POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi di fattibilità del prodotto finalizzata all'applicazione di Robot Collaborativi nel General Assembly in FCA

Relatore:
Prof. Paolo Chiabert
Tutor aziendale:
Mauro Tagliani

Candidato:
Alessio Giardinelli

A.A.2017-2018

Indice

Introduzione 5

1. Il Settore Automobilistico 7

1.1. Dall'Auto dell'élite alla produzione di massa 8

1.2. Il metodo Toyota 9

1.3. La crescita della competitività 11

1.4. Scenario attuale 12

1.4.1. Alcuni parametri di influenza 13

1.5. Concurrent Engineering 16

1.5.1. L'Informatica all'interno dell'azienda 20

1.5.2. Early Design e Virtual Simulation 22

1.5.3. Progettazione di prodotto 23

1.5.4. Virtual Simulations nell'Industria Automobilistica 24

1.6. Pianificazione Sviluppo Prodotto in FCA 26

1.6.1. Pre-Concept-Phase 26

1.6.2. Concept Definition 28

1.6.3. Strategic Definition 29

1.6.4. Target Definition 31

1.6.5. Technical Development 34

1.6.6. Tooling Development 38

1.6.7. Process Verification 39

1.6.8. Production Readiness 40

2. Virtual validation analysis nella fase di CAD Step Design 42

2.1. Le macro-fasi del Manufacturing 42

2.1.1. Stampaggio 42

2.1.2. Lastratura 43

2.1.3. Verniciatura 44

2.1.4. Montaggio 45

2.2. Advanced Manufacturing Engineering 46

2.2.1. Advanced Manufacturing Engineering Process 47
2.2.2. Advanced Manufacturing Engineering Product 48
2.3. Verifica installazione batteria Alfa Giulia 54
2.3.1. Impostazione della simulazione 56
2.3.2. Prima fase della simulazione 62
2.3.3. Seconda fase della simulazione 69
2.4. Considerazioni finali 77
3. I Robot Collaborativi 80
3.1. Industria 4.0 80
3.2. La robotica industriale e la nuova tecnologia 82
3.2.1. Collaborazione uomo-robot 85
3.3. La Sicurezza nelle applicazioni Robotiche 87
3.3.1. ISO 12100 90
3.3.2. ISO 13849 91
3.3.3. ISO 10218 93
3.3.4. ISO/TS 15066 96
3.4. I Cobot presenti sul mercato 105
3.5. Applicazioni collaborative 112
4. Progettazione e realizzazione di un'operazione collaborativa 118
4.1. Robot utilizzato 118
4.1.1. Gripper 120
4.1.2. Motori riduttori e sistemi di misura 121
4.2. Definizione delle configurazioni 125
4.2.1. Sistemi di riferimenti 125
4.2.2. Vincoli di sicurezza 127
4.3. Descrizione dell'operazione 131
4.4. Progettazione della traiettoria 134
4.5. Programmazione del robot 141
4.5.1. Funzione di ricerca dell'oggetto 141

4.5.2. Posizionamento all'interno del vano 144
4.5.3. Fissaggio della batteria 145
4.6. Dimostrazione reale 147
4.7. Valutazione del rischio 150
4.7.1. Motivazioni 151
4.7.2. Metodo per la riduzione del rischio 151
4.7.3. Descrizione della macchina e dei dispositivi 152
4.7.4. Criterio di valutazione e stima del rischio 153
4.7.5. Identificazione dei rischi 155
4.7.6. Rischio relativo agli oggetti manipolati 160
4.7.7. Classificazione dei rischi 160
Conclusioni 161
Bibliografia e Sitografia 165

Introduzione

Negli ultimi anni l'industria dell'automobile sta affrontando le conseguenze di un mercato sempre più globale. La crescita della concorrenza infatti ha portato ad una generale riduzione del time to market, del ciclo vita del prodotto e ad una maggior richiesta di diversificazione. Per poter soddisfare rapidamente le necessità mutevoli dei clienti, le case produttrici dunque, sono costrette ad investire costantemente nell'innovazione e nell'integrazione aziendale.

In quest'ottica il presente lavoro di tesi si inserisce nel contesto dell'Industria 4.0 ed è stato svolto grazie ad una collaborazione tra il Politecnico di Torino e FCA Italy SPA.

La prima parte della trattazione, riguarderà il processo di sviluppo del prodotto all'interno dell'azienda. In questo modo sarà possibile osservare l'importanza della fase di Virtual Validation (uno dei pilastri della quarta rivoluzione industriale) durante l'attività di sviluppo tecnico del veicolo.

L'ente Advanced Manufacturing Engineering Product infatti, essendo adibito a questo compito, lavora al fianco della funzione aziendale che si occupa della progettazione, garantendo la fattibilità del loro operato tramite valutazioni virtuali. Così facendo è possibile quindi anticipare le modifiche sul prodotto, concentrandole in un ambiente virtuale e riducendo i possibili costi futuri legati alle variazioni in fase di produzione.

Nello specifico l'attenzione verrà concentrata sull'attività di General Assembly sviluppando uno studio sulla risoluzione di una problematica reale relativa al montaggio della batteria di un Alfa Giulia in linea di produzione. Questo studio consentirà di acquisire una conoscenza approfondita dell'operazione creando gli spunti per un miglioramento dell'attività dal punto di vista dell'automazione, dell' ergonomia, della flessibilità della stazione di lavoro e di riduzione del tempo ciclo.

La seconda parte della tesi a tal proposito, sarà concentrata sull'implementazione di un altro punto chiave dello sviluppo dell'Industria 4.0: i Robot Collaborativi. La collaborazione tra uomo e macchina infatti è un tema di grande attualità in questi giorni. Molte aziende produttrici di robot stanno concentrando la loro attenzione sullo sviluppo di macchine human-friendly curando con maggior attenzione rispetto al passato, il peso dei componenti, le forme e i materiali utilizzati per il braccio robotico e i sensori tramite i quali esse si interfacciano con l'ambiente esterno. In questo modo anche al livello normativo si sono aperti nuovi orizzonti al punto da rendere possibile

l'operato di uomo e macchina nello stesso ambiente senza l'utilizzo di barriere metalliche.

In prima istanza dunque verrà sviluppato uno riepilogo sullo stato dell'arte di questa tecnologia e sulle normative vigenti per la regolamentazione delle relative applicazioni. In seguito verrà condotto uno studio sulla fattibilità dell'operazione relativa al montaggio della batteria visto in FCA, utilizzando il robot UR3 dell'Universal Robots di proprietà del Politecnico di Torino. Verranno mostrati dunque i punti chiave della progettazione dell'operazione considerando la programmazione del robot e l'allestimento del workspace. In questo modo sarà possibile evidenziare le problematiche relative all'implementazione di un'attività collaborativa, testando la capacità del robot di interagire con tutti i componenti dell'ambiente di lavoro definito. Per concludere poi, verrà mostrata un'analisi sulla valutazione del rischio e verranno messi in luce i vantaggi e limiti di questa applicazione robotica.

1. Il Settore Automobilistico

L'automobile è un bene di fondamentale importanza per l'uomo poiché gli ha consentito di ampliare la propria concezione del mondo plasmando la configurazione del nostro territorio. Al giorno d'oggi, nonostante sia il bene più costoso dopo la casa, tutte le famiglie dei paesi industrializzati (Nord America, Europa e Giappone) ne possiede almeno una. La domanda mondiale nell'industria automobilistica ha raggiunto recentemente le 94,1 milioni di unità, con una crescita di circa il 5% rispetto al 2015 e del 14,6% sul 2012.

Per mettere in evidenza la rilevanza di questo settore produttivo, basti pensare che nell'Unione europea essa garantisce lavoro a 3,3 milioni di addetti diretti e indiretti, il 10,9% degli occupati del settore manifatturiero.

Questo la dice lunga sull'incidenza dell'industria automobilistica sullo stato occupazionale dei lavoratori di un paese. Nessuna economia infatti si è affermata nel mercato moderno senza un settore automobilistico significativo.

Proprio per la sua rilevanza il prodotto "automobile" influenza inoltre le principali attività regolatrici dei governi: dalle leggi sulla sicurezza e sull'inquinamento agli accordi economici sul carburante e alle iniziative di riciclaggio.

Questo settore è stato l'epicentro di innovazioni tecnologiche e organizzative rivoluzionarie. Si tratta infatti di un campo molto vasto che fa coesistere diverse aree dell'ingegneria. Per quanto riguarda le metodologie produttive esso ha portato a due radicali mutazioni:

- all'inizio del secolo con la produzione di massa;
- negli anni 70 e 80 con la produzione snella.

In questa capitolo verranno ricostruiti i principali passaggi che hanno mutato il mercato del settore automobilistico fino a mettere in luce le dinamiche che lo influenzano al giorno d'oggi. [1][2]

1.1. Dall'Auto dell'élite alla produzione di massa[1]

I primi modelli di automobili, comparirono in Italia verso la fine del 1800. Queste venivano create grazie ad una conoscenza di base sull'ingegneria e alla manodopera artigianale. Le auto erano "fatte a mano" e quindi prodotte in un numero estremamente ridotto. Ne derivavano perciò costi di produzione estremamente considerando la quantità di beni fabbricati e il costo della manodopera. In questo modo le prime auto apparse nel mercato, erano praticamente dei "pezzi" unici e rappresentavano un bene accessibile economicamente solo ad una ristretta élite di persone. Fino al 1920 questo fu il periodo della produzione artigianale, caratterizzata da un costo finale del prodotto molto elevato e necessità di personale specializzato.

Nei primi anni del '900 però, iniziò a farsi strada all'estero una nuova teoria di organizzazione scientifica del lavoro volta all'abbattimento dei costi di produzione.

Frederick W. Taylor propose un nuovo metodo di organizzazione del lavoro facendo in modo che ogni operaio si occupasse di una determinata operazione, da svolgere sempre nello stesso modo e in un intervallo temporale prestabilito. Così facendo divenne possibile intervenire sulle specifiche operazioni per poterle migliorare e verificare sempre l'efficienza del ciclo produttivo abbassandone i costi.

L'applicazione poi da parte di Henry Ford della teoria di Taylor sull'organizzazione del lavoro, permise di creare il ciclo produttivo definito come catena di montaggio, che fu la principale innovazione nel campo industriale automobilistico.

La produzione di veicoli tramite catena di montaggio, permise di incrementare drasticamente la produzione rispetto al metodo artigianale, nel 1919 anche la Fiat lanciò sul mercato un modello prodotto in diverse decine di migliaia di pezzi. Era la 501 e fu la prima macchina italiana a far parte di questa nuova corrente produttiva, quella della diffusione di massa. In questo periodo che durò fino agli anni 80, l'automobile si trasformo in un mezzo di trasporto di uso comune e di grande affidabilità anche grazie a sistemi di produzione e di organizzazione del lavoro rinnovati. Il montaggio fu molto semplificato riducendo le tempistiche. In questo modo venne superata la necessità di manodopera specializzata ed iniziarono a crescere i volumi produttivi[4].

L'automobile stava diventando un oggetto di uso quotidiano, ed iniziava a farsi spazio il concetto di utilitaria.

[1] Riferimenti [3][4]

La catena di montaggio fu, quindi, la prima innovazione significativa nei processi produttivi e rimase all'interno dell'industria automobilistica per molto tempo, grazie all'innovazione tecnologica e ad una sempre maggiore automazione delle operazioni.

1.2. Il metodo Toyota

Tuttavia, la crisi petrolifera del 1979 dette un nuovo indirizzo all'organizzazione del lavoro. Da quel momento iniziò un'altra importante rivoluzione nel settore che influenzo notevolmente il modo di produrre le vetture. Questa fase si colloca tra la fine degli anni Settanta e i primi degli anni Ottanta. L'aumento del prezzo del petrolio costrinse le case produttrici a cambiare strategia di vendita, puntando sul frazionamento dell'offerta e su una generale limitazione dei volumi fabbricati per modello in contraddizione ai punti chiave della produzione di massa.

I mercati interni ormai erano in grado di assorbire poche migliaia di unità per ogni modello. Prese dunque piede una diversa organizzazione del lavoro, definita produzione snella, che seguiva la linea adottata dalla casa giapponese Toyota. I punti cardine di questa nuova filosofia furono diversi ed essi influenzano il settore produttivo automobilistico anche al giorno d'oggi. [4]

Esistono 5 principi-guida che delineano il modello teorico della produzione snella [5]:

1. definire il valore dal punto di vista del cliente;
2. identificare il flusso di valore cioè identificare l'insieme di azioni che portano a realizzare il prodotto o il servizio;
3. organizzare le attività per processi e non per funzioni, senza soste o interruzioni;
4. impostare le attività secondo la logica "pull" e non "push", ovvero realizzare un'attività solo quando il processo a valle lo richieda;
5. perseguire la perfezione tramite continui miglioramenti (fare kaizen, parola composta che significa KAI = cambiamento, miglioramento e ZEN= buono, migliore).

Un altro fattore fondamentale di questo modo di operare è la ricerca di riduzione al minimo degli sprechi agendo sui seguenti punti:

- eliminazione delle attività che non producono valore;
- riduzione spostamenti per raggiungere materiali lontano dal punto di utilizzo;
- limitare la produzione che genera scarti o rilavorazioni;

- evitare di acquistare o produrre materiali in eccesso rispetto al fabbisogno del processo successivo;
- ridurre sprechi di tempo in generale e momenti di non produttività;

Nella tabella 1.1 vengono riassunte le principali differenze tra la produzione di massa e la produzione snella.

Tabella 1.1 - Principali differenze tra la produzione snella e quella di massa.

Produzione Snella	**Produzione di Massa**
Produrre in funzione degli ordini	Produrre il più possibile
Efficienza	Efficacia
Produzione "pull"	Produzione "push"
Piccoli lotti	Grandi lotti
Attrezzaggi Rapidi	Attrezzaggi lenti e disorganizzati
Utilizzo Celle produttive	Linee di produzione
Macchinari dimensionati per la produzione	Macchinari ingombranti per grandi produzioni
Flessibilità al cambiamento	Rigidità al cambiamento
Conoscenze generalizzate	Conoscenze specifiche

I benefici sul mercato furono evidenti in termini di volumi produttivi: la produzione di automobili in Italia nel 1988 (1.884.000 auto) segnò un nuovo record, superando il picco del 1973 (1.823.000), rimasto ineguagliato per quindici anni.[4]

Questa nuova rivoluzione nel settore portò il mercato ad un punto di profonda e irreversibile mutazione in cui la domanda era diventata di difficile previsione e soggetta a cambiamenti veloci. Il nuovo concetto di produzione snella aveva fatto cambiare le condizioni per l'eccellenza competitiva; essa si basava sulla percezione dei bisogni espressi e nascosti dei clienti, sulla ricerca di nicchie non adeguatamente servite, su una maggior flessibilità della progettazione, maggior coordinazione dei flussi logistici e delle fasi di produzione ed assemblaggio.

Per il settore automobilistico era l'inizio di una nuova epoca, un punto di cambiamento radicale destinato ad influenzare le dinamiche future. Nell'età moderna infatti la maggior parte dei possibili acquirenti, possiede già un'autovettura; gli automobilisti dunque ricercano un prodotto dando sempre più peso all'estetica, alle dotazioni di bordo, alle

prestazioni e alle emissioni. Le aziende hanno mutato di conseguenza il loro modo di operare, inizialmente orientato al prodotto ed ora concentrato fondamentalmente sul consumatore.

1.3. La crescita della competitività

Oltre alla mutata esigenza dei clienti, un altro fondamentale aspetto, che negli ultimi anni ha influenzato e governato le dinamiche dell'industria automobilistica, è la globalizzazione.

Nel 1950, oltre il 75% della produzione di auto era realizzata negli Stati Uniti. Nei vent'anni successivi entrò in gioco l'Europa occidentale: la produzione mondiale triplicò e nel 1970 il Vecchio continente giunse a produrre il 45% circa del totale, mentre la produzione Usa si stabilizzò in valore e arrivò a coprire una quota inferiore al 30%. Fu poi la volta del Giappone, che nel 1980 raggiunse quota 28%, contro il 40% dell'Europa occidentale e il 21% degli Stati Uniti. La Triade pesava dunque per quasi il 90%, ma negli ultimi 30-40 anni, la produzione di auto è raddoppiata e si sta assistendo ad un cambiamento profondo che modifica la mappa degli stabilimenti produttivi dell'industria dell'automobile a favore di nuove potenze emergenti. La BRIC (Brasile, Russia, India e Cina) e il resto del mondo occupano ormai più del 50% della produzione mondiale di auto (Figura 1.1). [2]

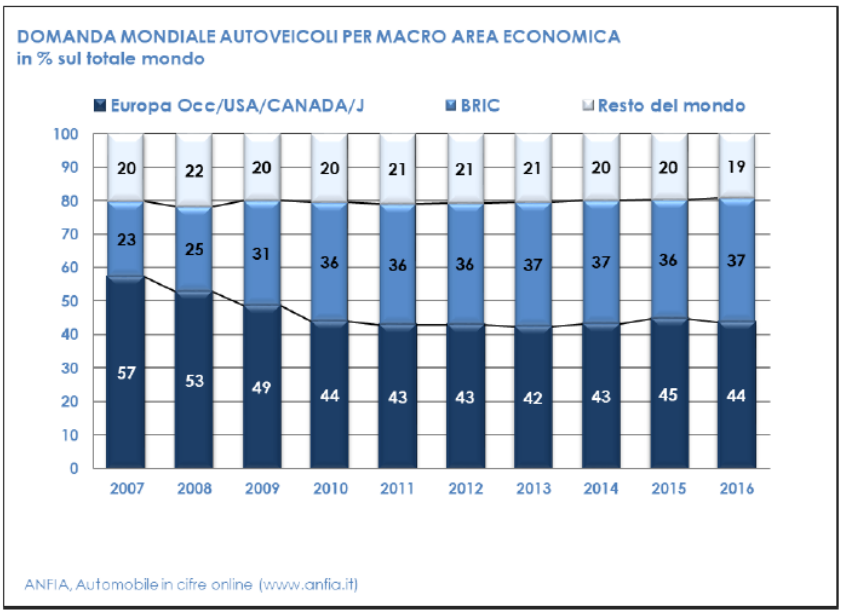


Figura 1.1 - Domanda mondiale per macro aree economiche.

Siamo dunque in presenza di una competizione che si sviluppa in modo complesso e imprevedibile rendendo il mercato allargato, integrato e vittima delle scelte di attori come azionisti, centri finanziari, imprese, lavoratori e Stati tra loro spesso in sovrapposizione di ruoli.

1.4. Scenario attuale

Gli elementi fondamentali delle strategie competitive industriali odierne sono fattori come la ricerca della qualità, il rispetto delle normative per l'ambiente, il grado di differenziazione del prodotto garantendo anche la loro personalizzazione e i servizi ad esso collegati.

Con queste condizioni, le uniche variabili in grado di fornire un qualcosa in più su cui costruire un vantaggio competitivo sono due: la capacità di generare continua innovazione e la velocità con cui essa viene realizzata.

L'innovazione è sempre stata un aspetto molto critico legato alla difficoltà di creare nuovi prodotti all'avanguardia e capaci di soddisfare i bisogni mutevoli del cliente. La globalizzazione negli ultimi anni inoltre, ha reso la velocità con cui affrontarla, un fattore fondamentale, la cui importanza viene accentuata dalla. La lotta contro la concorrenza

diventa allora come una gara in cui i partecipanti sono rappresentati dalle varie aziende del settore e il traguardo è raffigurato dal cliente.

Mai come prima infatti, il vantaggio competitivo, garantisce a chi riesce ad aggiudicarselo, un controllo così grande del mercato. Continuando in metafora, certamente la gara si vince sull'intera durata del percorso, superando bene ogni ostacolo, ma l'esperienza olimpica insegna che il giusto scatto in partenza ipoteca notevolmente la vincita. In termini industriali, ciò significa che la velocità è fattore di competizione dell'intera catena del valore aziendale, dalla produzione, alla logistica, ma anche, a maggior ragione, delle fasi iniziali di ricerca e sviluppo, progettazione e industrializzazione. [6]

Il processo di sviluppo e innovazione quindi, deve essere efficace ed efficiente per creare un prodotto che possa arrivare nel momento giusto e senza errori.

1.4.1. Alcuni parametri di influenza[2]

In questo scenario le aziende hanno dovuto adottare delle strategie vincenti che le rendessero flessibili e reattive in grado di stare al passo con un mercato mutevole e affollato.

Le principali conseguenze dello sviluppo del mercato sono state:

- riduzione del time to market;
- aumento del numero di varianti e della complessità;
- riduzione del ciclo vita del prodotto;
- Riduzione dei tempi di consegna.

Di seguito verranno descritti alcuni aspetti fondamentali che influenzano il ruolo di leadership di un'azienda.

In quest'ottica, *l'innovazione tecnologica* risulta essere la chiave di lettura; essa rappresenta lo strumento principale delle aziende per rispondere con successo alla richiesta di varietà dei consumatori, contrastando la crescente concorrenza globale e differenziando la propria offerta. Per le imprese infatti, l'innovazione è fondamentale per acquisire una posizione di leadership nel mercato oppure per recuperare lo svantaggio competitivo.

[2] Riferimento [7]

L'innovazione può essere di due tipi:

- di prodotto e in questo caso produce più facilmente un vantaggio competitivo esterno ed è incorporata nei beni e nei servizi realizzati;
- di processo quando i cambiamenti riguardano le modalità con le quali l'azienda svolge le sue attività. Il miglioramento in questo caso è legato all'efficacia e all'efficienza dei sistemi produttivi.

Nel mercato dell'automobile però, non è sufficiente garantire l'innovazione; il tempo con il quale un prodotto raggiunge l'obsolescenza tecnologia si è ridotto notevolmente.

In questi termini è molto importante il concetto di *ciclo vita* del prodotto. Esso può essere inteso in diversi modi:

- classe di prodotti, quando ci si riferisce ad una categoria di auto senza distinguere tra imprese produttrici o versioni diverse dell'offerta (intera categoria delle automobili);
- il form del prodotto, fa riferimento ad una particolare tipologia (sportiva o familiare ad esempio);
- brand, offerta specifica di una particolare azienda per quanto riguarda un modello (ad esempio la Grande Punto).

La riduzione del ciclo vita è dunque il motivo per il quale l'innovazione non basta ad assicurarsi un vantaggio sulla concorrenza. I consumatori infatti, richiedono sempre di più un equilibrio complessivo tra le diverse caratteristiche degli oggetti.

Pertanto, in queste condizioni, diventa fondamentale anche l'integrità del prodotto. Si definisce

- integrità interna la caratteristica che rende coerenti funzione e struttura, cioè monitora che le parti si adattino bene l'una con l'altra;
- integrità esterna, cioè nella misura con cui le funzioni e la struttura del prodotto soddisfano gli obiettivi, i valori, lo stile e il senso d'identità dei clienti. In questo caso l'integrità è correlata al rapporto tra produttore e cliente.

Al giorno d'oggi il rispetto di questi canoni diventa sempre più complesso. Le aziende nel settore automobilistico, introducendo sempre più modelli e versioni e risentono di più della difficoltà di gestire l'equilibrio tra innovazione e integrazione.

Come è stato specificato in precedenza, risulta essere fondamentale, inoltre, attrarre il cliente e soddisfarlo. Durante il processo di sviluppo del prodotto, per fare questo, si deve tener conto di tre parametri:

- *qualità del prodotto*, un parametro che può essere valutato tramite il grado di soddisfazione del cliente ed ha degli attributi oggettivi (consumi, velocità, accelerazione) e soggettivi (styling);
- *time to market*, tiene conto della rapidità con la quale le case produttrici di automobili riescono a passare dalla definizione di un concetto (dall'idea) al lancio sul mercato. Esso dipende sia dal livello di tecnologia presente nell'azienda sia dalle condizioni del mercato. Rinnovare il proprio prodotto in maniera più reattiva genera un vantaggio rispetto ai concorrenti. Nel campo dell'automobile in passato, il time to market, superava i 2-3 anni. Oggi, per via della turbolenza del mercato, si è arrivati a tempi che stanno anche sotto i 2 anni;
- *produttività*, indica il livello di risorse richiesto per arrivare alla commercializzazione del prodotto. Questo valore ha un riscontro diretto sul costo di produzione unitario e quindi sul numero di pezzi producibili in base alle risorse.

Con l'obiettivo di ridurre i tempi di sviluppo del prodotto e quindi il time to market risultano di fondamentale importanza le pratiche di esternalizzazione e standardizzazione.

Un tempo le aziende automobilistiche progettavano i veicoli in maniera quasi totalmente integrata. Solitamente le attività che venivano decentrate sui fornitori riguardavano solo la produzione di alcune parti che venivano poi depositate nelle linee di assemblaggio negli stabilimenti. Il loro compito era solo quello di produrre i pezzi con precisione e nel rispetto delle tempistiche concordate con il cliente.

Visti i nuovi scenari di mercato e la necessità di produrre in maniera frenetica, le case automobilistiche si sono viste costrette a riconsiderare il loro rapporto con i fornitori. Per affrontare il ritmo accelerato dell'innovazione, la riduzione del ciclo di vita del prodotto e per ridurre i costi di produzione, le aziende sono ricorse all'*esternalizzazione*. I fornitori in questo modo vengono coinvolti anche nella fase di progettazione e sviluppo prodotto diventando "partner" e contribuendo anche nella messa a punto del business. Le potenzialità di altre ditte esterne vengono integrate totalmente all'interno della ditta principale mettendo al primo posto il cliente.

Un altro fenomeno molto importante che ha influenzato il modo di produrre un veicolo è la *standardizzazione*; essa consiste nella possibilità di diversificare il prodotto favorendo però l'economia di scala. Utilizzare parti comuni permette di distribuire i costi fissi, di ricerca e sviluppo e produttivi, su diversi modelli. Un altro vantaggio di questa filosofia sta nel fatto che sviluppare nuove vetture utilizzando parti già collaudate sul campo, permette di risparmiare e di proporre con maggior frequenza miglioramenti. Per fare questo è necessario che l'azienda abbia una perfetta conoscenza architetturale del prodotto e dei processi ad esso collegati. Avere degli standard infatti, consente di risparmiare anche sulle attrezzature e sulla definizione dei processi produttivi.

1.5. Concurrent Engineering[3]

L'obiettivo principale delle case automobilistiche nello scenario odierno è quello di ridurre al minimo l'intervallo temporale che intercorre tra la definizione del concetto di un nuovo prodotto e il lancio del veicolo sul mercato.

Per questo le aziende del settore si sono viste costrette a modificare il proprio modo di agire negli anni. A tal proposito vedremo di seguito cosa si intende per ingegneria simultanea o Concurrent Engineering e come l'informatica funga da supporto in una politica di organizzazione dei compiti che si pone l'obiettivo di creare un'azienda estesa e maggiormente efficiente.

Un aspetto fondamentale nel raggiungimento dei canoni di ottima qualità, ridotto Lead Time e elevata produttività è la gestione aziendale dello sviluppo del prodotto.

Nell'organizzazione tradizionale del lavoro all'interno dell'azienda ogni reparto ed ente lavorava per conto proprio. Non esisteva una comunicazione diretta tra le parti, sia perché esse lavoravano fisicamente separate, sia perché la concezione dello sviluppo del prodotto prevedeva che si progredisse in maniera sequenziale. Questo approccio creava un rapporto di sudditanza della produzione rispetto alla progettazione. Il progettista "ordinava" ciò che doveva essere fatto senza preoccuparsi troppo dell'effettiva fattibilità delle operazioni dal punto di vista produttivo (figura 1.2).

[3] Riferimenti [8][9]

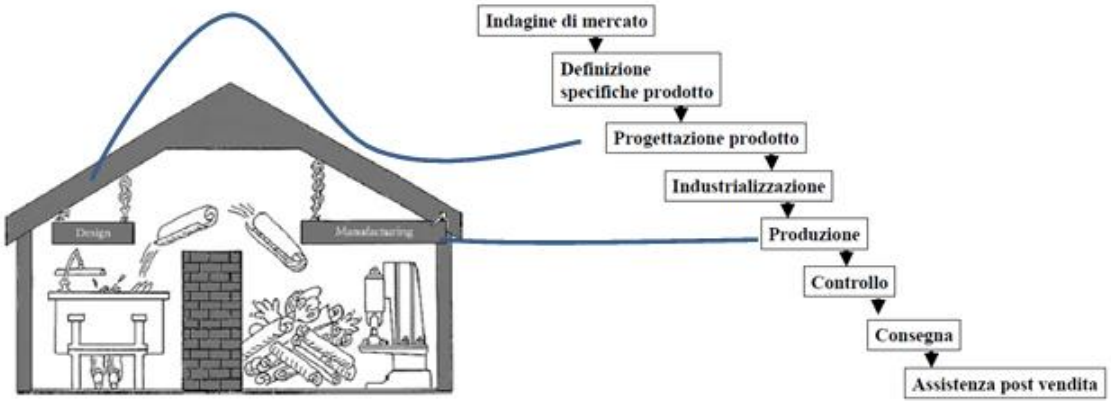


Figura 1.2 - Schema rappresentativo della logica relativa all'ingegneria sequenziale.

Come si evince dallo schema non erano previste retroazioni tra le varie funzioni aziendali e gli eventuali errori del progettista venivano individuati solo nelle fasi di produzione e collaudo, determinando costi elevati per la correzione.

Questo modo di operare comportava diverse difficoltà come l'individuazione degli errori e delle responsabilità, la definizione degli standard software ed hardware comuni alle varie funzioni aziendali, la gestione rapida delle modifiche richieste dai clienti e comportava inoltre relazioni interne difficili.

È evidente che un approccio di questo tipi non poteva più funzionare in un'azienda che opera nel libero mercato ed è soggetta alle leggi della concorrenza che comportano cicli di vita del prodotto sempre più ridotti.

Va tenuto in conto inoltre di come la fase di progettazione influenzi il costo finale del prodotto. Nel grafico qualitativo in figura (basato su dati empirici) si evince che nonostante i costi della progettazione siano ridotti, questa fase ha un'importanza enorme. Un progetto non adeguato potrebbe avere riscontri negativi in fase di produzione. Le parti progettate infatti, oltre a rispettare dei requisiti ingegneristici, devono essere fattibili dal punto di vista della produzione e del montaggio. Per questo, come mostrato in figura 1.3, la fase progettuale ha un'influenza del 70% ed un errore in quest'ambito si ripercuoterebbe direttamente sul prodotto e genererebbe costi non preventivati.

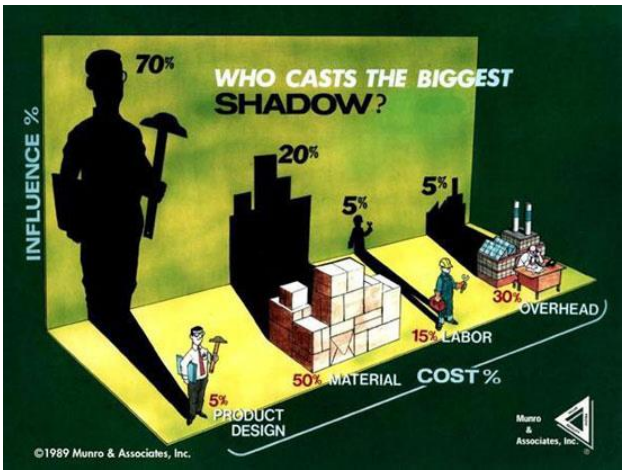


Figura 1.3 – Raffigurazione dei componenti principali del progetto con la loro influenza sul prodotto finale.

Occorre quindi tener presente sin dalle prime fasi dello sviluppo del progetto di tutti gli aspetti che intervengono nel ciclo di vita del prodotto quali la producibilità, il montaggio, l'affidabilità, i costi, e le aspettative dell'utente.

L'obiettivo viene raggiunto rendendo parallele alcune fasi del ciclo di sviluppo del prodotto e del relativo processo produttivo: la definizione delle specifiche del prodotto, il progetto del prodotto e l'industrializzazione.

Come si può vedere in figura 1.4 queste tre fasi vengono sviluppate da un gruppo di lavoro composto da persone che provengono dai diversi enti dell'azienda.

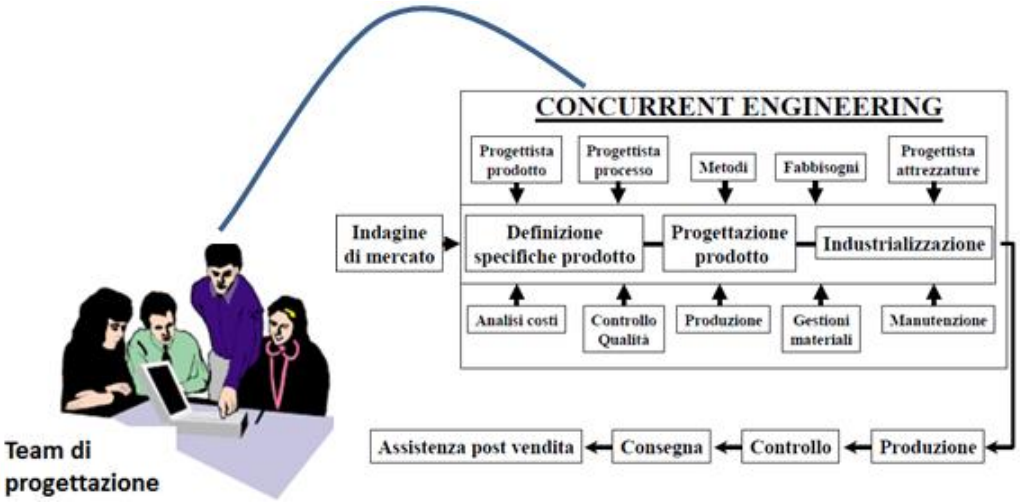


Figura 1.4 - Schema rappresentativo della logica relativa all'ingegneria simultanea.

È necessario dunque un continuo scambio di informazioni bidirezionali che consenta alle funzioni a valle di proporre immediatamente eventuali variazioni riguardo alle scelte progettuali senza dover incorrere in modifiche durante l'avvio della produzione.

Per fare questo è necessario un grosso rinnovamento aziendale che deve prevedere:

- Modifiche della struttura organizzativa. Occorre passare dalla tradizionale gestione del progetto secondo la suddivisione per funzioni ad una in cui il progetto viene sviluppato da un team inter-funzionale guidato da un responsabile a tempo pieno. Con una interazione diretta e immediata tra progettisti e uomini di produzione si evitano continui rimbalzi di comunicazioni tra le varie funzioni, con gravi perdite di tempo e si facilita la scelta di soluzioni ottimali riguardanti il costo e la qualità del prodotto;
- Impiego di adeguate tecniche e metodologie di progettazione del prodotto e del processo implementate su calcolatori di supporto.

L'attuazione di questo tipo di politica consentirebbe di anticipare i tempi di sviluppo ed ottenere anche un ritorno dell'investimento anticipato (figura 1.5). [8]

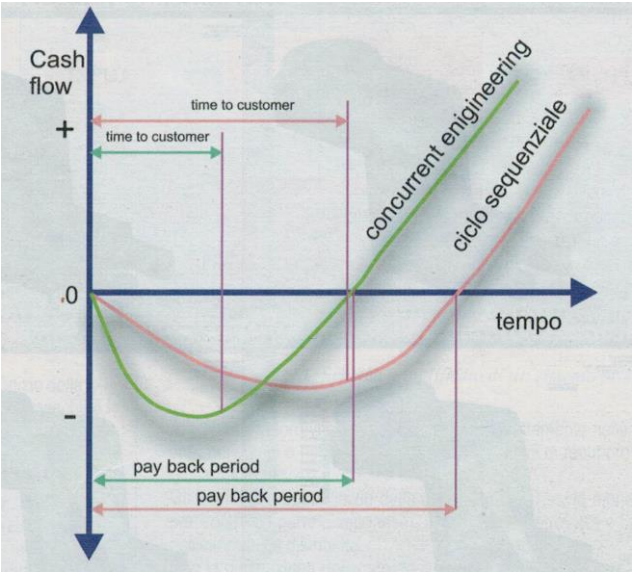


Figura 1.5 – Nel grafico è possibile notare i vantaggi dell'applicazione della filosofia Concurrent Engineering.[9]

1.5.1. L'Informatica all'interno dell'azienda

L'avvento dell'informatica distribuita si registra intorno agli anni 70 quando inziò a diminuire il costo degli elaboratori. Il computer fece cosi il suo ingresso nei reparti produttivi delle aziende per poi estendersi alle varie funzioni aziendali come il marketing, la finanza, il personale. I primi risultati in questo senso si videro nel settore amministrativo e nella fase di programmazione della produzione con i sistemi MRP (Material Requirement Planning) che consentivano di determinare il fabbisogni necessari alla definizione del programma produttivo del prodotto finito.

Tra il 1960-1970 inoltre, il controllo manuale di alcune macchine fu sostituito dal controllo numerico e poi dalle più potenti macchine CNC (Computerized Numerical Control) come forma di automazione programmabile.

Negli stessi anni si passo dalla tavolo da disegno alla progettazione tramite sistemi CAD ed iniziarono ad essere sviluppati anche i primi sistemi CAE (Computer Aided Engineering) di analisi e ottimizzazione progettuale per le simulazioni virtuali delle caratteristiche funzionali dei prodotto. Si inizio dunque a parlare di produzione assistita dal calcolatore CAM (Computer Aided Manufacturing), il computer veniva utilizzato per la pianificazione dei processi produttivi, il controllo delle operazioni, la verifica e la gestione dei prodotti finiti negli stabilimenti. Con l'acronimo CIM (Computer Integrated Manufacuring) ci si riferiva ad un modello che era riuscito ad integrare per la prima volta tutte le risorse di una fabbrica in un quadro unico di riferimento.

Tutte le attività aziendali di sviluppo prodotto però, erano ancora organizzate in maniera sequenziale e questo non consentiva alle aziende di sfruttare a pieno le potenzialità della tecnologia emergente.

Intorno agli anni inizio 80 infatti, nacque la necessità di condividere i disegni CAD da parte dei progettisti con diversi enti aziendali per velocizzare il loro operato. Vennero sviluppati per questo dei network che permettevano ad numero esiguo di persone di condividere il proprio lavoro. Questi software presero il nome di PDM (Product Data Manager) e si svilupparono in concomitanza con i sistemi di gestione della documentazione tecnica EDM (Engineering Data Management).

Fu in questo periodo che si iniziò a parlare di Concurrent Engineering. Come è stato spiegato nel precedente paragrafo, l'obiettivo di questa nuova corrente di pensiero, era quello di arrivare ad una collaborazione tra i diversi livelli aziendali e ad una condivisione delle informazione e delle conoscenze per ridurre il time to market.

L'espansione dei mercati e l'affermarsi dell'era della globalizzazione inoltre, spinsero le grandi imprese ad adottare nuove politiche di gestione, a delegare la produzione all'estero per ridurre i costi e a condividere il proprio Business (e quindi anche i rischi ad esso collegati) con sempre più enti esterni. Ne derivò quindi la necessità sempre più stringente di utilizzare sistemi SCM (Supply Chain Management) per la gestione dell'intera filiera del prodotto.

Per questi motivi dagli anni 90 iniziò una fase di potenziamento dei sistemi PDM, inizialmente focalizzati solo nel supporto dei rilasci CAD e trasformato poi in uno strumento di gestione dei dati ingegneristici di prodotto ma anche di informazioni su livelli superiori di visibilità, garantendo quindi una visione più ampia dello scenario aziendale. L'idea di fondo era quella di avere un mezzo che consentisse di creare un ambiente omogeneo e integrato, per seguire l'intero ciclo di sviluppo del prodotto e organizzare le informazioni necessarie a definire, produrre e mantenere un prodotto industriale nell'arco del suo ciclo vita.

Nell'era moderna la riduzione del ciclo vita del prodotto, la necessità di ridurre il time to market, la crescita degli standard qualitativi e della diversificazione dei prodotti hanno portato alla nascita di applicativi Product Lifecycle Management PLM. Si tratta di soluzioni che integrano diverse attività aziendali come CAD, CAM, CAE, organizzazione dati di prodotto PDM, gestione amministrativa ERP (Enterprise Resource Planning), sistemi di visualizzazione, gestione della documentazione, rapporti con i fornitori, controllo qualità e persino rapporti con il cliente.

I sistemi PLM sono il mezzo tramite il quale si realizza nella sua essenza il concetto di progettazione concorrente e sviluppo sinergico del prodotto.

Alcuni considerano questi applicativi come un'evoluzione dei PDM altri invece sostengono che non ci sia distinzione. Ci sono 4 concetti fondamentali che chiariscono l'utilità di un sistema PLM all'interno di un azienda:

- Accesso universale, sicuro alle informazioni di definzione del prodotto;
- Mantenimento dell'integrità di quella definizione di prodotto e di tutte le informazioni per l'intero ciclo di vita;
- Gestione e mantenimento dei processi utilizzati per immagazzinare le conoscenze possedute dall'azienda;
- Garanzia di strumenti efficaci per la collaborazione dei diversi attori coinvolti nel ciclo vita del prodotto.

  [9]

1.5.2. Early Design e Virtual Simulation

Per ridurre al minimo i tempi di sviluppo di un prodotto è necessario inoltre adottare dei metodi che consentano di anticipare temporalmente le richieste di modifiche al progetto. I costi per eventuali variazioni infatti crescono man mano che ci si avvicina alla scadenza del progetto (figura 1.6).

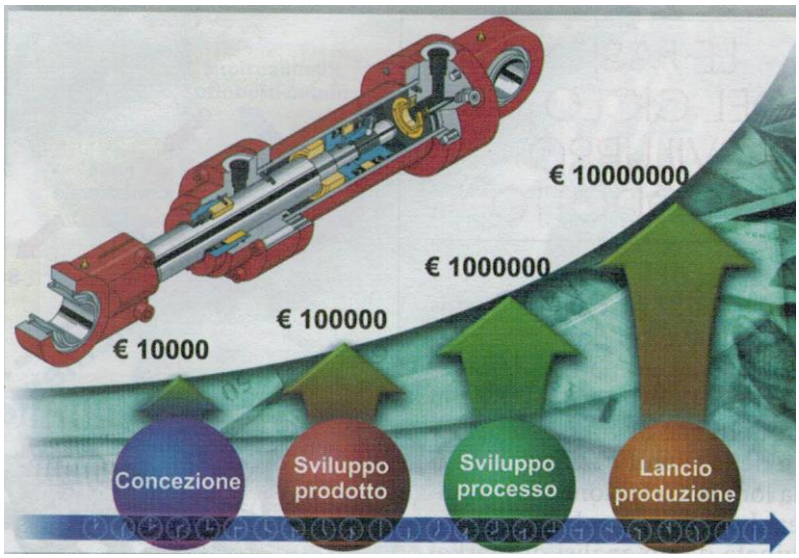


Figura 1.6 – Andamento dei costi legati al progetto durante lo sviluppo del prodotto.[9]

Per questo motivo le imprese automobilistiche adottano una metodologia di Early Design o Progettazione Anticipata. Questa filosofia consiste nel portare avanti il progetto concentrando la maggior parte delle modifiche nelle fasi iniziali in cui si lavora soprattutto con modelli virtuali. La progettazione anticipata però, deve essere supportata da adeguati strumenti software e hardware.

Come è possibile notare dagli andamenti in figura 1.7, l'impatto delle scelte progettuali ha un effetto maggiore nelle prime fasi della pianificazione, specialmente in quella di ideazione. Di contro però, negli anni passati, gli strumenti a disposizione dei progettisti erano molto limitati in questo step. Lo sviluppo tecnologico negli anni ha cercato di invertire questa tendenza.

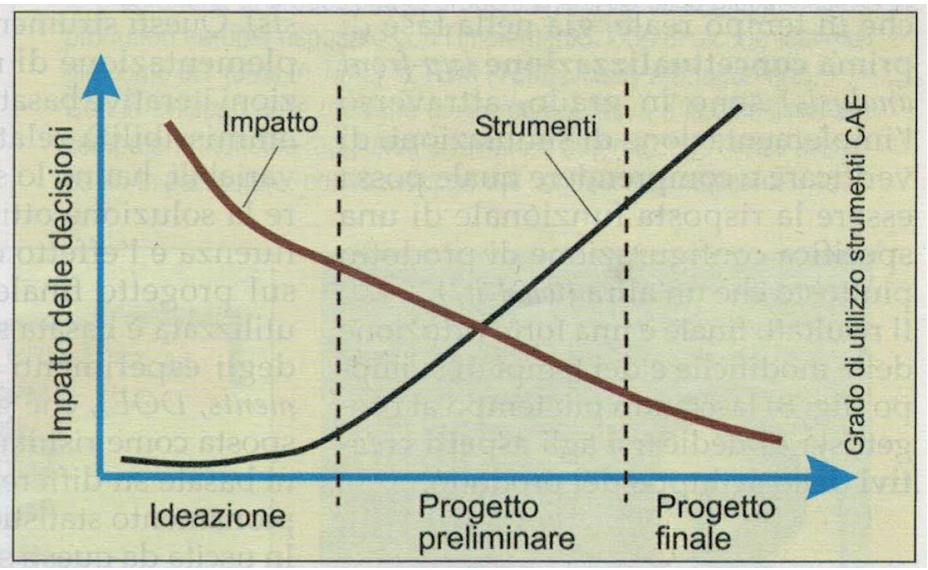


Figura 1.7 – Andamento dei costi legati al progetto durante lo sviluppo del prodotto.[9]

1.5.3. Progettazione di prodotto

Dal punto di vista della progettazione del prodotto l'evoluzione tecnologica ha consentito di anticipare l'utilizzo di strumenti più sofisticati nelle fasi iniziali del progetto. In passato infatti, la fase di ingegnerizzazione era molto lenta; i progettisti sviluppavano i modelli tridimensionali e gli assemblati e li fornivano ad un gruppo di analisti che importavano le geometrie nei sistemi CAE ed effettuavano le analisi agli elementi finiti. La scelta del tipo di elemento, della mesh, le condizioni al contorno e l'interpretazione dei risultati però, richiedeva così tanto tempo che spesso era possibile effettuare delle verifiche solo sui pezzi più critici. In questo modo venivano rilasciati dei modelli finali non precisi, spesso sovradimensionati e lontani dall'obiettivo ottimale.

La soluzione a questi problemi è stata trovata grazie alla nascita di particolari software CAE che consentono un'associazione bidirezionale tra modello CAD parametrico e risultati della simulazione. In questo modo i progettisti hanno a disposizione uno strumento che già dalla fase di concettualizzazione gli consente di valutare, tramite simulazioni e verifiche, le risposte funzionali di diverse soluzioni e configurazioni di prodotto.

Gli strumenti più sofisticati consentono inoltre di gestire un elevato numero di variabili ed esigenze ingegneristiche concorrenti. I componenti di un autoveicolo infatti, devono rispettare diversi canoni ingegneristici come leggerezza per il risparmio sul carburante,

frequenze di risonanza ridotte e resistenza sufficiente a rispettare i canoni delle prove di impatto. Numerose simulazioni iterative, rispettando i vincoli imposti, consentono di identificare l'effetto di ogni parametro sulla soluzione finale e suggeriscono le soluzioni ottimali. Questa metodologia viene definita DOE (Design of Experiments). [9]

1.5.4. Virtual Simulations nell'Industria Automobilistica

In relazione alla riduzione e anticipazione del numero di modifiche sul modello in via di sviluppo, le simulazioni effettuate grazie alla realtà virtuale ricoprono un ruolo fondamentale. Avere la possibilità di visualizzare in 3D il veicolo e di effettuare dei test su prototipi virtuali consente di risolvere anticipatamente i problemi che potrebbero manifestarsi in fase di produzione o utilizzo del prodotto.

