salute del personale che li utilizzerà.

Nel caso in esame dunque i *cobot* sono soggetti sia a direttive di prodotto, che ne definiscono i requisiti essenziali per l’immissione sul mercato, che a direttive societarie, che stabiliscono dei livelli minimi di legge per la *safety*.

Lo scopo di questo paragrafo è proprio quello di delineare questo panorama normativo, per chiarire gli obblighi in materia di sicurezza da rispettare con i robot collaborativi e chi li deve rispettare.

Per fare questo immaginiamo il ciclo di vita di un *cobot*, dalla sua produzione e vendita al suo utilizzo, e quindi per prime vedremo le prescrizioni a cui si deve attenere un fabbricante.

I robot collaborativi rientrano nel campo di applicazione della Direttiva 2006/42/CE, nota come Direttiva macchine.

La prima domanda che sorge è se un *cobot* sia da considerare una macchina a tutti gli effetti o una quasi-macchina, poiché in base a questa distinzione si aprono due percorsi diversi per l’immissione sul mercato.

La risposta non è unica, è più corretto dire che dipende, e ora vediamo perché.

Innanzitutto, ricordiamo la definizione di macchina riportata nella direttiva 2006/42/CE al punto a) dell'articolo 2:

- *“insieme equipaggiato o destinato ad essere equipaggiato di un sistema di azionamento diverso dalla forza umana o animale diretta, composto di parti o di componenti, di cui almeno uno mobile, collegati tra loro solidamente per un'applicazione ben determinata”*
- *“insieme di cui al primo trattino, al quale mancano solamente elementi di collegamento al sito di impiego o di allacciamento alle fonti di energia e di movimento”*
- *“insieme di cui al primo e al secondo trattino, pronto per essere installato e che può funzionare solo dopo essere stato montato su un mezzo di trasporto o installato in un edificio o in una costruzione”*
- *“insiemi di macchine, di cui al primo, al secondo e al terzo trattino, o di quasi macchine, che per raggiungere uno stesso risultato sono disposti e comandati in modo da avere un funzionamento solidale”*
- *“insieme di parti o di componenti, di cui almeno uno mobile, collegati tra loro solidamente e destinati al sollevamento di pesi e la cui unica fonte di energia è la forza umana diretta”*

Il punto g) del medesimo articolo riporta invece la definizione di quasi-macchina:

- *“insiemi che costituiscono quasi una macchina, ma che, da soli, non sono in grado di garantirne un'applicazione ben determinata. Un sistema di azionamento è una quasi-macchina. Le quasi macchine sono unicamente destinate ad essere incorporate o assemblate ad altre macchine o ad altre quasi-macchine o apparecchi per costituire una macchina disciplinata dalla seguente direttiva”*

Attenendoci a queste definizioni si può dire che un robot collaborativo è una macchina se costruito per un'applicazione specifica e la può svolgere comunque. Per esempio, un robot da saldatura è una macchina, poiché a meno dei collegamenti alla propria postazione e alla fonte di alimentazione, ha una funzione ben definita che può svolgere senza dover essere assemblato ad altri apparecchi o quasi-macchine.

Per chiarire queste dualità è utile citare la Guida 2017 alla Direttiva Macchine, la quale al punto 46 in riferimento all'articolo 2 della direttiva macchina dice :*“Un assemblato che è quasi una macchina significa che una macchina parzialmente completa è simile a una macchina nel senso stretto di quanto detto nell'articolo 1 punto a), cioè un assemblato che consiste di parti o componenti collegati tra loro di cui almeno uno mobile, ma che manca di alcuni elementi necessari a una specifica applicazione. Una macchina parzialmente completa deve quindi subire un ulteriore assemblaggio per diventare la macchina finale capace di svolgere il proprio compito. Per esempio, i robot industriali sono spesso progettati senza una specifica applicazione fino a quando non*

vengono incorporati nella macchina finale. Il fabbricante della macchina finale adotta le misure necessarie in modo che il robot possa eseguire il proprio compito in sicurezza una volta integrato. In pratica, solo un robot autonomo e funzionante, dotato sia di end effector che di sistema di controllo in modo da eseguire una specifica funzione, è una macchina ai sensi della direttiva macchine”.

Se il robot può essere definito macchina, il fabbricante allora dovrà soddisfare i requisiti essenziali di sicurezza applicabili, riportati nell’Allegato I della direttiva 2006/42/CE e quindi marcare CE la macchina, producendo la documentazione richiesta dall’allegato VII parte A.

Molto spesso capita però che un robot non nasca già destinato a una specifica applicazione, ma che questa gli venga assegnata solo una volta che l’acquirente lo installa nella propria linea, lo dota dell’*end effector* specifico e lo programma.

In tal caso il *cobot* è una quasi-macchina, dunque il fabbricante non dovrà marcarla CE, ma produrre la documentazione richiesta nell’allegato VII parte B, le istruzioni per l’assemblaggio di cui all’allegato VI e una dichiarazione di incorporazione per le quasi-macchine, come espresso nell’allegato II parte 1, sezione B.

La marcatura sarà un obbligo dell’integratore della quasi macchina che la assembla assieme agli altri componenti necessari per costituire una macchina che andrà marcata nel suo insieme.

L’integratore dovrà produrre la documentazione tecnica richiesta per la macchina come detto sopra.

Un elemento importante della documentazione che compone il fascicolo tecnico di una macchina è l’analisi dei rischi, determinante per valutare il livello di ogni rischio associato a ogni pericolo generato dalla macchina, in modo da elaborare le misure di riduzione necessarie.

Per ridurre i rischi derivanti da una macchina debbono essere rispettati i requisiti essenziali di sicurezza elencati nell’allegato I della direttiva ad essa applicabili.

Fabbricante o integratore che sia, tramite dichiarazione di conformità e marcatura CE attesta la conformità della macchina a questi requisiti.

L’articolo 7 della direttiva macchine è dedicato al concetto di presunzione di conformità.

Per capire di cosa si parla occorre premettere che esistono degli strumenti, ad adozione volontaria, la cui applicazione aiuta a soddisfare i requisiti essenziali di sicurezza.

Questi strumenti sono le norme armonizzate, le quali sono divise in tre categorie, ovvero norme di tipo A, B e C.

Le norme di tipo A specificano i concetti di base, terminologia e principi di progettazione applicabili a tutte le categorie di macchine. L’applicazione di queste sole norme non è sufficiente a garantire la conformità ai pertinenti requisiti essenziali di sicurezza.

Le norme di tipo B trattano aspetti specifici della sicurezza della macchina o tipi specifici di protezioni che possono essere adottati per una vasta gamma di macchine.

L'applicazione delle disposizioni di una norma di tipo B conferisce una presunzione di conformità ai relativi requisiti essenziali di sicurezza se una norma di tipo C o la valutazione dei rischi condotta dal fabbricante indicano che la soluzione tecnica proposta da questa norma è adatta per la categoria o il modello di macchina in questione.

Infine, le norme di tipo C forniscono specifiche per una data categoria di macchine. Le macchine incluse in una specifica categoria coperta da una norma di tipo C sono accomunate da un impiego simile e quindi pericoli simili.

Qualora vi sia discordanza tra le indicazioni di una norma di tipo C e quelle di una norma di tipo A o B, prevalgono le specifiche della norma di tipo C.

L'applicazione di una norma di tipo C sulla base della valutazione dei rischi del fabbricante garantisce la presunzione di conformità ai requisiti essenziali di sicurezza coperti da tale norma

Il sopracitato articolo della direttiva macchine al punto 2 recita:

“le macchine costruite in conformità di una norma armonizzata, il cui riferimento è stato pubblicato nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, sono presunte conformi ai requisiti essenziali di sicurezza e di tutela della salute coperti da tale norma armonizzata”

Queste norme armonizzate sono un utile aiuto poiché elaborate con il fine di rappresentare lo stato dell'arte nel campo a cui si riferiscono.

Dunque, la domanda che sorge spontanea ora è quali siano le norme armonizzate applicabili ai robot collaborativi.

Partiamo da quelle di tipo A, rappresentate dalla UNI EN ISO 12100:2010 Sicurezza del macchinario-Principi generali di progettazione-Valutazione del rischio e riduzione del rischio.

Questa norma, come già detto di carattere generale, fornisce una vasta indicazione di pericoli legati alle macchine, e una metodologia di analisi del rischio molto utilizzata da professionisti del settore.

Dedicate specificatamente al settore della robotica industriale l'ISO ha elaborato due norme, che rientrano nella categoria delle norme di tipo C, le quali sono:

- UNI EN ISO 10218-1:2011 Robot e attrezzature per robot-Requisiti di sicurezza per robot industriali-Parte 1: Robot;
- UNI EN ISO 10218-2:2011 Robot e attrezzature per robot-Requisiti di sicurezza per robot industriali-Sistemi ed integrazione di robot

La prima norma presenta i rischi di base legati ai robot (derivati dalla UNI EN ISO 12100:2010) e relative misure per ridurli allo scopo di realizzare un progetto di manipolatore intrinsecamente sicuro, predisporre le adatte misure protettive ed elaborare le necessarie informazioni per l'uso.

Il campo di applicazione è quello dei robot industriali, concepiti però come macchine non complete, quindi alcuni rischi, ad esempio il rumore, non vengono considerati da questo documento.

Per quanto riguarda le applicazioni collaborative, il paragrafo 5.10 riporta specifici requisiti di sicurezza, inerenti all'arresto di sicurezza, l'accompagnamento manuale (*hand guiding*) del robot, il monitoraggio di velocità e distanza dall'operatore, e la limitazione di potenza e forze o per progettazione o tramite controlli.

La norma prevede anche dei metodi di verifica e di validazione dei requisiti di sicurezza e delle misure protettive.

La UNI EN ISO 10218-2:2011 specifica i requisiti necessari per l'integrazione di robot industriali, sistemi robotizzati e celle robotizzate.

L'integrazione include la progettazione, la costruzione, l'installazione, l'utilizzo, la manutenzione e lo smantellamento dei sistemi robotizzati, le informazioni necessarie per le fasi di vita appena elencate e i componenti che costituiscono questi sistemi.

In questo caso i pericoli descritti non sono riferiti al singolo manipolatore ma al completo sistema in cui è integrato.

Per supportare ulteriormente queste due norme, l'ente di standardizzazione internazionale ISO ha elaborato due *Technical Report* TR (rapporti tecnici) che riportano requisiti aggiuntivi a quelli espressi dalle UNI EN ISO 10218-1:2011 e UNI EN ISO 10218-2:2011.

Da questo lavoro sono nati i seguenti rapporti tecnici

- ISO/TR 20218-1:2018 *Robotics- Safety design for industrial robot systems End-effectors*;
- ISO/TR 20218-2:2017 *Robotics- Safety designs for industrial robot systems Manual load/unload station*.

In particolare, il primo fornisce indicazioni di sicurezza aggiuntive per i sistemi e l'integrazione di robot a quelle espresse nella UNI EN ISO 10218-2:2011 per quanto riguarda la progettazione e l'installazione di effettori finali su manipolatori.

Il documento nei suoi allegati fornisce situazioni di pericolo e rischi derivanti da queste in funzione dell'*end effector* considerato (ad attuazione meccanica o non meccanica) e dell'operazione svolta.

Inoltre, viene specificato che nel valutare i rischi associati a un effettore finale pesa il fatto che si stia analizzando una applicazione collaborativa o non collaborativa poiché questo si ripercuote sull'esposizione dei lavoratori ai pericoli.

Il secondo rapporto tecnico fornisce dei requisiti di sicurezza per proteggere i lavoratori che si trovano ad operare in stazioni di carico e scarico manuale di robot industriali.

Queste applicazioni possono determinare rischi legati all'ergonomia e all'accesso di parti del corpo nella zona di lavoro del robot attraverso le stazioni di carico/scarico.

In questi documenti mancano ancora delle disposizioni che tengano conto delle peculiarità tipiche dei robot collaborativi, urti e soglie di accettabilità è una tra tutte, dunque l'ISO ha elaborato un ulteriore strumento che specifichi i requisiti di sicurezza per applicazioni collaborative.

In questo caso non si tratta di un *technical report* ma di un *technical specifications* e nello specifico della ISO/TS 15066:2016 *Robots and robotics devices- Collaborative robots*.

Il campo di applicazione di questo documento sono i sistemi robotizzati industriali coperti dalle norme UNI EN ISO 10218-1:2011 e UNI EN ISO 10218-2:2011, anche se i principi di sicurezza esposti, come scritto nel paragrafo 1, possono essere utili in altri campi della robotica.

I principali requisiti di sicurezza trattati riguardano la progettazione dello spazio collaborativo e delle operazioni collaborative del robot.

Come già detto nei paragrafi precedenti, nei robot collaborativi la potenza e le forze in gioco vengono limitate per ridurre al minimo l'entità del danno arrecato all'operatore in seguito ad un urto, che è un'eventualità ammessa entro certi limiti, in questo tipo di applicazioni.

Queste limitazioni vengono definite sulla base di una valutazione del rischio, come detto nella UNI EN ISO 10218-2:2011.

Molto importante è il fatto che la specifica tecnica distingua due tipologie di urti:

- Contatti quasi statici: Contatto tra operatore e una parte del robot, durante il quale una parte del corpo dell'operatore può essere serrata tra un componente in moto del robot e un'altra parte fissa o mobile della cella robotizzata;
- Contatti transitori: contatto tra operatore e una parte del robot, in cui una parte del corpo non è più serrata, ma può ritrarsi o subire un contraccolpo dall'elemento in movimento del robot.

L'annesso A della ISO/TS 15066:2016 riporta i limiti per contatti quasi statici e transitori, che concorrono nel definire i livelli massimi di potenza e forza di cui si parlava prima.

I dati contenuti in questo allegato sono basati su un modello di corpo umano costituito da 12 regioni, suddivise in 29 aree specifiche, per ognuna delle quali sono stabiliti i valori massimi ammissibili di forza e pressione derivanti da un contatto con un *cobot*.

A seconda che l'urto sia quasi statico o transitorio questi limiti cambiano, in particolare i valori per un contatto transitorio vengono ricavati da quelli di un contatto quasi statico, moltiplicati per un coefficiente.

Questi dati sono frutto di uno studio indipendente condotto dall'Università di Mainz⁽³⁾, la quale ha condotto esperimenti utilizzando tecniche allo stato dell'arte, determinando valori di forza e pressione tali da determinare una sensazione di dolore appena percettibile nell'area del corpo esaminata.

(3) Progetto di ricerca No. FP-0317: *Collaborative robots- Investigation on pain sensibility at the Man-Machine-Interface. Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine at the Johannes Gutenberg University of Mainz, Germany. Final report December 2014*

Come precisato nella specifica tecnica, questo studio non è esaustivo, ma rappresenta una base per studi futuri.

Lo stesso annesso consente di calcolare le massime velocità ammesse al robot correlate ai massimi valori di pressione permessi.

In sostanza quanto detto finora è ciò che si pone davanti agli occhi di un fabbricante.

Ora cambiamo prospettiva e ragioniamo dal punto di vista di un datore di lavoro che vuole inserire nel proprio parco macchine un robot collaborativo.

Il suo riferimento in materia di obblighi di sicurezza è il D. lgs. 9 aprile 2008 n. 81, il cosiddetto Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro.

Il datore di lavoro deve rispettare degli obblighi non delegabili, primo fra tutti, la valutazione dei rischi.

Infatti, l'articolo 17 recita:

“Il datore di lavoro non può delegare le seguenti attività:

- a) La valutazione di tutti i rischi con la conseguente elaborazione del documento previsto dall'articolo 28”*

L'articolo 28 definisce l'oggetto della valutazione del rischio e al punto 1 dice: *“La valutazione di cui all'articolo 17, comma 1, lettera a), anche nella scelta delle attrezzature di lavoro e delle sostanze o delle miscele chimiche impiegate, nonché nella sistemazione dei luoghi di lavoro, deve riguardare tutti i rischi per la sicurezza e la salute dei lavoratori”*

Il titolo a cui fare riferimento è il Titolo III, che riguarda l'uso delle attrezzature di lavoro e dei dispositivi di protezione individuale poiché i robot collaborativi rientrano nella definizione di attrezzatura di lavoro data all'art.69 comma 1 punto a): *“qualsiasi macchina, apparecchio, utensile o impianto, inteso come il complesso di macchine, attrezzature e componenti necessari all'attuazione di un processo produttivo, destinato ad essere usato durante il lavoro”*

L'articolo 70 prevede dei requisiti di sicurezza che devono essere rispettati, e nel nostro caso è pertinente quanto riportato al comma 1: *“Salvo quanto previsto al comma 2, le attrezzature di lavoro messe a disposizione dei lavoratori devono essere conformi alle specifiche disposizioni legislative e regolamentari di recepimento delle Direttive comunitarie di prodotto”.*

Capitolo 2

Nel presente capitolo verranno illustrate le tecniche di analisi del rischio più diffuse per quanto riguarda la sicurezza macchine e lo stato attuale delle metodologie di analisi più utilizzate per la valutazione dei rischi legati all'impiego di robot collaborativi.

Per quanto riguarda le metodologie trattate si farà particolare attenzione a quali sono gli aspetti finora non considerati o non sufficientemente approfonditi necessari ad analizzare i robot collaborativi.

Le considerazioni sullo stato attuale forniranno le basi da cui partire per elaborare una metodologia di analisi dei rischi legati alle applicazioni collaborative.

2.1 Analisi dei rischi

Dal paragrafo precedente si evince il ruolo chiave svolto dall'analisi dei rischi per la produzione e poi la successiva messa in servizio di un robot collaborativo.

Si tratta di un processo fondamentale, dal quale dipende *in primis* la sicurezza dei lavoratori, e le scelte che si fanno sulla base dell'analisi si riflettono poi su costi, produttività, efficienza.

Un'analisi dei rischi è valida se è condotta da persone competenti che si avvalgono di metodi efficaci e affidabili.

L'utilizzo di norme specifiche aiuta i fabbricanti in questo; non sempre è così però per coloro che vogliono dotare le proprie linee produttive di robot, i quali non ritengono conveniente il pagamento delle norme per consultarle oppure non hanno abbastanza conoscenza dell'argomento.

È essenziale nell'analisi del rischio non solo conoscere l'argomento che si sta affrontando, ma sapersi districare tra i numerosi metodi di analisi per scegliere il più adatto alla situazione.

Il rischio viene in genere definito come la probabilità che ha un pericolo di causare un certo danno, ed è esprimibile con la nota formula:

$$R = P * D$$

Dove:

- R è il rischio;
- P è la probabilità di accadimento di un evento;
- D, o a volte M (magnitudo) indica l'entità del danno causato dall'evento.

Ciò che in sostanza si fa tramite un'analisi del rischio è definire i due fattori dell'equazione per arrivare poi alla definizione del rischio associato a un determinato pericolo.

Esistono molti metodi di analisi del rischio, che si dividono sostanzialmente in due grandi categorie, metodi qualitativi e metodi quantitativi.

I metodi qualitativi sono i più semplici da utilizzare, richiedono poco tempo e danno indicazioni facili da comprendere.

Non danno un valore definito del rischio ma una stima, appunto, qualitativa, come ad esempio basso medio o alto.

I metodi quantitativi hanno lo scopo di calcolare un valore puntuale del rischio in esame, combinando i vari parametri che concorrono a definire probabilità e danno.

Sono più complessi e richiedono più tempo rispetto alle analisi qualitative, e necessitano di una gran quantità di informazioni inerenti a ciò che si sta studiando.

