



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA  
IN INGEGNERIA DELL'AUTOMAZIONE**

**TESI DI LAUREA**

**LA ROBOTIZZAZIONE DI CELLE DI LAVORO E LA RIDUZIONE DEI TEMPI DI SET-UP  
PER IL MIGLIORAMENTO DEL PROCESSO PRODUTTIVO INDUSTRIALE**

**Relatore**  
**Ch.mo Prof. ALDO ROSSI**

**Laureando**

*Federico Zardini*

**27 aprile 2010**

**ANNO ACCADEMICO 2009/10**

# Indice

<b>Introduzione</b> .....	1
<b>Capitolo 1 – Lean Manufacturing e il Metodo 5 S</b> .....	4
1.1 Il Metodo “5 S” .....	4
1.2 La manutenzione produttiva totale .....	7
1.3 Muda (sprechi) .....	7
<b>Capitolo 2 – Riduzione dei tempi di set-up</b> .....	9
2.1 Sistema SMED .....	10
2.1.1 Fasi per la diminuzione del set-up .....	10
2.1.2 Eliminazione dell’aggiustaggio .....	13
2.1.3 I vantaggi della ripresa video .....	13
2.2 I lotti minimi .....	13
<b>Capitolo 3 – Robot e automazione industriale</b> .....	15
3.1 Robot cartesiani .....	16
3.2 Robot antropomorfi .....	16
3.2.1 Struttura meccanica .....	17
3.3 Trasformazioni di coordinate, problemi cinematici diretto e inverso .....	18
3.4 Programmazione .....	18
3.5 Tipi di automazione .....	19
3.5.1 Automazione fissa .....	20
3.5.2 Automazione programmabile .....	20
3.5.3 Automazione flessibile .....	20
3.6 Linee automatiche .....	20
3.7 Celle di lavoro .....	21
3.8 Flexible manufacturing systems .....	22
3.9 Macchine transfer .....	23
<b>Capitolo 4 – Controllo dei robot</b> .....	24
4.1 Controllo negli spazi dei giunti e di lavoro .....	24
4.2 Schema di controllo generale .....	25
4.3 Controllo dei robot a più gradi di libertà .....	26
4.3.1 Controllo centralizzato e decentralizzato .....	26
4.3.2 Effetti dinamici mutui tra links .....	27
4.3.3 Compensazione degli effetti mutui: controlli a dinamica inversa e a coppia precalcolata .....	29
4.4 Controllo nello spazio di lavoro .....	30
4.5 Controllo di forza .....	31
4.5.1 Controllore di forza .....	32
4.5.2 Controllore di impedenza .....	32
4.5.3 Misure di forza o coppia .....	33
<b>Capitolo 5 – Robotizzazione di una cella</b> .....	34
5.1 Descrizione del problema .....	34
5.2 Scelte di progetto .....	37
5.2.1 Robot .....	37
5.2.2 Nastro di carico .....	38
5.2.3 Manipolazione .....	39
5.2.4 Scarico .....	40

5.3	Installazione e messa in funzione.....	40
5.3.1	Simulazione del ciclo .....	42
5.4	Riduzione del set-up.....	43
5.5	Guadagno.....	45
5.6	Documentazione prodotta .....	46
<b>Capitolo 6 – Ampliamento di una cella esistente .....</b>		<b>47</b>
6.1	Configurazione iniziale della cella .....	47
6.1.1	Centro di lavoro a 4 assi .....	49
6.1.2	Tornio verticale bi mandrino .....	50
6.1.3	Robot antropomorfo .....	50
6.2	Idea di miglioramento .....	52
6.2.1	Studio di fattibilità .....	52
6.2.2	Realizzazione .....	54
6.3	Applicazione del metodo SMED .....	55
6.3.1	Preparazione del centro di lavoro .....	55
6.3.2	Tappeto portapezzi .....	57
6.3.3	Programma robot.....	59
<b>Capitolo 7 – Sicurezza di una macchina .....</b>		<b>61</b>
7.1	DPR 459/96 .....	61
7.2	UNI EN 1050 .....	62
7.2.1	Scopo e campo di applicazione .....	62
7.2.2	Concetti fondamentali.....	62
7.3	UNI EN ISO 12100-2 .....	64
7.3.1	Scopo e campo di applicazione .....	65
7.3.2	Riferimenti normativi .....	65
7.4	Fascicolo tecnico .....	65
7.5	Manuale d’uso e manutenzione .....	66
7.6	Dichiarazione di conformità e marcatura CE .....	66
7.6.1	Dichiarazione CE.....	67
7.6.2	Marcatura CE .....	67
<b>Conclusioni .....</b>		<b>68</b>
<b>Appendice A – Tabelle SMED .....</b>		<b>70</b>
<b>Appendice B – Esempio di programma robot .....</b>		<b>73</b>
<b>Appendice C – Datasheet centro di lavoro .....</b>		<b>76</b>
<b>Appendice D – Funzionamento delle pompe.....</b>		<b>77</b>
D.1	Pompe .....	77
D.1.1	Prevalenza della pompa .....	77
D.1.2	Portata e potenza della pompa.....	78
D.1.3	Curve caratteristiche delle pompe .....	78
D.1.4	Tipi di pompe .....	79
D.1.5	Le pompe centrifughe .....	79
<b>Bibliografia .....</b>		<b>81</b>

# Introduzione

Le aziende dedite alla produzione sono certamente uno dei motori più importanti dell'economia italiana, e ancor più a livello regionale. Seppur appesantite dagli effetti deleteri della crisi, le industrie e le piccole fabbriche sono largamente diffuse sul territorio veneto, e danno occupazione ad un gran numero di persone e di figure professionali, permettendo in un tempo sia un'alta produttività sia un'evoluzione tecnologica costante. Il lavoro congiunto di persone con diverse competenze e gradi di esperienza, infatti, è spesso foriero di idee innovative dal punto di vista tecnico, riguardanti la progettazione dei beni da produrre ma soprattutto lo studio dei sistemi e dei processi produttivi. L'attenzione è rivolta al miglioramento dei metodi, alla riduzione degli sprechi, all'automazione e velocizzazione dei processi, puntando sulla formazione e sulle capacità umane. Gli obiettivi principali di questo sistema economico sono l'aumento della qualità dei prodotti e della capacità produttiva, per rispondere al meglio alle richieste del mercato facendo fronte ad una concorrenza molto agguerrita, prima fra tutte quella cinese. Da tali esigenze scaturiscono talvolta soluzioni creative che permettono alle aziende di mantenere alta la competitività e far avanzare lo stato dell'arte.

La presente tesi tratta due efficaci strumenti che possono essere adottati per realizzare quel miglioramento del processo produttivo a cui si è fatto riferimento. Il primo è la robotizzazione di piccoli sistemi produttivi a sé stanti, chiamati celle (o isole) di lavoro, cioè un tipo di automazione evoluta e programmabile che consente alle celle una notevole autonomia anche in presenza di operazioni non banali, come possono essere la manipolazione o la saldatura, e la flessibilità di adattarsi con un minimo sforzo a nuovi processi. Le celle sono usualmente composte da macchine per la lavorazione e la trasformazione di materie prime o semilavorati in prodotti finiti, e trovano applicazione in numerosi settori industriali. I robot che vengono impiegati non hanno nulla a che fare con lo stereotipo di macchina umanoide che imita i nostri comportamenti, ciononostante hanno esattamente il compito di sostituire l'uomo in attività per lui ripetitive e faticose, in modo che la "risorsa umana" si possa dedicare a mansioni maggiormente qualificate, di controllo e gestione, e seguire anche più processi insieme. Pur con limitate possibilità decisionali, i robot sono spesso in grado di assolvere le funzioni per le quali sono stati programmati meglio di quanto potrebbero fare gli operatori, essendo più veloci, precisi, potenti a seconda dei casi e, cosa ancora più importante, capaci di garantire identiche prestazioni per molto tempo prima che insorgano fenomeni di usura.

Il secondo strumento per il miglioramento è costituito da un metodo analitico per ridurre il tempo di attrezzaggio delle macchine (o set-up), cioè quel periodo in cui vengono fatte delle modifiche alla strumentazione di lavoro, e all'eventuale software di controllo, per predisporre i macchinari ad un nuovo processo produttivo. Può accadere infatti che i cambi di produzione siano gestiti con una certa superficialità, non curando a dovere l'organizzazione delle operazioni, e ciò comporta un protrarsi dei lavori oltre il tempo strettamente necessario. La tecnica formalizzata per la riduzione prende il nome di SMED, acronimo che indica proprio il cambio rapido di un'attrezzatura (Single Minute Exchange of Die), e segue uno schema operativo ben preciso che dà subito un'idea delle possibilità di risparmio: da una ripresa video del set-up da studiare, si individuano le singole operazioni effettuate dagli addetti, registrandone la durata, e si classificano in interne ed esterne, cioè tali che la macchina debba o meno essere ferma durante il loro svolgimento. Per ogni attività, in particolare per quelle certamente interne, si discute poi la possibilità di renderla più semplice e veloce, tramite l'utilizzo di strumenti adatti, la modifica delle attrezzature, la semplificazione dei sistemi di fissaggio e soprattutto la migliore organizzazione del lavoro (preparazione degli utensili, impiego di più operatori, sequenza intelligente delle operazioni, ecc.). Si ottiene quindi una stima di quale potrebbe essere il tempo effettivo dell'attrezzaggio, da confrontare con un nuovo filmato del set-up rivisto e corretto. L'applicazione dello SMED porge risultati talvolta sorprendenti permettendo notevoli abbattimenti dei tempi di fermo macchina, che si traducono in risparmi di denaro altrettanto interessanti. Inoltre, la riduzione provoca un beneficio ancora maggiore alla logica di produzione dell'azienda, poiché in genere è applicata ai cosiddetti colli di bottiglia, cioè quelle macchine (o gruppi di macchine) che non sono sempre in grado di soddisfare la domanda a causa di un limite intrinseco sul volume che possono produrre; condizionando l'intero sistema di cui fanno parte, è evidente che esse sono i primi elementi su cui occorre intervenire con l'ottimizzazione dei tempi, per migliorare la capacità complessiva.

Questi argomenti sono stati approfonditi nell'ambito di un tirocinio svolto in un'azienda della provincia di Verona. La ditta è produttrice e leader internazionale nel settore delle elettropompe per acqua, ed è formata da numerosi reparti che collaborano coordinati ma come piccole fabbriche separate, formando una sorta di

rete interna di fornitori e clienti. L'attività si è concentrata nel reparto di lavorazioni meccaniche, il posto dove vengono lavorati tutti i pezzi grezzi in ghisa, acciaio inox, ottone e alluminio, provenienti dalla fonderia, che sono utilizzati nella costruzione delle pompe; per farlo sono impiegate molte macchine utensili, per la maggior parte a controllo numerico, fra cui torni, centri di lavoro, transfer, presse ecc. L'azienda è dotata di diversi robot, sia semplici di tipo cartesiano, con movimenti su tre assi ortogonali, sia avanzati e costosi antropomorfi, bracci articolati a sei gradi di libertà. Oltre che nell'aspetto, queste due categorie si differenziano per la possibilità di programmazione, le capacità motorie e di conseguenza i compiti che possono eseguire. I primi, infatti, hanno movimenti più elementari e sono in genere programmati una sola volta per svolgere un'operazione sempre uguale, di solito la pallettizzazione, cioè la presa di componenti processati e la loro sistemazione ordinata in contenitori adatti al trasporto; i robot antropomorfi, invece, sono più complessi e dotati di un'unità di governo attraverso la quale è possibile progettare con estrema flessibilità i loro programmi di lavoro, con la disponibilità di una struttura meccanica che consente un ampio range di movimento (in analogia con un braccio umano) da cui la possibilità di eseguire molteplici operazioni, dalla pallettizzazione all'assemblaggio al carico/scarico macchine utensili. Ed è proprio per l'asservimento dei macchinari che i robot antropomorfi sono inseriti nelle cosiddette celle di lavoro, zone ben delimitate, e recintate per la sicurezza delle persone, dove si svolgono interi processi produttivi, spesso articolati in più fasi. Sebbene vi siano varie classificazioni delle celle, la caratteristica comune che le distingue da altri sistemi automatici di produzione come le "linee" (composte da macchine in serie dalle quali i pezzi passano su nastri trasportatori) è che le celle sono pensate per poter modificare il loro funzionamento e lavorare particolari differenti, in modo automatico (tramite sistemi di riconoscimento intelligente, come la visione) o più frequentemente a seguito ad un'attività manuale di attrezzaggio, che si può comunque supporre breve. I pezzi prodotti da una stessa cella sono generalmente affini tra loro e fanno parte di quelle che vengono chiamate "famiglie". Il controllo dei robot è un problema difficile da studiare, data la loro struttura a catena aperta e l'interazione di più membri ognuno con un proprio azionamento. È necessario analizzare i sistemi a retroazione usati, le strategie per risolvere all'interno la cinematica diretta e inversa (cioè calcolare la configurazione assunta dall'estremità del robot in base a rotazioni note dei motori e viceversa), capire quali sono e come si compensano le influenze reciproche fra i singoli gradi di libertà, conoscere metodi diversi di controllo, come quelli di forza e di impedenza.

Oltre allo SMED, vi sono alcuni altri metodi estremamente utili per il miglioramento del lavoro, il risparmio e l'aumento della qualità, e fanno tutti parte della filosofia industriale denominata *lean manufacturing* o *lean production*, ispirata al sistema di produzione della Toyota, che mira a minimizzare gli sprechi fino ad annullarli. I teorizzatori e migliori esponenti della metodologia sono i giapponesi, che possono vantare, con le loro aziende, esempi di efficienza produttiva difficili da raggiungere: tutto è perfettamente pulito e ordinato, ognuno sa esattamente come e quando intervenire e l'organizzazione del lavoro è impeccabile. Alla produzione snella (*lean*) si riconduce per esempio il *Just In Time*, principio in base al quale si vogliono ridurre le scorte ed il lead time, oppure il *Metodo 5 S*, con cui ci si propone di seguire, nel normale svolgimento delle attività lavorative, semplici regole che possano mantenere condizioni operative ottimali, ad esempio eliminare il superfluo, tenere in ordine la strumentazione, usare procedimenti standard, pianificare la manutenzione, ecc. Proprio nel periodo dello stage, l'azienda ospitante ha promosso due progetti, diretti da consulenti esterni, sulla riduzione dei tempi di set-up, tramite tecnica SMED, e sul miglioramento "lean", con l'applicazione del Metodo 5 S. Tali attività, organizzate in gruppi di lavoro, hanno fatto parte integrante del tirocinio.

La robotizzazione è stata messa in pratica, in tutte le sue fasi progettuali e realizzative, in un'isola che doveva essere sfruttata nel miglior modo possibile essendo un collo di bottiglia del reparto. Si è studiato il problema e sono state fatte delle scelte tecniche in funzione delle richieste, relativamente al robot, al suo dispositivo di presa ed ai nastri di trasporto. È stato utile studiare off-line il ciclo di lavoro che avrebbe dovuto eseguire il robot per essere più rapido, fluido nei movimenti ed evitare gli ostacoli, attraverso una simulazione con Matlab, e l'applicazione del metodo SMED per la riduzione dei tempi di set-up si è rivelata particolarmente proficua avendo fatto calare un attrezzaggio da 5 a 1,5 ore, per un risparmio unitario di circa 2.000 €; questo grazie ad un'organizzazione più oculata del lavoro e all'adozione di strumenti che permettono operazioni di regolazione e montaggio più veloci. In parallelo è stato affrontato il tema della sicurezza delle macchine, studiando le norme di riferimento, e redatta la documentazione necessaria alla certificazione di conformità europea. Il processo di produzione ha subito effettivamente un cambiamento positivo, cui hanno corrisposto vantaggi logistici ed economici.

Un'altra cella di lavoro, già automatizzata, ha proposto una diversa situazione di studio, in cui si intendeva valutare la fattibilità tecnica ed economica di una modifica al processo produttivo, mediante l'aggiunta di

una terza macchina utensile, per introdurre le lavorazioni di corpi che prima subivano dispendiosi spostamenti nel reparto. Sono stati presi in considerazione tutti gli aspetti del progetto, stabilendo non solo che il cambiamento aveva senso dal punto di vista tecnologico, ma anche che esso comportava un notevole guadagno in termini di denaro. La robotizzazione sostanzialmente è stata fatta sui processi che in precedenza erano esterni all'isola, ed ha portato un miglioramento considerevole in termini logistici, contenendo la movimentazione dei materiali, i tempi morti e l'impiego dell'uomo. Anche in questo caso, lo SMED ha dato ottimi risultati nella riduzione dei tempi impiegati a preparare diversi elementi dell'isola, durante i cambi di produzione: ad esempio nell'attrezzaggio del centro di lavoro, dove uno studio dettagliato ha permesso di individuare la gestione più conveniente del magazzino utensili, oppure nella programmazione del robot, con una semplificazione nel sistema di memorizzazione dei punti.

Il processo produttivo industriale può realmente velocizzarsi e migliorare in qualità se vengono utilizzati nel modo giusto gli strumenti dell'automazione, in particolare della robotica, e dell'analisi del set-up: basti pensare che già nell'attività di tesi si è potuto stimare un guadagno di più di 115.000 € dall'ampliamento di una cella, e allo stesso tempo trovare il modo di far gestire ad un operatore il lavoro che era prima svolto da cinque.

Il primo capitolo espone i concetti fondamentali della lean production, spiegando più in dettaglio il Metodo 5 S, cioè le cinque regole teorizzate in Giappone per eliminare gli sprechi della produzione, e la sua applicazione in azienda. Nel secondo capitolo è invece trattato il sistema SMED per la riduzione dei tempi di set-up. Il Cap.3 parla dei robot e dell'automazione utilizzati nel mondo industriale, descrivendone tipi e proprietà, e correlando le diverse macchine con i layout produttivi ed i lavori per i quali sono adatti; vengono evidenziate le differenze tra celle e linee, e spiegate le peculiarità di una macchina transfer. Il capitolo successivo focalizza sull'argomento del controllo dei robot, nelle varie versioni e secondo schemi più o meno efficaci in base alle esigenze pratiche, e sugli effetti dinamici che si generano nei robot a più gradi di libertà. Nel Cap.5 è trattata la robotizzazione di una cella di lavoro e l'applicazione su di essa del metodo SMED; viene descritto il problema e le scelte effettuate per risolverlo, illustrata la simulazione al computer del ciclo, i benefici ottenuti e la documentazione prodotta per l'azienda. Il sesto capitolo si occupa dell'ampliamento di un'isola, spiegando la situazione originale e qual è stato lo sviluppo dell'idea di miglioramento, attraverso lo studio di fattibilità; inoltre è riportato il procedimento per la riduzione del set-up. Nel settimo e ultimo capitolo sono riassunte alcune nozioni sulle leggi in materia di sicurezza delle macchine, in particolare sulla Direttiva Macchine e sulla valutazione dei rischi, e sui documenti che devono accompagnare una macchina perché possa essere immessa nel mercato europeo (Fascicolo tecnico, Manuale d'uso e manutenzione, Dichiarazione di Conformità). Seguono le conclusioni ed alcune appendici, riguardanti degli esempi sul metodo SMED, le specifiche di un centro di lavoro, il codice operativo dei robot ed il funzionamento delle pompe per l'aspirazione dell'acqua.

# 1 Lean Manufacturing e il Metodo 5 S

La "Lean Manufacturing" è una filosofia che incorpora un insieme di strumenti e tecniche da utilizzare nei processi aziendali per ottimizzare il tempo, le risorse umane, la produttività, migliorare il livello qualitativo dei prodotti e ridurre gli sprechi. È un approccio sistematico per individuare ed eliminare gli sprechi (o *muda*) attraverso il miglioramento continuo, modulando il flusso di produzione sulla richiesta del cliente. Il termine *lean production*, produzione snella, è stato coniato dagli studiosi Womack e Jones nel loro libro "La macchina che ha cambiato il mondo". La metodologia Lean si applica non solo alla produzione ma a tutti i processi aziendali per realizzare l'azienda snella, o *lean enterprise*. Molti degli strumenti e metodi della Lean Manufacturing (JIT, Kanban, PokaYoke, SMED, TPM, Kaizen, 5 S, ecc.), sono stati ereditati dalle esperienze delle aziende giapponesi, soprattutto dalla Toyota. Lo SMED, che implementa la riduzione dei tempi di set-up, sarà l'oggetto del prossimo capitolo; di seguito invece si concentra l'attenzione sul Kaizen e sul "Metodo 5S".

Il kaizen è una metodologia di "miglioramento continuo" che coinvolge l'intera struttura aziendale. Il kaizen si connette con concetti come il Total Quality Management (TQM - Gestione della qualità totale), il Just In Time (JIT - abbattimento delle scorte), il kanban (metodo per la reintegrazione costante delle materie prime e dei semilavorati). Il kaizen, presentato inizialmente dalla Toyota e applicato sempre più in tutto il mondo, si basa sul principio che detta le fondamenta di questa filosofia: "L'energia viene dal basso", ovvero sulla comprensione che il risultato in un'impresa non viene raggiunto dal management, ma dal lavoro diretto sul prodotto. Il management assume dunque una nuova funzione, non tanto legato alla gestione gerarchica, quanto al supporto dei diretti coinvolti nella produzione. Il sistema semplice quanto innovativo che rappresenta la forza di tale metodologia sta nella riduzione degli sprechi. Il vecchio sistema studiava l'energia e la materia impiegate per il raggiungimento del risultato. Il metodo che veniva utilizzato per aumentare il rendimento del processo era quello di aumentare il lavoro utile. Con la metodologia kaizen, invece, bisogna impegnarsi nella riduzione di quei processi che non creano valore aggiunto sul prodotto, ovvero eliminando tutte quelle cose che il consumatore non è disposto a pagare. Una ulteriore metodologia creata e sviluppata in Giappone per coinvolgere i singoli nel miglioramento, è il cosiddetto *Sistema dei suggerimenti*, che consiste in proposte formulate da tutti i dipendenti per apportare migliorie al ciclo produttivo o per evitare l'insorgere di problemi ancora non manifestati ma di probabile insorgenza.

La Lean Manufacturing è insomma una cultura operativa che si pone l'obiettivo dell'eliminazione degli sprechi in tutti i punti del processo di fabbricazione. L'approccio pratico, interattivo all'apprendimento e all'utilizzo della tecnica Lean genera miglioramenti sostenibili a lungo termine e promuove la partecipazione dei lavoratori a tutti i livelli del suo funzionamento. Si concentra sul massimizzare la velocità, migliorare la qualità, ridurre i tempi, migliorare il tempo di risposta ai clienti, ridurre i costi e sulla creazione di una cultura di miglioramento continuo. Le aziende che hanno adottato logiche di produzione snella hanno visto una media del 50% di miglioramento in questi settori con sostanziali riduzioni dei costi ed aumento di produttività senza impegnare ulteriori risorse economiche.

## 1.1 Il Metodo "5 S"

L'espressione "5 S" è l'acronimo dei cinque termini con i quali si indicano, in lingua giapponese, i fondamenti del *visual workplace* e che designano le 5 tappe di azione per migliorare l'efficienza del lavoro quotidiano. Il metodo si focalizza su ordine, organizzazione, pulizia e standardizzazione. I principi di base sono talmente semplici, ovvi e poco costosi che molte aziende ne sottovalutavano l'importanza. Il metodo permette di aumentare la produttività, e allo stesso tempo migliorare sia la qualità che la sicurezza, scopi che si propone anche lo studio dei metodi di lavoro. Ciò è possibile:

- riducendo lo spreco di tempo e di materiali
- riducendo il tempo di set-up
- riducendo gli interventi manutentivi e i tempi di fermo
- migliorando l'efficienza

- migliorando l'ambiente di lavoro
- migliorando il morale dei dipendenti

Tale logica può essere portata in ogni settore, specie in quello industriale.

**Seiri** – Separare il necessario dal superfluo. Eliminare qualsiasi cosa che non serve nella postazione di lavoro. Questo principio risponde a quello base del JIT, che afferma: “solo quel che serve, nella quantità che serve ed al momento in cui serve”. Per evidenziare tutto ciò che non serve è necessario, prima di tutto, eseguire una pulizia generale ed accurata dell'area di lavoro, per poi decidere cosa fare di ciò che sarà ritenuto inutile o inutilizzabile. In pratica una etichetta rossa (di espulsione) viene collocata su ciascun articolo che si considera non necessario per l'operazione. In seguito, questi articoli sono portati in un'area di deposito transitorio. Più tardi, se questi si confermano non necessari, si divideranno in due classi, quelli che sono utilizzabili per altre operazioni e gli inutili, che saranno scartati. La scelta tra l'inutile e l'indispensabile è guidata dalla frequenza di utilizzo; in Tab.1.1 si dà un esempio di possibile organizzazione.

Tabella 1.1 – Destinazione dei materiali usati nel posto di lavoro

<b>Frequenza di utilizzo</b>	<b>Provvedimenti presi</b>
Oggetto non utilizzato da 1 anno	Eliminare
Oggetto utilizzato 1 volta negli ultimi 6 – 12 mesi	Mandare in zona scarto
Oggetto utilizzato 2 volte negli ultimi 2 a 6 mesi	Mandare in zona scarto
Oggetto utilizzato 1 volta al mese	Depositare in un magazzino separato
Oggetti utilizzati più di 1 volta per settimana, 1 volta al giorno, tutti i giorni, tutte le ore	Depositare sul posto di lavoro

Questo passo di ordinamento é un modo eccellente per liberare spazio allontanando cose come: attrezzature rotte o obsolete, scarti ed eccessi di materia prima, ecc. Dal punto di vista produttivo migliora i seguenti aspetti:

- il personale non è più costretto a camminare e lavorare aggirando gli ostacoli rappresentati dagli articoli non necessari con spostamenti inutili che non portano a produttività;
- quando oggetti inutili si accumulano nei magazzini, si perde più tempo nella ricerca di ciò che è necessario;
- le scorte ed i macchinari non necessari impongono delle spese per il loro mantenimento, e letteralmente “corrodono” il profitto;
- le scorte non necessarie sono sinonimo di spreco di denaro, a causa degli oneri che si debbono sostenere per gestirle;
- un eccesso di scorte a disposizione tende a nascondere altri tipi di problema (ad esempio, poca forza operativa, processi non bilanciati, realizzazione di beni affetti da difettosità, rotture delle macchine, strumenti mancanti, consegne ritardate, lentezza dei set-up);
- gli attrezzi o i materiali sparsi a caso su di un banco di lavoro o sul pavimento non solo causano perdite di tempo e fatica spesa nel cercarli in mezzo al disordine, ma rendono ogni tanto necessario far ordine sul posto di lavoro quando, durante il giorno, serve lo spazio per operare; inoltre il disordine crea condizioni di pericolo perché l'operaio potrebbe nella fretta cadere e farsi male;
- quanto più gli spazi sono ristretti tanto più si deve sistemare ed ordinare.

**Seiton** – Ordinare i materiali in posizioni ben definite per eliminare i tempi di ricerca. Sistemare gli strumenti, le attrezzature ed i materiali in modo tale che chiunque possa vedere dove si trovano, possa facilmente prelevarli, adoperarli, e rimetterli al loro posto. L'ordinare consiste in pratica nello strutturare le attività in modo tale da minimizzare gli sprechi. In questa fase viene applicata la buona regola di “un posto per ogni cosa, ogni cosa al suo posto”.



L'individuare dove le cose sono collocate (individuazione "a colpo d'occhio") porta al concetto di *Visual Control*. Il Controllo Visivo si ha quando chiunque può comprendere all'istante il modo in cui si deve svolgere il lavoro e può individuare la collocazione degli oggetti. Con il Visual Control c'è un'unica collocazione possibile per ogni oggetto, e si può comprendere immediatamente se una certa operazione stia procedendo come dovrebbe o sia fuori specifica. Per esempio, quando è previsto che la scorta interoperazionale tra due processi consecutivi sia pari ad un semilavorato, ci dovrebbe essere un cartello nel luogo dedicato, indicante "scorta pari ad un pezzo". Se capita di vedere in quel luogo due o tre pezzi, un'occhiata al cartello evidenzia immediatamente una qualche irregolarità. Di solito si è in grado di ricondurre il problema alla sua causa, che potrebbe essere una parte mancante, un prodotto difettoso, o la rottura di una macchina. Una volta identificato il problema, ed immediatamente messo in atto un intervento di miglioramento delle condizioni, si può affermare che si è attuato concretamente il concetto di "ordine visivo".

In questa parte di organizzazione rientra anche l'organizzazione del posto di lavoro priva di sprechi dovuti a spostamenti, attese e movimenti non necessari, fatta in quattro fasi:

- 1) minimizzazione delle operazioni da compiere su un posto di lavoro, eliminando tutti i lavori inutili o quelli che vengono svolti 2 volte;
- 2) minimizzazione dei movimenti inutili che riguardano:
  - uso del corpo umano;
  - il layout del posto di lavoro;
  - le attrezzature, gli strumenti e i macchinari;
- 3) minimizzazione delle attese nel processo;
- 4) massimizzazione dell'uso delle risorse.

In queste fasi è necessaria la stretta collaborazione con i tecnici dei tempi e metodi per determinare e standardizzare il metodo di lavoro più appropriato. Uno dei metodi usati nel visual control consiste nel marcare in modo differente i camminamenti e le aree di svolgimento operazioni.

**Seison** – Pulire e ordinare sistematicamente le varie aree di lavoro per scoprire i problemi. Controllare l'ordine e la pulizia creati; una volta che sono state eliminate le cose inutili, e ricollocate quelle necessarie, viene fatta una pulizia dell'area. Nel medesimo tempo, cominceranno ad evidenziarsi problemi che prima erano occultati dal disordine o dallo spreco. Così, potranno evidenziarsi fughe, parti con eccessiva vibrazione o temperatura, rischi di contaminazione, parti rotte, ecc. Inoltre la pulizia regolare permetterà di mantenere in buone condizioni operazionali gli utensili, le attrezzature e le macchine, ecc.

**Seiketsu** – Standardizzare e migliorare. Mantenere l'ordine e la pulizia creati, cercare di migliorare ripetendo continuamente le fasi precedenti: Seiri, Seiton, Seison; implementando le 5 S, ci si deve concentrare nello standardizzare le migliori pratiche per mantenere l'ordine e la pulizia nell'area di lavoro, e questo porta ad elaborare standard di pulizia e di ispezione. Si deve scrivere la lista delle cose da fare, il tempo necessario e la periodicità, corredate possibilmente da foto, e realizzare delle azioni di autocontrollo permanenti. Bisogna che gli operai partecipino nella preparazione degli standard o norme, in quanto essi sono la fonte più valida delle informazioni che si riferiscono al loro lavoro.

**Shitsuke** – Mantenere e migliorare gli standard ed i risultati raggiunti. Imporsi disciplina e rigore per il proseguo. Questa è la "S" più difficile da fare e da implementare: fare del mantenimento appropriato un'abitudine stabile. La *disciplina* consiste nel mantenere le norme o gli standard definiti dall'organizzazione nella zona di lavoro. Le quattro "S" precedenti si possono inserire senza difficoltà, ma se nei luoghi di lavoro si mantiene la disciplina la sicurezza sarà permanente, la produttività migliorerà progressivamente e la qualità dei prodotti sarà eccellente. Il mantenimento dei risultati raggiunti si realizza attraverso audit periodici per la verifica del rispetto degli standard. Attraverso l'analisi continua dei problemi, l'identificazione delle contromisure ed il continuo monitoraggio della prestazioni è possibile fissare nuovi obiettivi secondo il principio del miglioramento continuo.

## 1.2 La manutenzione produttiva totale

Le "5 S" sono un prerequisito per l'inserimento della TPM (Total Productive Maintenance), perché non si possono ridurre i tempi di arresto di una macchina se non si trovano gli utensili o i pezzi, o se tutti gli interventi necessitano di una pulizia preliminare per identificare la sorgente dei problemi. Per le medesime ragioni, le 5 S sono una premessa indispensabile allo SMED, o cambio di utensili rapido. Passando uno straccio ciascuna sera sulla macchina si può trovare precocemente le anomalie, le fughe, i surriscaldamenti, i cambi di colore, di forma, gli odori non abituali. Il termine pulizia prende un senso più ampio, esso si integra con le operazioni correnti come la lubrificazione ed il riserraggio. Se si considera che questi compiti fanno parte della manutenzione preventiva, si può qualificare questo tipo di pulizia come pulizia a valore aggiunto. Inoltre con questo metodo si ottengono dei benefici sotto l'aspetto della qualità. Infatti senza sistemazione, ordine e pulizia, la precisione non può essere assicurata; i trucioli o la polvere che si infiltrano nelle macchine o nei computer possono causare dei guasti, degli errori o degli scarti. Le "5 S" trattano la causa principale di queste manchevolezze e così permettono di eliminare tali problemi prima che sorgano.

## 1.3 Muda (sprechi)

Muda è una parola giapponese che significa spreco ma che ha, se possibile, un significato ancora più ampio di quello italiano. Muda, infatti, identifica ogni attività priva di valore aggiunto. Ogni processo può nascondere dei muda, in ufficio come in ambito produttivo. In tempi difficili come questi, occorre prestare attenzione ad ogni possibile risparmio di tempo e di denaro e il kaizen è molto utile proprio per fare questo lavoro al meglio, mediante l'identificazione e la rimozione di tutti gli sprechi. I principali benefici che ne derivano sono i seguenti:

- risparmio di soldi
- aumento della produttività dovuto ad un risparmio del tempo necessario per fare un lavoro
- disponibilità di macchinari, attrezzature e parti quando servono
- standardizzazione di procedure e processi
- maggiore soddisfazione dei clienti
- miglioramento del morale
- miglioramento delle comunicazioni

I seguenti "sette sprechi" (*Seven Wastes*) identificano e classificano risorse che usualmente sono degli sprechi. Essi sono stati identificati da Taiichi Ohno, ingegnere capo Toyota, come parte del *Toyota Production System*.

1. **Difetti:** difetti alla qualità portano il cliente a rifiutare il prodotto. Lo sforzo necessario a creare questi difetti è uno spreco.
2. **Sovraproduzione:** la sovrapproduzione è la produzione o l'acquisizione di beni prima che siano effettivamente richiesti. E' uno spreco molto pericoloso per le aziende perché tende a nascondere problemi di produzione. La sovrapproduzione deve essere immagazzinata, gestita e protetta, generando quindi altri sprechi.
3. **Trasporti:** ogni volta che un prodotto è trasferito rischia di essere danneggiato, perso, ritardato, ecc., così diventa un costo che non produce valore. I trasporti non introducono alcuna trasformazione al prodotto che il cliente sia disposto a pagare.
4. **Attese:** si riferisce sia al tempo impiegato dai lavoratori nell'attesa che la risorsa sia disponibile, sia al capitale immobilizzato in beni e servizi che non sono ancora stati consegnati al cliente.
5. **Scorte:** le scorte, siano esse in forma di materie prime, di materiale in lavorazione (WIP), o di prodotti finiti, rappresentano un capitale che non ha ancora prodotto un guadagno sia per il produttore che per il cliente. Ciascuna di queste tre voci che non sia ancora elaborata per produrre valore è uno spreco.
6. **Movimento:** è simile ai trasporti, ma si riferisce, anziché ai prodotti, ai lavoratori o alle macchine. Questi possono subire danneggiamenti, usure, problemi di sicurezza.

7. **Processi inutilmente costosi:** usare risorse più costose del necessario per le attività produttive o aggiungere funzioni in più, oltre a quelle che aveva originariamente richiesto il cliente, produce solo sprechi. C'è un particolare problema in tal senso che riguarda gli operatori. Gli operatori che possiedono una qualifica superiore a quella necessaria per realizzare le attività richieste, generano dei costi per mantenere le proprie competenze che vanno sprecati nella realizzazione di attività meno qualificate.

Le "5 S" sono il fondamento del modello di produttività industriale creato in Giappone e poi applicato nelle aziende occidentali. Non sono caratteristiche esclusive della cultura giapponese, bensì criteri di buon senso, opportunamente formalizzati, che chiunque può fare propri. Sono però poco frequenti le fabbriche o le officine che applicano in forma standardizzata le "5 S". Questo non dovrebbe succedere perché i compiti giornalieri di mantenere in ordine l'organizzazione ed eliminare gli sprechi servono per migliorare l'efficienza e la qualità del lavoro nel luogo dove gli operatori trascorrono più della metà della vita.

[1], [2], [3]

In azienda sono stati applicati tutti i concetti descritti, durante due giornate operative ogni settimana dedicate alle attività di miglioramento. È stato fatto ordine e pulizia implementando le 5 S, eliminato molto materiale superfluo e ridisposto parte delle attrezzature in maniera più funzionale, rendendo sempre visibile il lavoro svolto attraverso il rapporto diretto con il personale e l'uso di cartelli, check list ed etichette. Per aiutare la diffusione della mentalità e del metodo, sono state affisse delle bacheche come quella in Fig.1.1, dove compaiono le liste di controllo, le regole fondamentali per il mantenimento dell'ordine e della pulizia, i cartellini per il materiale fuori posto, il layout dei reparti suddiviso per aree di responsabilità, gli spazi per evidenziare i problemi e proporre delle soluzioni. Inoltre è stata creata, per ogni zona, la "finestra delle competenze", cioè una tabella che indica le capacità professionali di tutti i dipendenti incentivando l'avanzamento di ognuno.



Figura 1.1 – Bachecca che espone i risultati prodotti dalle attività di miglioramento

## 2 Riduzione dei tempi di set-up

Il tempo di set-up è quello che intercorre tra l'ultimo pezzo "buono" della produzione precedente ed il primo "buono" del nuovo lotto, dove per pezzo "buono" si intende un pezzo conforme, cioè utile se il cliente è interno, vendibile se il cliente è esterno. Questo tempo, insieme con il costo, influenza la frequenza con cui si effettuano le operazioni di set-up; di conseguenza viene condizionata anche la quantità del lotto minimo di produzione.

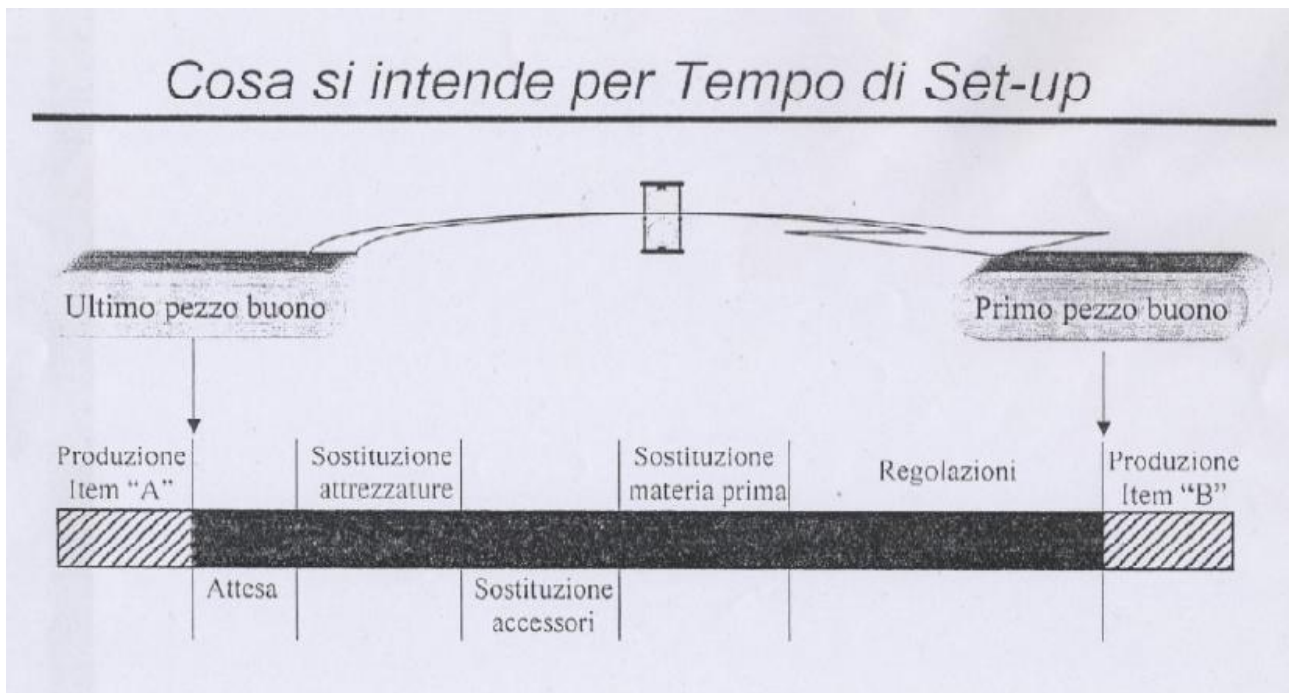


Figura 2.1 – Diagramma che sintetizza il set-up necessario durante un cambio di produzione

Il set-up è fondamentale per definire:

- la flessibilità del sistema produttivo, cioè la sua capacità di adeguarsi, per esempio, alle esigenze del mercato;
- il livello di servizio al cliente, sia esso esterno o interno (quale ad esempio un diverso reparto);
- il livello delle scorte a magazzino, che impegnano spazio e producono spese non indifferenti.

