

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Studio di fattibilità di un cambio pallet automatico per un centro di fresatura CNC



Relatore

Prof. Atzeni Eleonora

Candidato

Matteo Mangini

Aprile 2020

*A Diletta,
la donna della mia vita*

Abstract

Negli ultimi trent'anni il mondo legato ai sistemi di produzione ha subito dei profondi e radicali cambiamenti; non solo l'introduzione del controllo numerico ha permesso di sviluppare macchine indipendenti dall'intervento manuale, ma ha aperto la strada ad un'automazione sempre più massiccia. Le richieste sempre più insistenti per produttività e flessibilità hanno portato all'implementazione di sistemi automatici controllabili dall'unità di governo della macchina, con l'aggiunta di funzioni di diagnostica e verifica per soddisfare quanto proposto con il concetto di **Industria 4.0**. Tra tutte queste innovazioni si possono identificare i sistemi automatici di cambio pallet, i quali permettono alla macchina utensile un elevato grado di autonomia, con conseguenti miglioramenti in termini sia di tempo ciclo che di costo di produzione, rendendo le operazioni di carico e scarico pezzo completamente indipendenti dall'intervento umano. L'abbinamento del concetto di modularità a questi sistemi consente inoltre di studiare in maniera separata il sistema *APC* dal centro di lavoro, permettendo lo sviluppo di questo modulo a date caratteristiche richieste. Nelle pagine che seguono verrà sì presentato il percorso necessario all'implementazione di un sistema automatico di cambio pallet su un centro di lavoro di fresatura, senza però tralasciare le motivazioni che determinano lo studio iniziale.

Indice

1. INTRODUZIONE	1
1.1 EMCO-MECOF	1
1.1.1. PERSONE E CULTURA AZIENDALE	2
1.1.2. TECNOLOGIA E MEZZI TECNICI	2
2. AUTOMAZIONE INDUSTRIALE	5
2.1 LEAN MANUFACTURING	9
2.1.1 ZERO SPRECHI (MUDA)	10
2.1.2 JUST-IN-TIME	11
2.1.3 JIDOKA	11
2.1.4 PRINCIPI FONDANTI IL LEAN MANUFACTURING	12
2.2 AGILE MANUFACTURING	12
2.3 TEORIA DEI VINCOLI (TOC)	13
2.4 INDUSTRIA 4.0	15
3. AUTOMAZIONE NELLE MACCHINE UTENSILI	17
3.1 MACCHINE UTENSILI TRADIZIONALI	17
3.2 TEMPO E COSTO DI TAGLIO	19
3.3 OEE	20
3.4 CONTROLLO NUMERICO NELLE MACCHINE UTENSILI	21
3.4.1 STORIA DEL CONTROLLO NUMERICO	21
3.4.2 ARCHITETTURA CNC	22
3.4.3 DNC E INDUSTRIA 4.0	27
3.4.4 ARCHITETTURA DNC	29
3.5 MACCHINE UTENSILI A CNC	31
3.6 CENTRI DI LAVORO DI FRESATURA A 5 ASSI SIMULTANEI	32
3.6.1 MODULARITÀ	36
3.6.2 AUTOMATIC TOOL CHANGER (ATC)	37
4. CAMBIO PALLET	41
4.1 INTRODUZIONE	41
4.2 CLASSIFICAZIONE SISTEMI DI CAMBIO PALLET	42
4.2.1 SISTEMI MANUALI	43
4.2.2 SISTEMI ROBOTIZZATI	44
4.2.3 SISTEMI AUTOMATICI	46
4.3 AUTOMATIC PALLET CHANGER (APC)	47
4.3.1 SHUTTLE PALLET CHANGER	48
4.3.2 MANIPULATOR PALLET CHANGER	49
4.3.3 SWING PALLET CHANGER	50
4.4 MAGAZZINI PORTA-PALLET	52