La realtà virtuale (VR) può essere definita come una classe di tecnologie di comunicazione multisensoriale controllate dal computer che consentono interazioni più intuitive con i dati e un coinvolgimento particolari dei sensi. Questa tecnologia consente agli utenti di sentirsi partecipi dell'ambiente virtuale generato. La visualizzazione e la gestione delle informazioni presenti nei modelli avviene in maniera dinamica ed immediata rendendo questi sistemi adatti alla creazione e alla risoluzione di problemi che possono scaturire. La VR è potenzialmente uno strumento per l'apprendimento tramite l'esperienza anticipata. Il mondo virtuale è interattivo; risponde alle azioni dell'utente. La realtà virtuale genera una sensazione di immersione, un senso percettivo e psicologico dell'essere nell'ambiente digitale presentato ai sensi. Il senso di presenza o immersione è una caratteristica critica che distingue la realtà virtuale da altri tipi di applicazioni informatiche. La visualizzazione scientifica degli ambienti attraverso la rappresentazione grafica di dati complessi, contribuisce a rendere più semplice per l'utente la percezione dei dettagli. La parola "visualizzazione" però è troppo ristretta quando si considera la realtà virtuale. La percezione della realtà infatti, nei sistemi più avanzati, viene creata sfruttando tutti i sensi: la vista, l'udito, il tatto e l'olfatto. [10]

Le simulazioni riguardano diversi aspetti della processo di sviluppo prodotto. Verranno illustrati di seguito i più significativi:

- la fase di *progettazione del prodotto*, in cui la realtà virtuale ha un ruolo fondamentale. In quest'ambito infatti essa garantisce la gestione di un enorme carico di dati e la visualizzazione del progetto dal punto di vista della compatibilità tra elementi, la valutazione delle strutture utilizzate e della fattibilità di montaggio;

- l'*Analisi dei Prototipi Virtuali* che è una sotto-sezione della Progettazione dove i prototipi virtuali vengono utilizzati per sostituire i modelli fisici. Grazie all'innovazione dal punto di vista software e hardware, con la realtà virtuale è possibile riprodurre modelli fisici con grande precisione. Inoltre, l'utilizzo di Prototipi Virtuali per la validazione del progetto può ridurre i cosiddetti "colli di bottiglia" che si manifestano per via degli errori compiuti nelle prime fasi dello sviluppo di un componente e causano un aumento dei costi per le revisioni portando alla necessità di modifiche sui modelli fisici. Con questo tipo di tecnologia invece, le modifiche possono essere effettuate in tempo reale durante la progettazione;
- la fase di *Progettazione dei Processi Produttivi* consiste nell'applicazione della realtà virtuale alla produzione. Grazie a questa pratica chiamata Virtual Manufacturing (VM) o Digital Manufacturing (DM), è possibile simulare e validare il flusso dei processi produttivi che avvengono con l'ausilio di robot, operatori umani e altre macchine. I vantaggi della VM vanno dall'ottimizzazione dei processi dal punto di vista dei tempi, della gestione dei magazzini e del personale fino alla riduzione dei costi;
- la fase di *Virtual Assembly* strettamente collegata al VM, consente l'assemblaggio e il disassemblaggio di oggetti virtuali. Il VA consente di effettuare le valutazioni ergonomiche per il rispetto delle norme vigenti sulla tutela del lavoratore per quanto riguarda sicurezza e salute grazie alla possibilità di creare rappresentazioni virtuali dei luoghi di lavoro**.** In questo modo si ha un enorme vantaggio dal punto di vista della progettazione dell'attività e dell'implementazione di nuovi strumenti per migliorare la qualità del lavoro e ridurre il time-to-market.
- l'*attività di formazione* grazie all'ausilio della realtà virtuale potrà essere svolta tramite esercizi in ambiente virtuale migliorando lo svolgimento delle future operazioni con gli strumenti reali da parte degli operatori.

Questo tema verrà sviluppato in maniera più dettagliata nel secondo capitolo, dove verrà mostrato come le simulazioni virtuali siano un aspetto fondamentale del processo di sviluppo del prodotto in FCA.

1.6. Pianificazione Sviluppo Prodotto in FCA [4]

Come è stato evidenziato in precedenza, per ottimizzare la produzione e il lavoro aziendale è necessaria una collaborazione costante tra le varie funzioni; vedremo ora come in FCA esse collaborino per lo sviluppo del prodotto.

Il processo di sviluppo del prodotto è una strada complessa che parte dalla definizione del concetto e porta fino al lancio di un nuovo veicolo sul mercato. Nel PDP vengono coinvolte parti che sono interessate direttamente o indirettamente; esso abbraccia tutti i processi dell'azienda ed ogni membro contribuisci a costruire un tassello del progetto. La pianificazione di sviluppo prodotto è composta dalle fasi illustrate in figura 1.8 che verranno specificate di seguito.

Figura 1.8 – Timeline delle attività aziendali che portano dalla definizione del concetto fino al lancio del veicolo sul mercato.

I punti chiave di questo sviluppo sono i seguenti:

- le Fasi che rappresentano le porzioni del processo;
- i Milestone, cioè gli eventi che chiudono ed aprono una fase;
- le Deliverable che sono gli obiettivi da raggiungere ad ogni milestone;
- consentono di misurare l'avanzamento del processo.

1.6.1. Pre-Concept-Phase

Il processo di sviluppo del prodotto inizia con la raccolta delle risorse tecniche e tecnologiche dell'azienda disponibili per lo sviluppo di nuovi modelli incrociati con il loro posizionamento sul mercato. Le informazioni vengono recuperate dalle seguenti fonti:

[4] Riferimento[11]

- Innovation Process, si tratta di un piano di sviluppo che deriva da analisi di mercato o da "New Idea Generation" ed è finalizzato all'accrescimento della competitività del prodotto, all'acquisizione di nuove quote di mercato e all'ottimizzazione dell'efficacia dei processi;
- Standardization Plan, presiede allo sviluppo dei sistemi e dei componenti standard prima che essi vengano implementati sulle nuove vetture. Lo scopo è di ridurre i rischi e i costi dello sviluppo di componenti insieme al loro veicolo creando un set di archetipi da cui attingere all'avvio del modello. I piani sono organizzati in famiglie omogenee che prevedono parti comuni, parti modificabili e parti da sviluppare per la specifica applicazione (figura 1.9)

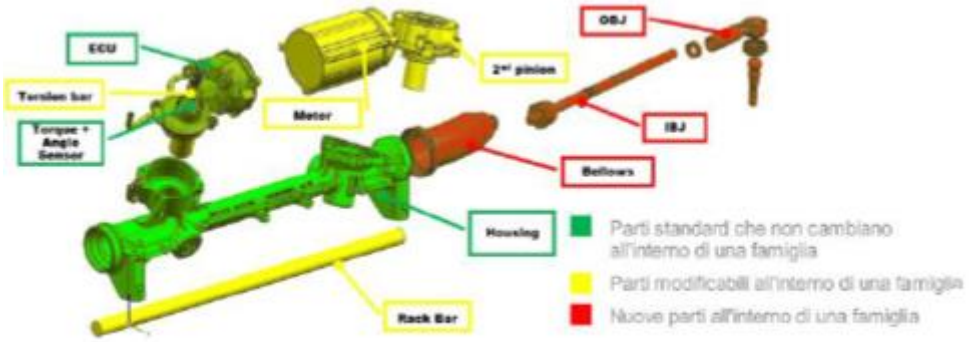


Figura 1.9 – Rappresentazione di un assieme con relative parti standard, modificabili o nuove.

- Competitive Intelligence, è un processo trasversale strutturato per l'analisi della concorrenza a livello di famiglie (segm. A, B, ecc.) guidato dal product planning che prevede in sequenza: feedback client, valutazione prestazioni, tear-down e analisi dei costi.
- Long Range Planning, consiste nella pianificazione negli anni degli interventi attesi a lungo termine, solitamente 5 anni, suddivisi per Brand.
- Features LRP, è la pianificazione delle funzionalità attualmente disponibili o in via di sviluppo previste per i veicoli considerati nel Long Range Planning.

1.6.2. Concept Definition

Identifica le caratteristiche generali del nuovo prodotto. Le principali attività riguardano analisi economiche e di profitto, tecnologiche, dello scenario corrente, del mercato e dei consumatori nonché il ciclo vita del prodotto e i volumi.

In questa fase vengono svolte diverse azioni, tra le più importanti si riportano:

- Team Definition, ufficializzazione e presentazione dei membri coinvolti nel progetto;
- Power Train, che definisce la griglia d moto-propulsione;
- Top Down Business Case, è un'analisi di redditività che parte dal posizionamento di mercato e dai volumi, per arrivare a definire il costo limite per vettura;
- Product Briefing, consiste nel definire un documento che riporti le caratteristiche di alto livello necessarie a guidare il successivo sviluppo;
- Program Timing, rilascio della prima pianificazione dell'intervento sulla base degli standard (figura 1.10);

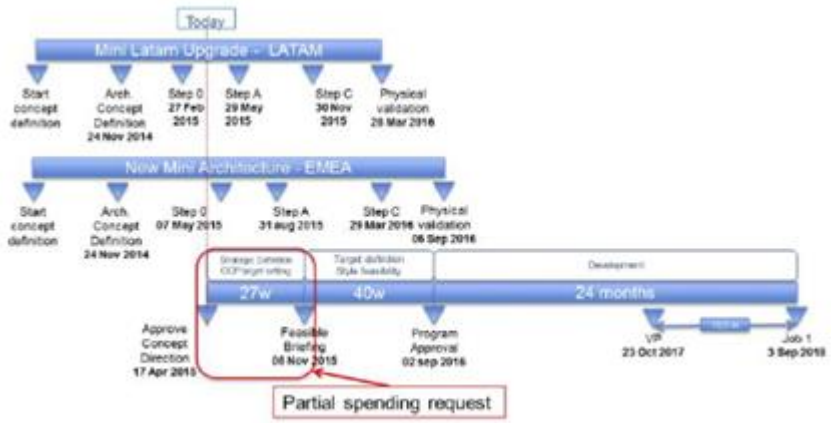


Figura 1.10 – Schema della prima definizione dei target temporali.

- Architecture, è quella parte di un veicolo che il cliente non vede direttamente e quindi può essere condivisa tra più vetture, senza far perdere loro la specifica visibilità che il mercato richiede. Una stessa architettura viene adattata e utilizzata quindi per più di un modello (figura 1.11).

Figura 1.11 – Raffigurazione dell'architettura del veicolo utilizzata per diversi modelli.

Il Milestone di questa fase è rappresentato dall'approvazione del Concept Direction che consiste nell':

- Approvazione del briefing iniziale del prodotto;
- Approvazione del budget per coprire le spese delle prime fasi.

1.6.3. Strategic Definition

Essa definisce la configurazione stilistica del nuovo prodotto. Lo scopo è quello di definire diversi concetti architetturali e di selezionarne uno verificando la sua fattibilità attraverso i punti chiave della definizione stilistica. Tutto deve rispettare la coerenza del posizionamento strategico nel mercato.

I mezzi utilizzati e le principali azioni in questa fase sono:

- CCP (Customer Car Profile) Agreement, cioè la definizione di diversi parametri riguardanti obiettivi prestazionali dei clienti come spaziosità degli interni, rumorosità dell'abitacolo, la massima velocità raggiungibile, comfort sedili ed altro. Rappresentano il massimo livello di dettaglio tramite il quale i clienti valutano il veicolo. Ad ogni CCP viene poi attribuito un punteggio, essi vengono confrontati con quelli della concorrenza e da questo derivano gli obiettivi ingegneristici che saranno gli input della progettazione (figura 1.12);

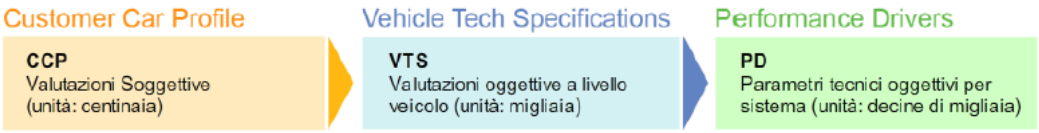


Figura 1.12 – Definizione di alcuni parametri interessanti per la definizione degli obiettivi ingegneristici.

- Hard Point, rappresentano i vincoli tecnici e dimensionali trasmessi dall'Ingegneria allo Stile, da cui deriva la base per creare il profilo stilistico del modello (figura 1.13);

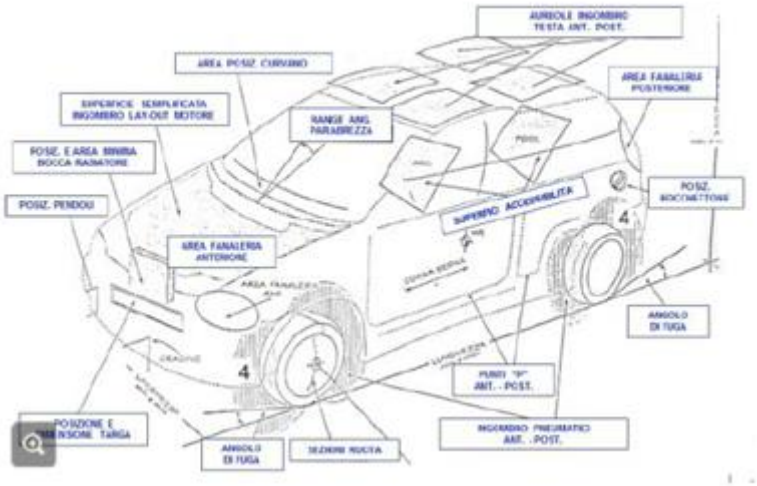


Figura 1.13 – Profilo stilistico del veicolo.

- Visual BOM, è la grafica dei macro-componenti che costituiscono il nuovo modello. Dalla rappresentazione grafica emergono le scelte aziendali riguardanti Carry Over (parti già impiegate su altri programmi e quindi già esistenti), componenti parzialmente modificati e oggetti da sviluppare ex novo per il veicolo;
- Total Industrial cost, è l'analisi dei costi che sta alla base del Business Case, usato per valorizzare la redditività di un progetto. L' analisi si sviluppa a partire dalla descrizione del prodotto e dalla sua valorizzazione tecnico/economica, fatta dal Cost Engineering;
- Realistic Sketch, sviluppo di bozzetti del veicolo realizzati dal centro Stile (figura 1.13).

Figura 1.13 – Immagine di un bozzetto realistico prodotto dal centro Stile.

Il Milestone di questa fase consiste nel Product Content Sign-Off che è costituito da diversi punti:

- Rilascio del briefing di prodotto finale, fattibile sia dal punto di vista tecnico che economico;
- Definizione dei target prestazionali e della raggiungibilità degli obiettivi tecnico prestazionali;
- Approvazione del budget per coprire le spese delle fasi successive.

1.6.4. Target Definition

Essa verifica la fattibilità tecnologica e tecnica dei modelli concettuali selezionati coerentemente con i progetti disegnati. La condivisione delle scelte avviene tra i tecnici dello sviluppo, il reparto acquisti, che determina i contratti e assegna i fornitori, e gli sperimentatori.

Da questa fase entrano in gioco inoltre i principali strumenti per lo sviluppo del prodotto:

- CODEP, distinta base di prodotto organizzata secondo una vista tecnologica e quindi finalizzata alla costruzione di una vettura in stabilimento. Descrive il prodotto per matricola e lo configura con la struttura incolore. Permette la definizione delle modifiche da passare alla distinta di produzione per la pianificazione e implementazione;
- TEAMCENTER, un data-base che gestisce la definizione dei CAD 2D E 3D e il loro ciclo vita, sia nella fase di sviluppo che in quella di mantenimento;

- PSI il piano di sviluppo integrato, strumento aziendale che gestisce tutti i dati relativi a definizione degli obiettivi e pianificazione e consultazione delle verifiche fisiche e virtuali;
- ESLM, una nuova modalità di gestione del software vettura sia nella fase di sviluppo che in quella di mantenimento.

Le principali attività di questa fase riguardano:

- Sourging di prodotto, è l'attività di selezione dei fornitori, viene pianificata in funzione dei tempi di attrezzamento dei nuovi componenti e delle date di richiesta disponibilità dei pezzi in stabilimento;
- Road Map e Softness Chart, dove il primo è un documento che contiene informazioni sulle finiture e trattamenti esterni ed interni del veicolo, ne caratterizza le superfici in termini di materiali, finitura, aspetto superficiale e tecnologie da applicare per la loro realizzazione. La seconda viene utilizzata nella prima parte di definizione del processo della Road Map e riporta la tecnologia e le tipologie di finiture degli interni;
- Clinic di Sviluppo, usa il Panel delle vetture di riferimento e un modello di stile che viene mostrato ad un gruppo significativo di clienti per un'analisi comparata. Non si testa solo la parte stilistica ma si danno indicazioni su diversi contenuti rilevanti come gamma dei motori, prezzi ecc;
- Griglia di prodotto, rappresenta l'insieme delle caratteristiche con cui il prodotto si presenta sui vari mercati. La definizione progredisce di pari passo con il modello e arrivati al Program Approval la griglia sarà completa e verrà ufficializzata;
- KBE, si tratta di una nuova metodologia che consiste nell'utilizzare le proprietà parametriche associative dei CAD. Si definisce un template di base che non riguarda la singola applicazione, costruito utilizzando le regole logiche di corretta progettazione. Questo template viene usato come base di partenza su cui inserire i dati specifici del componente in via di sviluppo. Si completa poi la progettazione con la rigenerazione di matematiche tecniche che saranno affinate con l'aggiunta di dettagli e verificate puntualmente. Questo metodo consente di capitalizzare le conoscenze della progettazione in un template, ridurre le attività di routine e abilitare l'esecuzione di analisi virtuali in anticipo, utili nell'individuazione degli errori;
- Processo di Stile, gli schizzi su carta vengono convertiti in modelli matematici conformi ai concetti stilistici definiti e ai vincoli ingegneristici. La creazione di

modelli virtuali consente di velocizzare il processo di modifica del prodotto. Il processo di conversione è riassunto nella figura 1.14;

Figura 1.14 – Rappresentazione del percorso che porta dai bozzetti di stile ai modelli CAD.

A proposito di questa trasformazione, il CAS Model (Computer Aided Styling) permette la conversione dei modelli iniziali in modelli matematici conformi agli obiettivi di stile e coerenti con i vincoli tecnici e tecnologici. Sono previsti rilasci progressivi e verifiche in Virtual Room a grandezza naturale al fine di fornire un modello ottimale a chi si occupa della progettazione CAD.

- Fattibilità di stile, In questa fase ha luogo la fattibilità di stile, attività ciclica e convergente che a partire dal primo rilascio delle superfici del tema di stile da verificare, chiamate genericamente CAS (Computer Aided Styling), ne verifica la fattibilità tecnica e tecnologica e il rispetto delle direttive di omologazione, compatibilmente con i target di costo desiderati. È un'attività svolta dal gruppo di Advanced Engineering, supportato da altre aree aziendali come il manufacturing, e dal centro Stile: ad intervalli di tempo definiti (solitamente ogni 2-3 settimane), una nuova revisione di superfici viene rilasciata, analizzata e verificata garantendo così che la crescita di maturità dello stile delle vetture sia compatibile con i vincoli al contorno. Le analisi comprendono: verifica del rispetto dei vincoli dimensionali e volumetrici, analisi aerodinamiche, verifica delle sezioni di taglio e sezioni tipiche, controlli omologativi e prestazionali e validazione delle soluzioni tecniche. Quando le superfici di stile raggiungono un livello di fattibilità

sufficiente per poter presentare l'iniziativa di progetto al Board Aziendale per l'approvazione, il CAS prende il nome di classe C fattibile;

- Six Panel, strumento con il quale si presenta il Business Case e riporta un unico prospetto con volumi, prezzi e ricavi, costi varabili, NPV (indicatori di redditività) e margini;

In questa fase ci sono due Milestone.

1. Theme Confirmation che riguarda:

    - Conferma del tema di stile in coerenza con studi di mercato e le strategie di Brand;
    - Valutazione della fattibilità del tema stile.

2. Programm Approval che è un punto molto importante dello sviluppo poiché il Consiglio di Amministrazione decide di finanziare il progetto. Per il team che porterà avanti il modello questo punto è molto delicato poiché sancisce un vero e proprio contratto attraverso il quale essi si impegnano con l'azienda a rispettare gli obiettivi di prodotto, i vincoli di tempo, costo e qualità. I punti riassuntivi sono:

    - Approvazione economica dell'intero programma con i contenuti tecnici e di prodotto completamente definiti e coerenti con il Business Case;
    - Approvazione dello stile esterno e interno da parte dell'Alta Direzione;
    - Certificazione dello stile Esterno ed Interno.

1.6.5. Technical Development

Vengono sintonizzati i disegni tecnici usando strumenti CAD e di virtual analysis. I componenti tecnici e tecnologici richiesti vengono sviluppati seguendo un Design Evolution. È previsto: un congelamento del modello di progetto, completamento della struttura del prodotto e costruzione di prototipi preliminari. L'obiettivo di questa fase è quello di definire il progetto tecnico della vettura per poter autorizzare l'attrezzaggio dei mezzi necessari alla produzione (figura 1.15).

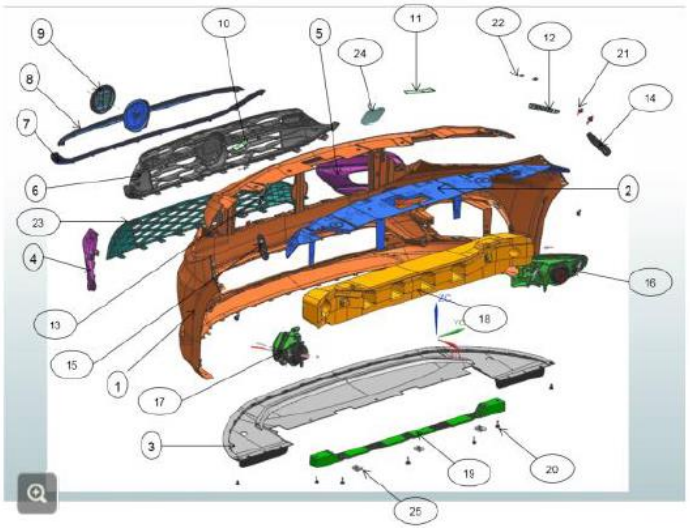


Figura 1.15 – Esploso di un assieme con numerazione dei componenti.

I punti chiave di questa fase sono:

- Power Train, vengono effettuate delle attività come la calibrazione del motore per impostare i parametri della centralina o dei cambi per soddisfare le prestazioni attese;
- Virtual Analysis Validation, quest'attività è fondamentale e consenta di simulare il comportamento del prodotto prima della sua realizzazione fisica. Anticipare la validazione del modello dal punto di vista virtuale vuol dire risparmiare sui prototipi fisici e ridurre i costi legati alle modifiche. I principali test effettuati nell'ambiente virtuale sono quelli elencati in figura 1.16.

Figura 1.16 – Lista dei principali test virtuali effettuati.

- CAD Design Step, dopo l'approvazione dell'iniziativa di progetto, i disegnatori tecnici elaborano i modelli CAD dei componenti secondo degli Step definiti. Questi modelli matematici subiranno affinamenti successivi arricchendosi di dettagli e nella precisione delle superfici. Gli Step CAD sono modelli matematici ingegneristici derivati da corrispondenti superfici di Stile. Pertanto il processo seguirà le seguenti evoluzioni: dalle Classi C (di stile) derivano gli Step CAD 1, dalle classi B (di stile) derivano gli Step CAD 2, dalle classi A (di stile) derivano gli Step CAD 3 (figura 1.17).

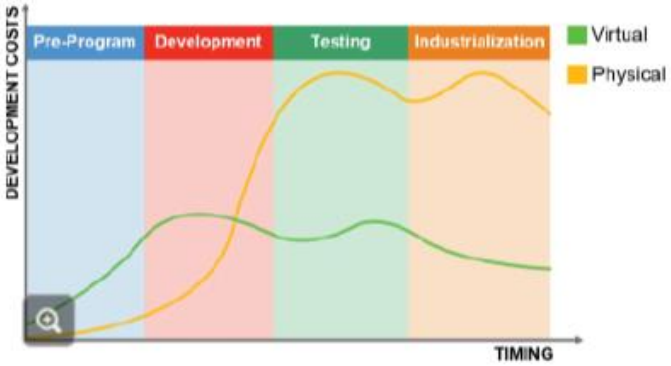


Figura 1.17 – Rappresentazione grafica dell'andamento dei costi legati ai costi di sviluppo nell'ambiente reale e virtuale.

- Dimensional Craftsmanship, è la percezione dei clienti per quanto riguarda accoppiamenti precisi e robusti e target ingegneristici. Viene rilasciato per questo un documento contenente le sezioni dei giochi&profili e tolleranza di un veicolo e

il Metodo, un documento che fornisce le informazioni geometrico/dimensionali di un componente;

- Sviluppo del processo Produttivo, esso riguarda la simulazione virtuali per le verifiche di fattibilità produttiva dal punto di vista dello stampaggio, lastratura, verniciatura e assemblaggio. Quando si parla di sviluppo del prodotto infatti si intende anche il Processo Produttivo visto che le due cose sono strettamente correlate e proseguono di pari passo. Il processo produttivo inizia ad essere definito dalla Concept Phase con la scelta dell'allocazione produttiva e poi si articola in tutte le diverse fasi. Durante il Technical Development si parte dallo Step 2 di progettazione per le verifiche di processo tramite simulazioni virtuali. Vengono definiti i "pre-metodi", i cartellini operazione, gli schemi di assemblaggio e la catena delle tolleranze. Si procede inoltre alla stesura delle specifiche tecniche e capitolati per il Sourcing delle attrezzature, sia quelle nuove che da modificare.

Il Milestone si questa fase è il rilascio dei file CAD dello Step 3, questo evento consiste nel:

- Completo rilascio dei modelli matematici 3D Step 3 finiti e adatti alle verifiche si stampaggio e virtuali con: riferimenti, fissaggi, fori, punti di saldatura, alette, spessori, materiali e raggi;
- Ufficializzazione di tutte le matematiche di Step 3 disponibili in Teamcenter;
- Valutazione della qualità dei rilasci e delibere di packaging;
- Avvio della costruzione stampi e attrezzature definite per i componenti make or buy (Tooling Kick Off) - lunghi attrezzaggi. Il Tooling Kick off o delibera ad attrezzare, è un evento legato ai tempi di attrezzamento in modo da avere la disponibilità degli oggetti nei tempi richiesti. Questo evento autorizza i fornitori ad avviare la costruzione degli stampi e delle attrezzature necessarie.

Dal punto di vista elettrico ed elettronico, i primi mesi seguenti all'approvazione dell'iniziativa sono dedicati al completamento di tutti i requisiti legati ai software del veicolo e alle centraline nonché al congelamento delle grafiche associate alla parte infotainment. I requisiti vengono rilasciati ai fornitori in un documento chiamato Spec 1 A (prima release), Spec 2 o 3 A (successive release). È importante ricordare che lo sviluppo del veicolo avviene in sinergia con il sistema motopropulsore per garantire l'integrazione del motore e del cambio.

1.6.6. Tooling Development

A partire dai modelli CAD Step 3 si realizza un modello fisico in scala 1:1 chiamato Master di Stile. Esso verrà verificato e certificato per definire la correttezza, la precisione e confermare i giochi e i profili. In funzione dell'approvazione del master si elaboreranno le corrispondenti superfici di Stile chiamate classi A certificate o classi A++ da cui si estrapolano i CAD Step 5. A ogni rilascio seguiranno dei loop di analisi virtuali al fine di certificare il progetto.
Questa fase prevede l'approvazione del processo attraverso diversi test, effettuati su veicoli prototipali, quali: test di sicurezza, stress test e test funzionali i cui risultati possono portare a cambiamenti di progetto / processo. Questa fase include l'impostazione della distinta base di produzione (BOM) e la definizione dei materiali e dei colori.

Tra i Milestone Step 3 e Step 5 si autorizza la maggior parte dei fornitori ad attrezzare.

Questa fase è caratterizzata dalle seguenti azioni:

- Off Tool, man mano che le attrezzature e gli stampi sono disponibili, vengono utilizzati per produrre i primi campioni usati per la messa punto del sistema produttivo. A seguito di tale operazione si otterranno degli oggetti significativi e utilizzabili per prove a banco o da montare su vettura. Tale livello tecnologico dell'oggetto è definito Off Tool (OT) cioè oggetto da stampi/attrezzature definitivi;

- Design Validation, inizio della delibera tecnica attraverso test virtuali e fisici. Si verifica che il progetto raggiunga tutti gli obiettivi tecnici e prestazionali, in linea con il piano di sviluppo dei componenti e dei sistemi;
- VP (State of BIW), è l'attività finale della fase e consiste nell'avvio della lastratura. Gli esemplari che ne derivano sono i primi modelli realizzati dallo stabilimento finale di produzione. Queste vetture verranno utilizzate per verifiche prestazionali e tecniche. Vengono inoltre effettuate le verifiche di tutti i processi produttivi, stampaggio, lastratura, verniciatura e montaggio;

In questa fase si possono osservare due Milestone.

1. Il rilascio dei file CAD dello Step 3, i punti principali sono:

    - Completamento rilascio dei modelli matematici 3D STEP 5;
    - Ufficializzazione di tutte le matematiche di Step 5 disponibili su Team Center;
    - Valutazione della qualità dei rilasci e delibera del packaging;
    - Avvio della costruzione stampi e attrezzature definitive per i componenti (Toolink Kick Off) – medi e corti attrezzamenti;

2. VP (VERIFICHE DI PROCESSO) che consiste nel:

    - Valutare la disponibilità dei componenti da attrezzatura/stampo definitivi (Off Tool);
    - Avviare la lastratura del primo campione di vetture prodotto nello stabilimento finale.

1.6.7. Process Verification

La fase di process verification inizia con l'avvio della lastratura delle vetture VP. Le Verifiche di Processo o VP sono i primi esemplari di vettura realizzati nello stabilimento produttivo scelto. Il nome deriva dal fatto che con tale vetture si inizia l'attività di verifica delle linee di produzione: si testano i componenti forniti e vengono effettuate le verifiche di qualità e affidabilità definendo poi delle azioni correttive se necessarie.
In questa fase vengono svolte le seguenti operazioni:

- Plant process, si verificano la sequenza delle operazioni, l'ergonomia di lavorazione, il tempo ciclo iniziale, il passaggio attrezzature ecc. Contemporaneamente si addestrano le prime squadre degli addetti alle linee. Vengono inoltre effettuate le misurazioni geometriche della scocca, in base alle quali si effettuano le correzioni necessarie;
- Customer Product Audit, si eseguono le prime prove in ottica cliente;
- Reliability Growth Durability, partono gli accumuli chilometrici per testare l'affidabilità del veicolo simulando un periodo di utilizzo di circa due anni;
- Performance Index (IRP), si monitora questo parametro che esprime il livello di raggiungimento degli obiettivi settati nei CCP;

- PWT – Quality Gate, con le verifiche di processo dovrebbe anche completarsi l'attività di calibrazione motore; partendo infatti con un livello di calibrazione equivalente a un Quality gate 4 sulla prima VP, si dovrebbe arrivare al quality gate 6 rilasciato;
- Design Validation, le vetture prodotte nella fase di Process Verification saranno utilizzate per la validazione tecnica e prestazionale del progetto con obiettivo di completamento entro l'inizio della fase successiva.

Il Milestone in questa fase è rappresentato dall'inizio della produzione delle PS (PRE-SERIE):

- Delibera tecnica dei componenti del veicolo;
- Quality gate 6 del motopropulsore;
- Disponibilità di tutti i pezzi definitivi per iniziare la costruzione delle vetture PS.

1.6.8. Production Readiness

Con la Production Readness avviene la certificazione del processo produttivo, si esegue un'analisi di qualità e affidabilità sul veicolo finito allo scopo di trovare potenziali rischi e attuare eventuali azioni correttive. Vengono valutatati inoltre l'estetica e i difetti funzionali per certificare gli obiettivi prefissati.

La fase si sviluppa nei seguenti punti:

- Plant process, si completa il processo di qualificazione dei componenti o sistemi volto ad accertare che la loro fabbricazione con attrezzature e ciclo tecnologico definitivi mantenga tutte le caratteristiche prestazionali, funzionali, di affidabilità, dimensionali ed estetiche definite a progetto;
- Customer Product Audit, vengono completate le valutazioni iniziate nella fase precedente;
- Reliability Growth Durability, viene effettuato il secondo loop;
- Performance Index, proseguono le analisi di affidabilità e qualità sul veicolo finito con lo scopo di trovare potenziali rischi e implementare delle correzioni.

Vengono valutati i difetti estetici e funzionali e certificati gli obiettivi di performance.

- Internal Customer Fleet, si effettua questo ulteriore test con l'ausilio di flotte specifiche utilizzate dal personale interno per un'analisi in ottica cliente;
- Qualification Buy, è la certificazione che il processo produttivo del fornitore garantisce gli obiettivi previsti nella documentazione tecnica (scheda di prodotto): dimensionali, estetici, prestazionali, funzionali e di affidabilità.

I Milestone di questa fase sono due e conducono al lancio del veicolo nel mercato.

1. Il PRA (production Release Approval). Essa rappresenta un evento conosciuto con il nome di Dap o delibera produrre e costituisce l'atto formale con cui l'ente di qualità certifica che il processo e il prodotto abbiano raggiunto i target qualitativi richiesti e siano tali da dare l'avvio alla salita produttiva.

Tra la Production Release Approval e il Job 1 si mette a punto il processo di logistica e si tara il processo produttivo per avviare la produzione (job1) con cadenza definitiva (figura 1.18).

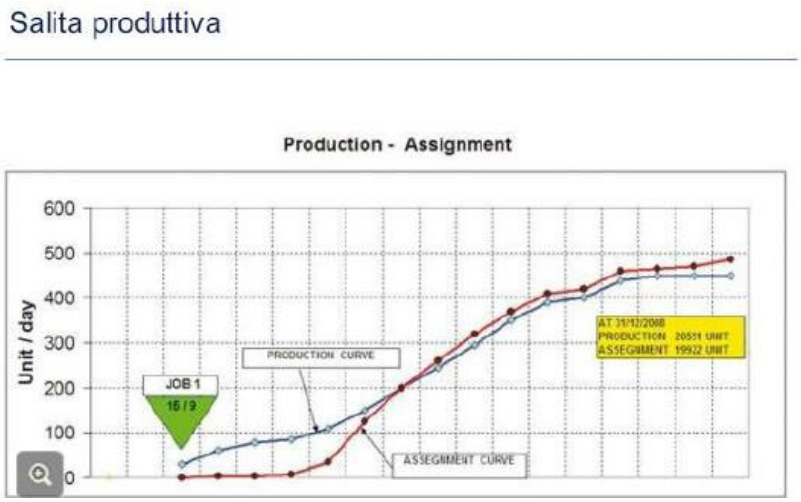


Figura 1.18 – Grafico che mostra l'andamento della salita produttiva.

2. JOB1 che dà inizio alla costruzione del primo veicolo del lotto di lancio.

2. Virtual validation analysis nella fase di CAD Step Design

L'utilizzo degli strumenti per la rappresentazione virtuale della realtà ha consentito alle industrie manifatturiere, specialmente a quella dell'automobile, essendo uno dei settori con maggiore influenza nel mercato mondiale, di anticipare i test e le validazioni sugli oggetti da produrre. Al giorno d'oggi è impensabile ottenere un percorso di sviluppo di un nuovo prodotto che prescinda da questi sistemi. In precedenza è stato illustrato come FCA affronti i vari punti del processo che conduce una vettura dall'essere un semplice concetto fino a divenire un prodotto finito accessibile al mercato. In questo capitolo invece, l'attenzione si concentrerà prevalentemente sull'attività di "fattibilità di prodotto" dal punto di vista produttivo. A tal proposito verranno illustrati i metodi ed i mezzi utilizzati, mostrando infine un esempio pratico relativo ad una simulazione di montaggio.

2.1. Le macro-fasi del Manufacturing [5]

Esistono quattro fasi produttive che riguardano la realizzazione di un veicolo esse influenzano l'organizzazione logistica dello stabilimento.

2.1.1. Stampaggio

Il processo produttivo di un veicolo inizia nell'area dello stampaggio, dove grandi rotoli di metallo vengono trasformati nei pezzi che costituiranno la struttura portante. Nonostante per "stampaggio" si intenda un complesso eterogeneo di processi di produzione industriale, essi sono accomunati dal fatto di usare un unico utensile di forma permanente detto, appunto, "stampo". Per prima cosa avviene la trasformazione plastica, tramite la quale i pezzi metallici vengono lavorati grazie all'applicazione di una pressione da parte degli strumenti della pressa. Quando la trasformazione riguarda pezzi che hanno una sezione varia, il processo viene definito di forgiatura, se sono coinvolti oggetti a sezione bassa invece (come nel caso delle lamiere) si parlerà di stampaggio vero e proprio. In alcuni stabilimenti FCA, all'interno del reparto dello stampaggio vi è una sala metrologica tecnologicamente avanzata dove grazie alle luci intense che evidenziano le

[5] Riferimento[12].

forme degli oggetti e ne mettono in risalto i difetti, due robot esaminano accuratamente tutti i pezzi finiti(figura 2.1).

Figura 2.1 – Immagini di alcuni pezzi ottenuti dallo stampaggio.

2.1.2. Lastratura

In questa fase vengono saldati e rivettati i diversi componenti precedentemente stampati. Quest'operazione viene definita lastratura. Qui avviene l'operazione di assemblaggio delle varie parti di lamiera che costituiranno il Body In White, cioè il corpo della vettura. L'allestimento del reparto è costituito da un numero elevato di robot e le modalità di giunzione adoperate sulla scocca sono molteplici dalla saldatura agli incollaggi, alle avvitature, e tutte prevedono un processo di controllo che ne certifica la conformità (figura 2.2). Vengono applicate inoltre diverse tecnologie di saldatura. Si parte dalle più tradizionali saldature, da punti e quelle ad arco con metallo sotto protezione di gas (dette MIG/MAG). Sono presenti inoltre le saldature laser e quella "estetica a scarica capacitiva", fino alla saldobrasatura di giunzioni estetiche con tecnologia laser in grado di raggiungere elevati canoni di qualità superficiale delle giunzioni.

I robot per fare in modo che il posizionamento reciproco delle parti sia preciso al decimo di millimetro sono controllati con sofisticati sistemi di telecamere e sensori. Alla fine del processo produttivo alcuni robot effettuano a una fase di misurazione dei punti critici della scocca per garantire un'elevata precisione.

In FCA il processo di controllo qualità viene studiato ad hoc per ottenere delle vetture perfette. Le attrezzature utilizzate infatti, sono molto precise e vi è anche un attento controllo delle tempistiche; in soli 60 minuti il modello scelto come campione per il

controllo viene ispezionato a livello geometrico e dimensionale. In questo processo è richiesta un'estrema precisione: i risultati dei rilevamenti infatti devono raggiungere la conformità al progetto con tolleranze impercettibili.

Figura 2.2 – Rappresentazione di una linea di lastratura con i robot in azione.

2.1.3. Verniciatura

In questa fase, vengono inizialmente utilizzate grosse vasche in cui le scocche vengono immerse per ottenere il trattamento elettromagnetico anticorrosione di cui avrà bisogno durante il suo ciclo vita. All'interno di celle robotizzate, dotate di precisissimi sistemi di visione, tutte le giunzioni tra le lamiere vengono analizzate e sigillate per fare in modo di evitare l' ingresso di aria e acqua all'interno del veicolo durante l'utilizzo. Segue la fase di verniciatura vera e proprio, in uno spazio privo di impurità ed altamente controllato, nel pieno rispetto dell'ambiente. Qui, per ciascuna vettura, vengono impiegati circa 50 robot e la supervisione di alcuni addetti, oltre all'impiego di 3-4 kg di vernice, a secondo del modello, e un tempo massimo di 90 secondi (figura 2.3).

Figura 2.3 – Processo di verniciatura effettuato da parte dei robot.

2.1.4. Montaggio

Questo processo è accompagnato da robot, manipolatori, un elevato numero di stazioni automatiche di avvitatura ed un cospicuo numero di persone esclusivamente dedicate al montaggio. Sulle linee allestite nel dettaglio vengono sistemate tutte le parti in materiale plastico (provenienti dallo stampaggio ad iniezione) come i paraurti, la plancia e il serbatoio dell'automobile. La scocca verniciata giunge nella zona del montaggio dove avviene il "mariage" tra la scocca dell'auto e il suo motore posizionato su un pallet. In questo modo il veicolo inizia a completarsi: le ruote, i freni, i sedili, il cruscotto, il volante, le luci, l'impianto elettrico, le tecnologie di bordo, fino ad ottenere il veicolo completo pronto per le prove su strada.

Durante la fase di montaggio vero e proprio, ogni componente deve trovarsi a lato della postazione di lavoro dell'addetto al montaggio nel momento in cui deve essere effettuata l'operazione. Si tratta dunque di un lavoro di logistica molto dettagliato e meticoloso, che viene supportato da un'avanzata tecnologia informatica che collega in tempo reale fabbrica, fornitori e logistica.
(figura 2.4).

Figura 2.4 – Rappresentazione di una linea di montaggio in cui un'operatrice effettua alcuni compiti.

2.2. Advanced Manufacturing Engineering

Dopo aver chiarito quali siano le principali attività della fase produttiva, ora l'attenzione si concentrerà per lo più sull'aspetto delle simulazioni per la fattibilità produttiva.

All'interno di FCA l'ente AME (Advanced Manufacturing Engineering) tramite l'utilizzo di strumenti per la visualizzazione della realtà, effettua delle validazioni virtuali che consentono lo sviluppo degli step CAD stabiliti durante la pianificazione del progetto. L'obiettivo, come anticipato nel primo capitolo, è quello di ridurre il time to market ed anticipare la curva delle modifiche applicate al progetto. In questo modo i costi legati alle variazioni effettuate, essendo esse relative a modelli virtuali, saranno notevolmente ridotti. In figura 2.5 vengono rappresentate la curva riguardante il numero di modifiche e l'andamento dei costi ad essa collegati, in funzione del timing prestabilito dall'azienda.

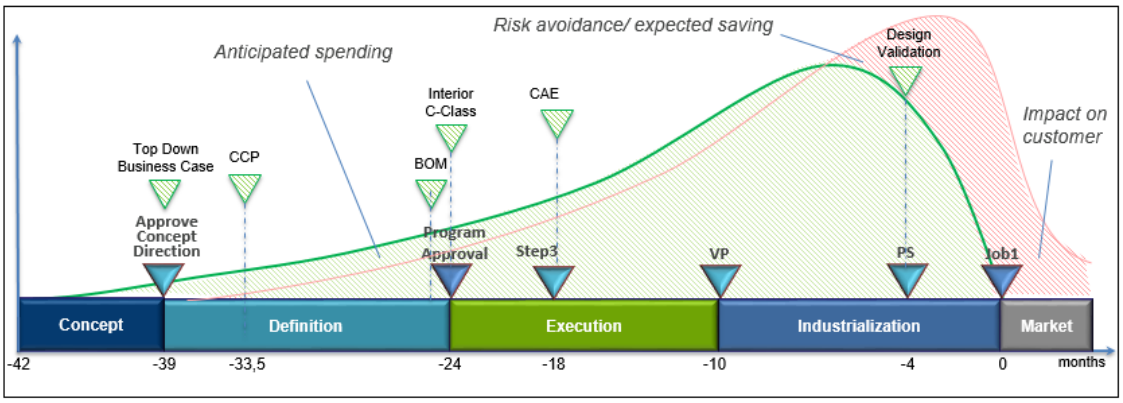


Figura 2.5 – In rosso è rappresentato l'andamento attuale dei costi legati alle modifiche mentre ed in verde l'andamento desiderato che si potrebbe ottenere investendo sulla risoluzione dei problemi anticipata.

Per questo motivo le attività svolte in questo settore sono di vitale importanza per l'azienda e contribuiscono al raggiungimento di una strategia di sviluppo del prodotto sempre più efficiente e strategica.

La attività produttiva dal punto di vista delle simulazioni può essere ispezionata secondo due aspetti.

2.2.1. Advanced Manufacturing Engineering Process

Nel momento in cui l'azienda decide di sviluppare un nuovo modello, il reparto di R&D lavora in concomitanza con il reparto, chiamato AME Process, per valutare l'adeguatezza del progetto relativamente ad un determinato stabilimento dal punto di vista economico e tecnico. Valutazioni economiche di diverse soluzioni in base al CAPEX. Si parte da un presunto investimento iniziale e si valuta l'equilibrio tra operazioni manuali ed automatiche; tutto in funzione dell'ottimizzazione del futuro processo produttivo.

Uno stabilimento può essere definito "Green Field" quando non sono presenti attrezzature e deve essere allestito totalmente per la nuova produzione. In verità rientrano in questa categoria anche le linee riallestite parzialmente, considerando che, per lo meno in Italia, vengono riutilizzati sempre gli stessi stabilimenti. Se invece si tratta di uno stabilimento già utilizzato per un altro modello, esso viene definito "Brown Field". In questo caso saranno presenti molti vincoli e sarà necessario effettuare degli

studi per capire quali strumenti e quali parti della linea esistente si possano adattare, quali debbano essere modificate e quali eliminate per la nuova produzione. Il prodotto in questo caso, può essere addirittura adattato alla linea esistente al fine di modificare il meno possibile i mezzi a disposizione.

Per questo tipo di attività sono disponibili una serie di software come ad esempio Catia, AutoCAD, RobCAD e Process Simulate (figura 2.6).

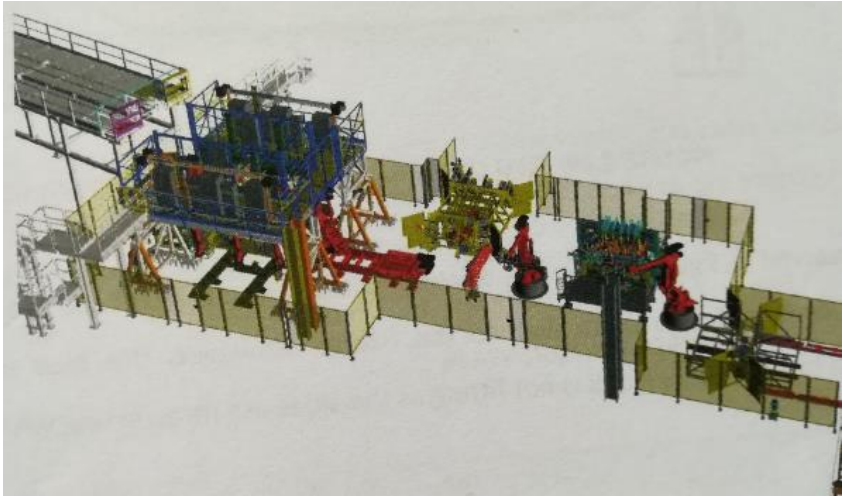


Figura 2.6 – Rappresentazione di una sessione di simulazione su RobCAD sull'allestimento di una linea.

All'interno dell'ente AME Process inoltre, vengono effettuate una serie di attività per la scelta delle sequenze ottimali ed economicamente più convenienti per il flusso produttivo. In generale dunque, in quest'area, l'attenzione si focalizza sui processi produttivi, l'allestimento delle linee, la sequenza delle operazioni da svolgere e le attrezzature da acquistare.

2.2.2. Advanced Manufacturing Engineering Product

In questo settore invece l'aspetto produttivo si concentra maggiormente sulla fattibilità di prodotto.

Nel reparto AME Product di FCA vengono svolte una serie di attività prettamente collegate allo sviluppo progettuale del prodotto. La fattibilità è un'attività di grande

importanza nel processo di sviluppo descritto alla fine del precedente capitolo. Il settore AME product infatti collabora direttamente con l'area progettuale dell'azienda per validare i modelli CAD che da essi vengono creati.