Il set-up si affronta definendo un *lotto minimo* (o *economico*), vale a dire una quantità di approvvigionamento di pezzi al di sotto della quale non è conveniente scendere, pena una maggiore onerosità della produzione stessa. Al crescere del lotto diminuisce il tempo perso nei cambi, ma aumenta il costo dovuto ai livelli delle scorte.

Il set-up è il problema che causa la mancanza di flessibilità verso i reparti interni o verso i clienti esterni. Come tale non va considerato imm modificabile, anzi può essere bene analizzato. Una sua riduzione drastica è un ottimo modo per aumentare contemporaneamente flessibilità ed economicità del sistema produttivo. Per evitare di doverlo ridurre in un secondo tempo, occorre prestare attenzione quando si acquistano o si modificano macchine o impianti, e valutare inoltre l'opportunità di privilegiare piccoli impianti dedicati (a set-up nullo o ridotto) piuttosto che uno unico, grande e con elevati tempi di set-up (laddove sia tecnicamente possibile). Nel caso in cui si intervenga su una situazione preesistente, si rivela molto efficace il metodo SMED.

## 2.1 Sistema SMED

Lo SMED, dall' inglese *Single Minute Exchange of Die* che letteralmente significa “cambio dello stampo in un minuto”, è una metodologia integrata nella teoria della *lean production* e volta alla riduzione dei tempi di set-up (o tempi di cambio produzione) teorizzata negli anni '70 dall'ingegnere giapponese Shigeo Shingo. È uno dei metodi della Produzione Snella per ridurre lo spreco in un processo manifatturiero. La tecnica operativa è estremamente efficace, semplice ed applicabile in numerose situazioni. La tendenza tradizionale è sempre stata quella di ridurre il costo del set-up per singola unità di prodotto, aumentando la dimensione del lotto medio. Questo fattore spinge le aziende a programmare la produzione a lotti, generando quindi un aumento delle scorte, del rischio di obsolescenza e del *lead time* di produzione speso in attese lungo il processo produttivo. L'abbattimento dei tempi di set-up risulta essere uno sforzo indispensabile per ottenere i seguenti benefici:

- produzione di lotti piccoli;
- miglior flessibilità e reattività verso il cliente;
- riduzione del costo del prodotto;
- riduzione dei tempi di fermo impianti;
- riduzione delle scorte;
- eliminazione di attività non a valore aggiunto.

Il tempo di set-up è costituito da due fasi concettualmente distinte: il set-up *esterno* e quello *interno*. La prima riguarda l'insieme delle operazioni che non debbono essere svolte rigorosamente a macchina ferma, come ad esempio la preparazione dei materiali o il trasporto delle attrezzature. Al contrario, della seconda fase fanno parte tutte le operazioni che necessitano dell'arresto della macchina (e.g. montaggio/smontaggio attrezzatura). Sono otto le tecniche che devono essere prese in considerazione quando si implementa lo SMED.

1. Separare le operazioni di attrezzaggio in interne e esterne
2. Convertire quelle interne in esterne
3. Standardizzare la funzione, non la forma
4. Usare chiusure funzionali o eliminare completamente le chiusure
5. Usare chiusure intermedie
6. Adottare operazioni parallele
7. Eliminare modifiche
8. Meccanizzare i processi [3]

In generale, bisogna assicurarsi che la maggior parte delle azioni esterne siano effettuate mentre la macchina è ancora in funzione, e cercare di migliorare tutte le azioni di attrezzaggio (mediante il supporto attivo degli addetti allo svolgimento di quelle operazioni). Il cosiddetto attrezzaggio (i.e. set-up) può essere suddiviso, a livello operativo, in quattro parti, che sono:

- preparazione degli attrezzi e dei materiali, controllo delle attrezzature, pulizia della macchina e degli utensili;
- smontaggio delle parti dedicate alla produzione uscente e montaggio delle nuove;
- operazioni di misurazione e di posizionamento di precisione, determinazione delle condizioni operative (controllo dei parametri);
- lavorazioni di prova e messa a punto.

### 2.1.1 Fasi per la diminuzione del set-up

È essenziale basarsi sulla rilevazione delle singole fasi che compongono un set-up, così come si presentano nella situazione iniziale. Per fare questo si adoperano le tecniche proprie dello studio dei tempi e dei metodi, e si filma con una videocamera tutto il periodo di attrezzaggio. La ripresa, infatti, costituisce oggi il mezzo più economico e semplice che permette di rivedere separatamente le singole fasi e quindi svolgere uno studio accurato. Può inoltre essere utilizzata proficuamente come strumento di training per gli addetti ai lavori.

Un ciclo SMED si compone delle seguenti otto fasi.

- 1) Definizione del team di lavoro: il team di lavoro, per avere una buona efficacia, deve essere composto da (almeno) tre persone con le seguenti caratteristiche:
  - a. *Team leader*: conoscitore degli strumenti di *Quick change over* (sinonimo di SMED), deve ricoprire la funzione di leader e coordinatore delle attività di SMED;
  - b. *Tecnico*: deve avere un orientamento fortemente operativo e innovativo nel fornire soluzioni e miglioramenti che riguardano la riduzione delle attività IED (Inside Exchange of Die) e OED (Outside Exchange of Die);
  - c. *Operativo*: deve coinvolgere il più possibile il personale operativo nell'analisi delle attività e nella ricerca delle azioni per ridurre le attività IED e OED; infatti l'operatore lavora otto ore al giorno sul posto di lavoro, ed è quindi la persona che conosce meglio la macchina ed è la più indicata per analizzarla.
- 2) Ripresa del ciclo di set-up attuale: la realizzazione di un filmato deve servire ad analizzare le singole operazioni che vengono seguite prima e dopo il fermo macchina/impianto. Una buona regola è utilizzare due videocamere: una fissa che riprende l'impianto e l'altra mobile per filmare le attività (come trasporti e movimenti) fuori dalla portata della videocamera fissa.
- 3) Analisi delle singole operazioni di set-up: per ognuna delle attività il team di lavoro dovrà definire i seguenti elementi, raccogliendoli sinteticamente come in Tab.A.3 (appendice A):
  - a. Breve descrizione delle operazioni svolte
  - b. Quantificazione del tempo speso per svolgere ciascuna operazione
  - c. Prima separazione tra attività IED e OED
  - d. Elenco degli utensili utilizzati e della loro locazione iniziale
  - e. Sequenza effettiva delle attività effettuata dall'operatore
  - f. Registrazione del numero di operatori impiegati per svolgere le singole attività
  - g. Elenco delle idee migliorative
- 4) Analisi critica del ciclo IED e OED: è necessario analizzare per ogni attività le motivazioni tecniche e di sicurezza per cui la macchina/impianto debba rimanere effettivamente ferma durante il set-up.
- 5) Stesura delle procedure IED e OED: si modifica la sequenza delle attività IED cercando, ove possibile, di identificare delle zone di intervento sulla macchina/impianto e di definire una sequenza di operazioni che permetta all'operatore di iniziare e terminare tutte le azioni di set-up in quella zona specifica. Scomponendo il set up per zone di intervento è possibile lavorare con due operatori in parallelo su più zone della macchina/impianto.
- 6) Riduzione attività interne: il tempo IED è definito come quell'intervallo di tempo durante il quale la macchina (o la linea, o il processo produttivo) deve essere fermata altrimenti non sarebbe possibile effettuare il set-up. Questo è il vero e proprio tempo di set-up, che inizia alla fine del lotto precedente e termina all'inizio del lotto successivo (primo pezzo "conforme"). Durante quest'intervallo di tempo non si aggiunge alcun valore al prodotto (vedi Tab.A.1 in App.A).
- 7) Riduzione attività esterne: le attività OED costituiscono quell'intervallo di tempo, durante il quale si effettuano alcune attività necessarie per il set-up (come portare o rimuovere materiali e prodotti, preparare o mettere a posto attrezzi, ecc.) e la macchina/ impianto può continuare a produrre. Tali attività possono essere effettuate da personale vario (operatori, tecnici, manovalanza...). Una parte di questo tempo può trascorrere prima delle attività di set-up interne e una parte dopo (vedi Tab.A.2).
- 8) Realizzazione del test pilota: si esegue un test pilota per verificare la fattibilità delle soluzioni disegnate. È utile stendere una check list a supporto degli operatori e renderla disponibile a bordo macchina.

Per perfezionare il lavoro, si può considerare un'ultima fase di affinamento del ciclo, consolidamento ed estensione ad altre macchine/impianti: la cultura del miglioramento continuo deve essere il principale strumento che permetta di proseguire velocemente nell'estensione dei principi e degli strumenti lean. [4]

L'obiettivo dell'analisi del set-up consiste nell'identificare fasi che sono spesso confuse tra loro, in modo da poterle separare operativamente. Per determinare se una certa operazione è esterna od interna occorre chiedersi se vada effettuata rigorosamente a macchina ferma.

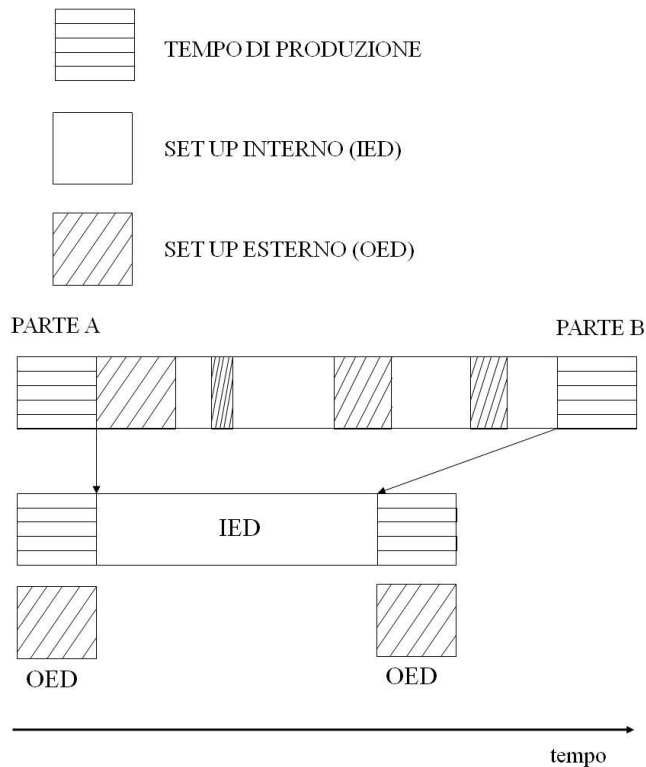


Figura 2.2 – Set-up interno e set-up esterno

Esempi di set-up esterno sono:

- Ricerca e trasporto delle attrezzature a macchina ferma
- Attesa dei mezzi di movimentazione
- Trasporto della materia prima e dei prodotti finiti
- Pulizia degli utensili smontati

Si esamina poi il set-up interno rimasto, allo scopo di evidenziare operazioni che potrebbero essere portate in esterno. Qui incominciano gli interventi sulle macchine e sulle attrezzature per permettere di preparare in anticipo le condizioni operative. Alcuni esempi possono essere:

- Eliminazione dei sollevamenti
- Standardizzazione delle caratteristiche che influenzano il set-up
- Presetting degli utensili

La conversione degli elementi da interni in esterni si attua dapprima preparando le condizioni operative normalmente raggiunte durante il set-up interno, e poi standardizzando le parti con funzioni essenziali per l'attrezzaggio (e.g. dimensioni, centratura, fissaggio, espulsione, aggancio,...).

La riduzione del set-up esterno non influenza, a questo punto, il tempo di set-up, ma sicuramente riduce i costi. Per fare ciò è utile:

- standardizzare le operazioni esterne;
- utilizzare liste di controllo;
- rivedere la movimentazione delle attrezzature;
- organizzare la movimentazione della materia prima;
- mantenere ordine nelle attrezzature e nei magazzini.

La riduzione del set-up interno è un ulteriore passo per ridurre il tempo di fermata macchina, e di conseguenza il lotto minimo di lavorazione. Ciò può essere perseguito adottando:

- operazioni in parallelo, con due o più operatori contemporaneamente. Se ciò è possibile il tempo uomo totale diminuisce. A parità di ore uomo spese, il costo diminuisce comunque per il minor fermo macchina;
- modifiche sulle attrezzature per rendere veloci le fasi IED, come ad esempio l'uso di connessioni rapide o l'accorciamento di bulloni inutilmente lunghi;
- morsetti funzionali;
- eliminazione dell'aggiustaggio, tramite sistemi di riferimento veloci da montare come le dime;
- automazione, per ultima e solo se necessario.

### **2.1.2 Eliminazione dell'aggiustaggio**

I principali modi per ridurre al minimo le regolazioni sono:

- determinare e rendere operative delle condizioni standard di set-up facilmente riproducibili dagli operatori;
- fornire le macchine di strumentazione idonea ad eliminare lunghe calibrature;
- organizzare kit di materiali per le fasi di montaggio.

### **2.1.3 I vantaggi della ripresa video**

La ripresa video genera un documento facilmente analizzabile in momenti diversi e/o da persone diverse, e non necessita di registrazioni scritte durante il set-up. È evidente poi che ciò che si può osservare favorisce la comprensione delle attività, piuttosto che una spiegazione orale; l'addetto all'attrezzaggio, in ogni caso, può chiarire i dettagli in fase di riproduzione. Lo stesso operatore deve essere informato sulle modalità di ripresa e di analisi, e lavorare nelle normali condizioni alla velocità abituale. Il video deve inoltre riportare i tempi progressivi, e la ripresa va progettata per quanto riguarda le posizioni, gli spostamenti, i punti luce e le prese di corrente. Un altro pregio della ripresa è che essa può essere utilizzata come mezzo di formazione per gli operatori, che possono vedere e rivedere la giusta sequenza ed i metodi corretti per lo svolgimento delle attività, così come gli errori da evitare.

## **2.2 I lotti minimi**

I costi delle scorte a magazzino sono dovuti a molti fattori, fra i quali:

- capitale immobilizzato
- spazi occupati
- movimentazioni
- non qualità
- deperimento
- obsolescenza

Normalmente essi sono considerati una percentuale del valore del prodotto finale (20-35%), e pertanto variano in modo lineare con la quantità. Il costo del set-up, d'altra parte, diminuisce rapidamente all'aumentare del quantitativo del lotto di produzione, ed è composto da:

- ore di manodopera
- materiali di consumo
- spese burocratiche
- produzione persa (solo se la macchina è collo di bottiglia)
- spese di trasporto di attrezzature e materiali
- costo dei pezzi di scarto all'avviamento dell'impianto

Il quantitativo per il quale il costo totale, cioè la somma dei costi di gestione delle scorte e del set-up, è minimo rappresenta il lotto economico (E.O.Q.), come si vede in Fig.2.3.



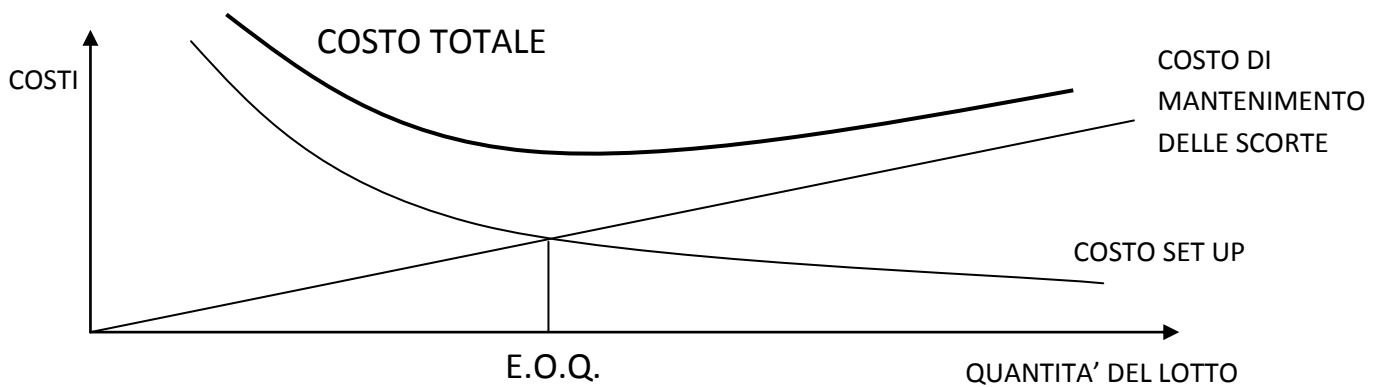


Figura 2.3 – Andamento dei costi al variare della quantità di produzione: il minimo individua l'E.O.Q.

$$E.O.Q. = \sqrt{\frac{2 \cdot A \cdot S}{c \cdot m}} \quad (2.1)$$

dove  $A$  è la quantità annua di pezzi,  $S$  il costo annuo del set-up,  $c$  il costo di un pezzo di lavorazione ed  $m$  il margine di guadagno. Si osserva che, trattandosi di un punto di minimo, produrre sia di meno che di più non è vantaggioso.

Studiare il problema dei lotti minimi è molto importante perché smentisce il pensiero tradizionale secondo il quale il set-up è un effetto dannoso che va limitato attraverso una bassa variabilità della produzione. La conoscenza precisa del lotto economico evita quindi di dover gestire lotti con copertura estremamente lunga, di aggregare al lotto principale dei lotti più piccoli di prodotti simili nell'ipotesi che prima o dopo serviranno, di ricorrere al sequenziamento di più lotti in funzione della comunanza dell'attrezzaggio piuttosto che delle necessità reali.

In azienda sono stati fatti dei calcoli basandosi su questa impostazione, al fine di stabilire, in modo approssimato ma molto ragionevole, i criteri e le quantità per l'approvvigionamento delle materie prime. I risultati numerici sui lotti economici e sui cosiddetti "punti di riordino", cioè i livelli di scorte a magazzino in cui bisogna emettere nuovi ordini d'acquisto, non sono tuttavia di interesse in questa tesi e perciò non vengono considerati. Il metodo SMED, invece, è stato applicato attivamente sfruttando tutti gli strumenti di analisi presentati, dalle riprese alle discussioni in gruppi di lavoro; sono state prodotte tabelle schematiche utili per studiare le modifiche agli attrezzaggi (vedi Tab.A.3 in appendice A), e sono state fatte le verifiche sul campo di quanto sviluppato, con nuovi filmati. Nei Cap.5 e 6 è ampiamente spiegato quanto fatto.

### 3 Robot e automazione industriale

I robot sono macchine in grado di sostituire il lavoro manuale dell'uomo in operazioni più o meno complesse, in modo automatico. Dalle prime realizzazioni degli anni '20, i robot si sono notevolmente evoluti, nella scia del progresso tecnologico del secolo scorso, e tuttora numerosi progetti sono aperti per utilizzarli in disparate applicazioni, che possono essere distinte fra avanzate ed industriali. Le prime riguardano l'esercizio in ambiente ostile (come per esempio spaziale, sottomarino, nucleare o militare), oppure il mondo dei servizi (ambito domestico, assistenza e protesi mediche, intrattenimento, agricoltura, education,...); molte di queste applicazioni sono ancora in fase di studio e la loro tecnologia deve essere affinata. Diverso è il caso dell'uso industriale dei robot, per il quale esistono soluzioni collaudate da diversi anni ed estremamente affidabili. In tale contesto le operazioni che vengono richieste sono relativamente semplici e ripetitive, e comprendono principalmente manipolazione, montaggio, pallettizzazione, verniciatura, saldatura, taglio, lavorazione o misura di oggetti, singoli o a gruppi. I benefici che si ottengono sono significativi sotto molteplici aspetti: si guadagna in precisione/qualità, dal momento i robot moderni sono controllati elettronicamente nei movimenti, hanno un'ottima ripetibilità e, a differenza delle persone, non si stancano; in tempo, perché la velocità consentita è elevata e la durata dei cicli sempre costante; in potenzialità, nel senso che diventano normali dei lavori altrimenti difficili da eseguire, ad esempio dal punto di vista dei carichi in gioco o dell'accuratezza; in denaro, poiché, oltre alle implicazioni economiche di quanto detto, un robot ha innanzitutto il compito di sostituire uno o più operatori, eliminandone il costo.



Figura 3.1 – Robot antropomorfi usati nell'industria dell'automobile: a sinistra un'operazione di manipolazione, a destra una saldatura [8]

In questo capitolo sono considerati due tipi di robot largamente diffusi nel mondo industriale, del quale l'azienda ospitante è esempio: i *cartesiani* e gli *antropomorfi*. Questi, pur essendo molto diversi fra loro, hanno il comune scopo di consentire l'automatizzazione di un processo produttivo, un risultato notevole indice di alto livello tecnologico, qualitativo e, in ultima analisi, di benessere economico. Sia che operi in una *linea automatica*, sia in una *cella di lavoro*, un robot migliora le prestazioni del sistema e rende possibile, entro certi limiti, un funzionamento autonomo del processo. I layout di linea e di cella hanno specifiche caratteristiche che li differenziano, sia sotto l'aspetto del tipo di produzione che per quanto riguarda l'automazione usata. Oltre ad essi, viene esposto anche il caso di un tipo particolare di macchina, il *transfer*, che quasi da sola può realizzare un processo produttivo.

Secondo le norme, il termine *robot (industriale)* designa un manipolatore multiscopo, programmabile, a tre o più assi, sotto comando automatico per uso di automazione industriale; può essere fisso o mobile. Non hanno quindi interesse la forma, la complessità, né l'aspetto esteriore della macchina. Le caratteristiche di riprogrammabilità, autonomia e versatilità sono invece quelle che differenziano il robot dalla macchina automatica, la quale è progettata per svolgere un determinato compito e non è facilmente modificabile per effettuare altri lavori. Dal punto di vista funzionale sono fondamentali la possibilità di adattamento a situazioni differenti e l'autonomia, cioè una qualche capacità di prendere decisioni. Per *sistema robotico* si intende un robot corredato da tutto l'equipaggiamento (hardware e software) necessario al suo funzionamento. Esso comprende:

- la struttura meccanica (il manipolatore) con base mobile o fissa;

- l'alimentazione di potenza;
- il sistema di comando (detto anche controllore o unità di governo);
- ogni equipaggiamento, dispositivo o sensore necessario al robot per eseguire il compito;
- ogni interfaccia di comunicazione, equipaggiamento o sensore, che sia gestito dal sistema di comando del robot. [5]

### 3.1 Robot cartesiani

I robot cartesiani (o rettangolari o “gantry”) sono i più semplici. Possiedono tre giunti di scorrimento ortogonali tra di loro, montati in genere sopra l'area operativa, mentre l'utensile di presa può avere o meno gradi di libertà aggiuntivi (al massimo 3). Possono essere di tipo a portale o a sbalzo (vedi Fig.3.2 e 3.3).

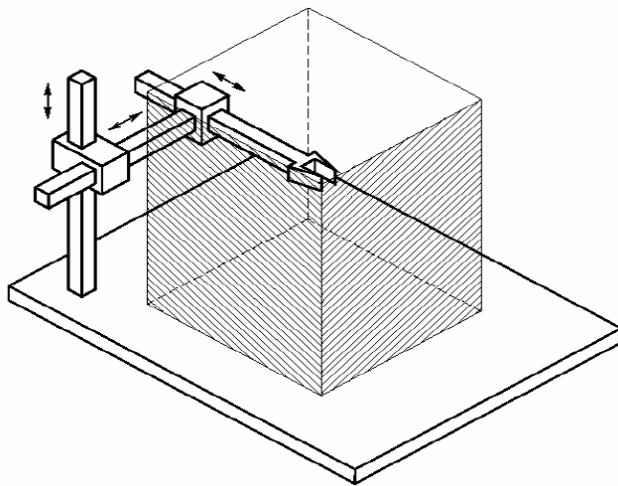


Figura 3.2 – Robot cartesiano a sbalzo [6]

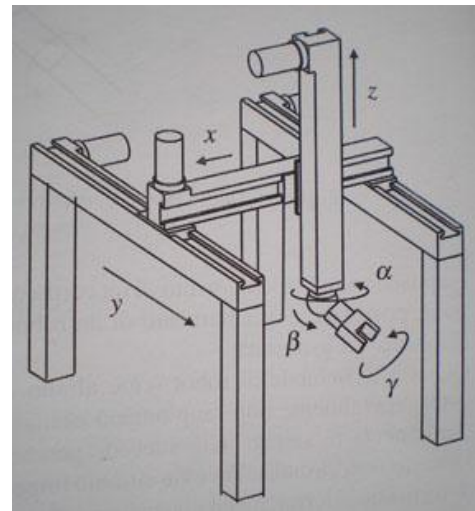


Figura 3.3 – Robot cartesiano a portale [5]

Vengono per lo più utilizzati per semplici operazioni di movimentazione pezzi, ad esempio per la pallettizzazione, spesso all'interno di linee automatiche o al termine di processi di lavaggio, cottura o altre trasformazioni di particolari sempre uguali. La programmazione dei cartesiani non ha perciò la necessità di essere molto flessibile, e quindi è solitamente effettuata solo in fase di installazione, e difficilmente modificabile (non c'è una console di comando). Le Fig.3.4 mostrano alcune realizzazioni presenti in azienda.

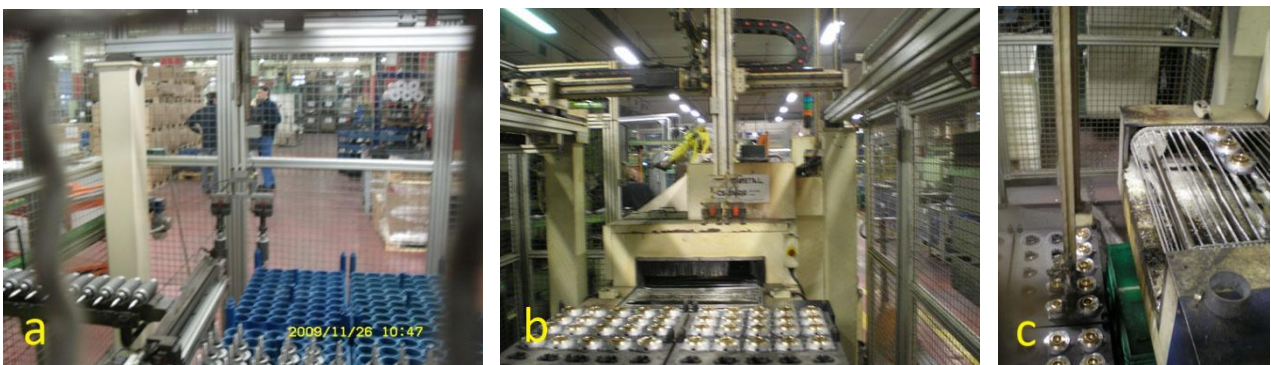


Figura 3.4a-b-c – Esempi di robot cartesiani in funzione: a) manipolatore a due pinze per la pallettizzazione di rotori al termine di una linea; b) e c) pallettizzazione, a coppie, di pezzi in uscita da un tunnel di lavaggio (b attesa, c deposito)

### 3.2 Robot antropomorfi

Un robot antropomorfo è di tipo seriale, cioè è un sistema meccanico composto da un insieme di membri, indicati spesso con il termine inglese *link* e generalmente rigidi, connessi da accoppiamenti

(rotoidali o prismatici) a formare una catena cinematica aperta, in maniera da ricordare vagamente un braccio umano (alcuni esempi in Fig.3.5a-b-c). Ogni accoppiamento è movimentato da un motore; il primo membro della catena, detto base, è fisso mentre l'ultimo porta un utensile utilizzato per manipolare o lavorare oggetti (pinza, saldatrice, pistola per verniciare, ecc...). Tale dispositivo d'estremità (*end-effector*) non è normalmente fissato in maniera permanente al robot, ma può essere ad esso fissato o rimosso in modo automatico o manuale. La parte terminale del robot cui è montato il dispositivo è detta *interfaccia meccanica*. L'intero sistema è comandato da un controllore che comprende un calcolatore più l'elettronica di interfacciamento con i motori e i trasduttori.



Figura 3.5a-b-c – Robot antropomorfi impiegati in azienda: a) inserimento dei rotorii negli statori; b) inscatolamento delle pompe; c) pallettizzazione dei prodotti finiti

I robot antropomorfi sono i più tipici robot industriali di manipolazione. Hanno diversi gradi di libertà (generalmente tra 4 e 6) e sono comandati automaticamente, riprogrammabili, multiscopo, fissi o mobili, destinati ad applicazioni di automazione industriale. Con riprogrammabile si intende che la sequenza di movimenti che il robot deve compiere o le funzioni ausiliarie possono essere variate senza dover modificare fisicamente il robot; multiscopo significa invece che può essere adattato a diverse applicazioni operando su di esso limitate modifiche fisiche. Un robot si dice poi *ridondante* se alcuni tipi di movimento si possono ottenere con diverse combinazioni dei movimenti dei singoli attuatori. Alcuni di essi non sono perciò strettamente indispensabili. La ridondanza può venire utilizzata per ottimizzare il comportamento del robot o per evitare ostacoli. Ogni robot che abbia più di sei attuatori è certamente ridondante.

Per funzionare, un robot (o un sistema robotico) è normalmente assistito da una o più persone con il compito di *operatore* (per avviare, sorvegliare e interrompere le operazioni previste) e di *programmatore* (per preparare il programma del compito). Per studiare le possibilità di movimento del dispositivo d'estremità vengono definiti i seguenti spazi:

- lo *spazio dei giunti*, uno spazio nel senso matematico che rappresenta l'insieme dei valori che possono assumere le coordinate ai giunti;
- lo *spazio di lavoro*, il quale descrive l'insieme dei punti che possono essere raggiunti dal punto di riferimento del polso. Lo spazio di lavoro è quello in cui gli assi secondari non hanno limiti di movimento tranne quelli imposti dal giunto stesso;
- lo *spazio operativo*, quella parte di spazio ristretto che è effettivamente utilizzata nell'effettuazione dei movimenti programmati. [5]

### 3.2.1 Struttura meccanica

Nei robot antropomorfi la struttura (*articolata*), detta anche *struttura meccanica*, è normalmente realizzata da una parte di posizionamento detta anche *braccio* (generalmente a 3 gradi di libertà) seguita da una parte di orientamento denominata *polso* (con 1, 2 o 3 gdl). Il braccio ha normalmente una dimensione molto maggiore della parte di orientamento, e serve a posizionare il centro del polso; quest'ultimo ha il compito di orientare l'interfaccia meccanica e/o il dispositivo d'estremità. L'*attuatore* è l'organo di potenza che realizza il movimento del robot (ad es. motore elettrico, pistone idraulico o pneumatico). Con il termine *giunto* (o



*articolazione*) si intende l'assemblaggio di due elementi rigidi tra i quali è permesso un movimento relativo. L'asse di un giunto è la direzione lungo/attorno la quale una parte del robot può muoversi in modo lineare/rotatorio. Il numero di assi corrisponde al numero di gradi di libertà. Gli *assi principali* (del braccio) sono l'insieme delle articolazioni e dei giunti motorizzati della parte di posizionamento, che è normalmente costituita da elementi di forma longitudinale e sorregge e posiziona il polso. Gli *assi secondari* (del polso) sono l'insieme delle articolazioni e dei giunti motorizzati, tra il braccio ed il dispositivo d'estremità, che orienta l'end-effector. Un polso si dice *sferico* se ha tre gradi di libertà rotoidali e gli assi di rotazione concorrono in un unico punto detto centro del polso.

Un tipo particolare di manipolatore, che si colloca fra i robot cartesiani e gli antropomorfi, è quello denominato SCARA, acronimo significativo *Selective Compliance Assembly Robot Arm* (robot di montaggio a cedevolezza selettiva). Gli assi dei giunti sono verticali. Il robot è a cedevolezza selettiva perché la pinza, se forzata, si può muovere leggermente nel piano orizzontale ma non in quello verticale; un certo grado di cedevolezza è appositamente inserito nel robot per compensare automaticamente alcuni errori di posizionamento. Lo SCARA è formato da due membri rigidi collegati da accoppiamenti rotoidali per effettuare il movimento nel piano  $x-y$  e da un terzo elemento collegato mediante accoppiamento prismatico per compiere gli spostamenti verticali. Un'ulteriore coppia rotoidale è talvolta presente per consentire una rotazione della pinza attorno al suo asse, che altrimenti durante il moto assumerebbe un orientamento dipendente dalla posizione dei primi due membri. [5]

### 3.3 Trasformazioni di coordinate, problemi cinematici diretto e inverso

La configurazione del robot e quindi la posa di ogni suo componente (ad es. del suo dispositivo d'estremità) può essere espressa utilizzando le coordinate dei giunti oppure un sistema cartesiano definito. L'operazione di conversione tra le coordinate che rappresentano la posa del robot in diversi sistemi di riferimento è chiamata *trasformazione di coordinate*.

Il *problema cinematico diretto* consiste nella determinazione della posa del dispositivo d'estremità nel riferimento di base (o in quello assoluto) quando siano note le coordinate ai giunti. In altre parole il problema cinematico diretto consiste nel determinare il movimento del dispositivo d'estremità quando siano noti i movimenti dei motori. Questo problema è relativamente semplice ed ha soluzione unica. Il *problema cinematico inverso* consiste invece nella determinazione delle coordinate ai giunti quando sia nota la posa del dispositivo d'estremità. Più in generale, il problema cinematico inverso consiste nel determinare il movimento da assegnare ai motori per ottenere un prefissato movimento dell'organo terminale. La risoluzione di questo problema può presentare diverse difficoltà e il numero delle soluzioni può variare. Lo stesso movimento del dispositivo d'estremità può essere ottenuto con diverse modalità di movimentazione degli attuatori. La maggior parte dei robot ha delle particolari *configurazioni* dette *singolari* nelle quali si manifestano difficoltà di movimento in alcune direzioni. Queste configurazioni sono quelle nelle quali due o più soluzioni del problema cinematico inverso coincidono. [5]

### 3.4 Programmazione

Il sistema di comando, detto anche controllore o unità di governo, è il dispositivo (o l'insieme di dispositivi) utilizzato per comandare il movimento del manipolatore (vedi Fig.3.6). Il controllore è normalmente un dispositivo elettronico a microprocessore.

Nel sistema di comando sono normalmente presenti due tipi di programmi. Il primo è il programma di comando (o di controllo) cioè l'insieme "base" delle istruzioni residente nel controllore del robot, che definisce le capacità, azioni e risposte di un sistema robotico. Questo tipo di programma è stabilmente presente nel controllore e normalmente non è modificabile dall'utilizzatore. Il programma di controllo è, in un certo senso, il sistema operativo del controllore. Ogni controllore poi può contenere uno o più programmi di compito (o programmi utente) che normalmente vengono creati dall'utente del robot per specificare il compito da svolgere. Esso contiene l'insieme delle istruzioni di movimento e di funzioni ausiliarie che devono essere eseguite.



Figura 3.6 – Unità di governo con dispositivo di comando a filo

La programmazione del compito, e cioè l'operazione di generazione del programma utente, può avvenire secondo differenti modalità. La programmazione con introduzione manuale dei dati è il modo diretto per agire sul sistema di comando del robot, mediante tastiera o altri dispositivi quali interruttori o programmatori a spine. Questo metodo di programmazione è talvolta definito programmazione in linea (on-line). La programmazione mediante addestramento (o apprendimento) consiste “nel mostrare” al robot il compito da svolgere affinché esso lo impari. Ciò si ottiene movimentando un oggetto nelle pose che si intende far raggiungere al dispositivo d'estremità e memorizzandole (ad esempio premendo un pulsante). Esistono le seguenti varianti:

- muovendo manualmente il dispositivo d'estremità del robot;
- muovendo manualmente un dispositivo meccanico di simulazione;
- muovendo l'end-effector, nello spazio dei giunti o in quello di lavoro, tramite pulsantiera;
- usando una pistola di addestramento per muovere il robot (sistema master-slave).

La programmazione esplicita è un metodo di programmazione in cui le pose del dispositivo di estremità o la traiettoria desiderata sono esplicitamente definite, ad esempio tramite sistemi CAD/CAM. È talvolta definito programmazione fuori linea (off-line). La programmazione orientata all'obiettivo consente di assegnare il compito da eseguire senza assegnare esplicitamente i movimenti del dispositivo d'estremità. Questa programmazione richiede che vengano impartiti al robot ordini di alto livello, lasciando al suo sistema di controllo il compito di scegliere le singole azioni per ottenere lo scopo richiesto. Per esempio: “assembla il pezzo A con il pezzo B” che il robot scompone nelle seguenti istruzioni: “individua la posizione del pezzo A, apri la pinza, posiziona la pinza nella posizione richiesta, chiudi la pinza, ecc.”. [5]

Nell'azienda dove è stato svolto il tirocinio i robot vengono programmati tramite apprendimento delle posizioni che deve assumere l'end-effector. I punti sono memorizzati dopo essere stati raggiunti facendo uso della console di comando, con cui l'attrezzista muove il robot a propria discrezione.

### 3.5 Tipi di automazione

L'automazione industriale è l'insieme delle tecnologie rivolte ad utilizzare sistemi (meccanici, elettronici, informatici) per il controllo e la produzione nell'industria, in modo da sostituire l'operatore umano, non solo per l'esecuzione materiale delle operazioni, ma anche per l'elaborazione intelligente delle informazioni. Può essere distinta in automazione fissa (o rigida), programmabile e flessibile. Dal punto di vista della produzione, la differenza sostanziale fra i tipi di automazione è espressa dalla Fig.3.7.

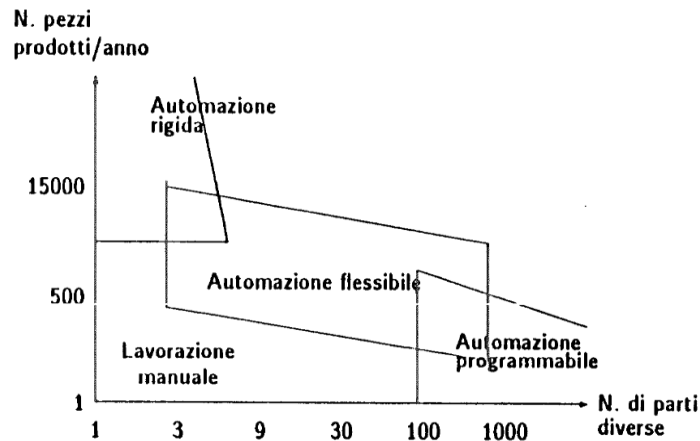


Figura 3.7 – Produzione associata ai diversi tipi di automazione [10]

### 3.5.1 Automazione fissa

Questo tipo di automazione è dedicato a lavori specifici o a limitate serie di lavori. Camme e altri meccanismi di base sono spesso usati nel controllo dei movimenti. L'automazione fissa richiede un notevole investimento iniziale e lunghi tempi di set-up. È di solito limitata a grandi volumi di produzione, di manufatti di caratteristiche costanti, per i quali può essere ottenuta un'alta capacità produttiva. L'equipaggiamento è poco flessibile e non può essere adattato in tempi rapidi a nuovi lavori o prodotti. Le linee transfer ed i torni automatici sono esempi di automazione fissa, o dedicata. Le linee automatiche in genere la sfruttano.