Il metodo più semplice e diffuso per analizzare i rischi è la cosiddetta matrice di rischio, che è la diretta applicazione della formula vista sopra.

A probabilità e danno vengono assegnati dei valori che vanno da 1 a 4 con il seguente significato:

Probabilità:

- 1: evento improbabile, che non ha precedenti analoghi;
- 2: evento poco probabile, che si verifica in concomitanza di circostanze difficilmente realizzabili e di cui sono disponibili pochissimi casi simili accaduti in passato;
- 3: evento probabile, di cui sono noti diversi casi in passato;
- 4: evento molto probabile, il cui accadimento è dato per scontato e ha diversi precedenti analoghi.

Danno:

- 1: danno lieve;
- 2: danno medio, come ad esempio escoriazioni o abrasioni;
- 3: danno grave, che si traduce in malattie e/o fratture, amputazioni;
- 4: danno molto grave, da intendersi come la morte di una o più persone.

Da una matrice in cui i prodotti di probabilità e danno sono suddivisi in quattro zone si stima il rischio.

La matrice è come quella indicata in tabella:

danno probabilità	1	2	3	4
1	1	2	3	4
2	2	4	6	8
3	3	6	9	12
4	4	8	12	16

Tabella 2.1 Esempio di matrice di rischio

A seconda del valore ottenuto si individuano quattro livelli di rischio:

- $R=1$: rischio minimo;
- $2 \leq R \leq 3$: rischio basso;
- $4 \leq R \leq 8$: rischio medio;
- $R > 8$: rischio alto.

In base a questi risultati si predispongono le opportune misure di riduzione del rischio, tecniche e organizzative, che agiscono su probabilità (misure preventive) o sul danno (misure protettive) o su entrambi.

Per la valutazione dei rischi macchine, gli strumenti più utilizzati, come riportato nell'ormai non più valida ISO/TR 14121-2:2007, sono:

- Identificazione dei pericoli tramite *checklists*;
- Matrice di rischio;
- Grafico del rischio;
- Punteggio numerico;
- Stima quantificata del rischio.

I suddetti possono essere usati da soli o combinati, come ad esempio matrice del rischio e punteggio numerico, creando degli strumenti ibridi.

Esistono altre metodologie di analisi del rischio, più o meno strutturate, applicabili al settore delle macchine, che sono oggetto della UNI IEC 31010:2019 Gestione del rischio- Tecniche di valutazione del rischio.

A questo punto è utile fornire una presentazione delle tipologie di analisi elencate sopra, poiché serviranno in seguito per fare ulteriori considerazioni per strutturare l'analisi del rischio mirata a robot collaborativi.

Cominciamo parlando delle *checklists*, che altro non sono che elenchi più o meno corposi, contenenti, nel caso dell'analisi dei rischi, un certo numero di pericoli, classificabili a seconda del tipo, dell'attività a cui sono collegati o dell'origine.

Si tratta di uno strumento utile per identificare i pericoli più rilevanti, ma insufficiente se utilizzato da solo, poiché il campo di analisi viene limitato solamente a ciò che è riportato nella *checklist* utilizzata, quindi deve essere utilizzato congiuntamente ad altri metodi di analisi, in modo da considerare tutto lo spettro di pericoli possibili associati ad una macchina.

Non ci dilungheremo ulteriormente sulla matrice di rischio, a cui abbiamo già accennato, quindi daremo solo qualche ulteriore chiarimento.

Questo strumento ha lo scopo di individuare i rischi che hanno un livello tale da essere inaccettabili, in modo da definire i punti in cui concentrare gli sforzi per applicare misure di riduzione.

L'analisi condotta a ogni modo non dà risultati ripetibili, poiché è subordinata alla capacità di giudizio, all'esperienza e alla conoscenza di chi la conduce.

Questo carattere fortemente soggettivo rende la matrice di rischio un metodo che non fornisce una grande precisione di analisi, ma può vantare una certa velocità di esecuzione e semplicità nell'utilizzo e nella comprensione.

Per condurre analisi più approfondite occorre utilizzare metodi caratterizzati da una maggiore complessità e che richiedono una certa competenza ed esperienza nel loro utilizzo.

Uno di questi metodi è il grafico del rischio, una sorta di metodo ad albero che, partendo da un evento iniziale, cioè una situazione di pericolo, ne deriva il rischio elaborando una ramificazione caratterizzata da determinati parametri.

Valutando in sequenza i diversi parametri si arriva ad una stima del rischio espressa mediante un indice.

I parametri da valutare sono i seguenti:

- Severità del danno S:
 - S1 ferita lieve, di solito reversibile, come per esempio graffi, lacerazioni,
 - S2 ferite serie, ad esempio fratture, problemi muscoloscheletrici, e morte.
- Frequenza e/o durata dell'esposizione al pericolo F:
 - F1 frequenza di due volte o meno durante un turno di lavoro oppure meno di 15 minuti di esposizione accumulata in un turno di lavoro;
 - F2 più di due volte in un turno di lavoro oppure più di 15 minuti di esposizione accumulati in un turno di lavoro
- Probabilità di accadimento dell'evento pericoloso O:
 - O1, tecnologia matura, provata e riconosciuta sicura nelle applicazioni;
 - O2, guasti tecnici rilevati nei due anni precedenti, correlati ad azioni scorrette di personale con esperienza superiore a sei mesi e informato sui rischi
 - O3, guasti tecnici riscontrati a cadenza di sei mesi o meno, correlati ad azioni inappropriate da parte di personale non addestrato con meno di sei mesi di esperienza e con precedenti analoghi registrati nei dieci anni precedenti nello stesso impianto.
- Possibilità di evitare o di ridurre il danno A:
 - A1, possibile, ma in alcune condizioni:
 - Le parti in moto sono dotate di una velocità inferiore a 0,25 m/s e i lavoratori esposti hanno familiarità con i rischi e le indicazioni impartite su situazioni pericolose;

- A seconda di condizioni legate a temperatura, ergonomia rumore, ecc...
- A2, impossibile.

Il processo di valutazione con il grafico del rischio può essere svolto seguendo lo schema riportato sotto (Figura 2.1).

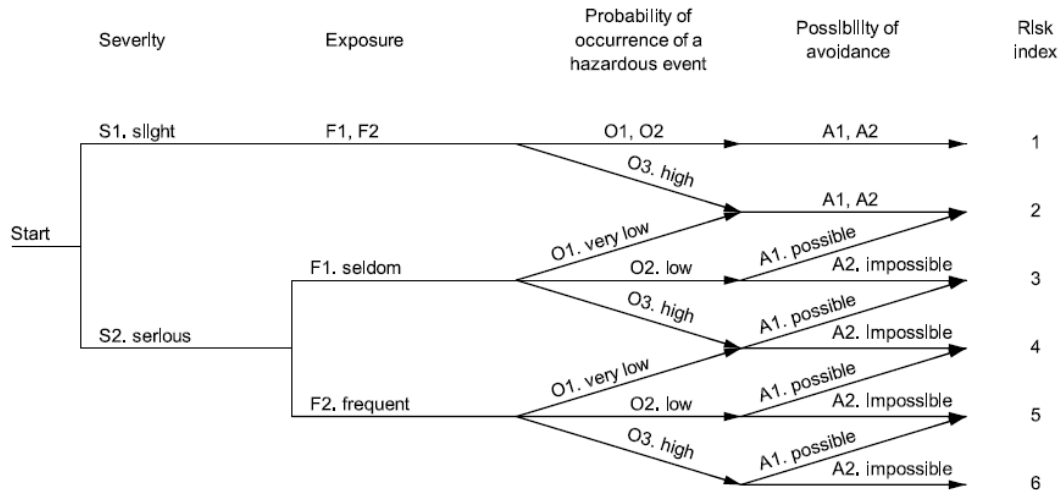


Figura 2.1 Schema per condurre un'analisi del rischio con il metodo del grafico del rischio, riportato nella ISO TR 14121-2:2007

Un'alternativa all'attribuzione di un indice al rischio è quella di ricorrere a un sistema di punteggi numerici, definendo poi dei *range* che individuano diverse classi di rischio.

Il metodo del punteggio numerico si basa solamente su due parametri, i quali sono esattamente i fattori dell'equazione del rischio, ovvero la magnitudo o severità, e la probabilità.

- Alla severità possono essere attribuiti i seguenti punteggi SS (*Severity Scores*):
 - Catastrofico, $SS \geq 100$;
 - Serio, $99 \geq SS \geq 90$;
 - Moderato, $89 \geq SS \geq 30$;
 - Minore, $29 \geq SS \geq 0$
- I punteggi attribuibili alla probabilità PS (*Probability scores*) sono:
 - Molto probabile, è certo che accada, $PS \geq 100$;
 - Probabile, può accadere, $99 \geq PS \geq 70$;
 - Poco probabile, difficile che accada, $69 \geq PS \geq 30$;
 - Remoto, la probabilità che accada è così bassa da poter essere considerata zero, $29 \geq PS \geq 0$.

Il punteggio del rischio RS (*Risk score*) si ottiene dalla somma dei punteggi dei due parametri appena descritti, secondo la formula:

$$SS + PS = RS$$

A seconda del punteggio ottenuto, il rischio può rientrare in una delle quattro categorie definite, ad esempio, dalle seguenti soglie:

-	Alto	≥ 160
$159 \geq$	Medio	≥ 120
$119 \geq$	Basso	≥ 90
$89 \geq$	Trascurabile	≥ 0

Tabella 2.2 Tabella per valutare il rischio utilizzando il metodo degli indici riportato nella ISO/TR 14121-2:2007

Soglie e livelli di inaccettabilità non sono univoci e definiti per ogni caso, poiché il soggetto o il gruppo che conduce questa analisi ha la libertà di impostare i livelli di rischio inaccettabili, stabilendo delle soglie oltre le quali sono necessarie delle misure di riduzione.

Per analizzare nel dettaglio quei rischi che sono troppo complessi per essere stimati qualitativamente si può utilizzare il metodo di stima quantificata del rischio.

La logica di questo strumento è analoga a quella di un albero dei guasti, infatti l'*output* dell'analisi è una stima del rischio in forma di frequenza annuale di accadimento di diversi livelli di danno.

Il primo *step*, una volta identificati i vari pericoli, è determinare i diversi scenari associati, sviluppando le situazioni che possono manifestarsi a partire da un pericolo.

Una sequenza da sviluppare potrebbe essere:

Pericolo $\longrightarrow$ Situazione pericolosa $\longrightarrow$ Evento pericoloso $\longrightarrow$ Conseguenze

Da un singolo pericolo può scaturire più di una situazione pericolosa, che andrà analizzata.

Questi dati possono essere poi organizzati in forma di tabella, per strutturare e ordinare l'analisi.

Un ulteriore elemento da considerare sono delle condizioni preesistenti che possono portare all'evento pericoloso, la cui assenza ne bloccherebbe lo sviluppo.

Occorre quindi stimare anche le probabilità che queste condizioni al contorno si verifichino.

Inoltre, se emergono delle dipendenze tra queste condizioni al contorno, occorre cercare di definire occorre individuare una situazione comune alla base delle condizioni tra loro collegate.

Per associare dei valori di probabilità si può, ad esempio, riferirsi a delle tabelle (Figura 2.2 e Figura 2.3), come quelle riportate nella ISO/ TR 14121-2:2007 nell'annesso A, tenendo in considerazione che alle condizioni preesistenti che originano da una causa comune a quella dell'evento iniziatore considerato verrà dato un valore di probabilità pari a uno.

Probability	Description
1	Occurs continuously
10^{-1}	Frequent and expected. Often occurs as part of the process.
10^{-2}	Possible. Known to occur during the process.
10^{-3}	Unusual. Known to occur occasionally but not normally anticipated.
10^{-4}	Remote. Has occurred somewhere, maybe within another company.
10^{-5}	Conceivable. Could occur but no evidence available that it ever has.
10^{-6}	Improbable. Extremely unlikely. Reasonable to assume it will not happen.
10^{-7}	Inconceivable. Should never occur.

Figura 2.2 Tabella riportata nella ISO/TR 14121-2:2007 per l'attribuzione di valori di probabilità di accadimento di un evento

Error probability	Task
1×10^{-4}	Routine, good feedback with time to make use of it, good appreciation of hazard
0,001	Routine, simple
0,01	General error of omission
0,1	Non-routine, complicated
0,1	High stress, time constraint 30 min
0,9	High stress, time constraint 5 min
1	High stress, time constraint 1 min
1	Error in second step, having already erred in first

Figura 2.3 Tabella riportata nella ISO/TR 14121-2:2007 per attribuire valori di probabilità di errore da parte dell'uomo

Il terzo passaggio prevede di stimare le probabilità di eventi pericolosi e l'esposizione, distinguendo tra eventi innescati da errori umani mentre le persone erano esposte al pericolo ed eventi pericolosi innescati da guasti a prescindere dall'esposizione o meno di persone al pericolo.

Per effettuare queste due valutazioni si può ricorrere a due tabelle diverse (Tabella 2.3 e Tabella 2.4), così organizzate:

- Eventi innescati da errori umani mentre le persone erano esposte a rischio:

Componente	Simbolo	Valore
Numero di turni svolti in un anno dall'operatore su una macchina	n_1	
Frazione del singolo turno passata sulla macchina in esame	r_1	
Numero di operazioni pericolose previste in un turno	n_2	
Numero di azioni pericolose svolte in un anno	$n_3 = n_1 \cdot n_2$	
Probabilità di errore umano durante un intervallo di tempo medio impiegato per un'operazione pericolosa	P_e	
Probabilità che siano soddisfatte tutte le precondizioni	P_p	
Frequenza annuale di un evento tra le persone esposte	$F = (P_e \cdot P_p \cdot n_3) / r_1$	

Tabella 2.3 Tabella per il calcolo della probabilità di eventi innescati da errori umani riportata nella ISO/TR 14121-2:2007

- Errori innescati da guasti:

Componente	Simbolo	Valore
Frequenza annuale di eventi pericolosi	f_1	
Frazione di tempo impiegata utilizzando o in prossimità della macchina	r_2	
Probabilità che siano soddisfatte tutte le precondizioni	P_p	
Frequenza annuale di un evento pericoloso tra le persone esposte	$F = P_p \cdot f_1 \cdot r_2$	
Frequenze annuali ottenute da altre fonti, come esperienza o altri dati	F	

Tabella 2.4 Tabella per il calcolo della probabilità di accadimento di eventi innescati da guasti, riportata nella ISO/TR 14121-2:2007

L 'ultimo passaggio consiste nella stima del rischio, tenendo conto di un ulteriore parametro, ovvero la possibilità di evitare o di ridurre un danno.

Utilizzando le frequenze calcolate come in precedenza si può calcolare il rischio utilizzando una tabella (Tabella 2.5) analoga alla seguente:

Componente		Simbolo	Valore
Frequenza di accadimento di un evento pericoloso mentre le persone sono esposte al pericolo		F	
Livello di severità	Probabilità che se si verifica un danno questo sia di una certa entità	Frequenza annuale che si verifichi un danno per ogni livello di severità	
	Simbolo Valore	Simbolo	Valore
Danno fatale o che comporta una grave disabilità permanente	$S1$		$F \cdot S1$
Elevato	$S2$		$F \cdot S2$
Ridotto	$S3$		$F \cdot S3$
trascurabile	$S4$		
	$S1+S2+S3+S4$		

Tabella 2.5 Tabella per il calcolo del rischio, riportata nella ISO/TR 14121-2:2007

Un'analisi condotta con questo metodo presenta una notevole complessità e richiede una certa quantità di risorse sia in termini umani, ovvero la collaborazione di più figure coinvolte nella progettazione, nell'utilizzo e nella manutenzione della macchina in esame, sia in termini temporali, tuttavia permette un maggiore approfondimento e una più completa comprensione dei fattori che contribuiscono alla definizione del rischio.

Parliamo ora del metodo ibrido, il quale rappresenta una buona base di partenza sui cui costruire una valutazione del rischio su misura per le applicazioni collaborative.

Questo metodo viene descritto nella ISO/TR 14121-2:2007, nel paragrafo 7 dell'annesso A, che specifica che questo tipo di analisi può essere condotta in una fase di *pre-risk assessment*, ovvero

all'inizio della progettazione, quando sono note solo le specifiche tecniche e delle bozze della macchina, in una fase di *intermediate risk assessment*, ovvero durante lo sviluppo della macchina, per tenere conto delle modifiche subite dal *concept* iniziale, o, infine, in una fase di *follow-up risk assessment*, allo scopo di implementare le idonee misure di protezione. In genere in questa ultima fase non si identificano nuovi pericoli, poiché già noti dagli *step* precedenti.

Il punto di partenza del metodo a ibrido è l'identificazione dei pericoli, i quali possono essere raggruppati per tipo o per origine, e a seconda del numero di situazioni pericolose che possono scaturire da un pericolo, questo può essere contato più volte.

Ad esempio, i pericoli possono essere categorizzati in base alla loro natura, elettrica, meccanica, termica, ergonomia, e ogni pericolo può poi essere associato alle varie situazioni pericolose che ne derivano.

Individuati i pericoli occorre definire i parametri che concorrono a definire il rischio.

La metodologia descritta nella ISO/TR 14121:2-2007 prevede i seguenti parametri:

- Severità del danno, indicata con Se, che categorizza l'entità del danno subito a seguito di un determinato pericolo.

Questo parametro è valutato da un punteggio che va da 1 a 4 secondo i criteri seguenti:

- 1: graffi, abrasioni che sono curabili tramite un intervento di primo soccorso;
- 2: graffi e abrasioni più gravi, perforazioni, che richiedono l'intervento medico di professionisti;
- 3: lesioni normalmente irreversibili, che rendono leggermente difficoltoso condurre il proprio lavoro dopo la guarigione;
- 4: lesioni irreversibili tali da impedire, anche per sempre, lo svolgimento del proprio lavoro dopo la guarigione.

Un altro parametro è la Classe, Cl, che deriva dalla somma di tre fattori, ovvero:

- Frequenza, Fr: indica l'intervallo medio tra le esposizioni al pericolo, con un punteggio da 2 a 6 come segue.
 - 2: intervallo tra le esposizioni superiore a un anno;
 - 3: intervallo superiore a due settimane, ma inferiore a un anno;
 - 4: intervallo superiore a un giorno ma inferiore o uguale a due settimane;
 - 5: intervallo maggiore di un'ora ma minore o uguale a un giorno;
 - 6: intervallo inferiore o uguale a un'ora.

Inoltre, i valori da 2 a 5, nel caso in cui l'esposizione sia minore di 10 minuti, possono essere ridotti al valore precedente.

Ad esempio, se un operatore è esposto a un certo rischio più di una volta nell'arco di due settimane, ma per un tempo sempre inferiore a 10 minuti, la frequenza anziché avere valore 4 potrà essere ridotta a 3.

Questo sconto non è invece applicabile nel caso in cui la frequenza abbia un valore pari a 6, poiché non potrà mai essere ridotta.