Questo ente svolge diverse attività [11]:

- Style Feasibility, riguarda la risoluzione di problematiche legate all'estetica interna ed esterna del veicolo ed è un'attività svolta in collaborazione con il dipartimento di Stile;
- Body in White Feasibility, è un'attività che si pone l'obiettivo di validare l'assemblaggio della scocca, le attrezzature utilizzate per le saldature e per operazioni manuali, le giunzioni ibride ed altri aspetti legati a questo processo;
- General Assembly Feasibility, riguarda le verifiche legate alle sequenze di montaggio, alla fattibilità delle operazioni e valutazioni preliminari degli aspetti ergonomici;
- Tolerances management, cura invece gli aspetti relativi alla creazione delle tolleranze per gli accoppiamenti, valutazione di giochi e profili e analisi sulla percezione del cliente per il BIW, per il GA e sugli oggetti acquistati dall'esterno;
- Standard Solutions, si occupa di definire le migliori soluzioni per diversi processi produttivi in funzione della concorrenza e delle conoscenze pregresse. In questo modo le nuove soluzioni diventano degli standard da applicare ai nuovi modelli;
- Innovation & Benchmarking, è un'attività svolta in concomitanza con il centro ricerche Fiat con lo scopo di individuare nuove opportunità tecnologiche da applicare ai modelli. Essa si focalizza principalmente sullo studio di ricerca e di analisi della concorrenza;
- EPM (Early Product Management), svolge un esercizio di gestione delle informazioni relative a soluzioni e problematiche passate, in maniera tale da poter supportare le applicazioni durante lo sviluppo di un nuovo modello in base ai business case, alle aspettative qualitative e agli standard precedentemente definiti;
- Advanced Virtual Process, è un'attività svolta in collaborazione con il centro di ricerca e riguarda la valutazione degli aspetti termo-meccanici durante i processi produttivi;
- New technologies, si occupa della valutazione della fattibilità tecnologica di nuove applicazioni con l'utilizzo della fibra di carbonio.

TeamCenter Vismockup [6]

Lo strumento primario che accumuna le diverse attività, durante lo svolgimento delle simulazioni virtuali, è Teamcenter, un software della Siemens che consente di distribuire prodotti molto complessi e al tempo stesso massimizzare la produttività e razionalizzare le operazioni globali. Si tratta di un software di gestione del ciclo vita del prodotto (PLM, Product Lifecycle Management), in grado di integrare processi, sistemi aziendali e persone, per dare vita a un'impresa estesa in cui diversi enti possano colloquiare facilmente. Questo tipo di programmi garantiscono una gestione efficiente ed economica delle informazioni lungo l'intero ciclo di vita di un prodotto, dalla concezione alla progettazione e dalla produzione all'assistenza, fino allo smaltimento.
Esso può essere visto sia come una strategia informatica che come una strategia aziendale. Come strategia informatica, permette di realizzare una struttura di dati coerente attraverso il consolidamento dei sistemi. Come strategia aziendale, permette alle organizzazioni globali di lavorare come un singolo team e di progettare, realizzare, supportare e ritirare prodotti, acquisendo le best practice e le metodologie che si sono dimostrate più efficienti lungo il percorso. Permette all'azienda di prendere decisioni unificate e informate, in ogni fase del ciclo di vita del prodotto.
Il software Teamcenter consente di visualizzare in maniera professionale il ciclo di vita del prodotto. In questo modo è in grado di estendere il valore visivo e analitico della progettazione assistita da computer (CAD) per coloro che sviluppano il prodotto e che devono condurre revisioni del progetto con i dati di progettazione creati in più sistemi CAD. Dal momento che molte persone hanno bisogno di lavorare direttamente con i dati di progettazione che si trovano all'interno di formati CAD, esse hanno dovuto hanno dovuto acquisire le conoscenze per utilizzare i software nativi dei modelli oppure attendere disegni 2D.
Questa soluzione invece, consente a chi lavora con i dati 3D di convalidare i contenuti di progettazione e la loro evoluzione senza incorrere in costi, complessità o necessità di formazione per sofisticati sistemi CAD. Il software Teamcenter ha acquisito infatti, le funzionalità dei sistemi CAD utilizzati al giorno d'oggi e li ha inserite all'interno di uno strumento globale.

Tradizionalmente, un esteso team di progettazione che comprende i simulatori, la produzione, team di qualità ecc., avevano bisogno di aspettare che il prodotto fosse completo prima di poter validare la forma, la funzione e la producibilità. Con l'utilizzo di Teamcenter la valutazione dello sviluppo prodotto, che viene effettuata da molte più

[6] Riferimento[13].

persone rispetto a quella che hanno generato i CAD, non avviene più a valle, le loro valutazioni possono essere effettuate molto prima e questo grazie ad una condivisione di informazioni che dà una visione globale del ciclo a tutti quelli che si occupano del progetto. In questo modo le decisioni possono essere migliori, più veloci e ne deriva un risparmio di tempo causato dal rimbalzo di informazioni e dalle necessità di riunirsi per discutere.

La visualizzazione in Teamcenter VisMockup è favorita dalla tecnologia JT. Si tratta di un formato CAD neutro altamente flessibile che consente la completa rappresentazione delle informazioni sul modello. Questi file inoltre risultano essere molto leggeri nonostante contengano grandi assiemi con un elevato numero di informazioni. In questo formato è possibile inoltre estrarre la geometria delle superfici, individuare la struttura del prodotto, ricavare informazioni sulla produzione del prodotto (PMI) comprese tolleranze, funzionalità, informazioni di controllo, simboli di saldatura e altre annotazioni di fabbricazione. La leggerezza di questi file JT consente di visualizzare assiemi che i sistemi CAD nativi non sarebbero in grado di gestire.

Il software è dotato anche di un sistema molto preciso di misurazione in 3D, dà la possibilità di effettuare sezioni ed ha molte delle potenzialità di un software CAD. Le funzioni di manipolazione inoltre consentono all'utente di valutare le forme, l'adattamento tra componenti e le distanze critiche in maniera molto realistica. Il format JT inoltre è compatibile con molti dei sistemi CAD utilizzati in progettazione e consente dunque la collaborazione tra le varie funzioni aziendali.

In sostanza si tratta di un potente strumento di simulazione che rende possibile visualizzare prototipi digitali ed eseguire analisi avanzate: clearence statica e dinamica, creazione di animazioni e pianificazione di percorsi, analisi ergonomiche con Jack, analisi di tolleranze e qualità.

General Assembly

Questo lavoro però si pone l'obiettivo di chiarire le dinamiche legate alla fattibilità di prodotto dal punto di vista del montaggio.

Nella seguente programma illustrato in figura 2.7, viene evidenziato il contributo dell'attività di fattibilità di montaggio durante lo sviluppo del prodotto. L'aspetto di maggior interesse per il lavoro di tesi riguarda le fasi di verifica virtuale. Esse fanno

parte dello sviluppo tecnico e tecnologico del modello e vengono condotte secondo un processo iterativo che porta alla totale definizione dei modelli CAD virtuali.

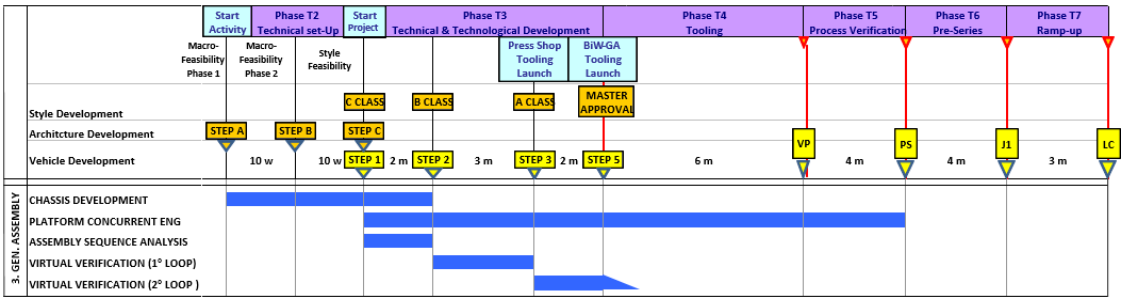


Figura 2.7 – Vengono rappresentati i periodi di esecuzione delle diverse attività svolte all'interno del General Assembly.

Il ciclo che definisce il modo di operare in quest'area è il seguente:

- Ricezione dei modelli CAD rilasciati dall'ente adibito alla progettazione;
- Analisi della fattibilità di montaggio utilizzando software Vismockup, Jack;
- Generazione di report sull'analisi ed eventuali aperture di schede di anomalia con richieste di modifiche e proposte di soluzioni;
- Nuovo rilascio dei file CAD;
- Analisi della fattibilità;
- Chiusura delle schede di anomalia con relativo report.

Questo loop si ripete fino alla risoluzione di tutti i problemi e al rilascio dei modelli CAD definitivi.

La gestione delle schede anomalia risulta essere un aspetto fondamentale per la riduzione delle tempistiche e per la valutazione dell'operato dell'ente. Ogni settimana infatti, come mostrato in figura 2.8, viene monitorato lo stato delle simulazioni e delle validazioni avvenuta con la chiusura delle schede anomalia.

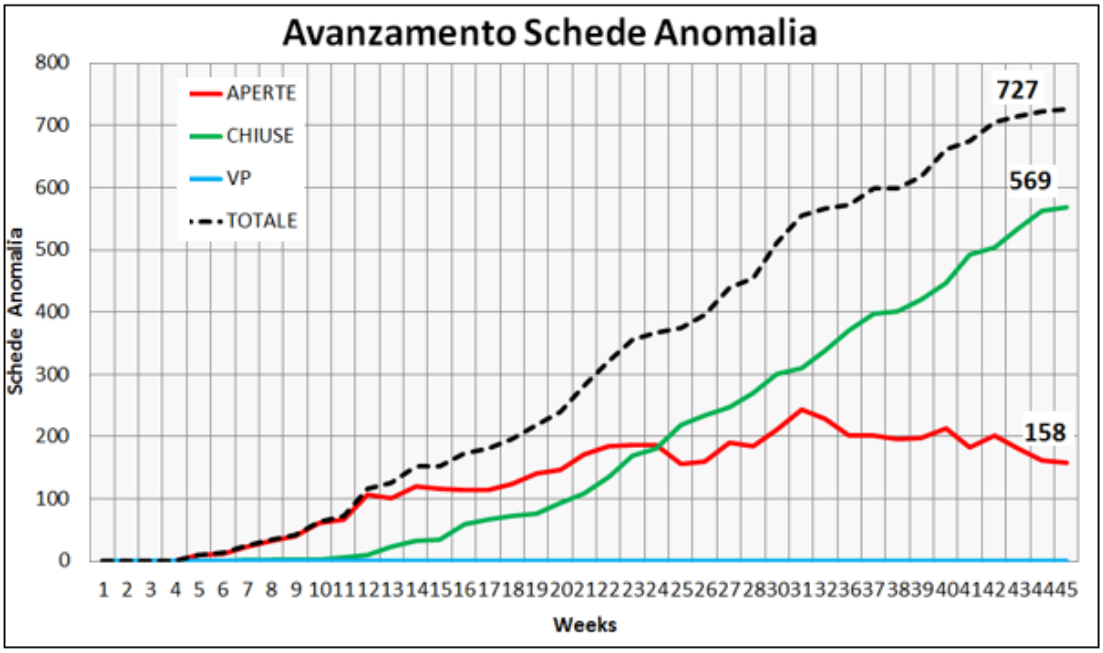


Figura 2.8 – Tramite questi grafici viene monitorato lo stato delle simulazioni effettuate.

Come illustrato tramite i seguenti grafici in figura 2.9, esiste inoltre un target relativo alla chiusura delle anomalie che viene definito in fase di pianificazione dello sviluppo prodotto. In questo modo è possibile confrontare periodicamente i trend per valutare lo stato dell'attività di fattibilità.

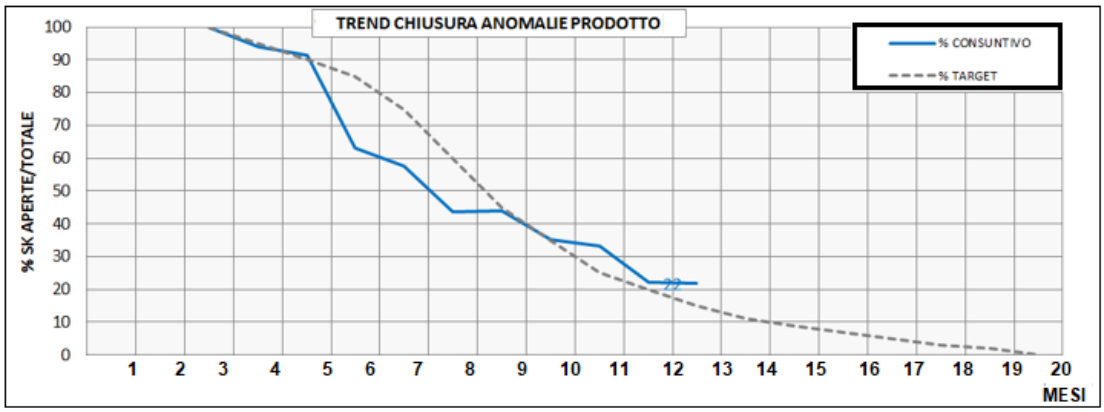


Figura 2.9 – Analisi grafica dello stato delle schede anomalia che sono state chiuse rispetto al trend ottimale.

La soluzione finale, in maniera utopistica, dovrebbe convergere verso una fase di snodo dello sviluppo del prodotto, il tooling kick off. Da questo momento viene autorizzata la

produzione degli stampi che daranno vita al modello del veicolo e ai componenti della vettura. Esso rappresenta un punto di non ritorno per il progetto. Da questo momento ogni modifica al progetto comporterà infatti dei costi aggiuntivi.

Si riporta pertanto nel prossimo paragrafo la risoluzione di un caso reale di montaggio tramite l'utilizzo delle simulazioni virtuali.

2.3. Verifica installazione batteria Alfa Giulia

I modelli matematici del veicolo vengono generati dall'ente Product Development (PD) e vengono forniti all'ente AME Product che ha il compito di effettuare delle verifiche e simulazione virtuali per il raggiungimento della fattibilità del prodotto. Nel caso della simulazione che verrà mostrata, si è agito cercando di garantire i requisiti per il montaggio corretto del componente che verrà analizzato.

Lo scopo della trattazione non è di riprodurre fedelmente tutti i passaggi seguiti da dipendenti e ingegneri di FCA per il raggiungimento della soluzione finale. Si cercherà invece di comprendere come il percorso di sviluppo del prodotto venga portato a termine tramite una procedura iterativa dove i modelli vengono modificati tenendo conto, sia dell'aspetto strutturale che di quello legato alla fattibilità di montaggio.

Precedentemente è stato spiegato che i rilasci ufficiali delle parti CAD avvengono nel rispetto delle tempistiche prefissate da un modello di pianificazione del lavoro. I modelli matematici delle parti diventano più precisi e dettagliati quanto più ci si avvicina alle fasi di snodo del processo, come ad esempio la delibera all'acquisto delle attrezzature.

Verrà quindi messo in evidenza come i primi assiemi di lavoro forniti dalla progettazione non presentino tutte le caratteristiche e i dettagli di cui è costituito il veicolo e siano adatti solo a delle verifiche di carattere generale. Alla luce delle difficoltà riscontrate nella prima fase di verifica, verranno mostrati i modelli in evoluzione dove si potranno notare le modifiche apportate. Facendo riferimento alla figura 2.7 è possibile collocare temporalmente le due simulazioni che verranno mostrate. Approssimativamente la prima verifica sarà relativa ad uno step 2, mentre la seconda riguarderà uno stato più avanzato dei modelli e presumibilmente vicino allo step 3.

Il caso che verrà analizzato riguarda il montaggio della batteria elettrica nell'Alfa Romeo Giulia.

Il gruppo FCA divide i modelli per categorie che vengono chiamate segmenti. L'obiettivo finale per l'ottimizzazione della produzione, sarebbe quello di avere uno standard unico

per ogni modello, delle soluzioni già sperimentate da adattare ad ogni contesto. Tuttavia accade spesso che per dei modelli servano soluzioni studiate ad hoc. Lo standard per l'installazione della batteria ad esempio, avrebbe previsto un montaggio del componente nel vano anteriore. Nelle figure 2.10 e 2.11 vengono riportati gli oggetti utilizzati e le fasi dell'intera operazione di montaggio.

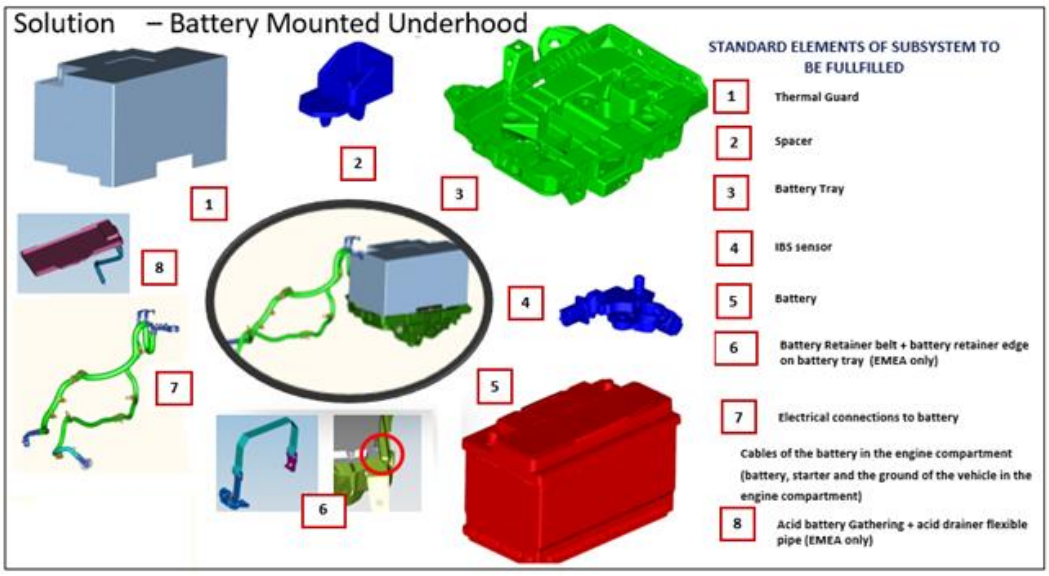


Figura 2.10 – Insieme dei componenti utilizzati per il montaggio delle batterie secondo lo standard.

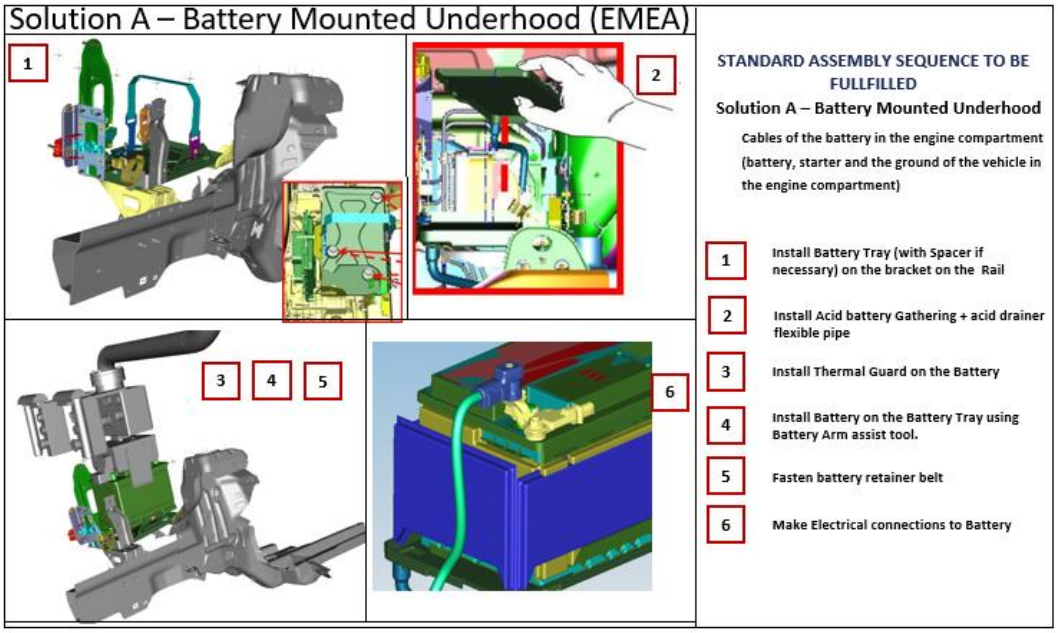


Figura 2.11 – Descrizione delle varie fasi riguardanti il montaggio della batteria secondo lo standard.

Tuttavia nella linea delle auto sportive, il gruppo FCA monta il componente nel vano posteriore per distribuire al meglio i pesi nel veicolo e per risolvere il problema degli spazi all'interno del vano motore.

2.3.1. Impostazione della simulazione

Il macro-ciclo

Per impostare la simulazione è necessario prima di tutto studiare il macro-ciclo. Esso rappresenta la guida del processo produttivo del veicolo. Si tratta di un file Excel stilato dall'ente AME Process in collaborazione con il General Assembly che descrive in maniera dettagliata quali siano le varie stazioni di lavoro, le altezze caratteristiche, alcuni strumenti utilizzati e una prima valutazione del tempo di lavoro. L'operazione oggetto della simulazione viene eseguita nella workstation 93 e fa parte del processo Chassis 4 (figura 2.12).
Le operazioni all'interno della parte dello stabilimento adibita al montaggio sono divise in questo modo:

- Pre-trim
- Trim,1,2,3
- Chassis 1
- Decking
- Chassis 2,3,4,5,6
- Final 1,2,3

Dal macrociclo possono essere estratti inoltre alcuni dettagli dell'operazione: il veicolo si trova ad una distanza da terra di 630 mm, l'utente è posizionato nella parte posteriore dell'automobile ed ha a disposizione un manipolatore che servirà appunto per l'installazione della batteria. La sequenza delle attività che esso svolgerà sono:

- Sistemazione cavi zona batteria;
- Montaggio batteria;
- Lettura tracebility batteria;
- Applicazione tappo su foro fissaggio batteria;
- Applicazione pipetta tubo sfiato su batteria;
- Montaggio tubo scolo acido.

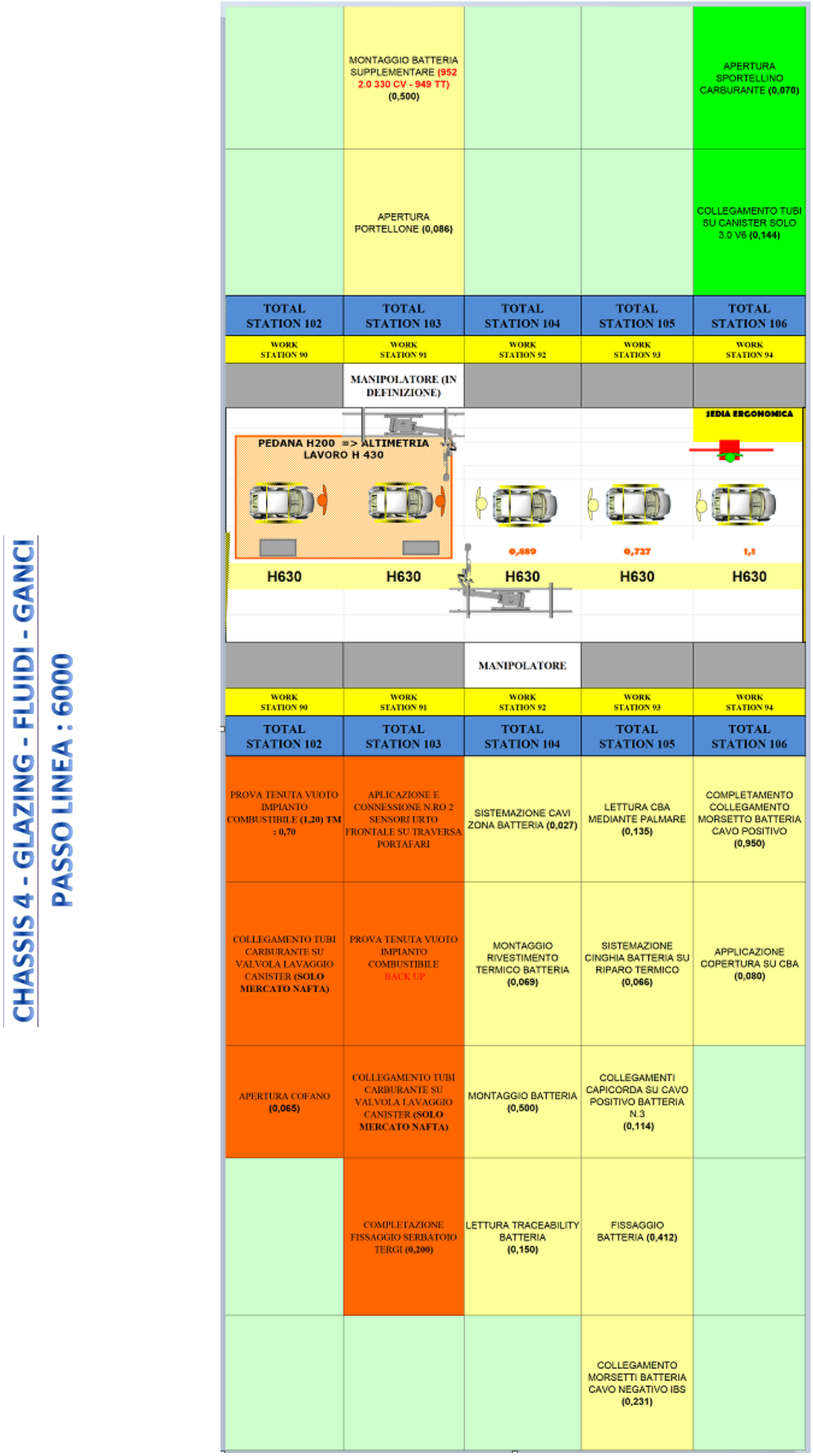


Figura 2.12 – Schematizzazione, estratta dal macrociclo dell'Alfa Giulia, relativa al montaggio della batteria.

Le principali informazioni sull'operazione svolte, utili per la simulazione sono riassunte nella seguente tabella 2.1.

Tabella 2.1 – Principali informazioni sull'operazione svolta.

Peso componente	24.6 Kg
Distanza del pallet dalla vettura	1m
Attrezzatura	Annullatore di peso Dalmec.
Sequenza operazioni	➢ Sollevare il partner con la batteria e disporsi a scocca zona vano baule posteriore. ➢ Posizionare la batteria mediante partner in zona vano baule lato dx portandola a battuta verso passaruota. ➢ Sganciare le alette di presa del partner dalla batteria, abbassare le maniglie di aggancio presenti e richiuderle in sede batteria. ➢ Estrarre il partner da vano baule e portarlo fuori ingombro a lato linea (zona asservimento/carico batterie).

Le informazioni riportate fino ad ora sono molto importanti per l'impostazione della simulazione e per acquisire consapevolezza del contesto in cui si inserisce il processo per poter proporre un miglioramento.

Ergonomia

Le verifiche vengono effettuate anche per garantire all'operatore i canoni stabiliti dalla normativa per la sicurezza sul lavoro. Per questo l'ente addetto agli studi ergonomici fornisce delle guide su come eseguire una simulazione nel rispetto delle specifiche. I principali punti per una verifica di fattibilità ergonomica sono:

- L' impostazione dell'altimetria e delle condizioni geometriche della vettura in ambiente virtuale Teamcenter Vismockup;
- La scelta del manichino virtuale in funzione della popolazione lavorativa;
- I parametri ergonomici da monitorare in fase di verifiche di fattibilità.

Le presenti linee guida si applicano in fase di analisi virtuale di fattibilità a tutte le postazioni di lavoro manuali per la valutazione ergonomica dei seguenti aspetti:

- Posture di lavoro incongrue;
- Azioni di forza;
- Movimentazione manuale dei carichi: sollevamento.

I parametri che vengono forniti di seguito non rappresentano le indicazioni fornite dalla normativa ma sono soltanto una prima indicazione di controllo. I casi più particolari infatti vengono analizzati da un ente specializzato sugli studi di ergonomia degli operatori nel lavoro.

I parametri riferiti alla postura dell'operatore sono indicati nella tabella 2.2 e possono essere controllati direttamente dalle impostazioni del software.

Tabella 2.2 – Limiti posturali per la corretta una corretta valutazione ergonomica

Tronco	Flessione frontale	0°-40°
	Rotazione assiale	0°-10°
	Piegamento laterale	0°-10°
Arti superiori	Elevazione	0°-60°

Nel caso in cui l'operazione analizzata preveda il raggiungimento di un oggetto o di un'area di lavoro attraverso un varco di accesso, è necessario verificare le luci disponibili in funzione della tipologia di presa. In figura 2.13 si riportano le casistiche più ricorrenti.

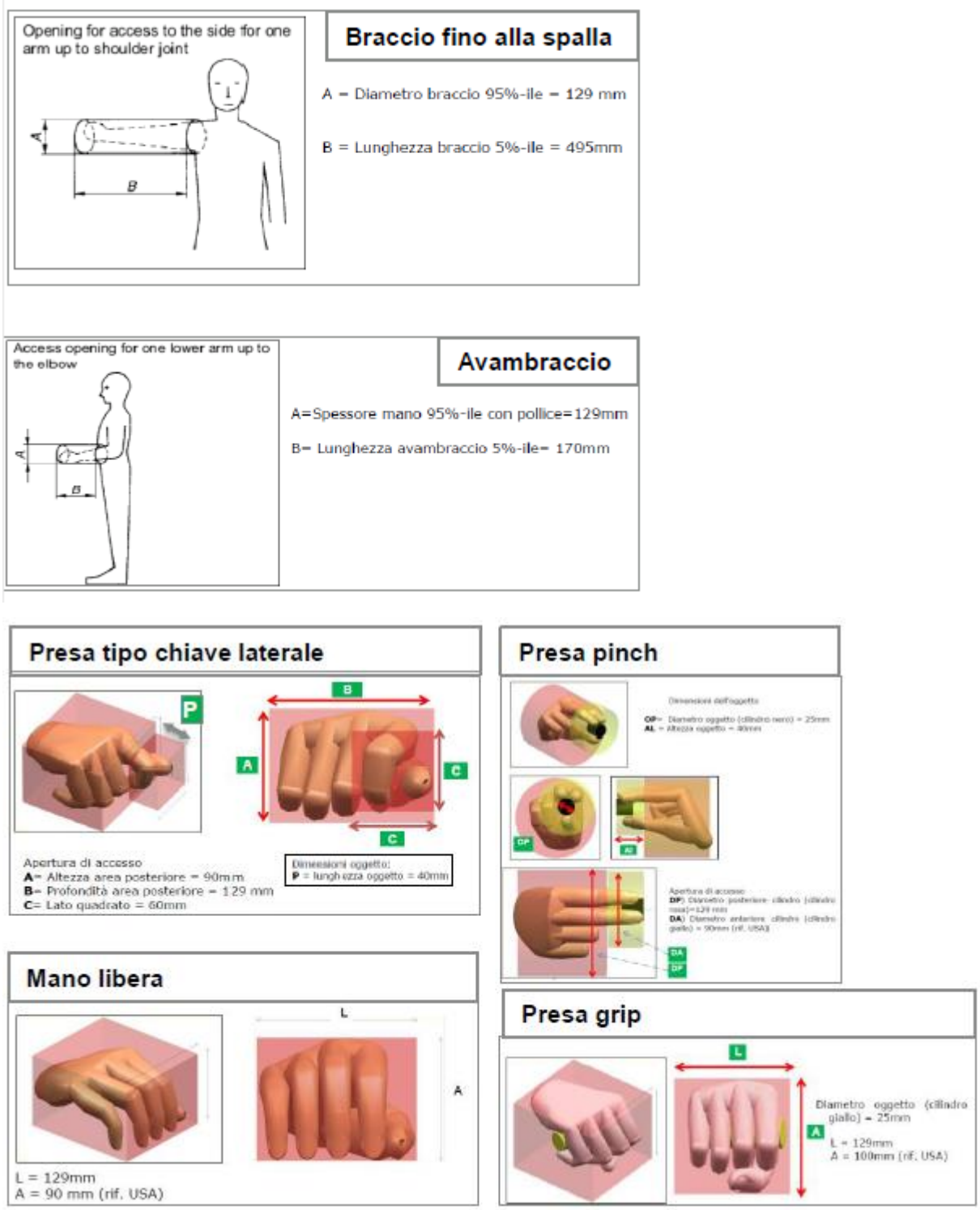


Figura 2.13 – Luci minime per l'accessibilità di mani e braccia.

Per tutti i componenti da movimentare manualmente è necessario richiedere al Product Development il valore del peso a progetto. Per le attività che richiedono il sollevamento

manuale di oggetti dal peso superiore ai 3 kg è invece necessario richiedere agli specialisti ergonomi una valutazione ergonomica di dettaglio.
Nel caso in cui l'attività analizzata implichi l'applicazione di forza esercitata con la mano è necessario verificare che le forze a progetto rispettino i limiti definiti in figura 2.14.

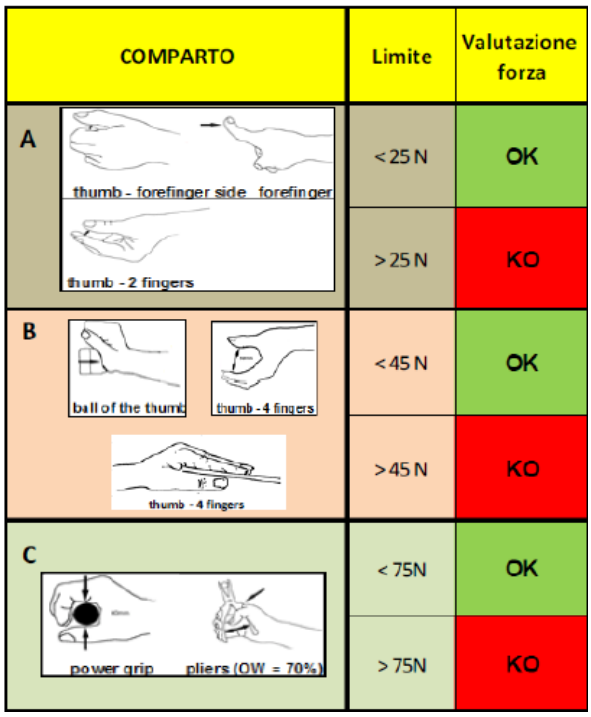


Figura 2.14 – Principali limiti per l'applicazione della forza per alcuni punti della mano.

In conclusione i mezzi a disposizione per effettuare la simulazione sono riassunti di seguito:

- Macrociclo: ufficializzato da AME_Process /ME_GeneralAssembly;
- Quadri di montaggio: Ufficializzato da AME_BiW;
- Process Flow: ufficializzato da AME_Process BiW;
- Peso degli oggetti da movimentare: ufficializzato da PD;
- Carichi di inserimento e forze di azionamento: ufficializzato da PD;
- Attrezzature di lavoro: ufficializzato dal Manufacturing Engineering (ME).

Altri vincoli: parametri di controllo

I modelli dall'ente che sviluppa la fase progettuale del prodotto vengono forniti in posizione "nominale" a chi effettua le simulazioni. Questa posizione rappresenta la configurazione finale della vettura e raffigura gli oggetti nella posizione ideale per il

montaggio reale. Per verificare che un oggetto sia assemblabile si opera nel senso inverso: a partire dalla posizione nominale viene verificato che i componenti si possano "disassemblare" senza collisioni tra oggetti, verificando le luci di passaggio delle parti del corpo umano e degli attrezzi e garantendo che l'operazione sia sicura per l'operatore. In questo modo è garantita la fattibilità di montaggio.

Riferimento veicolo

In FCA i modelli delle vetture fanno fede ad un unico sistema di riferimento. In figura 2.15 viene mostrata la terna degli assi per il modello
preso in considerazione e una descrizione delle parti oggetto della verifica.

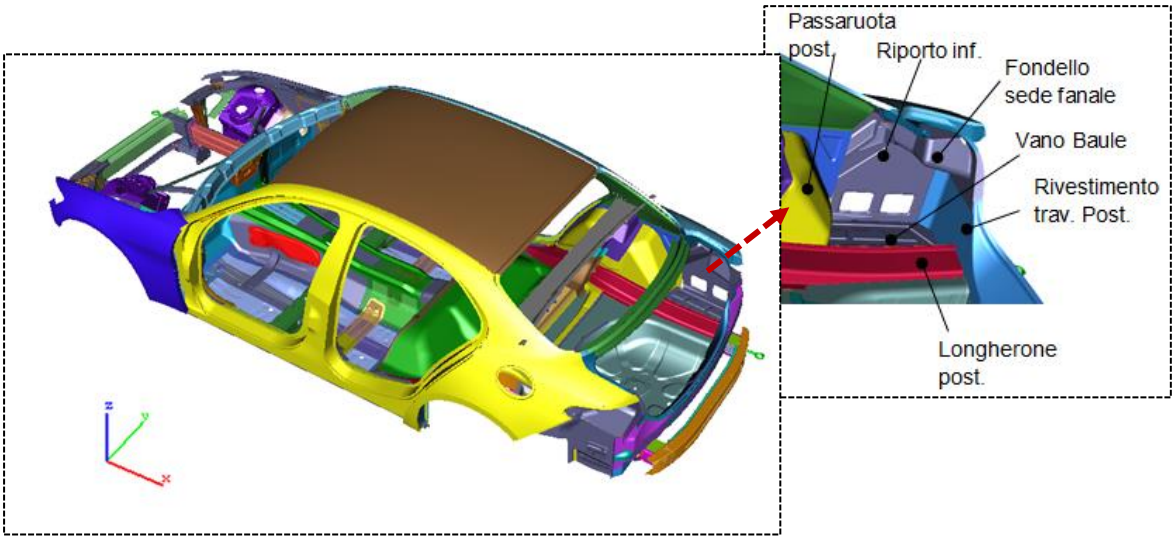


Figura 2.15 – Modello del veicolo utilizzato per il primo step della simulazione con uno zoom sulla sede della batteria.

2.3.2. Prima fase della simulazione

Bozza del modello

La prima fase di simulazione si inserisce in un contesto non ancora perfettamente definito. Il prodotto infatti si trovo in uno stato embrionale dello sviluppo in cui si studiano le soluzioni più adeguate e si cerca di ottimizzare la futura produzione. L'ente adibito alla progettazione fornisce dei modelli matematici degli oggetti non completamente definiti. In questo caso infatti le geometrie e i riferimenti degli oggetti non sono completi; si tratta di un primo modello adatto ad effettuare delle macro verifiche.

Inizialmente viene svolta una simulazione per verificare che non vi siano criticità nell'attività svolta dall'operatore. Per impostare la condizione di lavoro vengono estratte le informazioni relative all'altimetria dal macro-ciclo; la distanza tra la scarpa del manichino (corrispondente alla quota 0 del suolo) e il riferimento del gancio web deve essere pari a 630 mm (figura 2.16).

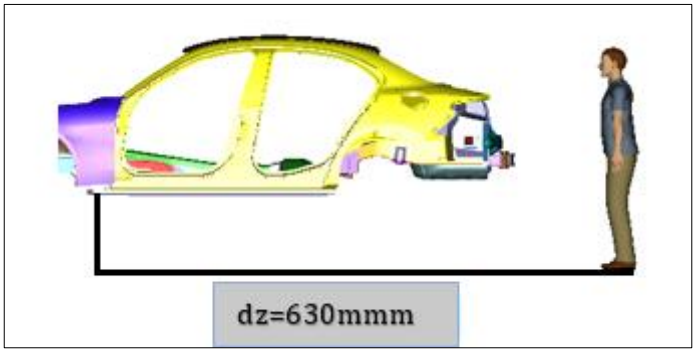


Figura 2.16 – Impostazione della quota altimetrica per l'inserimento dell'uomo nell'ambiente virtuale.

L'operatore viene posizionato in prossimità della zona di lavoro; il manipolatore disegnato rappresenta un modello ideale. In questa fase dello sviluppo infatti, non si è ancora a conoscenza della attrezzatura che verrà utilizzata. In figura 2.17 viene messo in evidenza come la postura del manichino, anche nella situazione poco probabile in cui la presa dello strumento da parte dell'addetto avvenga in una posizione molto interna del veicolo, non risulti critica. Si conclude pertanto che l'operazione è ergonomicamente corretta e la quota altimetrica è adeguata.

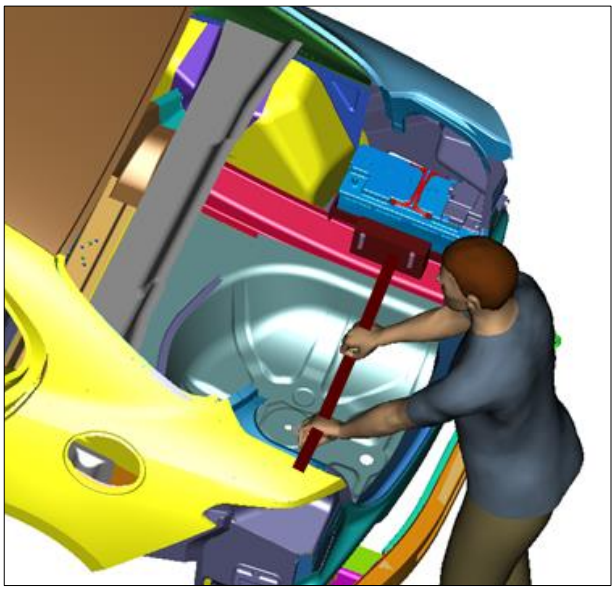


Figura 2.17 – Rappresentazione grafica della prima simulazione per la verifica della postura dell'operatore.

La verifica dell'installazione della batteria avviene per due modelli, da utilizzare nella vettura, con differente capacità e dimensione. Le principali caratteristiche geometriche, utili per la simulazione, sono evidenziate in figura 2.18.

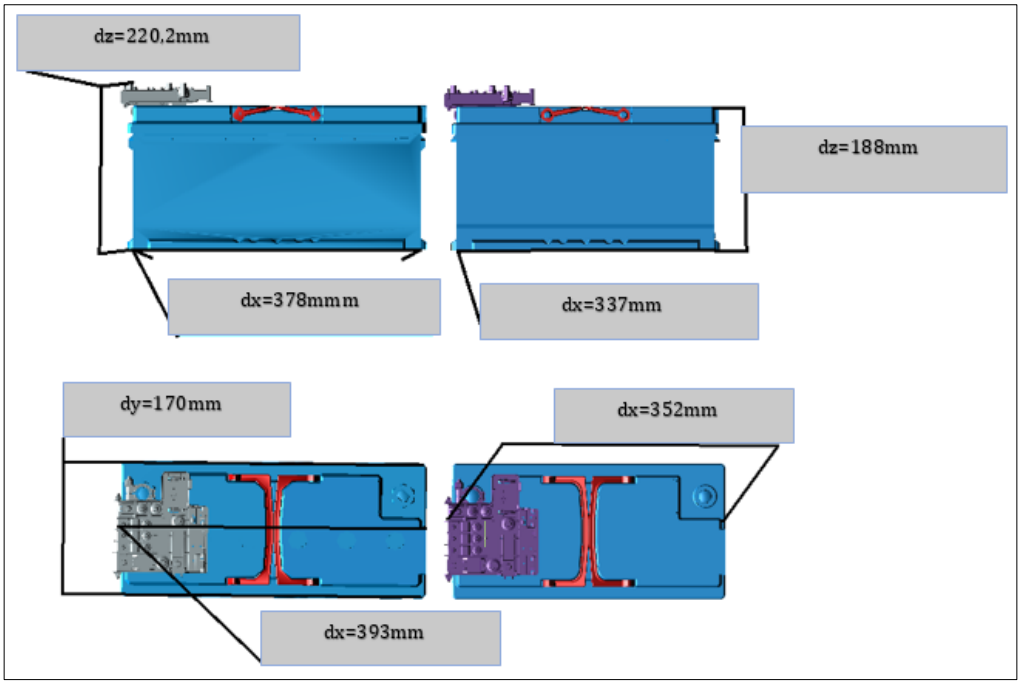


Figura 2.18 – Principali dimensioni delle batterie interessate all'operazione di montaggio del primo step di simulazione.

La verifica che viene illustrata si articola nei seguenti punti:

1. Batteria 95Ah in posizione nominale e verifica dell'estrazione senza coperchio;
2. Batteria 110Ah in posizione nominale e verifica dell'estrazione senza coperchio.

Per ogni batteria verranno presentate due configurazioni che differiscono per l'orientamento dei poli; una volta disposti verso l'esterno della vettura ed una volta disposti verso l'interno.

Analisi batteria 95Ah

Configurazione 1: poli verso lato esterno

In questa configurazione, i poli delle batterie sono rivolti dalla parte opposta rispetto all'accesso dell'operatore, cioè verso l'esterno della vettura.

La batteria in posizione nominale non mostra interferenze con altri componenti. Si riscontra una quota estremamente ridotta per via del montaggio del coperchio della centralina CBA (figura 2.19).

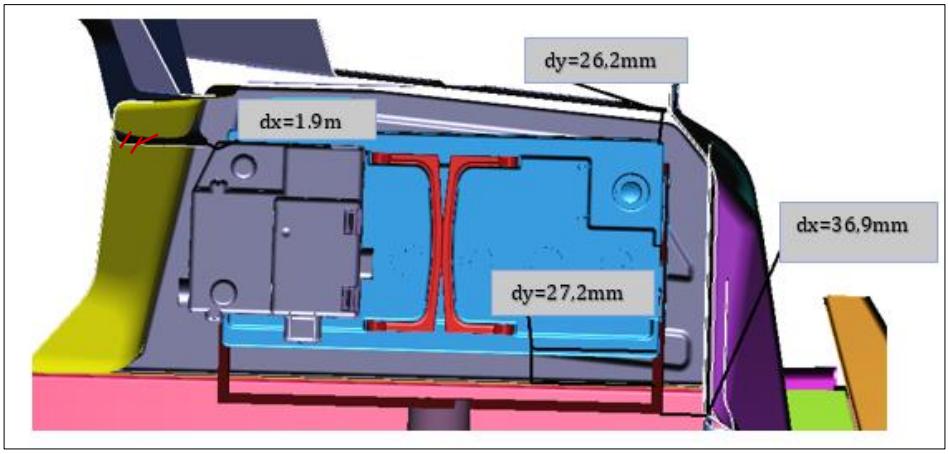


Figura 2.19 – Batteria piccola da 95Ah in posizione nominale nella prima configurazione.

L'estrazione avviene agevolmente con due movimenti: una traslazione verticale lungo Z (108mm) che libera lo spazio per l'estrazione e una lungo Y che disimpegna totalmente l'oggetto. In figura 2.20 vengono mostrate le distanze critiche durante l'estrazione.

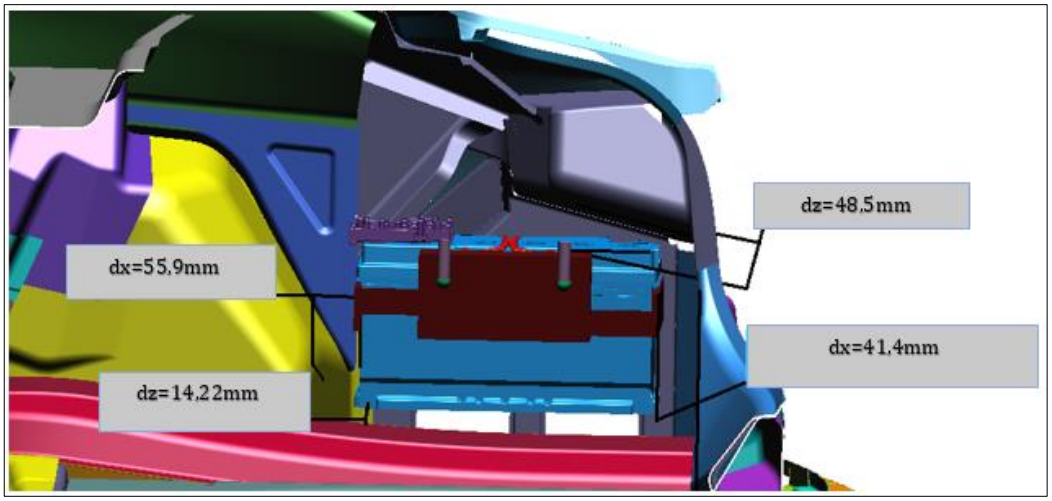


Figura 2.20 – Luci di passaggio durante la fase di estrazione della batteria da 95Ah nella configurazione 1.