### 3.5.2 Automazione programmabile

Questo tipo di automazione può essere impiegata per bassi o medi volumi di produzione, di manufatti di caratteristiche variabili, in quanto l'equipaggiamento è velocemente riprogrammabile per nuovi lavori e prodotti. Essa può essere implementata attraverso il controllo di sequenze programmate, tramite timer, relè, controllori programmabili o microprocessori, oppure con il controllo numerico integrato su alcune macchine. L'automazione programmabile si applica perfettamente nella realizzazione di celle di lavoro flessibili, mediante l'uso di PLC, robot e macchine utensili a controllo numerico.

### 3.5.3 Automazione flessibile

Questa automazione è adatta a volumi di produzione variabili di manufatti diversi (FMS). Si avvale di macchinari in grado di essere utilizzati in diverse lavorazioni con modesti cambiamenti.

## 3.6 Linee automatiche

Nel layout di una linea, le macchine sono disposte secondo la sequenza delle operazioni, cosicché i pezzi scorrono da una alla successiva durante il processo di lavorazione. Sono previsti numeri elevati di particolari con la stessa sequenza di lavorazioni, e perciò l'uso delle linee automatiche è solitamente ristretto alle produzioni di massa e grande quantità. Tali linee sono usualmente associate ad alti livelli di automazione dedicata (fissa). Sono tipici tempi di produzione brevi e prevedibili, insieme a bassi livelli di *work in progress*. Come risultato, il controllo della produzione è considerevolmente semplificato. Le linee automatiche richiedono investimenti ingenti e costi alti per il progetto e lo sviluppo. Inoltre sono molto poco flessibili, ed in genere non adatte a situazioni in cui la domanda di prodotti sia variabile o vi siano frequenti modifiche di progetto degli stessi [7]. Possono essere usati robot per semplici operazioni di movimentazione, ad esempio cartesiani per la pallettizzazione.

In azienda le linee sono impiegate prevalentemente nei reparti di preparazione dei rotor e degli statori che compongono i motori elettrici, nelle operazioni di resinatura, assemblaggio, verniciatura. Un esempio in Fig.3.8.

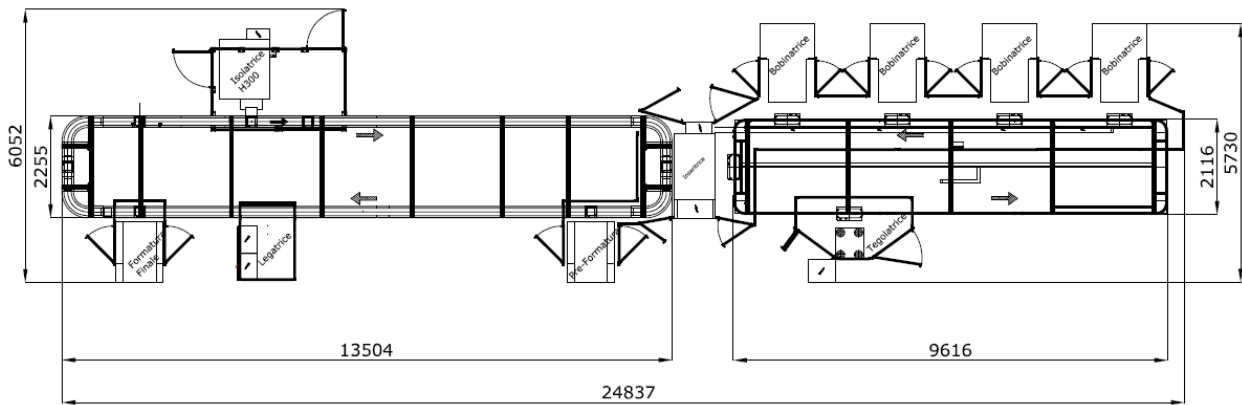


Figura 3.8 – Layout di una linea automatica di preparazione statori

### 3.7 Celle di lavoro

La forma di layout a cella (o a gruppo) può essere usata per una produzione di media entità, quando esista una distribuzione di tipi di componenti relativamente stabile. Questo è il tipico caso delle società che operano nella fabbricazione di tipi particolari di prodotti, come gli utensili per le macchine, le pompe idrauliche, ecc. Le celle di macchine (chiamate anche isole di lavoro), sono strutturate per processare famiglie di pezzi “imparentati”, che richiedono lavorazioni simili in una varietà di sequenze. Se possibile, i componenti dovrebbero essere completamente processati in una sola cella. Il layout funzionale di un’isola porta ad un miglioramento del flusso di lavoro ed a tempi di *throughput* più bassi, oltre che ad un’efficienza e un utilizzo migliori delle macchine. Il controllo della produzione è generalmente semplice ed i livelli di work in progress sono ridotti. Le Fig.3.9, 3.10 e 3.11 mostrano alcuni esempi di celle.

L’impiego ottimale di un layout a cella prevede un’elevata mobilità e flessibilità del lavoro, e normalmente in ognuna vi sono più macchine che operatori. Le macchine chiave sono a pieno carico ed ognuna richiede un operatore, ma diverse macchine secondarie possono essere usate da più persone che si spostano da una all’altra in base alle esigenze del processo. Un’estensione di questo approccio di base porta ai moderni FMS (Flexible Manufacturing Systems). Linee automatiche multi-prodotto, o gruppi di linee, possono essere usati per alcune famiglie di componenti, dove ogni membro della famiglia abbia una simile sequenza di operazioni in modo tale che possa essere utilizzato un flusso unidirezionale. Le macchine utensili general-purpose vengono usate solitamente in combinazione con nastri trasportatori e robot che sostituiscono il lavoro manuale. Spesso si impiegano bracci articolati fino a 6 gradi di libertà, che offrono una versatilità adatta alla varietà di operazioni da compiere. Un lavoro comune per i robot è il carico dei particolari grezzi nelle macchine utensili e lo scarico dei lavorati. Per un cambio di produzione è richiesto qualche resetting delle macchine, ma il vantaggio risiede nella somiglianza dei pezzi che ne mantiene bassa l’entità. [7]

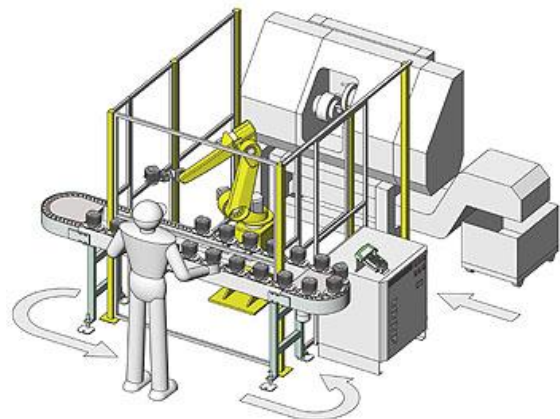


Figura 3.9 – Cella robotizzata per asservimento macchina utensile con magazzino a ricircolo di pallet [9]



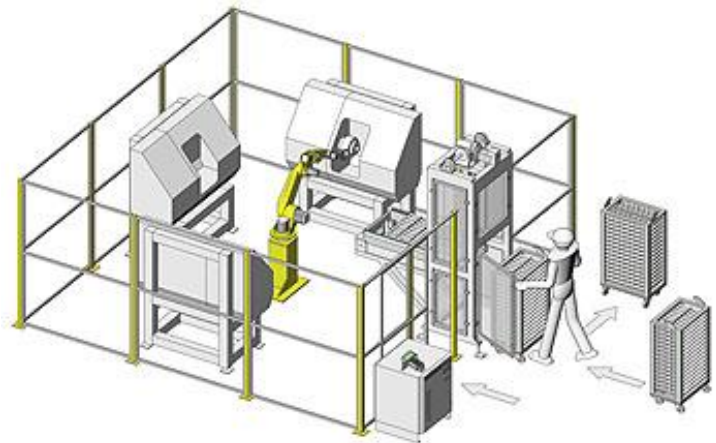


Figura 3.10 – Cella robotizzata per asservimento multiplo di macchine utensili con magazzino automatico verticale [9]

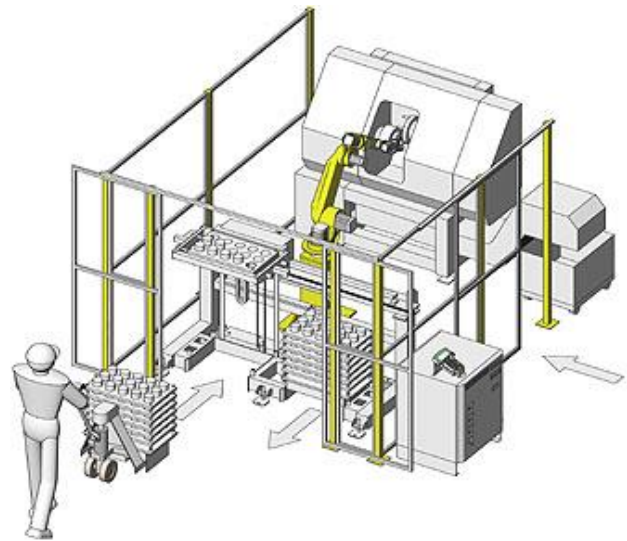


Figura 3.11 - Cella robotizzata per asservimento macchina utensile con magazzino automatico a vassoi [9]

### 3.8 Flexible manufacturing systems

Un passaggio logico dai concetti di layout di cella e di macchine utensili e robot NC è rappresentato dai sistemi multistazione di lavoro a controllo computerizzato di macchine connesse fra loro, o sistemi di produzione flessibili (FMS). Essi possono essere considerati come celle produttive di famiglie di componenti, altamente automatizzate. Le loro caratteristiche tipiche sono:

1. Stazioni di lavoro NC interconnesse operanti su una limitata gamma o famiglia di particolari. Nelle prime realizzazioni le macchine erano di costruzione modulare, mentre nei sistemi moderni sono usate per lo più macchine general-purpose NC, in particolare centri di lavoro.
2. Trasporto automatico, carico e scarico dei pezzi e degli utensili utilizzando AGV, robot, ecc.
3. Pezzi disposti su pallet per il trasporto, per sopperire in parte al problema del set-up di ogni stazione.
4. Macchine centralizzate NC o DNC, oltre a computer di controllo generale del sistema.
5. Operatività per lunghi periodi di tempo senza o con poco intervento manuale.

Negli FMS il termine “flessibilità” indica la capacità di processare una varietà di componenti senza avere la necessità di impostare le macchine o cambiare le attrezzature. Un’alta flessibilità implica che una vasta famiglia di componenti diversi può essere prodotta da un unico sistema. Esistono alcune varianti del concetto di base degli FMS, che sono le seguenti.

1. FMC (Flexible Manufacturing Cells): questi sono sostanzialmente centri di lavoro con l'aggiunta di un magazzino-pallet. Lo scopo è quello di lavorare il pezzo con un solo set-up. Questo tipo di macchina può funzionare in autonomia per lunghi periodi di tempo, con i pezzi pallettizzati trasferiti automaticamente da e verso la macchina. Le celle di lavoro flessibili devono essere servite da macchine od operatori impiegati in operazioni di preparazione e pallettizzazione esterne. Queste celle sono altamente flessibili, avendo la capacità di processare un ampio range di componenti (da 40 a 800) in piccole serie (da 15 a 500).
2. FTL (Flexible Transfer Lines): questi sistemi constano di un certo numero di macchine utensili NC o a teste intercambiabili, connesse da sistemi automatici di trasferimento del materiale. Possono essere lavorati pezzi differenti, ma senza la flessibilità nella loro movimentazione (percorso). Le famiglie di componenti sono relativamente poche (meno di 20) e i pezzi devono essere abbastanza simili all'interno di una stessa famiglia, perché la flessibilità globale è troppo bassa per accogliere una varietà maggiore. Di conseguenza i cicli di lavoro per ogni stazione devono essere attentamente bilanciati. I volumi di produzione devono inoltre essere abbastanza elevati per motivare economicamente l'uso di questi sistemi (1500 ÷ 15000 pezzi dello stesso tipo all'anno).
3. FMS (Flexible Manufacturing Systems): in questi sistemi le stazioni di lavoro NC sono collegate da un trasferimento ed una manipolazione automatica dei pezzi, con percorsi flessibili e operazioni di carico/scarico automatizzate. I tempi di lavorazione di ogni stazione possono differire considerevolmente. Il numero di componenti diversi che può essere processato varia generalmente da 10 a 150, e vengono prodotte quantità contenute, ad esempio da 15 a 500 pezzi l'anno. [7]

### 3.9 Macchine transfer

Le macchine transfer sono spesso il metodo più adatto per ottenere un flusso continuo di pezzi identici o molto simili, nella produzione di massa dei beni di consumo. Esse sono sostanzialmente sistemi special-purpose in cui i particolari lavorati vengono automaticamente trasferiti da una testa di lavorazione all'altra, chiamate in inglese *unit head machines*. Ogni testa svolge un'operazione specifica, e quando un pezzo ha attraversato per intero il sistema transfer tutte le operazioni necessarie sono state completate.

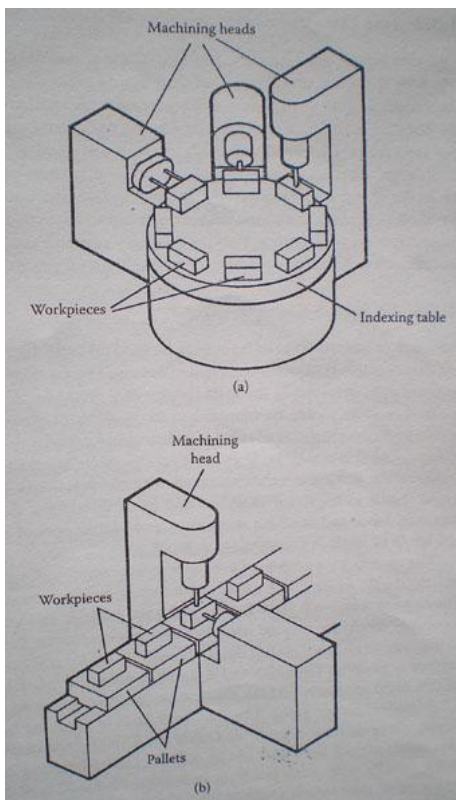


Figura 3.12 – Macchine transfer, di tipo a tavola rotante (a) ed in linea (b) [7]

Nelle macchine transfer il particolare è trasferito da una stazione alla successiva mediante o un tavolo rotante indicizzato o un nastro trasportatore (vedi Fig.3.12). In quest'ultimo caso, il pezzo è collocato su uno speciale pallet o attrezzatura, e deve essere trovato un modo per riportare i pallet vuoti all'inizio della linea, terminato il processo. Spesso viene usato un nastro in parallelo che si muove nel verso contrario, formando un circuito per i pallet.

Le macchine transfer sono spesso costruite con una tecnica modulare; i mandrini per la foratura, l'alesatura, ecc., sono oggetti standard e vengono aggiunti al sistema nelle opportune stazioni. I transfer rotanti possono solitamente ospitare al massimo 6/8 stazioni, a causa dei limiti di spazio. La dimensione di un transfer in linea può invece essere molto maggiore, e macchine di questo tipo sono utilizzate, ad esempio, per realizzare tutte le lavorazioni sul blocco motore cilindrico di certe automobili. In aggiunta alle trasformazioni meccaniche, questi sistemi incorporano anche stazioni per l'ispezione e, talvolta, per l'assemblaggio. L'asservimento può essere fatto manualmente o per mezzo di un robot antropomorfo, capace anche di inserire pezzi negli alloggiamenti di una tavola rotante. [7]

In azienda sono presenti diverse macchine transfer, fornite di tavola rotante; per la maggior parte sono servite da operatori, ma si sta progredendo verso il loro inserimento in isole robotizzate.

# 4 Controllo dei robot

Un robot è un perfetto esempio di sistema che deve essere controllato secondo i principi dell'automatica, perché è fondamentale garantire la correttezza delle posizioni assunte, delle velocità e di altre grandezze importanti nell'ambito delle funzioni da svolgere, come per esempio le forze. Sono quindi esposti alcuni concetti essenziali che si applicano ai robot industriali.

## 4.1 Controllo negli spazi dei giunti e di lavoro

Nel realizzare il sistema di controllo di un robot occorre ricordarsi delle seguenti osservazioni:

- in genere si vuole controllare il movimento del dispositivo d'estremità specificandolo nello spazio di lavoro (S), ma solitamente esso non è misurabile né può essere comandato direttamente dagli attuatori;
- gli attuatori agiscono sui giunti (Q) e solo indirettamente sull'end-effector;
- posizione e velocità degli attuatori possono essere misurate da appositi trasduttori, quelli del dispositivo d'estremità sono dedotti dalla cinematica diretta;
- gli attuatori non sono generalmente comandabili direttamente in posizione, ma solo in coppia (forza) e talvolta in velocità; comandi in velocità e posizione richiedono schemi di controllo retroazionati;
- la relazione tra movimenti dei giunti e dell'end-effector è dedotta dalla cinematica diretta e/o inversa, perciò imprecisioni di modellizzazione nonché le irregolarità e la cedevolezza delle trasmissioni influenzano negativamente la precisione del movimento. Queste ultime fonti di errore non possono essere facilmente compensate dal sistema di controllo perché sono esterne all'anello di retroazione;
- il controllore deve garantire: stabilità del sistema, reazione agli eventi esterni (forze impreviste, carichi variabili, disturbi in genere, ...), precisione di generazione del movimento.

I sistemi di controllo più semplici prevedono la risoluzione del problema cinematico inverso per calcolare le rotazioni dei motori che producono il desiderato movimento del robot; tali rotazioni richieste vengono inviate al controllo degli attuatori i quali comandano il robot nel modo voluto. Il sistema di controllo decide i parametri di regolazione degli attuatori sulla base della differenza tra il loro movimento desiderato e quello reale (misurato). Una corretta soluzione della cinematica inversa ed un buon controllo garantiscono che il robot si muova come previsto. Questo schema è detto *controllo nello spazio dei giunti*; uno schema classico appartenente a questa famiglia è riportato in Fig.4.1, ove  $S^*$  e  $Q^*$  rappresentano i valori desiderati di S e Q mentre questi ultimi sono quelli reali. Quando non è assegnata la traiettoria del movimento da eseguire, ma solo il punto da raggiungere  $S^{**}$ , è possibile operare la pianificazione del movimento dopo la cinematica inversa (Fig.4.2).

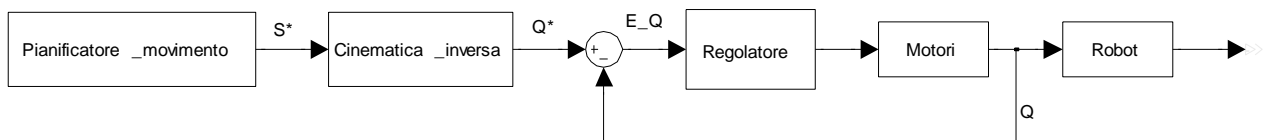


Figura 4.1 – Controllore nello spazio dei giunti per movimenti in traiettoria

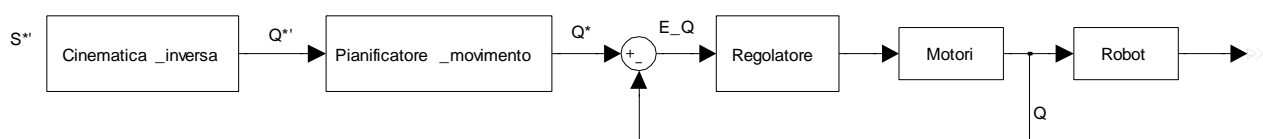


Figura 4.2 – Controllore nello spazio dei giunti per movimenti punto-punto;  $S^{**}$  e  $Q^{**}$  sono le coordinate desiderate degli estremi della traiettoria,  $S^*$  e  $Q^*$  l'intera traiettoria.

Le differenze  $E_Q = Q^* - Q$  ed  $E_S = S^* - S$  sono gli errori di posizione rispettivamente nello spazio dei giunti ed in quello di lavoro. È possibile anche realizzare schemi di *controllo nello spazio di lavoro* e cioè nei quali il controllo degli attuatori è effettuato sulla base della differenza tra le posizioni desiderata e reale del dispositivo d'estremità; questi sistemi richiederebbero la misura della posizione reale dell'end-effector (vedi Fig.4.3). Questo sistema, quando attuabile, permette di compensare gli errori della struttura cinematica del robot, cosa che non è possibile negli altri sistemi in cui l'anello di retroazione viene chiuso prima e cioè sul movimento ai giunti. Tuttavia, dato che generalmente per problemi pratici il movimento del dispositivo d'estremità S non è direttamente misurabile, esso deve essere stimato da una misura di quello dei giunti Q (Fig.4.4). Ciò rende meno utili queste modalità di controllo. Questi schemi fanno spesso uso della relazione cinematica inversa valida per piccoli spostamenti  $\Delta S \approx J\Delta Q$  da cui  $E_S \approx JE_Q$ , dove J è la matrice jacobiana (o semplicemente lo jacobiano) per passare dalle coordinate ai giunti a quelle nello spazio di lavoro.

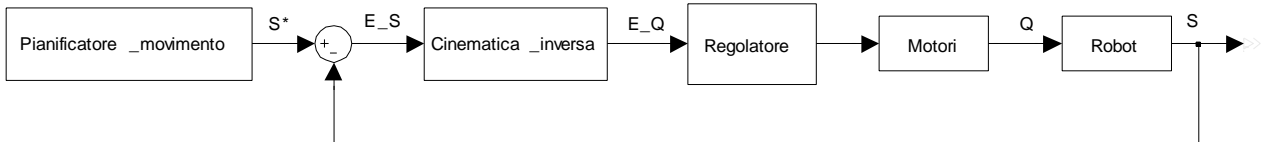


Figura 4.3 – Controllore nello spazio di lavoro (ideale)

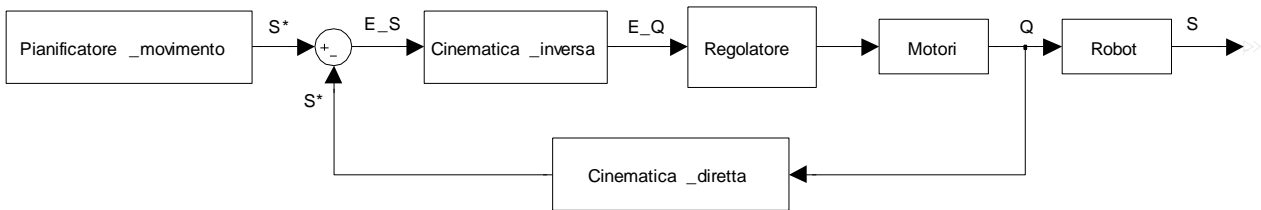


Figura 4.4 – Controllore nello spazio di lavoro (pratico)

## 4.2 Schema di controllo generale

In questo paragrafo si cerca di mettere in rilievo il ruolo dei blocchi che costituiscono un normale sistema di controllo e movimentazione di un robot, esaminando come essi influenzano la stabilità del sistema e la precisione di esecuzione delle traiettorie elaborate dai blocchi di pianificazione del movimento. È importante ricordare come la struttura degli schemi di controllo è grandemente influenzata dalla necessità di controllare il movimento della pinza avendo la possibilità di comandare solo i giunti. Si usano sempre sistemi retroazionati.

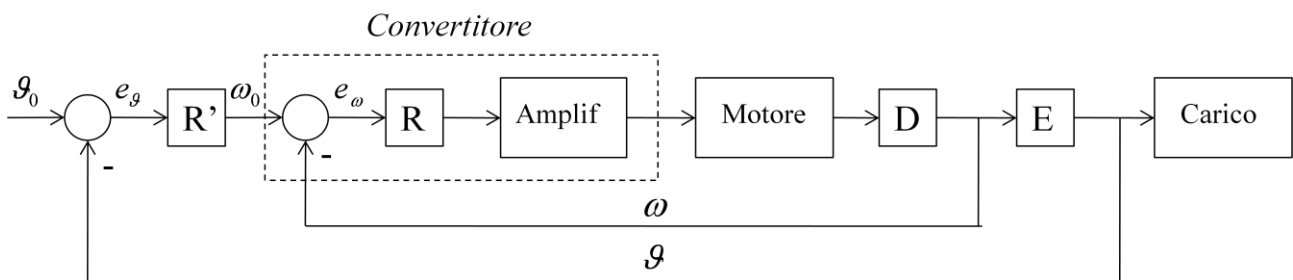


Figura 4.5 – Schema classico di controllo di un motore retro azionato in velocità e posizione

Si consideri innanzitutto il blocco classico di regolazione di un singolo grado di libertà rappresentato in Fig.4.5, dove  $\vartheta_0$  è il segnale di ingresso (moto desiderato) ed  $\vartheta$  è la posizione angolare reale del motore; D ed E sono dei trasduttori di velocità e posizione (spesso sono una dinamo tachimetrica e un encoder o un resolver). I moderni motori brushless sinusoidali sono equipaggiati con resolver e la velocità può essere stimata per derivazione numerica della posizione rendendo superflua la dinamo. Il segnale  $\vartheta_0$  viene generato da un blocco contenuto nell'unità di governo del robot eventualmente dopo aver risolto il problema cinematico inverso e applicando un algoritmo di pianificazione delle traiettorie. Il convertitore è un dispositivo elettronico che serve ad alimentare con i giusti valori di tensione e corrente il motore in modo che

esso si muova alla velocità richiesta  $\omega_0$ . Al suo interno si trova il regolatore R e l'amplificatore di potenza. Il regolatore è il blocco che decide con che parametri alimentare il motore, mentre l'amplificatore esegue gli ordini ricevuti dal regolatore. Ad esempio, nel caso comune di motori brushless, il regolatore sceglie che coppia far esercitare al motore per ridurre l'errore di velocità  $e_\omega = \omega_0 - \omega$  (differenza tra velocità richiesta e velocità reale), mentre l'amplificatore alimenta il motore con una corrente proporzionale a questa coppia. La velocità reale viene misurata da un apposito sensore, ad esempio una dinamo tachimetrica (blocco D) che fornisce una tensione proporzionale alla velocità; in altri casi il segnale di velocità viene ottenuto elaborando il segnale di posizione. Il blocco R' è invece un regolatore utilizzato per stabilizzare e regolare l'anello di posizione. R', ricevendo in ingresso la differenza tra la posizione  $\vartheta_0$  richiesta e quella effettivamente raggiunta dal motore, decide che velocità assegnargli. La differenza  $e_r$  è l'errore di posizione. La posizione reale del motore è misurata da un apposito trasduttore, ad esempio un encoder (indicato con E in Fig.4.5) o un resolver.

### 4.3 Controllo dei robot a più gradi di libertà

Nei robot reali sono presenti fenomeni non ideali che complicano il modello da studiare, quali ad esempio i momenti d'inerzia costanti e/o variabili, la forza peso, gli attriti radente e statico, l'elasticità. Questi non vengono trattati nella tesi; nel seguito sono affrontati invece altri fenomeni che interessano i robot industriali a più gradi di libertà.

#### 4.3.1 Controllo centralizzato e decentralizzato

Nei sistemi e nelle macchine dotate di più assi controllati sono possibili due strategie:

1. controllo centralizzato (Fig.4.6);
2. controllo decentralizzato (Fig.4.7).

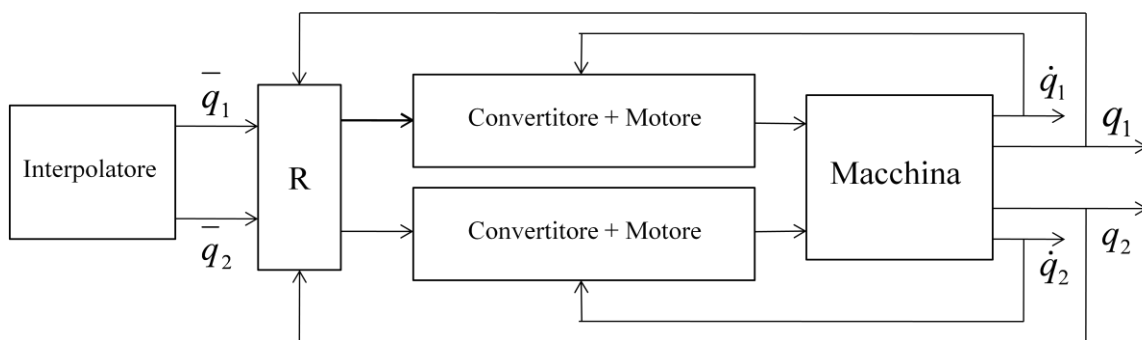


Figura 4.6 – Controllore centralizzato

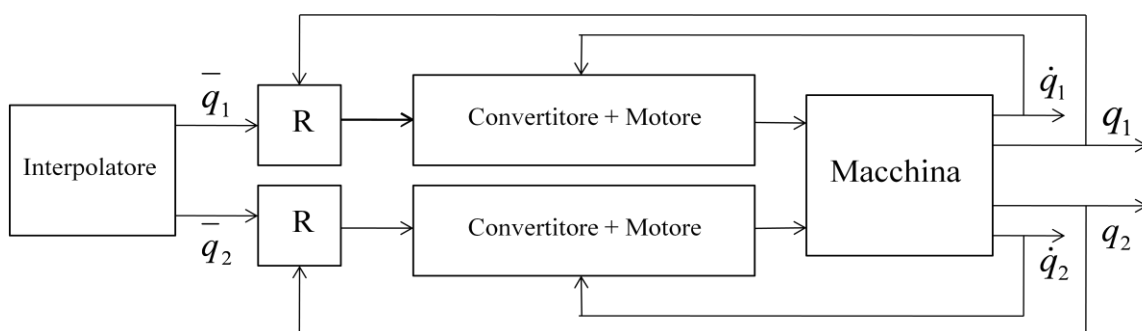


Figura 4.7 – Controllore decentralizzato



In entrambi i casi un sistema di elaborazione di tipo digitale confronta il movimento richiesto ai motori ed elaborato dal blocco “interpolatore”, misura il movimento effettivo tramite sensori di posizione e/o velocità e fornisce i riferimenti di velocità e/o coppia ai convertitori dei motori. L’elaborazione è svolta da una routine di calcolo richiamata ciclicamente con tempo prefissato (ad es. 0,001 s). Nel primo caso un unico regolatore, lineare o non lineare, controlla contemporaneamente i due motori; nel secondo i due assi vengono controllati separatamente come fossero completamente indipendenti l’uno dall’altro. La seconda soluzione è spesso sufficiente a ottenere buoni risultati. Tuttavia, quando una macchina è dotata di più assi, è buona norma trattarli insieme in modo da avere, approssimativamente, la stessa funzione di trasferimento. Come esempio si consideri un robot cartesiano in cui siano controllati i movimenti X ed Y con due assi indipendenti. Se i due assi hanno la stessa funzione di trasferimento, e si comanda un movimento lineare a velocità costante, la posizione reale si trova in ritardo di una distanza

$$e \cong \tau v \quad (4.1)$$

dove  $\tau$  è l’inverso della banda passante e  $v$  è la velocità, ma verrà percorsa esattamente la traiettoria lineare richiesta (vedi Fig.4.8). Se invece un asse è “più pronto” di un altro, cioè ha banda passante più elevata, può succedere la situazione di Fig.4.9 ove con  $\tau_x < \tau_y$  l’utensile deborda dalla traiettoria prevista. Conviene pertanto tarare i vari assi in modo che abbiano le stesse prestazioni. Se gli assi sono identici, sarà sufficiente porre i guadagni dei regolatori agli stessi valori.

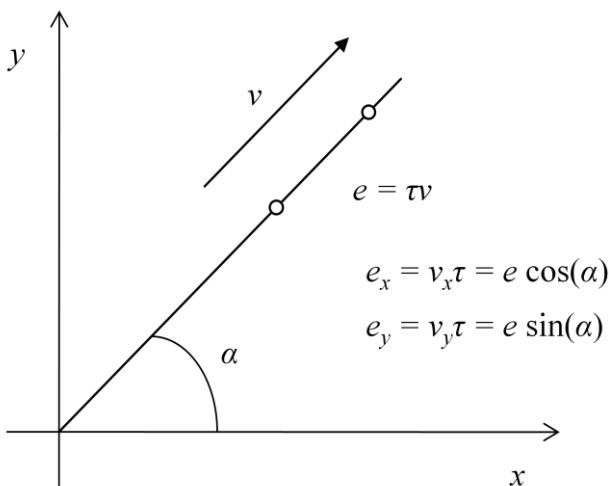


Figura 4.8 – Errore su traiettoria lineare di un robot cartesiano quando gli assi hanno la stessa funzione di trasferimento

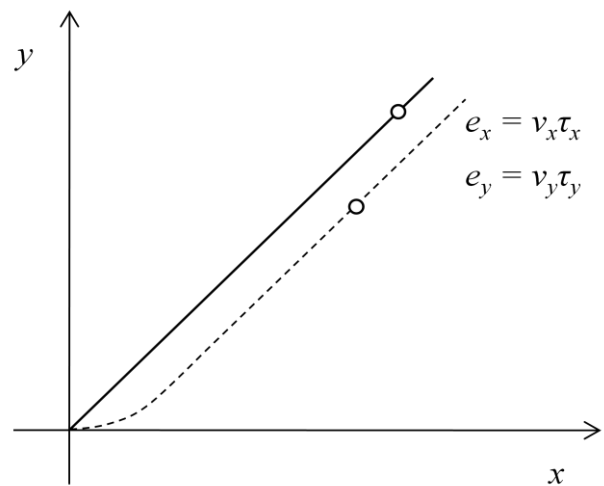


Figura 3.9 – Errore su traiettoria lineare di un robot cartesiano con l'asse X più pronto dell'asse Y ( $e_x < e_y$ )

### 4.3.2 Effetti dinamici mutui tra links

Ogni movimento, anche di un solo motore, richiede in generale azioni motrici non nulle anche sugli altri assi. Pertanto le movimentazioni dei vari assi di un robot non sono tra loro indipendenti. Si considera l’esempio del robot SCARA (Fig.4.10), e le azioni d’inerzia che nascono durante il movimento; nelle Fig.4.11 e 4.12 sono indicate quelle generate nel caso in cui si muovimenti soltanto il primo o il secondo motore. Da un semplice equilibrio alla rotazione si può dedurre che, in entrambi i casi, anche il motore che non si muove deve produrre una coppia  $C$  per mantenere la sua posizione angolare. Se si considera il movimento contemporaneo di  $\alpha$  e di  $\beta$ , compaiono ulteriori termini; in generale per un robot si ha  $C = M\ddot{\theta} - C(\dot{\theta})$ , che nel caso dello SCARA, per  $m = 0$  e  $J = 0$ , diventa

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_2 g_2 h (\dot{\beta}^2 + 2\dot{\alpha}\dot{\beta}) \\ m_2 g_2 \dot{\alpha}^2 h \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

dove

$$h = l_1 \sin \beta \quad e \quad \begin{cases} J_{11} = m_1 g_1^2 + m_2 (l_1^2 + g_2^2 + 2l_1 g_2 \cos \beta) + J_{G1} + J_{G2} \\ J_{12} = J_{21} = m_2 g_2 (g_2 + l_1 \cos \beta) + J_{G2} \\ J_{22} = J_{G2} + m_2 g_2^2 \end{cases}$$

Quindi, anche se un membro del robot deve restare fermo mentre gli altri si muovono, il suo motore deve generare comunque una coppia, e in ogni caso quella che deve fornire ciascun motore non è semplicemente del tipo  $J\ddot{\theta}$ . In generale i movimenti dei vari gradi di libertà si influenzano reciprocamente. Ciò può essere rappresentato attraverso il diagramma di Fig.4.13, ove la parte di controllo di ogni link è lineare e assume per ognuno di operare su di un elemento di momento d'inerzia costante  $J_{ii}$  (elemento diagonale della matrice  $J$ ). Tutti gli altri termini sono considerati disturbi. È importante osservare che le coppie di disturbo si verificano solo durante il moto del robot e non durante le soste, perciò non provocano errori di posizionamento finale. Opportune scelte dei regolatori R ed R' riducono l'effetto di generiche coppie resistenti e quindi anche di queste. Il modo più semplice, anche se teoricamente imperfetto, per ridurre il loro effetto è quello di progettare un regolatore con basso guadagno delle funzioni di trasferimento che legano posizioni e velocità alle coppie. Altri metodi più raffinati, ma anche più onerosi, vengono presentati nel prossimo paragrafo.

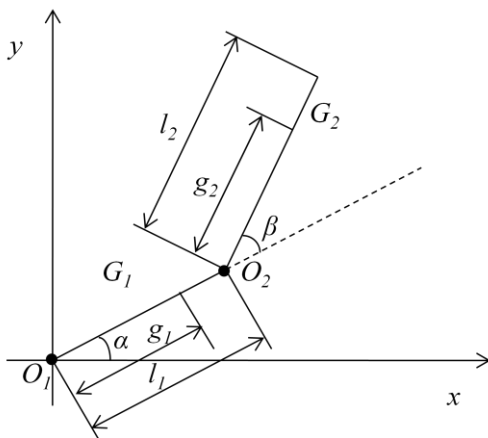


Figura 4.10 – Definizione dei parametri per un modello dinamico di robot SCARA

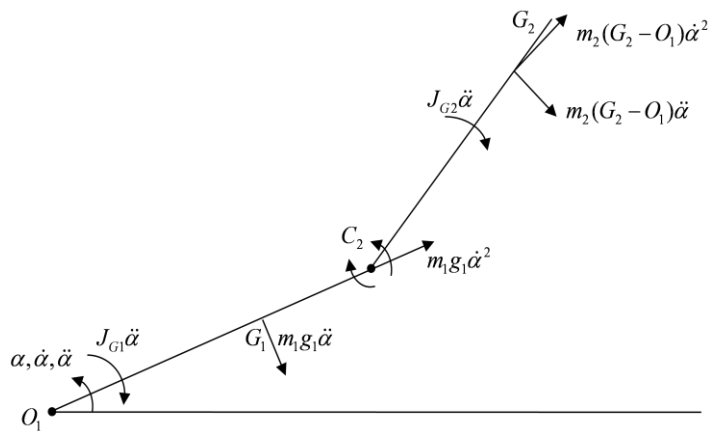


Figura 4.11 – Azioni dinamiche dovute al movimento del solo primo motore

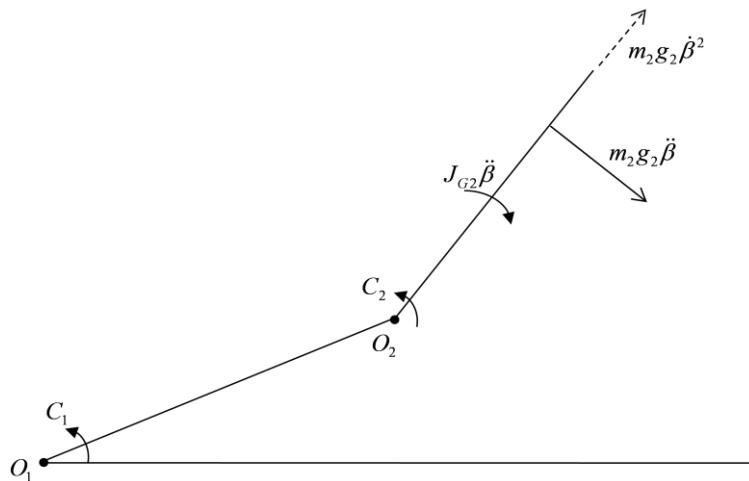


Figura 4.12 – Azioni dinamiche dovute al movimento del solo secondo motore

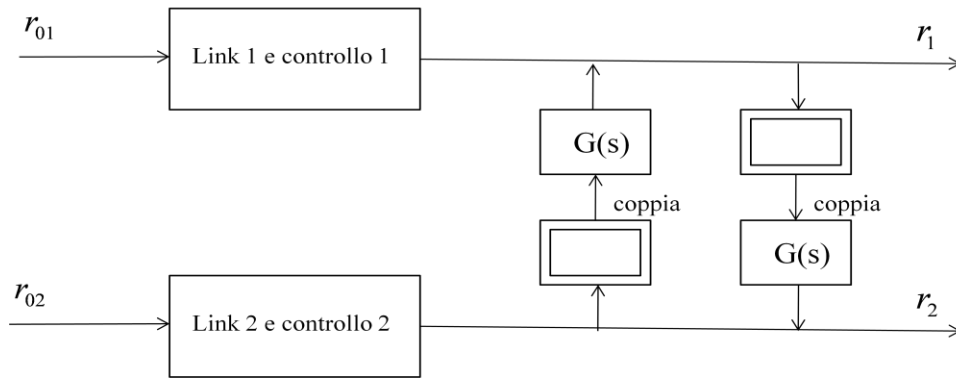


Figura 4.13 – Effetto mutuo tra diversi gradi di libertà: il movimento di un motore provoca effetti dinamici anche sugli altri.