- Probabilità, Pr: esprime la probabilità di accadimento di un evento pericoloso, considerando il comportamento umano, l'affidabilità dei componenti, casi storici e la natura del componente o sistema. Questo fattore è descritto da un punteggio che va da 1 a 5:
 - 1 Trascurabile: ad esempio, un componente che non si guasta mai o non è possibile che si verifichi un errore umano.
 - 2 Raro: è poco probabile che, ad esempio, un componente si guasti o che una persona commetta un errore.
 - 3 Possibile: ad esempio non è escluso che un componente possa guastarsi o che una persona possa commettere un errore.
 - 4 Probabile: probabilmente si verificherà un guasto o un errore o un malfunzionamento.
 - 5 Molto probabile: è il caso, ad esempio, di componenti impiegati in applicazioni per le quali non sono progettati o di situazioni che possono indurre facilmente in errore una persona.
- Evitabilità, Av: questo fattore rappresenta la possibilità di evitare un danno, in base alle capacità dell'operatore coinvolto, della rapidità con cui un pericolo può generare un danno, l'attenzione posta al rischio. L'evitabilità viene considerata con il seguente metodo di punteggio:
 - 1 Probabile: ad esempio è probabile evitare il contatto con parti in movimento poste dietro ripari interbloccati nel momento in cui l'interblocco dovesse guastarsi.
 - 3 Possibile: a basse velocità, ad esempio, è possibile evitare che una manica si aggrovigli attorno a un elemento rotante o l'urto con un componente che si muove molto lentamente.
 - 5 Impossibile: in questo caso il danno non può essere evitato, poiché l'evento è inatteso e si manifesta rapidamente, come una massa che entra improvvisamente in tensione o un carico sospeso che cade.

Una volta calcolati la severità e la classe è possibile valutare il rischio con un procedimento simile alla matrice del rischio.

Infatti, si utilizza una tabella (Tabella 2.6) simile alla seguente:

	Severità Se	Classe Cl= Fr + Pr + Av					Frequenza Fr		Probabilità Pr		Evitabilità Av	
		3- 4	5- 7	8- 10	11-13	14-15						
		Morte, perdita di un occhio o di un braccio	4						≤1h	6	Molto probabile	5
Lesione permanente, perdita di dita	3						>1h to ≤24h	5	Probabile	4		
Lesioni reversibili, cure mediche	2						>24h to≤2w	4	Possibile	3	Impossibile	5
Lesioni reversibili, primo soccorso	1						>2 w to≤1y	3	Raro	2	Possibile	3
							>1 y	2	Trascurabile	1	Probabile	1
Legenda												
Rischio accettabile		Rischio che consigliabile ridurre						Rischio inaccettabile				

Tabella 2.6 Tabella di valutazione del rischio del metodo ibrido riportata nella ISO/TR 14121-2:2007

Dalla combinazione di classe e severità otteniamo il valore associato al rischio, il quale, se ricade nelle caselle nere necessita l'elaborazione di misure di riduzione, che possono essere protettive se incidono sulla severità, o preventive se agiscono su uno dei fattori che determinano la classe.

Se il rischio ricade nelle aree grigie, le misure di riduzione non sono obbligatorie, ma consigliabili, o perlomeno occorrono delle indicazioni per gestire il rischio residuo.

Per le caselle bianche il rischio è accettabile e non occorrono provvedimenti.

Alla stima iniziale del rischio si può affiancare poi il calcolo riveduto in seguito alle misure di riduzione adottate, verificando la presenza di eventuali rischi residui da gestire tramite indicazioni su opportune azioni o procedure da attuare, consigliare l'uso di dispositivi di protezione.

L'intera analisi viene ordinata in una tabella (Tabella 2.7) organizzata come segue:

Tipologia di pericolo	Pericolo	Situazione pericolosa	Se	Fr	Pr	Av	Cl	Misure protettive	Se	Fr	Pr	Av	Cl

Tabella 2.7 Tabella di organizzazione dell'analisi del rischio

Questa non rappresenta l'unica configurazione possibile, la stessa tabella riportata nella ISO/TR 14121-2:2007 è un esempio e non prevede colonne per ricalcolare i parametri di severità e classe, ma solo un'indicazione dell'efficacia delle misure adottate.

2.2 Come analizzare i rischi legati ai robot collaborativi?

Nel momento in cui si deve condurre un'analisi dei rischi di un'applicazione collaborativa, è spontaneo domandarsi se esista un metodo di analisi specifico, e che quindi permetta di analizzare i rischi in funzione anche di quelle che sono le peculiarità di un *cobot*.

Dalla ricerca bibliografica condotta non è emersa l'esistenza di un tale strumento, anche se il problema è già stato sollevato nel recente passato.

Nello specifico, la questione è stata affrontata in un *report* del 2018 del TNO dal titolo *Emergent risks to workplace safety; working in the same space as a cobot* nel quale uno degli interrogativi sollevati e a cui si è cercato di dare risposta è proprio lo stato attuale delle tecniche di analisi e controllo dei rischi che sono applicabili a robot sempre più autonomi e se siano necessari ulteriori e nuovi approcci.

La prima constatazione che viene riportata è che innanzitutto mancano specifiche liste che raccolgano i pericoli relativi ai robot collaborativi, e inoltre i pericoli raccolti nelle norme specifiche per i robot non considerano:

- L'interazione indiretta attraverso interfacce *hardware* e *software*;
- Interazione cognitiva attraverso gesti, dialoghi o segnali audio;
- Effetti dell'interazione ambientale;

Gli standard non mancano solo di queste liste, ma anche di specifiche linee guida che facciano da supporto nell'analisi.

Nel *report* viene spiegato che attualmente sono quattro le tecniche di analisi dei rischi utilizzate nel settore dei robot:

- *Process hazard analysis*;
- *Hazard and Operability* (HazOp);
- *Fault Tree Analysis* (FTA);
- *Failure Mode and Effects Criticality Analysis* (FMECA);

e in particolare le prime due sono applicabili durante le prime fasi di sviluppo del *design* e le ultime due sono più adatte a studi sull'affidabilità o allo sviluppo avanzato.

La Hazop, descritta al punto B.2.4 dell'annesso B della IEC 31010:2019, è un metodo di analisi qualitativo che ha lo scopo di studiare le deviazioni di un sistema dalle condizioni di normalità utilizzando parole chiave come *più di* oppure *meno di* riferite a parametri di sistema. In questo modo si analizza come la variazione di alcuni elementi influisce sul sistema, quali rischi possono essere innescati, in modo da formulare soluzioni di riduzione del rischio.

Si tratta di un metodo di analisi condotto in gruppo ed è caratterizzato dalla propria semplicità di utilizzo, che lo rende dunque adatto all'impiego nelle prime fasi di *design*, ma non di sviluppo avanzato.

L'albero dei guasti (FTA), descritto al punto B.5.7 della IEC 31010:2019, è invece un metodo di analisi quantitativo di tipo induttivo, dal momento che partendo da un evento iniziatore definito *top event* si ricostruisce la catena di eventi che lo possono causare, in modo da determinare la probabilità di accadimento dell'evento finale partendo da quelle degli eventi iniziatori, combinate tramite opportuni operatori logici (come *and* oppure *or*) derivati dall'algebra booleana.

La FMECA, descritta al paragrafo B.2.3 dell'annesso B della IEC 31010:2019, è un altro metodo di analisi strutturato, particolarmente adatto a studi di affidabilità.

Questa tecnica consiste nel suddividere il sistema in esame nei suoi componenti per studiarne le modalità di guasto in relazione alla funzione svolta e stimare quindi gli effetti sul sistema.

Allo studio dei modi in cui si sviluppano i guasti la FMECA aggiunge un'analisi delle criticità, al fine di classificare i suddetti modi per individuare i punti più critici del sistema in termini di conseguenze.

Uno strumento più recente, che trova applicazione nelle fasi di *design* iniziale, è l'HAZOP UML (*Unified Modelling Language*), che in sostanza è una variante della HAZOP classica, condotta con l'uso delle parole chiave per analizzare le deviazioni rispetto al normale di un sistema che in questo caso viene modellato tramite l'uso di un linguaggio unificato che prevede la costruzione di diagrammi che schematizzano le relazioni tra le funzioni del sistema e gli attori coinvolti in queste funzioni e le relazioni che intercorrono tra gli elementi del sistema anche in ordine temporale.

Nel *report* emerge la necessità di un metodo di analisi specifico per robot collaborativi che soddisfi determinati requisiti:

- Che sia applicabile in ogni fase di sviluppo, dal *design* preliminare a quello avanzato;
- Vi sia attenzione alle attività umane come fonte di sviluppo;
- Che si tenga conto delle capacità del *cobot*;
- Vi sia attenzione sui pericoli operazionali che emergono dall'impiego pianificato e in termini di interazioni con uomo e ambiente.

2.3 Considerazioni sullo stato attuale

Dai paragrafi precedenti emerge la necessità di sviluppare metodi di analisi per quanto riguarda il rischio macchine in relazione ai robot collaborativi che tengano conto di aspetti che fino a questo momento non sono stati considerati o sono stati considerati parzialmente.

Il fattore umano, in termini di interazione uomo macchina, è senza dubbio uno dei fattori che devono essere approfonditi, poiché ha un ruolo fondamentale in quella che è la qualità della

collaborazione, che non può dipendere esclusivamente dalle caratteristiche tecniche del robot, in virtù del particolare rapporto uomo macchina che caratterizza le applicazioni collaborative.

Si tratta di un elemento ovviamente di non facile definizione e quantificazione, e come si è visto non sono molti i metodi di analisi a tenerne conto.

Un altro punto su cui riflettere è la mancanza di un metodo di analisi che sia applicabile a tutte le fasi di vita di un *cobot*, dal *design* all'implementazione in una linea produttiva.

Questo richiede una certa flessibilità alla metodologia, affinché sia in grado di garantire il grado di approfondimento richiesto dalla fase in cui viene applicata.

In ultima istanza, per analizzare i rischi legati ai robot collaborativi, occorre un metodo che nei parametri di definizione del rischio tenga conto di quelle che sono le caratteristiche delle modalità di collaborazione.

Partendo da queste considerazioni si svilupperà il contenuto del prossimo capitolo, che avrà come obiettivo quello di costruire un metodo di analisi del rischio per i *cobot* che soddisfi il più possibile i requisiti evidenziati.

Capitolo 3

In questo capitolo verrà descritto il metodo di analisi dei rischi elaborato per le applicazioni collaborative. Verranno descritte le fasi di identificazione dei pericoli, di analisi e di valutazione del rischio, saranno inoltre spiegati i fattori che concorrono a definire il rischio associato ai cobot.

3.1 Un metodo di analisi su misura per i robot collaborativi

Un grande vantaggio dei *cobot* è senza dubbio la loro flessibilità, ed è una caratteristica determinante dal momento che riflette la tendenza della produzione industriale ad adattarsi alle richieste del mercato, che implicano continue modifiche ai volumi di produzione, alle tipologie e alle caratteristiche dei prodotti.

A questo necessariamente corrisponde una gran varietà di applicazioni e settori a cui possono essere destinati i robot collaborativi.

Ogni applicazione è unica e va studiata nello specifico, anche per quanto riguarda i rischi.

Dunque, può essere vantaggioso disporre di un metodo di analisi dei rischi orientato ai sistemi collaborativi, che guidi l'analisi e che sia strutturato al fine di considerare le peculiarità di questi apparecchi.

Quello che si vuole fare ora è costruire uno strumento a supporto dell'analisi dei rischi, con il quale l'utilizzatore possa prendere velocemente familiarità, che sia di facile comprensione per chi conduce la valutazione e per chi la consulta e che rappresenti una base affidabile su cui elaborare misure di riduzione del rischio.

Considerando anche lo stato attuale precedentemente descritto, il metodo proposto sarà utilizzabile nelle varie fasi di studio di un'applicazione collaborativa, dall'analisi preliminare dei rischi ad una più dettagliata in fase di integrazione.

Fin da subito è bene specificare che non verrà proposta una tecnica di analisi esclusiva che sostituirà quelle esistenti, le quali invece a seconda del grado di approfondimento necessario potranno essere applicate in concomitanza come supporto.

Lo scopo primario è fornire uno strumento utile a coloro che vogliono integrare un robot collaborativo nella propria realtà produttiva, aiutandoli a realizzare una applicazione che sia il più possibile efficiente e sicura.

Per realizzare questo metodo, una volta stabilito il *target* a cui è rivolto, sono stati fissati dei criteri da rispettare, ovvero:

- Oggettività: la valutazione deve basarsi su dati e osservazioni oggettive, l'esperienza e la conoscenza di chi conduce la valutazione sono importanti, ma non possono costituire l'unico elemento di giudizio;
- Ripetibilità: è strettamente legata all'oggettività ed è un aspetto importante, in quanto poter ottenere risultati simili permette una discussione che dipende molto di più dalla situazione reale in esame che dalla sensibilità della singola persona che conduce l'analisi
- Semplicità: poter comprendere facilmente il filo logico che guida il processo valutativo, riuscire a individuare le aree critiche con chiarezza e capire i fattori che influenzano il rischio sono elementi che contribuiscono all'efficacia dell'analisi.

Il metodo qui proposto si articola in più passaggi, che di seguito verranno descritti nel dettaglio, giustificando le scelte compiute, i parametri selezionati e i livelli di rischio.

I vari passaggi seguono le fasi tipiche di ogni analisi del rischio, ovvero:

- Identificazione dei pericoli;
- Analisi dei rischi associati ai pericoli, definendo i parametri caratteristici;
- Valutazione dei rischi, confrontando i livelli di rischio ottenuti con quelli accettabili;
- Elaborazione di misure di riduzione opportune;
- Nuova valutazione alla luce delle misure elaborate;
- Indicazione di gestione di eventuali rischi residui.

3.1.1 Identificazione dei pericoli

Il primo passo per condurre un'analisi approfondita ed efficace è l'identificazione di tutti i pericoli specifici della macchina in esame.

I pericoli non sono solamente legati all'utilizzo, ma a tutte le fasi di vita della macchina che prevedono un'interazione con il personale, e quindi trasporto, installazione, manutenzione ordinaria e straordinaria, regolazioni e smontaggio.

A parità di macchina considerata, è molto importante analizzare il contesto in cui questa viene integrata, poiché anche questo aspetto genera pericoli.

Ambiente di lavoro, prossimità di altre macchine sono fattori da non trascurare.

La fase di identificazione dei pericoli è quindi molto delicata, poiché trascurare un pericolo equivale a trascurare il rischio associato, che quindi non verrà valutato ed eventualmente gestito, e che rappresenterà una costante fonte di potenziale danno per chiunque abbia a che fare con la macchina.

Le applicazioni che prevedono robot collaborativi vanno analizzate di volta in volta considerandole come casi unici, date le numerose declinazioni disponibili, quindi vi sono una grande varietà di pericoli da considerare.

Per identificarli tutti occorre definire i limiti dell'applicazione collaborativa, le dimensioni dello spazio collaborativo, le lavorazioni e le funzioni che vengono effettuate, e le operazioni necessarie di installazione, manutenzione e smantellamento.

In questa fase, inoltre, devono già essere evidenziate le modalità di collaborazione previste per l'attività in esame poiché ognuna comporta aspetti diversi che vanno considerati nella successiva fase di analisi.

Per una identificazione il più possibile completa, si può ricorrere all'ausilio di una *checklist*, un elenco di tutti i principali pericoli associati a robot e accessori.

Come abbiamo già visto le *checklist* sono strumenti limitati, in questo caso però possono essere sfruttate come supporto nell'identificazione dei maggiori pericoli del robot che si sta considerando.

La versione di seguito proposta è un elenco di pericoli, non esaustivo, che ha lo scopo di aiutare a individuare i pericoli specifici della macchina pertinenti al caso in esame.

Per costruire questa *checklist* si è partiti dalle liste di pericoli significativi riportati nelle norme UNI EN ISO 10218-1:2011 Robot e attrezzature per robot-Requisiti di sicurezza per robot industriali-Parte 1: Robot e UNI EN ISO 10218-2:2011 Robot e attrezzature per robot-Requisiti di sicurezza per robot industriali-Sistemi ed integrazione di robot, riportate negli annessi A di entrambe le norme.

Con questi due documenti è stato possibile raggruppare tutti i pericoli principali di vario genere legati al robot, e all'*end effector* utilizzato.

Per completare la *checklist* quindi, sono stati usati come riferimenti gli annessi C e D della ISO/TR 20218-1:2018 *Robotics- Safety design for industrial robot systems End-effectors*, in modo da elaborare un elenco di pericoli generali e uno di pericoli specifici legati al tipo di effettore utilizzato.

La lista di controllo (Tabella 3.1) proposta per questa fase ha una struttura come la seguente:

Modalità di collaborazione prevista	Safety-rated monitored stop		
	Hand guiding		
	Speed and separation monitoring		
	Power and force limiting		
Pericolo		A	NA
Pericoli connessi al robot			

Pericoli di natura meccanica	di	Movimenti normali o inattesi di qualsiasi parte del braccio robotico		
		Movimento normale o inatteso di qualsiasi parte della cella robotizzata o dell' <i>end effector</i>		
		Movimento normale o inatteso di asse esterno, incluso l' <i>end effector</i> in posizione di servizio		
		Movimento o rotazione di un utensile affilato montato sull' <i>end effector</i> o su un asse esterno		
		Movimento involontario di parti di macchine o della cella robotica durante operazioni di maneggio		
		Rotazione lungo un asse		
		Caduta o eiezione di prodotti o materiali		
		Impigliamento di capelli lunghi o di vestiti sciolti		
		Movimento involontario di dime o pinze		
		Rilascio involontario dell'utensile		
		Movimento involontario di macchina/e associate		
		Attivazione o movimento involontario di un <i>end effector</i> o di equipaggiamento associato		
		Rotazione o movimento di macchine o di utensili di macchine associate al robot nella cella robotizzata		
		Guasto della giunzione dell' <i>end effector</i>		
		Schiacciamento tra robot e oggetto fisso		
		Schiacciamento tra <i>end effector</i> e un oggetto fisso		
		Impossibilità per un operatore di uscire dalla cella dopo esservi rimasto rinchiuso durante la modalità automatica del robot		
		Manipolazione di prodotti o materiali, incluse eiezioni		
Pericoli di natura elettrica	di	Rilascio inatteso di energia da fonti accumulate		
		Problemi legati a cavi		
		Contatto con parti in tensione o con connessioni		
		Confusione dovuta alla presenza di più voltaggi all'interno del sistema		
		Contatto con componenti discreti del circuito elettrico		
		Esposizione ad archi elettrici		
		Processi che sfruttano alti voltaggi o alte frequenze		
		Operazioni di saldatura che richiedono elevati voltaggi		