4.4.1	MAGAZZINO LINEARE FISSO	52
4.4.2	MAGAZZINO LINEARE A RICIRCOLO DI PALLET	53
4.4.3	MAGAZZINO CIRCOLARE FISSO	54
4.4.4	MAGAZZINO CIRCOLARE A TAVOLA ROTANTE	55
4.5	SISTEMI DI CENTRAGGIO E BLOCCAGGIO PALLET	55
4.6	CARATTERIZZAZIONE MACCHINA UTENSILE DOTATA DI SISTEMA APC	57
5.	CASO DI STUDIO: UMILL 1500	61
<hr/>		
5.1	UMILL 1500: CARATTERISTICHE TECNICHE	62
5.2	BENCHMARK	65
5.2.1	CARATTERISTICHE ASSI LINEARI	67
5.2.2	CONCEPT MACCHINA E BASAMENTO	67
5.2.3	TESTA DI FRESATURA	69
5.2.4	TAVOLA ROTANTE (FRESATURA E TORNITURA)	72
5.2.5	MAGAZZINO UTENSILI	74
5.2.6	DIMENSIONI E PESO MACCHINA BASE	75
5.2.7	CARATTERISTICHE CAMBIO PALLET AUTOMATICO	76
5.3	CAMBIO PALLET: VALUTAZIONI PRELIMINARI	77
5.3.1	MAKE OR BUY	79
5.3.2	SPECIFICHE MACCHINA PER SISTEMA CAMBIO PALLET	81
5.4	CAMBIO PALLET: SCELTA E SVILUPPO	82
5.5	MACCHINA STANDARD VS APPLICAZIONE APC	87
5.5.1	CARENATURA	88
5.5.2	CARRO PORTA-PALLET	90
5.5.3	ARMADIO IDRAULICO E PNEUMATICO	91
5.6	CARATTERISTICHE PREVISTE PER VERSIONE DEFINITIVA	92
6.	CONCLUSIONI	95
<hr/>		
7.	BIBLIOGRAFIA	97
<hr/>		
7.1	SITOGRAFIA	97
7.1.1	CAPITOLO 2	97
7.1.2	CAPITOLO 3	98
7.1.3	CAPITOLO 4	98
7.1.4	CAPITOLO 5	99
7.2	DISPENSE UNIVERSITARIE E ARTICOLI	99
8.	RINGRAZIAMENTI	101
<hr/>		

Indice figure

Figura 2.1: Modello piramidale per organizzazione automazione industriale. Fonte Treccani, Enciclopedia della Scienza e della Tecnica.	7
Figura 2.2: Rappresentazione schematica del <i>Lean Manufacturing</i>	10
Figura 3.1: Esempio di controllo di posizione e velocità in anello chiuso applicato su un asse lineare della macchina utensile.	23
Figura 3.2: Raffigurazione schematica dell'unità di governo e delle interfacce con macchina utensile, operatore e sistema <i>DNC</i>	24
Figura 3.3: Rappresentazione di un attuatore elettro-meccanico (EMA). Immagine ricavata da presentazione del corso di "Meccatronica".....	26
Figura 3.4: Struttura HW del <i>DNC (Direct Numerical Control)</i>	29
Figura 3.5: Struttura HW del <i>DNC (Distributed Numerical Control)</i>	30
Figura 3.6: Centro di lavoro di fresatura Umill 1800, prodotto da Emco-Mecof.....	32
Figura 3.7: Rappresentazione delle tre soluzioni più comuni per garantire il controllo di 5 assi su un centro di lavoro di fresatura.	35
Figura 3.8: Sistema di cambio utensile a camma (o <i>CUT</i>).....	39
Figura 4.1: Macchina utensile <i>CNC</i> con aggiunta di un sistema di cambio pallet manuale.....	44
Figura 4.2: Braccio robotico articolato in fase di sollevamento pallet.	46
Figura 4.3: Centro di lavoro asservito da un sistema di cambio pallet con <i>shuttle</i> roto-traslante. ...	48
Figura 4.4: Sistema di cambio pallet automatico con manipolatore polare e telescopico integrato nel magazzino porta-pallet.	49
Figura 4.5: Sistema di cambio pallet con forca a rotazione di 180°. Immagine da Emco-Mecof. ...	50
Figura 4.6: Esempio di applicazione di un sistema di cambio pallet a forca roto-traslante in una macchina utensile dotata di un supporto pallet brandeggiabile.	51
Figura 4.7: Rappresentazione virtuale 3D di magazzino lineare fisso applicato ad un centro di fresatura. Immagine fornita da Emco-Mecof.	53
Figura 4.8: Rappresentazione virtuale tridimensionale di un centro di lavoro con un magazzino a ricircolo di pallet, con presenza di un robot antropomorfo.	53
Figura 4.9: Rappresentazione virtuale 3D di magazzino circolare fisso applicato ad un centro di fresatura. Immagine fornita da Emco-Mecof.	54
Figura 4.10: Magazzino circolare a tavola rotante con (a) <i>swing pallet changer</i> oppure (b) <i>manipulator pallet changer</i>	55
Figura 4.11: Raffigurazione di un cono di centraggio (a) e del relativo anello di riferimento (b). ...	56
Figura 5.1: Render tridimensionale del centro di lavoro Umill 1500 prodotto da Emco-Mecof.	62
Figura 5.2: Concept macchina diversi per la movimentazione lungo i tre assi lineari.	68
Figura 5.3: DuMe esempi di proposte di sistemi di cambio pallet valutate durante lo studio.....	83
Figura 5.4: Rappresentazione schematica del magazzino pallet applicato ad <i>UMILL 1500</i>	85