### 4.3.3 Compensazione degli effetti mutui: controlli a dinamica inversa e a coppia precalcolata

Qualora si disponga di un buon modello dinamico del robot è possibile eliminare l'effetto delle “coppie mutue di disturbo” tra motori riducendo così l'errore di inseguimento, cioè la differenza tra movimento richiesto e ottenuto. Se il modello consente di prevedere la coppia richiesta dal motore si può adottare uno schema di controllo centralizzato analogo a quello di Fig.4.14 (controllo a dinamica inversa) ove  $M$  è la massa equivalente del sistema,  $V$  è una stima delle coppie dovute alle accelerazioni centrifughe e di Coriolis,  $G$  è una stima delle forze esterne (compresa la forza peso),  $Q = [\vartheta_1, \dots, \vartheta_i, \dots]^T$  è il vettore delle variabili da controllare (posizioni). Un sistema simile, detto a coppia precalcolata, che spesso consente di ottenere prestazioni migliori, è riportato in Fig.4.15. In base alle conoscenze del sistema si costruisce un blocco non lineare (indicato con NL) in grado di prevedere, almeno approssimativamente, la coppia necessaria ad azionare il robot affinché esegua il compito desiderato (ovvero NL riproduce il modello dinamico inverso del robot).

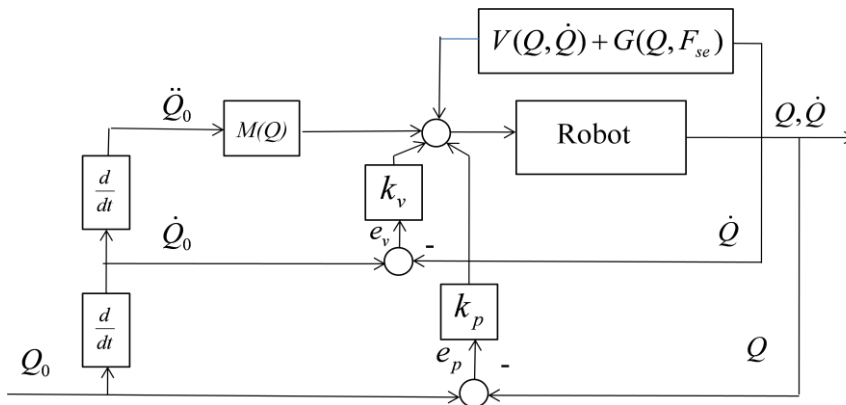


Figura 4.14 – Schema di controllo a dinamica inversa

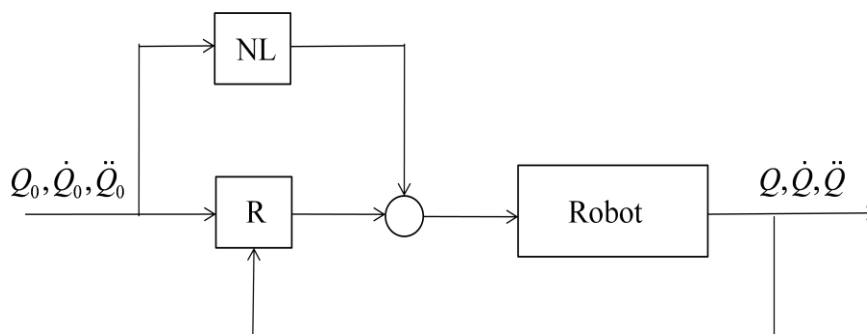


Figura 4.15 – Schema di controllo a coppia precalcolata



Un regolatore lineare R (tipicamente di tipo PID), ovvero una retroazione di posizione e velocità (tramite le costanti  $k_p$  e  $k_v$ ) nello schema a dinamica inversa compensa le inevitabili imprecisioni del modello e i disturbi esterni. In genere lo schema a coppia precalcolata funziona meglio di quello a dinamica inversa perché, applicando il modello a posizioni, velocità e accelerazioni teoriche e non a quelle misurate, è meno soggetto al rumore. Entrambe le metodologie possono comunque essere utilizzate solo se si ha a disposizione un controllore sufficientemente potente dal punto di vista computazionale, problema sempre meno sentito con il passare degli anni ed il miglioramento delle tecnologie per la costruzione dei microprocessori. Inoltre, quando non si disponga di un modello sufficientemente preciso, il miglioramento delle prestazioni è scarso e non giustifica l'onere di implementazione. Per ottenere valori attendibili dei parametri del sistema è spesso necessario effettuare esperimenti: ad esempio, il robot viene fatto muovere su traiettorie predefinite e si stima la coppia esercitata tramite una misura della corrente assorbita. Si riescono quindi a stimare i parametri dinamici (masse, inerzie, attriti) da utilizzarsi per movimentazioni successive. Per semplificare il calcolo è talvolta utile evidenziare gli effetti più rilevanti ed accontentarsi di compensare questi.

## 4.4 Controllo nello spazio di lavoro

Usando come variabili di controllo le coordinate ai giunti  $Q$ , si riescono a valutare gli errori ai giunti ma non si possono avere informazioni immediate sulla posizione dell'organo terminale nello spazio di lavoro e sui suoi errori di traiettoria e/o posizione. Quando sia necessaria una più stretta sorveglianza è indispensabile agire nello spazio di lavoro. In sostanza il modello finora di riferimento è quello riportato in Fig.4.16, in cui si sono indicate con  $S$  le coordinate dell'end-effector nello spazio di lavoro e nel blocco denominato "robot" sono contenuti anche gli attuatori con la relativa elettronica di comando. Seguendo questo schema, il controllore risolve, a istanti di tempo campionati con un opportuno intervallo, il problema cinematico inverso e confronta per ogni istante la posizione reale del robot tramite le coordinate ai giunti per controllare opportunamente i motori.

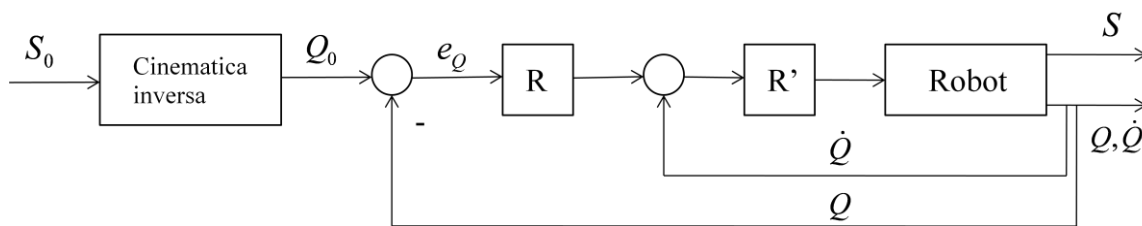


Figura 4.16 – Robot industriale: schema classico di controllo nello spazio dei giunti

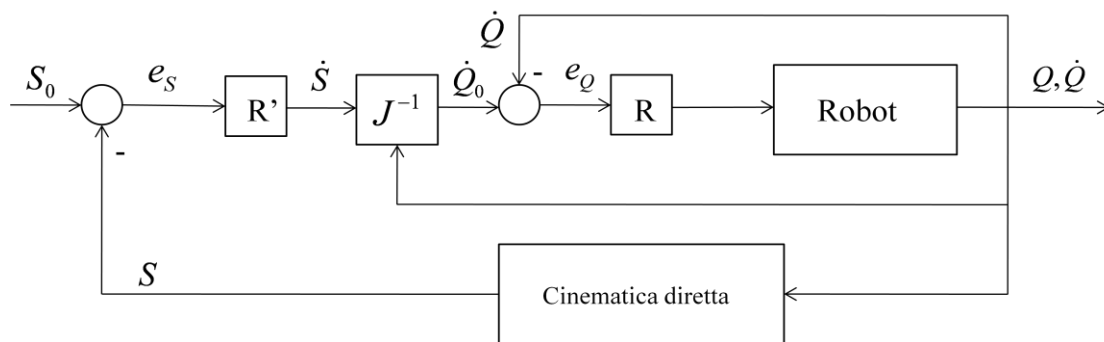


Figura 4.17 – Robot industriale: schema di controllo nello spazio di lavoro

Un modo per tenere meglio sotto controllo l'errore  $E(s) = S - S_0$  sulle coordinate della pinza è quello di chiudere i loop di controllo direttamente sulle coordinate nello spazio di lavoro. Ad esempio si può ottenere lo schema di Fig.4.17 (si ricorda che vale la relazione  $\dot{S} = J\dot{Q}$ ). Il blocco regolatore R, in base all'errore  $e_s$ , decide quale velocità dare al robot; tramite lo jacobiano inverso, si calcola la velocità da assegnare ai vari motori che sono retroazionati in velocità. In confronto allo schema di controllo nello spazio dei giunti, non è più presente il blocco della cinematica inversa (esterno all'anello di regolazione), ma si rende necessario un blocco che risolva la cinematica diretta. Questo deve essere implementato all'interno della retroazione di

posizione. Inoltre è necessario calcolare ed invertire lo jacobiano; questa operazione può essere gravosa in prossimità delle configurazioni singolari. Altri schemi utilizzano lo jacobiano trasposto. Dato che queste operazioni vanno ripetute parecchie volte al secondo, è necessario avere un controllore sufficientemente veloce. Il blocco di risoluzione del problema diretto potrebbe essere eliminato se fosse possibile avere dei sensori che misurano la posizione della pinza nello spazio di lavoro; ciò garantirebbe altresì un'accuratezza maggiore. Questo però non è solitamente possibile perché non esistono strumentazioni di misura, di utilizzo generale, con prestazioni e prezzi accettabili.

## 4.5 Controllo di forza

Nei paragrafi precedenti sono stati considerati gli azionamenti di controllo in posizione e velocità, che sono quelli di gran lunga più utilizzati in tutti i casi frequenti in cui si vuole che il dispositivo d'estremità percorra traiettorie predefinite. Esistono tuttavia delle situazioni in cui una simile strategia non è adeguata perché al robot non è richiesto di muoversi su una traiettoria stabilita o con una specifica velocità, ma di esercitare una determinata forza sull'ambiente esterno. In questi casi il robot deve essere equipaggiato con un *controllore di forza*. Esempi di applicazione di questi controllori sono i casi in cui è necessario, per esempio, mantenere un oggetto premuto con una certa pressione su una superficie mentre (eventualmente) i due pezzi si muovono di moto relativo in una direzione normale alla forza esercitata. Se si utilizza un normale controllo di posizione, per esercitare con precisione la forza desiderata sarebbe necessario conoscere l'esatta geometria delle parti in gioco nonché l'esatto valore di tutti i parametri elastici. Dopodiché con complicati calcoli si potrebbe determinare come muovere la pinza per eseguire la lavorazione richiesta. È evidente che un piccolo errore in un qualsiasi passo di questa procedura potrebbe far fallire completamente l'operazione. Molto più comoda sarebbe la possibilità di impartire al robot l'ordine di esercitare una certa forza ottenendo come risultato il movimento necessario. Diverse applicazioni riguardano operazioni di montaggio nelle quali il robot potrebbe riconoscere e compensare con opportuni movimenti le eventuali interferenze tra oggetti dovute a errori geometrici o ad impreciso posizionamento degli oggetti stessi. Ci si limiterà ad illustrare soltanto i concetti fondamentali. Il discorso è infatti complesso e tuttora oggetto di ricerca, e controllori di forza sono presenti solo nei robot più sofisticati.

Si osserva innanzitutto che, come è intuitivo, se si controlla la forza non è possibile fare altrettanto con il movimento nella stessa direzione. Infatti, se si impone al robot di eseguire incondizionatamente un certo movimento, la forza da esercitare sarà quella necessaria a vincere eventuali ostacoli incontrati. Analogamente, se gli si chiede di esercitare una forza in una certa direzione, il suo spostamento dipenderà dalla rigidità e dalla robustezza di eventuali ostacoli. Più in generale, si può controllare: il movimento, una forza o una loro funzione. In quest'ultimo caso si parla anche di *controllo di impedenza*. Le tre situazioni possono essere rappresentate nel modo seguente:

$$\begin{cases} v = \bar{v} \\ F = ? \end{cases} \quad \text{oppure} \quad \begin{cases} v = ? \\ F = \bar{F} \end{cases} \quad \text{oppure} \quad f(v, F) = 0$$

dove con  $v$  si è indicata la velocità del robot nella direzione della forza  $F$ . In generale la forza può anche dipendere da altri fattori, tra cui la posizione, e possono essere presenti effetti dinamici e di isteresi.

Si consideri, come esempio, la situazione in cui un robot, schematizzato con una parte rigida ed una elastica, deve esercitare su un certo oggetto (ambiente) una forza  $\vec{F}$ . Sia  $\vec{v}$  la velocità dell'estremo rigido del robot. Si possono avere due casi:

- 1) non c'è contatto tra robot ed ambiente:

$$\begin{cases} v_p = v \\ F_p = 0 \end{cases}$$

La forza esercitata dal robot è nulla, ma può essere imposto il moto che si vuole alla pinza;

- 2) c'è contatto. In tal caso robot e ambiente si deformano di quantità  $\Delta l$  dipendenti dalle rigidità  $k_p$  e  $k_a$  di robot e ambiente:

$$F_a = k_a \Delta l_a; \quad F_p = k_p \Delta l_p; \quad F_a = F_p;$$

da cui si può ottenere

$$\Delta l_p = \frac{k_a}{k_p} \Delta l_a$$

Siccome le due molle sono in serie, ponendo

$$k = \frac{k_p k_a}{k_p + k_a}$$

si ottiene

$$\begin{cases} F = \Delta(l_a + l_p)k \\ v_p = v \frac{k_p}{k_a + k_p} \end{cases}$$

La forza esercitata dal robot è funzione del suo moto (posizione P del punto di contatto pinza-ambiente) dipendendo dal termine  $\Delta(l_a + l_p)$ . Qualora siano presenti anche effetti viscosi la forza potrebbe dipendere anche dalla velocità. Si osserva quindi che non si possono controllare liberamente movimento e forza nella stessa direzione, ma in generale ci sarà una relazione tra i due.

Diversamente, considerando due direzioni ortogonali, è certamente possibile controllare il robot in forza in una di esse ed in spostamento nell'altra.

### 4.5.1 Controllore di forza

Un possibile schema di controllore di forza è riportato in Fig.4.18, che fa riferimento ad un semplice esempio in cui un motore trasmette il moto ad un'asta tramite un apposito accoppiamento (ad es. pignone-cremagliera). L'asta deve esercitare una prefissata forza sull'ambiente esterno. Su di essa è presente un trasduttore che misura la forza realmente esercitata. Nel sistema vi è un controllore di velocità convenzionale, oltre ad uno per regolare la forza.  $F_0$  rappresenta la forza che si vuole esercitare. Qualora  $F_0$  sia superiore ad  $F$  (forza reale), il motore spinge l'asta nel senso delle  $x$  crescenti. Questa azione fa crescere  $F$  fino a renderla uguale ad  $F_0$ , dopodiché il motore viene arrestato. Per  $F_0 < F$  accade l'opposto. Il regolatore  $R(s)$  provvede a stabilizzare il sistema.

Nonostante l'apparente semplicità non è facile realizzare buoni controllori di forza da utilizzarsi in situazioni ove sia richiesta grande accuratezza, poiché potrebbero presentarsi sovraelongazioni di posizione o instabilità talvolta pericolose. Fattori che possono influenzare notevolmente il comportamento del robot sono la rigidità e la massa dei corpi con i quali entra in contatto. Inoltre il robot "vede" un sistema molto diverso a seconda che l'end-effector sia o meno a contatto con qualche corpo presente nell'ambiente esterno. In particolare, la rigidità nella direzione positiva del contatto può essere molto maggiore che nelle direzione opposta. Queste asimmetrie e possibili rapide variazioni di situazioni, oltre a richiedere controllori con elevate bande passanti, rendono difficile la taratura dei regolatori a causa del possibile innesco di vibrazioni e/o sovraelongazioni.

### 4.5.2 Controllore di impedenza

Può essere necessario utilizzare un sistema meccanico affinché esso simuli il comportamento di una molla o di uno smorzatore nell'intorno di una determinata posizione  $\vartheta_0$ . La Fig.4.19 illustra un possibile schema di controllo d'impedenza. Nell'ipotesi che si abbia  $\vartheta/\vartheta_0 = 1$  si può scrivere la relazione

$$X = \vartheta r = R(s)(X_0 - AF) \Rightarrow F = \frac{RX_0 - X}{RA} = \frac{X_1 - X/R}{A}$$

Per cui se  $R(s) \approx 1$  e per  $A = 1/k$  il sistema si comporta come una molla di costante elastica  $k$ . Per  $R(s) \approx 1$  ed  $A = 1/(s\lambda)$  si ottiene invece

$$F = \lambda s(X_0 - X) \Rightarrow F = \lambda(\dot{X}_0 - \dot{X})$$

ovvero per  $x_0$  costante la forza risulta proporzionale alla velocità e quindi viene simulato uno smorzatore viscoso. Opportune scelte di  $R(s)$  e  $A(s)$  permettono di simulare diversi tipi di impedenza.

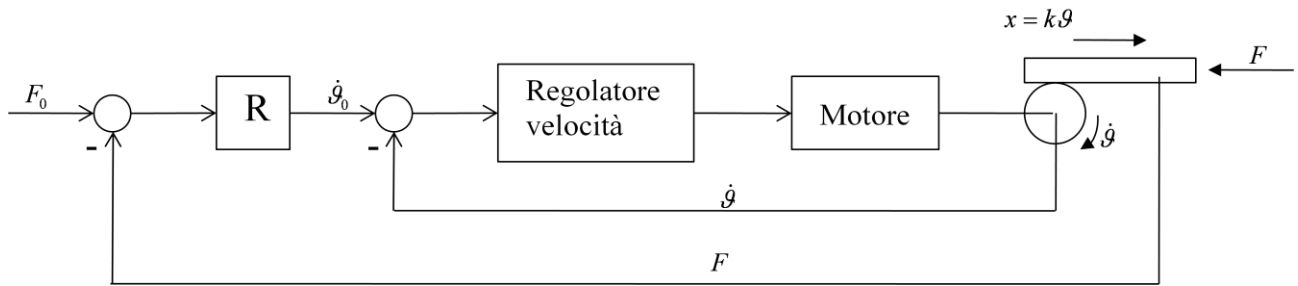


Figura 4.18 – Schema di controllo di forza

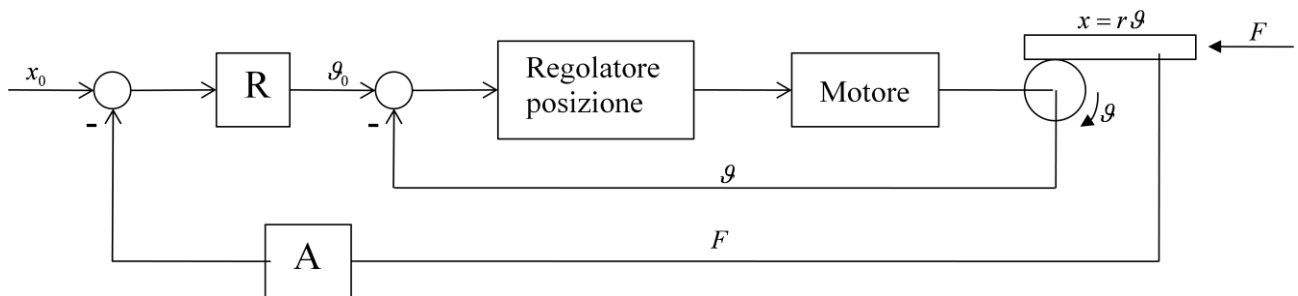


Figura 4.19 – Schema di controllo di impedenza

### 4.5.3 Misure di forza o coppia

Per controllare l'intensità della forza esercitata dall'organo terminale del robot è necessario rilevarla tramite sensori che possono essere posizionati:

- ai giunti*: in tal caso rilevano anche l'effetto dei pesi e delle inerzie;
- sull'end-effector*: la misura di forza risulta più precisa perché è effettuata nel punto in cui essa viene esercitata;
- sulle "dita" di presa del robot*: quando si rende necessario che le griffe si chiudano opportunamente per realizzare una certa pressione e afferrare degli oggetti.

Nel caso a) le forze vengono talvolta misurate indirettamente tramite la misura della corrente assorbita dal motore. Tuttavia, quando è necessaria una misura accurata delle forze scambiate con l'ambiente, si opera normalmente per via indiretta a partire dalle deformazioni causate sugli oggetti. Ad esempio, nei casi b) e c), per misurare le deformazioni di alcuni organi del robot, si possono usare estensimetri nei quali si verifica una variazione della resistenza elettrica.

[5]

## 5 Robotizzazione di una cella

Venendo all'argomento centrale di questo lavoro, l'azienda ha ritenuto vantaggioso costruire, attorno ad una macchina utensile (Fig.5.1), un'isola o cella di lavoro pressoché indipendente, sostituendo l'operatore che vi lavorava con un robot antropomorfo, e creando un ambiente ad esso funzionale e protetto, per la tutela delle persone. È emersa dunque l'esigenza di uno studio approfondito del problema, volto ad analizzare le caratteristiche tecniche e di processo per effettuare una serie di scelte operative e di dimensionamenti. In parallelo, l'applicazione del metodo SMED ha portato ottimi risultati nell'ottica del miglioramento. Al completamento del lavoro c'è stata la redazione di documenti essenziali per l'isola, quali il Fascicolo tecnico ed il Manuale d'uso e manutenzione.



Figura 5.1 – Macchina transfer e lavatrice prima della robotizzazione

### 5.1 Descrizione del problema

La macchina da asservire è un cosiddetto *transfer*, cioè ha la peculiarità di disporre di diverse stazioni, dalle quali i pezzi passano a rotazione per subire una successione ben definita di lavorazioni meccaniche (vedi Fig.5.2). I particolari processati sono corpi-pompa centrifuga in ghisa, di tre possibili grandezze. Il transfer è costituito essenzialmente da una tavola rotante a cinque lati, su ciascuno dei quali sono fissati, durante la lavorazione, due corpi, dello stesso tipo ma orientati in modo diverso. In corrispondenza di ognuno dei quattro lati operativi, vi sono una o due unità utensili, per un totale di sette piccole macchine che svolgono le differenti operazioni. La stazione frontale è dedicata al cambio dei pezzi, i quali sono lavorati in due fasi distinte in base alla posizione (sinistra/destra) dove vengono collocati. Le unità sono fisse, e ripetono ciclicamente la propria lavorazione sui pezzi che si presentano ad ogni passo di rotazione della tavola.

La macchina esegue completamente le operazioni di foratura, lamatura, maschiatura, fresatura, alesatura di sgrossatura e finitura lato accoppiamento, secondo lo schema in Fig.5.6. La tavola ruota in senso orario con una velocità di 108°/s. Agli utensili di ciascuna delle 7 unità è impresso il moto rotatorio attraverso altrettanti motori elettrici, per una potenza totale installata di 47,8 kW. Le unità operatrici scorrono lungo l'asse di rotazione del relativo motore, su apposite guide. I morsetti tengono i pezzi grazie all'apertura/chiusura automatica di tre griffe; sono inoltre provvisti di appendici specifiche per ogni tipo di corpo, capaci di fare la giusta presa sulla parte esterna del corpo o, se invece le griffe aprono, sulla voluta interna. Tutti questi blocchetti dedicati sono da sostituire in fase di attrezzaggio.

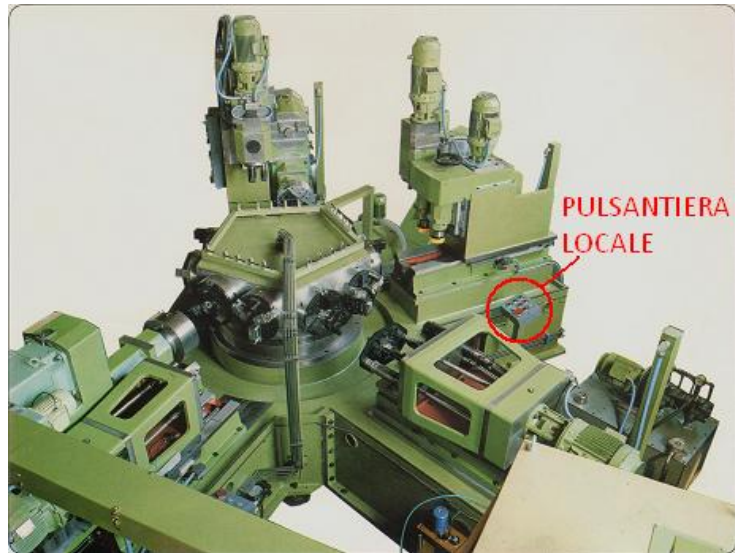


Figura 5.2 – Macchina transfer da asservire, spoglia dei ripari

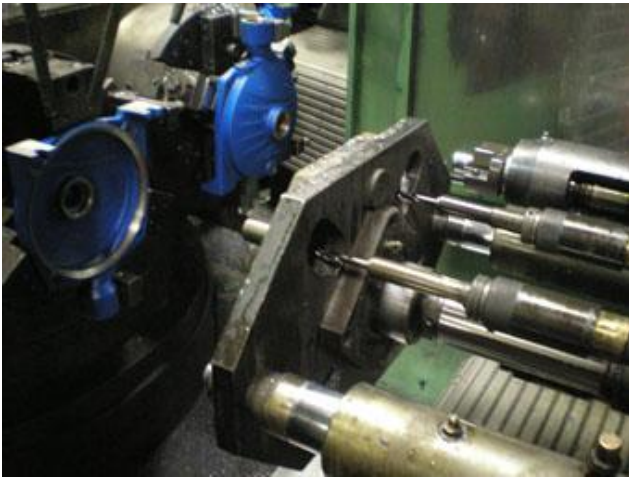


Figura 5.3 – Unità di foratura e barenatura

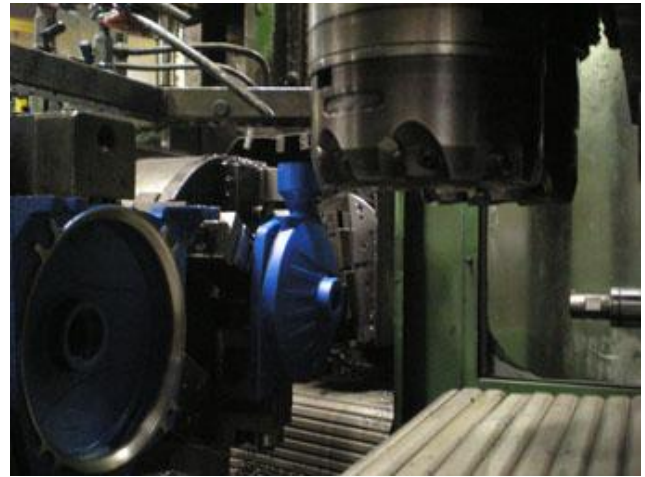


Figura 5.4 – Unità di fresatura

Il funzionamento del transfer è gestito da un processore dedicato all'applicazione in esame; a sinistra della stazione frontale è posto il pannello di controllo, che mostra lo stato delle unità, dei segnali di allarme ed i tempi delle soste. Tramite touch-screen si possono cambiare le impostazioni, mentre una serie di pulsanti e selettori presiede al funzionamento di tavola, mandrini, sistemi di lubrificazione e quant'altro, governando così il ciclo di lavoro. Il lavaggio dei pezzi lavorati è eseguito da una macchina monostadio, tramite un unico ciclo di fosfatazione. La lavatrice (Fig.5.5) dispone di una tavola rotante a sei posizioni: cinque sono chiuse, per il processo, mentre una è aperta per il carico/scarico.



Figura 5.5 – Lavatrice a tavola rotante



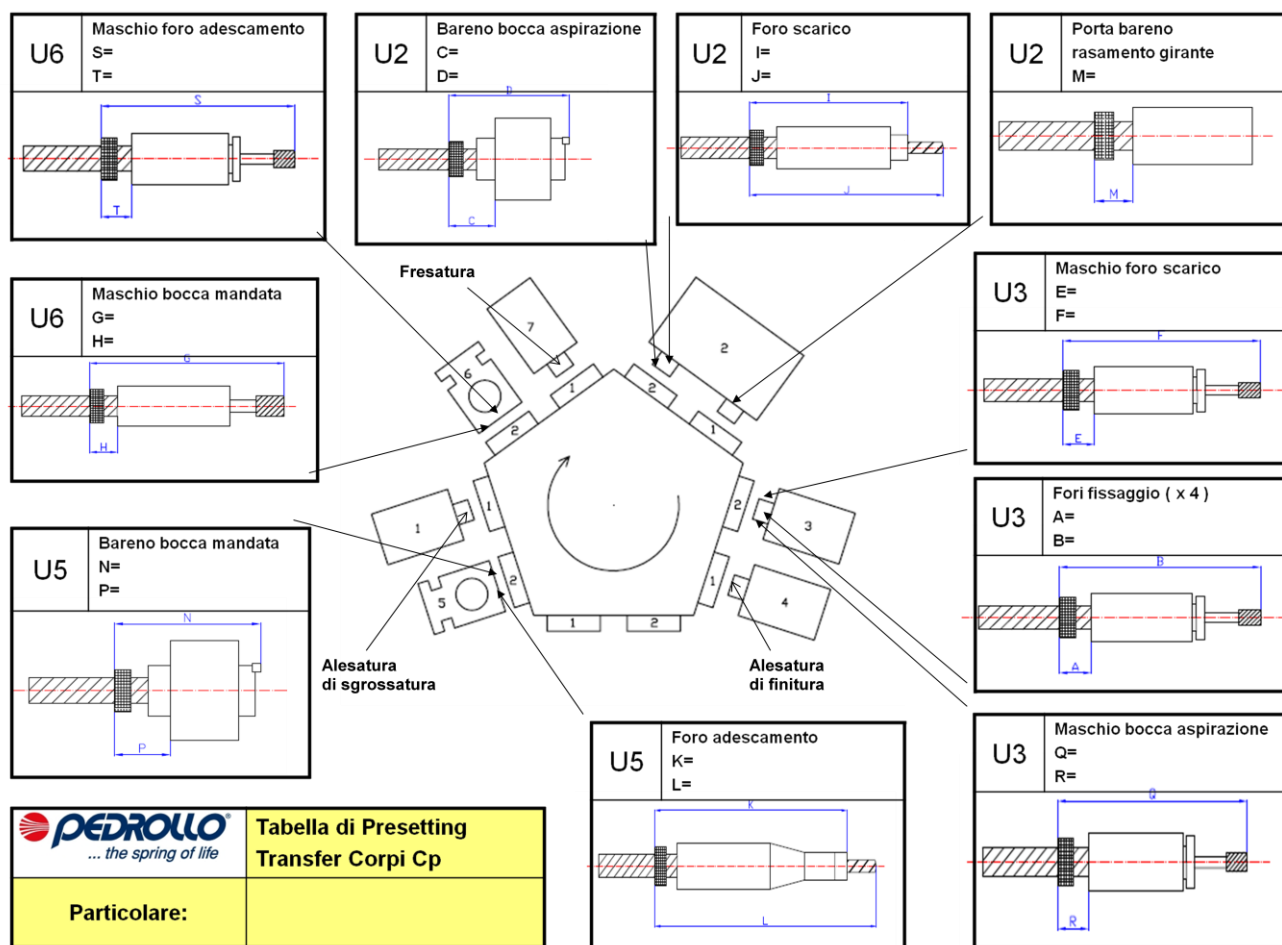


Figura 5.6 – Schema sintetico delle unità utensili

Il compito dell'operatore consisteva nel togliere i pezzi lavorati dal transfer e metterli nella lavatrice, inserire i nuovi e controllare il prodotto finale dopo la fase di lavaggio. Inoltre, con una frequenza oraria prestabilita, doveva effettuare delle misure sui corpi finiti per verificare che rispettassero le specifiche di progetto. Il carico/scarico veniva svolto manualmente servendosi di due cassoni posti a terra. Questo modo di funzionamento, sebbene molto semplice, presenta alcuni svantaggi:

- il processo produttivo è vincolato alla presenza dell'operatore (costo fisso);
- l'operatore è impegnato per circa la metà del *tempo ciclo* della lavorazione;
- l'operatore è soggetto ad affaticamento, alla necessità di allontanamento dalla macchina o addirittura può non essere disponibile;
- i cambi di produzione non sono eseguiti in maniera metodica e ben organizzata, comportando dei tempi di fermo-macchina eccessivi;
- il lavoro umano è fisicamente faticoso e logorante.

Come conseguenza si ha una considerevole perdita di efficienza, espressa dalla seguente Tab.5.1 (1 turno = 7,5 ore).

Tabella 5.1 – Produzioni teoriche e a consuntivo del transfer nella situazione originale

	Pezzo A	Pezzo B	Pezzo C
Pezzi/turno (consuntivo)	300	350	260
Pezzi/turno (teorico)	375	400	357
Perdita efficienza	20%	14%	27%
Tempo ciclo	1' 30''	1' 17''	1' 44''

Volendo quantificare il solo costo dell'operatore (26 €/ora), e tenendo conto che la produzione dell'ultimo anno è stata di 103.070 pezzi di tipo A, 22.000 pezzi B e 22.880 pezzi C, si parla di una spesa annua di circa

96.400 €, di cui metà corrisponde al periodo di inattività. È sembrata allora fondata l'idea di automatizzare il lavoro, e si è iniziato a fare delle considerazioni progettuali.

## 5.2 Scelte di progetto

### 5.2.1 Robot

La prima questione da affrontare è stata la scelta del robot adatto a svolgere, in maniera equivalente, le operazioni eseguite precedentemente dall'uomo, comprese le attività di carico e scarico. La necessità di movimenti articolati e di flessibilità nella programmazione hanno subito indirizzato verso un moderno robot antropomorfo a sei gradi di libertà, quindi con sei motori ed altrettanti assi controllati. Questo costituisce di fatto uno standard in ambito industriale, poiché combina la massima versatilità con una percentuale di affidabilità testata e tendente al 100%.

Facendo riferimento ad una delle maggiori case produttrici, la Fanuc, già fornitrice aziendale, è stato esaminato il catalogo che riporta i dati tecnici dei modelli di robot in commercio. Le caratteristiche di maggiore interesse sono il carico al polso e lo sbraccio massimo, che devono soddisfare con un certo margine le richieste dell'applicazione, senza essere troppo sovradimensionate perché ciò comporta un costo più elevato e uno spreco di risorse. La massa da muovere è al più quella di 2 dei pezzi più grandi (4 kg ciascuno) sommata a quella dell'utensile di presa (25 kg); il raggio del cerchio in cui è inscritto lo spazio operativo è invece di circa 1,5 m. Un'osservazione importante riguarda le forze d'inerzia che dipendono dalle masse e dalle velocità in gioco, oltre che dalle posizioni assunte dall'end-effector: per garantire la corretta funzionalità del robot occorre sceglierne uno dalle prestazioni sufficientemente maggiori di quelli strettamente necessarie. È stato individuato un modello avente 50 kg di carico al polso e 2.050 mm di sbraccio massimo, quindi apparentemente adatto alle nostre esigenze; le altre specifiche di coppia e velocità ottenibili sono pienamente soddisfacenti, confermando l'opportunità della scelta. In collaborazione con il Responsabile dell'Industrializzazione e la direzione, si è deciso di procedere all'acquisto.

Tabella 5.2 – Principali caratteristiche del robot scelto [8]

MODELLO	CONTROLLORE	ASSI CONTROLLATI	CARICO AL POLSO [kg]	RIPETIBILITÀ [mm]	PESO [kg]	SBRACCIO MASSIMO [mm]
M-710iC 50	R-30iA	6	50	±0.07	560	2050
AREA DI LAVORO [°]	J1	J2	J3	J4	J5	J6
	360	225	440	720	250	720
VELOCITÀ DI LAVORO [°/s]	J1	J2	J3	J4	J5	J6
	175	175	175	250	250	355
MOMENTI D'INERZIA APPLICABILI [Nm/kgm <sup>2</sup> ]	J4	J5	J6	IP		
	206/28	206/28	127/11	54/67 *		

\* : struttura/polso e asse J3

Il manipolatore è fornito di un pesante basamento in ghisa, che è stato fissato al suolo (con viti e resine speciali) per assicurare la stabilità meccanica e, di riflesso, la qualità del lavoro; la posizione più consona è parsa quella vicina e frontale alle aperture sia del transfer che della lavatrice. Poco dietro è stato collocato il



pannello di comando, che è la base operativa per il controllo e la gestione del robot. Per maggior chiarezza si veda il layout della cella finita, al termine del paragrafo (Fig.5.14).



Figura 5.7 – Posizionamento del robot al centro della cella

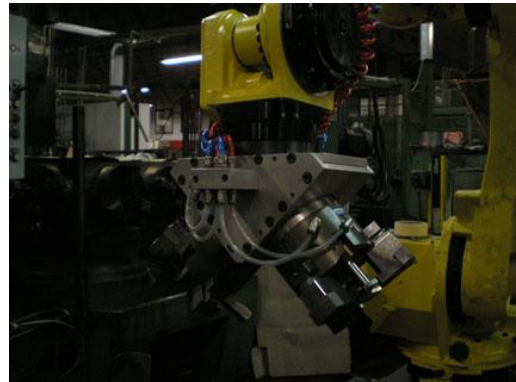


Figura 5.8 – End-effector a doppia pinza

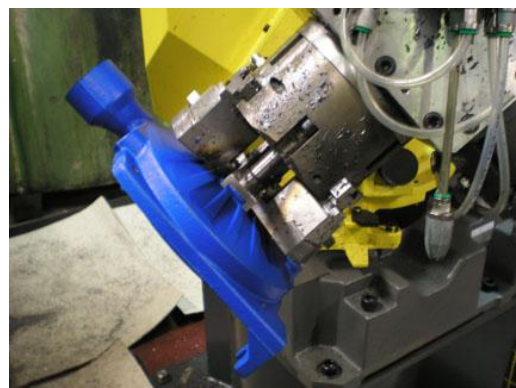


Figura 5.9 – Presa del pezzo sull'imbocco di aspirazione

La presa dei pezzi si è rivelata una questione da studiare attentamente. La caratteristica geometrica cui fare riferimento è quella circolare, sia dal lato del foro di aspirazione (presa esterna sulla parte cilindrica), sia dal lato della voluta (presa dall'interno). Dovendo il robot sostituire un pezzo "vecchio" con uno "nuovo" in modo rapido e per tre volte in un ciclo (2 fasi presenti sul transfer più una di lavaggio), vi è la necessità di una doppia pinza che possa tenere nello stesso istante il corpo tolto e quello da inserire. Per realizzarla si è pensato a due utensili ad assi complanari sfasati di  $90^\circ$  (vedi Fig.5.8); c'era bisogno perciò di una struttura che permettesse questa orientazione (un prisma triangolare), e di un meccanismo a tre griffe capace di effettuare la presa, in un caso in chiusura, nell'altro in apertura (l'attuazione in questo tipo di robot è pneumatica). Serviva un'ulteriore funzionalità: tenere premuto il pezzo nel momento del rilascio in macchina, dopo averlo appoggiato. Allo scopo è stato deciso di impiegare una flangia elastica che agisse in compressione su un lato del corpo, fra le griffe. Il sistema di gestione realizza sostanzialmente un controllo di forza. Il disegno e la costruzione dei componenti personalizzati si sono basati sul sistema di giunzione con il polso del robot, nonché sulla disponibilità in commercio di utensili di presa autocentranti su cui montare le griffe. Questo "sotto-progetto" è stato sviluppato internamente all'azienda e concretizzato nel reparto *Prototipi*.