	Mancanza di energia		
Pericoli di natura termica	Superfici calde associate all' <i>end effector</i> , o all'equipaggiamento o ai pezzi lavorati		
	Superfici o oggetti freddi		
	Atmosfere esplosive causate dai processi		
	Presenza di temperature estreme richieste da determinati processi		
	Materiali infiammabili		
Pericoli acustici	Perdita di equilibrio, disorientamento nell'area di lavoro della cella robotizzata		
	Incapacità di due o più persone assegnate a un compito di coordinare le loro azioni tramite una normale conversazione		
	Rumore ambientale a un volume tale da impedire l'ascolto e la comprensione di segnali acustici di pericolo		
	Esposizione a lungo termine ad elevati livelli di rumore		
	Applicazioni specifiche che sono fonti di forte rumore		
Pericoli dovuti a vibrazioni	Contatto diretto con la fonte		
	Allentamento di connessioni o fissaggi		
	Disallineamento di parti o componenti		
Pericoli da radiazioni	Interferenze elettromagnetiche con operazioni specifiche del sistema robotizzato		
	Esposizione a radiazioni correlate a processi		
Pericoli legati a sostanze e materiali	Fluidi di processo o refrigeranti		
	Parti di servizio, ricambi o lubrificazione ricoperte di fluidi		
	Guasti a componenti meccanici ed elettrici del sistema robotizzato o del sistema di protezione		
	Fumi corrosivi e polvere		
Pericoli legati all'ergonomia	Mancanze nel design dell'interfaccia uomo macchina, <i>touchscreen</i> troppo vicino o troppo lontano		
	Mancanze nel design di punti di carico e scarico, eccessiva distanza tra scatole dei componenti e aree di carico e scarico		
	Dispositivi di abilitazione con imperfezioni di progettazione		
	Posizione inappropriata dei comandi		
	Operazioni inavvertite dei controlli		
	Posizione inappropriata dei comandi operativi che sono difficili da raggiungere e causano l'esposizione ad ulteriori		

	pericoli		
	Posizione difficile da raggiungere e che espone ad ulteriori pericoli di componenti a cui è necessario accedere per operazioni anticipate di manutenzione		
	Il riconoscimento di pericoli o di situazioni pericolose è limitato a causa di scarsa illuminazione		
	Componenti in pertugi che ostacolano la luce ambientale		
	Interfacce uomo macchina in posizione tale da impedire una corretta visione		
Pericoli associati all'ambiente in cui la macchina è utilizzata	Problemi di design indotti dall'ambiente		
	Errori di identificazione di problemi reali e problemi del sito in seguito ad azioni non necessarie		
	Un guasto o un'azione incrementa il livello di danno		
	Umidità		
	Temperatura		
Combinazione di pericoli	Movimenti inattesi del robot o dell' <i>end effector</i> o di macchine associate		
	Comportamento imprevedibile dei comandi della macchina a causa di interferenze magnetiche o sovratensioni		
	Una persona avvia il robot all'insaputa di un'altra che non se lo aspetta		
	Scorretta interpretazione dei movimenti di robot collaborativi		
	Comando di arresto che ferma il robot nel mezzo di un ciclo che rimane incompleto		
	La velocità del robot può essere regolata in modo da svolgere diversi compiti a velocità diverse		
	Malfunzionamento dei comandi con conseguente rilascio di dispositivi di trattenuta sul tavolo di carico o movimento per inerzia dell' <i>end effector</i>		
	Malfunzionamento dei comandi con conseguente rilascio dei freni del braccio robotico, che causa il movimento per inerzia di parti del robot		
	Movimenti inattesi del robot, dell' <i>end effector</i> , di assi ausiliari o equipaggiamento associato		
	Guasto di una protezione che non funziona come atteso		
	Guasto di una macchina associata che non funziona come atteso		

	Allentamento di tubi e componenti che si separano o saltano via		
	Componenti installati impropriamente che creano movimenti o pericoli inattesi		
	Parti in rotazione ad alta velocità che si rompono o si separano dai supporti		
	Sovraccarico del robot o dell’equipaggiamento associato che porta a rotture o flessioni di componenti meccanici		
	Contatto con espulsioni dovute a processi		
	Guasto di dispositivi di ritenzione		
	Parte incontrollata del robot o di una macchina associata che cade o si rovescia		
	Incidenti durante operazioni di installazione o smantellamento		
	Parte che può cadere se non installata o fissata correttamente		
	Illuminazione insufficiente nella zona dell’operatore o nella cella robotica		
	Ostacoli sul pavimento della cella		
	Pavimenti scivolosi		
	Scarsa disposizione di utilità		
	Rottura dei sensori		
Pericoli significativi per l’ <i>end effector</i>			
Pericoli di natura meccanica	Problemi legati a cavi		
	Guasto della pinza		
	Rottura dei sensori		
	Guasto nella flangia o nel sistema di cambio <i>end effector</i>		
	Rivestimento <i>end effector</i>		
	Design dell’ <i>end effector</i> non adatto alla variabilità dei pezzi		
Pericoli legati a fonti di energia	Perdita di potenza		
	Manca di energia		
	Progettazione e uso scorretti di stop di protezione ed emergenza		
	Rilascio di energia accumulata		
	Requisiti di energia sottostimati		
	Fonti di energia direzionate come parte del processo dell’ <i>end effector</i>		
	Sensori		

	Perdita di pressione		
	Rottura cavi di alimentazione o fissaggi		
Problemi di natura elettrica	Superficie dell' <i>end effector</i> in tensione		
	Surriscaldamento		
	Conduttori esposti		
Pericoli legati all'ergonomia	Condizioni di lavoro sfavorevoli per l'operatore		
Pericoli legati a errori dell'operatore	Disallineamento dei pezzi		
	Programmazione della sequenza scorretta		
	Errori nei comandi di <i>input/output</i> o <i>input/output</i> scorretti		
Problemi legati al sistema di controllo	Perdita di comunicazione		
	Perdita di conduttività nei segnali di attivazione		
	Guasto nel sistema del robot		
	Applicazione, design o programmazione scorretti		
Pericoli di natura chimica	Fumi creati dal processo		
	Abrasioni durante la pulizia dei materiali		
	Appannamento durante l'utilizzo di spray		
	Contatto con sostanze in seguito a perdite o spillamenti		
	Contatto con sostanze pericolose depositate sull' <i>end effector</i> dopo che questo ne è entrato in contatto durante la lavorazione		
Pericoli di natura biologica	Contatto con sostanze grezze, lavorate o infettive legate a prodotti di origine biologica		
Pericoli legati all'attuazione	Sequenza scorretta		
	Attuazione involontaria		
Pericoli specifici legati al tipo di <i>end effector</i>			
Tipo di <i>end effector</i>	Pericolo	A	NA
<i>Gripper</i> meccanico	Bordi affilati		
	Pizzicamento o stritolamento		
	Caduta oggetti		
	Impigliamento abiti o capelli		
<i>Gripper</i> a vuoto (ventosa)	Caduta oggetti		
	Movimento pezzi con bordi affilati		
<i>Gripper</i> magnetici	Interferenze elettromagnetiche		
	Surriscaldamento		

Terminale per saldatura a punti	Corrente di saldatura		
	Elevata temperatura		
	Interferenza elettromagnetica		
	Scintille		
Terminale per saldatura ad arco	Corrente di saldatura		
	Bagliore dell'arco		
	Elevata temperatura		
	Fumi		
	Interferenza elettromagnetica		
Terminale per saldatura laser	Raggio laser, diretto o riflesso		
	Fumi e gas		
	Alta temperatura		
Terminale per la verniciatura	Pericoli legati alle sostanze utilizzate		
	Pericoli associati a utensili affilati o appuntiti nel caso di deposizione		
Terminale per taglio o perforazione meccanica	Pericoli legati a lame e punte		
	Pericoli legati ai bordi del taglio		
	Sviluppo di fumi o gas o polveri		
Terminale taglio al plasma	Fumi e gas		
	Alte temperature		
	Pericoli legati al plasma		
Terminale taglio laser	Pericoli associati al raggio laser		
	Fumi e gas		
	Alte temperature		
Terminale per taglio ad acqua	Getto d'acqua ad alta pressione		
Terminale per operazioni di lucidatura	Pericoli legati a utensili abrasivi in rotazione		
Terminale per la cucitura	Pericoli associati ad aghi		
Terminale per esecuzione marchi (meccanico, laser, inchiostro)	Schiacciamento dita sotto i punzoni		
	Esposizione a fasci laser		
	Spruzzi di inchiostro		
Terminale per	Impigliamento in parti rotanti		

l'avvitamento	Contatto con punte		
Terminale per la piegatura	Schiacciamento parti del corpo		
	Urto		
Terminale per ispezioni	Esposizione a fasci laser		

Tabella 3.1 Checklist di supporto all'identificazione dei pericoli, basata sulle tabelle dei pericoli riportate nelle UNI EN ISO 10218-1, UNI EN ISO 10218-2 e ISO/TR 20218-1

Ribadiamo che quelli elencati sono solo una parte dei pericoli relativi a un robot collaborativo.

Proprio in virtù delle numerose applicazioni a cui possono essere destinati i *cobot* è impossibile costruire una *checklist* onnicomprensiva, tuttavia averne una a disposizione può senz'altro aiutare il o i professionisti durante la fase di identificazione dei pericoli.

Nello studio della specifica applicazione andranno per esempio individuati in maniera autonoma i pericoli legati ad esempio alle operazioni di trasporto, installazione, manutenzione ordinaria e straordinaria e di smantellamento.

3.1.2 Analisi e valutazione dei rischi

Il secondo passo consiste nell'analisi e nella valutazione dei rischi associati ai pericoli individuati nella fase precedente.

Lo strumento di valutazione proposto in questa tesi è molto simile al metodo a ibrido presentato in precedenza, con alcune modifiche.

In primo luogo, i fattori che concorrono a definire il rischio sono stati elaborati in modo da tenere conto di quelle che sono le caratteristiche determinanti di un robot collaborativo, con lo scopo di rendere più approfondita l'analisi.

La stessa fase di analisi e valutazione è stata articolata in diversi passaggi, poiché i parametri sono stati modellati anche in funzione delle quattro modalità di collaborazione realizzabili con i *cobot*.

In sostanza sono stati realizzati quattro modelli di valutazione, che in seguito verranno descritti, uno per ogni modalità di collaborazione, per valutare i rischi relativi alle fasi di utilizzo del robot collaborativo, più un quinto, molto simile al metodo a ibrido originale, pensato per valutare i rischi relativi a quelle che sono le fasi di installazione, smantellamento e manutenzione.

Le quattro modalità di collaborazione vengono descritte nelle UNI EN ISO 10218-1:2011 e UNI EN ISO 10218-2:2011 e approfondite nella ISO/TS 15066:2016 e sono:

1. Stop monitorato di sicurezza;
2. Guida manuale;
3. Controllo di posizione e velocità;
4. Limitazione di forza e potenza.

Ognuna prevede una diversa esposizione o una diversa frequenza di esposizione ai rischi nello spazio di lavoro collaborativo, e un diverso rapporto con la macchina, e questo influisce sulla diversa entità che può avere un medesimo rischio in condizioni diverse.

Esaminando un'applicazione collaborativa occorre innanzitutto definire quali sono le modalità di lavoro previste tra le quattro elencate sopra, poi si analizzeranno e valuteranno i rischi, in modo che le misure di riduzione decise siano adatte al sistema che si sta studiando, pertinenti e soprattutto per evitare ridondanze o protezioni inutili, o che peggio, potrebbero introdurre nuovi rischi.

Alla luce di questo, è il momento di descrivere i modelli di valutazione per ognuna delle modalità di collaborazione.

1) Stop monitorato di sicurezza (*Safety-rated monitored speed*)

Questa modalità di sicurezza viene descritta nel paragrafo 5.5.2 della ISO/TS 15066:2016, e in sostanza implica che il robot arresti il proprio moto prima che un operatore faccia il proprio ingresso all'interno dello spazio collaborativo per ultimare un compito, come caricare o scaricare un pezzo dall'*end effector* o più in generale per interagire con il sistema robotizzato.

Quando non vi è presenza umana all'interno dello spazio collaborativo, il robot è libero di operare, anche in maniera non collaborativa.

La ISO/TS 15066:2016 indica tre condizioni, al paragrafo 5.5.2.3 nelle quali all'operatore dovrebbe essere permesso l'accesso nell'area di lavoro collaborativa nel caso in cui venga utilizzata la funzione di stop monitorato di sicurezza, ovvero:

- 1) Quando nello spazio di lavoro collaborativo non sono presenti il robot o altri pericoli;
- 2) Quando il robot è all'interno dello spazio di lavoro collaborativo, ma in uno stato di stop di sicurezza monitorato, che rimane attivo finché l'operatore permane nel medesimo spazio;
- 3) Quando il robot è nello spazio di lavoro collaborativo in uno stato di stop protettivo.

In considerazione delle caratteristiche di questa modalità, per elaborare un modello di valutazione dei rischi in caso di *safety rated monitored stop*, sono stati considerati i seguenti parametri:

- Danno (D): serve a esprimere l'entità delle conseguenze che può subire una persona in seguito a un evento sfavorevole. Il danno è classificabile in quattro livelli, a cui corrispondono i seguenti indici:
 - 1-Lieve: il danno potenziale è di piccola entità, come graffi, abrasioni, lievi ematomi, piccole scottature, che necessitano al massimo del primo soccorso.
 - 2-Medio: le conseguenze per una persona sono traducibili in piccole fratture, tagli o altri tipi di lesioni che richiedono cure mediche, e che sono comunque reversibili;
 - 3-Serio: una persona potrebbe subire serie lesioni che impedirebbero di riprendere a lavorare senza difficoltà, come l'amputazione di dita;

- 4-Molto serio o fatale: le potenziali conseguenze per la persona sono tali da impedire una futura ripresa del lavoro, come la perdita di un braccio o di una gamba, la perdita totale o parziale della vista, oppure il danno potrebbe essere fatale e cagionare la morte.
- Frequenza (Fr): questo parametro è definito come il numero di ingressi in un'ora da parte dell'operatore all'interno della zona collaborativa. Nel caso della modalità collaborativa di *safety-rated monitored stop* è plausibile pensare che un fattore che contribuisce a definire il rischio sia il numero di volte in cui una persona entra in una zona a cui può essere sottoposta ai rischi legati a un'applicazione collaborativa.

Per la frequenza sono stati definiti tre livelli:

- 1-Bassa: la frequenza è bassa quando l'operatore entra meno di 3 volte in un'ora nello spazio collaborativo;
- 2-Media: la frequenza è media quando gli ingressi nella zona collaborativa sono compresi tra 3 e 6 in un'ora;
- 3-Alta: la frequenza è alta quando l'operatore effettua più di 6 accessi all'ora nello spazio collaborativo.
- Probabilità che la situazione pericolosa si verifichi (Pr): Con questo parametro si valuta la probabilità che una certa situazione scaturita da un pericolo si verifichi.

Per questo fattore si considerano cinque livelli, come nel metodo a ibrido, ma con qualche indicazione in più per scegliere il valore corretto.

- 1-Remota o trascurabile: questo valore si può attribuire ad esempio a guasti che non accadranno mai, ad esempio nel caso di componenti che hanno tassi di guasto inferiori a 10^{-9} o nel caso si parli di un evento che non ha avuto analoghi simili negli ultimi 10 anni. Dato che ci stiamo riferendo a robot collaborativi prendiamo 10 anni come periodo di tempo di riferimento per eventi inverosimili poiché i *cobot* sono presenti sul mercato da circa un decennio. Nel caso in cui siano disponibili dati o elementi per calcolare la probabilità di accadimento di un evento, se questa è minore di 10^{-6} , può considerarsi remota.
- 2-Bassa: non è impossibile che un certo evento accada, anche se è difficile che si realizzi. Se si parla di guasti, ad esempio una bassa probabilità può essere riferita a tassi di guasto compresi tra 10^{-9} e 10^{-6} . Ad un evento può essere associata una bassa probabilità se ad esempio negli ultimi 10 anni sono stati riscontrati casi analoghi (se sono reperibili dati storici) oppure è oggettivamente difficile che accada nelle condizioni di lavoro del sistema analizzato. Nel caso in cui siano disponibili dati o

elementi per calcolare la probabilità di accadimento di un evento, se questa è compresa tra 10^{-6} e 10^{-4} , può considerarsi bassa.

- 3-Media: questo valore è adatto ad eventi plausibili, ma infrequenti o, ad esempio, a guasti di componenti che registrano tassi di guasto compresi tra 10^{-6} e 10^{-4} . Un evento può essere considerato possibile se è noto almeno un caso analogo negli ultimi 5 anni. Nel caso in cui siano disponibili dati o elementi per calcolare la probabilità di accadimento di un evento, se questa è compresa tra 10^{-4} e 10^{-2} , l'evento può considerarsi possibile.
 - 4-Alta: un evento ad esempio può essere considerato probabile se sono noti casi analoghi negli ultimi due anni, o se un guasto può avvenire facilmente. Nel caso in cui siano disponibili dati o elementi per calcolare la probabilità di accadimento di un evento, se questa è compresa tra 10^{-2} e 10^{-1} , l'evento può considerarsi probabile.
 - 5-Molto alta, quasi certo: si può dare per scontato che un certo evento o guasto possa verificarsi, come ad esempio tagliarsi maneggiando oggetti con bordi affilati senza guanti. Nel caso in cui siano disponibili dati o elementi per calcolare la probabilità di accadimento di un evento, se questa è superiore a 10^{-1} , l'evento è quasi certo.
- Fattore umano (HF): il metodo a ibrido della ISO/TR 14121-2:2007 non teneva esplicitamente conto del fattore umano come elemento che compone il rischio, in quanto era accorpato al parametro della probabilità, in termini di possibilità di errore da parte dell'uomo. Tuttavia, il fattore umano ricopre una grande importanza poiché la sua analisi è essenziale per capire quanto possa influire su un certo evento e quindi elaborare misure di riduzione del rischio non solo tecniche ma anche organizzative.

Si tratta di un parametro tanto rilevante quanto difficile da determinare in maniera oggettiva. Sebbene sia oggetto di studio per quanto riguarda la sicurezza, basti pensare ai già citati studi sul rapporto di fiducia uomo-robot, non ne viene fatto riferimento, ad esempio, nella ISO/TS 15066:2016.

Il metodo della stima quantificata del rischio descritto dalla ISO/TR 14121-2:2007 teneva conto in un certo senso del fattore umano, dal momento che prevedeva due tabelle per calcolare la probabilità di accadimento di eventi a seconda che questi fossero causati da guasti o da errori umani.

In un tipo di interazione come quello previsto dalle applicazioni collaborative però quest'ottica di bianco o nero mal si adatta, nel senso che il fattore umano non può essere rivestire solo la veste di causa di un evento o non essere considerato. In alcune situazioni

potrebbe essere ininfluyente, in altre potrebbe essere l'origine di una situazione pericolosa e altre volte ancora potrebbe avere un ruolo marginale.

Alla luce di questo, per il fattore umano si possono considerare tre livelli:

- 1- Ininfluyente: in relazione a un certo evento o guasto l'azione dell'uomo non ha peso, come ad esempio la presenza di un componente difettoso, oppure la probabilità che venga commesso un errore e che questo inneschi il rischio in esame è molto bassa.
 - 2-Limitato: il fattore umano ha un ruolo marginale in un certo tipo di situazione o di guasto, può contribuire allo sviluppo di un evento pericoloso ma solo in concomitanza con altre circostanze.
 - 3-Influyente: il fattore umano assume un ruolo determinante nello sviluppo di una certa situazione, come ad esempio la mancanza di perizia nel fissaggio di un componente che poi si stacca, o l'utilizzo deliberato del sistema oltre i limiti fissati.
- Questo indice è adatto nel caso in cui un evento sia la diretta conseguenza di un errore umano, o possa essere reso possibile solo da un volontario atto di manomissione che renderebbe inefficaci misure tecniche preventive e protettive.

Considerando ad esempio un rischio legato ad un'operazione per la quale è richiesta una certa competenza, il fattore umano di sicuro non potrà essere ininfluyente nello sviluppo di una situazione pericolosa.

Il parametro del fattore umano non va confuso con la probabilità di un errore umano, poiché non è necessariamente detto che un'alta probabilità di errore sia associata a un elevato indice HF, poiché potrebbero esserci circostanze in cui anche se è frequente commettere errori, questi non influiscano più di tanto su una certa situazione. Analogamente a una bassa probabilità di errore non corrisponde necessariamente un basso indice.

Il parametro del fattore umano non ha lo scopo di indicare quanto l'essere umano possa fallire, ma piuttosto quanto il suo comportamento e i suoi errori, che saranno riconducibili a carenze di competenza, possano influire su una certa situazione di rischio.