Configurazione 2: poli verso lato interno

Viene proposta la modifica mostrata in figura 2.21, dove la batteria ha i poli rivolti verso l'interno della macchina per facilitare il collegamento dei cavi da parte dell'operatore.

La batteria in posizione nominale non collide con altri oggetti nonostante lo spazio sia molto ristretto.

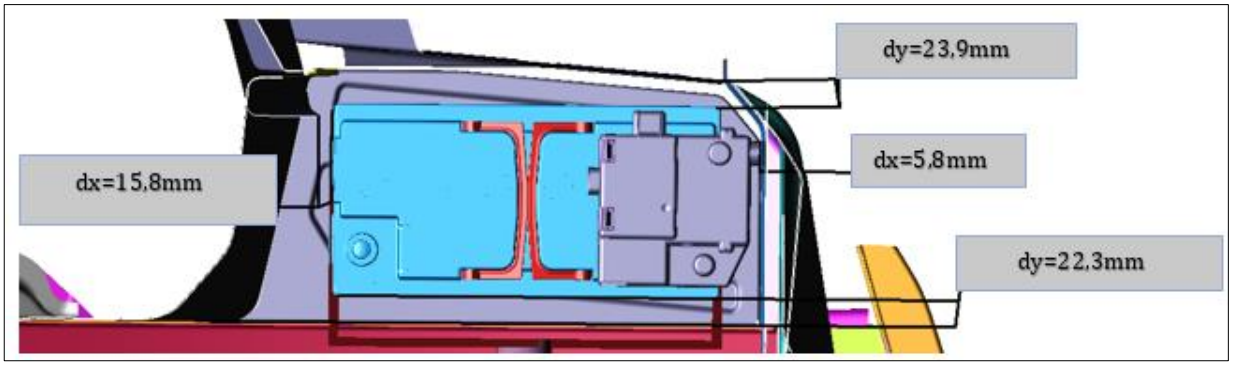


Figura 2.21 – Batteria piccola da 95Ah in posizione nominale nella seconda configurazione.

L'estrazione avviene eseguendo le seguenti operazioni:

- traslazione dell'oggetto verticalmente in direzione Z fino a che la centralina CBA della batteria non arrivare in battuta con il fondello fanale (figura 2.22);
- traslazione in direzione Y per superare l'ostacolo rappresentato dalla lamiera (di colore blu nell'immagine);
- Seguire il profilo del fondello fanale con movimento nel piano XZ verticalmente fino a che non viene liberato il sottosquadro che impedisce la totale estrazione del componente (figura 2.23);

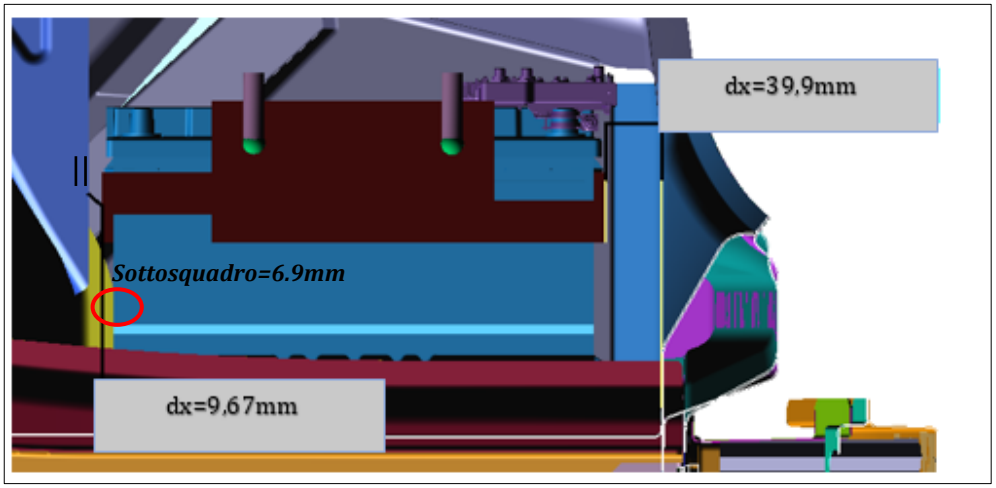


Figura 2.22 – La batteria da 95Ah viene portata in battuta con il fondello fanale ma lo spazio in direzione Z non è ancora sufficiente all'estrazione per via del sottosquadro evidenziato in rosso.

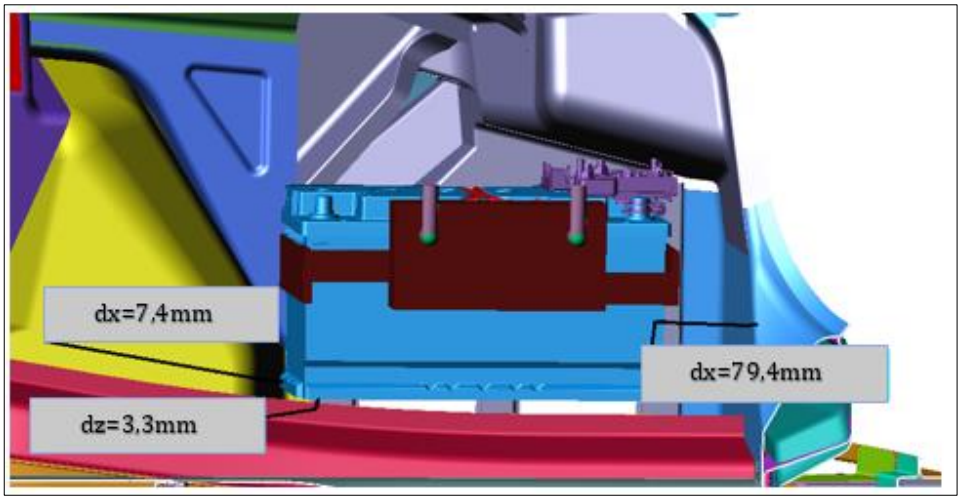


Figura 2.23 – Luci di passaggio durante la fase di estrazione della batteria da 95Ah nella configurazione 2.

Dall'analisi svolta si conclude che il vincolo in quest'operazione è rappresentato dalla forma del fondello fanale che ostruisce l'estrazione. L'operazione risulta essere fattibile ma molto complessa per via delle luci di passaggio estremamente ridotte.

Analisi batteria 110Ah

Configurazione 1: poli verso lato esterno

La soluzione che presenta i poli della batteria rivolti verso l'esterno della vettura, come mostrato in figura 2.24, non presenta interferenze. Si riscontra una zona critica tra la batteria e il passaruota esterno posteriore dove si misura una distanza di circa 2 mm.

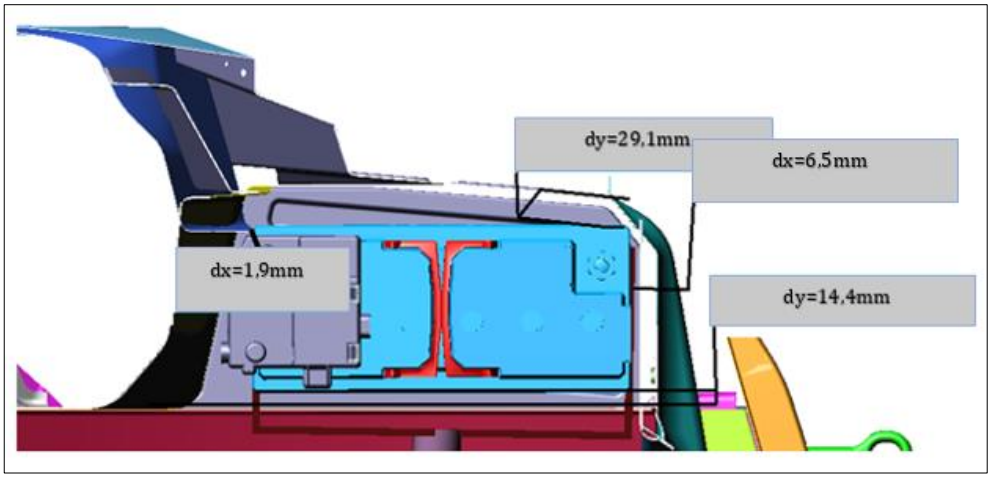


Figura 2.24 – Batteria grande da 110Ah in posizione nominale nella prima configurazione.

Tuttavia l'estrazione risulta teoricamente fattibile con due movimenti lineari, verticale in direzione Z e lungo l'asse Y (figura 2.25).

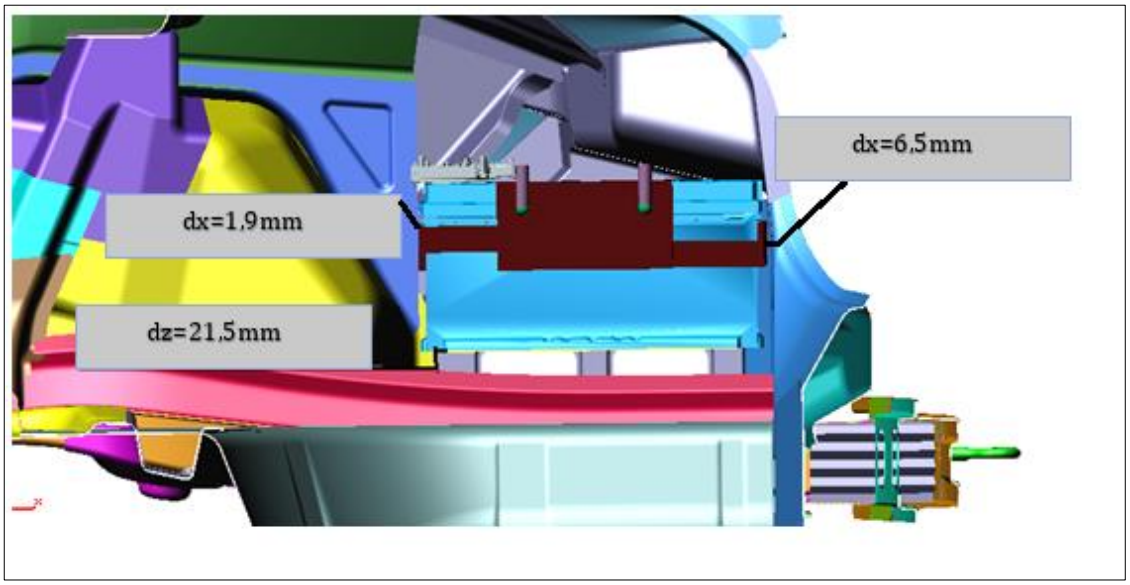


Figura 2.25 – Batteria da 110Ah in battuta con il fondello fanale, le luci di passaggio consentono l'estrazione.

Configurazione 2: poli verso lato interno

La batteria da 110Ah risulta essere più lunga nella direzione X rispetto alla precedente e questo comporta che la centralina CBA installata sul polo positivo della batteria vada in interferenza con il rivestimento della traversa posteriore (figura 2.26)

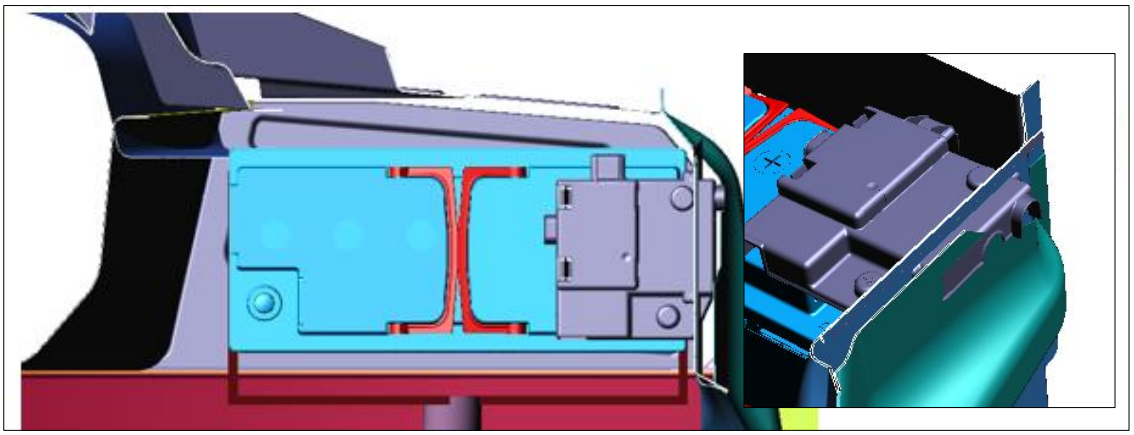


Figura 2.26 – La batteria da 110Ah in posizione nominale con il coperchio interferisce con il rivestimento della traversa posteriore.

Inoltre pur modificando il vano della batteria per un corretto adattamento in posizione nominale, i problemi durante l'estrazione sarebbero gli stessi riscontrati per la medesima configurazione nel caso della batteria da 95Ah. La differenza in questo caso è rappresentata dal fatto che non sia ammessa una traslazione lungo X per via dell'interferenza mostrata sopra (figura 2.27).

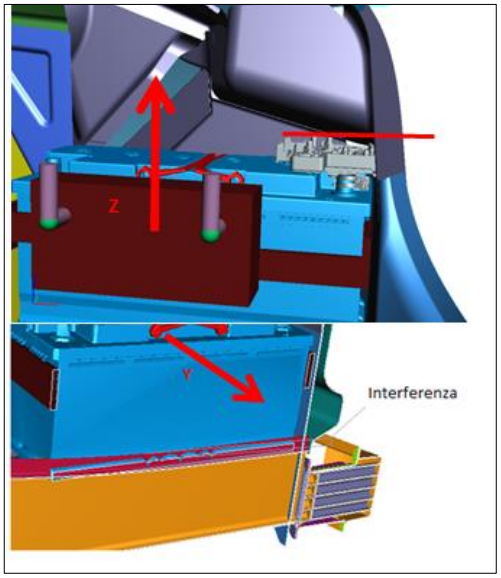


Figura 2.27 – La batteria grande d 110Ah portata in battuta con il fondello fanale presenta un sottosquadro che rende impossibile l'estrazione.

Nella tabella 2.3 si riportano le principali informazioni sulle simulazioni analizzate.

Tabella 2.3 – Dati riassuntivi della simulazione effettuata.

Batteria	**95Ah**		**110Ah**	
	Stato	*Luce min.*	*Stato*	*Luce min.*
Conf.1 poli esterni	OK	dz=14,22mm	OK	dx= 1,9mm
Conf.2 poli interni	OK	dz=3,35mm	KO	//

2.3.3. Seconda fase della simulazione

Nel precedente paragrafo si è visto come la prima fase della simulazione sia approssimativa; le geometrie non sono totalmente definite, mancano i riferimenti degli oggetti e il manipolatore è stato semplicemente modellato per fare una prima valutazione degli ingombri. I target definiti in fase di pianificazione dello sviluppo del

prodotto impongono che la definizione del progetto sia sempre più precisa tanto più ci si avvicina all'acquisto delle attrezzature. Arrivati al tooling kick off infatti, si va incontro ad aumento dei costi per le modifiche.

Differenza tra i modelli (dopo avanzamento step) e soluzioni

A seguito degli avanzamenti nello sviluppo degli step CAD, è possibile notare come il veicolo sia definito maggiormente nel dettaglio: è presente il portellone posteriore, tutti i fori per i fissaggi, vengono forniti i modelli dei cavi che verranno utilizzati e la vettura è molto vicina alla soluzione finale che andrà in produzione.
Nella zona di interesse per il montaggio della batteria, mostrata nella figura 2.28 si può notare la presenza di un oggetto che agirà da riscontro e i fori per l'inserimento di un galletto che completerà il fissaggio della batteria. Il primo foro verrà utilizzato in caso di installazione della batteria da 95Ah, mentre il secondo riguarda il fissaggio della batteria da 110Ah.

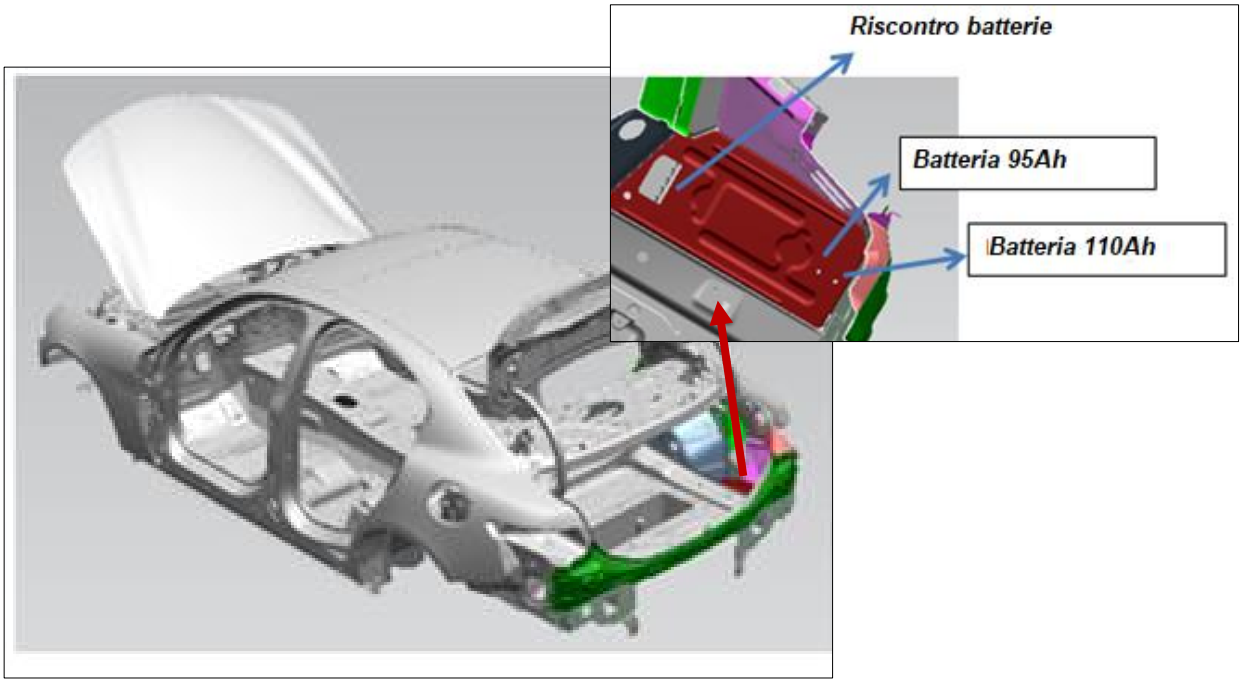


Figura 2.28 – Modello del veicolo utilizzato per il secondo step della simulazione con uno zoom sulla sede della batteria.

Durante questa fase avanzata della simulazione dunque si conoscono più nello specifico i passaggi e i componenti dell'operazione che verrà effettuata. In figura 2.29 vengono mostrati alcuni oggetti necessari per il fissaggio della batteria.

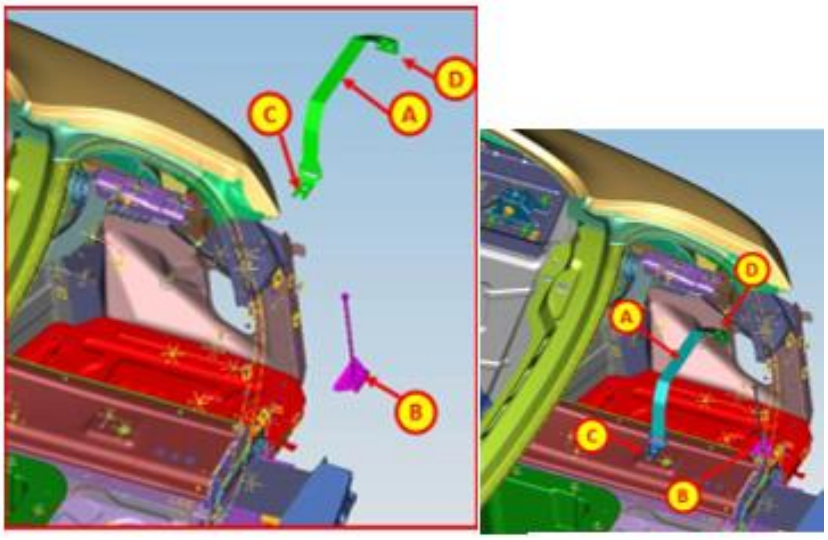


Figura 2.29 – Rappresentazione dei componenti necessaria per il fissaggio della batteria.

Le soluzioni adottate

Il modello riportato in questa seconda fase della simulazione è il frutto di un processo di sviluppo che ha seguito diversi step. La soluzione principale adottata dall'ente della PD in collaborazione con l'AMEp, è quella di utilizzare un altro modello di batterie con caratteristiche geometriche differenti. Questa soluzione risulta essere meno critica visto che le modifiche da adottare sulla carrozzeria sarebbero state troppo invasive. In figura 2.30 vengono mostrati i nuovi modelli di batteria. Rispetto alla proposta mostrata, relativa ad uno stadio iniziale del progetto, entrambe le batterie utilizzate sono 2 mm più corte in direzione Z mentre in direzione X la batteria da 95Ah è 39 mm più corta e quella da 110Ah, 42mm. In questo modo vengono aumentate le luci di passaggio e facilitata l'estrazione.

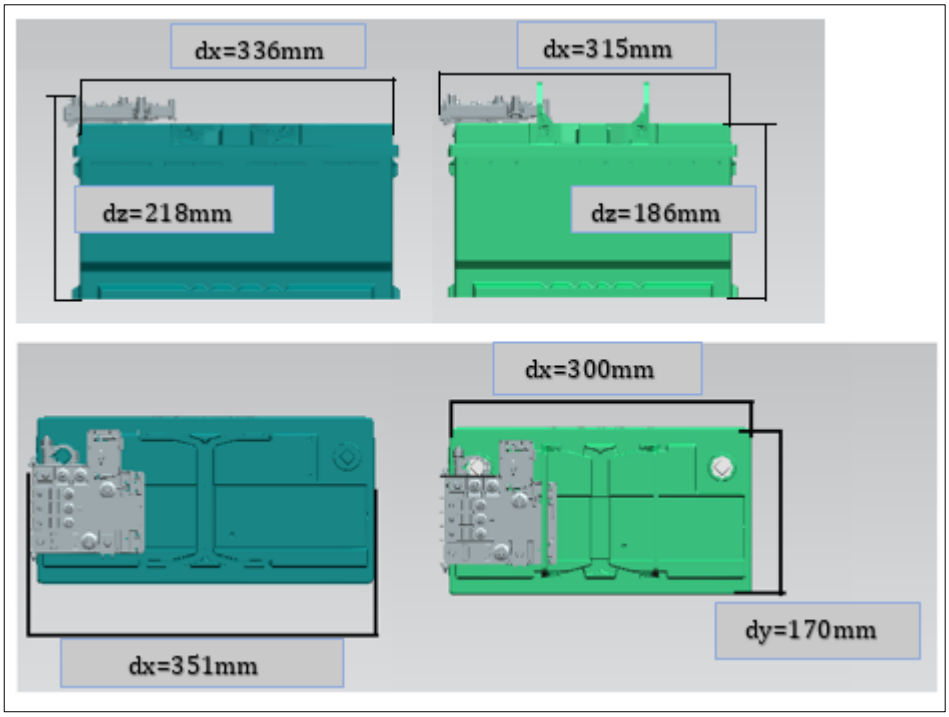


Figura 2.30 – Principali dimensioni delle batterie interessate all'operazione di montaggio del secondo step di simulazione.

Durante questa fase di simulazione è necessario verificare che il montaggio sia fattibile con le alette delle batterie aperte. Questo è necessario affinché la simulazione consenta di verificare al meglio l'operazione che avverrà in futuro. Di seguito verrà illustrata la verifica relativa all'utilizzo dell'attrezzatura specifica.

Partner per la manipolazione del pezzo

La figura 2.31 mostra l'applicazione di uno specifico partner per la manipolazione della batteria. Questo strumento può ruotare intorno all'asse Z di 180° e di pochi gradi intorno all'asse X; esso facilità il controllo di oggetti pesanti grazie ad un sistema per l'abbattimento del peso e risulta essere adatto per operazioni in cui non è richiesta un'elevata precisione.

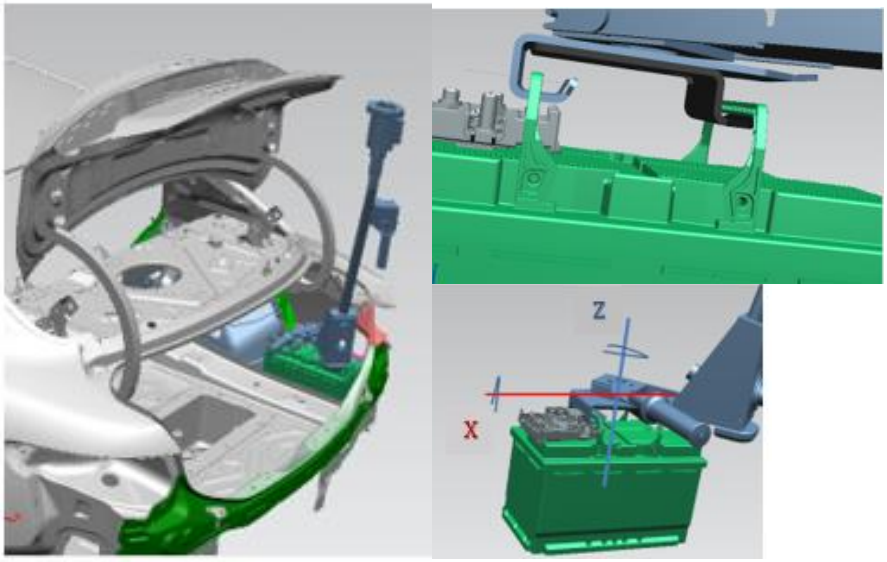


Figura 2.31 – Abbattitore di peso che verrà utilizzato nel processo di montaggio.

L'operazione di posizionamento della batteria con lo strumento mostrato, risulta essere ergonomicamente corretta; i parametri imposti dalle schede precedentemente illustrate sono infatti rispettati. L'inclinazione della colonna vertebrale dell'operatore, è di circa 20° e risulta essere in linea con gli standard (figura 2.32).

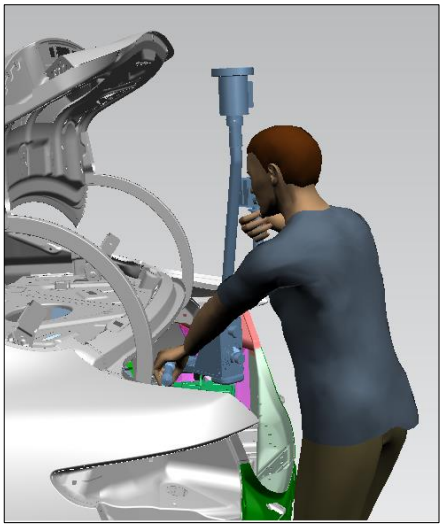


Figura 2.32 – Verifica ergonomica della postura dell'operatore. L'inclinazione frontale del tronco è pari a 20°.

Di seguito verranno mostrate le verifiche per le due batteria nella sola configurazione 1. Si potrà notare infatti, come esse vengano posizionate con i poli rivolti verso l'esterno del veicolo contrariamente a quanto proposto nella prima fase di simulazione.

Inizialmente infatti, era stata valutata più efficiente l'opzione relativa all'installazione della batteria con i poli rivolti verso l'interno della macchina per facilitare l'accesso dell'operatore durante le operazioni di fissaggio e collegamento dei cavi. Questo però, come osservato durante le prima simulazione, comportava che la centralina CBA risultasse essere un ostacolo durante il montaggio in quanto collideva con il fondello fanale. Nonostante quest'ultimo problema sia stato risolto in parte con l'utilizzo di batterie meno ingombranti, si è studiato che avendo la centralina della batteria dal lato opposto rispetto al fondello fanale, si ha un notevole risparmio sull'acquisto dei cavi. Per poter avere sia i poli della batteria rivolti verso l'interno della vettura, sia avere la centralina CBA come in figura 2.33, sarebbe stato necessario acquistare una batteria a poli invertiti di costo nettamente maggiore.

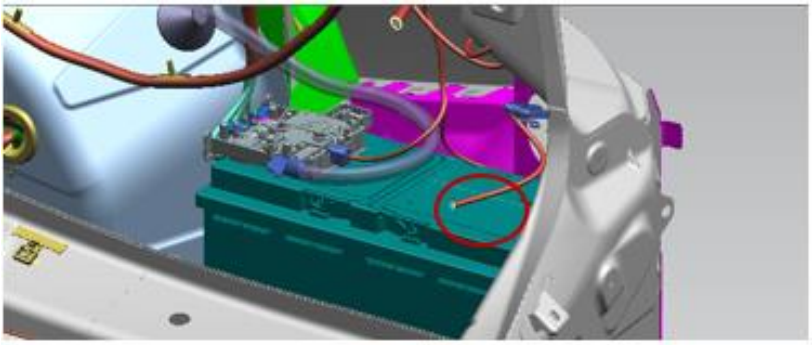


Figura 2.33 – Configurazione finale della batteria che consente di ottenere un risparmio sull'acquisto dei cavi.

Batteria 95Ah

La seguente figura 2.34 riporta la batteria in posizione nominale. In questo caso è possibile osservare come la essa abbia maggior spazio all'interno del vano.

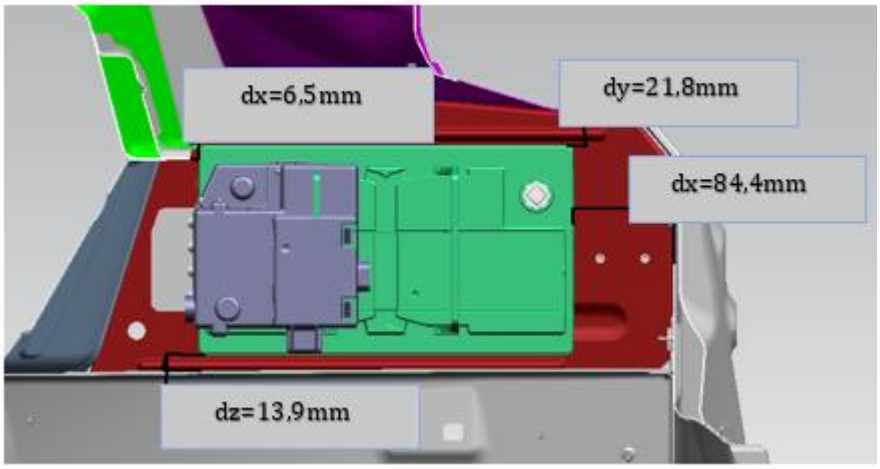


Figura 2.34 – Batteria piccola da 95Ah in posizione nominale per il secondo step di simulazione.

In fase di verifica di estrazione non ci sono problemi di collisione e con i soli movimenti in direzione Z e Y è possibile completare l'operazione. In figura 2.35 vengono riportate le dimensioni delle luci di passaggio.

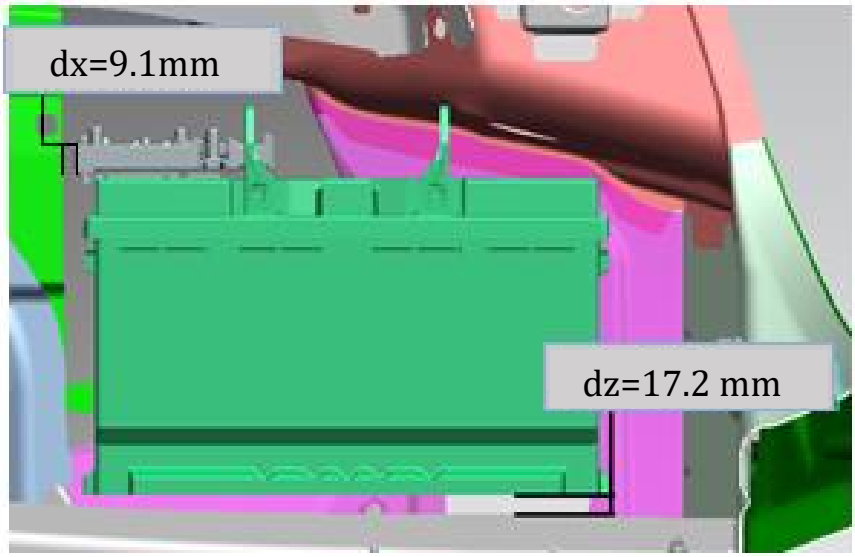


Figura 2.35 – Batteria piccola da 95Ah con le alette per la presa in battuta con il fondello fanale. Le luci di passaggio sono adeguate per l'estrazione.

2.3.3.1. Batteria 110Ah

In figura 2.36 la batteria in posizione nominale.

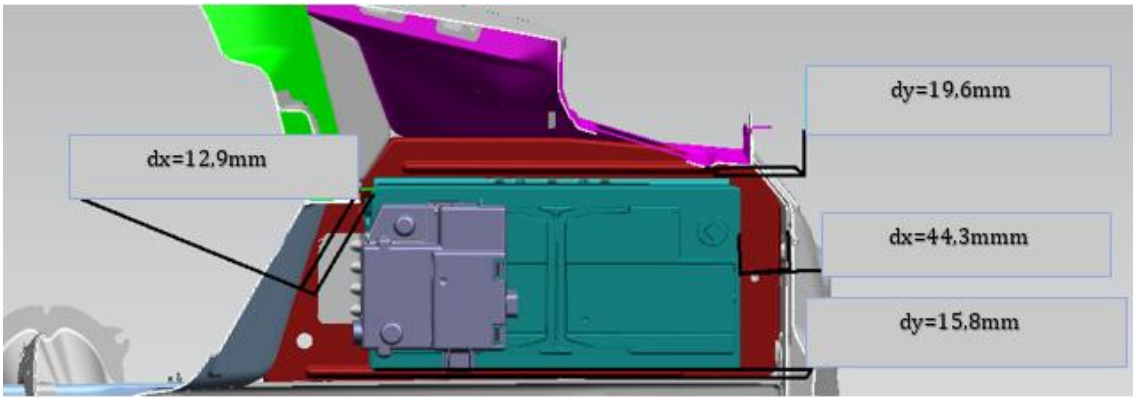


Figura 2.36 – Batteria grande da 110Ah in posizione nominale per il secondo step di simulazione.

L'estrazione risulta essere più complessa rispetto alla batteria precedente ma è comunque fattibile. Nelle figure 2.37 e 2.38 si riporta la sequenza di estrazione. Le operazioni effettuate sono:

- traslazione verticale fino ad andare in battuta con il fondello fanale;
- traslazione lungo l'asse y per evitare l'ostacolo della lamiera (verde nell'immagine);
- traslazione lungo X;
- traslazione verticale in Z;
- estrazione finale in direzione y.

Nonostante le luci di passaggio per la batteria in questo caso siano molto ristrette, l'operazione risulta essere corretta.

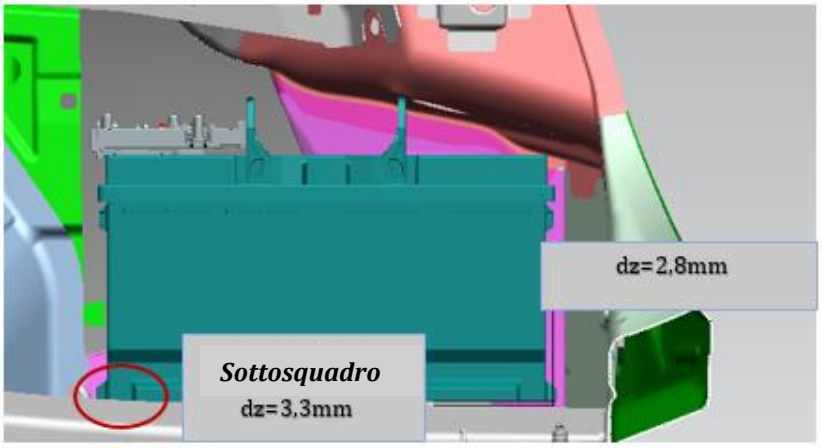


Figura 2.37 – Batteria grande da 110Ah con le alette per la presa in battuta con il fondello fanale. È presente un sottosquadro che impedisce l'estrazione.

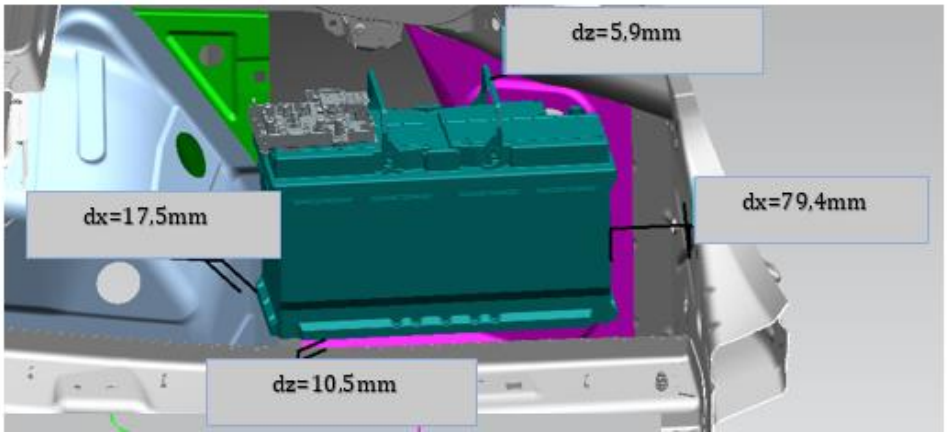


Figura 2.38 – Estrazione finale della batteria grande da 110Ah con rispettive luci di passaggio.

La seguente tabella 2.4 riassume il risultato della simulazione.

Tabella 2.4 – Dati riassuntivi della simulazione effettuata.

Batteria	**95Ah**		**110Ah**	
	Stato	*Luce min.*	*Stato*	*Luce min.*
Conf.1 poli esterni	OK	dx=9,1mm	OK	dz=5,9mm

2.4. Considerazioni finali

Riepilogo

Per riassumere quanto visto fino ad ora, si osserva che la prima fase di simulazione è servita a mettere in luce le problematiche relative all'operazione di montaggio. La possibilità di studiare diverse soluzioni tramite un prototipo digitale ha consentito di risparmiare sui costi legati alle modifiche sul modello reale. Nella seconda fase di simulazione infatti, la verifica sulle nuove batterie ha dimostrato l'effettiva fattibilità di montaggio.

È stato possibile inoltre constatare che:

- l'operatore potesse lavorare nel rispetto dei vincoli per la tutela della salute;
- ci fosse la necessità di installare delle batterie di dimensioni ridotte rispetto alla proposta iniziale;
- il posizionamento all'interno del vano potesse essere ottimizzato per un risparmio sull'acquisto dei cavi.

L'operazione descritta in precedenza risulta essere fattibile ed è totalmente controllata dall'operatore. Esso dunque effettua una serie di attività come riportato nel macro-ciclo. Essendo però le luci di passaggio della batteria particolarmente ristrette, l'azione risulta essere complessa. Per l'installazione infatti sono necessari, ad esempio nel caso della batteria da 110Ah, una serie di movimenti millimetrici che rendono l'operazione di montaggio difficoltosa.

Dopo il posizionamento dell'oggetto inoltre, il lavoratore deve effettuare una serie di operazioni sporgendosi verso l'interno del vano come collegare i cavi di alimentazione ed effettuare i fissaggi mostrati in precedenza.

Al fine di verificare la postura dell'operatore durante queste azioni è stata svolta una simulazione nella quale esso è in posizione per accedere alla zona più critica di lavoro. In figura 2.39 viene mostrato il risultato e tenendo conto del fatto che l'azione è ripetuta nel tempo, si conclude che la salute dell'operatore potrebbe essere compromessa. La flessione frontale per accedere alla centralina CBA della batteria è di circa 47°.

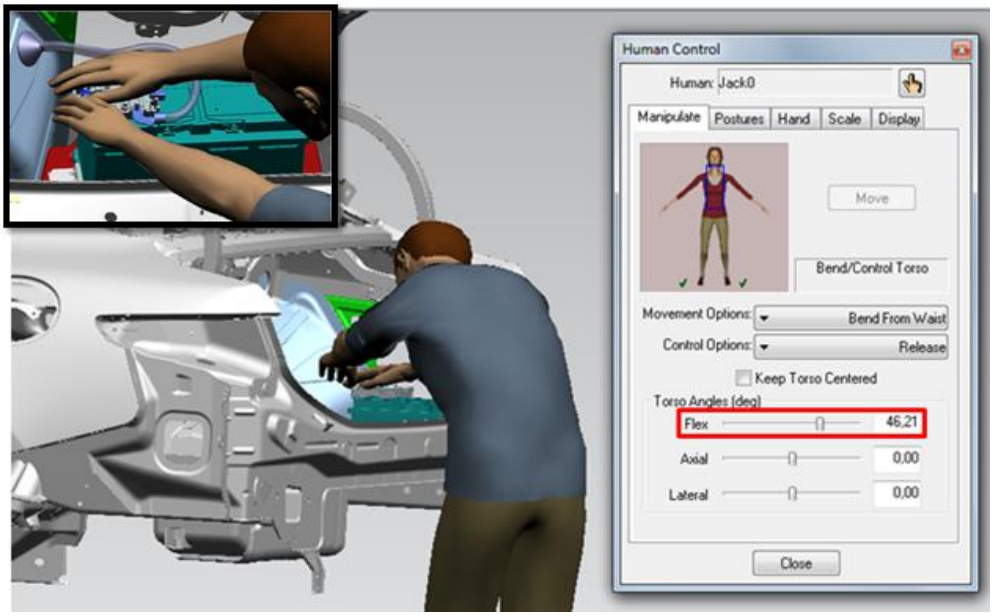


Figura 2.39 – Verifica ergonomica della postura del dipendente durante l'operazione di fissaggio e collegamento dei cavi della batteria. L'inclinazione frontale del tronco è pari a 47°.

Lo strumento virtuale dunque, oltre ad essere fondamentale per la verifica di operazioni, talvolta complesse e articolate, dà la possibilità di acquisire una conoscenza dei processi molto approfondita. In questo modo le persone che lavorano

quotidianamente a contatto con i modelli, sono in grado di proporre un miglioramento e un potenziamento dei sistemi produttivi.

Sviluppi futuri

Analizzando nel dettaglio la specifica operazione presa in considerazione, è possibile osservare che:

- in un'ottica di riduzione del tempo ciclo l 'operazione risulta complicata per via di luci di passaggio ristrette, flessibilità della strumentazione utilizzata ridotta (gdl del manipolatore). Inoltre deve essere tenuto in considerazione il rischio di urti alla carrozzeria.
- l'aspetto ergonomico risulta essere talvolta critico, soprattutto per le operazioni successive al semplice posizionamento dell'oggetto. Infatti, l'operatore è costretto a lavorare sporgendosi internamente al vano baule per il fissaggio della batteria, collegamento dei cavi, ecc. (vedi macro-ciclo);
- un'operazione di questo tipo all'interno di un contesto più complesso potrebbe essere vitale. Lo sviluppo futuro infatti, prevede la presenza sempre più frequente all'interno delle linee di montaggio, di vetture a trazione ibrida o elettrica. Questo comporta la necessità di posizionare batterie di portata nettamente maggiore. L'obiettivo quindi potrebbe essere quello di garantire una compatibilità della stessa linea per modelli di vetture differenti.

A tal proposito, nel capitolo successivo, verranno illustrate le potenzialità di un nuovo sistema di automazione robotica ricercando una soluzione più efficiente per l'operazione analizzata, con l'obiettivo di migliorare gli aspetti ergonomici, tempo ciclo e difficoltà dell'operazione. Nel capitolo conclusivo, verrà mostrata la risoluzione del problema sfruttando una particolare tipologia di robot.

3. I Robot Collaborativi

La funzione aziendale Advanced Manufacturing Engineering Product che si occupa di validazione virtuale di un modello di automobile, facendo parte dello sviluppo progettuale, risulta avere un compito di snodo fondamentale nella pianificazione di sviluppo del prodotto. In un certo senso essa consente una valutazione di insieme del progetto e garantisce l'acquisizione di un punto di vista strategico per quanto riguarda l'innovazione tecnologica. Infatti, inizialmente questa attività riguarda la valutazione dei mezzi preesistenti a partire dalle lessons learned e quindi dal know-how dell'azienda fino ad arrivare poi ad una soluzione ottimale che rispetti più vincoli possibile. Nello studio del caso reale di fattibilità, realizzato nel capitolo 2, per esempio, è stato mostrato il processo che porta alla risoluzione di un problema di montaggio di una batteria. Pur trattandosi di un'operazione relativamente semplice dunque, è stato possibile evidenziare l'importanza di questa attività come fonte di nuove soluzioni. In questo senso l'ente addetto alla fattibilità di prodotto ha il compito di individuare e risolvere problemi aperti come quelli di tipo ergonomico e sul lavoro dell'uomo, quelli relativi all'incremento della produttività, fino ai temi più importanti riguardanti la cura dell'ambiente e la riduzione degli sprechi.

In questo capitolo quindi si cercherà, partendo da quanto visto fino ad ora, di comprendere quali siano gli sviluppi futuri della tecnologia dal punto di vista dell'automazione in linea per il montaggio. Più nel dettaglio verrà presentato lo stato dell'arte di una nuova categoria di robot che ha come obiettivo quello di rendere compatibile l'operato dell'uomo e della macchina.

Questo nuovo processo evolutivo inoltre, fa parte di una rivoluzione tecnologica tendente ad una sempre maggiore coesistenza dell'intelligenza artificiale e dell'operato dell'uomo, chiamata Industria 4.0.

3.1. Industria 4.0 [7]

Il termine Industria 4.0 è stato coniato intorno al 2011 dal ministero dell'istruzione e della ricerca tedesco e riguarda una roadmap per promuovere la digitalizzazione e lo sviluppo tecnologico della produzione. Questo nuova filosofia del settore manifatturiero ha assunto un'influenza globale negli ultimi anni spingendo le aziende verso

[7] Riferimenti [14][15].

l'integrazione di sistemi "smart". In particolare però, la "rivoluzione 4.0" non consiste soltanto nell'integrare nuove macchine ma nell'adozione di una filosofia che tenda ad integrare i sistemi di fabbrica e le filiere produttive sfruttando la tecnologia e connettendo macchine, persone e sistemi informativi.

I nove pilastri di questa nuova corrente, mostrati nella figura 3.1, sono:

- *Advanced manufacturing solution* coinvolge sistemi avanzati per la produzione, più nel dettaglio quelli per la movimentazione e manipolazione automatiche dei materiali, come gli AGV e i robot collaborativi;
- *Additive manufacturing*, sono le stampanti 3D per la produzione di prototipi in materiale plastico e componenti sofisticati in metallo come le palette delle turbine;
- *Simulation,* consiste nell'impiego di dati su operatori, mezzi di produzione e prodotti che vengono utilizzati per reperire nuove soluzioni in modo virtuale prima che esse vengano implementate realmente;
- *Horizontal e vertical integration,* che consiste nello sviluppare mezzi in grado di garantire l'integrazione verticale ed orizzontale tra tutti gli attori del processo produttivo;
- *Industrial internet of things,* riguarda la necessità di inserire computer incorporati all'interno dei macchinari ed un sistema di controllo che li faccia comunicare e connettere ad internet per la gestione della produzione dall'interno e dall'esterno;
- *Cloud,* riguarda il modo di gestire ed analizzare le informazioni tramite l'implementazione di sistemi cloud come lo "storage online", l'uso del "cloud computing" e di altri servizi esterni;
- *Cyber-security,* proprio per via dei nuovi sistemi aperti verso l'esterno e comunicanti con internet è necessario il presidio della sicurezza delle informazioni che non devono essere alterate per via delle molteplici interconnessioni;
- *Big Data Analytics,* sono tecniche che consentono la gestione di grandi quantità di dati provenienti da sistemi aperti per la previsione e predizione;
- *Augmented reality*, si tratta di una nuova tecnologia che permetterà al personale dell'azienda di interfacciarsi fisicamente con i problemi reali del loro lavoro in un ambiente virtuale.