## 5.2.2 Nastro di carico

Per il prelevamento dei grezzi è subito parso utile un nastro trasportatore, o *tappeto*, da impostare per un avanzamento autonomo. La domanda successiva riguardava il modo di disporre i pezzi, se alla rinfusa oppure ordinati. La prima possibilità certamente avrebbe fatto risparmiare molto tempo sul rifornimento del nastro (attività svolta necessariamente da un operatore), ma era da scartare nel nostro caso poiché, in mancanza di un sistema di visione, il manipolatore ha bisogno di orientazioni e punti certi. È chiaro che la disposizione ordinata rappresentava l'unica soluzione, pur causando una certa perdita di tempo. In particolare, essa doveva soddisfare determinati requisiti:

- i corpi devono assumere posizioni ben precise;
- il tempo per il posizionamento deve essere il minore possibile;
- i corpi non devono potersi muovere (cambiare posizione) durante l'avanzamento del nastro;
- la densità di pezzi sul tappeto deve essere alta per aumentare, a pieno carico, l'autonomia dell'isola.

Questo è stato possibile scegliendo un sistema di pallettizzazione in ingresso, cioè predisponendo il nastro con una serie di file di alloggiamenti per i corpi: essi sono adatti ai tre diversi particolari, perché dotati di un puntale di riferimento per il foro di mandata e di piastre laterali strette da molle, come si osserva in Fig.5.10. È stato ordinato un nastro da capacità di 30 file da 5 pezzi, che da solo consentirebbe un'autonomia di almeno 180 minuti, a fronte di un tempo di rifornimento di circa 22 minuti. Nella vista dall'alto, con il robot nella parte bassa, il nastro di carico è posto alla sua sinistra.

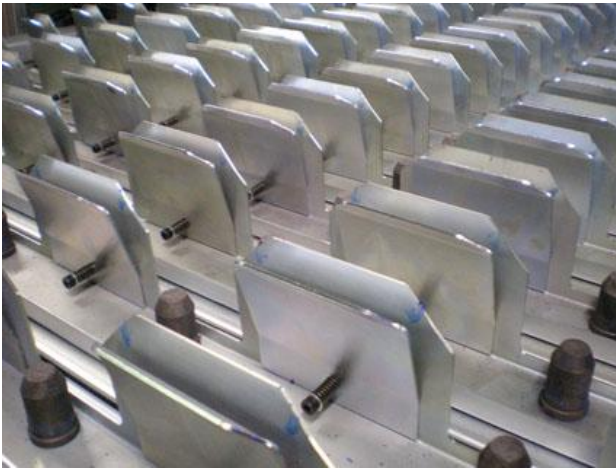


Figura 5.10 – Sistema portapezzi



Figura 5.11 – Nastro di carico

### 5.2.3 Manipolazione

Un altro problema è costituito dall'inserimento nel transfer. Oltre all'utilizzo di flange elastiche, serviva infatti un sistema in grado di garantire la corretta posizione angolare dei pezzi, in quanto la sesta coordinata della terna utensile non è sempre la stessa nella fase di presa. Pertanto si è scelto di applicare alle morse del transfer dei riferimenti laterali a molle, con funzione di appoggio (vedi Fig.5.12): il pezzo, già posizionato a meno di un angolo di orientazione, viene fatto ruotare attorno al sesto asse del robot fino ad appoggiarsi al riferimento, e la resistenza al movimento ne comanda l'arresto. Successivamente, le griffe rilasciano il pezzo, che viene bloccato da quelle della macchina transfer.

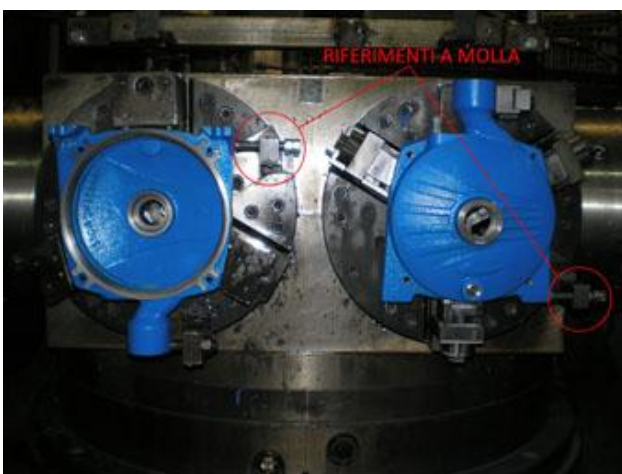


Figura 5.12 – Morse della tavola del transfer con riferimenti



Figura 5.13 – Appoggio su forcella per cambio presa

Il pezzo lavorato sul morsetto di sinistra, nella prima fase, deve essere spostato su quello di destra per la seconda, dove appoggia però il lato opposto. Il robot non può in pratica prenderlo come prima, ma ha bisogno di girarlo. Per risolvere questo aspetto è stata saldata al transfer una forcella, dove poggiare il corpo dall'alto e riprenderlo dal basso, come si vede in Fig.5.13.

## 5.2.4 Scarico

Supponendo poi che il robot sia arrivato a prendere il pezzo finito dalla lavatrice, e l'abbia sostituito con uno da lavare tramite la doppia pinza, si pone la questione dello scarico. Inizialmente si era pensato di far depositare i pezzi in un cassone posto a terra tra il nastro di carico e il manipolatore, in modo ordinato. Questa soluzione non è buona per due ragioni, di seguito esposte. In primo luogo, l'operazione di scarico è resa molto complicata dalla forma dell'utensile, che dovrebbe adattarsi ogni volta alla posizione all'interno del cassone: questo non è di fatto possibile, a meno che non si appesantisca esageratamente la programmazione o si modifichi la struttura meccanica delle pinze. Il secondo motivo, di natura organizzativa e non tecnica, è rappresentato dalla necessità di ispezionare almeno visivamente tutti i prodotti in uscita, che fa escludere direttamente la prima opzione di scarico automatico in cassoni. Non potendo fare a meno in questa fase di un controllo umano, l'alternativa escogitata ha previsto l'uso di un nuovo nastro trasportatore, attraverso il quale far pervenire ad un operatore i pezzi. La posizione più adatta è a lato del primo tappeto, mentre il dimensionamento è stato fatto secondo nuovi ragionamenti sull'autonomia dell'isola: ogni nastro funge infatti da buffer.

L'autonomia minima richiesta è di 40 minuti. Si desidera che la procedura di scarico sia la seguente: il robot deposita ciclicamente sempre sugli stessi 2 (o 3) punti del tappeto, allineati nella direzione della sua larghezza, variando l'altezza a seconda che il pezzo sia il primo o il secondo della pila; il nastro avanza automaticamente, di una quantità preimpostata, per lasciare libero lo spazio di deposito quando una fila di pile sia completa; in alternativa, l'operatore può farlo avanzare arbitrariamente, agendo su un pedale a terra. Il riempimento automatico del nastro fa sì che la capacità massima determini la massima autonomia ottenibile. È stata scelta allora una macchina dalla portata di 150 kg, le cui dimensioni, insieme al peso dei corpi, consentono una disposizione del tipo:

- particolare A: 12 file di coppie di pile da 2 pezzi, per un'autonomia di 61 minuti;
- particolare B: 11 file di terne di pile da 2 pezzi, per un'autonomia di 79 minuti;
- particolare C: 9 file di coppie di pile da 2 pezzi, per un'autonomia di 48 minuti.

Si vede che la scelta fatta soddisfa la richiesta. All'estremità di scarico è montata una fotocellula, che ha il compito di fermare il ciclo di lavoro se tutto il nastro è pieno e l'operatore non è presente, impedendo che i pezzi cadano al suolo. Il lavoro manuale dell'operatore resta quindi solo quello di pulire i prodotti e ispezionarli visivamente, prima di riporli in un cassone, oltre al compito periodico di controllare che siano soddisfatte le specifiche dimensionali.

## 5.3 Installazione e messa in funzione

Stabiliti così tutti i componenti funzionali della cella, sono iniziati i lavori di posizionamento delle unità e di allestimento dei sistemi di protezione. La circostanza ha dato modo di svolgere anche attività di pulizia e manutenzione del transfer e della lavatrice. La zona operativa del robot è stata interamente circondata da un assemblato di rete elettrosaldata, alto circa 2 metri, che impedisce fisicamente l'intrusione nell'area durante le fasi di lavorazione (Fig.5.15). Come si osserva in Fig.5.11, il nastro di carico giace solo parzialmente entro l'area di lavoro recintata. Per il suo restante ingombro è necessario un sistema di sicurezza che prevenga possibili situazioni di pericolo, quali le interferenze umane durante l'avanzamento automatico. A tal fine è presente un sistema di sensori ottici e specchi (Fig.5.16), che crea una barriera invisibile sui tre lati scoperti capace di inibire qualsiasi movimento del tappeto qualora il segnale fra trasmettitore e ricevente venga in qualche modo interrotto.



# Layout ISOLA ROBOTIZZATA TRANSFER CP158

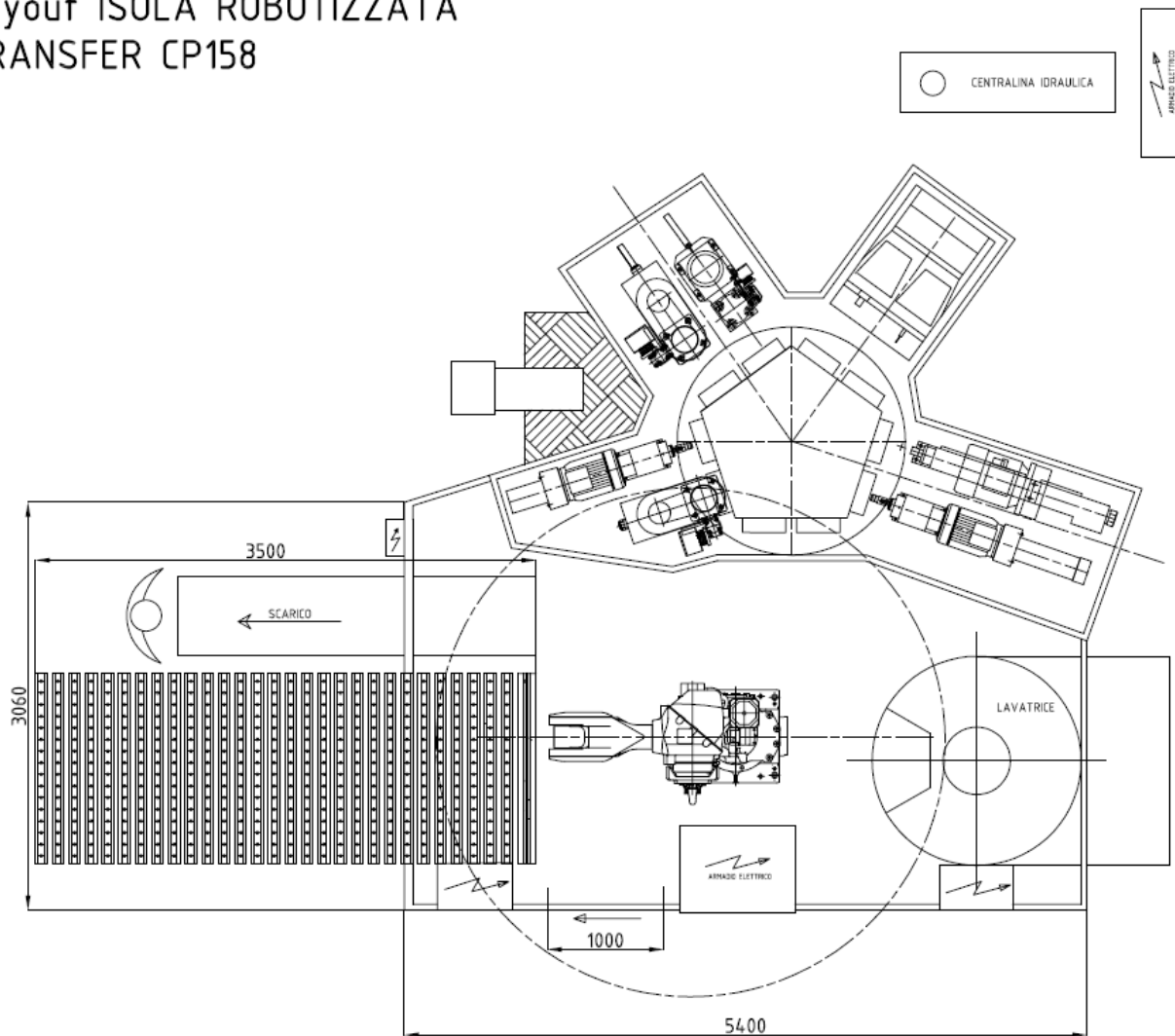


Figura 5.14 – Pianta della cella di lavoro automatizzata



Figura 5.15 – Recinzione metallica



Figura 5.16 – Sistema di sicurezza a barriera ottica

Successivamente le nuove macchine, con tutti i relativi segnali di ingresso e uscita, sono state collegate all'impianto elettrico, per ottenere il funzionamento coordinato richiesto all'automazione. Il robot in particolare, essendo dotato di un software che gli consente una ampia programmabilità, è stato interfacciato con i diversi segnali elettrici provenienti dalle altre macchine dell'isola, compresi quelli di allarme provenienti da fincorsa interbloccati, barriere ottiche e pulsanti di emergenza. Oltre che per i nastri, il robot, il transfer e la lavatrice, i cablaggi sono serviti anche per connettere i comandi di avvio/arresto del ciclo e di accesso, esterni alla cella. L'ingresso è infatti possibile dalla porta scorrevole della recinzione, ma solo previa interruzione del ciclo, dalla pulsantiera in alto a destra: l'operatore qualificato, o l'attrezzista, che debba entrare preme il pulsante di *stop ciclo* ed attende l'effettivo arresto delle macchine, segnalato da una luce verde. In questo modo si sblocca la chiusura elettromeccanica, atta ad impedire aperture non autorizzate o imprudenti.

### 5.3.1 Simulazione del ciclo

Prima di procedere alla scrittura del programma di lavoro del manipolatore, è stato necessario soffermarsi ad analizzare quale fosse la giusta sequenza di operazioni, e soprattutto quali le configurazioni da far assumere al polso per realizzare alcune non ovvie azioni di posizionamento. Si è pensato in questa fase di supportare le scelte fatte sul campo, osservando da vicino le posizioni relative e gli ingombri, con una simulazione al computer del ciclo desiderato. Si è usato un programma sviluppato in *Matlab* (un ambiente di calcolo numerico molto diffuso), da un gruppo di studenti e docenti del Dipartimento di Meccanica dell'università di Padova. Il suo nome è *Robotica*, ed è un software dotato di interfaccia grafica articolata, con cui è possibile effettuare la cinematica diretta e inversa, pianificare le traiettorie, creare dei modelli semplificati di spazi fisici dove riprodurre dei programmi di movimentazione e "pick&place" compilati da file di testo, scritti in linguaggio *Vplus*. Fra i modelli di robot disponibili, è stato scelto un antropomorfo somigliante a quello reale, fornito però di un'unica pinza. Ciò ha comportato una leggera variazione del ciclo simulato da quello effettivo, ma non ha impedito di studiare "a tavolino" la sequenza operativa più logica e di familiarizzare con la pianificazione dei movimenti nello spazio di lavoro e in quello dei giunti. Le operazioni realizzate sono:

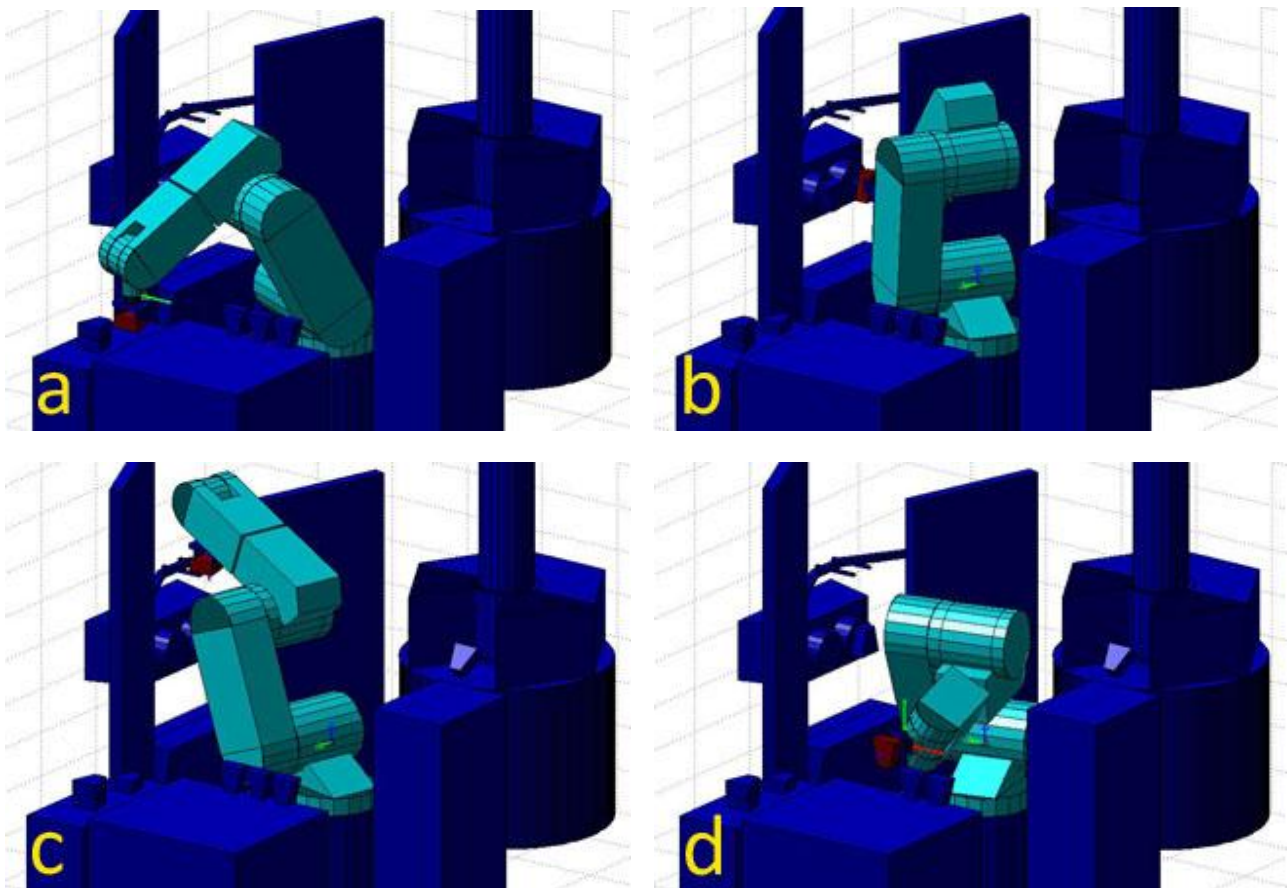


Figura 5.17a-b-c-d – Passaggi della simulazione del ciclo di lavoro

- prelevamento da lavatrice e scarico (Fig.5.17a);
- prelevamento da seconda fase ed inserimento in lavatrice (Fig.5.17b);
- passaggio da prima a seconda fase tramite forcilla per cambio presa (Fig.5.17c);
- carico nuovo pezzo in prima fase (Fig.5.17d).

In Fig.5.17 si osservano attorno al robot, partendo dal basso a sinistra e girando in senso antiorario: nastro di scarico, nastro di carico, unità di governo, lavatrice, transfer (di cui è riprodotta solo la facciata nelle sue dimensioni di massima). Si riporta di seguito il segmento per lo spostamento di un pezzo dalla prima alla seconda fase (le istruzioni di pausa “BREAK” fra un movimento e l’altro sono omesse per semplicità). La sequenza usata prevede che, per il cambio di mandrino, il pezzo sia appoggiato dall’alto sulla forcilla (locazione “over”) e ripreso da sotto (“under”), prestando attenzione al tipo di allontanamento: infatti l’utensile deve sfilare il pezzo nell’unica direzione consentita, cioè muovendosi lungo una linea orizzontale. Le locazioni sono state calcolate conoscendo le posizioni esatte degli oggetti che compongono l’ambiente.

APPRO spindle_sx, D	% avvicinamento al mandrino sinistro di una quantità D definita	MOVE inter12	% moto ad inter12
		MOVE inter11	% moto ad inter11
MOVES spindle_sx	% moto lineare al man. sx	APPRO under, D	% avvic. ad under di D
DELAY 0.4	% pausa di 0,4 s	MOVES under	% moto lineare ad under
CLOSE	% chiusura della pinza	DELAY 0.4	% pausa
DELAY 0.4	% pausa	CLOSE	% chiusura della pinza
DEPART D	% allontanamento lineare di D	DELAY 0.4	% pausa
		MOVES under2	% moto lineare ad under2
MOVE inter22	% moto alla locaz. inter22	MOVES inter4	% moto lineare ad under4
APPRO over, 20	% avvic. alla locaz. over	MOVE inter11	% moto ad inter11
MOVES over	% moto lineare ad over	MOVE inter5	% moto ad inter5
DELAY 0.4	% pausa	APPRO spindle_dx, D	% avvic. al mandrino dx
OPEN	% aperture della pinza	MOVES spindle_dx	% moto lineare al man. dx
DELAY 0.4	% pausa	DELAY 0.4	% pausa
DEPART 20	% allontanam. di 20 mm	OPEN	% aperture della pinza
MOVE inter22	% moto ad inter22	DELAY 0.4	% pausa
		DEPART D	% allontanamento di D

Nella realtà, fra le varie azioni del *task* vanno esplicitate delle istruzioni di attesa dei segnali di abilitazione, cioè quelli che danno il consenso a proseguire in risposta a informazioni del tipo “rotazione tavola transfer avvenuta” o “presenza pezzi su tappeto”, ed altre istruzioni di condizionamento (degli *if*), con funzioni simili. Come esempio, si veda in appendice B il codice operativo scritto per l’asservimento dell’isola oggetto del Cap.6. L’ambiente della cella presenta diversi ostacoli, per cui è stato importante scegliere con cura alcuni punti di passaggio intermedi delle traiettorie, in modo da evitare urti (virtuali) ma altresì per rendere più fluidi i movimenti senza incorrere in bruschi cambi di configurazione del robot: questo problema è rilevante nella pratica, dove si vogliono evitare situazioni dannose per la macchina e allo stesso tempo ottenere una maggiore velocità. L’utilizzo dei tool di cinematica è risultato fondamentale.

Organizzati i passaggi e le regole del ciclo di lavoro, un attrezzista qualificato ha scritto il programma del compito del robot, facendo uso della console di comando, e l’intero processo è stato provato. Dopo alcuni aggiustamenti sui punti spaziali e sulle traiettorie, il funzionamento automatico progettato è andato presto a regime. In poco tempo la produzione si è assestata a circa 350 pezzi a turno, per tutti e tre i particolari, a significare che il limite dell’isola è rappresentato dal transfer, una macchina di costruzione datata e priva di un sistema di controllo evoluto.

## 5.4 Riduzione del set-up

Trattandosi di un “collo di bottiglia” del reparto, sull’isola di lavoro è stato applicato il metodo SMED descritto nel Cap.2. La criticità è dovuta all’alta domanda dei pezzi ivi lavorati rispetto alla potenzialità produttiva; l’obiettivo primario è velocizzare il processo per soddisfare tutte le richieste. Si è



deciso di condurre l'analisi partendo dalla situazione antecedente alla robotizzazione, per giungere ad una verifica a posteriori. Il primo filmato riprende le modifiche effettuate al transfer per un cambio di produzione, da un solo attrezzista esperto, prima dell'allestimento dell'automazione: pulizia dei morsetti della tavola e sostituzione delle appendici di ognuno, sostituzione degli utensili e regolazioni della loro posizione e della profondità di lavorazione, cicli di prova, controlli dimensionali e calibrature. Sebbene l'addetto a tali operazioni fosse abile, rapido e non facesse errori di montaggio, si sono evidenziate una certa carenza di organizzazione, una serie di contrattempi eliminabili ed alcune modifiche tecniche da apportare.

Il video è stato proiettato, dal consulente responsabile del progetto, alla presenza di un gruppo di lavoro formato da tre operatori con conoscenza diretta della macchina, due stagisti, i Responsabili della Produzione e dell'Industrializzazione, il disegnatore delle attrezzature ed un ingegnere meccanico. Ogni operazione è stata cronometrata, rinominata e attentamente discussa per capire se fosse svolta nel modo più opportuno; in altre parole, ci si è chiesti se le singole attività fossero necessariamente da compiere nel tempo di fermo-macchina, se gli strumenti e le attrezzature a disposizione fossero adeguati o migliorabili, se l'ordine delle operazioni fosse quello ottimale per ridurre la durata complessiva, eccetera.

Il tempo di un attrezzaggio prima del miglioramento era di circa 5 ore. Una prima classificazione delle operazioni fra interne ed esterne ha permesso di affermare che grossomodo il 15% del tempo era fino a quel momento speso in attività che potevano essere comodamente svolte prima (o dopo) il vero e proprio set-up (cioè quello che interviene rigorosamente sulla macchina ferma), come ad esempio la preparazione di tutti gli attrezzi utili o, molto semplicemente, l'assistenza ad altri operatori al di fuori dell'isola. Sono state fatte poi delle proposte atte ad abbattere drasticamente il peso di alcune fasi, tramite scelte tecniche ragionevolmente implementabili. Ciò ha prodotto:

- il progetto e la realizzazione di *dime* per due unità operatrici del transfer (Fig.5.18). Su di esse infatti venivano spesi ben 25 minuti per la regolazione degli interassi degli utensili di foratura e maschiatura, che andava inoltre sempre corretta durante le prove di lavorazione, date le tolleranze stringenti da rispettare. Facendo uso invece di una sorta di disco in acciaio, da montare alla base degli utensili in corrispondenza dell'asse del mandrino, si ottiene un riferimento sul quale appoggiarsi per garantire che la lavorazione sia conforme (vedi Fig.5.19). Il montaggio di due dime ha una durata molto breve, di un minuto al massimo.
- L'acquisto di un nuovo set di utensili e porta-utensili, per attuare un vantaggioso *presetting*. Cambiando corpi prodotti, infatti, possono servire le stesse punte o maschi usati precedentemente, ma in generale deve essere variata la loro lunghezza, essendo differenti le dimensioni dei pezzi. Potendo disporre allora di utensili già regolati (prima che la macchina sia arrestata), il tempo di innesto si riduce considerevolmente e, come per le dime, si può contare su impostazioni subito pronte e già accurate.
- L'utilizzo di appoggi dedicati, per i diversi corpi, da montare su tutte le morse della tavola. Questo consente una velocizzazione nell'attrezzaggio perché elimina ogni altra regolazione successiva al montaggio.
- La dotazione di un avvitatore pneumatico, che aiuti l'operatore nelle operazioni di montaggio/smontaggio con conseguente risparmio di tempo ed energie.



Figura 5.18 – Dime realizzate per le diverse unità

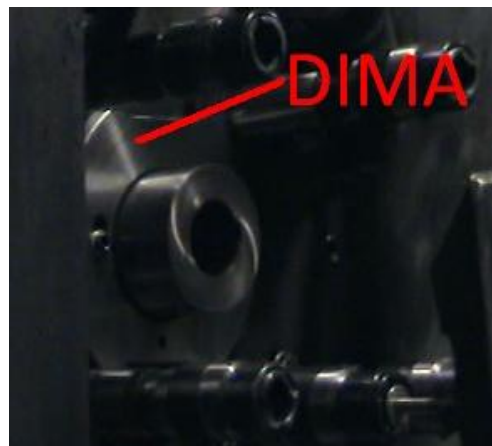


Figura 5.19 – Dima per riferimento dell'interasse utensili



Una scelta importante è stata anche quella di impiegare due uomini in parallelo, anziché uno solo. Naturalmente ciò ha comportato una redistribuzione oculata dei compiti, in modo tale che entrambi fossero occupati più o meno per lo stesso tempo e senza intralciarsi. Suddividendo le operazioni in base alle unità coinvolte e tenendo conto dei tempi, si sono stabilite le modalità con cui gli operatori devono lavorare per essere coordinati; mentre uno interviene sui morsetti della tavola, facendola ruotare e rimanendo davanti alla stazione frontale, l'altro attrezza le unità di lavorazione, spostandosi con il carrello attorno al transfer. Questa parte dovrebbe avere una durata complessiva di circa 50 minuti. In aggiunta, va considerato il tempo necessario per effettuare 2 cicli di prova completi di eventuali regolazioni di finitura e controlli dimensionali. Ciò coinvolge un solo uomo, e nel frattempo il secondo ha modo di attrezzare il robot sostituendo le dita di presa. Questa seconda parte occupa pressappoco 40 minuti (stima per eccesso), perciò la pianificazione dell'intero attrezzaggio fornisce una previsione di 1,5 ore. Sapendo il costo orario di un operatore e quello della macchina ferma (dal prezzo finale di una pompa e dal margine di guadagno, oltre che dalla produzione oraria), si è calcolato che il costo del set-up così ottimizzato è di circa 800 €, contro i 2.800 € del vecchio attrezzaggio: la differenza è notevole e giustifica gli sforzi fatti. Alla verifica sul campo, in cui sono stati messi in pratica tutti gli accorgimenti ed i metodi ideati, il tempo effettivo misurato è stato 1 ora e 40 minuti. Poiché si sono riscontrati piccoli inconvenienti, e soprattutto gli operatori erano nuovi all'attrezzaggio del transfer in prima persona, si può dire che l'esito è stato favorevole e soddisfacente, e vi è ulteriore margine di miglioramento.



Figura 5.20 – Cartellone che riporta, tramite foto ed annotazioni, i problemi riscontrati (sinistra), le soluzioni proposte (al centro) e gli standard migliorativi adottati al termine dello studio (destra).

## 5.5 Guadagno

L'automatizzazione della cella ha confermato essere una scelta strategica vincente, in quanto soddisfa le aspettative e porta dei benefici, in termini di costo e tempo, che si riflettono direttamente sulla qualità del processo produttivo. Basti pensare all'autonomia dell'isola nel caso peggiore: per ben 48 minuti il funzionamento è certamente autosufficiente (a meno di guasti o avarie). Questo non significa che l'obiettivo della robotizzazione è cercare di abbandonare le macchine in totale indipendenza, ma piuttosto che si vuole arrivare alle condizioni per cui un operatore abbia il tempo di gestire più macchine insieme, contando su "polmoni" quali i nastri trasportatori ed ovviamente sui robot. Lo snellimento di questa fase produttiva, che come detto rappresenta un elemento di criticità, porta inoltre un grande vantaggio all'economia dell'azienda, derivando dalla garanzia di una velocità di produzione più sostenuta e costante e da una cospicua riduzione del set-up e dei suoi costi.

## 5.6 Documentazione prodotta

La cella di lavoro, così costruita attorno alla componente produttiva principale che è il transfer, è diventata nell'accezione giuridica una "macchina", che deve rispondere a precisi requisiti di sicurezza (vedi *Direttiva Macchine*), e abbisogna di una certificazione riconosciuta per essere in regola. La produzione dei documenti necessari segue le normative di cui al Cap.7, in base alle quali vanno redatti il Fascicolo tecnico, che contiene la Valutazione di Rischi, il Manuale d'Uso e Manutenzione ed infine la Dichiarazione/Certificato di Conformità "CE". A ciò deve provvedere l'azienda costruttrice, ancorché utilizzatrice nello stesso tempo, al fine di garantire l'immissione nel mercato di un prodotto sicuro.

Durante il tirocinio, è stato affrontato anche questo aspetto del processo di automazione, a cominciare dallo studio delle leggi e delle normative di riferimento: DPR 459/96, UNI 1050, UNI 12100-1/2. È stato raccolto tutto il materiale disponibile sugli elementi che compongono la cella, e sono state scattate numerose fotografie. In osservanza della norma tecnica UNI EN 1050 del 1998 e dei requisiti essenziali di sicurezza esposti nel DPR sulla Direttiva Macchine, è stata sviluppata l'analisi dei rischi presenti nell'utilizzo, relativamente ai temi de:

- i materiali costituenti e prodotti;
- i comandi;
- le avarie;
- le misure di protezione contro i rischi meccanici;
- i rischi di altra natura (elettrica, termica, esplosiva, acustica, radioattiva, ecc.);
- la manutenzione;
- i sistemi di informazione.

Successivamente è stato steso e redatto il manuale di istruzioni della macchina, secondo le prescrizioni contenute nella norma tecnica UNI EN ISO 12100-2 del 2005. In esso trovano spazio:

- le informazioni generali;
- le istruzioni di trasporto, installazione e messa in funzione;
- la descrizione di tutti gli elementi costitutivi;
- le istruzioni di utilizzo;
- la descrizione dei dispositivi di protezione;
- le istruzioni di manutenzione e quelle di messa fuori servizio;
- le disposizioni in caso di emergenza;
- i disegni e gli schemi tecnici.

Da ultima, è stata compilata la dichiarazione di conformità "CE": essa certifica, con la marcatura di Fig.5.21, la rispondenza alle norme vigenti da parte della macchina, in particolare alle Direttive

- 98/37/CE "Direttiva macchine";
- 73/23 "Bassa tensione";
- 89/336 - 92/31 "Compatibilità elettromagnetica".

e che per la sua progettazione e costruzione sono stati adottati i principi ed i concetti introdotti dalle Norme Armonizzate *ISO EN 12100 – 1 – ISO EN 12100-2*.

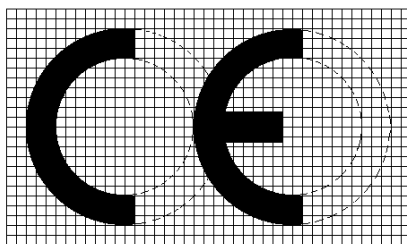


Figura 5.21 – Costruzione del marchio di Conformità Europea

## 6 Ampliamento di una cella esistente

Un altro problema reale con cui confrontarsi in azienda è stato la modifica di una cella produttiva, in base ad un'idea di miglioramento che coinvolgesse più di un processo. Si è pensato infatti di espandere il range di pezzi lavorati, in una data isola, aggiungendo una nuova macchina utensile; ciò ha richiesto un'analisi della situazione originale ed uno studio di fattibilità sotto il punto di vista sia tecnico che economico. È stato inoltre interessante esaminare l'aspetto del set-up per alcuni elementi fondamentali dell'isola.

### 6.1 Configurazione iniziale della cella

La cella era composta da un centro di lavoro a 4 assi, che dispone di una tavola rotante a due pallet, un tornio verticale bimandrino ed un tunnel di lavaggio, già asserviti da un robot antropomorfo ed un tappeto portapezzi. In Fig.6.1 si può osservare un layout di massima, dove a sinistra del robot vi sono il centro e la lavatrice, e a destra, frontalmente, il tornio ed il nastro.

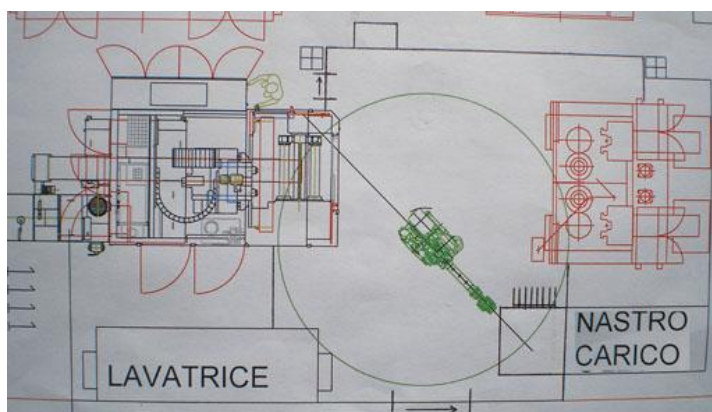


Figura 6.1 – Layout della cella originale



Figura 6.2 – Cella di lavoro con centro di lavoro (a sinistra) e tornio verticale (a destra)

Venivano lavorati 53 particolari, in medie quantità con cambi di produzione mediamente ogni 2/3 giorni. Un operatore caricava, su due file predisposte del nastro trasportatore, solitamente due tipi differenti di componenti, di modo che ad ogni passo vi fosse sempre una coppia mista (vedi Fig.6.3).

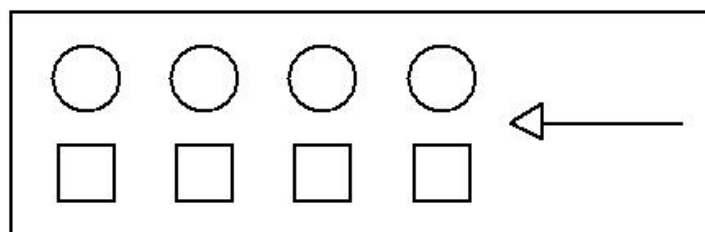


Figura 6.3 – Funzionamento del nastro trasportatore

Il posizionamento è facilitato da bulloni con funzione di riferimento, che vengono avvitati opportunamente sulle piastre metalliche di cui è formato il tappeto; un sensore ottico ferma l'avanzamento quando almeno un corpo si trova all'estremità sinistra. Il robot ha il compito di prelevare i grezzi, uno alla volta, e di portarli alle fasi di lavorazione programmate, che in genere prevedono il passaggio da un mandrino del tornio (un solo pezzo) e dal centro di lavoro (che va caricato con due pezzi uguali), ed infine il lavaggio automatico.