- Evitabilità (A_v): l'ultimo parametro considerato, come nel metodo a ibrido originale è l'evitabilità, ovvero la possibilità di evitare un certo danno, che è sempre classificata in tre livelli:
 - 1-Probabile: velocità basse, sbracci limitati, lento evolversi di una situazione, rendono facile per l'operatore evitare un potenziale danno. Ad esempio, è facile non entrare in contatto con il robot se non appena si entra nello spazio collaborativo in cui esso è presente si nota che questo non si arresta come dovrebbe;

Capitolo 3

- 2-Possibile: non è scontato, ma è possibile evitare un certo danno, come una manica impigliata in una parte in movimento nel caso di elementi in lenta rotazione.
- 3-Impossibile: la situazione pericolosa ha uno sviluppo talmente repentino che è impossibile evitare di rimanere coinvolti.

Prima di valutare il rischio associato a un determinato pericolo si determina la classe di rischio Cl, che è data dalla somma di Frequenza, Probabilità, Fattore umano ed Evitabilità, secondo la formula:

$$Cl = Fr + Pr + HF + Av$$

In base agli indici assegnati si possono ottenere classi di rischio che rientrano in uno di questi quattro intervalli:

- Cl da 4 a 7;
- Cl da 8 a 10;
- Cl da 11 a 12;
- Cl da 13 a 14.

I valori di danno e classe di rischio vengono poi incrociati in una tabella (Tabella 3.2) come la seguente:

Danno (D)		Classe di rischio Cl= Fr+ Pr + HF + Av				Frequenza Fr		Probabilità Pr		Fattore umano HF		Evitabilità Av	
		4-7	8-10	11-12	13-14								
Graffi, scottature, piccole punture, ecchimosi	1					Bassa ≤3 in 1h	1	Remota	1	Trascurabile	1	Probabile	1
Tagli, fratture a mani o dita, slogature, lussazioni	2					Media > 3 e ≤6 in 1h	2	Bassa	2	Limitato	2	Possibile	2
Amputazione di dita di mani o piedi, gravi ustioni	3					Alta > 6 in 1h	3	Media	3	Influente	3	Impossibile	3
Amputazione di braccia o gambe, perdita della vista, paralisi, morte	4							Alta	4				
								Molto alta	5				
Legenda		Livello di rischio inaccettabile, pertanto vanno prese misure di riduzione				Permangono dei rischi residui da gestire, sono consigliabili misure di riduzione ulteriori					Livello di rischio minimo		

Tabella 3.2 Tabella di valutazione del rischio

Il confronto tra il valore di danno e classe di rischio svolto tramite la matrice indicata sopra restituisce tre possibili livelli di rischio:

- Zona bianca: rischio minimo, probabilità di accadimento e danno sono bassi;
- Zona grigia: rischio intermedio, che è meglio ridurre con opportune misure o, qualora non sia possibile ridurlo o eliminare la fonte di pericolo, va gestito come un rischio residuo con opportune misure;
- Zona nera: rischio molto alto, le misure di riduzione richiedono la massima priorità.

Questa suddivisione in tre livelli è utile per stabilire una gerarchia di intervento, in modo da focalizzare le misure di riduzione sui punti più critici. Tenendo ben presente che il rischio va ridotto sempre il più possibile, occorrerà dunque valutare se anche i rischi in zona bianca siano ulteriormente riducibili.

Per organizzare i dati dell'analisi può essere utile ordinarli in una tabella (Tabella 3.3) simile alla seguente:

Analisi dei rischi legati all'utilizzo del robot collaborativo nel caso di <i>Safety rated monitored stop</i>																	
Pericolo		Attività	Situazione pericolosa	D	Fr	Pr	HF	Av	D/Cl	Misure di riduzione	D	Fr	Pr	HF	Av	D/Cl	Note
Tipologia	Elenco pericoli																

Tabella 3.3 Tabella di organizzazione dell'analisi del rischio

Nella colonna dei pericoli verranno inseriti tutti i pericoli identificati tramite *checklist* e osservazione dell'applicazione collaborativa, raggruppati a seconda della loro tipologia, ovvero meccanici, elettrici, ergonomici, termici, eccetera.

Accanto ai pericoli andranno indicate le attività svolte dall'operatore con o sul robot collaborativo che espongono la persona a tali pericoli.

Da questi pericoli possono nascere diverse situazioni pericolose, ovvero i rischi che dovranno essere valutati. A ogni fattore che contribuisce a determinare il rischio è dedicata una colonna ed è dedicata una colonna anche al risultato del confronto tra danno e classe di rischio riassunto in Tabella 3.2.

A seconda del livello di rischio potranno essere necessarie o meno misure di riduzione, che potranno essere indicate nella colonna dedicata.

Individuate le misure di riduzione ritenute opportune si ripete la valutazione del rischio, ricalcolando gli indici dei vari parametri di rischio, in modo da esplicitare quali sono i fattori su cui si intende lavorare per ridurre il rischio.

Un'ultima colonna è dedicata alle note, per raccogliere eventuali indicazioni su rischi residui o ulteriori misure di riduzione auspicabili.

2) Guida manuale (*hand guiding*)

Questa modalità di collaborazione è oggetto del paragrafo 5.5.3 della ISO/TS 15066:2016 e prevede che l'operatore trasmetta i comandi di movimento al robot tramite un dispositivo operato manualmente (Figura 3.1) situato in prossimità dell'*end effector* oppure integrato nello stesso.



Figura 3.1 *cobot Fanuc con dispositivo di guida manuale*

In sostanza il robot con questa impostazione non si muove autonomamente, ma asseconda i movimenti impressi dall'operatore, assistendolo nella movimentazione di carichi, o nell'utilizzo di utensili.

Quindi fino a che la persona rimane nello spazio collaborativo è a diretto contatto con il manipolatore, da questo deriva che eventuali distanze di sicurezza come misure di riduzione del rischio sono inattuabili, mentre assumono grande importanza gli aspetti legati all'ergonomia.

L'analisi e la valutazione dei rischi viene svolta allo stesso modo di quella per il *safety-rated monitored stop*, con qualche cambiamento ai parametri che definiscono la classe di rischio.

I fattori considerati per l'analisi nel caso di *hand guiding* sono dunque:

- Danno (D): definito tale e quale come descritto sopra, classificato in quattro livelli con i medesimi indici;
- Esposizione (Esp): questo fattore prende il posto della frequenza, dato che utilizzando direttamente il *cobot* è più rilevante la durata dell'esposizione ai pericoli durante il lavoro nella zona collaborativa che il numero di accessi a questa. L'esposizione si può suddividere in quattro livelli che sono funzione della percentuale di tempo relativa a un turno di lavoro trascorsa da un operatore esposto a un determinato pericolo o nello spazio collaborativo.
 - 1-Breve: meno del 25% di un turno di lavoro;
 - 2-Media: dal 25% al 50% (escluso) di un turno lavorativo;
 - 3-Prolungata: dal 50% al 75% (escluso) di un turno di lavoro;
 - 4-Continua: al di sopra del 75% di un turno di lavoro.

Capitolo 3

- Probabilità (Pr): definita come nel caso del *safety rated monitored stop*;
- Fattore umano (HF): definito come nel caso del *safety rated monitored stop*;
- Evitabilità (Av): definita come nel caso del *safety rated monitored stop*.

Sommando gli indici attribuiti a esposizione, probabilità, fattore umano ed evitabilità si ottiene la classe di rischio, che può assumere valori compresi tra 4 e 15. Confrontando l'indice di danno con quello della classe di rischio, che può rientrare in una dei quattro intervalli definiti, si determina il livello del rischio.

Danno (D)		Classe di rischio Cl= Esp+ Pr + HF + Av				Esposizione Esp		Probabilità Pr		Fattore umano HF		Evitabilità Av	
		4-7	8-10	11-12	13-15								
Graffi, scottature, piccole punture	1					Breve <25% turno	1	Remota	1	Trascurabile	1	Probabile	1
Tagli, fratture a mani o dita, slogature, lussazioni	2					Media ≥25% e < 50% turno	2	Bassa	2	Limitato	2	Possibile	2
Amputazione di dita di mani o piedi, gravi ustioni	3					Prolungata ≥50% e < 75% turno	3	Media	3	Influente	3	Impossibile	3
Amputazione di braccia o gambe, perdita della vista, paralisi, morte	4					Continua ≥75% turno	4	Alta	4				
								Molto alta	5				
Legenda		Livello di rischio inaccettabile, pertanto vanno prese misure di riduzione					Permangono dei rischi residui da gestire, sono consigliabili misure di riduzione ulteriori					Livello di rischio minimo	

Di seguito viene riportata la tabella (Tabella 3.4) riassuntiva per la valutazione.

Tabella 3.4 Tabella di valutazione del rischio

Anche in questo caso è bene ordinare l'analisi in una tabella (Tabella 3.5), come già evidenziato nel caso precedente.

Analisi dei rischi legati all'utilizzo del robot collaborativo nel caso di <i>Hand guiding</i>																	
Pericolo		Attività	Situazione pericolosa	D	Esp	Pr	HF	Av	D/Cl	Misure di riduzione	D	Fr	Pr	HF	Av	D/Cl	Note
Tipologia	Elenco pericoli																

Tabella 3.5 Tabella di organizzazione dell'analisi

3) Monitoraggio di velocità e separazione (*speed and separation monitoring*)

La terza modalità di collaborazione viene descritta nel punto 5.5.4 della ISO/TS 15066:2016, e consiste nell'effettiva condivisione dello spazio collaborativo tra uomo e robot, ognuno dei quali compie autonomamente il proprio lavoro senza interruzione fintanto che viene mantenuta una minima distanza di sicurezza tra i due, la quale è funzione della velocità di lavoro.

La distanza dell'operatore dal robot viene costantemente monitorata e quando scende sotto una certa soglia stabilita, il robot si arresta e non riprende il proprio moto fino a quando l'operatore non si allontana.

La soglia minima può essere fissa o variabile, a seconda che il robot lavori a una velocità fissata o variabile durante l'attività. A un incremento della velocità corrisponde un aumento della soglia minima di separazione.

L'analisi e la valutazione dei rischi si conduce considerando i medesimi parametri proposti per l'analisi nel caso della guida manuale, cioè:

- Danno (D), come definito nel caso del *safety rated monitored stop*;
- Esposizione (Esp), come definita nel caso dell'*hand guiding*;
- Probabilità (Pr), come definita nel caso del *safety rated monitored stop* ;
- Fattore umano (HF), come definito nel caso del *safety rated monitored stop*;
- Evitabilità, come definita nel caso del *safety rated monitored stop*;

a cui aggiungere ulteriori criteri nell'attribuzione degli indici, peculiari per questa modalità.

In particolare, la distanza tra operatore e robot è un fattore di cui tenere conto per stabilire l'evitabilità o meno di un pericolo legato direttamente al braccio robotico.

Qualora la distanza di separazione fosse maggiore della metà dello sbraccio del *cobot*, si può stimare che sia probabile evitare un certo tipo di situazione in cui la distanza ha un certo peso.

Si potrebbe ritenere al contrario impossibile da evitare un danno se la distanza di separazione fosse inferiore ad esempio a un quarto dello sbraccio del robot, che corrisponde a una vicinanza ristretta.

L'analisi andrà poi ordinata in una tabella (Tabella 3.6) simile alla seguente:

Analisi dei rischi legati all'utilizzo del robot collaborativo nel caso di <i>Speed and separation monitoring</i>																	
Pericolo		Attività	Situazione pericolosa	D	Esp	Pr	HF	Av	D/Cl	Misure di riduzione	D	Fr	Pr	HF	Av	D/Cl	Note
Tipologia	Elenco pericoli																

Tabella 3.6 Tabella di organizzazione dell'analisi

4) Limitazione di potenza e forza (*Power and force limiting*)

Questa modalità operativa è oggetto del paragrafo 5.5.5 della ISO/TS 15066:2016, in cui viene precisato che è l'unico tipo di collaborazione in cui gli urti con il robot e il pezzo da lavorare, intenzionali o meno, sono concessi.

In particolare, i contatti tra macchina e qualsiasi parte del corpo dell'operatore possono verificarsi in tre condizioni:

- I. Contatti intenzionali che sono parte della sequenza di operazioni,

- II. Contatti accidentali in seguito a violazione di procedure di lavoro, senza che vi sia alcun tipo di guasto;
- III. Contatti che si realizzano in seguito a guasti.

Come già detto i contatti possono essere di due tipi, transitori o quasi statici.

Affinché vi possa essere contatto tra robot e persona, occorre che la pressione esercitata non superi determinate soglie in funzione della regione del corpo umano che può essere potenzialmente urtata.

Nel caso sia prevista una modalità di lavoro collaborativo realizzata tramite limitazione di potenza e velocità, occorre considerare nell'analisi dei rischi se gli urti possibili sono intenzionali o meno, e quali sono le zone del corpo interessate, poiché questo influisce nella definizione del rischio.

In particolare, descrivendo le situazioni pericolose associate a pericoli di urto, occorrerà specificare nella colonna delle situazioni se l'urto è intenzionale o meno.

Analizzando ad esempio un contatto previsto nella sequenza di azioni di lavoro, tale eventualità avrà un'alta probabilità e una bassa evitabilità (cioè evento impossibile da evitare, quindi indice massimo), ma un valore di danno corrispondente al minimo possibile.

I parametri per effettuare analisi e valutazione sono gli stessi utilizzati per la modalità di collaborazione precedente, così come la matrice per confrontare danno e classe di rischio:

- Danno (D), come definito nel caso del *safety rated monitored stop*;
- Esposizione (Esp), come definita nel caso dell'*hand guiding*;
- Probabilità (Pr), come definita nel caso del *safety rated monitored stop*;
- Fattore umano (HF), come definito nel caso del *safety rated monitored stop*;
- Evitabilità, come definita nel caso del *safety rated monitored stop*;

L'analisi andrà poi ordinata in una tabella (Tabella 3.7) simile alla seguente:

Analisi dei rischi legati all'utilizzo del robot collaborativo nel caso di <i>Power an force limiting</i>																	
Pericolo		Attività	Situazione pericolosa	D	Esp	Pr	HF	Av	D/Cl	Misure di riduzione	D	Fr	Pr	HF	Av	D/Cl	Note
Tipologia	Elenco pericoli																

Tabella 3.7 Tabella di organizzazione dell'analisi

5) Analisi dei rischi legati a installazione, manutenzione e smantellamento.

L'analisi dei rischi deve coprire ogni fase di vita di una macchina o di un impianto, affinché ogni interazione tra persona e sistema avvenga in sicurezza.

Per analizzare e valutare i rischi legati ad operazioni quali installazione e smantellamento, e manutenzioni ordinarie e straordinarie per un robot collaborativo, occorre prima di tutto conoscere le azioni richieste nello specifico dal sistema che si sta esaminando, per individuarne i pericoli.

Per condurre l'analisi si può utilizzare un metodo a ibrido normale, come quello proposto nel paragrafo § 2.1 di questo testo.

L'analisi viene poi ordinata in una tabella (Tabella 3.8) come la seguente:

Analisi dei rischi legati a installazione, manutenzione e smantellamento del robot collaborativo															
Pericolo		Attività	Situazione pericolosa	D	Fr	Pr	Av	D/Cl	Misure di riduzione	D	Fr	Pr	Av	D/Cl	Note
Tipologia	Elenco pericoli														

Tabella 3.8 *Tabella di organizzazione dell'analisi*

3.2 Rafforzare l'analisi

A seconda del grado di approfondimento richiesto alla fine dell'analisi, che è anche funzione della fase in cui questa è condotta, può essere necessario dover integrare ulteriori modelli di analisi quantitativi e strutturati alla metodologia proposta per giustificare l'assunzione di un determinato indice di un parametro rispetto ad un altro.

Il metodo proposto in queste pagine infatti, è stato elaborato per essere sufficiente per condurre un'analisi, ma non per essere esclusivo, precludendo la possibilità di affiancare ulteriori strumenti, che invece possono aiutare nell'attribuzione degli indici.

Ad esempio, l'utilizzo congiunto di un albero dei guasti (FTA) può aiutare ad attribuire con più precisione l'indice di probabilità di accadimento di un evento, qualora siano disponibili dati a sufficienza per effettuare il calcolo.

La tecnica del FTA può essere di supporto anche nell'attribuzione dell'indice del fattore umano, poiché, disponendo dei dati necessari, si può ad esempio vedere quanto la probabilità di un errore umano influisca in termini di ordine di grandezza sulla probabilità di accadimento del *top event*.

Come riferimento per i valori di probabilità di errore umano si può utilizzare la tabella di Figura 2.3.

A seconda della fase in cui l'analisi viene applicata, alcuni indici saranno attribuibili con maggiore o minore precisione.

Ad esempio, in una fase preliminare sarà più difficile attribuire l'indice riguardante il fattore umano o l'esposizione oppure la frequenza, dunque si individuerà il valore più verosimile e corrispondente alla condizione peggiore, per evitare di sottostimare il rischio.

Capitolo 4

Questo capitolo è incentrato su quella che è la parte più pratica del progetto di tesi, ovvero testare su un caso reale la metodologia di analisi del rischio proposta nel capitolo precedente, con lo scopo di verificarne l'efficacia, ed evidenziare quali sono i punti su cui lavorare in futuro.

Il contenuto del capitolo prevede la descrizione, in termini di funzionamento, attività, spazi e tipologia di interazioni, dei robot collaborativi che verranno analizzati, e l'analisi vera e propria.

Infine, vi sarà un confronto tra i risultati ottenuti con tale metodo e quelli ottenuti con il metodo a ibrido.

4.1 I casi

I casi che verranno presentati riguardano due robot collaborativi UR 10 impiegati in uno stabilimento di produzione di prodotti per il corpo, in cui svolgono mansioni di *packaging*.

I due *cobot* sono stati installati in due postazioni molto simili in una linea nella quale avviene l'imballaggio di flaconi di misure variabili di detergenti.

Le caratteristiche del *cobot* limitano l'entità del carico massimo movimentabile a 10 kg, inclusivi della massa dell'*end effector* montato, mentre il massimo raggio d'azione di ciascun manipolatore è di 1.3m, racchiuso dalle dimensioni della cella.

4.1.1 Operazioni celle e *layout*

Il primo passo per analizzare i rischi legati a una cella robotizzata consiste nel comprenderne il funzionamento, lo scopo, quali elementi la compongono e la loro distribuzione.

Il ciclo di lavoro è identico per entrambi i robot, al momento del sopralluogo le uniche differenze erano le dimensioni dei contenitori movimentati e i *gripper* montati sui *cobot*.

I flaconi riempiti di prodotto vengono trasportati tramite un nastro trasportatore (Figura 4.1) alla cella robotizzata (Figura 4.2), in corrispondenza della quale, al termine del nastro, il lavoro combinato di fotocellule e di due pistoni operati ad aria compressa cadenza a due a due i contenitori e in seguito un terzo pistone dotato di una lastra all'estremità spinge la coppia all'interno di un box fisso che può contenere sei flaconi.



Figura 4.1 Nastro trasportatore che trasferisce i contenitori alla postazione del robot, le sponde verdi evitano che i flaconi cadano durante il tragitto e sono regolabili tramite le manopole nere visibili per adattarsi alle dimensioni dei prodotti che transitano

Una volta che vengono accumulati i sei contenitori nel box (Figura 4.3), il robot dotato di opportuno *gripper*, che varia a seconda degli appigli forniti dai flaconi, afferra i sei contenitori e li sposta all'interno di una scatola di cartone posta su un altro nastro destinata all'imballaggio finale.