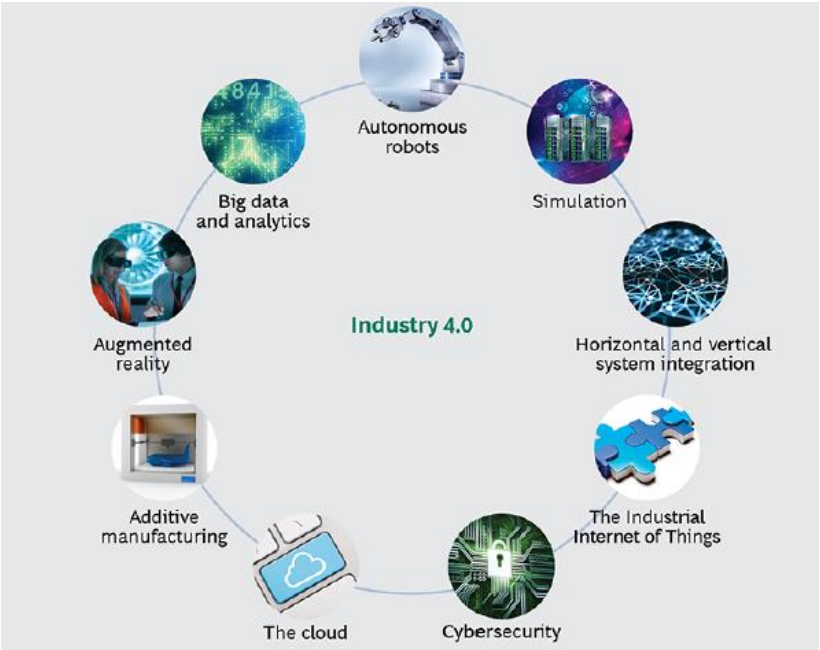


Figura 3.1 – I 9 pilastri dell'Industria 4.0.

L'interesse comune di questi fattori innovativi è sicuramente il miglioramento delle condizioni lavorative dell'uomo per una sempre maggiore sicurezza e ottimizzazione delle attività aziendali.

Per questo motivo di seguito verrà analizzato più nel dettaglio il tema della collaborazione tra uomo e robot.

3.2. La robotica industriale e la nuova tecnologia

L'utilizzo dei robot nel mondo sta vivendo una grande crescita negli ultimi anni; i principali motivi sono la necessità di miglioramento delle condizioni lavorative dell'uomo e il raggiungimento di maggior precisione e velocità per un potenziamento dei processi produttivi. Questo trend viene evidenziato dai dati raccolti dall'International Federation of Robotics (IRF) relativi al periodo 2006-2017 (figura 3.2).

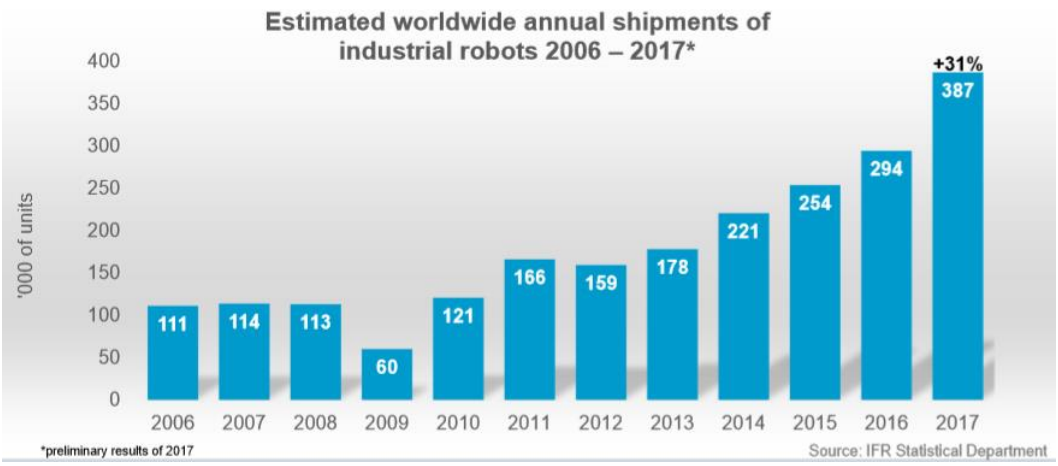


Figura 3.2 – Andamento annuale delle installazioni di robot nell'industrie di tutto il mondo.

Nell'ultimo decennio il numero dei robot utilizzati è cresciuto più del 300%. Un grande contributo a questa crescita è stato fornito, come evidenziato in figura 3.3, dal mercato asiatico e australiano che nell'ultimo anno ha sfruttato il contributo di questi sistemi con un numero di implementazioni pari a 262.000 unità, 4 volte maggiore alle 67.000 dei paesi europei.

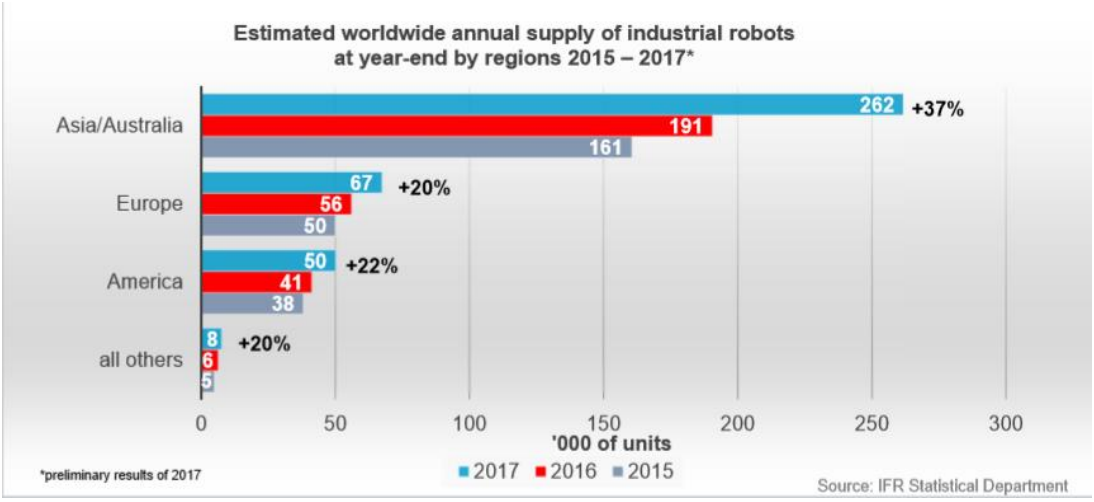


Figura 3.3 – Andamento dell'utilizzo di robot industriali diviso per regioni in 3 diversi anni.

Il dato saliente per la presente trattazione però, riguarda la statistica di utilizzo per settori. Essa infatti mostra come il mercato dell'automobile sia quello più interessato

all'innovazione tecnologica riguardante la robotica. Quasi un terzo di queste macchine vengono sfruttate nel settore dell'auto con una crescita del 21% nel 2017 rispetto all'anno precedente (figura 3.4).

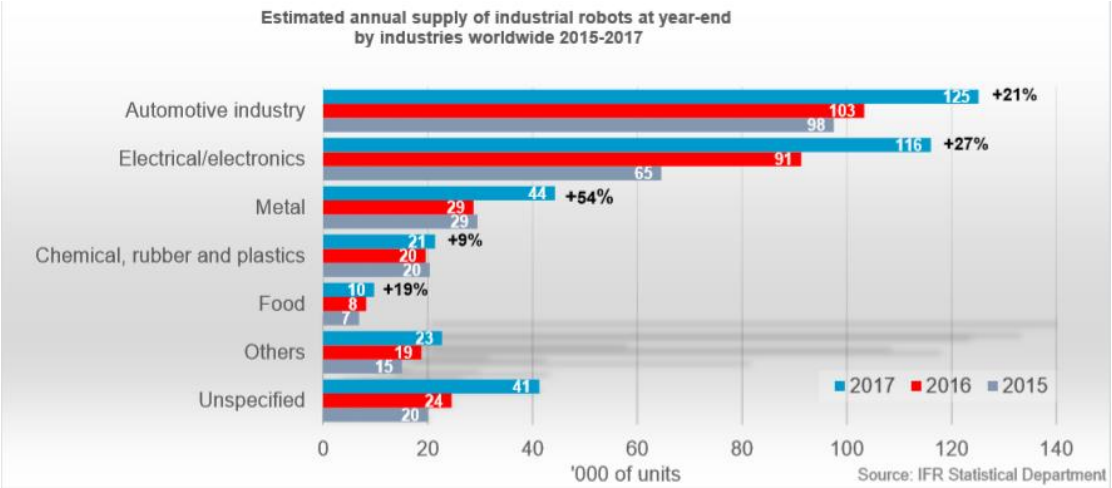


Figura 3.4 – Andamento dell'utilizzo di robot diviso nei principali settori industriali in 3 diversi anni.

L'incremento dello sviluppo di sistemi robotici all'interno delle aziende è fortemente legato alla nuova corrente di pensiero rivoluzionaria. Al momento la produzione industriale è orientata verso il raggiungimento di una maggiore flessibilità e reattività di processi, strutture e reti. Quest'evoluzione è necessaria per far fronte al nuovo mercato in cui i tempi di attesa si sono ridotti, è cresciuta la richiesta di personalizzazione del prodotto con maggiore diversità e conseguenti cambiamenti repentini del prodotto all'interno di una singola unità produttiva.

Per ottenere questo risultato le tendenze industriali stanno influenzando il modo in cui uomini e macchine interagiscono.

I robot hanno la capacità di svolgere attività di routine con grande velocità, precisione e ripetibilità, sopportando il carico di oggetti pesanti senza subire affaticamenti o danni e lavorando in ambienti talvolta difficili e pericolosi. D'altra parte però i loro sistemi di controllo sono soggetti a limiti dal punto di vista della gestione di situazioni inaspettate (riflesso dei piani di lavoro, oggetti di forma variabile). L'essere umano invece, è in grado di garantire un contributo intellettuale insostituibile, avendo una maggiore consapevolezza dell'ambiente esterno ed una migliore capacità decisionale di fronte a

situazioni differenti e complesse. D'altro canto essi sono resi vulnerabili da una maggiore inclinazione all'errore, allo stress e all'affaticamento ed inoltre il loro impiego è limitato dai vincoli di sicurezza.

Ciononostante, la combinazione delle risorse umane e artificiali, non ha mai fatto parte della pratica dell'automazione tradizionale. Per una questione di sicurezza infatti, i robot comunemente utilizzati devono operare in delle zone totalmente isolate da delle barriere metalliche. [16]

Negli ultimi anni invece, grazie alla costante ricerca di far comunicare questi due mondi, è stata sviluppata una nuova tecnologia di robot in grado di cooperare con l'uomo in maniera sicura. Nonostante i temi aperti dal punto di vista della sicurezza siano molteplici, di sicuro questi sistemi sono destinati ad occupare un ruolo di fondamentale importanza all'interno delle fabbriche produttive del futuro.

3.2.1. Collaborazione uomo-robot

Nella concezione comune, con il termine "co-bot" o "robot collaborativo" si intende una macchina sofisticata e appositamente studiata per poter operare al fianco dell'uomo senza rappresentare però un rischio per la sua salute. Tuttavia secondo quanto riportano le normative vigenti esistono diverse tipologie di collaborazione con l'uomo, (descritte nel 3.3.4) e non in tutte è previsto un contatto diretto con l'essere umano.

Sicurezza passiva

Tutte le caratteristiche dei robot progettati per la cooperazione con l'essere umano fanno parte della così detta "sicurezza passiva". In questi termini, il primo fattore che salta all'occhio di un osservatore esterno è la differenza di peso rispetto alle macchine tradizionali. Per poter condividere uno spazio con l'essere umano è necessario che essi abbiano una massa ridotta, obiettivo ampiamente raggiunto dalle case produttrici grazie all'applicazione di motori e componentistica di ultima generazione. In questo modo, quasi sempre, il rapporto tra il peso del braccio robotico e la sua portata massima risulta essere ridotto.

Anche la forma ed i materiali utilizzati ricoprono un ruolo molto importante. Per questo motivo vengono preferite forme cilindriche per le varie parti del braccio che sono composte di plastica e metalli leggeri molto spesso ricoperti di uno strato di materiale

morbido. L'estrema leggerezza di questi robot consente dunque di limitare i danni nei confronti dell'uomo a seguito di un possibile urto.

Sicurezza attiva

La fondamentale differenza rispetto alle applicazioni del passato quindi, sta proprio nel fatto che venga considerata la possibilità di contatto tra la macchina e il lavoratore. Per questo motivo è importante anche la "sicurezza attiva" di cui fanno parte te funzioni di tutte le funzioni di sicurezza studiate ad hoc ed integrate nei sistemi di controllo che operano grazie alle informazioni reperite dalla vasta gamma di sensori di cui sono dotati questi sistemi. I motori, solitamente ad azionamento diretto, sono dotati di sensori ad effetto Hall in grado di misurare la velocità di rotazione dei giunti con elevata precisione. Gli encoders installati su ogni giunzione rotante inoltre, favoriscono la ridondanza del sistema di misura, contribuendo a fornire delle informazioni sicure ed affidabili all'unità di controllo. Così facendo, anche i modelli base privi di telecamere integrate, sono in grado di interagire con l'ambiente esterno regolando la forza applicata e garantendo la sicurezza del personale.

La sicurezza nell'ambito collaborativo può essere inoltre potenziata tramite tutti i sensori e sistemi che possono essere integrati con il robot per fare in modo di adattarlo a qual si voglia operazione. Rientrano in questa categoria i sistemi di visione, quelli laser e altri sensori limitativi dello spazio che fanno in modo di evitare il manifestarsi dell'evento pericoloso. La ricerca al livello industriale è da sempre interessata a questa tipologia di controllo delle macchine. Negli ultimi tempi infatti l'obiettivo dei ricercatori, con lo scopo di rendere sempre più simbiotico l'ambiente di lavoro, è quello di rendere la macchina più simile all'uomo anche dal punto di vista decisionale conferendogli la capacità, non solo di essere consapevole dell'ambiente circostante, ma anche di prevedere la possibilità di manifestazione di un evento.

Le principali differenze di questi robot rispetto a quelli tradizionali sono riassunte nella tabella 3.1.

Tabella 3.1 – Principali differenze tra i robot tradizionali e quelli collaborativi.

Fattore	Robot Industriale Tradizionale	Robot Collaborativo
Sicurezza	Dannoso, richiede protezioni	Progettato per essere sicuro
Lavoro con l'uomo	Non consentito, richiede barriere	Possibile con le dovute valutazioni e precauzioni
Difficoltà programmazione	Elevata	Contenuta
Payload	Elevato	Ridotto
Sbraccio	Lungo	Limitato
Velocità	Elevata	Limitata
Adattabilità	Bassa: ottimo per gradi volumi e processi limitati	Elevata: ottimo per piccoli volumi e processi eterogenei
Prezzo	Elevato	Ridotto

Le applicazioni collaborative sono una novità assoluta ed una prerogativa dell'industria 4.0. Per questo motivo negli ultimi tempi c'è una grande attenzione anche dal punto di vista normativo per poter consentire agli attori in gioco di implementare i loro sistemi robotici nel rispetto dei limiti di sicurezza.

Nel prossimo paragrafo dunque si cercherà di ripercorrere il cammino legislativo che porta, dalla nascita del concetto di collaborazione uomo-macchina, fino al raggiungimento dei risultati più recenti.

3.3. La Sicurezza nelle applicazioni Robotiche

La concezione di sicurezza nelle applicazioni di robotica fino all'avvento dei Cobot, era rappresentata dall'utilizzo di barriere metalliche che separavano fisicamente la macchina dall'uomo.

Negli ultimi anni lo sviluppo del tema della collaboratività ha aperto nuovi orizzonti. Per questo sarà utile chiarire come viene regolamentata la materia della sicurezza in relazione ai Robot.

Direttive, Leggi e Standard

Per fare chiarezza sulla questione sicurezza è necessario distinguere alcuni concetti.

Una direttiva è una formulazione generale nell'ambito della sicurezza. Le direttive entrano in vigore nei singoli paesi all'interno dell'UE che decidono di incorporare queste nella loro legislazione nazionale. In ogni paese dell'UE, una legge o una disposizione fa riferimento alla pertinente direttiva UE e quindi la eleva allo status di legge nazionale.

Gli obiettivi di sicurezza formulati nelle direttive sono specificati in modo più preciso tramite degli standard. Essi non hanno alcuna rilevanza giuridica diretta finché non sono pubblicati nella Gazzetta ufficiale dell'UE o vengono citati nelle leggi e nelle disposizioni nazionali. Uno standard però, può acquisire la "presunzione di conformità". Ciò vuol dire che un fabbricante può presumere di aver soddisfatto i requisiti della direttiva corrispondente a condizione di aver rispettato le specifiche della norma.

La direttiva che regolarizza l'utilizzo delle macchine installate all'interno della comunità europea è la EU Machinery Directive 2006/42/EC. Essa si pone l'obiettivo di assicurare che le macchine siano progettate e costruite per essere sicure durante tutte le fasi del loro ciclo vita minimizzando i rischi per le persone e per l'ambiente. Questa Direttiva, con i relativi Standard, definisce i requisiti essenziali per la salute e la sicurezza (EHSR) nel seguente ordine:

- eliminare o minimizzare i rischi per quanto ragionevolmente previsto considerando gli aspetti legati alla sicurezza durante la progettazione e la costruzione;
- applicare le necessarie misure protettive contro i rischi che non possono essere eliminate;
- informare gli utilizzatori dei rischi persistenti anche se tutte le misure protettive sono state adottate, specificando eventuali requisiti necessari alla formazione o all'equipaggiamento protettivo del personale.

Con l'obiettivo di rispettare la direttiva i costruttori di Robot e coloro i quali decidano di sviluppare un'applicazione con queste macchine, possono seguire gli standard. In figura 3.5 vengono illustrate le normative maggiormente utilizzate. Nella parte bassa della piramide sono elencate le principali normative sulla materia robotica.

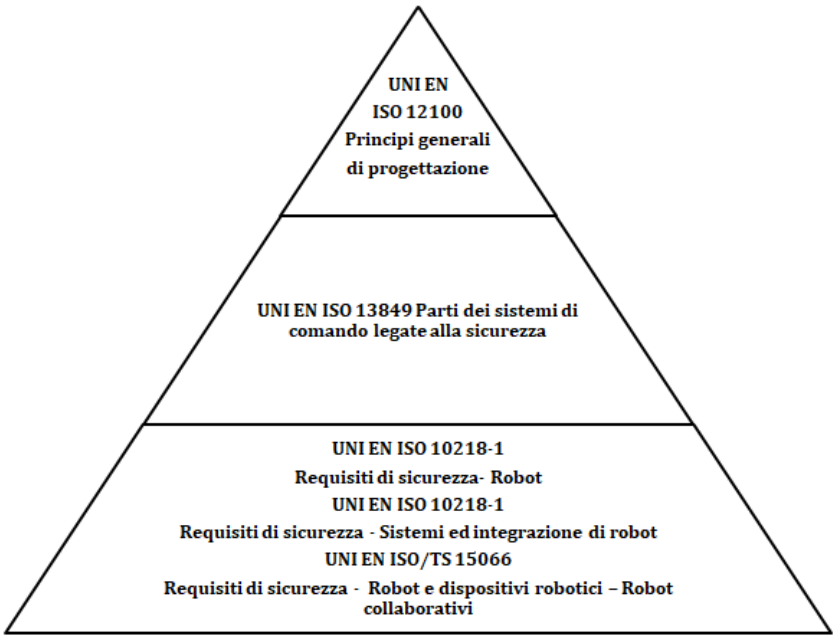


Figura 3.5 – Principale normative coinvolte nel processo di regolamentazione delle operazioni collaborative.

La UNI EN ISO 12100 si riferisce a tutte le tipologie di macchine e fornisce una guida per la valutazione e riduzione dei rischi di carattere generale.

La UNI EN ISO 13849 fornisce requisiti di sicurezza e una guida ai principi per la progettazione e l'integrazione delle parti di sistemi di controllo delle macchine che sono assegnate a fornire funzioni di sicurezza sono chiamate parti di sistemi di controllo relative alla sicurezza (SRP / CS) e possono essere costituite da HW e SW. Essa non specifica le funzioni di sicurezza o i livelli di prestazione da utilizzare in casi particolari e neanche i principi della progettazione dei prodotti che sono parti dei sistemi di controllo.

L'ultima tipologia di standard coinvolge 2 normative, la UNI EN ISO 10218-1 e la UNI EN ISO 10218-2, più una linea guida specifica di recente formulazione, la UNI EN ISO/TS 15066 riferita alle operazioni collaborative.

In questo gruppo rientrano specifiche tipologie di macchine e questi sono i robot industriali con i loro sistemi di sicurezza. Per fare una distinzione tra i tre documenti: il primo UNI EN ISO 10218-1 è riferito ai produttori di robot, il secondo UNI EN ISO 101218-2 riguarda coloro i quali decidano di applicare i robot in un determinato

processo, mentre il terzo UNI EN ISO/TS 15066 si riferisce alle sole applicazioni in cui esiste collaborazione tra l'uomo e il robot.

Analizziamo gli standard più importanti nel processo logico che porta ad una probabile conformità con la direttiva sopra citata.

3.3.1. ISO 12100[8]

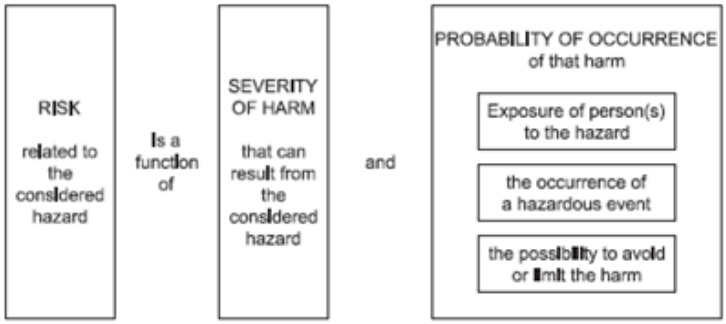
Lo scopo principale è quello di fornire ai progettisti un quadro generale e una guida per le decisioni durante lo sviluppo dei macchinari per consentire loro di progettare macchine che siano sicure.

La valutazione del rischio è rappresentata da un algoritmo logico e sistematico che consente un'attenta analisi relativa alle macchine oggetto della progettazione. La valutazione del rischio è seguita, quando necessario, dalla riduzione del rischio. L'iter di questo processo può essere necessario per eliminare i rischi per quanto possibile e ridurli adeguatamente mediante l'attuazione di misure protettive.

Il rischio associato a una particolare situazione pericolosa, come evidenziato nella figura 3.6, dipende dai seguenti elementi:

a) Gravità del danno
b) Probabilità della manifestazione:

    1) esposizione delle persone al pericolo;
    2) accadimento di un evento pericoloso;
    3) possibilità tecniche e umane per evitare o limitare il danno.



[8] Riferimento [17].

Figura 3.6 – Andamento dell'utilizzo di robot diviso nei principali settori industriali in 3 diversi anni.

L'obiettivo della riduzione del rischio invece può essere raggiunto rimuovendo i pericoli o riducendo, separatamente o simultaneamente, ciascuno dei due elementi che determinano il rischio associato: gravità del danno e probabilità che si manifesti. Le misure protettive previste devono essere applicate secondo il metodo dei tre stadi:

1) *misure di protezione integrate nella progettazione*, in questo primo stadio si ricercano le caratteristiche di progettazione più idonee della macchina valutando le interazioni con le persone esposte;
2) *Protezione e/o misure di protezione complementari,* il secondo stadio prevede di attuare delle misure di sicurezza complementari qualora non sia possibile un'eliminazione totale del rischio nel primo stadio.
3) *Informazioni per l'uso,* nel terzo stadio si considerano i rischi che non è possibile ridurre o eliminare con i primi due passaggi. In questo caso quindi, i rischi devono essere correttamente identificati nelle informazioni per l'uso.

3.3.2. ISO 13849[9]

La capacità di SRP / CS di eseguire una funzione di sicurezza in condizioni prevedibili è assegnata a uno dei cinque livelli, detti livelli di prestazione (PL). Questo PL è definito in termini di probabilità di guasto pericoloso all'ora.

Una tipica presentazione schematica delle funzioni di sicurezza è fornita nella figura 3.7 che illustra una combinazione di parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza SRP/CS per:

- ingresso (SRP/CSa);
- logica di elaborazione (SRP/CSb);
- uscita/elementi di comando della potenza(SRP/CSc);
- mezzi di interconnessione (iab, ibc) (per esempio elettrici, ottici).

[9] Riferimento [18].

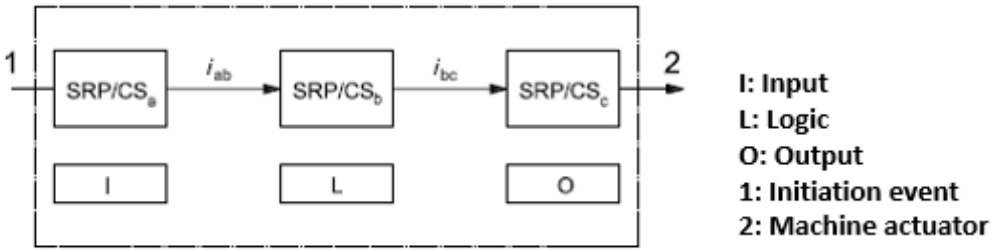


Figura 3.7 – Rappresentazione schematica di una tipica funzione di sicurezza.

Dopo aver identificato ed implementato le funzioni di sicurezza del sistema di comando, il progettista deve procedere con la valutazione del livello di prestazione PL. Nella tabella 3.2 viene illustrata la scala per la definizione del parametro in base alla probabilità che avvenga un guasto pericoloso (PFH).

Tabella 3.2 – Principali differenze tra i robot tradizionali e quelli collaborativi.

PFH_d	PL
10^{-5} ... 10^{-4}	a
$3*10^{-6}$ ... 10^{-5}	b
10^{-6} ... $3*10^{-6}$	c
10^{-7} ... 10^{-6}	d
10^{-8} ... 10^{-7}	e
10^{-9} ... 10^{-8}	-

La definizione di questo parametro PL avviene grazie ad un processo valutazione del rischio che si attiene agli step mostrati nella figura 3.8 utilizzando i parametri descritti nella tabella 3.3.

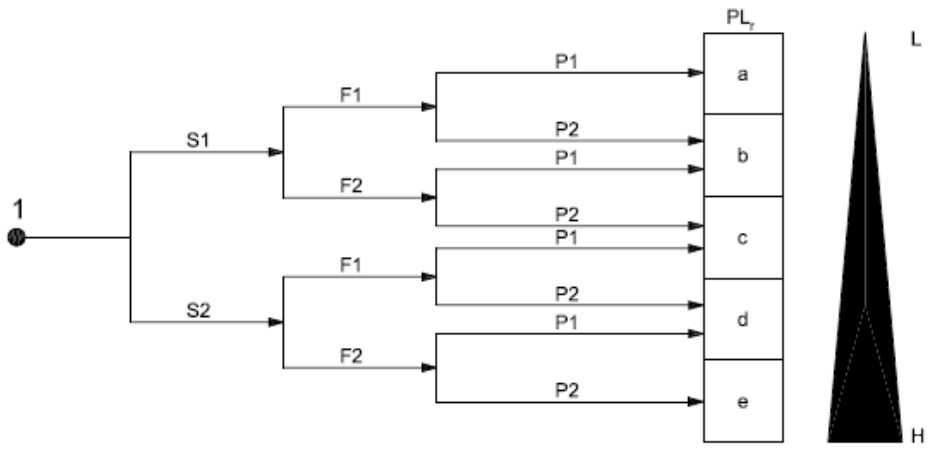


Figura 3.8 – Schema logico per la definizione dell'indice PL.

Tabella 3.3 – Descrizione dei vari parametri per la definizione dell'indice PL.

Quantity in ISO 13849-1 Risk Tree	Choice and Justification
Severity of injury (S)	S1 – injuries are slight, reversible, normally at most a contusion
Frequency and/or exposure to hazard (F)	F2 – frequent or continuous due to nature of collaborative application
Possibility of avoiding hazard or limiting harm (P)	P2 – in general, little possibility of avoiding contact events
Required safety performance level PLr	PL c – derived requirement for ABB robot concept (see also ISO 10218-1, clause 5.4.3)

Ad un PL-e è un sistema che ha un altissimo livello di contribuzione alla riduzione del rischio. Per questo motivo si stima che possano avvenire tra i 10(-8) -10(-9) guasti all'ora.

3.3.3. ISO 10218[10]

ISO 10218:1

Questa parte della ISO 10218 specifica i requisiti e le linee guida per la progettazione sicura intrinseca di un robot, le misure protettive e le informazioni per l'uso di qualsiasi

[10] Riferimenti [19][20].

tipologia di robot industriale. Descrive i pericoli di base associati ai robot e fornisce i requisiti per eliminare o ridurre adeguatamente i rischi. Questa parte della ISO 10218 è riferita esclusivamente alla progettazione del robot.

In generale per quanto riguarda l'utilizzo di robot industriali, la sezione 5.4 afferma che le parti relative alla sicurezza dei sistemi di controllo applicati ai robot industriali, devono essere progettate in modo conforme a PL= d con la categoria 3 di struttura (informazioni descritte nella ISO 13849)".

Categoria 3 di struttura è un termine utilizzato per definire i sistemi di controllo della sicurezza progettati con due canali. In questo modo essi devono garantire che:

A. un singolo errore in un qualsiasi sistema di controllo non deve causare la perdita della funzione di sicurezza;
B. ogni qualvolta possibile, il singolo guasto deve essere individuato prima o dopo la seguente richiesta sulla funzione di sicurezza;
C. quando avviene un singolo guasto, la funzione di sicurezza deve essere progettata affinché lo stato di sicurezza possa essere mantenuto fino a che l'errore non sia stato risolto;
D. tutti i prevedibili guasti devono essere individuati.

Per la prima volta inoltre viene toccato il tema della cooperazione uomo-robot. La sezione che interessa le operazioni collaborative è la 5.10 dove si può trovare scritto che i robot progettati per il funzionamento collaborativo devono fornire un'indicazione visiva quando si trovano in questa modalità e devono rispettare uno o più dei requisiti specificati nelle sezioni da 5.10.2 a 5.10.5.

Nei vari paragrafi vengono specificate le tipologie di cooperazione e le caratteristiche che il robot deve avere per essere applicato in questi casi:

- 5.10.2) *Safety-rated monitored stop*, in questo caso viene utilizzato uno stop protettivo quando la persona supera un limite imposto;
- 5.10.3) *Hand guiding*, quest'operazione prevede un controllo dei movimenti del robot guidato dall'operatore, il dispositivo per il controllo di questa funzione deve essere vicino all'end-effector;
- 5.10.4) *Speed and separation monitoring,* il robot deve mantenere una determinata velocità in funzione della posizione della persona; [in ISO 13855 si può trovare la descrizione della minima distanza]

5.10.5) Power and force limiting. In questo caso è previsto un possibile contatto tra l'uomo e il robot, se i limiti impostati vengono superati ne deriva una condizione di stop di sicurezza.

ISO 10218-2

Questa parte della normativa riguarda più nel dettaglio la corretta integrazione di sistemi robotici. Vengono descritti i pericoli di base e i requisiti per ridurre i rischi associati.

Una corretta determinazione dei requisiti di sicurezza e delle misure protettive non può prescindere da un'attenta valutazione dell'ambiente in cui viene implementato il sistema. Per questo il progetto dell'operazione deve tenere in considerazione le caratteristiche dell'ambiente in cui viene eseguita: temperatura, umidità disturbi elettro-magnetici, livello di illuminazione, zona di lavoro del robot, presenza di oggetti e persone, sono solo alcune delle informazioni necessarie.

Per quanto riguarda le operazioni ''tradizionali'' questa parte della normativa, nella sezione 5.4 spiega come le attività del robot debbano essere limitate all'interno di un ambiente ben progettato per la salvaguardia delle persone. Questa limitazione può essere ottenuta grazie all'applicazione di barriere metalliche o grazie a dei mezzi, integrati nel robot e/o esterni ad esso, che controllano i suoi movimenti. Le minime distanze di sicurezza per l'installazione delle barriere o per l'applicazione di dispositivi di protezione possono essere valutate seguendo i riferimenti di altre normative (come specificato nella sezione 5.10.3).

La sezione 5.11 invece cura nello specifico le operazioni collaborative. I requisiti illustrati per la salvaguardia dell'uomo in ogni momento, sono molteplici, i più importanti sono:

a) L'integratore di robot per una valutazione del rischio deve considerare attentamente le caratteristiche del robot e dei suoi accessori, il layout del sistema robotico, le posizioni reciproche del robot e dell'operatore durante il processo ed altri aspetti;
b) Il robot deve rispettare i requisiti specificati nella parte 1 della presente normativa;
c) I dispositivi di sicurezza devono essere conformi alla categoria 3 di struttura;

d) Deve essere definita correttamente la porzione di spazio collaborativa e in ogni caso è necessario che venga mantenuta una distanza di sicurezza tra il robot e l'area di lavoro dell'operatore, altre strutture o altre macchine.
e) Se è previsto un cambio di modalità durante l'attività del robot, da collaborativa a non-collaborativa, esso deve essere controllato correttamente per non recare danni al personale.

La tipologia di operazioni collaborative considerate sono le stesse della parte 1 e non verranno trattate in questa descrizione dal momento che maggiori informazioni possono essere reperite nella ISO/TS 15066.

3.3.4. ISO/TS 15066[11]

L'obiettivo dell'applicazione dei robot collaborativi è quello di combinare le prestazioni ripetitive dei robot con le capacità individuali dell'uomo. I robot mostrano precisione, potenza e resistenza. Per raggiungere la sicurezza però, le applicazioni robotiche nel passato escludevano completamente l'accesso umano all'area operativa mentre il robot era attivo. Pertanto, una varietà di operazioni che richiedono l'intervento umano spesso non potevano essere automatizzate usando i robot.

Questa specifica tecnica nasce quindi per fornire una guida relativa alle operazioni collaborative dei robot che condividono lo stesso spazio di lavoro dell'uomo. In tali operazioni l'integrità del sistema di controllo relativo alla sicurezza è di grande importanza, in particolare quando vengono monitorati parametri di processo come velocità e forza. È necessaria una valutazione del rischio completa, non solo del robot, ma anche dell'ambiente in cui viene collocato, cioè il luogo di lavoro. Questa specifica tecnica (TS), per ora, è soltanto un'integrazione di supporto agli standard di sicurezza ISO che per i robot industriali che cura con un dettaglio maggiore quanto accennato nelle precedenti normative ISO 10218 in riferimento alle attività collaborative.

È molto importante ricordare che a differenza degli standard precedentemente illustrati, questo non ha la "presunzione di conformità"; non si alcuna garanzia che seguendo queste linee guida sarà rispettata la conformità con la direttiva vigente.

Essendo rivolto esclusivamente all'utilizzo dei Robot Collaborativi, questo documento risulta essere molto interessante per lo studio in questione. Verranno pertanto chiariti

[11] Riferimento [21].

di seguito i punti chiave del suo contenuto. In particolare è importante osservare i dettagli supplementari relativi alle 4 tipologie di collaborazione citate in precedenza.

Prima di passare alla descrizione delle singole modalità di collaborazione è importante definire le diverse modalità di arresti riconosciute dalla norma EN 60204-1 che riporta:

- Categoria 0 - Arresto dovuto all'immediato scollegamento dell'alimentazione degli attuatori della macchina. È considerato un arresto non controllato. Con l'alimentazione disinserita, l'azione di frenata, che richiede energia, non sarà attiva. Questo consente ai motori di girare liberamente e rallentare fino a fermarsi dopo un certo periodo di tempo. In altri casi, e possibile che i sistemi di fissaggio della macchina depositino del materiale e che l'alimentazione sia necessaria per tenere fermo tale materiale. I sistemi di arresto meccanici, poiché non richiedono alimentazione, possono essere usati anche con un arresto di categoria 0. L'arresto di categoria 0 ha la priorità sugli arresti di categoria 1 o 2;
- Categoria 1 - Arresto comandato in cui l'alimentazione è disponibile affinché gli attuatori della macchina eseguano l'arresto. Quindi, l'alimentazione viene rimossa dagli attuatori dopo l'arresto. Questa categoria di arresti consente una frenata con alimentazione che provoca l'arresto rapido del movimento pericoloso, successivamente l'alimentazione può essere rimossa dagli attuatori;
- Categoria 2 - Arresto comandato con alimentazione disponibile per gli attuatori della macchina. La categoria 2 non è generalmente considerata adatta ad un arresto d'emergenza. Un normale arresto di produzione è considerato un arresto di categoria 2.

Safety-rated monitoring stop

In questo metodo viene sfruttata la capacità del sistema di interrompere il movimento del robot all'interno del workspace, prima che l'operatore entri nello spazio. Quando la persona si sarà allontanata dalla zona predefinita, l'attività del robot potrà riprendere in maniera non collaborativa. Questa tipologia di operazione è gestita da un adatto sistema di sorveglianza e non è pertanto richiesto l'intervento umano per il ripristino dell'operazione. Nella figura 3.9, sono riassunte le possibilità di interazione di questa modalità collaborativa.

Robot motion or stop function		Operator's proximity to collaborative workspace	
		Outside	Inside
Robot's proximity to collaborative workspace	Outside	Continue	Continue
	Inside and moving	Continue	Protective stop
	Inside, at Safety - Rated Monitored Stop	Continue	Continue

Figura 3.9 – Combinazione delle possibili posizioni del braccio robotico e dell'operatore con relativa azione del sistema di sicurezza.

Il robot pertanto deve essere equipaggiato con un sistema che monitori la posizione dell'operatore e consenta la riduzione della velocità del robot. È necessario inoltre un dispositivo per lo stop protettivo di Categoria 0. Quando l'operatore invece è all'interno del workspace deve essere garantito uno stop di Categoria 2.

Le distanze limite vengono stabilite in funzione della tipologia di operazione secondo la ISO 13855.

Hand guiding

In questo caso il robot deve utilizzare una funzione di monitoraggio della velocità e una per lo stop di sicurezza controllato. Tramite una valutazione del rischio viene stabilità una velocità limite. Se la sicurezza dell'operatore dipende dalla limitazione del range di movimenti del robot, esso deve avere un sistema di controllo sicurezza "soft axis" e di controllo nello spazio.

La sequenza delle operazioni per questa applicazione sono:

1) Il robot è pronto per essere guidato ed è impostato su uno stop di sicurezza monitorato, l'operatore per tanto può accedere all'area di lavoro;
2) Quando l'operatore ha preso controllo del sistema robotico e sta eseguendo l'attività guidandolo il safety-rated monitoring stop è disattivato;
3) l'operatore rilascia il dispositivo di controllo e lo stop di sicurezza viene riattivato;

4) quando l'operatore è uscito dall'area di lavoro il robot può riiniziare la sua attività in maniera non collaborativa.

Per qualsiasi azione che non è conforme a quanto specificato, il sistema deve essere in grado di attivare un immediato stop di sicurezza.

La sezione fornisce inoltre qualche dettaglio sul dispositivo di guida; esso deve avere anche incorporato un emergency stop e un dispositivo "enabling device".

Speed and separation monitoring

È una delle due tipologie di collaborazione più interessante. In questo caso infatti, è previsto il movimento contemporaneo di operatore e robot all'interno della stessa zona di lavoro. La riduzione del rischio in questo caso è ottenuta mantenendo una specifica distanza di sicurezza tra la macchina e la persona per ogni istante di tempo dell'operazione. Se la distanza che li separa dovesse essere inferiore rispetto al limite consentito, il sistema deve arrestare immediatamente l'azione del robot. Quando l'operatore si allontana il lavoro della macchina riprenderà automaticamente. Inoltre la distanza di sicurezza non sarà un valore fisso ma potrà decrescere se il sistema robotico riduce la sua velocità. In figura 3.10 viene mostrata una divisione dell'area di lavoro a cui corrispondono differenti limiti di velocità.

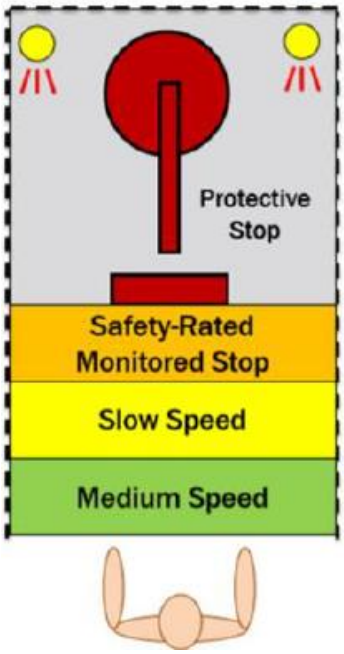


Figura 3.10 – Definizione dei limiti di distanza dell'operatore dalla macchina a cui corrispondono diverse velocità.

L'ampiezza delle varie aree e le rispettive velocità del robot vengono definite dal progettista del processo in funzione della sicurezza dell'operatore e dell'efficienza dell'operazione. La zona di maggiore interesse risulta essere quella di Safety-Rated Monitored Stop dove è possibile che l'operatore vada a contatto con il robot. Per ottenere una maggiore efficienza del processo ed evitare la violazione della distanza di sicurezza effettuare o una riduzione della velocità (che fa aumentare la distanza minima consentita) o una rielaborazione della traiettoria.

La normativa inoltre fornisce un metodo di valutazione analitico della distanza di sicurezza sopra citata per questa tipologia di operazione.

Definizione della velocità massima e valori della distanza di separazione limite

Entrambe queste grandezze possono essere costanti o variabili.

Se si vuole mantenere i due parametri variabili si deve tenere in considerazione che essi cambiano continuamente in funzione della posizione e della velocità reciproca tra robot e operatore.

Per mantenere i parametri costanti invece è possibile calcolare una velocità e una distanza di separazione massima considerando il caso peggiore possibile durante l'applicazione.

La distanza di arresto può essere calcolata utilizzando la seguente formula:

$$S(t_0) = \int_{t_0+T_r}^{t_0+T_R+T_s} V_H(t)\ dt + \int_{t_0+T_r}^{t_0+T_R} V_R(t)\, dt + \int_{t_0+T_r}^{t_0+T_R+T_s} V_S(t)\, dt + C + Z_0 + Z_R$$

Dove si ha che:

- $S(t_0)$ è la distanza protettiva di separazione all'istante t0;
- t_0 istante di tempo considerato;
- C è un coefficiente che indica quanto una parte del corpo può introdursi all'interno della zona sensibile prima che il sistema se ne accorga;
- Z_d è l'incertezza sul posizionamento dell'operatore all'interno dell'area di lavoro dipendente dalla tolleranza del sistema di controllo che determina la sua posizione;
- Z_r è l'incertezza sul posizionamento del robot all'interno dell'area di lavoro dipendente dall'accuratezza del sistema di misura della posizione del robot;
- T_r è il tempo di reazione del sistema robotico, incluso il tempo richiesto per stabilire la posizione dell'operatore, processare il segnale, attivare lo stop del robot ma escluso il tempo che esso impiega per l'arresto;
- T_s è il tempo impiegato per lo stop del robot, dall'attivazione del comando fino all'arresto, non p un valore costante ma piuttosto una funzione della configurazione del robot, della pianificazione del moto, della velocità e del carico sul manipolatore.
- V_Hè la velocità diretta dell'operatore nello spazio di lavoro in direzione di una parte in movimento del robot (può essere positiva o negativa), inoltre se la velocità della persona non può essere monitorata essa si può assumere pari a 1,6m/s;
- t è la variabile di integrazione;
- S_h contributo alla distanza di sicurezza attribuibile per il cambio di posizione dell'operatore, può essere stimato tramite la seguente formula:

$$S_h = 1{,}6 \times (T_r + T_s)$$

- $S_r$contributo alla distanza di sicurezza attribuibile per il cambio di posizione del sistema robotico anch'esso stimabile:

$$S_r = V_r(t_0) \times (T_r + T_s)$$

- Dove V_r è la velocità del robot in direzione dell'operatore nello spazio di lavoro.
- S_s contributo alla distanza di sicurezza dovuta alla distanza di fermata del sistema robotico;

$$S_s = \int_{t_0+T_r}^{t_0+T_r+T_s} V_s(t)\ dt$$

Dove V_s è una funzione del tempo che dipende dalla velocita e dalla variazione di direzione del robot.

Power and force limiting

Questa modalità di collaborazione è la più interessante per quanto riguarda la dimostrazione applicativa che verrà mostrata nel capitolo successivo.

Per questa tipologia di applicazioni è previsto l'incorrere di un contatto intenzionale o fortuito tra il robot e l'uomo. Per questo motivo è indispensabile l'utilizzo di una macchina studiata ad hoc.

Le tipologie di contatto previste sono le seguenti:

1. Contatto quasi-statico, sono previsti schiacciamenti o bloccaggi, situazioni in cui una parte del corpo umano rimane bloccata tra il robot in movimento e una parte fissa della zona di lavoro: l'applicazione della pressione in questo caso avviene per un periodo prolungato di tempo (figura 3.11);

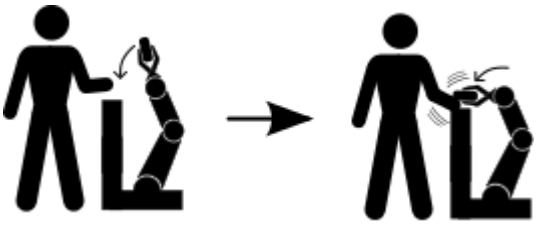


Figura 3.11 – Raffigurazione di un contatto quasi-statico.

2. Contatto transitorio, è previsto un contatto in movimento, l'uomo a seguito dell'urto ha un rinculo ed il suo moto non è vincolato da alcun oggetto: il fenomeno avviene per un periodo ristretto di tempo e l'entità dell'urto dipende dall'inerzia del corpo umano, del robot e dalla velocità relativa tra i due.
   (figura 2.12).

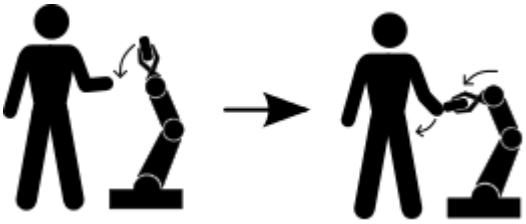


Figura 3.12 – Raffigurazione di un contatto transitorio.

Per quanto riguarda la riduzione del rischio il documento illustra le due tipologie (di cui si era parlato già in precedenza):

- le misure passive, che consistono ad esempio nell'incrementare le superfici di contatto per limitare i danni, nell'utilizzare materiali che assorbano gli urti come rivestimenti o componenti flessibili e nel limitare le masse in movimento;
- le misure attive riguardano il controllo del progetto del sistema robotico: limitazione di forza, coppia, quantità di moto, zona d'azione, utilizzo di sistemi di monitoraggio per gli stop di sicurezza e altri sistemi sensoriali per la previsione dei contatti.

I valori limite per le situazioni di contatto relative a specifiche parti del corpo umano esposte, deve essere analizzata per la "condizione peggiore" sia nel caso di contatto quasi statico che transitorio (figura 3.12).