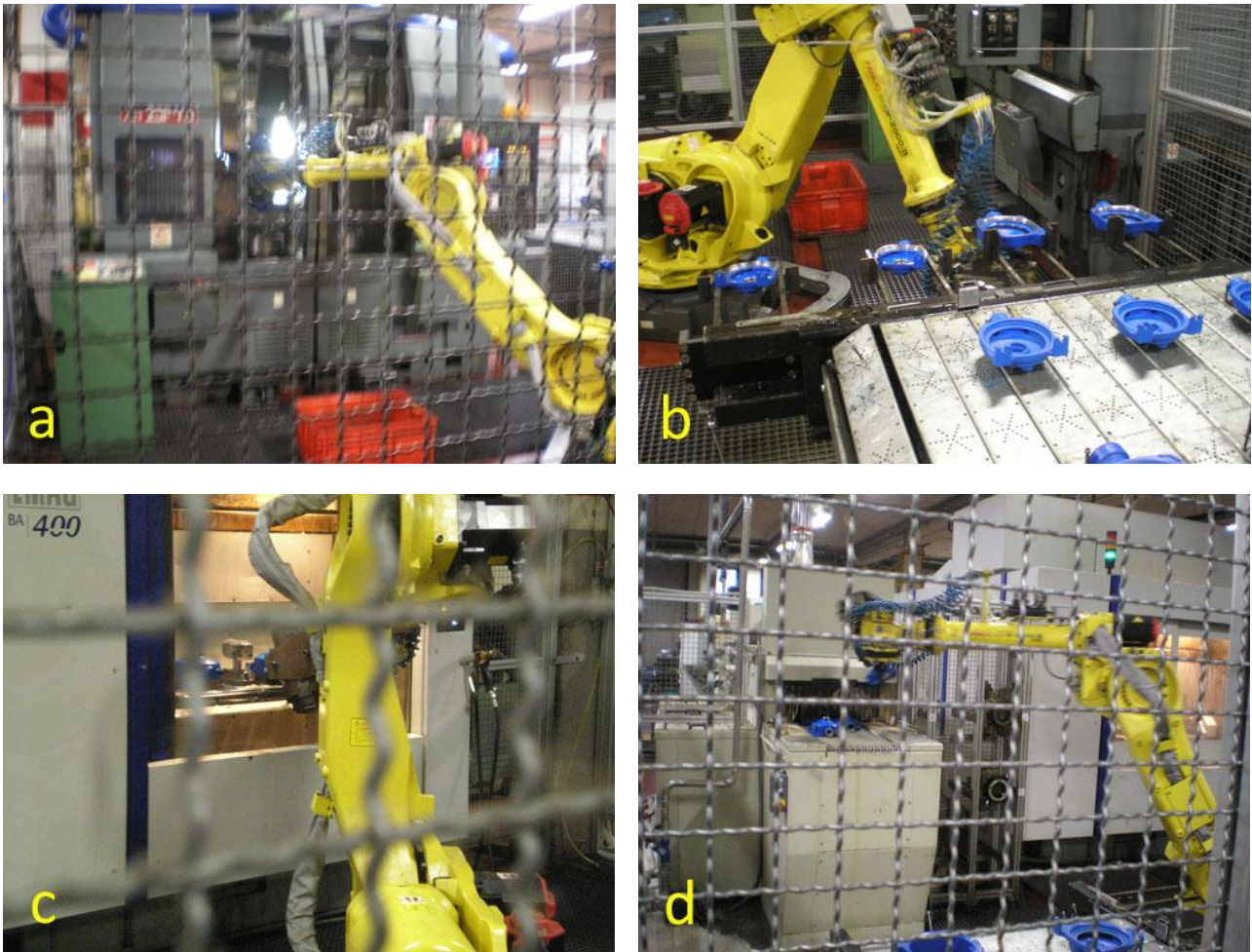


Figura 6.4a-b-c-d – Passaggi fondamentali di un ciclo di lavoro: a) tornio; b) attesa su forcelle; c) centro di lavoro; d) lavatrice

Una parte dei componenti subisce nell'isola tutte le trasformazioni di cui ha bisogno, cioè entra come materia prima (proveniente dalla fonderia) ed esce prodotto finito; altri particolari, invece, subiscono una lavorazione preliminare di tornitura, per poi essere completati nella cella. I cicli di lavorazione dei due tipi di pezzi sono combinati, in modo tale che i mandrini del tornio lavorino in parallelo su due particolari diversi mentre il centro di lavoro trasforma insieme i due pezzi di un pallet, mentre l'altro è disponibile per il carico/scarico. Programmando opportunamente il manipolatore, si ottiene la sequenza logica delle operazioni e "l'incastro" dei processi. La doppia pinza di cui è fornito, consente al robot:

- di prendere il pezzo lavorato dal tornio e metterne uno nuovo, oppure
- di estrarre/inserire due particolari dello stesso tipo dal/nel centro di lavoro.

Un particolare uscito dal tornio viene fatto sgocciolare dal liquido lubrorefrigerante su apposite forcelle e, quando una coppia dello stesso tipo è pronta, questa viene introdotta nel centro di lavoro non appena possibile. Spesso i pezzi diversi hanno bisogno di utensili di presa diversi; perciò nel programma robot è inserito anche il cambio automatico dell'end-effector, tramite un'attrezzatura portautensili ad hoc.

L'attrezzaggio richiede, in generale, un set-up abbastanza rapido per il tornio, la preparazione del tappeto con i suoi appoggi di riferimento, la modifica delle piastre (pallet) del centro di lavoro con i blocchetti specifici per tenere in morsa i pezzi, l'inserimento degli utensili mancanti ed il cambio di programma sempre della stessa macchina, la riprogrammazione del robot. Tutte queste attività, sebbene possano essere svolte da più persone insieme, comportano una certa lentezza nei cambi di produzione, e vanno quindi analizzate per cercare eventuali miglioramenti nel metodo.

## 6.1.1 Centro di lavoro a 4 assi

Il centro di lavorazione (abbreviato in cdl) è equipaggiato di due mandrini orizzontali motorizzati, che sono disposti uno accanto all'altro e girano in modo sincronizzato per lavorare una coppia di particolari identici (Fig.6.5). Con un sistema portapezzo girevole, si creano due vani di lavoro separati in modo da poter impiegare due dispositivi di serraggio, anche diversi fra loro. A mezzo di un asse girevole a controllo numerico (NC), i dispositivi di serraggio sono integrati nel sistema portapezzo. Il centro di lavoro è concepito per le operazioni di fresatura, foratura, allargatura, alesatura e maschiatura, possibili grazie ad un magazzino utensili posto sopra i mandrini, come si vede in Fig.6.6, che li attrezza in modo automatico.

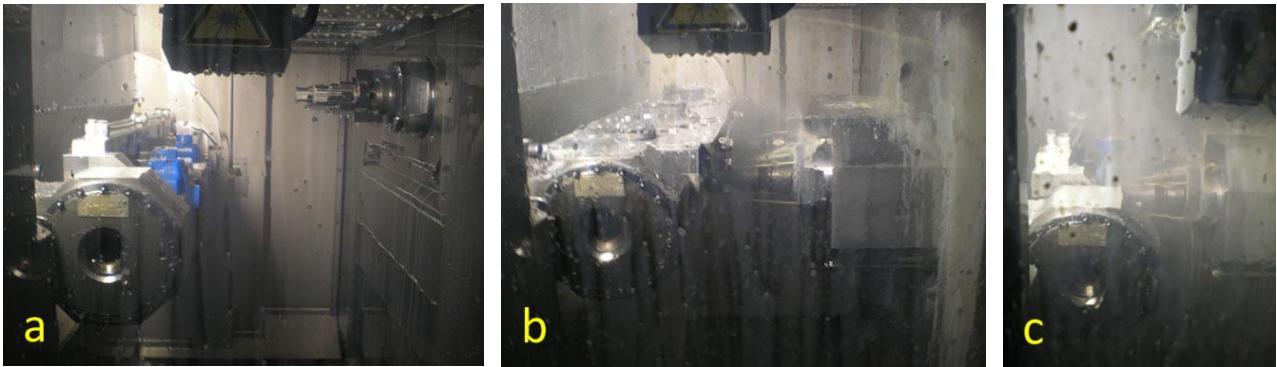


Figura 6.5a-b-c – Fasi di una lavorazione nel centro di lavoro

Le caratteristiche fondamentali sono di seguito elencate.

- Gruppo di lavoro orizzontale a due mandrini motorizzati che girano in modo sincronizzato.
- Lavorazione a due posti grazie a due vani di lavoro separati ( $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$  /  $180^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ) nel sistema portapezzo girevole (carico e scarico in parallelo al tempo principale).
- Dispositivi/sistemi di serraggio pezzo girevoli in direzione orizzontale tramite degli assi NC autonomi con supporto esterno (lavorazione ad angolo solido).
- Magazzino portautensili capsulato; sistema *pick up*.
- Montante della macchina realizzato come costruzione saldata di materiale pieno, altamente resistente alle torsioni e con raccogliatore di lubrorefrigerante integrato.
- Comandi digitali di avanzamento ad elevata dinamica e precisione.
- Vano di lavorazione con convogliatori da lamiera ed elementi di rivestimento fortemente inclinati per convogliare il refrigerante ed i trucioli verso il trasportatore di trucioli. [13]

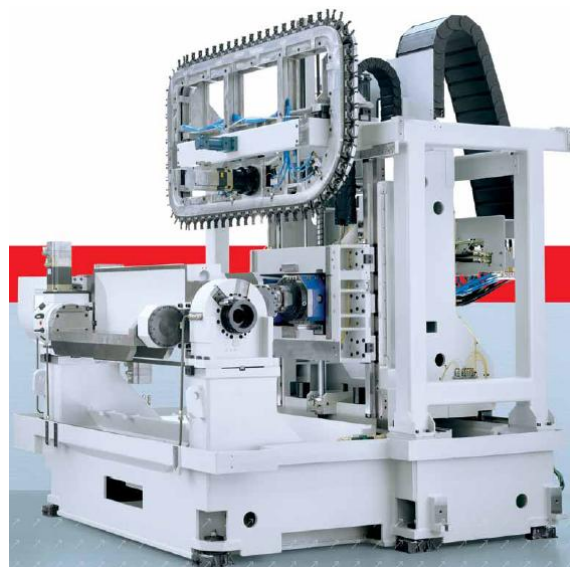


Figura 6.6 – Centro di lavoro privo dei ripari, in cui si nota in alto il nastro portautensili [11]

In appendice C è riportato il datasheet della macchina. Nell'isola di lavoro in esame, il centro è attrezzato ad ogni cambio per processare due tipi di corpi pompa, in modo ciclico servendosi della tavola portapezzi. Le lavorazioni durano pochi minuti (2÷4).

### 6.1.2 Tornio verticale bimandrino

Il tornio è dotato di due mandrini verticali, separati fisicamente nelle due metà della macchina (Fig.6.7). Ad essi corrispondono portelli di accesso distinti e lavorazioni indipendenti, per processare anche corpi diversi. La velocità di rotazione varia tra 25 e 2500 rpm, mentre quella lineare di avanzamento (lungo gli assi X e Z) può arrivare a 15 m/min. Fra una lavorazione e l'altra viene effettuato il soffiaggio automatico dei mandrini. È presente un magazzino utensili capace di ospitarne 12 (x 2). Il controllo numerico del tornio permette un'agevole impostazione dei cicli di lavoro e il coordinamento nei tempi con le altre macchine.



Figura 6.7 – I due mandrini del tornio

### 6.1.3 Robot

Il braccio articolato è fisso al centro dell'isola e possiede le specifiche di Tab.6.1. In Fig.6.8 se ne osserva invece la conformazione e lo spazio di lavoro.

Tabella 6.1 – Principali caratteristiche del robot presente nell'isola [8]

MODELLO	CONTROLLORE	ASSI CONTROLLATI	CARICO AL POLSO [kg]	RIPETIBILITÀ [mm]	PESO [kg]	SBRACCIO MASSIMO [mm]
R-2000/B	R-30/A	6	165	±0.2	1170	2655
AREA DI LAVORO [°]	J1	J2	J3	J4	J5	J6
	360	136	362	720	250	720
VELOCITÀ DI LAVORO [°/s]	J1	J2	J3	J4	J5	J6
	110	110	110	150	150	220
MOMENTI D'INERZIA APPLICABILI [Nm/kgm <sup>2</sup> ]	J4	J5	J6	IP		
	921/74.8	921/74.8	461/40.2	67/54/66 *		

\* : polso e asse J3/resto/parti in movimento



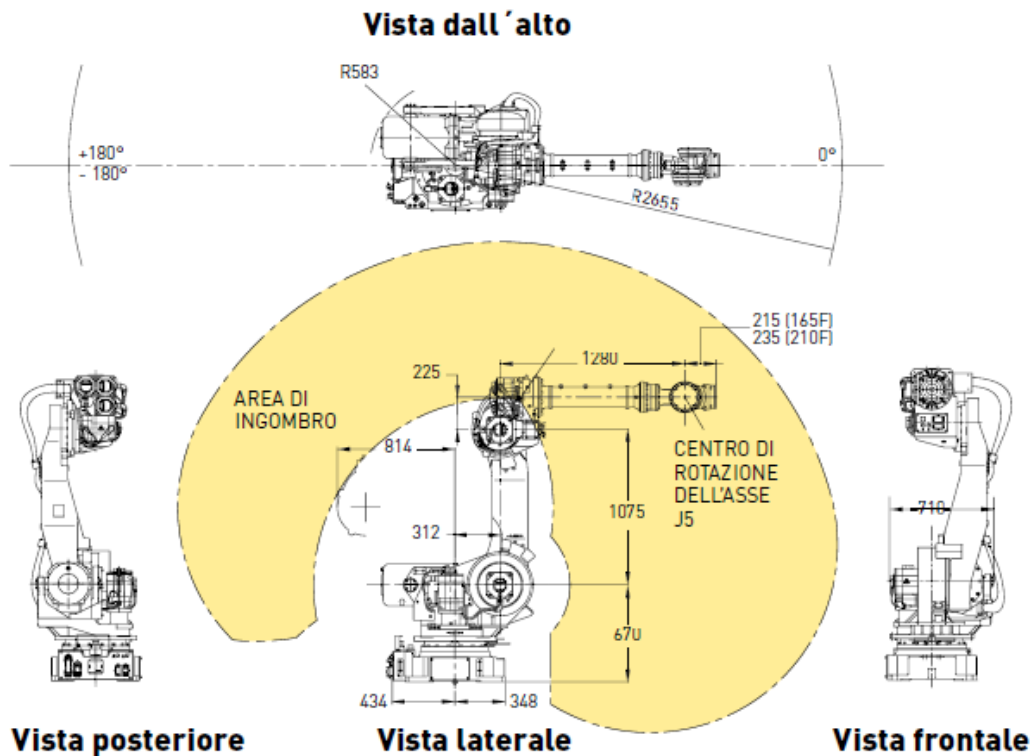


Figura 6.8 – Viste del robot e suo spazio di lavoro [8]

Per quanto riguarda gli utensili di presa, ne sono stati realizzati alcuni per consentire la manipolazione dei diversi particolari. Montano tutti due pinze sfasate di  $180^\circ$ , le quali agiscono per mezzo di tre griffe, che possono lavorare in chiusura o in apertura (vedi Fig.6.9 e 6.10). Sono inoltre dotati di un'appendice che, mediante due molle, serve a orientare correttamente i pezzi dentro il centro di lavoro: una volta posti nella loro sede, vengono fatti girare lentamente da una spinta "tangenziale" da parte del robot, fino ad incontrare l'appoggio di riferimento del pallet.



Figura 6.9 – Utensile doppio di presa con molle di riferimento

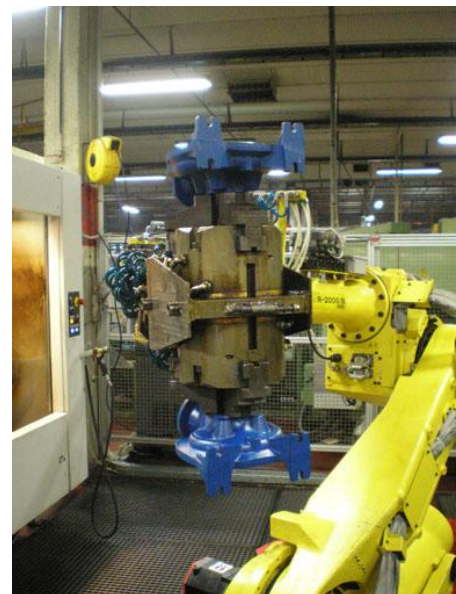


Figura 6.10 – Sistema di presa di due pezzi uguali



## 6.2 Idea di miglioramento

Nel reparto di lavorazioni meccaniche dell'azienda si svolgono contemporaneamente decine di processi, e per ognuno di essi è richiesta anche qualche attività di trasporto pezzi (per approvvigionamento, spostamento verso altre stazioni o immagazzinamento), a mezzo di cassoni e carrelli elevatori. Le celle già presenti favoriscono un contenimento dei flussi di materiale, giacché solitamente sono progettate per eseguire i processi dall'inizio alla fine, e spesso anche del numero di uomini e macchine impiegati, procurando benefici sia logistici che economici. Un rischio importante nelle imprese di produzione di serie è proprio quello dell'ammassarsi di semilavorati in posizioni non idonee.

In particolare, è stato osservato che alcune famiglie affini di componenti (corpi/pezzi K) seguivano un iter complesso all'interno dello stabilimento, passando addirittura per quattro macchine diverse, e non in maniera diretta e automatica ma compatibilmente con la disponibilità dei mulettisti. Ad esempio un pezzo K poteva subire una prima fase di tornitura, poi essere trasferito in un centro di lavoro, da lì ai trapani per la foratura ed infine giungere al tunnel di lavaggio; peraltro senza che vi fosse una disposizione favorevole dei macchinari.

Nella cella viene lavorata una famiglia di corpi, che chiameremo famiglia/corpi P, proveniente da una prima fase di tornitura esterna; dentro passa dal tornio, dal cdl e dalla lavatrice. Se in un dato momento un particolare P fosse l'unico tipo di componente lavorato, il tornio sarebbe attrezzato con due mandrini identici in modo da produrre in parallelo due pezzi, per renderli disponibili al centro in metà tempo: il ciclo sarebbe già ottimizzato, poiché le durate della tornitura e della lavorazione nel cdl sono molto prossime, quindi non vi sarebbero tempi morti per una delle due macchine. Si è immaginata invece la situazione che si presenterebbe se i corpi P fossero processati dall'inizio alla fine nell'isola, cioè torniti in entrambe le fasi e poi lavorati dal cdl. Allora necessariamente i due mandrini del tornio dovrebbero essere destinati a questo tipo di pezzi, uno per fase; supponendo di dedicare il funzionamento della cella alla sola famiglia P e sapendo che la lavorazione aggiuntiva è più breve della tornitura già presente, si otterrebbe un ciclo la cui durata è comandata dal tornio, più lento del centro di lavoro a produrre due pezzi: infatti la prima macchina produrrebbe un pezzo nel tempo in cui il cdl ne completa due, in altre parole il centro resterebbe inattivo per circa la metà del ciclo. Questa situazione è altamente inefficiente e sconsigliabile, ma ha suggerito una modifica strategica della cella, potenzialmente vantaggiosa: utilizzare il tempo morto del centro di lavoro, insieme con una nuova macchina utensile, per combinare i processi dei corpi P con quelli dei corpi K. La macchina da aggiungere sarebbe un tornio verticale a controllo numerico, fornito di un nastro speciale predisposto con pallet singoli portapezzo; esso sostituirebbe due torni impiegati in parte dei processi delle famiglie K.

### 6.2.1 Studio di fattibilità

#### Fattibilità tecnica

I particolari di tipo P dai quali si può ottenere del tempo utile sono 5, per una quantità complessiva che nell'ultimo anno ammonta a 18.100 pezzi. I corpi K da introdurre sono invece 22, per 33.891 pezzi. Si tratta di capire se i tempi di lavorazione dei particolari P e K si prestano ad essere accostati in modo da unificare i due processi in un solo ciclo produttivo, cioè in una sequenza di operazioni che si ripete con tempi costanti. Per farlo è stato necessario calcolare quale fosse il tempo complessivo di disponibilità del centro di lavoro (altrimenti inutilizzato), e quale quello richiesto per il processo dei corpi K, a partire dai dati di ogni codice, fase per fase. Il tempo utile è dato dalla somma di quelli ottenibili da ogni particolare moltiplicati per le relative quantità. Quello richiesto si determina invece sommando i tempi di tutte le lavorazioni che andranno svolte dal cdl (prima eseguite da macchine diverse: transfer, due cdl, trapani) moltiplicati sempre per le quantità di pezzi. Con il campione di dati di produzione considerato, è risultato che il tempo a disposizione è circa 462,2 ore, a fronte di una richiesta di 271,3 ore: ciò implica un soddisfacimento teorico maggiore del 100% (170,4%). Il risultato è certamente positivo, in quanto giustifica dal punto di vista tecnico l'idea di ampliamento dell'isola, anche se l'assunzione sul tempo morto del cdl fosse leggermente semplificativa (cioè se il tempo medio di inattività fosse inferiore a metà del ciclo).

## Fattibilità economica

Un altro aspetto interessante del problema riguarda il risparmio di denaro che può derivare da minori costi variabili: di funzionamento delle macchine nonché di manodopera umana. È chiaro infatti che la possibilità di eliminare, da uno “pseudo-bilancio”, i costi di esercizio dei macchinari non più usati e del lavoro degli operatori addetti è allettante, e porta a stimare la differenza fra questo risparmio e le nuove spese della cella modificata, nella speranza che tale differenza sia positiva e maggiore possibile. I tempi di lavoro dell'uomo sono delle frazioni di quelli delle macchine corrispondenti; in particolare, quello associato al centro di lavoro è stimato  $1 \cdot \text{tempo\_macch}$ , mentre per il tornio aggiuntivo vale circa  $0,2 \cdot \text{tempo\_macch}$ : quest'ultimo dato è interessante perché implica che, a parità di tempo di lavoro delle macchine,  $\Sigma(\text{tempo\_macch}_{\text{vecchie}}) = \text{tempo\_tornio}_{\text{new}}$ , l'occupazione umana è minore grazie ad un sistema di asservimento più rapido. I costi che vengono tagliati sono quelli inerenti alle macchine usate finora per la lavorazione dei corpi K, compreso il tunnel di lavaggio ed escluso uno dei torni, che continua ad eseguire una prima fase esterna; nel conto si sommano i prodotti delle ore occupate da ogni macchina e suo operatore (calcolate in base alle quantità annue) per i rispettivi costi orari, estratti dalla banca dati gestionale. Un ulteriore addendo è rappresentato dal costo della persona associata al tornio che operava la lavorazione esterna dei particolari di tipo P: nell'ipotesi migliorativa non è più presente perché la tornitura diventa interna e viene supervisionata insieme alle altre operazioni. I costi che al contrario subentrano sono imputabili al funzionamento prolungato del centro di lavoro ed all'utilizzo del nuovo tornio, con i relativi operatori. L'operazione algebrica porge ancora un risultato incoraggiante: 115.140 € è il guadagno stimato del processo innovativo tramite l'ampliamento dell'isola. E la stima andrebbe arrotondata per eccesso, perché non si è quantificato il risparmio sulle attività di movimentazione dei pezzi tramite muletto; anche se questi costi sono piccoli rispetto ai precedenti, è indubbio che la drastica riduzione di impiego di un operatore specializzato e di spostamenti di mezzi e materiali per il reparto genera un miglioramento qualitativo del processo, e diminuisce anche i rischi. Con questa conferma è stato ancor più avvalorato il progetto, e la sua realizzazione ha proceduto con l'installazione della terza macchina.

Tabella 6.2 – Ore e costi di funzionamento all'anno, prima e dopo la modifica del processo: i costi su sfondo verde vengono eliminati, quelli in rosso sono introdotti in seguito all'ampliamento della cella.

	ORE MACCH.	COSTO [€/ora]	COSTO MACCH. [€]	ORE UOMO	COSTO UOMO [€]
TRANSFER	25	75	1.875	25	650
TORNIO 1	440,6	43	18.945,8	220,3	5.727,8
TORNIO 2	732,1	43	31.480,3	366,1	9.518,6
TORNIO 3	137,3	28	3.844,4	27,5	715
CDL 1	654,7	87	56.958,9	654,7	17.022,2
CDL 2	298,5	87	25.969,5	298,5	7.761
TRAPANI	107,1	70	7.497	107,1	2.784,6
LAVATRICE	116,3	84	9.769,2	116,3	3.023,8
TORNIO NEW	869,4	29	25.212,6	173,9	4.521
CDL ISOLA	271,3	136	36.896,8	271,3	7.053,8
TORNIO ISOLA	763,6	43	32.834,8	382,9	9.955,4

A testimonianza del miglioramento raggiunto c'è il fatto che, dopo le modifiche effettuate sulla cella del Cap.5 e del presente, un solo operatore può seguire sia il nuovo tornio verticale che l'isola transfer robotizzata. Le due macchine sono infatti vicine (separate solo da un corridoio di passaggio del muletto), ed i tempi uomo richiesti sono tali da permettere di soddisfare entrambi i processi.

## 6.2.2 Realizzazione

Con riferimento al layout di Fig.6.1, si intendeva posizionare il nuovo tornio NC oltre il lato alto della recinzione, al posto di una macchina presente in quell'area. La partecipazione al ciclo della cella diverrebbe possibile attraverso un particolare nastro, passante dal tornio e parzialmente entro l'isola (avendo creato un'apertura adatta nella rete). Le questioni di carattere pratico da affrontare sono state essenzialmente due, e cioè:

- la posizione del nastro;
- la larghezza del nastro, che ne determina la forma dell'estremità.

Il primo problema ha richiesto di decidere le coordinate  $X$  e  $Y$  in un ipotetico piano cartesiano (l'orientamento è prestabilito). Sull'asse  $X$  il nastro doveva trovarsi in posizione centrale, cioè a metà circa della recinzione, in modo tale da non creare un ostacolo eccessivo durante le operazioni di attrezzaggio e lasciare spazio sufficiente sia dalla parte del centro di lavoro che del tornio. Per stabilire la posizione lungo l'altra direzione, occorre verificare lo spazio raggiungibile dal robot, senza che vi fosse contatto con la rete. Di conseguenza, il nastro avrebbe potuto essere inserito nella cella per la minima lunghezza necessaria per la presa, così da ridurre ulteriormente l'ingombro interno. Grazie al suo sbraccio, il manipolatore non presenta problemi di raggiungibilità della zona di carico, e per evitare che l'end-effector tocchi la recinzione è sufficiente che il nastro entri per 610 mm, come si vede in Fig.6.12.

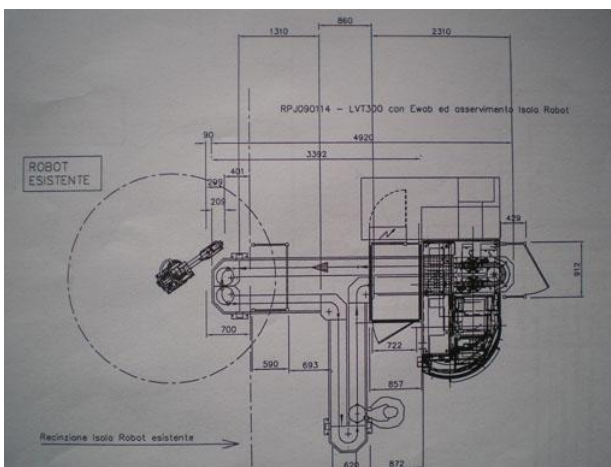


Figura 6.12 – Collocazione del nuovo tornio con il suo nastro



Figura 6.11 – Area destinata alla nuova macchina



Figura 6.13 – Nastro portapallet in fase di installazione

Poiché nella larghezza del nastro vi sono due corsie di scorrimento dei pallet, con verso opposto, e l'inversione di  $180^\circ$  è realizzata alle estremità, il secondo problema consisteva nel capire e scegliere quale fosse la configurazione più idonea della parte di nastro dentro l'isola, con i suoi pallet. Infatti, la posizione assunta dai vassoi durante l'inversione è condizionata dalla larghezza del nastro che, se troppo ridotta, consente ad un solo pallet per volta di trovarsi nel punto estremo, al centro della curva (vedi Fig.6.14). L'esigenza, a livello di processo, è quella di disporre nello stesso momento di due pezzi torniti, da trasferire insieme nel centro di lavoro. Ma se il nastro avesse la larghezza standard (proposta dal fornitore), i due pezzi da prelevare verrebbero a trovarsi necessariamente uno avanti (all'estremità) ed uno più indietro lungo la corsia (Fig.6.14). Il grave difetto di questa condizione è il bisogno di aumentare di molto l'inserimento del nastro in cella (circa 30 cm), cosa che ingombra troppo il passaggio. È stato chiesto allora di fornire un nastro più largo, tale da permettere a due vassoi di occupare la stessa posizione  $Y$ , cioè di stare alla stessa distanza dalla rete come mostrato in Fig.6.15. In questo modo il robot è in grado di eseguire correttamente la presa dei due corpi, da un nastro sporgente solo 610 mm.

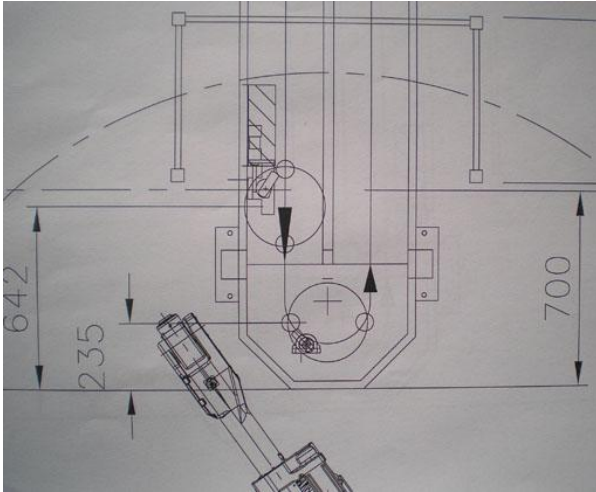


Figura 6.14 – Configurazione del nastro inadatta: all'estremità ha spazio un solo pallet, e servirebbe che il nastro entrasse maggiormente nell'area di lavoro.



Figura 6.15 – Nastro definitivo, che permette la disposizione appaiata di due pallet .

## 6.3 Applicazione del metodo SMED

La cella in esame rappresentava, anche prima dell'ampliamento, un collo di bottiglia nell'economia di produzione aziendale, processando una varietà di corpi pompa molto richiesti. Si è pensato allora di provare a migliorare la fase di set-up delle macchine, per ridurre al minimo il tempo di mancata produzione. La situazione esaminata è quella relativa alla cella originale, senza il secondo tornio; ciò non costituisce un limite perché i ragionamenti che sono stati fatti restano validi e facilmente estendibili. Il metodo è quello già visto nei Cap.2 e 5, che si struttura in riprese video, analisi e discussione delle operazioni, proposta ed implementazione di soluzioni migliorative, affissione dei cambiamenti introdotti con spazio per nuove idee. L'attrezzaggio coinvolge tutti gli elementi dell'isola, ad eccezione del tunnel di lavaggio, e richiede l'intervento di diversi operatori addestrati, che possono comunque lavorare in parallelo.

Il tornio utilizza un numero limitato di utensili, e la modifica delle morse per tenere i particolari non è molto onerosa; il programma di lavorazione viene richiamato velocemente ed in pochi minuti di prove la macchina è pronta. In poco più di mezzora il set-up è completato, con solo un 6,8% delle operazioni che può essere portato all'esterno. Pertanto si può considerare che questa attività sia già quasi ottimizzata e venga comunque svolta in tempo mascherato, essendo la più breve. L'unica accortezza è quella di preparare esternamente un carrello con tutta l'attrezzatura necessaria. Lavori più gravosi sono:

- il set-up del centro di lavoro;
- l'attrezzaggio del tappeto;
- la programmazione del robot.

Per ciascuno è stato fatto uno studio e introdotta qualche miglioria, come di seguito esposto.

### 6.3.1 Preparazione del centro di lavoro

Per predisporre il centro di lavoro alla lavorazione di nuovi componenti, è necessario agire su tre parti diverse, che sono:

- il magazzino-utensili;
- i pallet portapezzi;
- il programma ciclo.

La prova registrata ha mostrato una durata complessiva di poco meno di tre ore, con il 27,7% di attività subito classificabili come esterne, cioè a dire che il sistema prospetta buoni margini di miglioramento. La tabella elaborata in sede di analisi è riportata in appendice A (Tab.A.3).



Quanto al programma, il set-up è estremamente rapido poiché il cdl è dotato di un controllo sofisticato che permette di impostare il ciclo ed i suoi parametri tramite un pannello di comando. L'integrazione di una memoria programmi rende il sistema molto efficace.

## Magazzino utensili



Figura 6.16 – Magazzino portautensili

La questione degli utensili è più delicata. Il centro dispone di un magazzino a 60 posti, cioè 30 coppie di utensili uguali da montare sui due mandrini che eseguono le medesime lavorazioni. Purtroppo però i vari processi ne richiedono ben 45: logicamente quindi non vi saranno, ad ogni cambio di produzione, sempre tutti gli strumenti indispensabili, ma alcuni dovranno essere inseriti ed altri verosimilmente tolti. Nonostante sia ovvio che sarà più probabile trovare già in macchina gli utensili maggiormente usati, non è univoco il criterio con cui rimpiazzarne alcuni con altri. È stato condotto uno studio per trovare una tecnica conveniente di gestione del magazzino.

Dalle schede di controllo in uso agli attrezzisti, si è appreso quali utensili servissero per lavorare ciascun particolare. Sono stati inoltre annotati tutti i cambi di produzione succedutisi nell'arco dei sei mesi precedenti, al fine di stabilire, con una sorta di statistica, la percentuale di produzione di ogni codice rispetto alla totalità. Da queste informazioni è stato possibile ricavare la percentuale di utilizzo (generale, cioè in tutto il funzionamento del cdl) dei singoli utensili, pesando la loro presenza nelle lavorazioni dei corpi con la relativa percentuale di produzione. È risultata una graduatoria nella quale una fresa speciale, per filettare, era lo strumento maggiormente impiegato, dal momento che compariva nel 74,8% dei casi, seguita da un maschio e da una punta a gradino con il 59,2%, e così via. La prima idea è stata quella di imporre che i 25 utensili più usati fossero sempre presenti in macchina (con le dovute eccezioni per cambi particolari). Questo metodo, benché velocizzasse le operazioni di set-up, non garantiva che non vi fossero da aggiungere spesso alcuni utensili, contando sui 5 posti liberi o addirittura dovendo togliere qualcuno dei venticinque. Si è pensato allora di considerare le famiglie processate (che sono almeno 6), i cui componenti sono accomunati da lavorazioni simili e un set abbastanza costante di utensili. I corpi dei tipi F e V, per esempio, hanno bisogno di 19 strumenti in tutto: immaginando di tenere fissi questi 19, si ottiene che certamente il 33,3% dei cambi non necessiterebbe di modifiche del magazzino. Già questo dato certo ha fatto propendere per la gestione "a famiglie". Ma i vantaggi sono ancora maggiori se si scelgono altri 8 utensili semi-fissi, usati trasversalmente da famiglie diverse: si aggiungerebbe un 34,7% di cambi senza set-up. Se poi i 3 ultimi posti vengono occupati in modo opportuno, un ulteriore 15,3% degli attrezzaggi può godere delle disponibilità del magazzino. Con la configurazione ottimale descritta non servirebbe dunque set-up utensili nell'83,3% dei casi. Questa è stata la scelta adottata, con le regole suddette di mantenere sempre i primi 19 strumenti, agire inizialmente sugli ultimi 3 e successivamente sugli altri 8, togliendone all'occorrenza il minimo numero necessario a partire dai meno usati (nella classifica determinata all'inizio). Va detto che il risparmio teorico di tempo ottenibile con questa tecnica è significativo, valendo in media 10 minuti per cambio di produzione.

## Piastre portapezzi

Per quel che riguarda le due piastre su cui vengono collocati e fissati i pezzi per la lavorazione, vi era il problema di un lungo attrezzaggio consistente nello smontaggio, la pulizia, il montaggio ed il controllo di una serie di appoggi, tasselli, morsetti, ecc. Questi set erano già dedicati per ogni tipo di corpo, ma il set-up restava un'attività "interna", cioè da svolgere rigorosamente a macchina ferma.



Figura 6.17 – Una delle due piastre del cdl, completa degli appoggi dedicati ai particolari in lavorazione

L'unico modo in cui si sarebbe potuto trasformarla in "esterna" era quello di disporre di altre due piastre, per attrezzarle al di fuori, prima di interrompere la produzione. Il costo per la nuova attrezzatura è rilevante (7.500 € per ogni piastra) poiché si tratta di un oggetto fatto ad hoc e con assoluta precisione; tuttavia il beneficio che se ne poteva trarre era maggiore della spesa, dal momento che, fra contrattempi e disorganizzazione, l'attività filmata faceva perdere 79 minuti. È stata approvata questa soluzione e ordinato il materiale. Il tempo di attrezzaggio, naturalmente, non cala a zero, visto che subentra l'operazione di cambio delle piastre (nuove già pronte al posto delle vecchie), che hanno peraltro una massa di circa 160 kg; è stato pensato di sfruttare allo scopo il robot, in grado di muovere un simile carico, pur a bassa velocità, e di realizzare un posizionamento accurato. Per rendere effettivo il miglioramento studiato, in azienda sono stati anche progettati un carrello speciale per il trasporto delle piastre, ed un anello da montare come organo terminale del manipolatore, per l'imbragatura ed il sollevamento.

### 6.3.2 Nastro di carico

Anche il tappeto portapezzi presentava delle caratteristiche di inefficienza, che però potevano essere migliorate facendo uso di attrezzature leggermente diverse. Si tratta di:

- le piastre di cui era formato il nastro;
- le forcelle per l'appoggio pezzi, saldate su un lato della struttura.

In entrambi i casi, il problema era relativo alla posizione che viene assunta alla fine dai corpi: se si vuole garantirne la precisione, si deve spendere più tempo; se invece la posizione è variabile da un cambio all'altro, il robot va riprogrammato di conseguenza (con un ulteriore ritardo).

Come accennato, le vecchie piastre possedevano una serie di fori nei quali inserire delle viti, in maniera specifica per ogni particolare lavorato, che avevano la funzione di costituire un riferimento per contatto; la posizione dei pezzi era determinata con certezza. L'inconveniente stava nel fatto che l'operazione di avvvitamento, per tutto il nastro, occupava un operatore per ben 21 minuti, nonostante l'apparente semplicità. Quello che si è pensato è stato di poter disporre di piastre più larghe, tipo pallet, da attrezzare in esterna e montare già pronte sul meccanismo trasportatore, con un sistema facilitato di fissaggio (concetto simile alle piastre del centro di lavoro). Così facendo il set-up interno si abbassa a circa 10 minuti. Inoltre, le nuove attrezzature possono essere fornite di un riferimento laterale di posizione, ad esempio una piastrina verticale applicata sul fianco, allo scopo di comandare lo stop dell'avanzamento (tramite la fotocellula) sempre nel medesimo punto. Infatti essendo varia la coppia di componenti processata nell'isola, le dimensioni differenti dei due causavano l'arresto del tappeto al presentarsi del pezzo più grande, mentre l'altro si trovava in posizione diversa da un cambio all'altro: ciò comportava che sul nastro di carico dovessero essere presi ogni volta nuovi punti per il robot. Avendo un indice fisico il problema è risolto, ed il robot può utilizzare le coordinate già memorizzate.



Figure 6.18-19 – Nastro di carico, con attrezzatura per l'appoggio temporaneo dei pezzi

Sul lato del nastro rivolto verso il tornio, è fissata una struttura metallica che porta quattro “forcelle”, orizzontali e parallele; il loro scopo è di sostenere i semilavorati tra una fase e l'altra del processo, e di consentire al manipolatore di prenderli sia da sopra che da sotto. Le questioni erano due. Innanzitutto il robot manifestava un problema di raggiungibilità in corrispondenza della forcina più lontana, laddove riusciva comunque ad arrivare con l'end-effector, ma nel momento di muoversi linearmente per sfilare il pezzo preso si trovava al limite delle possibilità di movimento. Questo richiedeva uno sforzo maggiore da parte dell'attrezzista per ottimizzare a tentativi la traiettoria. Una soluzione potrebbe essere consistita nella modifica delle forcelle, allungandole o spostandole in un altro punto della cella, ma il metodo più semplice ed efficace si è rivelato quello di spostare il tappeto; con riferimento alla Fig.6.1, la scelta migliore è stata di muoverlo verso l'alto di 200 mm. In secondo luogo, le forcelle avevano il difetto che la disposizione opportuna dei pezzi era teoricamente diversa per ogni abbinamento di particolari (e le coppie sono ben 2.756,  $53 \times 52!$ ). Date le dimensioni molto varie poi, ci sarebbe potuta addirittura essere l'impossibilità di collocare certi pezzi, se non vi fosse stata presente la regolazione dell'interasse fra le forcelle. Ma questa era un'altra operazione che faceva perdere tempo prezioso. Si è scelto di adoperare delle “maschere”, cioè delle attrezzature specifiche, con funzione di riferimento, per posizionare univocamente i corpi, da montare sulle forcelle. Viene meno così la variabilità dei punti di pick&place del robot.