Figura 4.2 Veduta complessiva dell'interno della cella, si possono vedere il robot antropomorfo dotato di ventose, la parte terminale del nastro trasportatore, il box di raccolta dei contenitori e i pistoni che cadenzano i prodotti

Capitolo 4

I due robot esaminati, in virtù dei contenitori che dovevano movimentare, erano dotati di due *gripper* diversi; il primo montava sei pinze per poter afferrare gli ugelli dei flaconi, mentre il secondo presentava sei ventose (Figura 4.) adatte ad aderire alle sommità piate dei tappi dei contenitori.

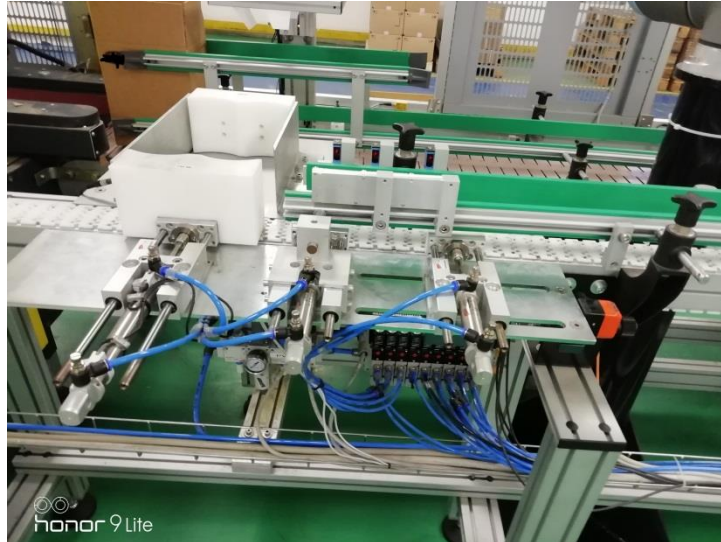


Figura 4.3 Particolare del tratto finale del nastro trasportatore, a partire da sinistra si vede il box di raccolta dei contenitori chiuso dalla piastra che spinge i contenitori al suo interno e a seguire i due pistoni che cadenzano i prodotti

Le due celle robotizzate sono state organizzate in modo da racchiudere i due *cobot* e i terminali dei nastri per l'afflusso dei contenitori.



Figura 4. Particolare dell'end effector costituito da sei ventose

Il personale, dotato di scarpe antinfortunistiche, cuffie e camici con polsini elasticizzati, può accedere a ciascuna cella da un solo ingresso dotato di barriera fotoelettrica che inibisce il movimento del robot non appena viene rilevato un accesso all'interno della zona delimitata.

L'interno della cella è completamente visibile dall'esterno.

Inoltre, il *layout* della cella è tale per cui il percorso di avvicinamento al *cobot* dal portale d'accesso sia posto in una direzione che è diversa da quella in cui avviene la movimentazione dei carichi.

Il pavimento di ciascuna cella, sia la parte calpestabile dall'operatore che la porzione sottostante i nastri trasportatori e i manipolatori, è sgombro e i canali di alimentazione dell'aria compressa e cavi di alimentazione e collegamento sono raggruppati con fascette e passacavi e allacciati alle intelaiature dei nastri trasportatori.

Le lavorazioni vengono effettuate a temperatura ambiente, in ambiente pulito, privo di detriti, sporcizia o polveri derivanti da lavorazioni.

Le interazioni tra operatori e cella avvengono in determinati casi, per lo più legati a operazioni di regolazioni *hardware* alla linea ogni qualvolta vi sia un cambio nelle dimensioni dei contenitori trattati, eventualità che può accadere anche un paio di volte a settimana, che richiedono un aggiustamento delle guide laterali del nastro trasportatore, un'eventuale sostituzione del *gripper* e la regolazione della posizione dei pistoni che cadenzano i flaconi.

Ulteriori motivi che possono portare all'ingresso di un operatore nella cella sono la sostituzione di fotocellule guaste, oppure un flacone che cade sul nastro in prossimità del braccio robotizzato e che deve essere raddrizzato, o ancora la sostituzione di nastrini.

Questi eventi sono comunque infrequenti e possono capitare al massimo una volta alla settimana.

Ogni tipo di regolazione fatta tramite *software* avviene al di fuori della cella dove sono posizionate l'unità di controllo dell'insieme, dotata di schermo ad altezza d'uomo, e il pannello di controllo *touchscreen* dedicato del solo braccio robotizzato.

La posizione dei terminali permette di effettuare operazioni tramite *software* controllando a vista la relativa cella su cui si sta agendo.

Le operazioni di manutenzione ordinaria a cella ferma vengono effettuate a distanza di mesi.

4.2 Identificazione dei pericoli

Per identificare i pericoli legati alle due installazioni robotizzate sono risultati essenziali due elementi:

- Sopralluogo guidato delle due celle per comprendere a fondo il funzionamento e soprattutto il grado e le modalità di interazione uomo-macchina;

- Esaminare *in loco* le postazioni con l'ausilio della *checklist* presentata nel capitolo precedente al fine di selezionare fin da subito quali fossero i pericoli principali pertinenti le due installazioni.

La similarità delle due celle e delle funzioni svolte ha prodotto come risultato che l'osservazione con l'ausilio della *checklist* portasse a individuare sulla medesima quasi gli stessi pericoli per entrambe le celle.

Di seguito vengono quindi riportati i pericoli identificati in fase di sopralluogo con l'ausilio della *checklist* relativi a ciascuna cella.

In aggiunta ai pericoli pertinenti contenuti nella *checklist*, sono stati individuati altri pericoli riportati nelle tabelle di analisi.

Lista pericoli cella 1

Pericoli connessi al robot	
Pericoli di natura meccanica	Movimenti normali o inattesi di qualsiasi parte del braccio robotico
	Movimento normale o inatteso di qualsiasi parte della cella robotizzata o dell' <i>end effector</i>
	Rotazione lungo un asse
	Caduta o eiezione di prodotti o materiali
	Impigliamento di capelli lunghi o di vestiti sciolti
	Movimento involontario di macchina/e associata/e
	Guasto della giunzione dell' <i>end effector</i>
	Schiacciamento tra robot e oggetto fisso
	Schiacciamento tra <i>end effector</i> e un oggetto fisso
	Rilascio inatteso di energia da fonti accumulate
Combinazione di pericoli	Comando di arresto che ferma il robot nel mezzo di un ciclo che rimane incompleto
	Malfunzionamento dei comandi con conseguente rilascio di dispositivi di trattenuta sul tavolo di carico o movimento per inerzia dell' <i>end effector</i>
	Malfunzionamento dei comandi con conseguente rilascio dei freni del braccio robotico, che causa il movimento per inerzia di parti del robot
	Guasto di una protezione che non funziona come atteso
	Guasto di una macchina associata che non funziona come atteso
	Parte che può cadere se non installata o fissata correttamente
Pericoli significativi per l' <i>end effector</i>	
Pericoli di natura meccanica	Problemi legati ai cavi
	Guasto della pinza
	Rottura dei sensori

	Guasto nella flangia o nel sistema di cambio <i>end effector</i>
	Mancanza di energia
	Progettazione e uso scorretti di stop di protezione ed emergenza
	Rottura cavi di alimentazione o fissaggi
	Programmazione della sequenza scorretta
	Errori nei comandi di <i>input/output</i> o <i>input/output</i> scorretti
Problemi legati al sistema di controllo	Perdita di comunicazione
	Perdita di conduttività nei segnali di attivazione
	Guasto nel sistema del robot
Pericoli specifici legati al tipo di <i>end effector</i>	
Gripper meccanico	Pizzicamento o stritolamento
	Caduta oggetti

Tabella 4.1 Tabella riassuntiva dei pericoli contenuti nella checklist al capitolo 3 pertinenti alla cella robotizzata 1

Lista pericoli cella 2

Pericoli connessi al robot	
Pericoli di natura meccanica	Movimenti normali o inattesi di qualsiasi parte del braccio robotico
	Movimento normale o inatteso di qualsiasi parte della cella robotizzata o dell' <i>end effector</i>
	Rotazione lungo un asse
	Caduta o eiezione di prodotti o materiali
	Impigliamento di capelli lunghi o di vestiti sciolti
	Movimento involontario di macchina/e associata/e
	Guasto della giunzione dell' <i>end effector</i>
	Schiacciamento tra <i>end effector</i> e un oggetto fisso
	Rilascio inatteso di energia da fonti accumulate
Combinazione di pericoli	Comando di arresto che ferma il robot nel mezzo di un ciclo che rimane incompleto
	Malfunzionamento dei comandi con conseguente rilascio dei freni del braccio robotico, che causa il movimento per inerzia di parti del robot
	Guasto di una protezione che non funziona come atteso
	Guasto di una macchina associata che non funziona come atteso
	Componenti installati impropriamente che creano movimenti o pericoli inattesi
	Parte che può cadere se non installata o fissata correttamente
Pericoli significativi per l' <i>end effector</i>	
Pericoli di natura meccanica	Rottura dei sensori
	Guasto nella flangia o nel sistema di cambio <i>end effector</i>
Pericoli legati a	Mancanza di energia

fonti di energia	Progettazione e uso scorretti di stop di protezione ed emergenza
	Rilascio di energia accumulata
	Rottura cavi di alimentazione o fissaggi
	Errori nei comandi di <i>input/output</i> o <i>input/output</i> scorretti
Problemi legati al sistema di controllo	Perdita di comunicazione
	Perdita di conduttività nei segnali di attivazione
	Guasto nel sistema del robot
Pericoli specifici legati al tipo di <i>end effector</i>	
<i>Gripper</i> a vuoto	Caduta oggetti

Tabella 4.2 Tabella riassuntiva dei pericoli contenuti nella checklist al capitolo 3 pertinenti alla cella robotizzata 2

4.3 Analisi dei rischi

A partire dai pericoli individuati in fase di sopralluogo, sia con *checklist* che identificati nell'applicazione specifica, verrà ora condotta l'analisi dei rischi a cui sono sottoposti i lavoratori durante le interazioni con le due celle robotizzate.

I dati saranno organizzati in due tabelle distinte, una per cella, dal momento che, se pur minime, vi sono delle differenze.

Per prima cosa, prima di iniziare l'analisi occorre specificare quali sono le tipologie di operazioni collaborative svolte nelle due celle.

A questo proposito, in virtù delle funzioni svolte dai robot e delle interazioni uomo-macchina, descritte nel paragrafo §4.1.1, le modalità di lavoro della cella sono assimilabili al *safety rated monitored stop*, pertanto i rischi connessi verranno valutati con i parametri previsti per questa modalità di collaborazione.

Dunque, i parametri considerati nella definizione del livello di rischio saranno:

- Danno D;
- Frequenza Fr;
- Probabilità Pr;
- Fattore umano HF;
- Evitabilità Av;

Analisi dei rischi per la cella robotizzata 1

Analisi dei rischi legati all'utilizzo del robot collaborativo nel caso di *Safety rated monitored stop*

Pericolo		Attività	Situazione pericolosa	D	Fr	Pr	HF	Av	D/Cl	Misure di riduzione	D	Fr	Pr	HF	Av	D/Cl	Note
Tipologia	Elenco pericoli																
Pericoli di natura meccanica	Movimenti normali o inattesi di qualsiasi parte del braccio robotico	Operatore all'interno della cella per ispezione o controllo, e il robot non si è arrestato	Urto con operatore	2	1	1	3	1		Non considerate	/	/	/	/	/		Questo pericolo porterebbe a un rischio solo se un operatore provasse ad accedere alla zona di lavoro del robot con una parte del corpo dalla direzione del nastro trasportatore o in caso di manomissione o malfunzionamento della fotocellula all'ingresso.
	Movimento normale o inatteso di qualsiasi parte della cella robotizzata o dell' <i>end effector</i>	Operatore all'interno della cella per controllare o correggere un errore con nastro trasportatore in funzionamento.	Pizzicamento delle mani	1	1	2	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/		Il rischio è molto basso poiché il potenziale danno è minimo, e la probabilità che vi sia un movimento di parti mobili della cella mentre un operatore è all'interno
		Operatore all'interno della cella per controllare o correggere un errore con pistoni in funzione.															
	Rotazione lungo un asse	Operatore nella cella e parte del robot che ruota lungo il proprio asse a causa di un guasto	Rischio di urto con l'operatore o intrappolamento di un braccio o di una mano tra due parti del robot	1	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		Le basse velocità in gioco rendono possibile evitare un eventuale danno all'operatore, inoltre la probabilità di una simile eventualità è bassa
	Caduta o eiezione di prodotti o materiali	Operatore nella cella per raddrizzare un contenitore caduto sul	Un contenitore potrebbe cadere dal nastro in prossimità	1	1	1	1	1		Non considerate	/	/	/	/	/		Le ridotte masse manipolate limitano il potenziale danno, mentre

Capitolo 4

		nastro.	dei pistoni che cadenzano i prodotti, cadendo sui piedi di un operatore														il percorso lungo cui vengono movimentate e la presenza di bordi alti sul nastro riducono la probabilità di accadimento di un tale evento
	Impigliamento di capelli lunghi o di vestiti sciolti	Operatore nella cella, o in prossimità con parti in movimento	Rischio impigliamento capelli lunghi o vestiti sciolti con conseguenti strappi/ lesioni	2	1	2	3	2		Non considerate	/	/	/	/	/		Situazione poco plausibile nel caso in esame dato che chiunque interagisca con la cella o parte di essa è dotato di cuffia e tute o camici chiusi e dotati di polsini elasticizzati. Il fattore umano ha valore massimo poiché l'esposizione a tale pericolo avverrebbe solo in caso di deliberato non utilizzo di dpi e di operazioni vicino a parti in movimento.
	Movimento involontario di macchina/e associata/e	Operatore all'interno della cella con nastro in funzione	Pizzicamento o urti agli arti superiori	1	1	2	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/		Il fatto che le operazioni si interrompano quando un operatore entra nella cella limita la probabilità di un tale evento, che potrebbe avvenire per un guasto o per un riavvio manuale di un operatore inconsapevole della presenza di un collega nella cella, eventualità scongiurata dalle piccole dimensioni e dalla

Capitolo 4

																	visibilità
	Guasto della giunzione dell' <i>end effector</i>	Operatore nella cella e per un guasto nella giunzione cadono componenti o prodotti dall' <i>end effector</i>	I componenti potrebbero urtare l'operatore, cadendo su mani o piedi	2	1	1	1	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Schiacciamento tra robot e oggetto fisso	Operatore nella cella con robot che ruota sulla base incastrando (a causa di un guasto) l'operatore contro le recinzioni	Urto con l'operatore	1	1	1	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/		La probabilità che questo avvenga è quasi trascurabile, poiché il lavoro svolto dal robot limita molto l'ampiezza delle rotazioni lungo la base, quindi per intrappolare un operatore dovrebbe fare un movimento diverso dal previsto, a causa ad esempio di un errore di programmazione e dovrebbe venir meno lo stop di protezione quando un operatore è nella cella
	Schiacciamento tra <i>end effector</i> e un oggetto fisso	Operatore che effettua regolazioni nell'area di lavoro dell' <i>end effector</i> che per un motivo si abbassa	Pizzicamento o schiacciamento delle mani	1	1	1	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		La probabilità è trascurabile, poiché è molto difficile che, se anche il robot si muove per qualche motivo, l' <i>end effector</i> intrappoli le mani di un operatore contro parti fisse, dato che gli spazi consentono di muoverle e le basse velocità del robot rendono possibile evitarlo

Capitolo 4

	Comando di arresto che ferma il robot nel mezzo di un ciclo che rimane incompleto	Operatore che entra nella cella per intervenire su un'anomalia del ciclo di lavoro	Contenitori che potrebbero cadere sulle mani dell'operatore se questo sta lavorando entro la zona di spostamento dei prodotti	2	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
		Robot che interviene su un'anomalia con robot arrestato in posizione che rende difficile l'operazione	Pizzicamento mani, urti con parti del robot o macchine associate	1	1	3	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Malfunzionamento dei comandi con conseguente rilascio dei freni del braccio robotico, che causa il movimento per inerzia di parti del robot	Operatore che effettua regolazioni in vicinanza del braccio, che se alimentato può muoversi se i freni sono rilasciati	Una parte del robot può muoversi	2	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		In mancanza di dati, si è definita bassa la probabilità di accadimento di questi eventi, che è verosimilmente il caso peggiore
		Se uno o più freni dei giunti cedono a causa di guasto in assenza di alimentazione il braccio ricade sulla zona di lavoro	Eventuale urto con parti del corpo dell'operatore vicino al robot	2	1	2	1	3			/	/	/	/	/		
	Guasto di una macchina associata che non funziona come atteso	Difficoltà di scorrimento del nastro trasportatore, che potrebbe andare a scatti	Rischio di caduta prodotti dal nastro, che potrebbero finire sui piedi dell'operatore se questo è in prossimità	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		La conformazione del nastro rende difficile la caduta di prodotti all'esterno
	Parte che può cadere se non installata o fissata correttamente	L'end effector se non fissato adeguatamente potrebbe sganciarsi	Urto con arti superiori o inferiori di un operatore dentro la cella	2	1	1	3	2		Non considerate	/	/	/	/	/		Il fattore umano ha una forte influenza, dal momento che un serraggio insufficiente può essere facilmente collegato ad

Capitolo 4

																	una imperizia nell'esecuzione
		Robot non ancorato adeguatamente che potrebbe staccarsi dal piedistallo	Urto con operatore nella cella	2	1	2	3	2		Non considerate	/	/	/	/	/		In questo caso siamo di fronte a un rischio residuo che si può gestire semplicemente con un controllo sui serraggi
		Componenti del nastro che potrebbero cadere	Urto con operatore nella cella	1	1	2	3	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Guasto della pinza	Operatore nella cella, robot fermo con prodotti afferrati dal <i>gripper</i> che si guasta	Caduta prodotti	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		La massa contenuta e le forme arrotondate dei contenitori limitano la potenziale entità del danno
	Guasto nella flangia o nel sistema di cambio <i>end effector</i>	Operatore nella cella, un guasto porta al distacco dell' <i>end effector</i> o di una sua parte	Caduta pezzi su operatore	2	1	1	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		La contemporanea presenza nella cella di un operatore e il guasto nella flangia è poco probabile
	Pizzicamento o stritolamento	Regolazioni sul nastro trasportatore	Pizzicamento delle mani	1	1	2	3	1		Non considerate	/	/	/	/	/		
		Regolazioni alla posizione dei pistoni che cadenzano i prodotti posti su guide mobili	Pizzicamento delle mani	1	1	2	3	1			/	/	/	/	/		
		Regolazione o intervento sul <i>gripper</i>	Pizzicamento delle mani	1	1	2	3	1			/	/	/	/	/		
	Rottura fissaggio base robot	Operatore nella cella a robot fermo che potrebbe cadere se sbilanciato	Caduta robot e urto con operatore	2	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Superfici spigolose	Tavola su cui sono incise le guide dei supporti dei pistoni presentano spigoli vivi	Rischio urto, abrasioni in caso di contatto violento	2	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
Pericoli legati a energia o	Mancanza di energia	La mancanza di energia può portare anomalie al	Rischio urto con parti della cella o del robot	1	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		Le cadute di tensione mentre un operatore è