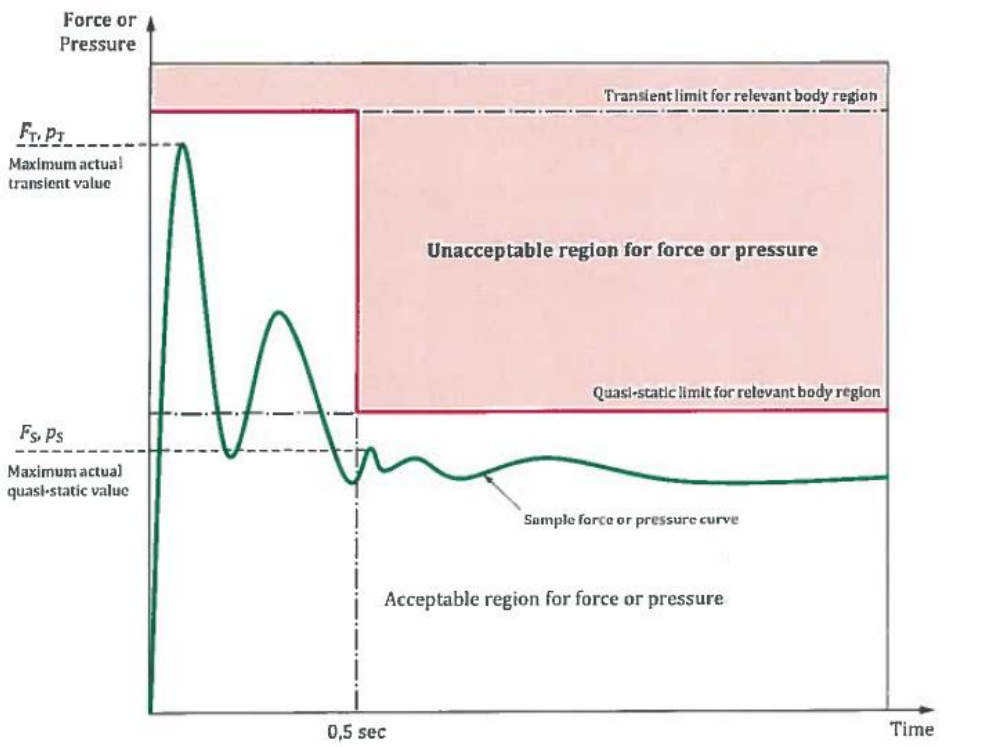


Figura 3.12 – Esempio dell'andamento della forza o pressione applicata dal robot su una specifica parte del corpo per un contatto quasi-statico e transitorio.

Per la valutazione dei limiti, la ISO/TS 15066, fornisce l'Annesso A. Si tratta di una raccolta dei risultati sviluppati da un gruppo di ricerca dell'Università di Mainz con lo scopo di valutare dei valori limite di forza e pressione nei due casi di contatto visti sopra in funzione della soglia del dolore per 29 diverse parti del corpo umano.

Per la valutazione dei limiti relativi ad un contatto quasi-statico si rimanda il lettore alla consultazione integrale della specifica tecnica.

Questo annesso della ISO/TS 10566 fornisce inoltre un approfondimento sui limiti biomeccanici e sul trasferimento di energia durante un contatto transitorio attraverso delle considerazioni matematiche che prendono in considerazione la superficie del contatto, la massa coinvolta nell'urto e la costante elastica della parte del corpo considerata. L'urto viene considerato secondo la condizione peggiore possibile, quindi si suppone che esso sia anelastico e tutta l'energia cinetica del robot venga dissipata durante l'urto con la parte del corpo umano. I risultati di questo studio possono essere osservati dal grafico in figura 3.13 che riporta i limiti di velocità calcolati.

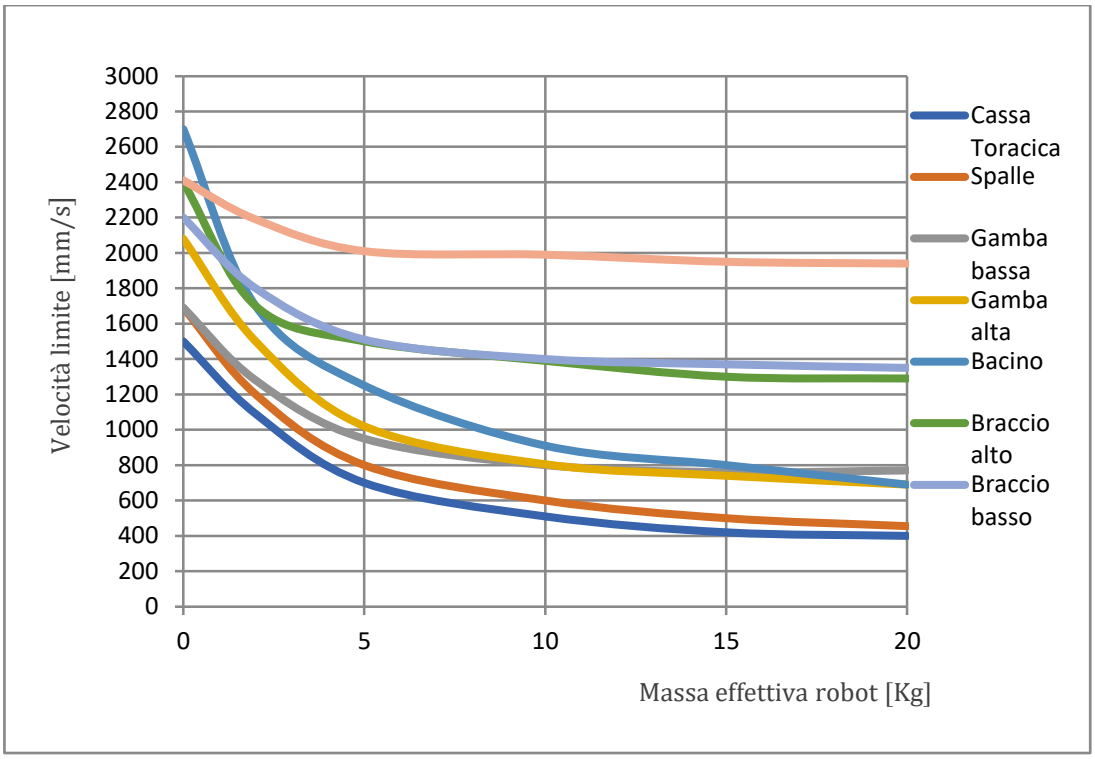


Figura 3.13 – Andamento dei limiti di velocità del robot in funzione della massa effettiva coinvolta in un contatto transitorio e della parte del corpo umano considerata.

Il grafico deriva da uno studio che tiene conto di una superficie contatto di 1 cm^2 su cui il robot applica la massima pressione ammissibile per quella parte del corpo. Questo vuol dire che le velocità cosi calcolate sono relative alla peggiore condizione possibile.

3.4. I Cobot presenti sul mercato[12]

Con l'obiettivo di rispettare i vincoli legislativi e di poter essere il più aderenti possibile all'ultima normativa integrativa i costruttori di robot hanno sviluppato dei prodotti, talvolta diversi per caratteristiche l'uno dall'altro. Le prerogative comuni di questi dispositivi sono quelle, di avere una modalità di auto-apprendimento della traiettoria e di essere sviluppati con particolare attenzione ai dispositivi per la sicurezza. Di seguito verranno riportati i principali modelli presenti nel mercato sottolineando le peculiarità di ognuno di essi. I parametri di maggiore interesse saranno:

- Peso della macchina;
- Payload;
- Reach;

[12] Riferimento [22]

- Numero di assi;
- Ripetibilità;
- Livello di sicurezza;
- Facilità di programmazione;
- Prezzo.

ABB, IRB 1400 Yumi

È un robot prodotto da ABB, una delle migliori case produttrici nel settore. Esso è costituito da due braccia sui cui possono essere montati una grande vastità di tools, telecamere, ventose, gripper e altri dispositivi per migliorare le funzionalità. È una macchina progettata per l'assemblaggio di piccoli componenti elettronici e pertanto ha una ripetibilità eccezionale, molto maggiore della norma (figura 3.14),(tabella 3.4).

Figura 3.14 – Robot IRB 1400 Yumi della ABB.

Tabella 3.4 – Caratteristiche del robot ABB.

Gradi di libertà	7 (per braccio)
Payload	0.5 Kg (per braccio)
Peso	38Kg
Ripetibilità	+/-0.02 mm
Sbraccio	500 mm
Sicurezza	PL b Cat B
Prezzo	+/- 40.000
Facilità programmazione	8/10

Comau, Aura

Questo braccio robotico non è molto diverso dai robot tradizionalmente utilizzati nell'industria. Comau infatti ha sviluppato una speciale skin di sicurezza, rivestita di un materiale morbido e costituita da una serie di sensori di prossimità che rendono il robot in grado di prevedere un impatto e di svolgere un'operazione collaborativa. Aura è il robot con il massimo payload sul mercato ed è destinato a rivoluzionare il concetto di montaggio di oggetti pesanti, soprattutto nel settore automotive (figura 3.15), (tabella 3.5).

Figura 3.15 – Robot Aura della Comau.

Tabella 3.5 – Caratteristiche del robot Comau.

Gradi di libertà	6
Payload	170 Kg
Peso	685 Kg
Ripetibilità	+/- 0.07 mm
Sbraccio	2800 mm
Sicurezza	Sensori prossimità capacitivi
Prezzo	80.000
Facilità programmazione	6/10

FANUC, CR-41A, CR-7iA e CR-7iA/L, CR-15iA, CR-35iA

Fanuc ha sviluppato una grande linea di robot collaborativi di diverse dimensioni. I punti di forza sono sicuramente la speciale pelle esterna ricoperta di gomma e i sensori di controllo della coppia installati alla base dei robot. Essi inoltre possono essere potenziati con il software iRVision appositamente studiato per controllare la telecamera posizionata sul polso del robot.

Grazie alla vasta gamma di prodotti, Fanuc riesce dunque ad accaparrarsi una grossa fetta di mercato per applicazioni che vanno dall'asservimento macchina, al testing, fino al montaggio di componenti pesanti (figura 3.16), (tabella 3.6).

Figura 3.16 – Da sinistra verso destra i robot *CR-41A, CR-7iA, CR-7iA/L, CR-15iA, CR-35iA di Fanuc.*

Tabella 3.6 – Caratteristiche dei robot Fanuc.

Modello	**CR-4iA**	**CR-7iA**	**CR-15iA**	**CR-35iA**
Gradi di libertà	6	6	6	6
Payload	4 Kg	7 Kg	15 Kg	35 Kg
Peso	48 Kg	55 Kg	255 Kg	990 Kg
Ripetibilità	+/- 0.01 mm	+/- 0.01 mm	+/- 0.02 mm	+/- 0.03 mm
Sbraccio	550 mm	911 mm	1441 mm	1813 mm
Sicurezza	//	//	//	PL d Cat 3
Prezzo	+/- 45.700 $	+/- 48.000 $	//	87.000 $
Facilità programmazione	2/10	2/10	2/10	2/10

Universal Robots, UR3, UR5, UR10

Si tratta dell'azienda leader del settore. Essa è una piccola compagnia che si occupa solo di robot collaborativi e si sta espandendo pian piano in tutto il mondo. Le principali caratteristiche di questi robot sono la leggerezza dei componenti e un efficace sistema di sicurezza basato sull'utilizzo di un sistema rindondante di sensori. Ciò che rende Universal Robots estremamente competitiva sul mercato sono i prezzi ridotti delle loro macchine e una fitta rete di aziende partner di supporto in grado di fornire dispositivi integrativi, software ed hardware, di ogni tipo.

Le applicazioni di queste macchine sono molteplici e molto spesso a stretto contatto con l'uomo (figura 3.17), (tabella 3.7).

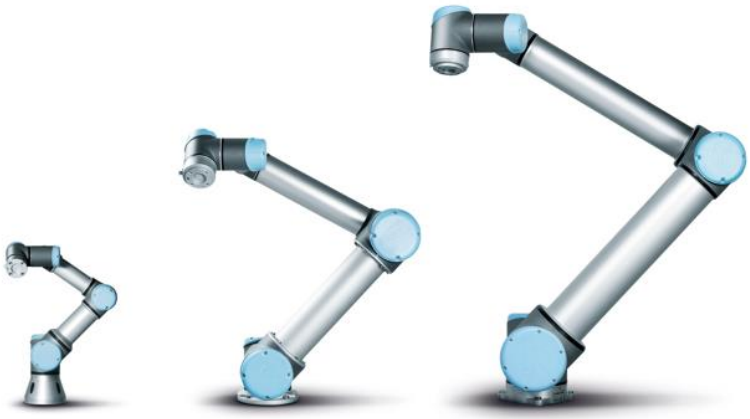


Figura 3.17 – Da sinistra verso destra i robot *UR3, UR5, UR10 di Universal Robots.*

Tabella 3.7 – Caratteristiche dei robot Universal Robots.

Modello	**UR3**	**UR5**	**UR10**
Gradi di libertà	6	6	6
Payload	3 Kg	5 Kg	10 Kg
Peso	11	18.4	28.9
Ripetibilità	+/-0.1 mm	+/- 0.1 mm	+/- 0.1mm
Sbraccio	500 mm	850 mm	1300 mm
Sicurezza	Certificati TUV con PL d e Cat 3 di struttura		
Prezzo	+/- 28.000 $	+/- 35.000 $	+/- 45.000 $
Facilità programmazione	8/10	8/10	8/10

KUKA, LBR IIWA 7 R800 e LBR IIWA 14 R820

Questi robot sono stati i primi della classe per un paio di anni ed hanno un costo relativamente alto per via di un sistema hardware molto avanzato. Hanno un'eccellente potenza in relazione al loro peso e sono equipaggiati di sensori di coppia su ogni giunto rotante. A differenza dei sensori utilizzati in questo campo però, essi sono in grado di misurare dei micro-impatti anziché valutare la variazione di corrente nei motori (figura 3.18), (tabella 3.8).

Figura 3.18 – Robot LBR IIWA R800 di Kuka.

Tabella 3.8 – Caratteristiche dei robot Kuka.

Modello	**iiwa 7 R800**	**iiwa 14 R820**
Gradi di libertà	7	7
Payload	7 Kg	14 Kg
Peso	22 Kg	30 Kg
Ripetibilità	+/- 0.1 mm	+/- 0.15 mm
Sbraccio	800 mm	820 mm
Sicurezza	Safe Operation Software Complying to ISO 10218; ISO 12100; ISO 13849	
Prezzo	+/- 70.000 $	
Facilità programmazione	9/10	

Rethink, Sawyer e Baxter

Rethink ha sviluppato due robot collaborativi, il modello Baxter con due braccia e quello Sawyer a braccio singolo che ormai ha superato il suo predecessore per precisione e accuratezza. La caratteristica di queste macchine è la grande sicurezza garantita dai sensori di forza installati su ogni giunto e dal sistema di visione integrato in prossimità dello schermo, sempre attivo durante il suo utilizzo, che fa capire all'utente, in maniera interattiva, lo stato del robot limitando i rischi (figura 3.19), (tabella 3.9).

Questi robot inoltre hanno anche delle camere integrate su ogni braccio per lo svolgimento di compiti più precisi e per il riconoscimento degli oggetti (figura 3.19).

Figura 3.19 – I Robot Sawyer e Baxter di Rethink.

Tabella 3.9 – Caratteristiche dei robot Rethink.

	Sawyer	**Baxter**
Gradi di libertà	7	7
Payload	4 Kg	2.2 Kg (per braccio)
Peso	19Kg	75 Kg
Ripetibilità	+/-0.1 mm	//
Sbraccio	1260 mm	1210 mm
Sicurezza	PL d, Cat. 3	//
Prezzo	+/- 37.000 $	//
Facilità programmazione	9/10	9/10

Idispositivi mostrati fino ad ora sono prodotti dalle aziende più importanti al mondo in quest'ambito. Tuttavia esistono tanti altri modelli disponibili sul mercato; si rimanda ad un documento pubblicato RobotiQ per la consultazione.

3.5. Applicazioni collaborative

All'interno del mercato di questi nuovi sistemi, rientrano anche tutti i dispositivi software ed hardware sviluppati, dalle stesse aziende produttrici di robot o da ditte esterne specializzate. Questo rende i "cobot" ancora più flessibili ed adattabili ai contesti più disparati. La grande semplicità degli strumenti reperibili in commercio è dovuta soprattutto alla modalità plug & play. In questo modo, la sostituzione di un tool risulta molto rapida ed il robot in un intervallo limitato di tempo può essere adattato ad una nuova operazione.

L'elemento terminale di queste macchine, l'end-effector, è ciò che le rende adatte ad una specifica operazione. Per questo motivo è possibile reperire una vasta gamma di grippers a seconda della forma, della distribuzione e del tipo di materiale dell'oggetto da manipolare.

Il più classico dei tools prevede due fingers per la presa di oggetti ma è possibile reperire strumenti con 3 dita o addirittura con la stessa fisionomia della mano umana, talvolta con sistemi di visione integrati per il riconoscimento del pezzo (figura 3.20).

Figura 3.20 – Principali tipologie di gripper utilizzati.

Per il packaging vengono utilizzati solitamente dispositivi a ventosa o magnetici in grado di aderire su più punti della superficie di un oggetto e garantire una presa precisa e salda (figura 3.21). [23]

Figura 3.21 – Gripper a ventosa per il packaging.

Un vincolo dei robot è quello di essere avere una grossa dipendenza dall'end-effector utilizzato. Spesso infatti può essere complicato manipolare con lo stesso strumento oggetti di forma differente. In questo senso la ricerca sta puntando verso lo sviluppo di speciali gripper in grado di modellare la propria forma in funzione del pezzo da movimentare. La logica di funzionamento di questi dispositivi, descritta dalla figura 3.22, prevede di utilizzare un rivestimento elastico per contenere una certa quantità di materiale granulare. Il gripper dunque si deforma attorno all'oggetto da afferrare e dopo un sistema provvede all'aspirazione dell'aria presente all'interno della sacca favorendo la presa del pezzo. Dopo aver depositato l'oggetto questo strumento riacquisisce la forma normale [24]. In figura 3.23 si riporta un esempio reale.

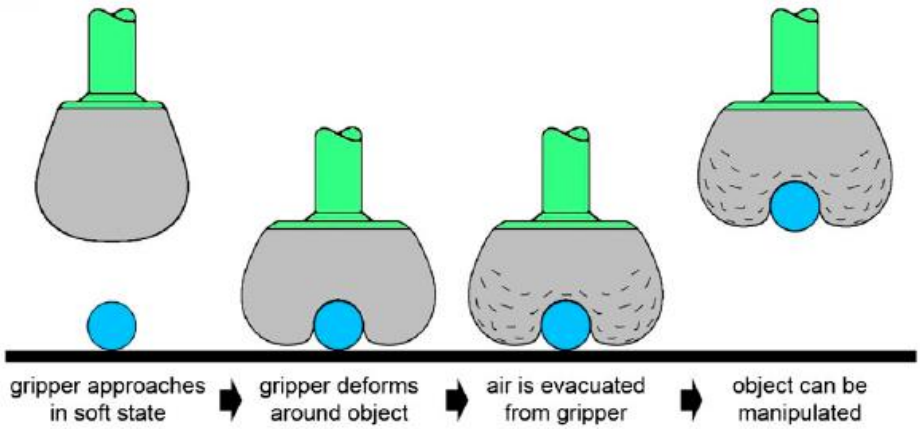


Figura 3.22 – Rappresentazione del funzionamento di un gripper universale.

Figura 3.23 Esempio gripper universale durante l'afferraggio di un oggetto.

Sulla flangia di questi robot è possibile inoltre installare una serie di strumenti per operazioni di saldatura, avvitatura, spalmatura, controllo qualità, lucidatura e altre operazioni comunemente effettuate negli stabilimenti (figura 3.24). [23]

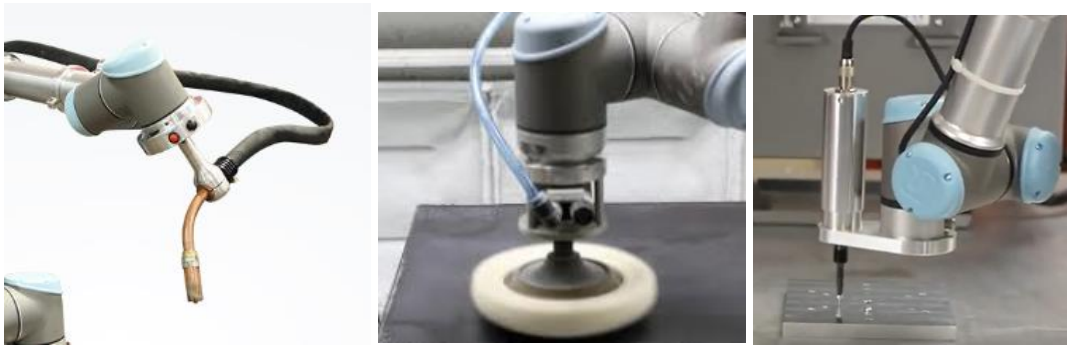


Figura 3.24 – Alcune tipologie di strumenti installabili sulle flange dei robot collaborativi.

Anche dal punto di vista degli accessori integrativi la scelta è davvero ampia. Si va dai sensori di forza con cella di carico, per ottenere una maggiore sensibilità al contatto, fino ai sistemi di visione più sofisticati.

Si possono trovare inoltre dei supporti per l'installazione di due strumenti sulla stessa flangia, supporti per l'installazione di due robot in parallelo, cover speciali per operazioni di verniciatura o in ambienti con temperatura estreme.

Dal punto di vista software sono disponibili invece pacchetti che consentono di effettuare simulazioni virtuali offline in maniera tale da progettare l'operazione robotica senza dover incorrere in un fermo macchina. Talvolta essi consentono anche la gestione online del braccio robotico per la modifica del programma in tempo reale.

L'aspetto più influente nella tipologia di applicazione di questi robot è la possibilità, concessa dalle normative, di lavorare nello stesso spazio dell'uomo senza il vincolo di barriere metalliche. Questo dunque lascia spazio a degli scenari applicativi che prima erano impensabili e si sta raggiungendo una maggiore flessibilità delle stazioni di lavoro. In questo modo, anche nel caso in cui non vi sia una collaborazione diretta, viene semplificata l'implementazione di un sistema robotico. Nella figura 3.25 ad esempio, viene mostrata la spalmatura delle guarnizioni per il parabrezza di un veicolo, attività che in precedenza veniva effettuata da un robot tradizionale in un ambiente isolato.

Figura 3.25 – Esempio di un'operazione di spalmatura delle guarnizioni sul parabrezza di un veicolo

Inoltre sono molto comuni operazioni dove l'uomo lavora con il robot come se esso faccia parte del personale di stabilimento, sostituendo la manodopera umana in attività ergonomicamente complesse, in condizioni particolarmente critiche o semplicemente in compiti noiosi e ripetitivi. Nelle figure 3.26 e 3.27 vengono mostrati un esempio relativo all'allestimento degli sportelli e all'esecuzione di alcuni fissaggi sotto la scocca di una vettura in linea in uno stabilimento.

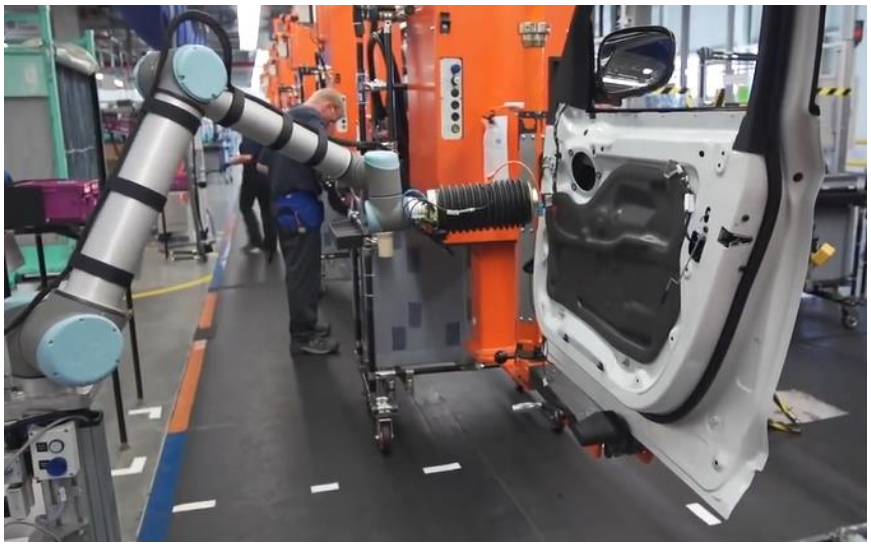


Figura 3.26 – Un robot dell'Universal Robots in azione lungo una linea di allestimento degli sportelli di uno stabilimento.

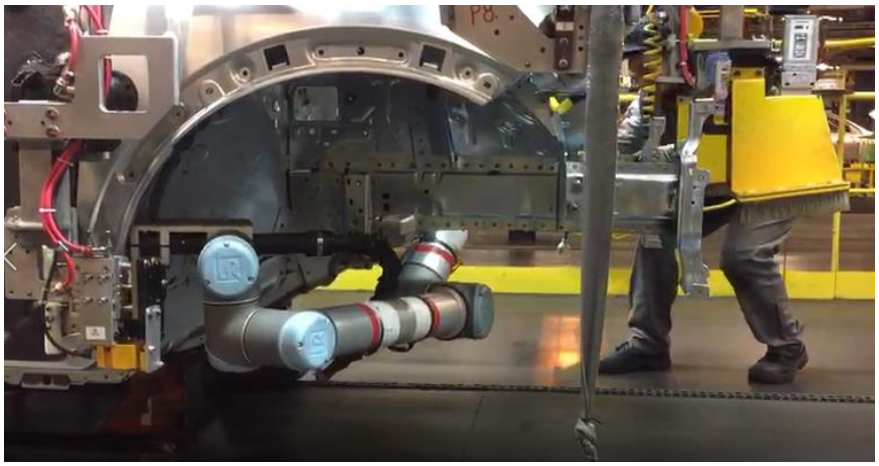


Figura 3.27 – Un robot dell'Universal Robots in azione lungo una linea di montaggio del veicolo in fabbrica.

Le operazioni collaborative però devono sottostare ai vincoli di sicurezza definiti dalle normative e ne derivano velocità di esecuzione relativamente ridotte. Per questo motivo sono molto comuni le operazioni di montaggio nelle quali non sono richieste velocità di esecuzione molto elevate. In figura 3.28 viene rappresentata un'operazione di assemblaggio di un carter di un ingranaggio.

Figura 3.28 – Operazione di assemblaggio di un componente meccanico con un robot Kuka.

Solitamente quindi le operazioni collaborative sono caratterizzate da forza, coppia, potenza e velocità tali da rendere i movimenti del robot molto simili a quelli dell'operatore umano, soprattutto quando essi lavorano fianco a fianco.

Un altro aspetto importante di cui tenere conto è l'entità dell'oggetto manipolato. L'attività collaborativa infatti perde la sua essenza dal momento in cui i pezzi sono taglienti o possono in qualche modo nuocere alla salute del lavoratore e quando il carico trasportato è molto elevato.

In generale però, nonostante queste limitazioni, le applicazioni odierne ricoprono un gran numero di attività del settore manifatturiero e gli studi di ricerca mireranno sicuramente ad ampliare questo scenario (figura 3.29).

Figura 3.29 – Elenco dei principali campi di applicazione dei robot collaborativi.

4. Progettazione e realizzazione di un'operazione collaborativa

In questo capitolo conclusivo verrà illustrato il contenuto di una dimostrazione reale di montaggio, relativa all'operazione vista nel capitolo 2, sfruttando le potenzialità di un robot collaborativo di ultima generazione. Per fare questo si utilizzeranno degli oggetti prototipali di legno e cartone in maniera tale da replicare l'operazione similmente a quanto avviene in linea nello stabilimento di FCA. Il cobot utilizzato è di proprietà del Politecnico di Torino ed è un modello UR3 Universal Robot. In prima istanza sarà possibile comprendere le problematiche relative alla definizione della traiettoria utilizzando un software specifico per le simulazioni robotiche. Esso consentirà inoltre di ribadire l'importanza delle simulazioni virtuali, garantendo la validazione del modello progettato in uno step precedente alla realizzazione. In seguito verrà illustrato il programma robot sviluppato appositamente per l'operazione e si chiariranno gli aspetti più interessanti riguardanti l'interazione tra l'operatore e la macchina e la valutazione del rischio associato.

4.1. Robot utilizzato

Il robot utilizzato è un Universal Robots UR3 di cui si riportano le specifiche tecniche (tabella 4.1).

Tabella 4.1 – Principali caratteristiche del robot UR3.

Caratteristiche tecniche	
Peso meccanica robot con cavo	11Kg
Carico utile	3 Kg
Portata	500 mm
Ripetibilità	±0.1 mm
Gradi di libertà	6 giunti rotanti
Materiali	Alluminio e plastica PP

Il robot ha 6 gradi di libertà, uno per ogni giunto rotante ed ognuno di questi ha dei vincoli relativi alla coppia massima applicabile per salvaguardare il personale e lo stato

della macchina stessa. La figura 4.1 chiarisce la nomenclatura per le varie parti del cobot e la tabella 4.2 specifica i vincoli su citati. [25]

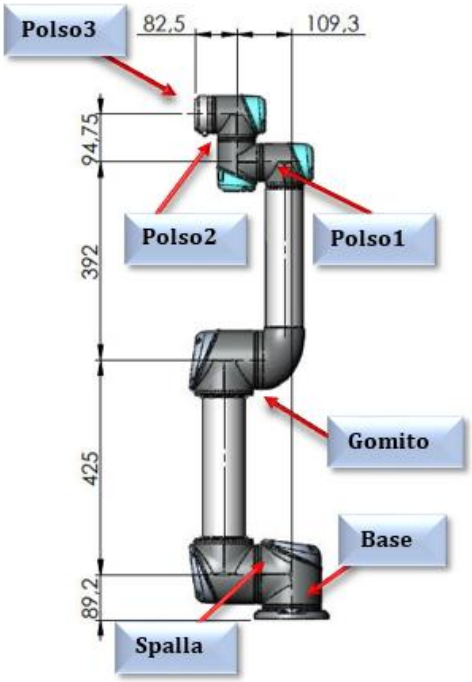


Figura 4.1 – Elenco dei principali campi di applicazione dei robot collaborativi.

Tabella 4.2–Coppia massima per ogni giunto del robot UR3.

Giunto	Coppia Max.
Polso 3	12 Nm
Polso 2	12 Nm
Polso 1	12 Nm
Gomito	28 Nm
Spalla	56 Nm
Base	56 Nm

4.1.1. Gripper

Lo strumento utilizzato per l'afferraggio della batteria è un gripper RG2 della OnRobot di cui si riportano le caratteristiche tecniche e il disegno in 2D in figura 4.2 e nella tabella 4.3. [26]

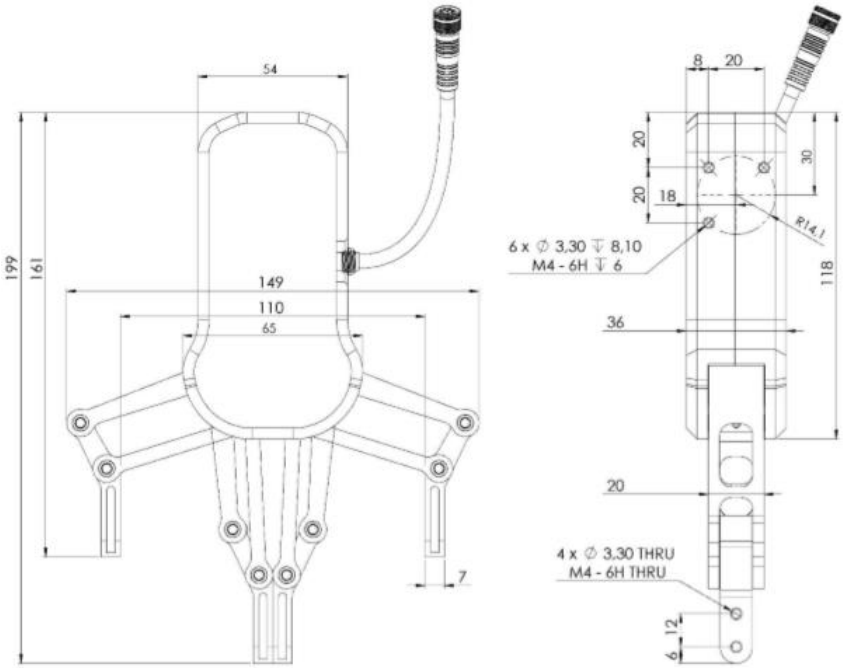


Figura 4.2 – Disegno con le quote del Gripper RG2.

Tabella 4.3 – Principali caratteristiche del Gripper RG2.

Payload	2kg
Forza	3-40 N (1N risoluzione)
Accuratezza Forza	+/- 1 N
Apertura max.	110 mm
Ripetibilità	+0.1 mm
Peso	650 g
Velocità di presa	184-55 m/s
Tempo di presa	0.11-0.04 s

4.1.2. Motori riduttori e sistemi di misura

Motori [13]

Uno dei punti chiave di questa tecnologia è la ricerca costante di riduzione del peso dei componenti. Questo infatti rende i robot più sicuri e riduce la gravità del danno nei confronti dell'uomo a seguito di un urto. Osservando i dati tecnici è possibile notare come il rapporto tra il peso complessivo della macchina (11Kg) e il payload massimo (3Kg) sia davvero ridotto rispetto alle applicazioni tradizionali.

Sulla corrente di questa strategia minimalista, è il robot stesso a garantire il rivestimento dei motori. La tecnologia ad azionamento diretto della KBM, fornisce dei motori privi di carcassa e che vengono integrati negli assi delle articolazioni avendo come supporto primario un riduttore armonico di cui si parlerà nel paragrafo successivo (figura 4.3). L'azionamento diretto e i sensori ad effetto Hall consentono ai robot di raggiungere un elevato livello di precisione nel movimento di controllo della forza, caratteristica di fondamentale importanza per le operazioni collaborative. Così facendo i robot sono in grado di riconoscere le dimensioni degli oggetti e regolare di conseguenza la forza. La sensibilità minima da questo punto di vista è di 25 N con una precisione di ± 10 newton ed un'accuratezza di ± 5 millimetri per ogni giunto.

I motori KBM inoltre offrono un'avanzata progettazione elettromagnetica per una coppia ottimizzata e il minimo di coppia di riluttanza e distorsione armonica. Questi benefici vengono offerti su un ampio range di velocità di funzionamento. La tecnologia elettromagnetica con un'elevata densità di impaccamento nello statore aumenta la coppia e tiene basse le perdite termiche. Nel rotore inoltre sono utilizzati magneti a terre rare a elevata intensità.

I principali vantaggi sono dunque un elevato rendimento, rumorosità ridotta, buona precisione e possibilità di evitare l'utilizzo di ingranaggi, cinghie dentate, cuscinetti ed altri componenti utilizzati in applicazioni convenzionali. Il sistema dunque risulta essere molto compatto, ha un'elevata densità di potenza e allo stesso tempo garantisce la sicurezza delle operazioni per via della sua sensibilità alla coppia.

[13] Riferimento [27].

Figura 4.3 – Motori ad azionamento diretto della KBM installati nei giunti del robot.

Riduttori[14]

Su ogni giunto inoltre sono montati dei riduttori Armonic Drive AG. Questi meccanismi vengono utilizzati molto frequentemente nel campo della robotica per la trasmissione del moto.

Questo sistema funziona grazie ad una teoria chiamata "strain wave gearing" che sfrutta l'elasticità dinamica e la flessibilità del metallo. I componenti di questo sistema sono quelli riportati in figura 4.4 :

1. Input shaft;
2. Wave generator (in verde);
3. Flex spline (in rosso);
4. Circular spline (in blu);
5. Output shaft;
6. Housing.

Il primo componente è costituito da due parti: un disco ellittico chiamato "wave generator plug" e un cuscinetto a sfere esterno. La ruota dentata più interna aderisce al cuscinetto, assumendo la stessa forma ellittica. La flex spline ha la forma di una tazza poco profonda. I lati di questa sono molto sottili ma hanno una rigidità al fondo relativamente elevata. Ne deriva una significativa flessibilità delle pareti specialmente in corrispondenza dell'estremità aperta. La parte chiusa invece è sufficientemente rigida da poter accogliere strettamente un albero rotante.

[14] Riferimento [28]

I denti sono posizionati radialmente intorno al lato esterno della flex spline. Essa inoltre è saldamente collegata con l'albero di ingresso (wave generator), per questo quando viene azionato ed inizia a ruotare essa si deforma in un'ellisse rotante e non scivola sull'anello esterno del cuscinetto.

Quest'ultimo inoltre consente alla flex spline il ruotare indipendentemente dall'albero rotante in ingresso. La circular spline invece è una ruota rigida con i denti rivolti verso l'interno.

Per via della forma ellittica della flex spline, l'ingranamento avviene solo nelle due regioni in prossimità dei vertici dell'asse maggiore.

Quando il wave generator inizia a ruotare la flex spline, che ingrana con la circular spline, inizia lentamente a cambiare posizione. L'asse maggiore dell'ellisse infatti ruoterà con l'albero di ingresso, quindi i punti in cui i denti ingranano ruoteranno attorno al punto centrale alla stessa velocità dell'albero rotante. Il principio di dimensionamento di questo meccanismo consiste nel progettare la flex spline con meno denti della circular spline. Questo vuol dire che per ogni rotazione completa del wave generator, la flex spline dovrebbe ruotare per una certa quantità nel verso opposto della circular spline. In sostanza alla rotazione dell'albero in ingresso corrisponderà una rotazione della flex spline, più lenta e nella direzione opposta. Il rapporto di riduzione β inoltre può essere calcolato come segue:

$$\beta = \frac{Z_3 - Z_4}{Z_3}$$

Se ci fossero 202 denti sulla circular spline e 200 sulla flex spline il rapporto di riduzione sarebbe -0.01. Quindi il componente flessibile si muoverebbe ad 1/100 della velocità di rotazione in ingresso e con direzione opposta. Questo rapporto può essere modificato inoltre cambiando il diametro del meccanismo o la sezione dei denti.

In conclusione vantaggi di questa tecnologia sono l'assenza i giochi, elevata compattezza e leggerezza, buona risoluzione ed eccellente ripetibilità. Dal punto di vista della trasmissione questo dispositivo consente di ottenere rapporti da 30:1 a 320:1 nello spazio in cui un riduttore tradizionale garantirebbe 10:1. Un ulteriore agevolazione è garantita dalla possibilità di riconfigurare il rapporto di trasmissione all'interno di una sede standard (figura 4.5).

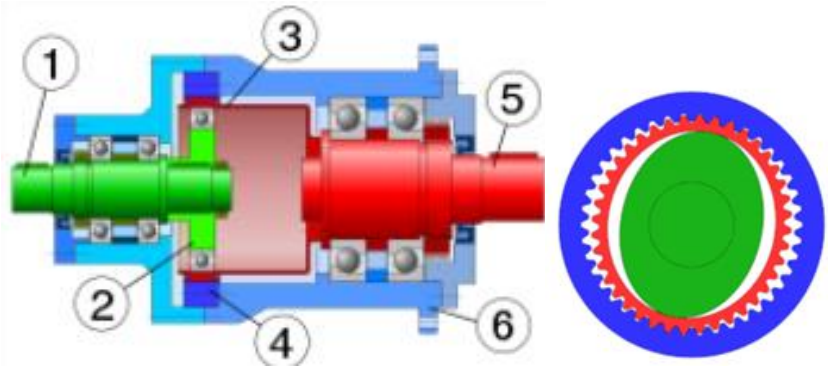


Figura 4.4 – Descrizione dei vari componenti della tipologia di riduttore armonico utilizzata nei robot UR.

Figura 4.5 – Modello tridimensionale del riduttore armonico della HArmonic Drive AG. [29]

Encoders[15]

Per garantite elevata precisione ed ottime performance in termini di sicurezza e stabilità, ogni giunto del robot ha installato al suo interno un encoder magnetico rotativo assoluto AksIM. In questo modo il sistema di controllo reperisce in tempo reale e con grande accuratezza le rilevazioni del posizionamento. Esso si trova all'estremità del riduttore per monitorare in tempo reale l'angolo di rotazione effettivo del robot. In questo modo viene eliminato l'errore di sistema, garantendo una ripetibilità di ± 0,1 mm. La risoluzione del sistema supera i 20 bit, con un'accuratezza di +/-0.1° (figura 4.6).

[15] Riferimento[30]

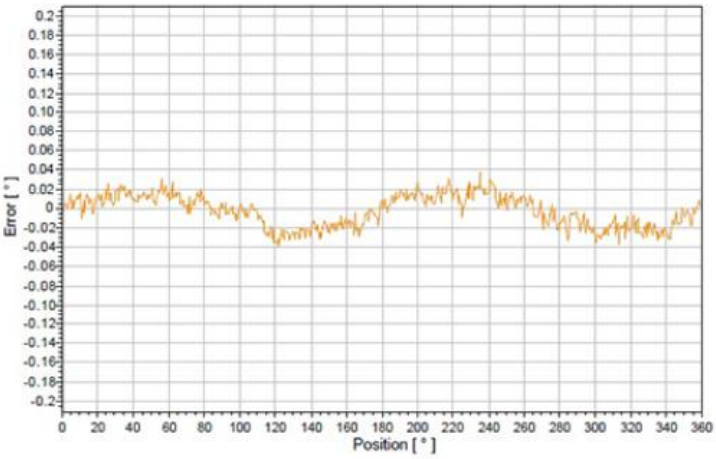


Figura 4.6 – Grafico rappresentativo della risoluzione degli encoders AksIM.

Questa tecnologia di encoder inoltre, non necessità di un backup della batteria poiché, la posizione assoluta viene letta all'accensione del robot.

In linea con i componenti visti fino ad ora, questi encoders sono appositamente progettati con una forma compatta per l'integrazione sul riduttore ed incrementano lo spessore dei giunti di soli 7 mm. La leggerezza di questi componenti inoltre, consente di limitare il peso complessivo dei giunti e di ridurre i consumi di elettricità (figura 4.7).

Figura 4.7– Encoder ottico AksIM.

4.2. Definizione delle configurazioni

Nella fase iniziale della definizione di un'operazione robotica è necessario effettuare il settaggio dei riferimenti e la configurazione degli strumenti utilizzati.

4.2.1. Sistemi di riferimenti

Dopo aver collegato il gripper alla flangia del robot, per evitare stop di protezione inaspettati da parte del robot è importante configurare il Tool Center Point (TCP) e il

centro di gravità dell'oggetto installato. Così facendo il sistema sarà consapevole della posizione dello strumento montato e della sua distribuzione del peso.

Il TCP è un punto che funge da riferimento dello strumento che si collega al robot e serve a garantire una adeguata precisione durante le operazioni. La definizione di questo parametro, ovviamente può essere differente a seconda dello strumento utilizzato, in generale però, deve essere impostato un riferimento significativo per l'applicazione. Nel caso di una pistola per saldature o di un distributore di colla presumibilmente il TCP sarà il punto terminale dello strumento.

Nella presente applicazione, verrà utilizzato il gripper con due dita mostrato nel paragrafo 4.1.1 pertanto il TCP verrà impostato in prossimità della zona di presa dell''oggetto. Per impostare la configurazione sarà necessario calcolare la distanza tra la flangia del robot e il punto definito (se non specificato, il TCP verrà impostato di default sul piano della flangia) (figura 4.8).

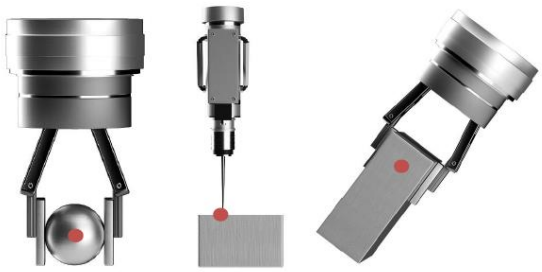


Figura 4.8 –Configurazione del TCP per tre diverse applicazioni.

Il centro di gravità del tool, invece, può essere calcolato pesando il componente. Una volta definito il punto esso dovrà essere registrato come distanza dal piano della flangia (lungo Z uscente dall'end-effector).

I sei gradi di libertà dell'UR3 implicano che la combinazione delle posizioni angolari espresse in gradi di ogni giunto di cui esso è dotato, definiscano un punto nello spazio. Lo stesso punto inoltre è definito da un vettore che contiene le coordinate in relazione al sistema di riferimento assoluto collocato nella base del robot (X, Y, Z [mm], Rx, Ry, Rz [deg]). Per instaurare una corrispondenza tra il riferimento assoluto e i punti di lavoro della macchina risulta essere di fondamentale importanza la configurazione del Tool Center Point. In questo modo le coordinate di ogni punto impostato saranno definite dalla relazione tra i riferimenti del Tool Center Point e la base del robot (figura 4.9).

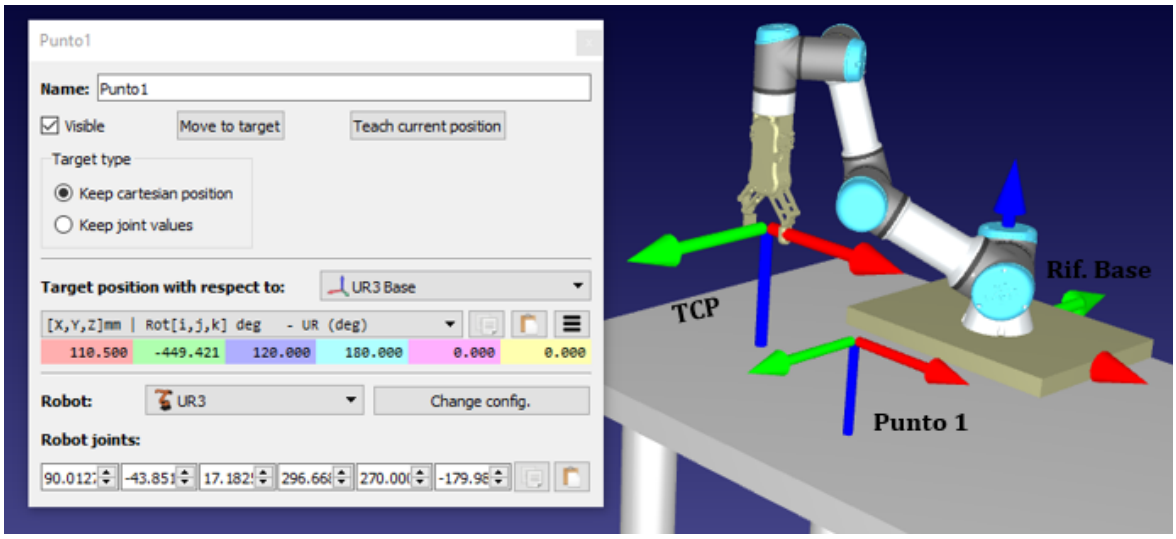


Figura 4.9 – Definizione delle coordinate di un punto esprimibili come relazione rispetto al riferimento principale o come combinazione delle posizioni dei giunti.

4.2.2. Vincoli di sicurezza

I robot UR, sono stati sviluppati principalmente per il funzionamento collaborativo ed hanno integrate nei propri sistemi 15 funzioni speciali di sicurezza. Di seguito verranno illustrati gli aspetti chiave per la definizione dei loro vincoli.

La scelta dei parametri deve essere effettuata durante la valutazione del rischio, a monte dell'implementazione di un'operazione collaborativa. Essa deve tener conto dell'ambiente circostante, degli oggetti e del personale e deve garantirne la totale sicurezza. Queste macchine infatti sono definite parzialmente complete, proprio perché la sicurezza del processo dipende non solo dal robot utilizzato ma anche dalle condizioni al contorno dell'operazione.

La valutazione del rischio relativa al montaggio della batteria sarà considerata alla fine di questo capitolo. In questa fase di analisi dei mezzi utilizzati quindi, si riporterà soltanto la descrizione delle funzioni di sicurezza di cui è dotato il robot.