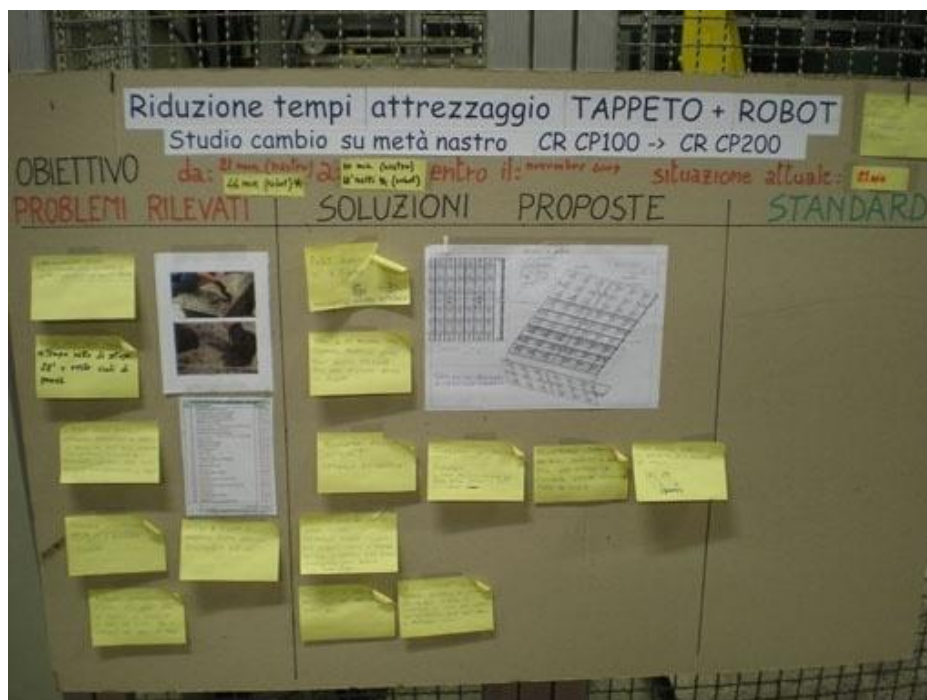


Figura 6.20 – Bachecca dell'attività di SMED, affissa alla recinzione dell'isola



### 6.3.3 Programma robot

Il tempo netto del set-up del robot era pari a 28 minuti, trascorsi a cercare e salvare in memoria i punti di presa e rilascio. L'operazione è effettuata tramite prove dirette sul campo con i nuovi pezzi da lavorare, usando i comandi di movimentazione nello spazio operativo. La sequenza generale delle operazioni (cioè il programma "main") è già realizzato e vale come struttura di base; viene modificato rapidamente nel set delle funzioni richiamate, che possono essere ad esempio la presa dal nastro, il carico nel centro o su uno dei mandrini del tornio, ecc., anch'esse memorizzate. Per ognuna di queste funzioni (o *routine*) sono salvate tutte le versioni in base al tipo di corpo, con i parametri specifici; esse contengono gli ultimi punti di presa e rilascio salvati. Il problema che si è posto è che ogni pezzo, nel corso dei cambi di produzione, poteva essere:

- prelevato da 2 punti diversi del nastro;
- appoggiato su 4 forcelle;
- inserito nel centro in 2 posti differenti;
- depositato in lavatrice in almeno 2 possibili posizioni.

Assumendo di aver voluto disporre di un sottoprogramma già pronto per ognuna delle combinazioni, il risultato era che per ogni versione di ogni routine ci sarebbero state teoricamente 32 varianti. Essendo 53 i particolari processati, ci sarebbe stato bisogno di avere a disposizione 1.696 versioni di ogni funzione, il che era assolutamente improponibile data la capacità limitata della memoria e l'impossibilità nell'identificazione che ne sarebbe derivata. Come conseguenza, in fase di attrezzaggio occorreva effettuare una paziente ricerca manuale dei punti ottimali, come si vede in Fig.6.21.

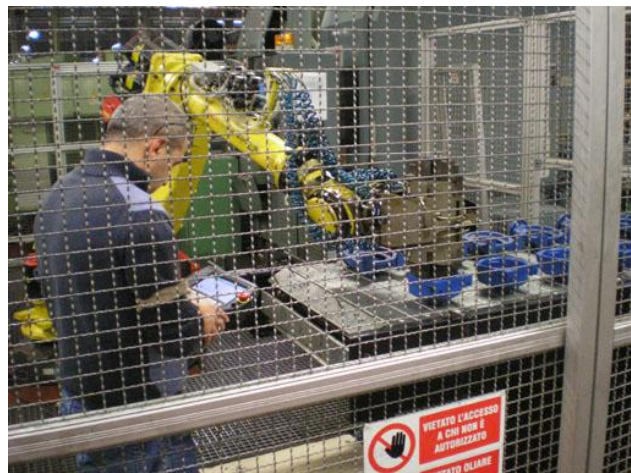


Figura 6.21 – Memorizzazione delle pose del robot

Inoltre, anche salvando di volta in volta i punti, le risorse di archiviazione erano insufficienti a contenere tutte le funzioni, così si doveva ricorrere alla maggiore memoria di un PC da cui trasferirle via USB. Il problema è stato risolto in due fasi: dapprima procurando delle espansioni di memoria (di tipo *flash* su chiavette USB) per immagazzinare le routine necessarie; successivamente agendo sulla logica del processo e della programmazione. Riguardo a quest'ultimo punto, si è capito che, rendendo più standard i cicli di lavorazione, le variabili in ogni particolare funzione potevano essere molto ridotte. L'applicazione di tali semplici innovazioni può abbattere i tempi di set-up del robot perché prevede che i punti siano già corretti non appena vengono chiamate le funzioni, salvo qualche aggiustamento. In una stima prudente, il tempo scende a 12 minuti.

A titolo di esempio, di seguito si riporta un estratto del programma principale del ciclo. In blu sono evidenziate le chiamate di funzioni; DI e DO indicano rispettivamente ingressi e uscite digitali, R un registro di memoria, JMP un salto ad un punto preciso del codice (LBL[]), J lo spazio dei giunti, mentre CNT l'avvicinamento, senza fermata, al punto di destinazione (FINE è invece il modo di posizionamento in cui il robot si arresta alla posizione di destinazione prima di proseguire verso il punto successivo).

#### PRINCIPALE

- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| 1: CALL ZERO ;                 | % reset, allineamento alle coordinate zero di riferimento |
| 2: DO[11:ROBOT ACCESO]=ON ;    | % attivazione dell'uscita digitale 11                     |
| 3: !Inizio Ciclo Continuo ;    |   |
| 4: DO[13:SICUREZZA PORTE]=ON ; | % attivazione dell'uscita digitale 13                     |
| 5: DO[12:EMERGENZA ROBOT]=ON ; | % attivazione dell'uscita digitale 12                     |

```

6: LBL[1] ;
7: R[7:CONTAPEZZI CP]=R[7:CONTAPEZZI CP]+1 ;           % incremento del registro 7
8: CALL PR1CP158 ;                                     % presa, con la prima pinza, del corpo CP158
9: J P[22] 100% CNT100 ;                               % moto CNT100, nello spazio dei giunti, al punto 22
10: J P[23] 100% CNT100 ;
11: CALL OKSCP158 ;                                    % carico sul mandrino sinistro del tornio
12: J P[1] 100% CNT100 ;
13: J P[18] 100% CNT100 ;
14: J P[4] 100% CNT100 ;
15: CALL RIDCP158 ;                                    % ripresa destra del pezzo
16: R[6:CONTAPEZZI 2CP]=R[6:CONTAPEZZI 2CP]+1 ;       % incremento del registro 6
17: CALL PR2CP130 ;                                    % presa con la seconda pinza, del corpo CP130
18: J P[13] 100% CNT100 ;
19: J P[14] 100% CNT100 ;
20: CALL OKDCP130 ;                                    % carico sul mandrino destro del tornio
21: J P[15] 100% CNT100 ;
...
44: LBL[10] ;
45: DO[13:SICUREZZA PORTE]=ON ;
46: DO[11:ROBOT ACCESO]=ON ;
47: WAIT DI[9:FINE CICLO SW]=ON ;                     % attesa del segnale d'ingresso digitale 9
48: WAIT DI[10:OK PER SCARICO SW]=ON ;               % e 10
49: IF DI[10:OK PER SCARICO SW]=ON AND DI[13:PALLET A SW]=ON, JMP LBL[20] ;
                                                    % salto condizionato dagli ingressi digitali 10 e 13
50: IF DI[10:OK PER SCARICO SW]=ON AND DI[14:PALLET B SW]=ON, JMP LBL[11] ;
                                                    % salto condizionato dagli ingressi digitali 10 e 14
51: JMP LBL[10] ;
52: LBL[11] ;
53: CALL SSWCP130 ;                                    % scarico dal centro di lavoro del pezzo CP158
...

```

Inserendo un valore compreso tra 0 e 100 è possibile regolare l'avvicinamento al punto di destinazione. Quando si immette il valore 0, il robot raggiunge il punto più vicino alla posizione memorizzata senza fermarsi e poi prosegue per il nodo successivo. Se si imposta il valore 100, il robot non decelera e, quindi, passa relativamente lontano dalla posizione di destinazione, per poi proseguire immediatamente a quella successiva.

Le istruzioni WAIT significano attesa di una condizione, mentre gli IF condizionano un'operazione allo stato di uno o più segnali. Tutti i punti del programma principale sono di passaggio, per descrivere grosso modo le traiettorie atte ad evitare gli ostacoli. Non serve raggiungere esattamente queste coordinate, ed il movimento può essere fatto nel modo più comodo e veloce, cioè nello spazio dei giunti.

Il programma completo è presente in appendice B, insieme al codice della funzione di scarico dal centro di lavoro.

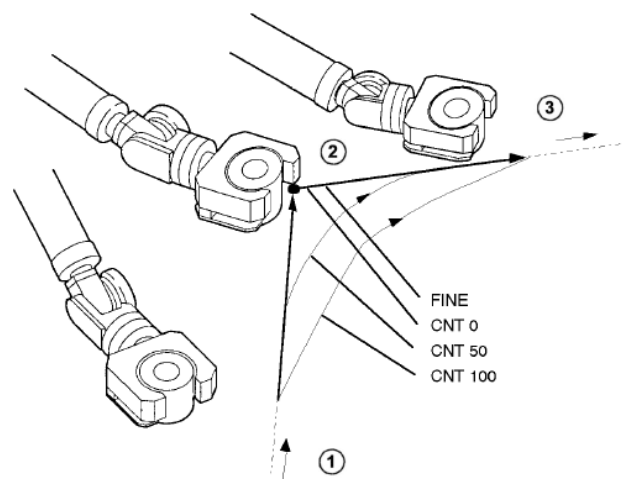


Figura 6.22 – Traiettorie del robot per posizionamenti di tipo FINE e CNT [12]

# 7 Sicurezza di una macchina

Con il termine *macchina* si intende, fra le varie definizioni giuridiche, anche “*un insieme di macchine e di apparecchi che, per raggiungere un risultato determinato, sono disposti e comandati in modo da avere un funzionamento solidale*” [DPR 459/96, Art.1]. Perciò una cella di lavoro è da considerarsi una macchina.

A corredo di una macchina che si voglia immettere nel mercato europeo, deve esserci una documentazione tecnica che testimoni il rispetto delle norme specifiche in materia di sicurezza, dal punto di vista della progettazione e della costruzione. Nel seguito viene spiegato brevemente il campo di applicazione di tali leggi di riferimento, ed è data una descrizione sintetica dei documenti fondamentali.

## 7.1 DPR 459/96

Con la pubblicazione del DPR n. 459, pubblicato sulla G.U. n. 146 del 21/9/1996 anche in Italia è stata recepita la *Direttiva Macchine*. L'importanza di tale decreto è notevole e per la vastità del campo di applicazione della direttiva, e perché gli obblighi derivanti riguardano sia i costruttori, sia i rivenditori, sia gli utilizzatori delle macchine.

La direttiva, si riferisce sia alle macchine e componenti già immessi sul mercato sia a quelli messi in servizio dopo l'entrata in vigore del decreto stesso (quindici giorni dopo la sua pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale) e cioè il 21 settembre 1996. Per immissione sul mercato si intende "la prima messa a disposizione sul mercato dell'Unione europea, a titolo oneroso o gratuito, di una macchina o di un componente di sicurezza per la distribuzione o impiego". Sono considerati immessi sul mercato anche le macchine o i componenti di sicurezza messi a disposizione dopo aver subito modifiche non rientranti nell'ordinaria o straordinaria manutenzione. Viene per esempio considerata immissione sul mercato:

- la cessione dal costruttore al grossista/rivenditore;
- la vendita finale all'utente;
- il noleggio;
- la locazione finanziaria;
- la concessione in uso, anche gratuita.

Viene considerata altresì messa in servizio la prima utilizzazione sul territorio dell'Unione europea oppure l'utilizzazione della macchina o del componente di sicurezza costruiti sulla base della legislazione precedente e già in servizio alla data di entrata in vigore del decreto qualora siano stati assoggettati a variazioni delle modalità di utilizzo non previste direttamente dal costruttore. Pertanto la direttiva si applica anche alle macchine e componenti di sicurezza usati, cioè già messi in servizio alla data del 21 settembre 1996 se dopo tale data hanno subito modifiche costruttive non rientranti nell'ordinaria o straordinaria manutenzione oppure hanno subito variazioni non previste direttamente dal costruttore. In questi casi il proprietario della macchina o chi reimmette la macchina sul mercato diventa il costruttore della stessa con tutti gli oneri.

Per quanto riguarda la procedura di certificazione, la direttiva prevede sostanzialmente una classificazione delle macchine in due classi, indicando nell'Allegato IV della direttiva le macchine ritenute più pericolose e quindi soggette all'intervento di un Organismo Notificato, ovvero di un ente riconosciuto, con decreto ministeriale, e dotato di quei requisiti di competenza tecnica e di imparzialità che devono essere posseduti da una parte terza. In particolare, mentre per tutte le macchine non indicate nell'allegato IV e comprese nel campo di applicazione della direttiva è sufficiente una dichiarazione di conformità del costruttore, che dovrà allestire un fascicolo tecnico in cui descrive come ha soddisfatto i requisiti essenziali della direttiva, per le macchine comprese nell'allegato IV il costruttore deve sottoporre la macchina all'esame di un Organismo Notificato. Per ogni macchina deve essere realizzato il fascicolo tecnico di costruzione. Tale documento, o

meglio raccolta di documenti, deve essere conservato dal costruttore e tenuto a disposizione delle autorità per almeno dieci anni a decorrere dalla data di fabbricazione.

Prima dell'immissione sul mercato o della messa in servizio il costruttore, o suo mandatario nell'Unione europea, deve attestare la conformità della macchina o del componente a quanto stabilito dalla direttiva; il tipo di dichiarazione varia a seconda se si tratta di un componente di sicurezza o una macchina, se la macchina deve essere installata in un'altra macchina ed infine se la macchina rientra o meno tra quelle dell'allegato IV. Infine per poter apporre la marcatura CE occorre soddisfare tutte le altre direttive applicabili a quel tipo di macchina; ad esempio la Direttiva EMC e la Direttiva Bassa Tensione per macchine con equipaggiamento elettrico/elettronico, la direttiva recipienti in pressione per macchine che utilizzano recipienti in pressione e così via.

Gli obblighi del costruttore di una macchina si possono riassumere nel:

- predisporre il fascicolo tecnico che dovrà contenere i documenti indicati nell'Allegato V della DM;
- redigere la dichiarazione CE di conformità secondo l'Allegato II.A della DM;
- apporre la marcatura CE sulla macchina ai sensi del punto 1.7.3 dell'Allegato I della DM.

L'inosservanza di quanto previsto dalla normativa vigente è causa di un grave danno economico per le Aziende che vedono ridotta la loro capacità produttiva e subiscono le sanzioni stabilite da una normativa in continua evoluzione a cui è obbligatorio adeguarsi.

## **7.2 UNI EN 1050**

La norma stabilisce i principi generali per la procedura nota come valutazione dei rischi, mediante la quale la conoscenza e l'esperienza su progettazione, uso, incidenti, infortuni e danni sulle macchine sono associati al fine di valutare i rischi durante tutte le fasi della vita delle macchine.

La funzione della norma, di tipo A, è di descrivere i principi per una procedura sistematica e coerente per la valutazione dei rischi come indicato al punto 6 della EN 292-1:1991. La UNI EN 1050 fornisce una guida per le decisioni da prendere durante la progettazione del macchinario, e sarà di aiuto nella preparazione delle norme di tipo B e C coerenti ed appropriate allo scopo di soddisfare i requisiti essenziali di sicurezza e di salute. In sé l'impiego della norma non fornisce la presunzione di conformità ai requisiti essenziali di sicurezza e salute. È raccomandato l'inserimento della norma nei corsi e nei manuali di formazione che forniscono istruzioni di base sui metodi di progettazione.

### **7.2.1 Scopo e campo di applicazione**

La UNI EN 1050 fornisce una guida sulle informazioni richieste per consentire l'esecuzione della valutazione dei rischi. Si descrivono le procedure per l'identificazione dei pericoli e la stima e la valutazione dei rischi. Lo scopo della norma è di fornire consigli sulle decisioni da prendere per la sicurezza delle macchine e sul tipo di documentazione richiesta per verificare l'esecuzione della valutazione dei rischi. La norma non è destinata a fornire un elenco dettagliato dei metodi per l'analisi dei pericoli e la valutazione dei rischi, poiché questi sono trattati altrove (per esempio, nei libri di testo ed in altri documenti di riferimento).

### **7.2.2 Concetti fondamentali**

La valutazione dei rischi consiste in una serie di tappe logiche che consentono di esaminare in modo sistematico i pericoli associati alle macchine. La valutazione dei rischi è seguita, ogni qualvolta risulti necessario, dalla riduzione del rischio come indicato al punto 5 della UNI EN 292-1:1991. Quando questo processo viene ripetuto, costituisce il processo iterativo per eliminare per quanto possibile i pericoli e per mettere in atto le misure di sicurezza. La valutazione dei rischi comprende (vedere Fig.7.1):

- analisi dei rischi, che si divide a sua volta in
  - a) determinazione dei limiti della macchina;
  - b) identificazione del pericolo;
  - c) stima del rischio;

- valutazione del rischio.

L'analisi dei rischi fornisce le informazioni necessarie per la valutazione dei rischi, che a sua volta consente la formulazione del giudizio sulla sicurezza della macchina. La valutazione dei rischi si basa su decisioni valutative. Tali decisioni devono appoggiarsi su metodi qualitativi, per quanto possibile integrati da metodi quantitativi. I metodi quantitativi sono particolarmente appropriati quando la gravità e l'entità prevedibili del danno sono elevate. Essi sono utili per valutare misure di sicurezza alternative, e per determinare quale tra queste fornisce la migliore protezione.

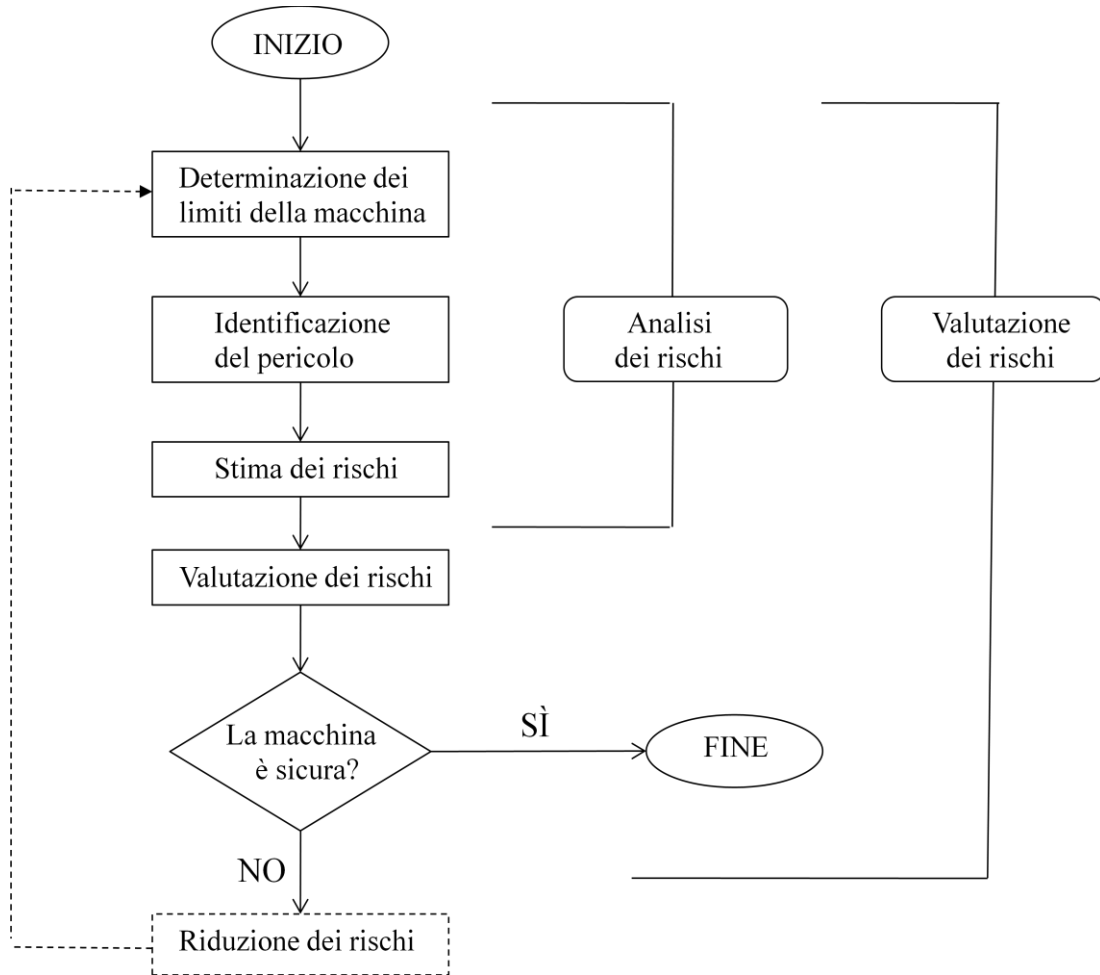


Figura 7.1 – Analisi e valutazione dei rischi

La Tab.7.1 seguente è uno strumento per l'effettuazione delle fasi 2) *identificazione dei pericoli* e 3) *stima dei rischi associati*. È composta da una lista dei pericoli standard e dei corrispondenti requisiti essenziali di sicurezza dell'Allegato 1 della Direttiva Macchine, tratta dalla citata norma UNI EN 1050. Le due colonne libere possono essere utilizzate ad esempio per stabilire un'ulteriore corrispondenza con norme "di tipo C" (specifiche per determinate macchine o famiglie di macchine) e per localizzare nello spazio e nel tempo i rischi effettivamente riscontrati, ossia per indicare in quali zone della macchina e in quali fasi della sua vita utile si possono manifestare i rischi corrispondenti a un dato pericolo identificato come presente nel caso in esame.

Tabella 7.1 – Esempi di situazioni di pericolo da valutare

n°	Rif.EN 1050	Pericolo secondo UNI EN 1050	Rif. prEN...	All.I Direttiva Macchine	LOCALIZZAZIONE zona / fase della vita utile
	1	PERICOLI DI NATURA MECCANICA (generati da forma, posizione relativa, massa, stabilità, accumulo di energia ecc.):		1.3 1.5.3, 1.6.3	
✓	1.1	Schiacciamento		1.3	
	1.2	Cesoiamento		1.3	
	1.3	Taglio o sezionamento		1.3	
	1.4	Impigliamento		1.3	
	1.5	Trascinamento o intrappolamento		1.3	
	1.6	Urto		1.3	
	1.7	Perforazione o puntura		1.3	
	1.8	Strisciamento o abrasione		1.3	
	1.9	Iniezione o eiezione di fluido ad alta pressione		1.3.2	
	2	PERICOLI DI NATURA ELETTRICA:			
	2.1	Contatto di persone con elementi in tensione (contatto diretto)		1.5.1, 1.6.3	
	2.2	Contatto di persone con elementi che entrano in tensione in caso di guasto (contatto indiretto)		1.5.1	
	2.3	Avvicinamento ad elementi ad alta tensione		1.5.1, 1.6.3	
	2.4	Fenomeni elettrostatici		1.5.2	
	2.5	Radiazioni termiche o altri fenomeni come la proiezione di particelle fuse e gli effetti chimici derivanti da corti-circuiti, sovraccarichi ecc.		1.5.1, 1.5.5	
	3	PERICOLI DI NATURA TERMICA			
	3.1	Bruciature e scottature e altre lesioni provocate dal possibile contatto di persone con oggetti o materiali a temperature estremamente elevate o basse, da fiamme o da esplosioni e anche per radiazioni da sorgenti di calore		1.5.5, 1.5.6, 1.5.7	
	3.2	Effetti dannosi alla salute provocati da un ambiente di lavoro caldo o freddo		1.5.5	
	4	PERICOLI GENERATI DAL RUMORE			
	4.1	Perdita di udito (sordità), altri disturbi fisiologici (ad es., perdita dell'equilibrio, della percezione)		1.5.8	
	4.2	Interferenze con comunicazioni verbali, segnali acustici ecc.		1.5.8	
	5	PERICOLI GENERATI DA VIBRAZIONI			
	5.1	Uso di macchine a mano risultanti in una varietà di disturbi neurologici e vascolari		1.5.9	
	5.1	Vibrazione dell'intero corpo, in particolare quando combinata con posizioni scomode		1.5.9	
	6	PERICOLI GENERATI DA RADIAZIONI			
	6.1	Radiazioni a bassa frequenza, frequenze radio, microonde		1.5.10	

## 7.3 UNI EN ISO 12100-2

La norma è la versione ufficiale della norma europea EN ISO 12100-2 (edizione novembre 2003) e tiene conto delle correzioni introdotte il 17 dicembre 2003. Definisce i principi tecnici per aiutare i progettisti e i costruttori ad ottenere la sicurezza in fase di progettazione delle macchine ad uso professionale o non professionale. La norma è stata ratificata dal Presidente dell'UNI ed è entrata a far parte del corpo normativo nazionale l'1 aprile 2005.

Lo scopo primario della ISO 12100 è di fornire ai progettisti una struttura generale e linee guida per consentire loro di produrre macchine che siano sicure per l'uso previsto. Fornisce inoltre una strategia per chi elabora le norme. Il concetto di sicurezza del macchinario considera la capacità di una macchina di eseguire la(e) sua(e) funzione(i) prevista(e) durante la sua durata di vita avendo adeguatamente ridotto il rischio.

La norma è la base di una serie di norme che ha la seguente struttura:

- **norme di tipo A** (norme fondamentali di sicurezza) che forniscono concetti fondamentali, principi di progettazione e aspetti generali che possono essere applicati a tutti i macchinari;
- **norme di tipo B** (nome di sicurezza generiche) che trattano un aspetto di sicurezza o un tipo di mezzo di protezione che può essere utilizzato su un'ampia gamma di macchinari:
  - norme di tipo B1 su particolari aspetti della sicurezza (per esempio distanze di sicurezza, temperatura superficiale, rumore);
  - norme di tipo B2 sui mezzi di protezione (per esempio comandi a due mani, dispositivi di interblocco, dispositivi sensibili alla pressione, ripari);
- **norme di tipo C** (norme di sicurezza per categorie di macchine) che trattano dettagliati requisiti di sicurezza per una particolare macchina o gruppo di macchine.

La ISO 12100 è una norma di tipo A. L'argomento di numerosi punti o sottopunti della norma è trattato anche, in maniera più dettagliata, in altre norme di tipo A o B. Quando una norma di tipo C devia da una o più disposizioni trattate nella parte 2 della ISO 12100 o da una norma di tipo B, prevale la norma di tipo C. Si raccomanda che la norma sia integrata nei corsi di formazione e nei manuali per divulgare la terminologia di base e i metodi generali di progettazione ai progettisti.

### 7.3.1 Scopo e campo di applicazione

La norma definisce i principi tecnici per aiutare i progettisti a ottenere la sicurezza nella progettazione del macchinario. Si prevede che la ISO 12100-2 sia utilizzata congiuntamente alla ISO 12100-1 quando si prende in considerazione la soluzione a uno specifico problema. Le due parti della ISO 12100 possono essere utilizzate indipendentemente da altri documenti o come base per la preparazione di altre norme di tipo A, B o C. La presente norma non tratta i danni relativi ad animali domestici, beni materiali o ambiente.

### 7.3.2 Riferimenti normativi

I documenti richiamati di seguito sono indispensabili per l'applicazione del presente documento.

IEC 60204-1:1997 Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements

ISO 12100-1:2003 Safety of machinery - Basic concepts, general principles for design - Part 1: Basic terminology, methodology

## 7.4 Fascicolo tecnico

Il fascicolo tecnico è una sorta di "radiografia" della macchina sotto il profilo della sicurezza. La sua presenza è sempre indispensabile ed è uno dei presupposti che consentono la redazione della Dichiarazione di Conformità. Il fascicolo tecnico deve contenere al suo interno:

- i. disegno complessivo della macchina
- ii. schemi dei circuiti di comando
- iii. disegni dettagliati delle parti che garantiscono la conformità ai requisiti essenziali di sicurezza
- iv. elenco dei requisiti applicabili e delle soluzioni tecniche adottate per assolverli
- v. riferimenti normativi
- vi. riferimenti ad altre specifiche tecniche
- vii. soluzioni tecniche adottate
- viii. certificati e relazioni tecniche
- ix. esiti delle prove
- x. manuale con le istruzioni per l'uso e la manutenzione della macchina
- xi. descrizione delle misure di garanzia della qualità sui prodotti di serie



Il fascicolo tecnico permette di dimostrare al progettista la conformità della macchina ai requisiti essenziali di sicurezza e la corretta applicazione delle soluzioni tecniche tratte dalle norme EN di riferimento.

La documentazione destinata al fascicolo tecnico può essere concepita per moduli. Ciò ne consente un assemblaggio flessibile in relazione ai diversi tipi di macchine ed alle relative caratteristiche costruttive, funzionali, manutentive e di sicurezza. L'insieme dei documenti deve essere caratterizzato da una successione di argomenti che proceda per deduzione logica. L'obiettivo è quello di garantire la conformità a tutti i requisiti essenziali di sicurezza applicabili sulla macchina in questione. Ad ogni rischio specifico deve essere conferita una valutazione di gravità e debbono essere trovate le soluzioni tecniche che consentano di ridurre l'entità ad un valore accettabile.

L'impostazione del fascicolo tecnico deve consentire di:

- a. ripercorrere le motivazioni di ogni scelta antinfortunistica in modo tale da evitare cattive interpretazioni del testo
- b. valutare la fattibilità di possibili modifiche da apportare sulla macchina salvaguardando la sicurezza
- c. evitare buchi documentali mentre si assemblano i dossier

## 7.5 Manuale d'uso e manutenzione

Il manuale di istruzioni è parte integrante della macchina. Esso è il mezzo tramite il quale il fabbricante ed il progettista si rivolgono all'utilizzatore per illustrargli il funzionamento della macchina e le caratteristiche di integrazione uomo-macchina. Il manuale si rivela spesso decisivo anche nel caso di contenzioso tra fabbricante e utilizzatore, in quanto consente di chiarire e ripartire le responsabilità tra le parti.

Il mancato rispetto delle istruzioni redatte correttamente può essere ritenuto in certi casi un fatto colposo a carico del danneggiato.

La fruibilità del manuale dipende dalla validità e dalla completezza dei contenuti e se si è tenuto in considerazione la comprensione da parte dei destinatari dello stesso. Il manuale d'uso deve essere consegnato all'acquirente prima del primo utilizzo.

Ogni macchina deve essere accompagnata da delle istruzioni per l'uso che forniscano almeno le seguenti informazioni:

- a. riepilogo delle informazioni previste per la marcatura CE, eventualmente completate dalle indicazioni per facilitare la manutenzione
- b. le condizioni di utilizzo previste
- c. il/i posto/i di lavoro che possono essere occupati dagli operatori
- d. le istruzioni per lavorare senza rischio
- e. la messa in funzione
- f. l'utilizzazione
- g. indicazioni che riguardano il trasporto
- h. l'installazione
- i. il montaggio e lo smontaggio
- j. la regolazione
- k. la manutenzione e la riparazione
- l. informazioni accessorie da mettere caso per caso

Deve essere redatto nella lingua del paese di utilizzo.

## 7.6 Dichiarazione di conformità e marcatura CE

Ogni macchina deve recare, in modo leggibile e indelebile, almeno le seguenti indicazioni:

1. nome del fabbricante e suo indirizzo
2. la marcatura CE
3. designazione della serie o del tipo
4. eventualmente, numero di serie

## 5. l'anno di costruzione

Nel caso in cui la macchina sia destinata in area esplosiva, essa deve recare l'apposita indicazione ed indicare tutte le avvertenze indispensabili alla sicurezza. Se un elemento della macchina deve essere movimentato durante l'utilizzo con mezzi di sollevamento, la sua massa deve essere indicata in modo leggibile, indelebile e non ambiguo.

La dichiarazione di conformità è l'atto con cui il fabbricante dichiara, sotto la propria personale responsabilità, che il prodotto è conforme ai requisiti essenziali di sicurezza. La marcatura CE è la dichiarazione del produttore che dimostra la rispondenza dell'apparecchio alle direttive comunitarie applicabili. La marcatura CE dichiara che il produttore-distributore si assume la responsabilità del prodotto, permettendone la libera circolazione in Europa e l'identificazione dei prodotti non conformi. La nuova direttiva macchine impone l'indicazione esplicita della persona autorizzata a costituire la Documentazione Tecnica Pertinente o il Fascicolo Tecnico della Costruzione indicando le generalità della persona e come raggiungerla, ad esempio: telefono e email. Gli scopi principali della marcatura CE sono:

1. indicare la conformità del prodotto alle direttive applicabili e quindi ai requisiti essenziali di sicurezza;
2. permettere l'accesso del prodotto sul mercato;
3. assicurare la libera circolazione dei beni;
4. permettere il ritiro dei prodotti non conformi dalle autorità preposte.

### 7.6.1 Dichiarazioni CE

La nuova direttiva prevede 3 tipi di dichiarazione (Allegato II):

- a. IIA - la dichiarazione CE di conformità alla Direttiva e alle altre Direttive in cui eventualmente ricade la macchina sottoscritta dal fabbricante.
- b. IIB - la dichiarazione d'incorporazione per le quasi-macchine. Questa dichiarazione contiene obbligatoriamente il preciso elenco dei RES ottemperati.
- c. IIC - Dichiarazione CE di conformità di un componente di sicurezza sottoposto oppure non sottoposto all'esame per la certificazione.

### 7.6.2 Marcatura CE

La marcatura CE nella nuova direttiva macchine dovrà:

- a. essere apposta nelle immediate vicinanze del nome del fabbricante o del suo mandatario usando la stessa tecnica;
- b. se è stata applicata la procedura di garanzia qualità totale, essere seguita dal numero di identificazione dell'organismo notificato.

Una volta apposta, la marcatura CE implica che la persona fisica o giuridica che ha effettuato o fatto effettuare la apposizione si è accertata che il prodotto - sottoposto alle appropriate procedure di valutazione di conformità - è conforme a tutte le direttive comunitarie che vi si applicano. Dunque, qualora un prodotto sia oggetto di più direttive che riguardano diversi aspetti e che prevedono la marcatura CE, quest'ultima indica che il prodotto è conforme alle disposizioni di tutte le direttive. Viceversa, qualora una o più di queste direttive lascino la scelta al fabbricante, nel corso di un periodo transitorio, del regime da applicare, la marcatura CE indica la conformità alle disposizioni delle sole direttive applicate dal fabbricante. In questo caso, i riferimenti delle direttive applicate debbono essere registrati sui documenti, note o istruzioni che accompagnano il prodotto. Tuttavia il legislatore non può impedire la commercializzazione di macchine non complete che il Fabbricante non è in grado di rendere totalmente conformi ai requisiti essenziali di sicurezza. Infatti la sicurezza della macchina potrebbe essere legata alla sua integrazione in un impianto complesso.

[14], [15], [16]

# Conclusioni

Il lavoro svolto ha permesso di applicare le conoscenze inerenti i robot, il loro controllo e la gestione e lo studio dei processi, nel contesto pratico di una realtà produttiva. In collaborazione con molti professionisti esperti, sono stati affrontati e risolti alcuni problemi di automazione e riduzione tempi di fermo-macchina, che ben chiariscono il significato di questa tesi, e cioè che la robotizzazione dei cicli di lavorazione e l'analisi metodica del set-up delle macchine sono strumenti chiave per ottenere processi di produzione veloci e affidabili, dalla qualità certa e costante. Per farlo si è familiarizzato con i diversi tipi di robot e con le loro possibilità operative nelle linee automatiche e nelle celle; si sono studiate le questioni del controllo dell'end-effector e dei fenomeni dinamici che nascono in presenza di più gradi di libertà; si è imparato ad usare il metodo SMED per dividere, analizzare e migliorare le attività di set-up. Sono state inoltre promosse in azienda la cultura e le regole della produzione snella, approfondendo le teorie che ne fanno parte per aiutare sul campo il personale a ridurre gli sprechi e mantenere in condizioni ottimali l'ambiente di lavoro.

Attorno ad una macchina transfer è stato progettato come creare un impianto autonomo di asservimento, dotato di un robot e due nastri trasportatori, dimensionando opportunamente i componenti ed effettuando scelte tecniche che favorissero la lavorazione dei pezzi e la gestione logistica del processo. Si è visto che, tramite un particolare sistema di carico/scarico, si riesce ad ottenere un periodo di autonomia più che sufficiente rispetto alle esigenze (pari almeno a 48'). Ancor prima della programmazione del manipolatore, è stata curata una simulazione in Matlab del ciclo di lavoro, allo scopo di ottimizzarlo nella sequenza degli movimenti. È stata inoltre prodotta la documentazione a corredo della nuova cella automatizzata, indispensabile per certificare la conformità alle leggi in termini di sicurezza. Grazie alla riduzione dei tempi di set-up si è potuto alleggerire il transfer, che costituiva un elemento di criticità per la produzione, portando la durata di un attrezzaggio da 5 a 1,5 ore e risparmiando su di esso circa 2.000 €; ciò è stato possibile attraverso la programmazione delle operazioni e la disponibilità di attrezzature ad utilizzo rapido. A questo guadagno si è aggiunto quello di una capacità produttiva più alta e stabile, grazie ai molteplici vantaggi dell'impiego di un robot al posto dell'operatore.

La robotizzazione può consistere anche nel portare alcuni processi, frammentati in diverse stazioni nella fabbrica e quindi poco efficienti, all'interno di un'isola già robotizzata, dopo averla adattata ai nuovi cicli da eseguire. È quello che si è studiato e realizzato come seconda situazione, dopo aver valutato l'opportunità del progetto. Lo studio di fattibilità ha fornito le giustificazioni tecniche, cioè ha permesso di capire come sfruttare i tempi-macchina a disposizione per far coesistere le lavorazioni dei componenti vecchi e dei nuovi, ed ha evidenziato la grande convenienza economica, data dal taglio di molti costi variabili (di funzionamento dei macchinari) e stimata in più di 115.000 €. Anche in questo caso poi, il metodo SMED è stato prezioso nella diminuzione delle attività di set-up: la sua dettagliata applicazione ha permesso di individuare soluzioni nuove e pratiche, principalmente nell'attrezzaggio del centro di lavoro (83,3% senza cambio utensili), e del robot, per il quale si è trovato un modo per ridimensionare la lunga fase di calibratura.

L'utilizzo di sistemi automatici e flessibili come i robot, oltre a migliorare le prestazioni generali del processo, ha il grande vantaggio di sgravare l'uomo da lavori fisici ripetitivi per consentirgli di dedicarsi ad attività di controllo e supervisione, anche di diversi processi insieme. Ciò trova conferma negli esempi esaminati, laddove l'automazione delle due celle (che sono vicine fra loro) ha permesso di gestire il lavoro, svolto in precedenza da 4/5 persone, da parte di un solo operatore: infatti l'isola con il transfer possiede ora una buona autonomia, mentre la modifica nella cella ampliata elimina la necessità di avere più addetti alle macchine utensili sparse nel reparto, ed anzi la stessa persona che effettua i controlli dei pezzi in uscita dal transfer può occuparsi anche del carico del nuovo tornio.

Durante il tirocinio si sono conosciute le normative sulla sicurezza delle macchine per la tutela delle persone, compresa la procedura di analisi e valutazione dei rischi che deve rientrare nel Fascicolo tecnico (vedi UNI EN 1050); questi elementi, spesso sottovalutati, sono in realtà essenziali perché regolano secondo buon senso il lavoro dell'uomo in modo da scongiurare eventi drammatici a danno delle persone.

Le attività svolte in gruppo sono state utili per cominciare ad apprendere una mentalità di lavoro produttiva e propositiva, che dovrebbe essere indirizzata all'innovazione puntando sulle idee e sull'esperienza di molti.