Capitolo 4

fonti di energia ed elementi di trasmissione		ciclo di lavoro che richiedono l'intervento dell'operatore per essere corrette	se parti che dovrebbero essere in movimento sono ferme e complicano le operazioni														nella cella possono essere considerate poco probabili
	Rilascio di energia accumulata	Operatore nella cella che effettua regolazioni e i pistoni a fine nastro scattano	Urto con le mani dell'operatore	2	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Rottura cavi di alimentazione, o fissaggi	Operatore che esegue regolazioni nella cella ed è presente un conduttore con guaina danneggiata	Folgorazione	3	1	1	1	1		Non considerate	/	/	/	/	/		La folgorazione potrebbe essere fatale, tuttavia il rischio è molto contenuto dal momento che il <i>layout</i> esclude la possibilità che parti in movimento o altre operazioni nella cella possano danneggiare un cavo di alimentazione
	Errori nei comandi di <i>input/output</i> o <i>input/output</i> scorretti	Errori nella programmazione dei movimenti del robot	Movimentazione nella contenitori nella direzione sbagliata, che cadono a terra rompendosi e spandendo il contenuto generano un rischio di scivolamento	1	1	2	3	1		Non considerate	/	/	/	/	/		In questo caso il fattore umano ha un forte peso, tuttavia la possibilità di errore è bassa nel caso di operazioni poco complesse
	Perdita di comunicazione	Robot o altre parti in movimento della cella che non si fermano quando l'operatore accede	Urti o pizzicamenti con parti in movimento	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Guasto nel sistema del robot	Il robot non si ferma come previsto quando l'operatore è nella cella	Urto con l'operatore	2	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		Il rischio è basso anche in virtù della bassa velocità del robot e del fatto che se

Capitolo 4

																	all'ingresso non si ferma la cella, l'operatore ha la possibilità di notarlo e di uscire
		Il robot si muove diversamente da quanto previsto dalle sue funzioni		2	1	2	2	2			/	/	/	/	/		
	Perdita di conduttività nei segnali di attivazione	Operatore entra nella cella che quindi dovrebbe arrestarsi, ma il segnale di stop non viene trasmesso	Contatto con parti in movimento	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Rottura dei sensori	Funzioni di sicurezza intrinseche del robot inaffidabili	Possibili contatti o urti	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
Pericoli legati a sistemi di protezione	Progettazione e uso scorretti di stop di protezione ed emergenza	In caso di ripristino dello stop di emergenza la cella si riavvia anche se l'operatore non ha dato tale comando e c'è personale all'interno della cella	Urti, pizzicamenti, abrasioni, stritolamenti	2	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Guasto di una protezione che non funziona come atteso	Fotocellula all'ingresso della cella che non funziona e quindi non avvia il segnale di arresto al robot	Rischio di caduta prodotti dal nastro, che potrebbero finire sui piedi dell'operatore se questo è in prossimità	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
		Contatto tra parti in movimento e operatore	Pizzicamento, schiacciamento	2	1	2	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/		

Tabella 4.3 Tabella di analisi dei rischi cella robotizzata 1

Analisi dei rischi per la cella robotizzata 2

Analisi dei rischi legati all'utilizzo del robot collaborativo nel caso di *Safety rated monitored stop*

Pericolo		Attività	Situazione pericolosa	D	Fr	Pr	HF	Av	D/Cl	Misure di riduzione	D	Fr	Pr	HF	Av	D/Cl	Note
Tipologia	Elenco pericoli																
Pericoli di natura meccanica	Movimenti normali o inattesi di qualsiasi parte del braccio robotico	Operatore all'interno della cella per ispezione o controllo, e il robot non si è arrestato	Urto con operatore	2	1	1	3	1		Non considerate	/	/	/	/	/	/	Questo pericolo porterebbe a un rischio solo se un operatore provasse ad accedere alla zona di lavoro del robot con una parte del corpo dalla direzione del nastro trasportatore o in caso di manomissione o malfunzionamento della fotocellula all'ingresso.
	Movimento normale o inatteso di qualsiasi parte della cella robotizzata o dell' <i>end effector</i>	Operatore all'interno della cella per controllare o correggere un errore con nastro trasportatore in funzionamento.	Pizzicamento delle mani	1	1	1	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/	/	Il rischio è molto basso poiché il potenziale danno è minimo, e la probabilità che vi sia un movimento di parti mobili della cella mentre un operatore è all'interno
		Operatore all'interno della cella per controllare o correggere un errore con pistoni in funzione.															
	Rotazione lungo un asse	Operatore nella cella e parte del robot che ruota	Rischio di urto con l'operatore o	1	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		Le basse velocità in gioco rendono possibile evitare

Capitolo 4

		lungo il proprio asse a causa di un guasto	intrappolamento di un braccio o di una mano tra due parti del robot														un eventuale danno all'operatore, inoltre la probabilità di una simile eventualità è bassa
	Caduta o eiezione di prodotti o materiali	Operatore nella cella per raddrizzare un contenitore caduto sul nastro.	Un contenitore potrebbe cadere dal nastro in prossimità dei pistoni che cadenzano i prodotti	1	1	1	1	1		Non considerate	/	/	/	/	/		Le ridotte masse manipolate limitano il potenziale danno, mentre il percorso lungo cui vengono movimentate e la presenza di bordi alti sul nastro riducono la probabilità di accadimento di un tale evento
	Impigliamento di capelli lunghi o di vestiti sciolti	Operatore nella cella, o in prossimità con parti in movimento	Rischio impigliamento capelli lunghi o vestiti sciolti con conseguenti strappi/ lesioni	2	1	2	3	2		Non considerate	/	/	/	/	/		Situazione poco plausibile nel caso in esame dato che chiunque interagisca con la cella o parte di essa è dotato di cuffia e tute o camici chiusi e dotati di polsini elasticizzati. Il fattore umano ha valore massimo poiché l'esposizione a tale pericolo avverrebbe solo in caso di deliberato non utilizzo di dpi e di operazioni vicino a parti in movimento.
	Movimento involontario di macchina/e associata/e	Operatore all'interno della cella con nastro in funzione	Pizzicamento o urti agli arti superiori	1	1	2	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/		Il fatto che le operazioni si interrompano quando un operatore entra nella cella limita la probabilità di un tale evento, che potrebbe avvenire per un guasto o

Capitolo 4

																	per un riavvio manuale di un operatore inconsapevole della presenza di un collega nella cella, eventualità scongiurata dalle piccole dimensioni e dalla visibilità
	Guasto della giunzione dell' <i>end effector</i>	Operatore nella cella e per un guasto nella giunzione cadono componenti o prodotti dall' <i>end effector</i>	I componenti potrebbero urtare l'operatore	1	1	1	1	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Schiacciamento tra <i>end effector</i> e un oggetto fisso	Operatore che effettua regolazioni nell'area di lavoro dell' <i>end effector</i> che per un motivo si abbassa	Pizzicamento o schiacciamento delle mani	1	1	1	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		La probabilità è trascurabile, poiché è molto difficile che, se anche il robot si muove per qualche motivo, l' <i>end effector</i> intrappoli le mani di un operatore contro parti fisse, dato che gli spazi consentono di muoverle e le basse velocità del robot rendono possibile evitarlo
	Comando di arresto che ferma il robot nel mezzo di un ciclo che rimane incompleto	Operatore che entra nella cella per intervenire su un'anomalia del ciclo di lavoro	Contenitori che potrebbero cadere sulle mani dell'operatore se questo sta lavorando entro la zona di spostamento dei prodotti	2	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		

	Malfunzionamento dei comandi con conseguente rilascio dei freni del braccio robotico, che causa il movimento per inerzia di parti del robot	Operatore che effettua regolazioni in vicinanza del braccio, che se alimentato può muoversi se i freni sono rilasciati	Una parte del robot può muoversi	2	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		In mancanza di dati, si è definita bassa la probabilità di accadimento di questi eventi, che è verosimilmente il caso peggiore
		Se uno o più freni dei giunti cedono a causa di guasto in assenza di alimentazione il braccio ricade sulla zona di lavoro	Eventuale urto con parti del corpo dell'operatore vicino al robot	2	1	2	1	2			/	/	/	/	/		
	Guasto di una macchina associata che non funziona come atteso	Difficoltà di scorrimento del nastro trasportatore, che potrebbe andare a scatti	Rischio di caduta prodotti dal nastro, che potrebbero finire sui piedi dell'operatore se questo è in prossimità	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		La conformazione del nastro rende difficile la caduta di prodotti all'esterno
	Parte che può cadere se non installata o fissata correttamente	L'end effector se non fissato adeguatamente potrebbe sganciarsi	Urto con arti superiori o inferiori di un operatore dentro la cella	2	1	1	3	2		Non considerate	/	/	/	/	/		Il fattore umano ha una forte influenza, dal momento che un serraggio insufficiente può essere facilmente collegato ad una imperizia nell'esecuzione
		Robot non ancorato adeguatamente che potrebbe staccarsi dal piedistallo	Urto con operatore nella cella	2	1	2	3	2		Non considerate	/	/	/	/	/		In questo caso siamo di fronte a un rischio residuo che si può gestire semplicemente con un controllo sui serraggi
		Componenti del nastro che potrebbero cadere	Urto con operatore nella cella	1	1	2	3	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Guasto del gripper a vuoto	Operatore nella cella, robot fermo con prodotti afferrati dal gripper che si guasta	Caduta prodotti	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		La massa contenuta e le forme arrotondate dei contenitori limitano la potenziale entità del danno

Capitolo 4

	Guasto nella flangia o nel sistema di cambio <i>end effector</i>	Operatore nella cella, un guasto porta al distacco dell' <i>end effector</i> o di una sua parte	Caduta pezzi su operatore	2	1	1	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		La contemporanea presenza nella cella di un operatore e il guasto nella flangia è poco probabile
	Pizzicamento o stritolamento	Regolazioni sul nastro trasportatore	Pizzicamento delle mani	1	1	2	3	1		Non considerate	/	/	/	/	/		
		Regolazioni alla posizione dei pistoni che cadenzano i prodotti posti su guide mobili	Pizzicamento delle mani	1	1	2	3	1			/	/	/	/	/		
		Regolazione o intervento sul <i>gripper</i>	Pizzicamento delle mani	1	1	2	3	1			/	/	/	/	/		
	Rottura fissaggio base robot	Operatore nella cella a robot fermo che potrebbe cadere se sbilanciato	Caduta robot e urto con operatore	2	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Superfici spigolose	Tavola su cui sono incise le guide dei supporti dei pistoni presentano spigoli vivi	Rischio urto, abrasioni in caso di contatto violento	2	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
Pericoli legati a energia o fonti di energia ed elementi di trasmissione	Mancanza di energia	La mancanza di energia può portare anomalie al ciclo di lavoro che richiedono l'intervento dell'operatore per essere corrette	Rischio urto con parti della cella o del robot se parti che dovrebbero essere in movimento sono ferme e complicano le operazioni	1	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		Le cadute di tensione mentre un operatore è nella cella possono essere considerate poco probabili
		Rilascio contenitori dalle ventose del <i>gripper</i>	Caduta contenitori sui piedi dell'operatore	2	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Rilascio di energia accumulata	Operatore nella cella che effettua regolazioni e i pistoni a fine nastro scattano	Urto con le mani dell'operatore	2	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Rottura cavi di alimentazione o	Operatore che esegue regolazioni nella cella ed	Folgorazione	3	1	1	1	1		Non considerate	/	/	/	/	/		La folgorazione potrebbe essere fatale, tuttavia il

Capitolo 4

	fissaggi	è presente un conduttore con guaina danneggiata															rischio è molto contenuto dal momento che il <i>layout</i> esclude la possibilità che parti in movimento o altre operazioni nella cella possano danneggiare un cavo di alimentazione
	Errori nei comandi di <i>input/output</i> o <i>input/output</i> scorretti	Errori nella programmazione dei movimenti del robot	Movimentazione nella contenitori nella direzione sbagliata, che cadono a terra rompendosi e spandendo il contenuto generano un rischio di scivolamento	1	1	2	3	1		Non considerate	/	/	/	/	/		In questo caso il fattore umano ha un forte peso, tuttavia la possibilità di errore è bassa nel caso di operazioni poco complesse
	Perdita di comunicazione	Robot o altre parti in movimento della cella che non si fermano quando l'operatore accede	Urti o pizzicamenti con parti in movimento	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Guasto nel sistema del robot	Il robot non si ferma come previsto quando l'operatore è nella cella	Urto con l'operatore	2	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		Il rischio è basso anche in virtù della bassa velocità del robot e del fatto che se all'ingresso non si ferma la cella, l'operatore ha la possibilità di notarlo e di uscire
		Il robot si muove diversamente da quanto previsto dalle sue funzioni		2	1	2	2	2			/	/	/	/	/		
	Perdita di conduttività nei segnali	Operatore entra nella cella che quindi dovrebbe arrestarsi, ma il segnale	Contatto con parti in movimento	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		

Capitolo 4

	attivazione	di stop non viene trasmesso															
	Rottura dei sensori	Funzioni di sicurezza intrinseche del robot inaffidabili	Possibili contatti o urti	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
Pericoli legati a sistemi di protezione	Progettazione e uso scorretti di stop di protezione ed emergenza	In caso di ripristino dello stop di emergenza la cella si riavvia anche se l'operatore non ha dato tale comando e c'è personale all'interno della cella	Urti, pizzicamenti, abrasioni, stritolamenti	2	1	2	2	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Guasto di una protezione che non funziona come atteso	Fotocellula all'ingresso della cella che non funziona e quindi non avvia il segnale di arresto al robot	Rischio di caduta prodotti dal nastro, che potrebbero finire sui piedi dell'operatore se questo è in prossimità	1	1	2	1	2		Non considerate	/	/	/	/	/		
		Contatto tra parti in movimento e operatore	Pizzicamento, schiacciamento	2	1	2	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/		

Tabella 4.4 Tabella di analisi dei rischi cella robotizzata 2

Come si può vedere, i rischi valutati sono bassi. Del resto, il compito di un'applicazione collaborativa è proprio ridurre i rischi connessi ad una lavorazione ai quali altrimenti sarebbe esposto il lavoratore.

Nonostante la presenza di organi in movimento nella cella, la limitata gamma di interazioni tra operatori e cella è caratterizzata da rischi di basso livello dal momento che queste sono caratterizzate da una bassa frequenza e la stessa possibilità che l'operatore subisca dei danni è in genere bassa, poiché subordinata al verificarsi di guasti di componenti o di errori che possono difficilmente accadere.

In alcuni casi è stato attribuito un basso indice di probabilità poiché l'eventualità considerata era frutto del concatenarsi di due condizioni a loro volta poco probabili.

A contribuire alla determinazione di un basso livello di rischio è stato anche il fatto che ai pericoli correlati alle interazioni uomo-macchina fossero associati rischi che potevano produrre danni di lieve entità alla salute e alla sicurezza degli operatori.

4.4 Confronto

Un ulteriore riflessione in seguito all'applicazione del metodo di analisi può venire dal confronto dei livelli di rischio ottenuti con quelli che sono calcolabili utilizzando il metodo a ibrido originale proposto nella ISO/TR 14121-2:2007.

L'analisi partirà dai medesimi pericoli evidenziati nel paragrafo precedente per entrambe le celle, in questo modo si potrà valutare l'attendibilità dei dati ottenuti.

Per il confronto sarà necessario mantenere la maggior corrispondenza possibile tra i fattori considerati dai due metodi.

La valutazione con il metodo a ibrido prevede di considerare i seguenti parametri per definire il livello di rischio:

- Severità S_e ;
- Frequenza F_r ;
- Probabilità;
- Evitabilità;

Capitolo 4

Analisi dei rischi cella robotizzata 1 con metodo ibrido ISO/TR 14121-2:2007

Pericolo		Attività	Situazione pericolosa	Se	Fr	Pr	Av	Se/Cl	Misure di riduzione	Se	Fr	Pr	Av	Se/Cl	Note
Tipologia	Elenco pericoli														
Pericoli di natura meccanica	Movimenti normali o inattesi di qualsiasi parte del braccio robotico	Operatore all'interno della cella per ispezione o controllo, e il robot non si è arrestato	Urto con operatore	2	4	2	1		Non considerate	/	/	/	/		
	Movimento normale o inatteso di qualsiasi parte della cella robotizzata o dell' <i>end effector</i>	Operatore all'interno della cella per controllare o correggere un errore con nastro trasportatore in funzionamento.	Pizzicamento delle mani	1	4	1	1		Non considerate	/	/	/	/		
		Operatore all'interno della cella per controllare o correggere un errore con pistoni in funzione.													
	Rotazione lungo un asse	Operatore nella cella e parte del robot che ruota lungo il proprio asse a causa di un guasto	Rischio di urto con l'operatore o intrappolamento di un braccio o di una mano tra due parti del robot	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/		
	Caduta o eiezione di prodotti o materiali	Operatore nella cella per raddrizzare un contenitore caduto sul nastro.	Un contenitore potrebbe cadere dal nastro in prossimità dei pistoni che cadenzano i prodotti	1	4	1	1		Non considerate	/	/	/	/		
	Impigliamento di capelli lunghi o di vestiti sciolti	Operatore nella cella, o in prossimità con parti in movimento	Rischio impigliamento capelli lunghi o vestiti sciolti con conseguenti strappi/ lesioni	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/		
	Movimento involontario di macchina/e	Operatore all'interno della cella con nastro in funzione	Pizzicamento o urti agli arti superiori	1	4	2	1		Non considerate	/	/	/	/		

Capitolo 4

	associata/e															
	Guasto della giunzione dell' <i>end effector</i>	Operatore nella cella e per un guasto nella giunzione cadono componenti o prodotti dall' <i>end effector</i>	I componenti potrebbero urtare l'operatore	1	1	1	5		Non considerate	/	/	/	/			
	Schiacciamento tra robot e oggetto fisso	Operatore nella cella con robot che ruota sulla base incastrando (a causa di un guasto) l'operatore contro le recinzioni	Urto con l'operatore	1	4	1	1		Non considerate	/	/	/	/			
	Schiacciamento tra <i>end effector</i> e un oggetto fisso	Operatore che effettua regolazioni nell'area di lavoro dell' <i>end effector</i> che per un motivo si abbassa	Pizzicamento o schiacciamento delle mani	1	1	1	3		Non considerate	/	/	/	/			
	Comando di arresto che ferma il robot nel mezzo di un ciclo che rimane incompleto	Operatore che entra nella cella per intervenire su un'anomalia del ciclo di lavoro	Contenitori che potrebbero cadere sulle mani dell'operatore se questo sta lavorando entro la zona di spostamento dei prodotti	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/			
		Robot che interviene su un'anomalia con robot arrestato in posizione che rende difficoltosa l'operazione	Pizzicamento mani, urti con parti del robot o macchine associate	1	4	3	1		Non considerate	/	/	/	/			
	Malfunzionamento dei comandi con conseguente rilascio dei freni del braccio robotico, che causa	Operatore che effettua regolazioni in vicinanza del braccio, che se alimentato può muoversi se i freni sono rilasciati	Una parte del robot può muoversi	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/			