Dalla schermata iniziale è possibile accedere al menù riguardante l'installazione; selezionando la voce "Safety" apparirà dunque una schermata di configurazione di sicurezza. Questi parametri sono protetti da una password che deve essere controllata dall'integratore del robot (figura 4.10).

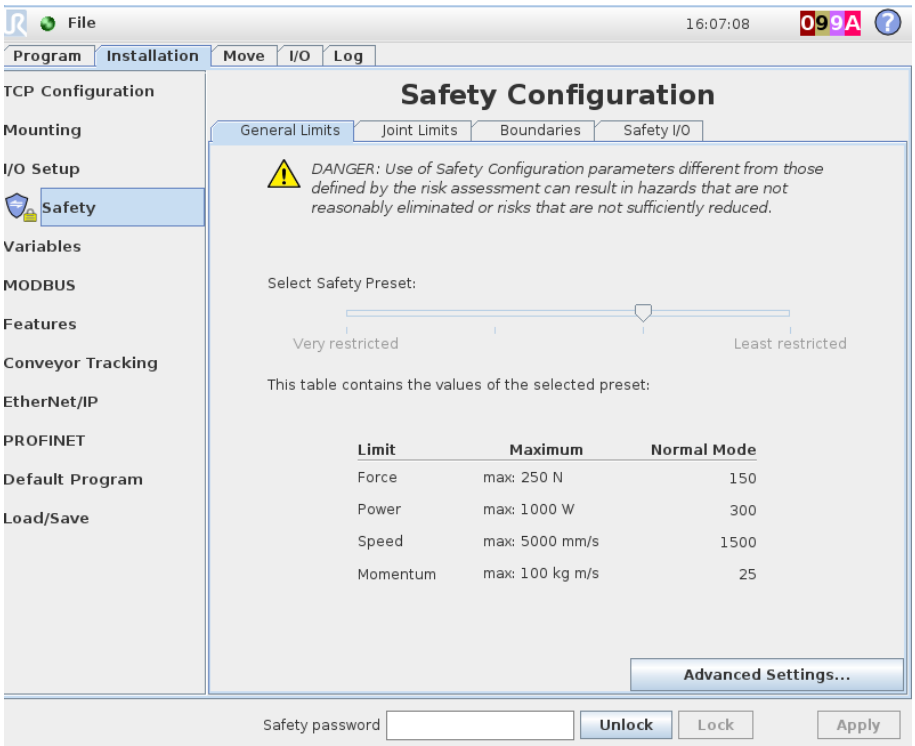


Figura 4.10 – Configurazione delle funzioni di sicurezza tramite interfaccia grafica UR..

Ci sono quattro livelli di controllo di sicurezza:

Dalla sezione *Limiti Generali*, si possono definire delle configurazioni preimpostate in base al livello di sicurezza desiderato oppure accedendo alle impostazioni avanzate si ha la possibilità di definire i valori per ogni parametro. Nello specifico si possono determinare forza, potenza velocità e quantità di moto massimi del centro utensile del robot per la configurazione "normale" e "ridotta" (figura 4.11). In funzione della probabilità e del possibile danno di una collisione contro oggetti o persone verranno dunque definiti questi valori.

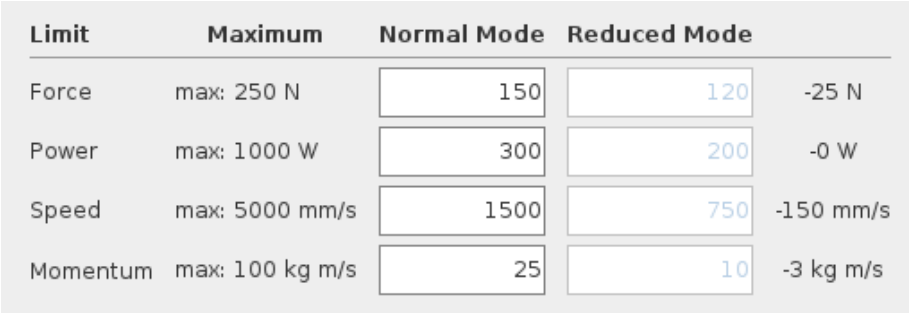


Figura 4.11 – Definizione dei parametri Forza, Potenza, Velocità del TCP e quantità di moto.

La scheda *limiti giunto* invece consente di definire la velocità e la posizioni limite di ogni singolo giunto (figura 4.12), (figura 4.13).

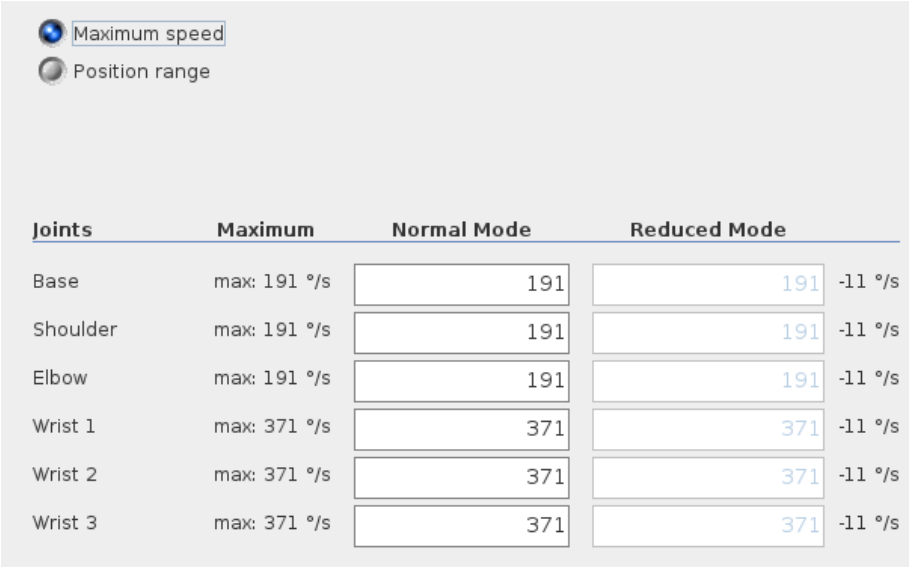


Figura 4.12 –Definizione dei limiti di velocità di rotazione di ogni giunto.

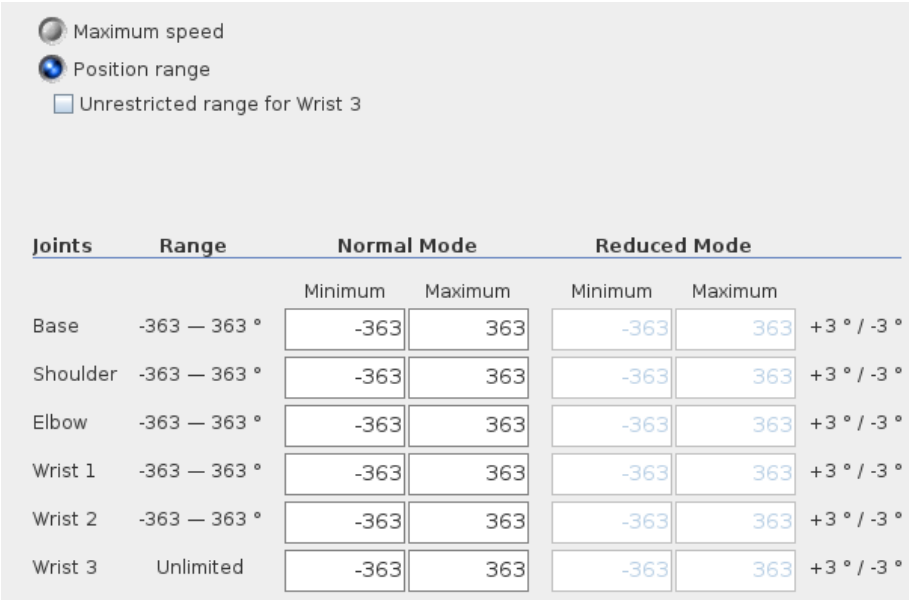


Figura 4.13 –Definizione dei limiti di posizione di ogni giunto.

Nella parte relativa ai limiti invece è possibile definire dei piani di sicurezza nello spazio cartesiano e dei limiti di orientamento dell'utensile. Questi vincoli possono essere inflessibili oppure possono rappresentare la zona di transizione per l'attivazione della modalità ridotta (figura 4.14).

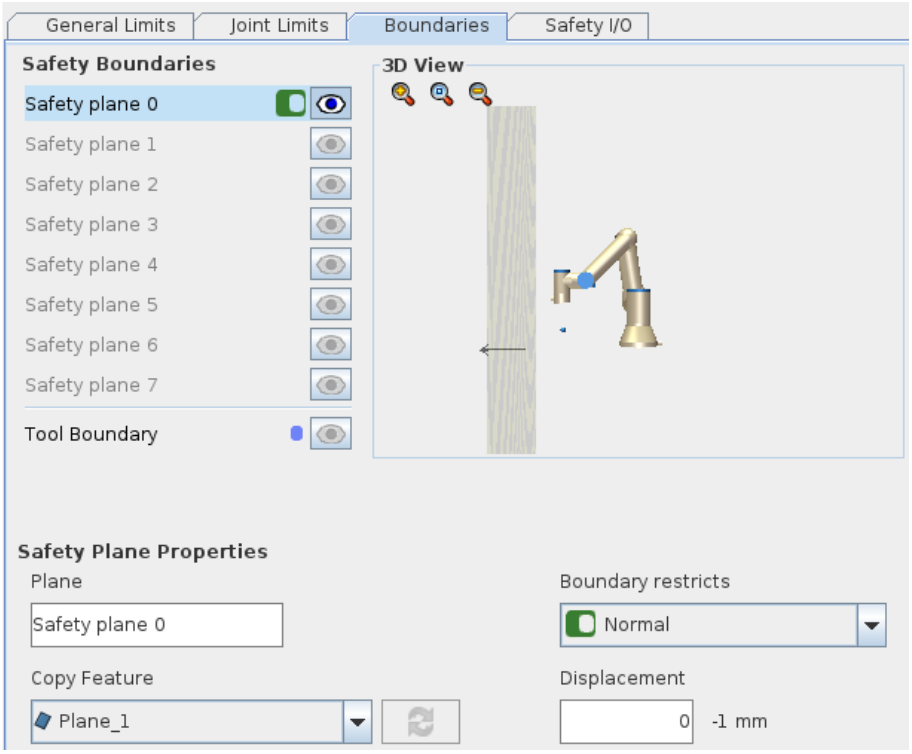


Figura 4.14 –Scheda di configurazione dei limiti di sicurezza spaziali del robot.

L'ultima scheda relativa agli *I/O di sicurezza* consente di gestire le funzioni di sicurezza per gli ingressi e uscite configurabili.

In caso di collisioni con l'ambiente esterno il robot potrà eseguire differenti tipologie di arresto secondo quanto illustrato nel capitolo 3. Il modello UR3 in questione solitamente viene settato per utilizzare un arresto di tipo 0 in condizioni estremamente critiche. Questo può accadere ad esempio per anomalie ai componenti, per la violazione di un limite con classificazione di sicurezza o per una variazione oltre i parametri definiti durante la modalità "ripristino" a seguito di un arresto o durante la fase di frenata di un arresto di altra categoria. In questa modalità sono possibili deviazioni dal percorso durante la fermata poiché viene a mancare istantaneamente la corrente ai giunti.

Nella condizione in cui:

- Il braccio sia esteso al 100%;
- La velocità del TCP sia come indicato in tabella;
- Il carico utile sia Massimo (3Kg);

i tempi di arresto per una categoria 0, che risulta essere la più critica, sono:

Tabella 4.4 – Tempi di arresto della Categoria 0 in funzione della velocità del robot.

Limite di velocità del TCP	Tempo si arresto massimo
1.0 m/s	400 ms
1.5 m/s	450 ms

Per quanto riguarda lo stop di emergenza che viene attivato dal bottone rosso del tech pendant, esso è di categoria 1 e a differenza della tipologia 0 consente il depotenziamento del sistema prima dell'arresto.

La categoria di arresto 2 invece viene usata per lo stop di salvaguardia in maniera tale che sia garantita la sicurezza dell'operazione ma che allo stesso tempo il processo possa riprendere dalla stessa posizione dell'arresto selezionando un comando. Tipologie di arresto di questo tipo sono solitamente legate a dispositivi esterni come sensori laser ed ottici, bottoni di switch per porte ecc.

4.3. Descrizione dell'operazione

Il processo simulato è composto dai seguenti step:

1. Riconoscimento della batteria;
2. Prelievo dell'oggetto in questione;
3. Posizionamento nella sede (con l'intervento dell'operatore o totalmente automatico);
4. Fissaggio nella sede della batteria;

La dimostrazione che verrà effettuata necessità di alcune semplificazioni riguardanti i pesi, la forma e le dimensioni degli oggetti coinvolti rispetto a quanto avviene nella realtà negli stabilimenti di FCA.

Per ricreare un ambiente di lavoro virtuale sono stati modellati tutti i componenti necessari all'operazione, con il software SolidWorks.

Il vano della batteria è stato simulato modellando un parallelepipedo che su un lato avrà ricavato lo spazio per il posizionamento della batteria. Nella figura 4.15 è possibile osservare le dimensioni e la forma della sede.

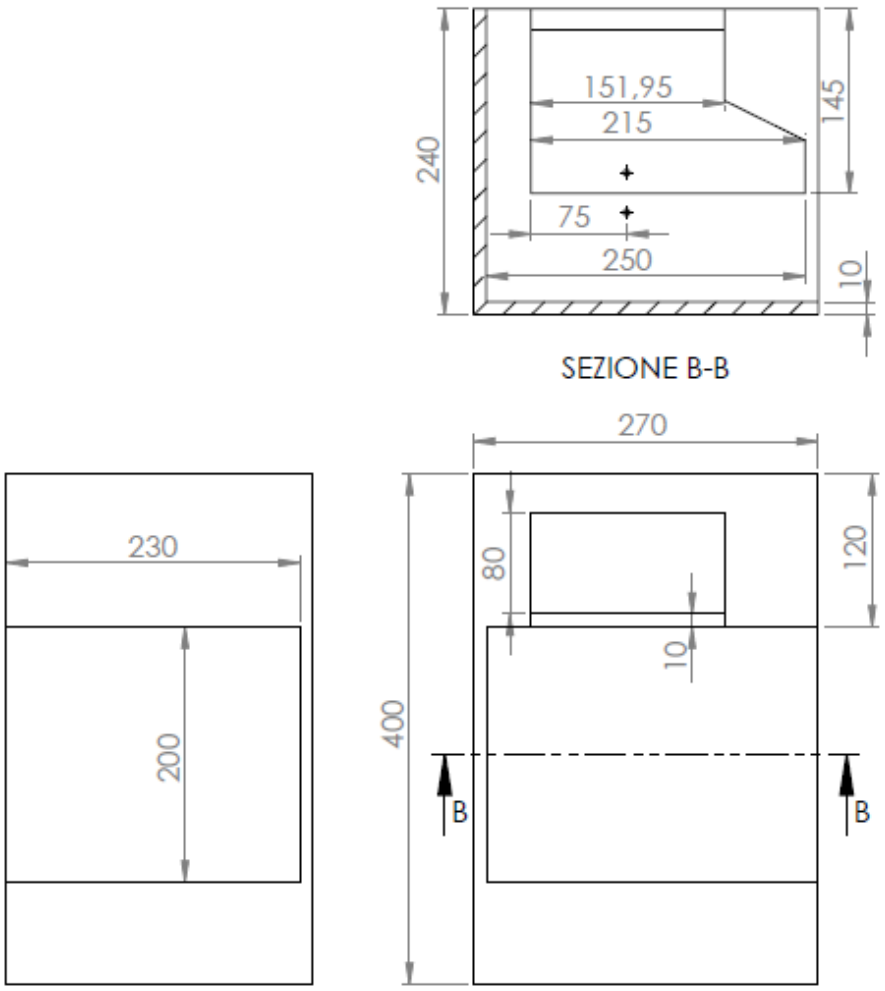


Figura 4.15 –Disegno 2D dell'oggetto utilizzato come prototipo del vano baule.

Per quanto riguarda le batterie, per la dimostrazione vengono utilizzati due prototipi di forma rettangolare di dimensione e peso differenti (figura 4.16)

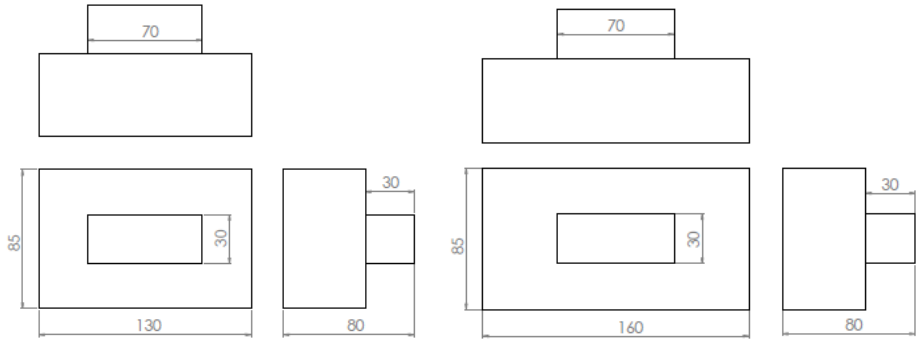


Figura 4.16 –Disegni 2D dei componenti modellati per simulare le batterie utilizzate in FCA.

E' possibile notare inoltre che i due modelli presentano nella parte superiore un dispositivo per garantire una presa da parte del gripper del robot che sia agevole e il meno ingombrante possibile.

Le misure del pallet che verrà utilizzato sono riportate in figura 4.17. Esso è costituito da una piastra modellata con delle sedi per garantire il corretto posizionamento delle batterie. Il preciso posizionamento di questi oggetti all'interno del pallet infatti, risulta essere fondamentale poiché il robot sarà programmato per agire conoscendo a priori le coordinate di questi ultimi.

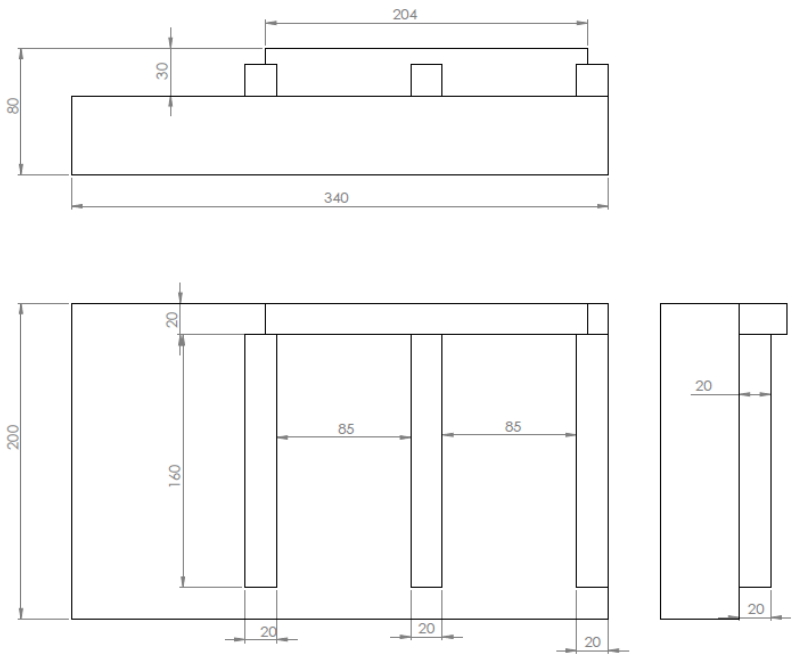


Figura 4.17 –Disegno 2D del modello utilizzato come pallet per le batterie.

In definitiva per l'organizzazione dell'ambiente di lavoro si è tenuto conto del raggio d'azione del robot e si è cercato di garantire un'azione il più vicino possibile al riferimento principale. In questo modo infatti risultano ridotti i problemi relativi all'estensione totale del braccio robotico e alle singolarità (figura 4.18).

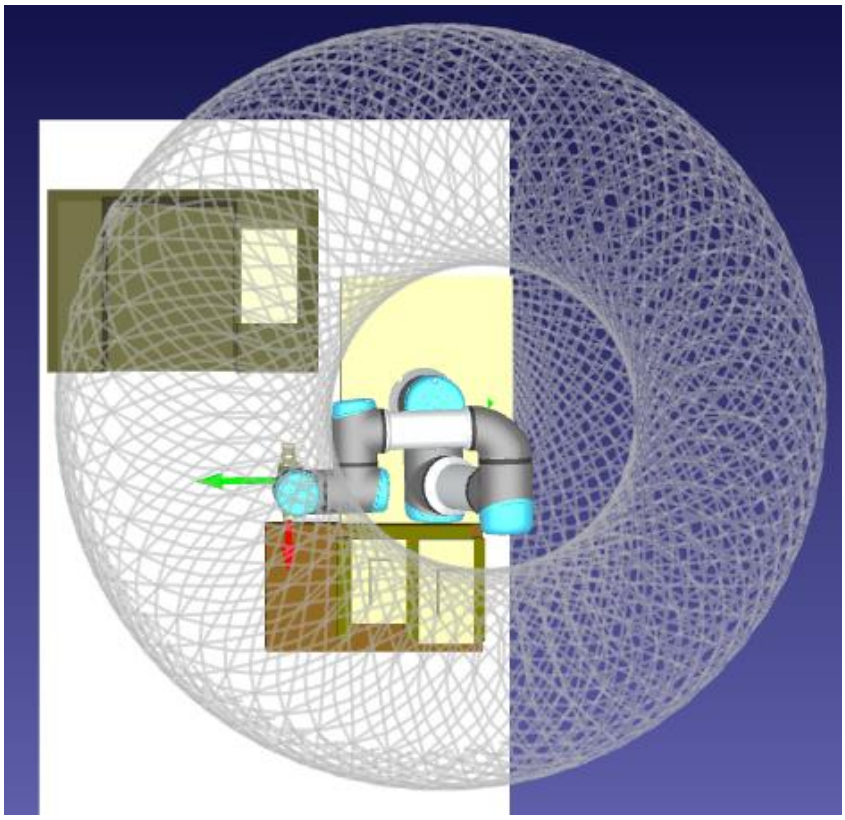


Figura 4.18 –Rappresentazione del workspace e del raggio d'azione del robot. Modello creato in ambiente virtuale con RoboDK.

4.4. Progettazione della traiettoria

Una parte del presente lavoro di tesi è servita ad illustrare come i software per le simulazioni virtuali siano di fondamentale importanza a monte dell'implementazione di un nuovo processo.

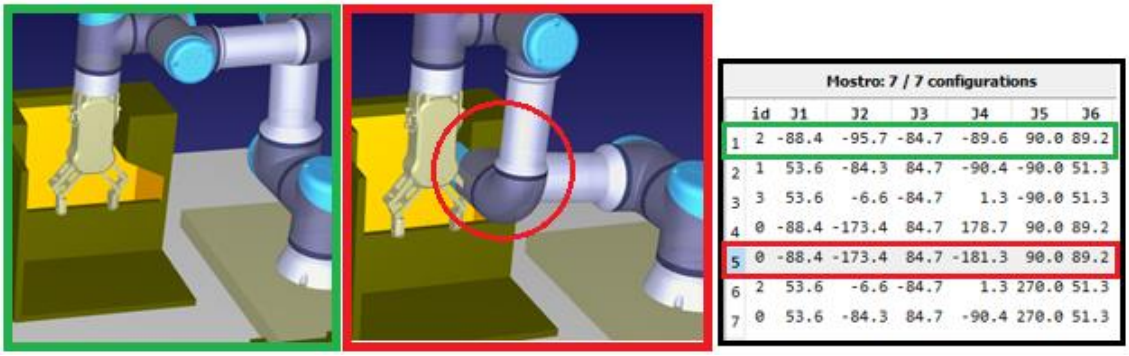
Anche per la definizione di questa operazione robotica pertanto, è stato utilizzato un software apposito chiamato Robo DK. Esso consente di sviluppare ed organizzare offline, in un ambiente virtuale, i programmi robot desiderati. Così facendo possono essere risolti una serie di problemi legati all'organizzazione della zona di lavoro e alla definizione ottimale della traiettoria.

La difficoltà nella definizione della traiettoria del robot è legata alla risoluzione della cinematica inversa. Essa consiste nella determinazione delle configurazioni da far assumere ai giunti attuati per fare in modo che la postura dell'organo terminale sia una assegnata. Il problema è costituito da un sistema di equazioni non lineari che può avere:

- Nessuna soluzione (si richiede di stare all'esterno dello spazio di lavoro);
- insieme finito di soluzioni (una o più);
- infinite soluzioni.

Lo strumento virtuale in questo caso consente di conoscere anticipatamente le combinazioni dei posizionamenti dei giunti consentite dal robot e di facilitare quindi la programmazione dell'operazione. Infatti, accade sovente che il robot durante il moto lungo una traiettoria lineare incontri dei punti di singolarità. Per questo motivo è preferibile, quando possibile, utilizzare la funzione di movimento che opera nello spazio dei giunti (le diverse tipologie verranno illustrate in seguito).

Talvolta inoltre, la combinazione dei giunti trovata per un determinato punto può non essere compatibile con gli oggetti circostanti come nell'esempio in figura 4.19. In questo caso dunque, analizzando le varie configurazioni sarà possibile scegliere quella che si adatta meglio all'ambiente di lavoro modellato (nell'esempio la configurazione in verde).



Mostro: 7 / 7 configurations

	id	J1	J2	J3	J4	J5	J6
1	2	-88.4	-95.7	-84.7	-89.6	90.0	89.2
2	1	53.6	-84.3	84.7	-90.4	-90.0	51.3
3	3	53.6	-6.6	-84.7	1.3	-90.0	51.3
4	0	-88.4	-173.4	84.7	178.7	90.0	89.2
5	0	-88.4	-173.4	84.7	-181.3	90.0	89.2
6	2	53.6	-6.6	-84.7	1.3	270.0	51.3
7	0	53.6	-84.3	84.7	-90.4	270.0	51.3

Figura 4.19 – Due diverse configurazioni dei giunti per il raggiungimento di uno stesso punto.

Sfruttando le informazioni fornite dal software è possibile quindi definire agevolmente il percorso del robot per lo svolgimento delle operazioni elencate in precedenza.

Per una completa progettazione della traiettoria inoltre, è importante conoscere tutte le possibili configurazioni di movimento utilizzabili. Nella tabella 4 vengono descritte singolarmente e vengono illustrati i campi di utilizzo di ciascuna.

Tabella 4.5 – Rappresentazione delle differenti tipologie di movimento consentite dal robot.

Tipologia di movimento	Caratteristiche	Quando utilizzarla
Move J (mov. giunti)	✓ percorso non lineare ✓ tipologia più veloce	✓ in uno spazio libero ✓ se non è importante la traiettoria del TCP
Move L (mov. lineare)	✓ percorso lineare	✓ in uno spazio definito ✓ se è importante la traiettoria del TCP
Move P (mov. di processo)	✓ mantiene la velocità del TCP costante	✓ se è necessario mantenere la velocità costante lungo il tragitto ✓ utilizzata per operazioni di processo
Move C (mov. circolare)	✓ movimento circolare ✓ velocità del TCP fissa ✓ si può utilizzare in combinazione con Move P	✓ quando è necessario che il TCP compia un movimento circolare ✓ utilizzata per operazioni di processo

All'interno di ogni configurazione inoltre è possibile impostare il profilo di velocità e accelerazione del TCP. Il livello della fase di crociera dipende dalla velocità impostata mentre la ripidità della fase di accelerazione e decelerazione dipende dal parametro di accelerazione (figura 4.20).

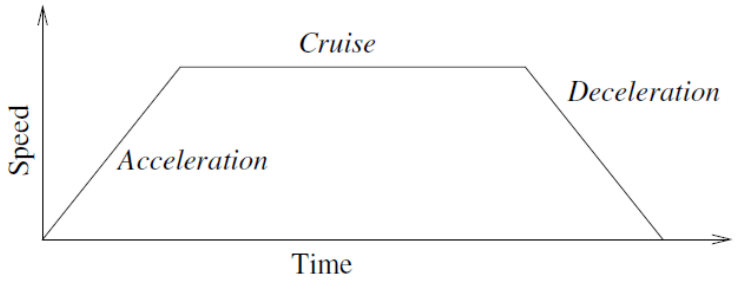


Figura 4.20 – Profilo di velocità seguito dal robot durante un'operazione.

Nella prima fase relativa al riconoscimento della batteria, il robot si sposterà sequenzialmente nelle diverse posizioni del pallet scorrendo in direzione X fino ad andare in battuta con l'oggetto quando esso viene pervenuto. In figura 4.21 si riporta la sequenza delle posizioni assunte dalla macchina durante questa fase e nella tabella 4.6 i valori delle coordinate.

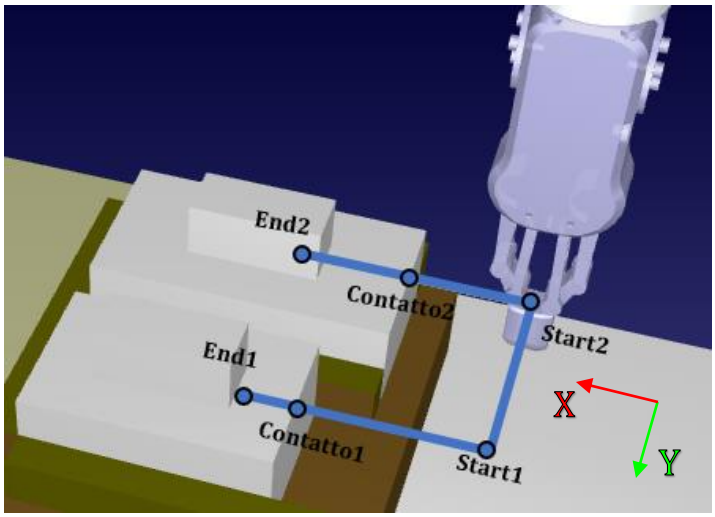


Figura 4.21 – Sequenza dei punti percorsi, utilizzando la modalità move L, per l'operazione di ricerca della batteria .

Tabella 4.6 – Vettori delle coordinate dei punti relativi all'operazione di ricerca delle batterie

Punto	X (m)	Y(m)	Z(m)	RX(Deg)	RY(Deg)	RZ(Deg)
Start1	0.3609	-0.053+y	0.1009	3.136	0	0
End1	0.2958	//	//	//	//	//

I vettori relativi alle due differenti posizioni (Start1, Start2 ad esempio) differiscono solo per la variabile Y che viene incrementata di un valore Δy ogni volta che il robot non trova un'oggetto. In questo modo esso si sposta nella postazione successiva che in questo caso sarebbe quella del punto Start2.

Dopo aver riconosciuto l'oggetto il robot provvederà al suo prelievo e posizionamento nella sede. Si riportano nella figura 4.22 i punti definiti per il processo di montaggio della batteria di dimensione maggiore e nella tabella 4.7 si possono osservare i valori delle coordinate.

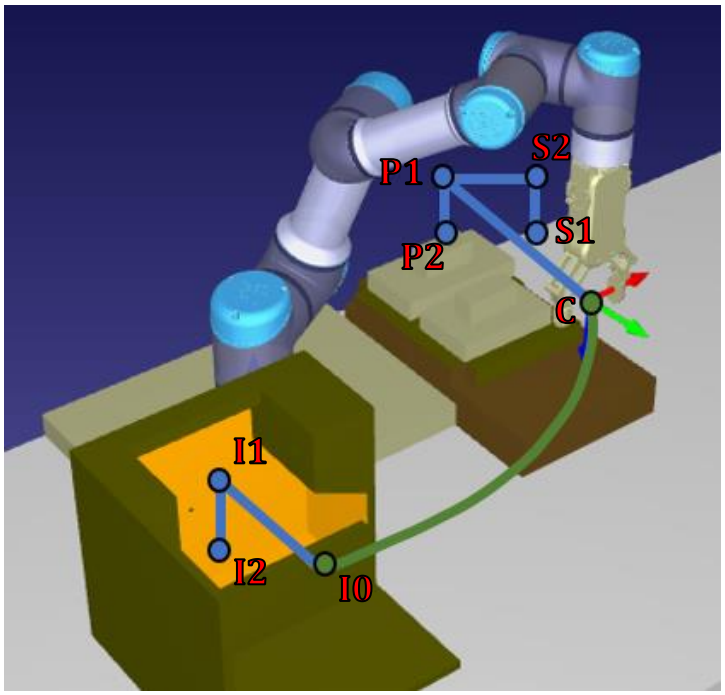


Figura 4.22 – Sequenza dei punti utilizzati per l'operazione di Pick and Place utilizzando le funzioni move L e move J. La batteria è stata sezionata per osservare al meglio l'andamento della traiettoria.

Tabella 4.7 – Vettori delle coordinate dei punti relativi all'operazione di ricerca delle batterie. *Paragrafo 4.5.2

Punto	X (m)	Y(m)	Z(m)	RX(Deg)	RY(Deg)	RZ(Deg)
S1	0.3609	-0.053+y	0.1009	3.136	0	0
S2	//	//	0.1556	3.136	0	0
P1*	0.280+x	//	//	//	//	//
P2*	//	//	0.0826	//	//	//
C	//	-0.2484	0.2145	//	//	//
I0	-0.1919	-0.3801	-0.2458	//	//	//
I1*	//	-0.2464	//	//	//	//
I2*	//	//	-0.3303	//	//	//

Nell'ultima fase dell'operazione il robot prenderà un bullone da una piastrina posizionata sul pallet per fornirla all'operatore. La traiettoria può essere osservata dalla figura 4.23 mentre le coordinate dei punti vengono definite nella tabella 4.8.

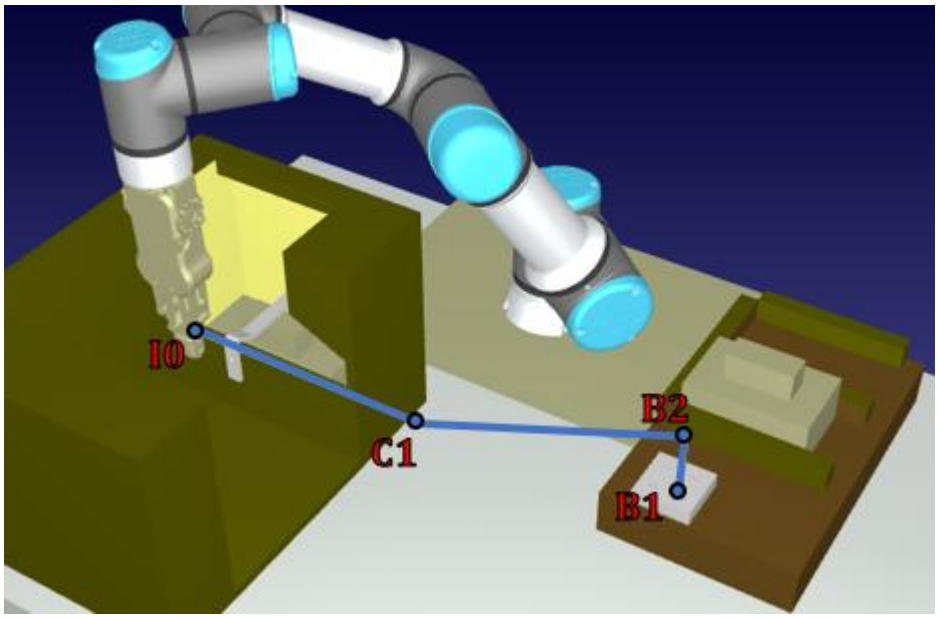


Figura 4.23 – Sequenza dei punti per l'operazione in cui il robot preleva il bullone e lo porge all'operatore.

Tabella 4.8 – Vettori delle coordinate dei punti relativi all'operazione di ricerca delle batterie.

Punto	X (m)	Y(m)	Z(m)	RX(Deg)	RY(Deg)	RZ(Deg)
C1	0.0525	0.3745	-0.2011	3.136	0	0
B1	0.2925	0.2041	0.3356	//	//	//
B2	//	//	0.3093	//	//	//

Durane la definizione della traiettoria sono state monitorate le luci di passaggio e le possibili collisioni tra gli oggetti coinvolti tramite una specifica funzione di controllo della traiettoria.

In particolare, essendo la sede delle batterie uno spazio particolarmente ristretto, i movimenti della macchina dovranno essere molto precisi. In figura 4.24 è possibile osservare le luci di passaggio durante l'inserimento della batteria nel vano.

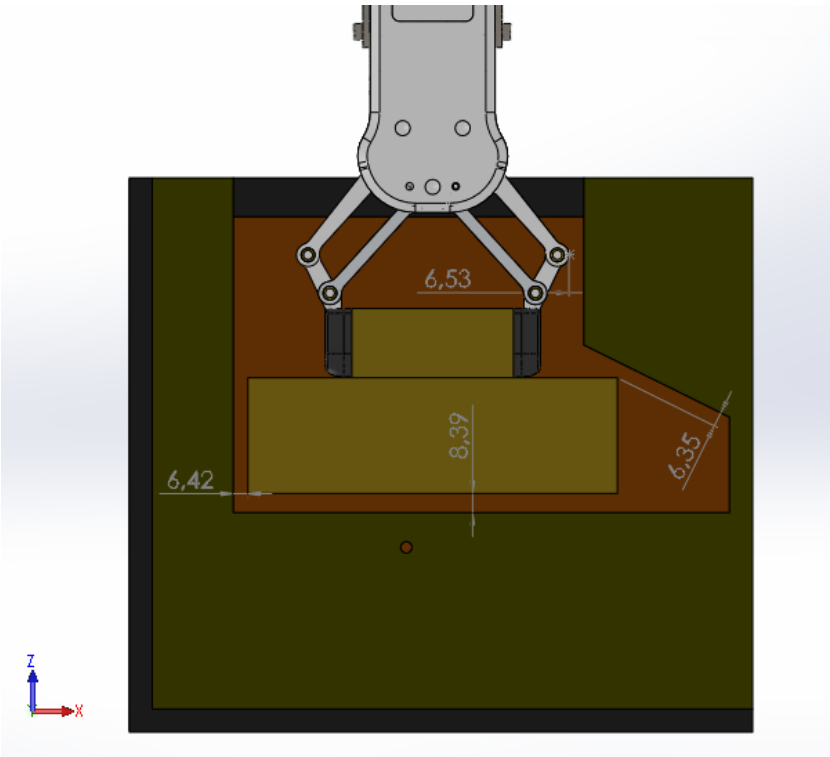


Figura 4.24 – Vista in sezione sul piano X-Z della fase di inserimento della batteria in cui si misurano le luci di passaggio minori di tutta l'operazione.

Un'altra condizione di criticità durante l'operazione è quella relativa al posizionamento finale della batteria, l'end-effector durante il rilascio dell'oggetto dovrà allargare la sua presa ed è necessario che possa farlo senza collisioni con le pareti della sede. In figura 4.25 viene mostrata la configurazione ottimale che corrisponde inoltre alla migliore distribuzione del peso della batteria durante la sua movimentazione evitando oscillazioni.

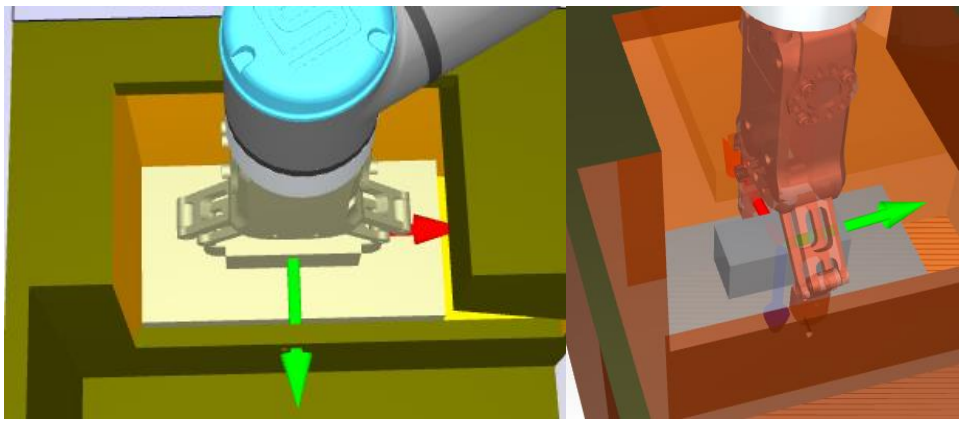


Figura 4.25 – Valutazione dell'orientazione del gripper durante la fase di posizionamento nella sede.

4.5. Programmazione del robot

Gli Universal Robots possono essere controllati su due livelli: utilizzando l'interfaccia grafica per l'utente o servendosi di linguaggi di programmazione ed utilizzare gli script su un altro PC. Esiste uno specifico linguaggio di programmazione URscript. Esso come tutti il linguaggio ha delle variabili, tipi, flussi di controllo di stato, funzioni ecc. Ci sono anche delle variabili e delle funzioni precostituite per gestire I/O e movimenti del robot. La casa costruttrice inoltre fornisce un manuale contenente tutti i dettagli per la programmazione al livello "script".

Questi sistemi inoltre sono dotati di un'unità di controllo gestita da un Mini-ITX PC. Quando esso viene avviato, URControl si attiva come un deamon e l'interfaccia utente PolyScope si connette come Client utilizzando la connessione locale TCP/IP. Utilizzando invece il controllo al livello Script il programma viene scritto ed eseguito su un altro PC connesso al URControl utilizzando un protocollo di comunicazione TCP/IP socket.

Nel caso studiato in questo capitolo il robot è stato controllato tramite l'interfaccia PolyScope utilizzando però una miscellanea di funzioni. Sono state utlizzate le funzioni precostituite nel linguaggio di programmazione UR, i comandi accessibili dall'interfaccia grafica GUI e alcuni script definiti con il codice Python. L'elaboratore del robot infatti consente anche di implementare parti di programma come script e elaborarle tramite il teach pendant gestito dall'utente.

4.5.1. Funzione di ricerca dell'oggetto

L'operazione è costituita da alcuni punti fondamentali. La prima parte relativa al rinoscimento della batteria verrà illustrata di seguito ed è stata semplificata tramite il diagramma di flusso in figura 4.26.

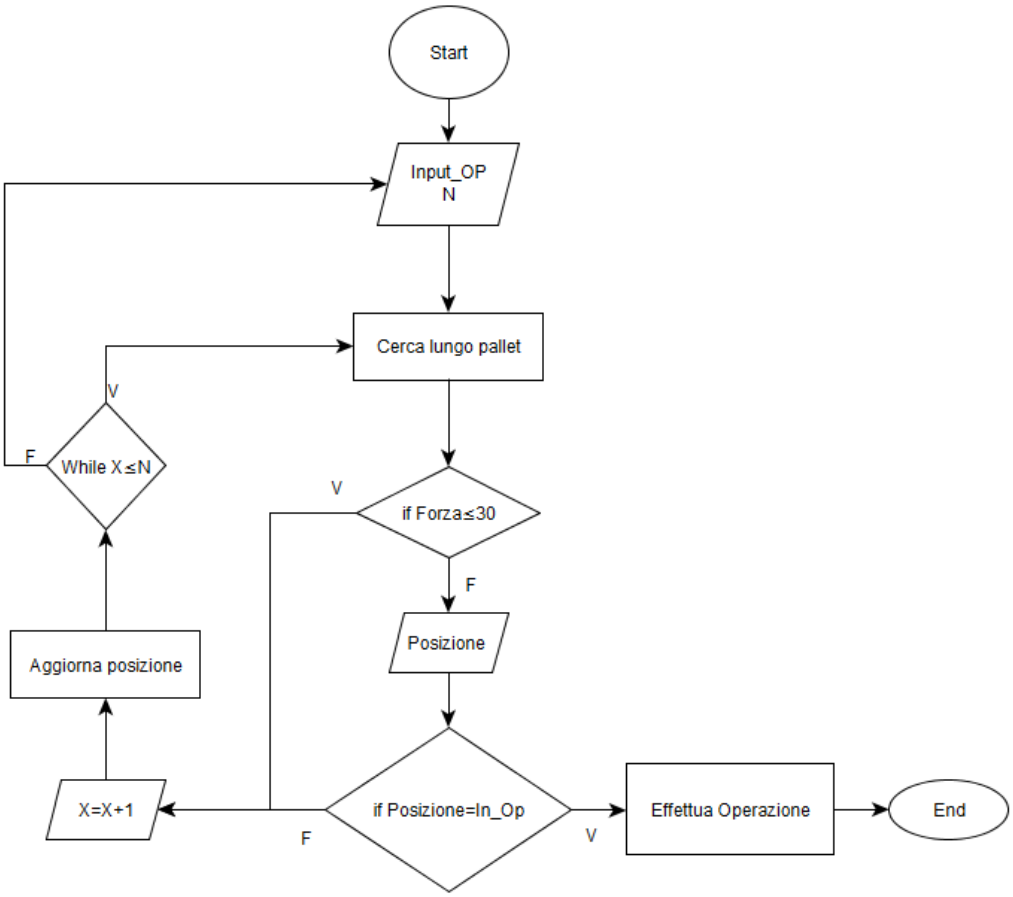


Figura 4.26 – Diagramma di flusso relativo alla fase di riconoscimento della batteria.

Il programma viene avviato dall'input dell'operatore che, tramite il teach pendant, comunica al robot il codice della batteria che deve essere montata. L'input viene definito da una stringa che diverrà la variabile di confronto utilizzata per il riconoscimento dell'oggetto da parte del robot.

Le due opzioni possibili sono il prelievo della batteria più piccola da 95Ah, che verrà riconosciuta dalla stringa "small" e di quella da 110Ah di dimensione maggiore identificata dalla stringa "big".

Il programma, dopo aver ricevuto l'input da parte dell'operatore, inizierà l'azione di ricerca dell'oggetto desiderato. Il robot pertanto, sarà programmato per agire sequanzialmente su delle posizioni prestabilite come è stato mostrato precedentemente. Il loop in questo caso è stato definito per N=2 (poiché sono due le posizioni costruite sul pallet).

Su ogni postazione del pallet il robot percorrerà una traiettoria lineare in direzione X partendo dal punto *Start* e cercando di raggiungere il punto *End* che corrisponde all'assenza di oggetto.

Il programma quindi è stato costruito per fare in modo che qualora, durante questo percorso, la forza massima misurata dal sistema dovesse superare i 30 N, venga attivata una specifica funzione che interrompe la ricerca e registra le coordinate del punto di contatto con l'oggetto. Il robot UR3 infatti, misurando la variazione di corrente sui motori dei giunti, è in grado di avere una sensibilità minima di 25 N sul TCP senza l'utilizzo di sensori integrativi.

Dopo aver registrato la coordinata del punto in cui avviene il contatto tra l'end-effector e l'oggetto di interesse, viene sfruttata dal sistema la differenza di lunghezza delle due batterie. Osservando la figura 4.21 infatti, è possibile notare che esse hanno differente lunghezza nella direzione X rispetto al riferimento del robot. Per questo motivo le due possibili stringhe sono collegate all'interno del programma a due differenti range di valori in direzione X. Questo è necessario affinché il sistema di controllo, a seguito del reperimento delle coordinate reali relative al posizionamento degli oggetti, possa confrontare il valore della variabile X del punto di contatto con la richiesta dell'operatore (tabella 4.9).

Tabella 4.9 – Assegnazione del range di valori in direzione X associati alle stringhe inserite dall'operatore.

Codice Batteria	**A= "valore letto in X"**
"small"	0.31<A<0.33
"big"	0.34<A<0.35

Questo sistema rende inequivocabile il riconoscimento delle due differenti batterie. Infatti, nonostante la lunghezza degli oggetti in direzione X sia rappresentata da dei valori finiti, è utile chiarire che sarebbe impossibile definire un limite certo di confronto per via della ripetibilità del sistema di +/-0.1mm del sistema di misura. In conclusione, per ogni misurazione, il valore A sarebbe differente di qualche decimo di millimetro dal valore impostato.