Per aumentare ulteriormente la qualità del lavoro, e di conseguenza anche dei prodotti e del servizio al cliente, appare fondamentale la piena acquisizione dei concetti della lean production che, oltre che sull'ordine e sulla riduzione dei tempi, si concentrano sulla gestione delle scorte, sulla manutenzione pianificata e su altri strumenti che cambiano realmente le condizioni in cui si svolgono i processi, in quanto semplificano e razionalizzano il lavoro evitando lo spreco di tempo e risorse (fra cui l'uscita di prodotti difettosi).

Per le varie esigenze di produzione, in termini di volumi e variabilità dei componenti, i layout presi in considerazione sono abbastanza collaudati ed efficaci; quello che può essere sviluppato è la strumentazione tecnologica per realizzare l'automazione, in particolare quella a supporto dei robot. Infatti, se da un lato la meccanica e l'elettronica attuali soddisfano la grande maggioranza delle richieste, d'altra parte può essere molto utile, in alcuni casi, disporre per esempio di dispositivi di visione, cioè telecamere interfacciate con l'elettronica di comando che dotino i robot di una nuova capacità decisionale, data dal riconoscimento visivo degli oggetti. Si pensi alla possibilità di caricare un nastro trasportatore con pezzi alla rinfusa, in modo molto veloce, anziché disporli in posizioni prefissate, ed avere un sistema che autonomamente ne identifica la geometria e la modalità di presa. Soluzioni di questo tipo sono già presenti, specie in alcuni settori produttivi di precisione (ad es. industria dell'occhiale e farmaceutica), ed offrono notevoli opportunità di studio e applicazione: nell'azienda che ha ospitato lo stage, per esempio, uno sviluppo nel miglioramento dei processi potrebbe essere proprio l'utilizzo di simili sistemi.

# Appendice A – Tabelle SMED

In riferimento al Cap.2 sulla riduzione dei tempi di set-up, si riportano le seguenti tabelle esplicative.

Tabella A.1 – Riduzione delle attività di set-up interno [4]

<b>AZIONI PER RIDUZIONE IED</b>	<b>EFFETTO</b>
Studiare dime, serraggi, agganci rapidi, morsetti speciali che consentano di eliminare dadi, viti o altri sistemi di lunga gestione.	Riduzione tempi impiegati per sostituzioni parti meccaniche.
Evitare trasporti di parti smontate, utensili, semilavorati e/o prodotti finiti durante le IED.	Riduzione trasporti durante IED.
Sfruttare tutte le potenzialità della macchina intesa come possibilità di registrazione e archiviazione della lunghezza degli utensili.	Questo fattore permette semplicemente di richiamare le misure dalla memoria della macchina.
Evitare le regolazioni degli utensili di supporto al set-up durante le IED; è utile allestire per ogni set up un carrellino, con tutti gli strumenti già preasettati.	Eliminazione della parte di tempo impiegata per settare gli utensili.
Nel caso di sostituzione di parti pesanti di delicato inserimento in macchina, studiare una unità di movimentazione versatile e gestibile con facilità come carrellini speciali.	Riduzione rischio nell'inserimento delle attrezzature; inoltre avere i carrellini permette di preparare come OED le parti pesanti da installare in macchina.
In caso di regolazioni e/o inserimenti di parti meccaniche nella macchina è utile installare sulla macchina la scala di unità di misura per effettuare più velocemente le regolazioni e/o gli inserimenti di dime, agganci, serraggi.	Semplificazione nella ricerca del punto di inserimento di particolari in macchina.
Standardizzare il più possibile tutte le attrezzature come viti, dadi, perni, agganci; se possibile tendere alla creazione di attrezzature universali.	Riduzione del numero di attrezzature per eseguire il set-up; inoltre se la forma e le dimensioni delle attrezzature sono completamente standardizzate il tempo occorrente per eseguire le operazioni di attrezzaggio diminuisce e, in più, l'operatore appare facilitato nei suoi movimenti.

Tabella A.2 – Riduzione delle attività di set-up esterno [4]

<b>AZIONI PER RIDUZIONE OED</b>
Realizzare dei carrellini o unità di movimentazione che contengano un kit di utensili, di schemi di funzionamento, disegni tecnici e schede di attrezzaggio da utilizzare in ogni set-up.
Allestire un'area vicino alla macchina/impianto destinata al materiale adibito al cambio produzione/linea che verrà riempita prima dello stop macchina e svuotata al termine del set-up.
Allestire uno spazio in cui durante il fermo macchina sarà possibile posizionare tutti i materiali che, a fine set-up, dovranno essere ricollocati in appositi magazzini o locazioni lontane dalla macchina.
Tenere tutti gli utensili usati sempre nelle fasi di set-up nei pressi della macchina in locazioni stabilite.
Riposizionare tutti gli utensili utilizzati in ordine nel posto assegnato.
Allestire i pezzi di "prova" usati per gli aggiustaggi, prima dell'inizio delle attività IED.
Standardizzare il più possibile tutte le attrezzature come viti, dadi, perni, agganci; se possibile tendere alla creazione di attrezzature universali.



Tabella A.3 – Analisi SMED dell'attrezzaggio del centro di lavoro presente nell'isola trattata al Cap.6

Analisi SET-UP centro di lavoro SW400												
N°	OPERAZIONE PRINCIPALE	OPERAZIONE ELEMENTARE	ATTREZZI	TEMPO PROGR.	SEC.	SEC. IED	SEC. OED	IDEA DI MIGLIORAMENTO	% RID. IED	% RID. OED	IED STIM.	OED STIM.
1	Programm. e cambio utensili	inserimento nuovo programma		00.07.04	424	424	0		85		64	0
2		scarico utensili		00.11.34	270	270	0		75		68	0
3		deposito e prelievo utensili		00.14.48	194	0	194			100	0	0
4		prelievo fresa x filettare		00.15.25	37	37	0		100		0	0
5		cambio fresa x filettare		00.22.00	395	395	0		100		0	0
6		azzeramento fresa e inserimento dati		00.24.02	122	0	122	caso particolare		100	0	0
7		carico parte utensili		00.28.35	273	273	0				273	0
8		ricerca e trascrizione dati utensili		00.30.32	117	117	0				117	0
9		prelievo utensili rimanenti		00.31.16	44	0	44			100	0	0
10		carico utensili		00.33.57	161	161	0				161	0
11		prelievo utensili rimanenti		00.34.17	20	0	20			100	0	0
12		carico utensili		00.34.37	20	20	0				20	0
13		memorizzazione finale		00.35.18	41	41	0				41	0
14		verifica posizionamento utensili		00.37.38	140	140	0				140	0
15	Tavola A	posizionamento tavola A		00.38.00	22	22	0				22	0
16		pulizia tavola		00.38.39	39	39	0				39	0
17		allentamento staffe	brugola T 8	00.39.38	59	59	0				59	0
18		smontaggio staffe	brugola 8	00.41.06	88	88	0				88	0
19		sbullonamento piastre	brugola T 8	00.42.11	65	65	0				65	0
20		smontaggio piastra 1		00.42.28	17	17	0				17	0
21		pulizia piastra 1		00.42.44	16	0	16			100	0	0
22		smontaggio piastra 2		00.42.48	4	4	0				4	0
23		pulizia piastra 2		00.43.01	13	0	13			100	0	0
24		pulizia morsetti		00.43.24	23	0	23			100	0	0
25		pulizia tavola		00.43.44	20	20	0				20	0
26		estrazione centraggio 1	estrattore	00.44.30	46	46	0				46	0
27		estrazione centraggio 2	estrattore	00.44.47	17	17	0				17	0
28		pulizia tavola		00.45.05	18	18	0				18	0
29	Tavola B	richiamo tavola B		00.45.23	18	18	0				18	0
30		idem 17-18 INT		00.48.24	181	181	0				181	0
31		idem 17-18 EST		00.48.52	28	0	28			100	0	0
32		pulizia staffe		00.00.15	15	15	0				15	0
33		svitamento 6 bulloni da 10	brugola T 8	00.01.15	60	60	0				60	0
34		estrazione piastre		00.01.28	13	13	0				13	0
35		pulizia piastre vecchie		00.01.52	24	0	24			100	0	0
36		pulizia ed estrazione centraggi		00.02.20	28	28	0				28	0
37		smontaggio parte fissa riferimenti pezzi		00.02.48	28	28	0				28	0
38		posizionamento bulloni e chiusura porta		00.03.09	21	21	0				21	0
39		rotazione tavola e apertura porta		00.03.17	8	8	0				8	0
40		pulizia tavola		00.04.00	43	43	0				43	0
41		intervento altra macchina		00.06.29	149	0	149	ineliminabile			0	149
42		pulizia tavola		00.07.23	54	54	0				54	0
43		deposito e prelievo attrezzatura		00.13.40	377	0	377			100	0	0
44		rotazione tavola e apertura porta		00.13.58	18	18	0				18	0
45		intervento altra macchina		00.15.28	90	0	90	ineliminabile			0	90
46		riposizionamento attrezzatura		00.16.51	83	0	83			100	0	0
47		spine centraggio		00.17.10	19	19	0				19	0
48		posizionamento piastre		00.18.09	59	59	0				59	0
49		ricerca martello		00.18.38	29	0	29			100	0	0
50		fissaggio piastre		00.20.50	132	132	0				132	0
51		pulizia staffe		00.21.21	31	31	0				31	0
52		fissaggio staffe		00.25.58	277	277	0				277	0
53		rotazione tavola		00.26.13	15	15	0				15	0
54		montaggio riferimenti		00.28.45	152	152	0				152	0
55		cambio guanti		00.29.33	48	0	48	rottura guanti			0	48
56		rotazione tavola		00.29.50	17	17	0				17	0
57		smontaggio parte riferimenti		00.36.00	370	370	0				370	0
58		montaggio parte riferimenti nuovi		00.40.15	255	255	0	tavola totale?			255	0
59		rotazione tavola		00.40.31	16	16	0				16	0
60		prova bloccaggio pezzi		00.41.23	52	52	0				52	0
61		rotazione tavola		00.41.41	18	18	0				18	0
62		serraggio riferimenti		00.42.18	37	37	0				37	0
63		rotazione tavola		00.42.38	20	20	0				20	0
64		caricamento pezzi		00.42.53	15	15	0				15	0
65		prova staffaggio		00.43.03	10	10	0				10	0
66	Tavola A	chiamata tavola A		00.43.19	16	16	0				16	0
67		pulizia tavola		00.44.01	42	42	0				42	0
68		deposito e prelievo nuove attrezzature		00.48.00	239	0	239			100	0	0
69		montaggio centraggi		00.48.25	25	25	0				25	0
70		controllo appoggi precedenti		00.01.36	96	96	0				96	0
71		smontaggio appoggi precedenti		00.02.08	32	32	0				32	0
72		pulizia appoggi		00.02.17	9	9	0				9	0
73		montaggio parziale appoggi		00.02.57	40	40	0				40	0
74		ricerca viti		00.04.09	72	0	72	caso particolare		100	0	0
75		fissaggio piastre	brugola T 8	00.05.41	92	92	0				92	0
76		montaggio riferimenti parte fissa	chiave 19 + brugola 6	00.06.04	23	23	0				23	0
77		rotazione tavola		00.06.15	11	11	0				11	0



# Appendice B – Esempio di programma robot

Questa appendice mostra per esteso il programma di movimentazione introdotto nel Cap.6, nonché un esempio di routine, chiamata nel main, che assolve all'operazione di scarico dei pezzi dal centro di lavoro.

## PRINCIPALE

```
1: CALL ZERO ; % reset, allineamento alle coordinate zero di riferimento
2: DO[11:ROBOT ACCESO]=ON ; % attivazione dell'uscita digitale 11
3: !Inizio Ciclo Continuo ;
4: DO[13:SICUREZZA PORTE]=ON ; % attivazione dell'uscita digitale 13
5: DO[12:EMERGENZA ROBOT]=ON ; % attivazione dell'uscita digitale 12
6: LBL[1] ;
7: R[7:CONTAPEZZI CP]=R[7:CONTAPEZZI CP]+1 ; % incremento del registro 7
8: CALL PR1CP158 ; % presa, con la prima pinza, del corpo CP158
9: J P[22] 100% CNT100 ; % moto CNT100, nello spazio dei giunti, al punto 22
10: J P[23] 100% CNT100 ;
11: CALL OKSCP158 ; % carico sul mandrino sinistro del tornio
12: J P[1] 100% CNT100 ;
13: J P[18] 100% CNT100 ;
14: J P[4] 100% CNT100 ;
15: CALL RIDCP158 ; % ripresa destra del pezzo
16: R[6:CONTAPEZZI 2CP]=R[6:CONTAPEZZI 2CP]+1 ; % incremento del registro 6
17: CALL PR2CP130 ; % presa con la seconda pinza, del corpo CP130
18: J P[13] 100% CNT100 ;
19: J P[14] 100% CNT100 ;
20: CALL OKDCP130 ; % carico sul mandrino destro del tornio
21: J P[15] 100% CNT100 ;
22: J P[16] 100% CNT100 ;
23: CALL RIDCP130 ; % ripresa destra del pezzo
24: J P[2] 100% CNT100 ;
25: ;
26: CALL PR1CP158 ; % presa, con la prima pinza, del corpo CP158
27: J P[10] 100% CNT100 ;
28: J P[11] 100% CNT100 ;
29: CALL OKSCP158 ; % carico sul mandrino destro del tornio
30: J P[12] 100% CNT100 ;
31: J P[19] 100% CNT100 ;
32: J P[20] 100% CNT100 ;
33: CALL RISCP158 ; % ripresa sinistra del pezzo
34: CALL PR2CP130 ; % presa con la seconda pinza, del corpo CP130
35: J P[21] 100% CNT100 ;
36: J P[24] 100% CNT100 ;
37: CALL OKDCP130 ; % carico sul mandrino destro del tornio
38: J P[25] 100% CNT100 ;
39: J P[26] 100% CNT100 ;
40: CALL RISCP130 ; % ripresa sinistra del pezzo
41: J P[27] 100% CNT100 ;
42: J P[17] 100% CNT100 ;
43: J P[8] 100% CNT100 ;
44: LBL[10] ;
45: DO[13:SICUREZZA PORTE]=ON ; % attivazione dell'uscita digitale 13
```

```

46: DO[11:ROBOT ACCESO]=ON ; % attivazione dell'uscita digitale 11
47: WAIT DI[9:FINE CICLO SW]=ON ; % attesa del segnale d'ingresso digitale 9
48: WAIT DI[10:OK PER SCARICO SW]=ON ; % e 10
49: IF DI[10:OK PER SCARICO SW]=ON AND DI[13:PALLET A SW]=ON,JMP LBL[20] ;
% salto condizionato dagli ingressi digitali 10 e 13
50: IF DI[10:OK PER SCARICO SW]=ON AND DI[14:PALLET B SW]=ON,JMP LBL[11] ;
% salto condizionato dagli ingressi digitali 10 e 14
51: JMP LBL[10] ;
52: LBL[11] ;
53: CALL SSWCP130 ; % scarico dal centro di lavoro del pezzo CP158
54: CALL DEPCP130 ; % deposito in lavatrice dei pezzi CP130
55: CALL RIPCP130 ; % ripresa del pezzo
56: UFRAME_NUM=1 ; % definizione sistema di riferimento utensile
57: J P[3] 100% CNT100 ;
58: J P[5] 100% CNT100 ;
59: WAIT DI[14:PALLET B SW]=ON ; % attesa del segnale d'ingresso digitale 14
60: CALL CSWCP130 ; % carico sul cdl di 2 pezzi CP130
61: LBL[20] ;
62: DO[13:SICUREZZA PORTE]=ON ; % attivazione dell'uscita digitale 13
63: DO[11:ROBOT ACCESO]=ON ; % attivazione dell'uscita digitale 11
64: UFRAME_NUM=1 ;
65: J P[6] 100% CNT100 ;
66: WAIT DI[9:FINE CICLO SW]=ON ; % attesa del segnale d'ingresso digitale 9
67: WAIT DI[10:OK PER SCARICO SW]=ON ; % e 10
68: IF DI[10:OK PER SCARICO SW]=ON AND DI[14:PALLET B SW]=ON,JMP LBL[10] ;
% salto condizionato dagli ingressi digitali 10 e 14
69: IF DI[10:OK PER SCARICO SW]=ON AND DI[13:PALLET A SW]=ON,JMP LBL[21] ;
% salto condizionato dagli ingressi digitali 10 e 13
70: JMP LBL[20] ;
71: LBL[21] ;
72: CALL SSWCP158 ; % scarico dal cdl di 2 pezzi CP158
73: CALL DEPCP158 ; % deposito in lavatrice dei pezzi CP158
74: CALL RIPCP158 ; % ripresa del pezzo
75: UFRAME_NUM=1 ;
76: J P[7] 100% CNT100 ;
77: J P[9] 100% CNT100 ;
78: WAIT DI[13:PALLET A SW]=ON ; % attesa del segnale d'ingresso digitale 13
79: CALL CSWCP158 ; % carico sul cdl di 2 pezzi CP158
80: JMP LBL[1] ;

```

La funzione seguente è quella sopra richiamata nelle istruzioni del tipo “CALL SSW...”.

#### SCARICO SW

```

1: J P[12] 100% CNT100 ; % moto CNT100, nello spazio dei giunti, al punto 12
2: DO[9:ROBOT FUORI INGOMBRO SW]=OFF ; % deasserimento del segnale d'uscita 9
3: WAIT DI[14:PALLET B SW]=ON ; % attesa del segnale d'ingresso 14
4: RO[2:CHIUDE P1]=OFF ; % sblocco della pinza 1
5: RO[1:APRE P1]=PULSE ; % apertura della pinza 1 (comando impulsivo)
6: RO[4:CHIUDE P2]=OFF ; % sblocco della pinza 2
7: RO[3:APRE P2]=PULSE ; % apertura della pinza 2 (comando impulsivo)
8: WAIT DI[9:FINE CICLO SW]=ON ; % attesa del segnale d'ingresso 9

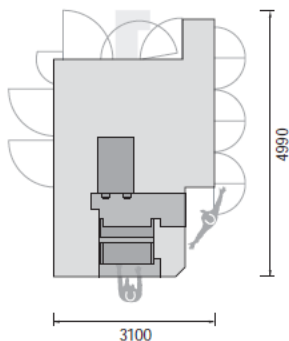
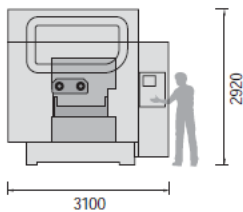
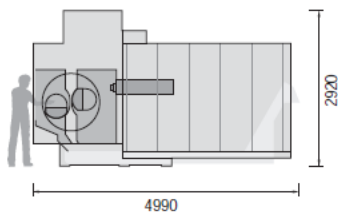
```

9: WAIT DI[10:OK PER SCARICO SW]=ON ;	% attesa del segnale d'ingresso 10
10:L P[3] 1500mm/sec CNT10 ;	% movimento lineare CNT10 con velocità specificata
11:L P[2] 300mm/sec FINE ;	
12: CALL CHIU_PZ1 ;	% chiusura pinza 1
13:L P[4] 300mm/sec CNT10 ;	
14:J P[6] 100% CNT10 ;	
15: RO[4:CHIUDE P2]=OFF ;	% sblocco della pinza 2
16: RO[3:APRE P2]=PULSE ;	% apertura della pinza 2 (comando impulsivo)
17:L P[7] 200mm/sec FINE ;	
18: CALL CHIU_PZ2 ;	% chiusura pinza 2
19:L P[10] 300mm/sec CNT10 ;	
20:L P[11] 1500mm/sec CNT50 ;	
21: DO[16:PEZZI SCARICATI SW ]=PULSE ;	% asserimento impulsivo del segnale d'uscita 16
22: DO[9:ROBOT FUORI INGOMBRO SW]=ON ;	% attivazione del segnale d'uscita 9
23: DO[19:START LAVAGGIO SW]=PULSE,0.5sec ;	% attivazione per 0,5 s dell'uscita digitale 19



# Appendice C – Datasheet centro di lavoro

Si riporta il datasheet del centro di lavoro a 4 assi presentato al Cap.6.



## ■ Working range

X-axis	400 mm
Y-axis (toolchange position)	450 mm (700 mm)
Z-axis	400 mm
Spindle distance	400 mm

Swivel table/end support with crown gear; swivelling time 0/180°

approx. 4 s

2 NC-rotary tables with end support, hydraulically locked, speed of face plate

33,3 rpm

## ■ Work spindle

Spindle taper	Hollow shank DIN 69893 – HSK – A63
Diameter of spindle bearings	80 mm

## ■ Power at S6/40% duty cycle (standard)

Power	2 x 25 kW/2.800 rpm
Max. torque	2 x 85 Nm
Speed range	1 – 12.500 rpm (1 – 17.500 rpm*)

## ■ Power at S6/40% duty cycle (option)

Power	2 x 35 kW/2.800 rpm
Max. torque	2 x 120 Nm (2 x 200 Nm, S6/25 % ED*)
Speed range	1 – 12.500 min <sup>-1</sup> (1 – 10.000 rpm*)

## ■ Feed rate

X, Z	1 – 50.000 mm/min
Y	1 – 50.000 mm/min
Max. feed thrust X, Y, Z	9.250 N

## ■ Tool magazine

Capacity	2 x 30 (2 x 60*) (2 x 92*)
Max. tool diameter	75 mm/160 mm (free adjacent place)
Max. tool length	300 mm
Max. tool weight	10 kg

## ■ Toolchange

Chip-to-chip time

approx. 3,8 s

## ■ Accuracy (according to VDI/DGQ 3441)

Positioning tolerance

T<sub>p</sub> = 0,010 mm

## ■ Connected load

Operating voltage	3 x 400 Volt, 50 Hz, TN-S/TN-C network
Total connected load	approx. 68 KVA
Mean air consumption	0,6 Nm <sup>3</sup> /min (6 bar)

## ■ CNC control system

GE Fanuc	16i
SIEMENS	SINUMERIK 840 D

## ■ Weight

Machine including switch cabinet

approx. 12.000 kg

## ■ Dimensions

machine installed, (W x H x L)	approx. 3,1 x 3,0 x 5,0 m
Transport dimensions (machine without peripheral equipment W x H x L)	approx. 3,1 x 3,0 x 4,2 m

(\*) = optional

# Appendice D – Funzionamento delle pompe

## D.1 Pompe

Le pompe sono macchine idrauliche operatrici che, ricevendo energia meccanica da un qualsiasi motore, la trasmettono, nella misura consentita dal rendimento del gruppo pompa-motore, al liquido che le attraversa. Sono impiegate per sollevare quantitativi d'acqua da un livello inferiore ad uno superiore, facendogli vincere un certo dislivello e conferendo all'acqua una spinta. Le pompe si possono classificare nelle due grandi categorie delle macchine a moto rotatorio e a moto alternativo. Queste ultime, che si riducono sostanzialmente al tipo a stantuffo, non vengono trattate in quanto poco impiegate od utilizzate per impieghi specifici.

Fra le pompe rotative non vengono prese in considerazione quelle ad ingranaggi, a capsulismi, a segmenti, ecc., e ci si limita a quelle centrifughe, oggi le più diffuse, che costituiscono la produzione dell'azienda ospitante.

### D.1.1 Prevalenza della pompa

Si consideri una pompa che sollevi l'acqua dal livello A al livello B. Per fare questo deve creare il vuoto nel tubo d'aspirazione, in modo tale che l'acqua vi salga spinta dalla pressione atmosferica, ed inviarla in pressione nel tubo di mandata.

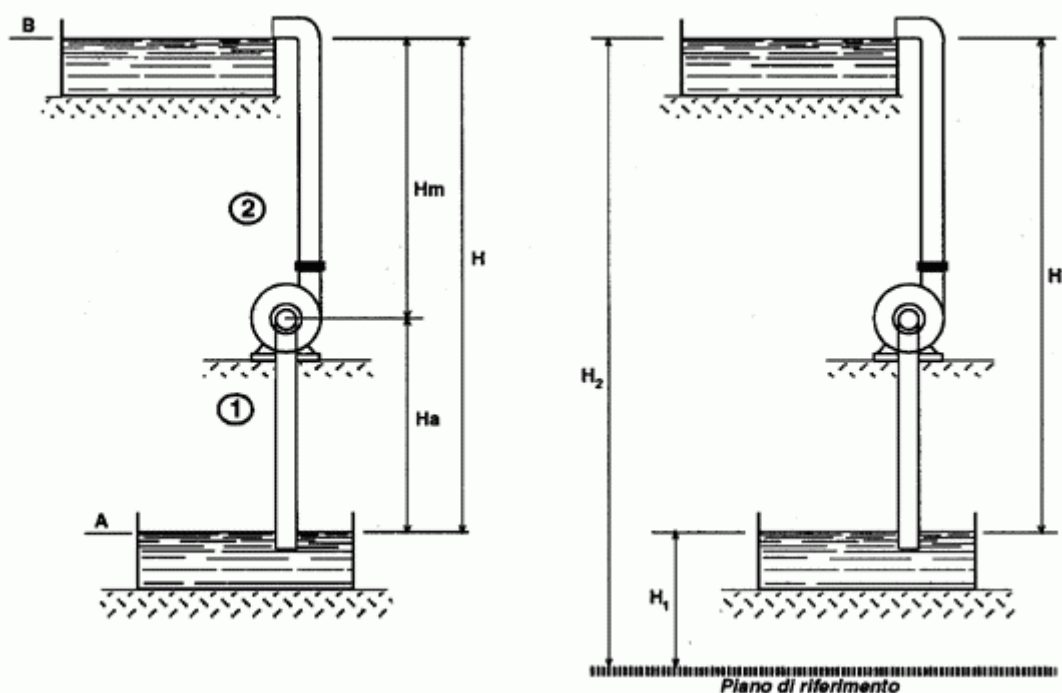


Figura D.1 – Schema di funzionamento di un impianto di sollevamento d'acqua a mezzo pompa e riferimenti per il calcolo della prevalenza. (1) tubo di aspirazione; (2) tubo di mandata

Si definisce:

- **altezza geodetica d'aspirazione  $H_a$**  la differenza di livello tra il punto A e la pompa,
- **altezza geodetica di mandata  $H_m$**  la differenza di livello tra il punto B e la pompa,
- **prevalenza geodetica  $H$**  la differenza tra i livelli del liquido alla mandata e all'aspirazione (Fig.D.1).

La prevalenza geodetica  $H$ , comunemente definita *prevalenza*, corrisponde quindi alla somma delle altezze geodetiche d'aspirazione  $H_a$  e di mandata  $H_m$ . Con riferimento alla Fig.D.1, se si misura i livelli dei punti A e B rispetto ad un unico piano di riferimento la prevalenza  $H$  è data dalla differenza:

$$H = H_2 - H_1$$

vale a dire dalla differenza tra il livello dell'acqua all'aspirazione e quello alla mandata, coincidente con l'altezza  $H$  di Fig.D.1. Si può determinare la prevalenza di una pompa misurando la differenza in metri esistente fra il livello dell'acqua d'aspirazione e quello di mandata: una pompa che aspira acqua da una vasca appoggiata al terreno, contenente un metro d'acqua e la solleva fino ad un serbatoio a 15 metri dal suolo ha una prevalenza  $H = 14$  m. In realtà nella vasca d'aspirazione ed in quella di mandata l'acqua è caratterizzata, oltre che da altezze diverse, anche diverse pressioni e velocità, per cui la pompa non le ha solo fornito un'energia potenziale sollevandola di un'altezza  $H_2 - H_1$ , ma le ha anche dato una pressione  $P_2 - P_1$  ed una velocità (quindi un'energia cinetica)  $V_2 - V_1$  corrispondenti alla differenza fra la pressione e la velocità finali ed iniziali. Nel passare attraverso le tubazioni e la pompa stessa l'acqua subisce dei rallentamenti e quindi delle perdite d'energia, definite *perdite di carico*, che si traducono in una minor prevalenza. Ad esempio, quando viene chiuso parzialmente il rubinetto della gomma con cui si lava l'auto, l'acqua esce più lentamente e non arriva più dove arrivava prima: la chiusura del rubinetto ha aumentato le perdite di carico, cioè si è verificata una perdita d'energia a discapito della prevalenza totale.

### D.1.2 Portata e potenza della pompa

La portata della pompa è il volume d'acqua, misurato in litri o metri cubi, che viene mosso dalla pompa nell'unità di tempo (generalmente secondi o minuti). La portata si misura pertanto in litri al secondo (l/s), litri al minuto (l/m), metri cubi all'ora (mc/h), ecc. La portata e la prevalenza sono i due elementi fondamentali che contraddistinguono le pompe.

La pompa, per sollevare una portata d'acqua  $Q$  fornendole una prevalenza totale  $H_t$  compie un lavoro di sollevamento che richiede una potenza  $P$  (misurata in kilowatt/ora), cioè un'energia, fornita attraverso un motore, definita dalla seguente espressione:

$$P = 9,8 * Q * H_t$$

La potenza così espressa è la *potenza utile*, cioè quella strettamente necessaria per sollevare la portata d'acqua  $Q$  all'altezza  $H$ . A causa delle inevitabili perdite d'energia la potenza utilizzata, cioè quella realmente necessaria per far funzionare la pompa, è maggiore e viene definita *potenza assorbita*. Il rapporto fra la potenza utile e quella assorbita è definito rendimento. Il rendimento è sempre inferiore all'unità perché in qualsiasi macchina operatrice la potenza utile è sempre minore di quella assorbita.

### D.1.3 Curve caratteristiche delle pompe

Prevalenza e portata seguono leggi di variazione diverse, essendo la prima proporzionale al quadrato della velocità e la seconda direttamente proporzionale alla velocità. All'aumentare della portata corrisponde una diminuzione della prevalenza, e la reciproca variazione di queste grandezze viene rappresentata in una curva chiamata *curva caratteristica*.

Dalla curva caratteristica, costruita sperimentalmente per ogni tipo di pompa, si può desumere quale sarà la prevalenza fornita dalla pompa per ogni valore di portata erogata (Fig.D.2a). Ne consegue che il valore di prevalenza di una pompa deve sempre essere riferito alla portata erogata. La curva caratteristica varia poi in funzione del numero di giri del motore, per cui in realtà ogni pompa è caratterizzata da una famiglia di curve caratteristiche, cioè da andamenti portate-prevalenze che variano in funzione del numero di giri (Fig.D.2b).

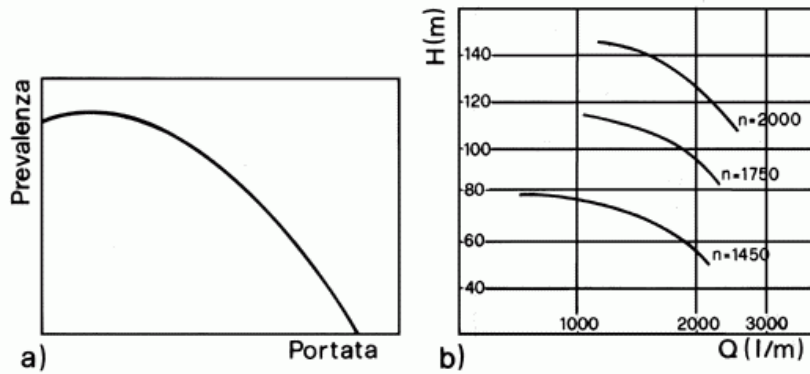


Figura D.2 – Curva caratteristica delle pompe. (2a) Curva teorica; (2b) Curva reale di una pompa centrifuga pluristadio per alte pressioni in funzione del numero di giri al minuto (n)

### D.1.4 Tipi di pompe

I tipi di pompe più comunemente impiegate nelle operazioni di protezione civile sono quelle *assiali* (o *elico-pompe*) e quelle *centrifughe*. Le pompe assiali possono spostare grandi quantità d'acqua, ma con prevalenze modeste e vengono impiegate soprattutto in bonifica, dove è necessario sollevare portate d'acqua ingenti con modesti dislivelli (pompe idrovore). Si tratta d'impianti di grandi dimensioni, quindi fissi, utilizzati normalmente per liberare dalle acque ampie zone che altrimenti non avrebbero scolo. In caso d'esondazioni fluviali le aree allagate possono essere prosciugate facendo confluire le acque fuoriuscite, attraverso canali esistenti o appositamente costruiti, verso queste pompe, adatte ad allontanare grandi quantità d'acqua. Le pompe centrifughe coprono ampi settori d'applicazione per la loro versatilità e per la possibilità di raggiungere forti prevalenze anche con portate elevate. Nelle operazioni di protezione civile vengono impiegate per lo spegnimento d'incendi, il prosciugamento di locali allagati, l'approvvigionamento idrico in casi d'emergenza.

### D.1.5 Le pompe centrifughe

Sono macchine idrauliche operatrici con le quali si ottiene il sollevamento dell'acqua per effetto della forza centrifuga. Una pompa centrifuga è composta essenzialmente da una parte rotante detta girante e da una parte fissa, o corpo di pompa, entro cui si muove l'acqua convogliata dalla forza centrifuga impressa dalla girante. L'acqua entra nel corpo di pompa attraverso il tubo di aspirazione e viene inviata, attraverso il movimento della girante, nel tubo di mandata. Il tubo di aspirazione è assiale rispetto alla girante, il tubo di mandata è radiale.

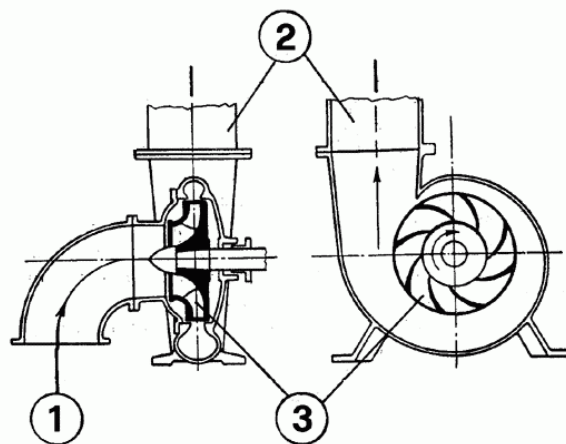


Figura D.3 – Rappresentazione schematica di una pompa centrifuga. (1) Tubo di aspirazione; (2) Tubo di mandata; (3) Girante;

Il movimento della girante determina una depressione nel tubo di aspirazione e l'acqua, spinta dalla pressione atmosferica, risale lungo il tubo e viene proiettata dalla girante sul corpo della pompa dal quale esce

attraverso il tubo di mandata (Fig.D.3). Le pompe centrifughe, a seconda della disposizione dell'albero di trasmissione che muove la girante, si distinguono in orizzontali e verticali. Le *pompe centrifughe orizzontali* sono accoppiate direttamente al gruppo motore, e a seconda che questo sia ad alimentazione elettrica o a benzina, si distinguono in elettropompe o motopompe. Sono pompe molto versatili, di dimensioni e peso contenuti, facilmente spostabili e trasportabili sia su automezzi sia a mano (pompe carrellate o barellate). Si prestano quindi sia per il prosciugamento di locali allagati che per l'uso antincendio. In quest'ultimo caso devono fornire alte pressioni all'acqua pompata, e questo si può ottenere con *pompe a giranti multiple o pluristadio*. L'acqua, all'uscita della prima girante, entra in una seconda e così via fino ad imboccare il tubo di mandata. La prevalenza della pompa è data dalla somma delle prevalenze delle singole giranti. Il numero di giranti è in funzione della pressione che si vuole avere alla mandata. Il limite delle pompe centrifughe orizzontali è la profondità massima d'aspirazione. Poiché è la pressione atmosferica che spinge l'acqua nel tubo d'aspirazione, la profondità massima da cui è possibile aspirare l'acqua è quella corrispondente alla pressione atmosferica, cioè a 10,33 m. In realtà, a causa delle perdite di carico, non è possibile sollevare l'acqua da una profondità superiore a 6-7 m dall'asse della pompa. Le *pompe centrifughe verticali* ovviano a questo inconveniente in quanto tutto il gruppo pompa può essere calato nella vasca o pozzo da cui estrarre l'acqua, riducendo a zero l'altezza d'aspirazione. Il gruppo motore rimane in superficie, accoppiato attraverso un albero di trasmissione oppure, come avviene più comunemente oggi con le pompe sommergibili o sommerse, realizzando in un unico corpo gruppo pompa e gruppo motore, necessariamente di tipo elettrico e perfettamente impermeabile all'acqua (Fig.D.4).

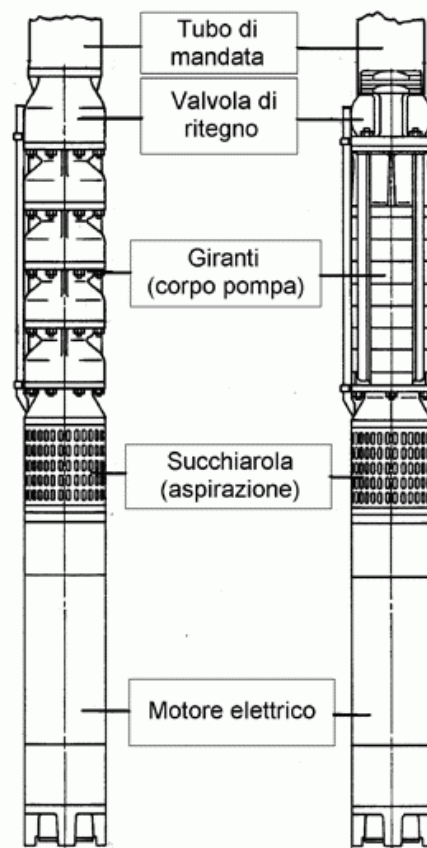


Figura D.4 – Elettropompe sommergibili a giranti multiple (pluristadio).

Le pompe sommergibili possono così essere calate sotto il livello dell'acqua, utilizzando il tubo stesso di mandata dell'acqua, ed evitare i problemi dell'altezza d'aspirazione. Questo tipo di pompa si presta per il prosciugamento di locali con livelli d'acqua profondi o con acque torbide, oppure per l'approvvigionamento idrico d'emergenza da pozzi. Essendo collocate molto spesso sotto il piano campagna devono fornire notevoli prevalenze, quindi adottare giranti multiple. Un altro inconveniente, nel caso d'impiego in emergenza, è costituito dal motore elettrico che può richiedere, in assenza d'alimentazione elettrica, l'impiego di un gruppo elettrogeno.



# Bibliografia

- [1] Jeffrey K. Liker, *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*, McGraw-Hill, 2004;
- [2] <http://www.leanmanufacturing.ch>, 8 marzo 2010;
- [3] <http://www.lean-manufacturing.it>, 18 febbraio 2010;
- [4] Antognazza A., Cunzi V., “La riduzione dei set-up e l’impatto sulla produzione snella”, *Logistica Management*, ottobre 2009;
- [5] Legnani G., *Robotica industriale*, Casa Editrice Ambrosiana, 2007;
- [6] Sciacivico L., Siciliano B., *Robotica industriale – Modellistica e controllo di robot manipolatori*, McGraw-Hill, 2000;
- [7] Boothroyd G., Knight W.A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, Taylor & Francis, 2005;
- [8] Home Italia – Fanuc Robotics: <http://www.fanucrobotics.it>, 15 dicembre 2009;
- [9] <http://www.rrrobotica.it>, 17 febbraio 2010;
- [10] Melchiorri C., *Corso di robotica industriale*, Università degli Studi di Bologna, 1994;
- [11] <http://www.emag.com/SW.82.0.html?&L=1>, 5 febbraio 2010;
- [12] FANUC Robotics, *Handling tool R-J3iB – Manuale per l’operatore*, ©Fanuc, 2003;
- [13] SW Emag, *Centro orizzontale di fresatura e alesatura BA400-2 / BA400-4 CNC*, Emag, 2003;
- [14] ISO International Standard Organization: <http://www.iso.ch>;
- [15] UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione: <http://www.unicei.it>;
- [16] <http://www.direttiva-macchine.it>, 3 marzo 2010.

**Nota:** tutte le fotografie presentate sono state autorizzate dall’azienda Pedrollo S.p.A. che ha ospitato il tirocinio.