Capitolo 4

	il movimento per inerzia di parti del robot	Se uno o più freni dei giunti cedono a causa di guasto in assenza di alimentazione il braccio ricade sulla zona di lavoro	Eventuale urto con parti del corpo dell'operatore vicino al robot	2	4	2	3			/	/	/	/		
	Guasto di una macchina associata che non funziona come atteso	Difficoltà di scorrimento del nastro trasportatore, che potrebbe andare a scatti	Rischio di caduta prodotti dal nastro, che potrebbero finire sui piedi dell'operatore se questo è in prossimità	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/		
	Parte che può cadere se non installata o fissata correttamente	L'end effector se non fissato adeguatamente potrebbe sganciarsi	Urto con arti superiori o inferiori di un operatore dentro la cella	2	4	1	3		Non considerate	/	/	/	/		
		Robot non ancorato adeguatamente che potrebbe staccarsi dal piedistallo	Urto con operatore nella cella	2	1	2	2		Non considerate	/	/	/	/		
		Componenti del nastro che potrebbero cadere	Urto con operatore nella cella	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/		
	Guasto della pinza	Operatore nella cella, robot fermo con prodotti afferrati dal gripper che si guasta	Caduta prodotti	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/		
	Guasto nella flangia o nel sistema di cambio end effector	Operatore nella cella, un guasto porta al distacco dell'end effector o di una sua parte	Caduta pezzi su operatore	2	4	1	3		Non considerate	/	/	/	/		
	Pizzicamento o stritolamento	Regolazioni sul nastro trasportatore	Pizzicamento delle mani	1	4	2	1		Non considerate	/	/	/	/		
		Regolazioni alla posizione dei pistoni che cadenzano i prodotti posti	Pizzicamento delle mani	1	4	2	1			/	/	/	/		

Capitolo 4

		su guide mobili														
		Regolazione o intervento sul <i>gripper</i>	Pizzicamento delle mani	1	4	2	1			/	/	/	/			
	Rottura fissaggio base robot	Operatore nella cella a robot fermo che potrebbe cadere se sbilanciato	Caduta robot e urto con operatore	2	4	1	5		Non considerate	/	/	/	/			
	Superfici spigolose	Tavola su cui sono incise le guide dei supporti dei pistoni presentano spigoli vivi	Rischio urto, abrasioni in caso di contatto violento	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/			
Pericoli legati a energia o fonti di energia ed elementi di trasmissione	Mancanza di energia	La mancanza di energia può portare anomalie al ciclo di lavoro che richiedono l'intervento dell'operatore per essere corrette	Rischio urto con parti della cella o del robot se parti che dovrebbero essere in movimento sono ferme e complicano le operazioni	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/			
	Rilascio di energia accumulata	Operatore nella cella che effettua regolazioni e i pistoni a fine nastro scattano	Urto con le mani dell'operatore	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/			
	Rottura cavi di alimentazione, o fissaggi	Operatore che esegue regolazioni nella cella ed è presente un conduttore con guaina danneggiata	Folgorazione	3	4	1	1		Non considerate	/	/	/	/			
	Errori nei comandi di <i>input/output</i> o <i>input/output</i> scorretti	Errori nella programmazione dei movimenti del robot	Movimentazione contenitori nella direzione sbagliata, che cadono a terra rompendosi e spandendo il contenuto generano un rischio di scivolamento	1	4	2	1		Non considerate	/	/	/	/			
	Perdita di	Robot o altre parti in	Urti o pizzicamenti	1	4	2	5		Non considerate	/	/	/	/			

Capitolo 4

	comunicazione	movimento della cella che non si fermano quando l'operatore accede	con parti in movimento												
	Guasto nel sistema del robot	Il robot non si ferma come previsto quando l'operatore è nella cella	Urto con l'operatore	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/		
		Il robot si muove diversamente da quanto previsto dalle sue funzioni		2	4	2	3			/	/	/	/		
	Perdita di conduttività nei segnali di attivazione	Operatore entra nella cella che quindi dovrebbe arrestarsi, ma il segnale di stop non viene trasmesso	Contatto con parti in movimento	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/		
	Rottura dei sensori	Funzioni di sicurezza intrinseche del robot inaffidabili	Possibili contatti o urti	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/		
Pericoli legati a sistemi di protezione	Progettazione e uso scorretti di stop di protezione ed emergenza	In caso di ripristino dello stop di emergenza la cella si riavvia anche se l'operatore non ha dato tale comando e c'è personale all'interno della cella	Urti, pizzicamenti, abrasioni, stritolamenti	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/		
	Guasto di una protezione che non funziona come atteso	Fotocellula all'ingresso della cella che non funziona e quindi non avvia il segnale di arresto al robot	Rischio di caduta prodotti dal nastro, che potrebbero finire sui piedi dell'operatore se questo è in prossimità	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/		
		Contatto tra parti in movimento e operatore	Pizzicamento, schiacciamento	2	4	2	1		Non considerate	/	/	/	/		

Tabella 4.5 Tabella di analisi con metodo ibrido della cella 1

Capitolo 4

Analisi dei rischi cella robotizzata 2 con metodo ibrido ISO/TR 14121-2:2007

Pericolo		Attività	Situazione pericolosa	Se	Fr	Pr	Av	Se/Cl	Misure di riduzione	D	Fr	Pr	HF	Av	Se/Cl	Note
Tipologia	Elenco pericoli															
Pericoli di natura meccanica	Movimenti normali o inattesi di qualsiasi parte del braccio robotico	Operatore all'interno della cella per ispezione o controllo, e il robot non si è arrestato	Urto con operatore	2	4	1	1		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Movimento normale o inatteso di qualsiasi parte della cella robotizzata o dell'end effector	Operatore all'interno della cella per controllare o correggere un errore con nastro trasportatore in funzionamento.	Pizzicamento delle mani	1	4	1	1		Non considerate	/	/	/	/	/	/	
		Operatore all'interno della cella per controllare o correggere un errore con pistoni in funzione.														
	Rotazione lungo un asse	Operatore nella cella e parte del robot che ruota lungo il proprio asse a causa di un guasto	Rischio di urto con l'operatore o intrappolamento di un braccio o di una mano tra due parti del robot	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Caduta o eiezione di prodotti o materiali	Operatore nella cella per raddrizzare un contenitore caduto sul nastro.	Un contenitore potrebbe cadere dal nastro in prossimità dei pistoni che cadenzano i prodotti	1	4	1	1		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Impigliamento di capelli lunghi o di vestiti sciolti	Operatore nella cella, o in prossimità con parti in movimento	Rischio impigliamento capelli lunghi o vestiti sciolti con conseguenti strappi/ lesioni	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Movimento involontario di macchina/e	Operatore all'interno della cella con nastro in funzione	Pizzicamento o urti agli arti superiori	1	4	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/		

Capitolo 4

	associata/e															
	Guasto della giunzione dell' <i>end effector</i>	Operatore nella cella e per un guasto nella giunzione cadono componenti o prodotti dall' <i>end effector</i>	I componenti potrebbero urtare l'operatore	1	4	1	5		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Schiacciamento tra <i>end effector</i> e un oggetto fisso	Operatore che effettua regolazioni nell'area di lavoro dell' <i>end effector</i> che per un motivo si abbassa	Pizzicamento o schiacciamento delle mani	1	4	1	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Comando di arresto che ferma il robot nel mezzo di un ciclo che rimane incompleto	Operatore che entra nella cella per intervenire su un'anomalia del ciclo di lavoro	Contenitori che potrebbero cadere sulle mani dell'operatore se questo sta lavorando entro la zona di spostamento dei prodotti	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Malfunzionamento dei comandi con conseguente rilascio dei freni del braccio robotico, che causa il movimento per inerzia di parti del robot	Operatore che effettua regolazioni in vicinanza del braccio, che se alimentato può muoversi se i freni sono rilasciati	Una parte del robot può muoversi	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
		Se uno o più freni dei giunti cedono a causa di guasto in assenza di alimentazione il braccio ricade sulla zona di lavoro	Eventuale urto con parti del corpo dell'operatore vicino al robot	2	4	2	3			/	/	/	/	/		
	Guasto di una macchina associata che non funziona come atteso	Difficoltà di scorrimento del nastro trasportatore, che potrebbe andare a scatti	Rischio di caduta prodotti dal nastro, che potrebbero finire sui piedi dell'operatore se	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		

Capitolo 4

			questo è in prossimità													
Parte che può cadere se non installata o fissata correttamente	L'end effector se non fissato adeguatamente potrebbe sganciarsi	Urto con arti superiori o inferiori di un operatore dentro la cella	2	4	1	3		Non considerate	/	/	/	/	/			
	Robot non ancorato adeguatamente che potrebbe staccarsi dal piedistallo	Urto con operatore nella cella	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/			
	Componenti del nastro che potrebbero cadere	Urto con operatore nella cella	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/			
Guasto del gripper a vuoto	Operatore nella cella, robot fermo con prodotti afferrati dal gripper che si guasta	Caduta prodotti	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/			
Guasto nella flangia o nel sistema di cambio end effector	Operatore nella cella, un guasto porta al distacco dell'end effector o di una sua parte	Caduta pezzi su operatore	2	4	1	3		Non considerate	/	/	/	/	/			
Pizzicamento o stritolamento	Regolazioni sul nastro trasportatore	Pizzicamento delle mani	1	4	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/			
	Regolazioni alla posizione dei pistoni che cadenzano i prodotti posti su guide mobili	Pizzicamento delle mani	1	4	2	1			/	/	/	/	/			
	Regolazione o intervento sul gripper	Pizzicamento delle mani	1	4	2	1			/	/	/	/	/			
Rottura fissaggio base robot	Operatore nella cella a robot fermo che potrebbe cadere se sbilanciato	Caduta robot e urto con operatore	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/			
Superfici spigolose	Tavola su cui sono incise le guide dei supporti dei pistoni presentano spigoli vivi	Rischio urto, abrasioni in caso di contatto violento	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/			

Capitolo 4

Pericoli legati a energia o fonti di energia ed elementi di trasmissione	Mancanza di energia	La mancanza di energia può portare anomalie al ciclo di lavoro che richiedono l'intervento dell'operatore per essere corrette	Rischio urto con parti della cella o del robot se parti che dovrebbero essere in movimento sono ferme e complicano le operazioni	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
		Rilascio contenitori dalle ventose del <i>gripper</i>	Caduta contenitori sui piedi dell'operatore	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Rilascio di energia accumulata	Operatore nella cella che effettua regolazioni e i pistoni a fine nastro scattano	Urto con le mani dell'operatore	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Rottura cavi di alimentazione o fissaggi	Operatore che esegue regolazioni nella cella ed è presente un conduttore nudo	Folgorazione	3	4	1	1		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Errori nei comandi di <i>input/output</i> o <i>input/output</i> scorretti	Errori nella programmazione dei movimenti del robot	Movimentazione nella direzione sbagliata, che cadono a terra rompendosi e spandendo il contenuto generano un rischio di scivolamento	1	4	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Perdita di comunicazione	Robot o altre parti in movimento della cella che non si fermano quando l'operatore accede	Urti o pizzicamenti con parti in movimento	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Guasto nel sistema del robot	Il robot non si ferma come previsto quando l'operatore è nella cella	Urto con l'operatore	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
		Il robot si muove		2	4	2	3			/	/	/	/	/		

Capitolo 4

		diversamente da quanto previsto dalle sue funzioni														
	Perdita di conduttività nei segnali di attivazione	Operatore entra nella cella che quindi dovrebbe arrestarsi, ma il segnale di stop non viene trasmesso	Contatto con parti in movimento	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Rottura dei sensori	Funzioni di sicurezza intrinseche del robot inaffidabili	Possibili contatti o urti	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
Pericoli legati a sistemi di protezione	Progettazione e uso scorretti di stop di protezione ed emergenza	In caso di ripristino dello stop di emergenza la cella si riavvia anche se l'operatore non ha dato tale comando e c'è personale all'interno della cella	Urti, pizzicamenti, abrasioni, stritolamenti	2	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
	Guasto di una protezione che non funziona come atteso	Fotocellula all'ingresso della cella che non funziona e quindi non avvia il segnale di arresto al robot	Rischio di caduta prodotti dal nastro, che potrebbero finire sui piedi dell'operatore se questo è in prossimità	1	4	2	3		Non considerate	/	/	/	/	/		
		Contatto tra parti in movimento e operatore	Pizzicamento, schiacciamento	2	4	2	1		Non considerate	/	/	/	/	/		

Tabella 4.6 Tabella di analisi con metodo ibrido della cella 2

Confrontando le tabelle si riscontra una sostanziale somiglianza dei livelli di rischio calcolati.

L'utilizzo del metodo ibrido, però, ha restituito più situazioni in cui il livello di rischio calcolato è tale da consigliare misure di riduzione o comunque di gestione del rischio residuo.

Questo può essere ricondotto alla diversa classificazione data alla frequenza nel metodo a ibrido, in cui le diverse classi di frequenza sono considerate in intervalli che vanno dall'ora all'anno, e ciò ha condotto ad attribuire un indice maggiore, facendo apparire più frequenti le esposizioni ai pericoli.

In un'ottica di collaborazione, interazioni settimanali con le celle robotizzate possono considerarsi come poco frequenti, e questa discrepanza è il motivo della leggera sovrastima ottenuta con il metodo a ibrido.

La considerazione del fattore umano, come previsto, non influisce direttamente nella definizione del livello di rischio, cioè a un indice HF elevato non corrisponde per forza un rischio elevato, così come un indice HF basso non corrisponde necessariamente a un rischio basso, e inoltre, non incide sulle differenze tra i livelli di rischio ottenuti con i due metodi, ma ha una ricaduta nell'elaborazione di misure di riduzione, che possono essere sia di natura tecnica che organizzativa, se necessarie a ridurre un rischio in cui il fattore umano ha un ruolo determinante.

Conclusioni

A chiusura del lavoro qui presentato vale la pena fare delle considerazioni sui risultati ottenuti rispetto agli obiettivi iniziali della tesi e per delineare quali potrebbero essere le possibili direzioni di uno sviluppo futuro.

Nella dilagante ed emergente realtà dell'Industria 4.0 si è cercato di approfondire dal punto di vista della sicurezza in termini di *safety* una delle tecnologie che caratterizzano questa evoluzione industriale, ovvero i robot collaborativi.

La nuova declinazione di quella che è l'interazione uomo-macchina con questi sistemi ha portato ad una semplice domanda di fondo: *“Quali sono i nuovi rischi per i lavoratori, e come possiamo valutarli?”*

Trattandosi di applicazioni relativamente recenti ci stiamo muovendo su un terreno per certi versi ancora inesplorato, infatti, la prima difficoltà incontrata è stata proprio quella di reperire materiale in letteratura e da fonti di settore per documentarsi a dovere su questo argomento.

La consultazione di articoli, *report* e *standard* di settore ha portato alla consapevolezza che attualmente non esistono metodi di analisi e valutazione dei rischi pensate per le applicazioni collaborative, che potrebbero essere utili, soprattutto se concepite per guidare nei vari passaggi lo studio, tenendo conto delle peculiarità dell'oggetto dell'analisi.

Con l'obiettivo di elaborare una metodologia di valutazione che fosse applicabile in ogni fase dello sviluppo di un'applicazione collaborativa, dal *design* iniziale per cui è sufficiente un'analisi sommaria, all'integrazione che necessita invece di un notevole grado di approfondimento, sono state consultate le tecniche di analisi del rischio più utilizzate per quanto riguarda la sicurezza macchine, e quelle che al momento vengono preferite per la valutazione dei rischi legati ai robot collaborativi.

La sintesi di questa fase di confronto e di studio è stata una tecnica di analisi strutturata, pensata per poter essere utilizzata nelle varie fasi di sviluppo di un'applicazione collaborativa e integrata con altri metodi di analisi esistenti per rafforzare e approfondire l'attribuzione di determinati indici.

Tra i diversi parametri che concorrono nella definizione del rischio, il più difficile da inquadrare in maniera oggettiva e da definire nella maniera più chiara possibile è stato il fattore umano.

Nonostante questa difficoltà si tratta di un elemento che non poteva essere ignorato alla luce del nuovo rapporto uomo-macchina proposto dalle applicazioni collaborative, che dunque in questo contesto, come in altri, riveste un ruolo fondamentale nella sicurezza.

Un metodo di analisi comunque che resta solo sulla carta e non viene testato sul campo non è di molta utilità, e così grazie ad un'azienda italiana che si è dimostrata interessata al lavoro portato avanti con questa tesi ha dato la propria disponibilità a mostrare le applicazioni collaborative presenti nella propria linea affinché si potesse applicare il metodo di analisi elaborato.

Nonostante si trattasse di sistemi con collaborazioni limitate, vi è stato un positivo riscontro nell'utilizzo del metodo.

La *checklist* è stata molto utile nella fase di sopralluogo, mentre i vari parametri e la differenziazione dell'analisi a seconda delle modalità di collaborazione teorizzata ha permesso di condurre uno studio considerando i fattori più adatti all'applicazione in esame.

Per giudicare i dati ottenuti sui livelli di rischio applicare il solo metodo non sarebbe bastato, così è stato fatto un confronto con i risultati ottenuti applicando il metodo a ibrido, dal momento che ha costituito il corpo centrale attorno al quale è stata sviluppata la tecnica presentata.

Non vi è stata una sostanziale differenza nei risultati ottenuti, il che porta a concludere che la metodologia di analisi presentata in questo elaborato sia stata impostata sui giusti binari.

Il fatto che i parametri di definizione del rischio siano stati elaborati nell'ottica delle applicazioni collaborative costituisce un vantaggio poiché permette di condurre un'analisi più precisa e approfondita rispetto ai metodi utilizzati per valutare il rischio macchine di sistemi più classici.

Questo lavoro di tesi non è comunque da considerarsi autoconclusivo, ma una base su cui continuare a lavorare per migliorare e rendere più efficiente e fruibile quanto fatto finora.

Vi sono diverse prospettive di futuri sviluppi, e una di queste riguarda l'ampliamento della *checklist* riguardo i pericoli associati alle applicazioni collaborative.

Un'altra strada è quella della redazione di una sorta di banca dati per alcuni dei parametri proposti in modo da supportare l'attribuzione degli indici più corretti nel caso di analisi dettagliate.

Un'altra opzione è quella di affiancare il metodo di analisi a software di simulazione virtuali, in modo da analizzare e progettare al meglio future installazioni e applicazioni che prevedono la collaborazione tra uomo e robot.

Un ultimo auspicio finale è che commissioni quali UNI, l'ISO, l'OSHA, BS e tutte le altre impegnate a elaborare e diffondere norme e rapporti aggiornati possano mettere a disposizione dei professionisti del settore metodi di analisi e valutazione sempre più precisi e mirati e che contestualmente gli organi di controllo come l'INAIL contribuiscano con la loro attività di presidio e regolamentazione alla diffusione di questi strumenti, in modo che siano noti e a disposizione di

quanti più attori possibili impegnati a rendere sicure le interazioni tra persone e macchine nel nuovo e crescente panorama delle applicazioni collaborative.

Bibliografia

- Robotiko;
- Hurolife;
- Robotics.org;
- Robot hall of fame;
- Universal Robots;
- Ambiente e lavoro, Approfondimento *robot e incidenti sul lavoro* di Renata Borgato, 2017
- Repertorio salute;
- Industria italiana;
- Direttiva 2006/42/CE;
- D.lgs. 81/08;
- UNI EN ISO 10218-1:2011 Robot e attrezzature per robot-Requisiti di sicurezza per robot industriali-Parte 1: Robot;
- UNI EN ISO 10218-2:2011 Robot e attrezzature per robot-Requisiti di sicurezza per robot industriali-Sistemi ed integrazione di robot
- ISO/TR 20218-1:2018 *Robotics- Safety design for industrial robot systems End-effectors*;
- ISO/TR 20218-2:201 *Robotics- Safety design for industrial robot systems manual load/unload station*;
- ISO/TS 15066:2016 *Robots and robotics devices- Collaborative robots*;
- ISO/TR 14121-2:2007 *Safety of machinery- Risk assessment- Pratical guidance and examples of methods*;
- IEC 31010:2019 *Risk management- risk assessment techniques*