I vettori relativi ai punti della traiettoria del robot sono stati definiti con la componente Y variabile. In questo modo dunque, alla fine della ricerca in una posizione, quando non si è verificata la condizione impostata dall'operatore, viene incrementa di Δy=0.105m la

variabile Y di tutti punti definiti (anche quelli necessari all'operazione di pick della batteria), fino al punto *Comune*, in maniera tale da proseguire la ricerca nella posizione successiva. Quando la variabile A misurata si trova all'interno dello stesso range definito dall'operatore, la batteria viene prelevata e può iniziare la fase di montaggio.
Se per entrambe le postazioni definite non viene reperito alcun oggetto, il programma fornirà un messaggio di errore per l'operatore.

4.5.2. Posizionamento all'interno del vano

Dopo aver riconosciuto la batteria il robot provvederà al suo prelievo dalla sede e al posizionamento all'interno del vano seguendo i punti definiti sopra. È da notare che il punto di presa del gripper in direzione X è diverso per le due batterie. Per questo motivo è necessario rendere anche la componente X dei vettori definiti per l'operazione di prelievo della batteria variabili. In questo modo il sistema effettuerà un incremento della variabile Δx pari alla differenza di lunghezza tra le due batterie quando dovrà prelevare quella di dimensione maggiore (figura 4.27).

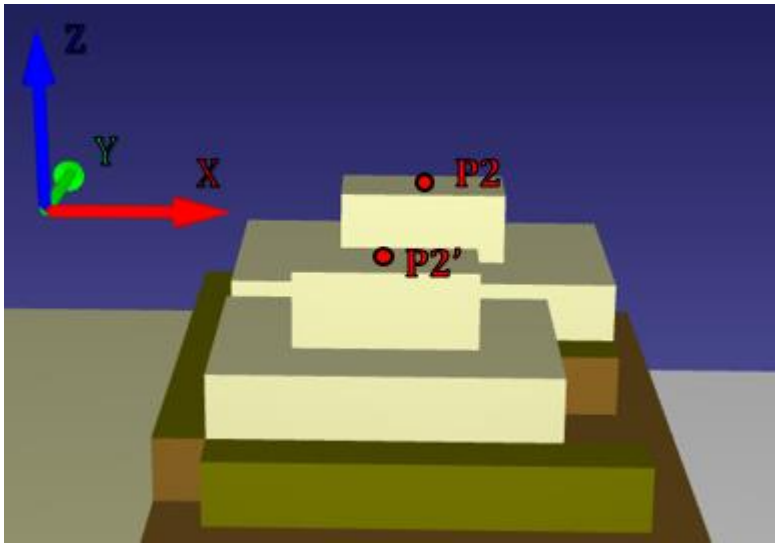


Figura 4.27 – I punti di presa delle due batterie hanno una diversa coordinata x.

Durante l'afferraggio inoltre è importante che il gripper applichi la giusta forza sui punti di presa. Considerando che i prototipi in legno hanno un peso di 0.55 Kg e 0.68 Kg considerando cautelativamente un coefficiente di attrito di 0.2, le forze minime durante la chiusura dovranno essere rispettivamente 14 N e 17 N.

Durante il posizionamento della batteria nel vano i punti I1 e I2 sono differenti per la batteria piccola e per quella grande. Per mandare la batteria grande correttamente in battuta con la parete sinistra del vano è necessario lo stesso incremento Δx visto in figura 4.27.

In conclusione quindi l'operazione automatica, secondo quanto visto fino ad ora, risulta essere fattibile.

Di contro può essere valutata la possibilità di introdurre l'ausilio dell'uomo durante il posizionamento. In questo modo l'operazione sarà automatica fino al punto *Ingresso* sopra definito. Da questo punto il robot agirà solamente da manipolatore applicando una forza in direzione contraria al peso della batteria e rilasciando il controllo negli altri 2 assi (figura 4.28). In questo modo l'operatore potrà variare la traiettoria della macchina fino al completamento del processo. Per terminare l'operazione sarà necessario o cliccare un bottone, che potrebbe essere installato sul robot, o selezionare l'opzione per proseguire dal teach pendant.

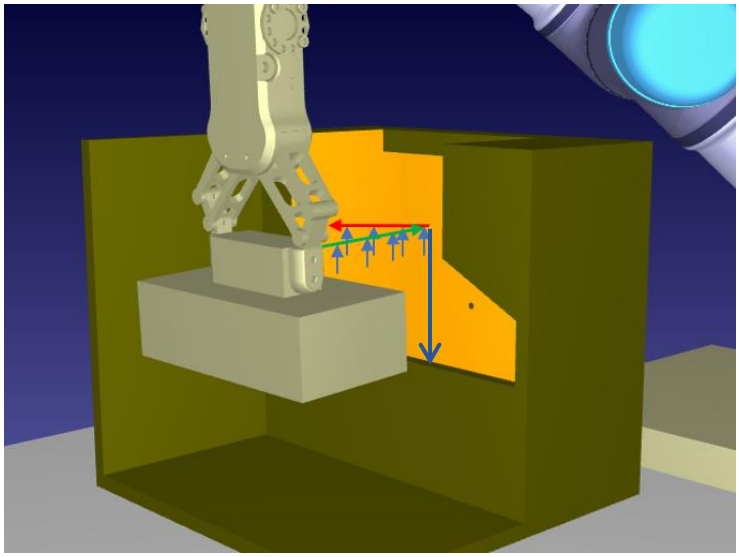


Figura 4.28 – Inserimento manuale, l'operatore può controllare i movimenti del robot lungo gli assi cartesiani.

4.5.3. Fissaggio della batteria

Dopo aver posizionato la batteria, essa dovrà essere vincolata nella sua sede. Nell'operazione reale, questa fase richiede il collegamento dei cavi, l'inserimento di un

coperchio, l'esecuzione dei fissaggi ed altre operazioni. Tuttavia nella dimostrazione effettuata verrà mostrata soltanto l'installazione di un dispositivo per la tenuta della batteria nella sede. Tale operazione infatti può essere significativa per mostrare un caso reale di collaborazione tra umano e robot. Gli oggetti che verranno utilizzati sono quelli rappresentati in figura 4.29 e la sequenza per il fissaggio prevedrà:

- posizionamento del gancio;
- primo fissaggio tramite vite e bullone;
- secondo fissaggio vite-bullone.

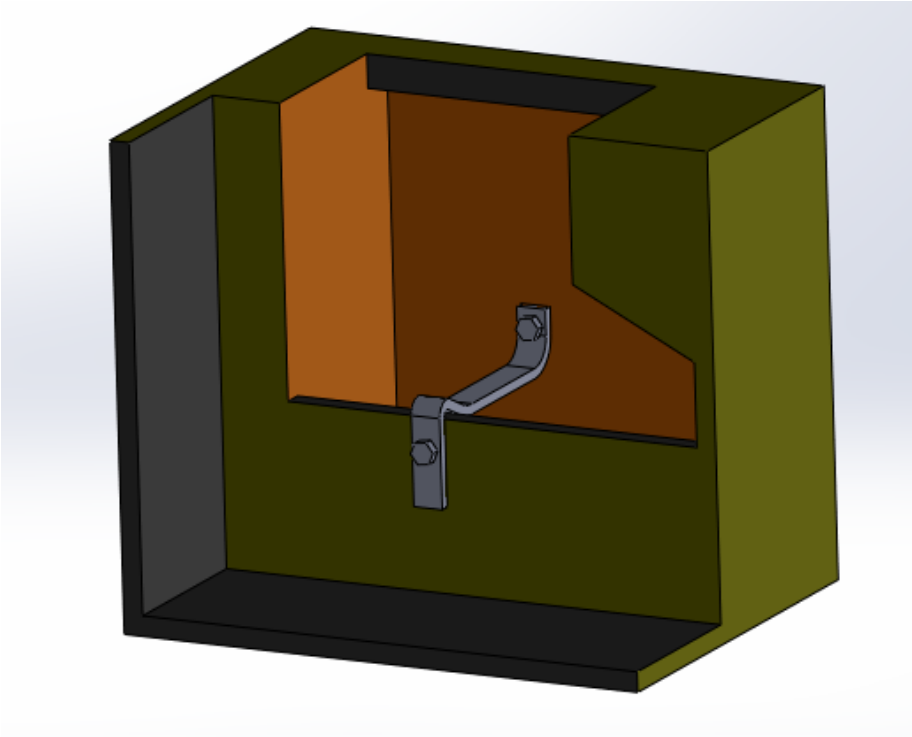


Figura 4.29 – Vista in sezione della scatola da cui è possibile osservare la posizione per il montaggio del gancio di tenuta della batteria.

A seguito del posizionamento della batteria, il robot sarà programmato per attendere un input da parte dell'operatore. Grazie all'elevata sensibilità alla variazione della coppia applicata sui giunti è possibile programmare il robot per eseguire una determinata operazione a seguito di una leggera pressione da parte dell'operatore. In questo modo appunto, l'umano potrà posizionare il gancio e dopo richiamerà il robot applicando una forza maggiore di 25N sul suo braccio per comandare l'operazione di sostegno del componente in posizione mentre lui effettuerà il primo fissaggio (figura 4.30).

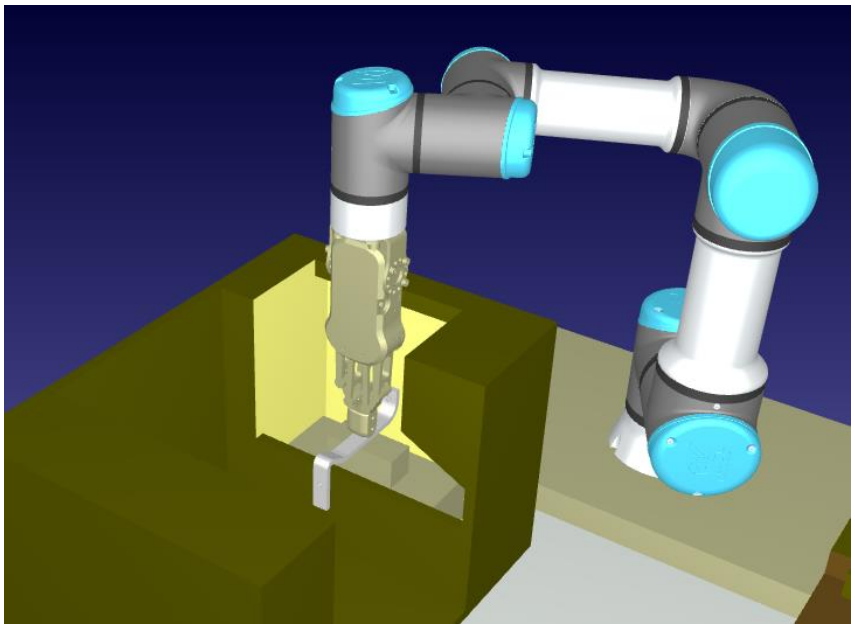


Figura 4.30 – Il robot tiene in posizione il gancio per dare il tempo all'operatore di effettuare l'inserimento del primo bullone sul lato interno della scatola.

A questo punto dal teach pendant l'operatore potrà comunicare al sistema il termine dell'operazione consentendo al robot di tornare nella posizione iniziale di attesa. Un secondo richiamo tramite contatto poi, attiverà la macchina che prenderà il secondo bullone per porgerlo all'operatore che concluderà il fissaggio.

4.6. Dimostrazione reale

Dopo aver progettato l'operazione nel dettaglio è stato dunque allestito il workspace per l'operazione reale. Gli oggetti che inizialmente erano stati progettati virtualmente con il software CAD SolidWorks, sono stati realizzati realmente. Si riportano di seguite delle immagini relative ai componenti utilizzati e alla struttura finale dello spazio di lavoro.

Vano baule

Per realizzare questo il prototipo del vano baule è stata utilizzata una scatola di cartone, modellata rispettando le dimensioni e le quote viste nel modello virtuale (figura 4.31).

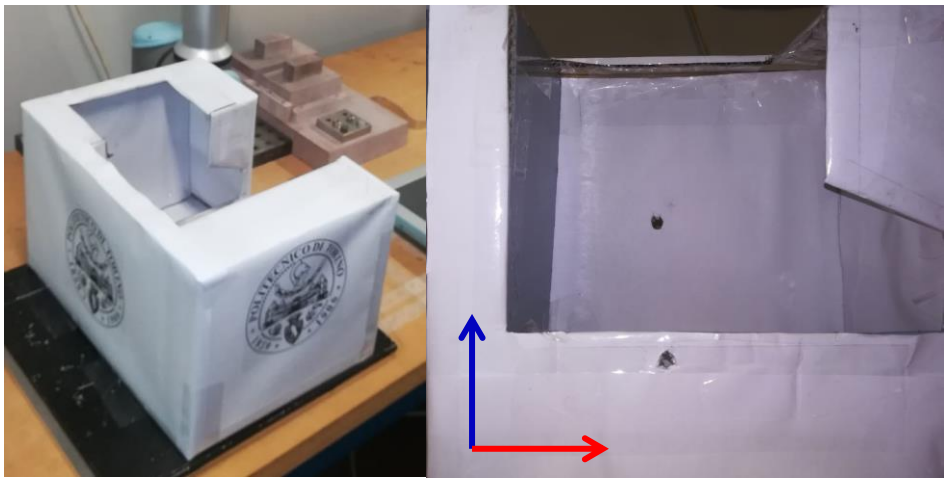


Figura 4.31 – Scatola in cartone modellata per la dimostrazione reale. Sulla destra viene mostrata una vista dall'interno sul piano X-Z.

Pallet

Per creare il pallet invece è stata utilizzata una lastra in resina sulla quale sono stati fissati i riferimenti per creare due sedi per il posizionamento delle batterie (figura 4.32).

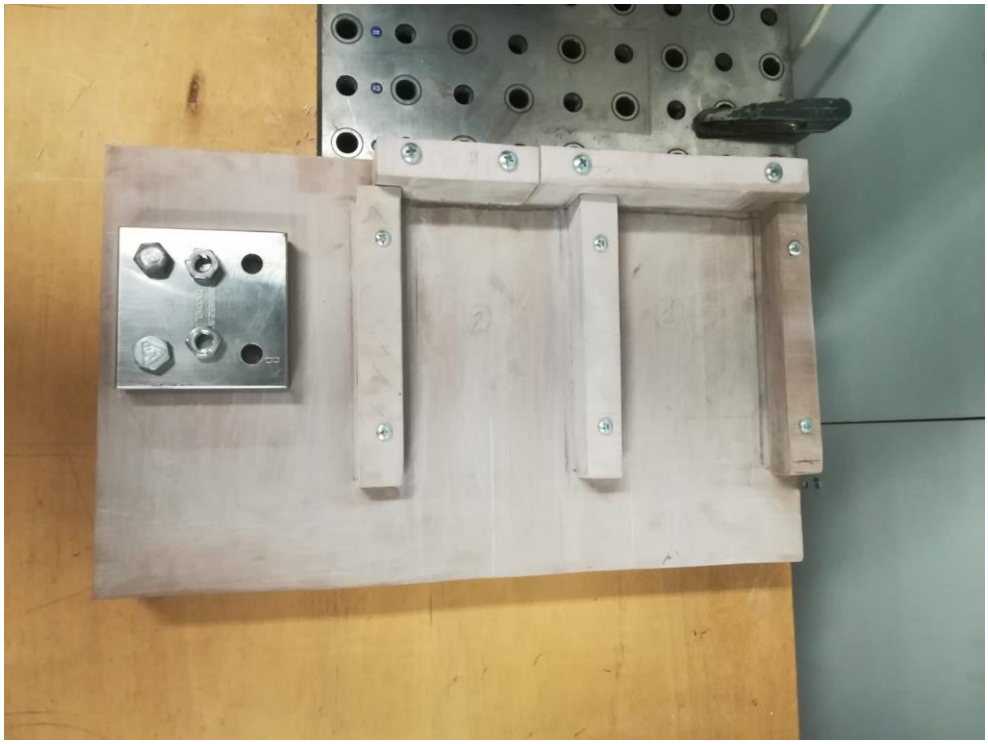


Figura 4.32 – Oggetto modellato per fungere da pallet per le batterie durante la dimostrazione. Sulla sinistra la piastrina metallica è stata utilizzata per posizionare correttamente i bulloni che il robot dovrà prelevare.

Batterie

I modelli delle batterie sono fatti dello stesso materiale del pallet e su di essi sono state aggiunte due parti per la presa del gripper (figura 4.33).

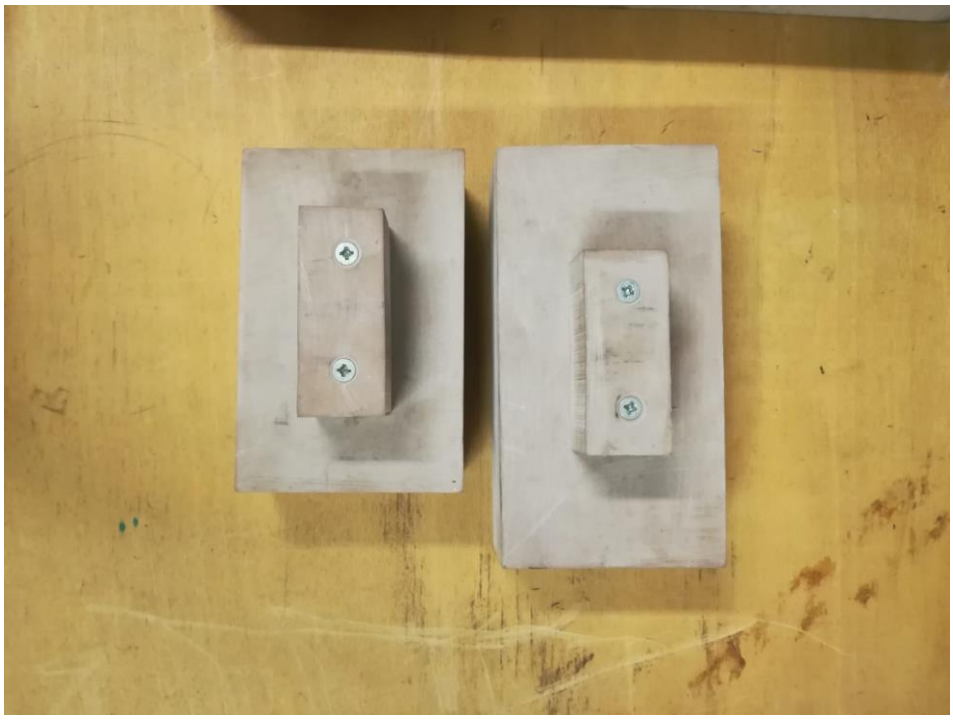


Figura 4.33 – Prototipi utilizzati per simulare le due batterie di diversa lunghezza.

Per garantire un'operazione precisa inoltre è stato necessario posizionare ogni componente con cura sul tavolo da lavoro in maniera tale da rispettare le coordinate imposte in fase di definizione della traiettoria. In figura 4.34 è possibile osservare l'area di lavoro completa.

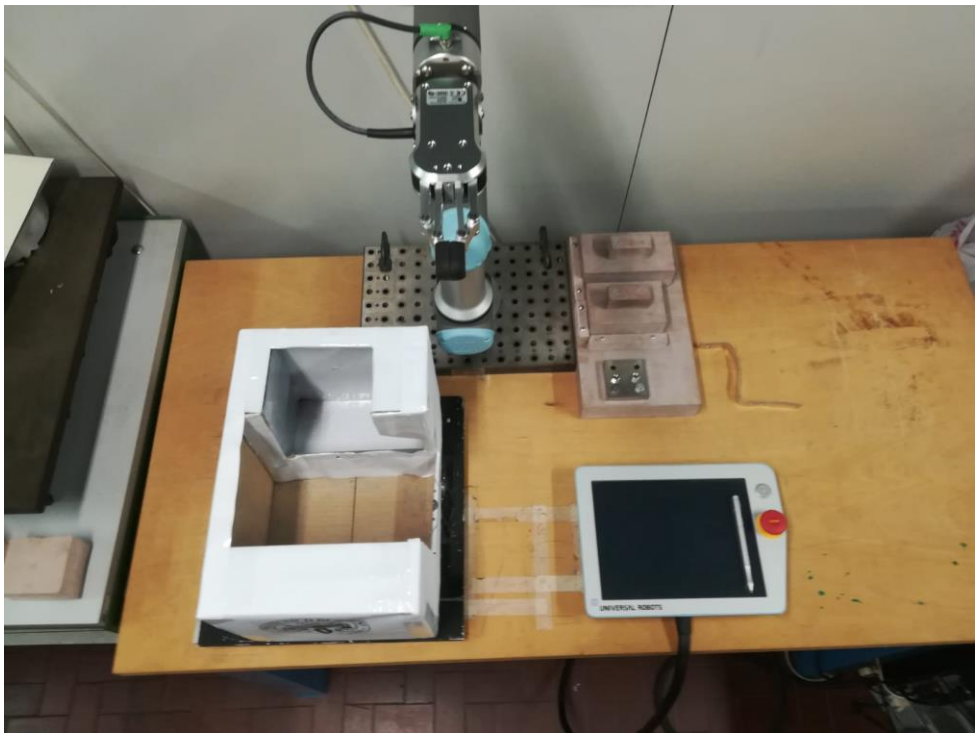


Figura 4.34 – Vista dall'alto del tavolo allestito con gli oggetti in posizione corretta per effettuare la dimostrazione.

4.7. Valutazione del rischio[16]

Dal momento in cui le applicazioni di sistemi robotici al fianco del lavoratore stanno acquisendo un'importanza sempre maggiore all'interno dei contesti produttivi, è ancora più importante porre l'accendo sui requisiti di sicurezza per la collaborazione uomo-robot.

Come visto nel paragrafo 3.3 del capitolo 3, da gennaio 2016, il comitato ISO ha divulgato una specifica tecnica esclusivamente riferita ai robot e ai dispositivi robotici per le operazioni collaborative. Trattandosi di una specifica tecnica non vi è alcun obbligo normativo di rispettarla, tuttavia essendo un documento fondato sulla base di ricerche scientifiche con la collaborazione del comitato tecnico ISO / TC 299 composto dai produttori:

- Universal Robots (UR3, UR5 & UR10);
- ABB (YuMI);
- Rethink robotics (Baxter & Sawyer);

[16] Riferimento [31].

- KUKA (IIWA);
- Fanuc (CR-35iA);

è lecito aspettarsi che nel futuro più prossimo diventerà uno standard ufficiale.
In questo paragrafo dunque si cercherà di valutare il livello di conformità dell'applicazione robotica mostrata in questo capitolo, a quanto riportato nella ISO/TS 15066.
Per fare chiarezza è giusto evidenziare che la tipologia di robots comunemente riconosciuta come "collaborativi" si riferisce a ciò che la specifica tecnica definisce operazione con controllo di forza e potenza. La valutazione del rischio che verrà mostrata sarà proprio relativa a questa categoria di dispositivi. È importante inoltre evidenziare che quest'analisi non garantisce la totale sicurezza dell'operazione.

4.7.1. Motivazioni

La seguente analisi viene condotta per limitare il rischio dell'insorgere di un danno nei confronti dell'utilizzatore della cella robotica.

L'obiettivo finale è quello di creare un ambiente di lavoro sicuro, senza l'utilizzo di sensori esterni e sfruttando il controllo di forza e potenza del robot UR3. Le normative seguite sono quelle vigenti con un focus sulla specifica ISO/TS 10566.

4.7.2. Metodo per la riduzione del rischio

Ci sono diverse metodologie per condurre un'analisi di questo tipo ed è importante chiarire il senso logico del procedimento.

In questo caso, in accordo con la ISO 12100, il metodo verrà implementato in una serie di steps per garantire la valutazione sistematica dei potenziali danni e le soluzioni per la loro riduzione. Il processo viene sviluppato con una logica iterativo al fine di ridurre quanto più possibile i rischi dell'operazione. In figura 4.35 viene riportato il diagramma esplicativo del metodo.

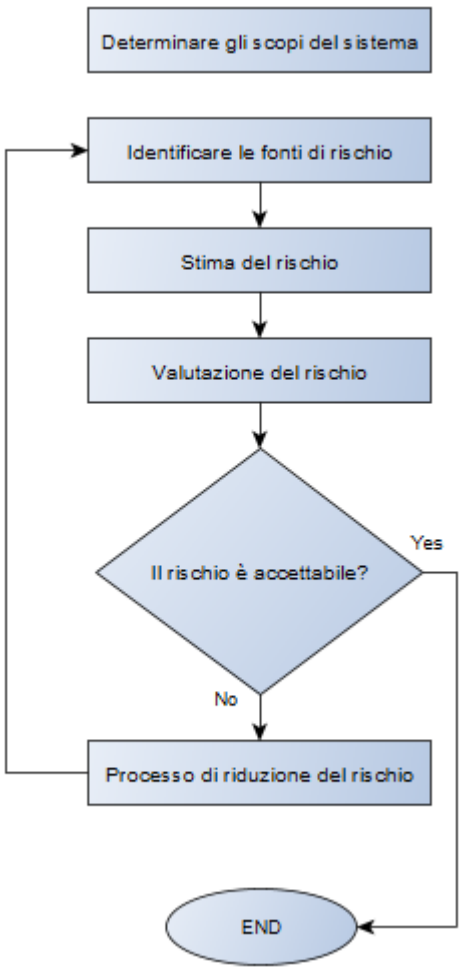


Figura 4.35 – Diagramma di flusso rappresentativo della logica utilizzata per la valutazione del rischio.

4.7.3. Descrizione della macchina e dei dispositivi

Al fine di garantire una corretta valutazione è fondamentale consultare preventivamente i manuali per l'utente forniti dalle case produttrici del robot e dei dispositivi ad esso integrati, come ad esempio il gripper o altri sensori. I dati tecnici e le caratteristiche di sicurezza di questi dispositivi sono illustrate nei paragrafi (n° paragrafi) di questo capitolo.

4.7.4. Criterio di valutazione e stima del rischio

Esistono diversi criteri per la valutazione numerica del rischio. In questo caso verrà utilizzato l'approccio "Pliz Hazard Rating" (PHR), implementato dall'azienda Pilz per Universal Robots che consiste nel valutare:

- Livello del possibile danno, (Degree of Possible Harm) DPH;
- Probabilità di manifestazione dell'evento (Possibility of Occurrence) PO;
- Possibilità di evitarlo (Possibility of Avoidance) PA;
- Frequenza di esposizione al rischio (Frequency of Exposure) FE.

Ognuno di questi parametri inoltre ha una scala per la sua valutazione come mostrato nelle seguenti tabelle.

Tabella 4.10 – Valori per il parametro DPH.

DPH	Entità del danno
0.25	Graffio o livido
0.5	Lacerazione / taglio / lieve effetto sulla salute / piccole ustioni
3	Fratture di ossa piccole (dita di mani o piedi)
5	Frattura di ossa grandi (mani braccia, gambe)
8	Perdita di dita (di mani o piedi) o ustioni gravi
11	Amputazione di un arto (superiori o inferiori) o parziale perdita di udito o vista
15	Amputazione di entrambi gli arti (superiori o inferiori) o perdita totale di udito o vista
25	Lesioni gravi o malattie/ condizioni/ lesioni permanenti
40	Morte singola
65	Catastrofe

Tabella 4.11 – Valori per il parametro PO.

PO	Probabilità dell'evento
0.5	Quasi impossibile
1.25	Improbabile
2.5	Possibile
4	Probabile
6	Certo

Tabella 4.12 – Valori per il parametro FE

FE	Frequenza
0.5	Annuale
1	Mensile
2	Settimanale
4	Ogni ora
5	Costantemente

Tabella 4.13 – Valori per il parametro PA.

PA	Possibilità di evitarlo
0.75	Possibile
2.5	Possibile in certe circostanze
5	Impossibile

In conclusione, l'indice globale di valutazione del rischio è rappresentato dalla formula:

$$PHR = DPH \times PO \times PA \times FE$$

Il valore risultante rappresenta il livello di rischio legato ad un evento (tabella 4.14).

Tabella 4.14 – Valori per il parametro PHR.

PHR		Livello Rischio	Commento
	1-10	Trascurabile	L'evento non rappresenta un rischio per la salute e per la sicurezza. Non sono richieste misure riduttive.
	11-20	Molto ridotto	Il rischio per la salute e per la sicurezza è molto limitato, non sono richieste misure specifiche ma può essere necessaria la protezione del personale con equipaggiamenti o addestramenti sulla sicurezza.
	21-45	Ridotto	Il rischio per la salute e per la sicurezza è presente ma ridotto. Devono essere considerate misure riduttive.
	46-160	Significativo	Il pericolo dell'evento è sufficiente da richiedere un'analisi per la riduzione del rischio non appena possibile.
	161-500	Elevato	L'evento rappresenta un potenziale danno sicuro, sono necessaria misure di riduzione del rischio con urgenza.
	501+	Molto elevato	L'evento è così pericoloso da richiedere un'immediata interruzione del processo per una riduzione del rischio e comunicazione alla gestione aziendale.

4.7.5. Identificazione dei rischi

A questo punto seguendo il processo illustrato nella figura precedente si cercherà di individuare i possibili rischi per la salute del personale ripercorrendo le varie fasi dell'operazione svolta.

Per ogni evento pericoloso individuato verrà condotta un'analisi per quantificare il livello di rischio e verranno proposte delle soluzioni per evitare o ridurre il danno relativo.

Identificazione del pericolo		**Pericolo No.**	**1**
Titolo	Ricerca batteria		
Parte del robot	Gripper		
Parte del corpo umano	Mani (dita)		
Attività svolta	Contatto gripper batteria		
Descrizione pericolo	Schiacciamento		
Tipologia di contatto	Quasi-Statico		
Descrizione	Durante la ricerca della batteria il robot si muove con entrambe le fingers chiuse e si muove linearmente fino a che non percepisce una forza di 30 N. È possibile che l'operatore metta le dita tra il gripper e la parte. Considerando che l'area interessata al contatto è pari 3.10 cm^2, la pressione risultante sarebbe 9.67 $N/\ cm^2$ e quindi al di sotto del limite massimo di 190 N/cm^2 espresso nella ISO/TS 15066.		

Stima e valutazione		
DPH	0.5	
PO	2.5	
PA	0.75	
FE	5	
PHR	4.68	

Riduzione del rischio
Istruire correttamente il personale affinché non intervenga in prossimità della zona in cui viene prelevata la batteria durante la ricerca dell'oggetto.

Identificazione del pericolo		Pericolo No.	2
Titolo	Movimentazione batteria		
Parte del robot	Gripper		
Parte del corpo umano	Avanbraccio		
Attività svolta	Ingresso zona vano baule		
Descrizione pericolo	Urto		
Tipologia di contatto	Transitorio		
Descrizione	Il robot dopo aver prelevato la batteria si avvicina al vano baule per concludere l'operazione. Durante questo movimento la velocità impostata è $V = 250\ mm/s$. Semplificando la valutazione della superficie di contatto si può considerare come da specifica, il valore minore possibile di 1 cm^2. Consultando la ISO/TS 10566 la V_{max} per questa parte del corpo è di circa 1400 mm/s considerando cautelativamente l'intera massa del robot di 11Kg.		

Stima e valutazione

DPH	0.5	
PO	4	
PA	2.5	
FE	5	
PHR	25	

Riduzione del rischio

Istruire correttamente il personale affinché si tenga alla debita distanza durante la movimentazione della batteria. Durante questa fase infatti il robot raggiunge il picco di velocità di tutta l'operazione ed inoltre non è richiesto l'intervento dell'operatore.
Per limitare i danni relativi ad un possibile urto è utile valutare la possibilità di controllare la velocità del robot e di inserire delle protezioni sulla batteria per mettere in sicurezza la parti spigolose dell'oggetto.

Identificazione del pericolo		Pericolo No.	3
Titolo	Movimentazione batteria		
Parte del robot	Articolazione tra Polso 2-3		
Parte del corpo umano	Cassa toracica		
Attività svolta	Ingresso zona vano baule		
Descrizione pericolo	Urto		
Tipologia di contatto	Transitorio		
Descrizione	Il robot dopo aver prelevato la batteria si avvicina al vano baule per concludere l'operazione. Durante questo movimento la velocità impostata è $V = 250mm/s$ Semplificando la valutazione della superficie di contatto si può considerare come da specifica il valore minore possibile, 1 cm^2. Consultando la ISO/TS 10566 la V_{max} per questa parte del corpo è di circa 400 mm/s considerando, cautelativamente, l'intera massa del robot di 11Kg.		

Stima e valutazione	
DPH	0.5
PO	2.5
PA	0.75
FE	5
PHR	4.68

Riduzione del rischio

Istruire correttamente il personale affinché si tenga alla debita distanza durante la movimentazione della batteria. Durante questa fase infatti il robot raggiunge il picco di velocità di tutta l'operazione ed inoltre non è richiesto l'intervento dell'operatore.
Per limitare i danni relativi ad un possibile urto è utile valutare la possibilità di controllare la velocità del robot e di inserire delle protezioni sulla batteria per mettere in sicurezza la parti spigolose dell'oggetto.

Identificazione del pericolo		**Pericolo No.**	**4**
Titolo	Fissaggio gancio		
Parte del robot	Gripper		
Parte del corpo umano	Mani		
Attività svolta	Il robot tiene il gancio in posizione		
Descrizione pericolo	Schiacciamento		
Tipologia di contatto	Quasi-statico		
Descrizione	Durante questa operazione il robot si muove con entrambe le fingers chiuse e va a contatto con il gancio per tenerlo fisso in posizione applicando una forza di 40 N. È possibile che l'operatore metta le dita tra il gripper e la parte. Considerando che l'area interessata al contatto è pari a 3.10 cm^2, la pressione risultante sarebbe 12.9 $N/\ cm^2$ e quindi al di sotto del limite di 190 $N/\ cm^2$espresso nella ISO/TS 15066.		

Stima e valutazione		
DPH	0.5	
PO	4	
PA	2.5	
FE	5	
PHR	25	

Riduzione del rischio
Istruire correttamente il personale affinché sia al corrente del rischio ed eviti di interferire con la traiettoria diretta del robot durante l'operazione

4.7.6. Rischio relativo agli oggetti manipolati

La valutazione del rischio di un'operazione robotica collaborativa può essere influenzata dagli oggetti manipolati.

In questo caso però, la batteria è un componente relativamente innocuo dal punto di vista della forma. Considerando invece il suo peso, è giusto evidenziare che sarebbe adeguato mettere in sicurezza la presa dell'oggetto utilizzando un dispositivo di ritenuta per evitare un'eventuale caduta che potrebbe essere rischiosa per l'operatore.

4.7.7. Classificazione dei rischi

Dopo aver individuato tutti i rischi relativi ad un'operazione è importante creare un resoconto finale che li classifichi in base alla pericolosità. In questo modo sarà possibile individuare le misure per la riduzione del pericolo che hanno maggiore priorità (tabella 4.15).

Tabella 4.15 – Classificazione dei pericoli in funzione del livello di rischio.

Priorità	Pericolo No.	PHR	Livello Rischio
1	4	25	Ridotto
2	2	25	Ridotto
3	3	4.68	Trascurabile
4	1	2.34	Trascurabile

Conclusioni

Il presente studio ha le sue basi in un contesto reale, legato al Manufacturing, all'interno dell'azienda FCA, che ha creato lo spunto per un'analisi di fattibilità relativa alla necessità di migliorare alcuni processi di montaggio in linea di produzione. Il punto di partenza di questo lavoro si trova pertanto all'interno della pianificazione di sviluppo prodotto che, tramite lo strumento dell'analisi virtuale, ha consentito di acquisire le conoscenze riguardanti le operazioni attualmente effettuate nelle fabbriche di FCA. Nello scenario produttivo odierno del settore automotive, influenzato da un mercato sempre più competitivo, l'innovazione ricopre un ruolo di grande importanza. Per questo motivo, con l'obiettivo di potenziare un processo esistente, si è deciso di indirizzare il lavoro sulla risoluzione di un singolo problema di montaggio cercando di implementare uno dei punti di sviluppo dell'industria 4.0: i robot collaborativi.

L'operazione scelta, riguardante il montaggio della batteria di un'Alfa Giulia, ha consentito di evidenziare i vantaggi e i limiti di questa nuova tecnologia sia al livello tecnico applicativo che al livello normativo.

La grande attenzione concertata da parte dei costruttori di questi dispositivi sull'aspetto della sicurezza ha consentito di effettuare questa dimostrazione. La leggerezza del braccio robotico, l'innovativo sistema di controllo legato ai sensori intrinsecamente installati, lo rendono infatti adatto e sicuro ad un'operazione collaborativa. Lo scopo della dimostrazione effettuata è stato quello di testare la capacità del robot di adattarsi all'ambiente esterno e quindi al personale e agli oggetti circostanti. Prima di tutto, sfruttando la sensibilità dei giunti, in grado di controllare la coppia di reazione percepita, e la capacità di misurare con precisione i suoi posizionamenti, è stato quindi possibile osservare che esso è in grado di riconoscere un oggetto in base alle sue dimensioni. Grazie poi alla possibilità di limitare le interazioni con l'esterno, definendo dei limiti su alcuni parametri fisici (forza, quantità di moto, velocità, limitazione dello spazio, ecc.) si è resa l'operazione sicura per l'uomo.

I vantaggi osservabili dall'implementazione di un'operazione di questo tipo, sono molteplici:

- *incremento della flessibilità* del sistema dovuto al fatto che il robot consente all'operatore di effettuare il compito desiderato con una nuova modalità automatica o manualmente in maniera simile a quanto avviene nel processo attuale;

- *intercambiabilità* poiché il robot può essere facilmente spostato da una zona di lavoro all'altra grazie alla semplicità di installazione, al contrario di quanto avviene con i sistemi tradizionali vincolati dalle strutture metalliche di sicurezza. In questo contesto, l'applicazione di sistemi Automatic Guided Vehicle AGV potrà aprire sviluppi futuri;
- *riduzione dei costi*, dal momento che può essere ridotta la manodopera impegnata in operazioni con poco valore aggiunto per l'uomo e poiché questa tipologia di sistemi ha un prezzo nettamente inferiore a quelli tradizionali e che nel caso studiato si aggira intorno ai 25.000 $;
- *miglioramento delle condizioni lavorative* dell'operatore legato al fatto che questi robot sono in grado di coadiuvare l'azione dell'uomo, lavorando al suo fianco, come visto nella dimostrazione sviluppata;
- *Riduzione del tempo ciclo,* poiché in una stessa stazione, sfruttando insieme le capacità del robot e dell'operatore, sarà possibile semplificare molti compiti.

D'altra parte però, è necessario evidenziare i limiti dell'operazione svolta e dell'applicazione di questi sistemi.

Uno dei vincoli principali dello studio effettuato riguarda il posizionamento degli oggetti all'interno della zona di lavoro. Non essendo il robot dotato di sistemi di visione, esso è in grado di garantire il corretto svolgimento dei suoi compiti solo conoscendo a priori le coordinate dei punti di interesse. Un errato posizionamento della batteria all'interno del pallet o della vettura che scorre sulla linea potrebbe causare il fallimento dell'operazione. In un contesto industriale però sarebbe impensabile andare incontro ad un fermo della linea. Per questo motivo sarebbe necessario integrare con il robot un sistema di visione. In questo modo esso potrebbe riconoscere, all'interno del workspace, gli oggetti e il loro orientamento modificando di conseguenza le sue azioni. Al riguardo esistono molti studi ed applicazioni (condotti anche all'interno del Politecnico di Torino), relativi al "machine learning". Costruendo una rete neurale per la specifica applicazione, il robot sarebbe capace di riconoscere l'ambiente esterno ed associare ad ogni oggetto presente nella cella una determinata azione.

Il robot UR3 utilizzato inoltre, ha un payload massimo di 3 Kg. Questo renderebbe impossibile l'operazione reale di montaggio di una batteria di una vettura che normalmente ha una massa di circa 25 Kg. Per questo motivo è importante ricordare che la chiave di lettura di questo lavoro è stata quella di fornire un'analisi sulla

fattibilità del processo che affrontasse tutti i problemi relativi all'implementazione di questa tecnologia.

Per l'applicazione in un contesto reale però, sarebbe necessario utilizzare un robot con caratteristiche differenti. A tal proposito, in figura 4.36 si riportano le informazioni relative al payload e all'estensione massima dei principali robot collaborativi in commercio.

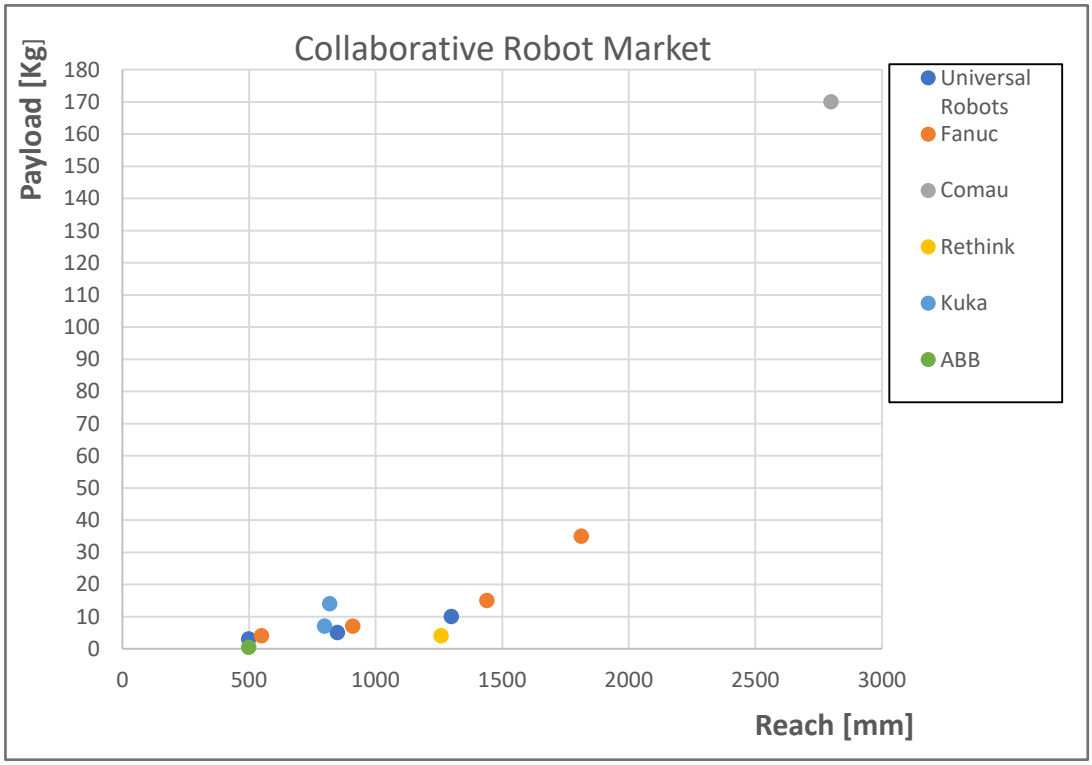


Figura 4.36 – Payload ed estensione massima dei i principali robot collaborativi in commercio .

Tuttavia, l'utilizzo di una macchina di dimensioni maggiori riapre il dibattito sulla collaboratività. Garantire la sicurezza dell'operato del robot diventa più difficile in questi casi. L'inerzia del braccio robotico infatti, può risultare vincolante e può rendere inaccettabile un urto con l'essere umano. Lo sviluppo degli studi futuri dunque si pone l'obiettivo di ridurre al minimo i possibili contatti utilizzando sensori di prossimità, sensori laser ed ottici, skin sensorizzate (già installate nei robot Fanuc e Comau) e sistemi di visione in grado di prevedere gli eventi all'interno della cella robotizzata.

In conclusione il discorso relativo alle operazioni collaborative è ancora totalmente aperto e da esplorare. Tra i principali problemi ci sono quelli legati alla velocità delle operazioni e ai carichi coinvolti, vincolati dei termini restrittivi sulla sicurezza. Per questo, anche nell'ambito normativo, ci si aspettano sviluppi futuri che porteranno all'emissione di un documento ufficiale e specifico per la collaborazione uomo-macchine, in grado di sostituire la specifica tecnica ISO/TS 10566.

Bibliografia e Sitografia

[1]Giuseppe Volpato, L'auto dopo la crisi, 2011.

[2]Giuseppe Volpato, FIAT Auto : crisi e riorganizzazioni strategiche di un'impresa simbolo, 2004.

[3]https://sites.google.com/site/storiaindustriaauto/evoluzione-dell-industria-automobilistica-nella-societa-e-nell-economia

[4]"Nascita e sviluppo dell'industria automobilistica" di Donatella Biffignandi - Il Contributo italiano alla storia del Pensiero - Tecnica (2013).

[5]https://it.wikipedia.org/wiki/Produzione_snella

[6]www.fabbricafuturo.it/gestione-dei-progetti-di-innovazione-e-sviluppo-prodotto/

[7]http://dspace.unive.it/bitstream/handle/10579/3220/821857-1173826.pdf?sequence=2

[8]Materiale interno Politecnico: "Sistemi integrati di Produzione", Luca Iuliano.

[9]E.Chirone, S.Tornincasa, "Disegno tecnico industriale 2", il capitello, 2015

[10] Hilary McLellan, Virtual Realities, Clellan Wyatt Digital

[11] Materiale interno FCA non divulgabile.

[12]http://www.automobilismo.it/articoli/print/23419

[13] https://www.plm.automation.siemens.com/fr_fr/Images/4591_tcm68-4790.pdf

[14]http://www.ilsole24ore.com/art/management/2018-05-03/l-industria-40-e-un-occasione-valorizzare-persone-e-competenze-184733.shtml?uuid=AEwiEaiE

[15]C.Santos, A. Mehrsai, A C. Barros, M. Araùjo,E.Ares, "Towards Industry 4.0: an overview of European strategic roadmaps", Manufacturing Engineering Society International Conference 2017.

[16] Xi Vincent Wang a, Zsolt Kemény, József Váncza, Lihui Wang "Human–robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation", CIRP Annals - Manufacturing Technology.

[17]UNI EN ISO 12100:2010, Sicurezza del macchinario - Principi generali di progettazione - Valutazione del rischio e riduzione del rischio.

[18]UNI EN ISO 13849-1:2016, Sicurezza del macchinario - Parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza - Parte 1: Principi generali per la progettazione.

[19]UNI EN ISO 10218-1:2011, Robot e attrezzature per robot - Requisiti di sicurezza per robot industriali - Parte 1: Robot.

[20]UNI EN ISO 10218-2:2011, Robot e attrezzature per robot - Requisiti di sicurezza per robot industriali - Parte 2: Sistemi ed integrazione di robot.

[21]ISO/TS 15066:2016 . Robots and robotic devices – Collaborative robots.

[22] https://blog.robotiq.com/: Cobots Ebook

[23] https://www.universal-robots.com/plus/

[24] http://www.kurzweilai.net/low-cost-robotic-gripper-replaces-human-hand-and-fingers

[25] https://www.universal-robots.com/products/ur3-robot/

[26] https://www.universal-robots.com/media/1226143/rg2-datasheet-v14.pdf

[27]https://www.kollmorgen.com/it-it/service-and-support/knowledge-center/success-stories/kollmorgen-aziona-gli-assistenti-leggeri-di-universal-robots/

[28] https://en.wikipedia.org/wiki/Harmonic_drive

[29]https://harmonicdrive.de/it/applicazioni/robotica-e-automazione/universal-robots/

[30] http://www.renishaw.it/it/aksim-supporta-universal-robots-per-lautomazione-smart-in-fabbrica--40389

[31] https://blog.robotiq.com/how-to-perform-risk-assessment

Le immagini sulla simulazione del capitolo 2 sono state estratte dal software *TeamCenter*.

Le immagini dei modelli dei componenti del capitolo 4 e sulla simulazione robotica sono state estratte rispettivamente dai software *SolidWorks* e *RoboDK*.