Figura 5.5: Applicazione del sistema <i>APC</i> con magazzino lineare a <i>UMILL 1500</i> (particolare di carenatura e basamento).....	87
Figura 5.6: Dettaglio del portellone dell' <i>UMILL 1500</i> con sistema di apertura motorizzato.	88
Figura 5.7: Dettaglio della carenatura del centro di lavoro <i>UMILL 1500</i>	89
Figura 5.8: Focus su gioco tra manipolatore e carenatura in fase di scarico pallet.	89
Figura 5.9: Tavola roto-traslante presente su versione standard del centro di lavoro di fresatura <i>UMILL 1500</i>	90
Figura 5.10: Carro porta-pallet roto-traslante previsto per applicazione sistema di cambio pallet su centro di lavoro <i>UMILL 1500</i>	91

Indice tabelle

Tabella 5.1: Specifiche <i>UMILL 1500</i> standard	64
Tabella 5.2: Tabella di riferimento per valutazione di <i>BENCHMARKING</i>	66
Tabella 5.3: Caratteristiche assi lineari	67
Tabella 5.4: Materiale basamento	69
Tabella 5.5: Testa di fresatura.....	71
Tabella 5.6: Tavola rotante (fresatura e tornitura)	72
Tabella 5.7: Magazzino utensili	75
Tabella 5.8: Dimensioni e peso macchina.....	75
Tabella 5.9: Caratteristiche cambio pallet automatico competitors	76
Tabella 5.10: Vantaggi e svantaggi <i>Make or Buy</i>	80
Tabella 5.11: Caratteristiche principali del sistema <i>APC</i> scelto	86
Tabella 5.12: Macchina standard vs applicazione <i>APC</i>	93

1. Introduzione

La presente attività di tesi ha come obiettivo lo studio di un sistema ad elevata automazione da implementare ad un centro di lavoro di fresatura a 5 assi simultanei; per l'azienda ospitante risulta infatti fondamentale adeguarsi alle nuove richieste del mercato delle macchine utensili, dove risulta sempre più importante la gestione ottimale dei tempi di produzione e di fermo macchina.

Per questo motivo l'attività è stata incentrata sullo studio di un nuovo sistema di cambio pallet automatico da proporre come opzione per il centro di fresatura verticale *UMILL 1500*, uno dei prodotti di punta dell'azienda Mecof S.r.l.

All'interno di quest'ultima è stata svolta l'intera attività, precisamente presso l'ufficio tecnico meccanico di ricerca e sviluppo; assieme al personale presente è stato così possibile sviluppare lo studio che verrà presentato nelle prossime pagine in maniera dettagliata.

La trattazione verrà così suddivisa in diverse parti, con l'obiettivo di fornire una completa comprensione del problema affrontato e delle soluzioni adottate per garantire il migliore compromesso tra l'utilizzo di questo nuovo sistema e le caratteristiche della macchina standard.

Per questo motivo, inizialmente si è provveduto all'introduzione del concetto di *Industria 4.0* e *Lean Manufacturing*, fondamenti per l'introduzione sempre più massiccia di sistemi automatici all'interno di ambienti produttivi. Successivamente si scende maggiormente nel dettaglio, con descrizioni approfondite sulle peculiarità di macchine utensili come i centri di lavoro, fino ad arrivare a quella in esame. Infine, verrà proposto lo studio sul sistema automatico di cambio pallet da applicare su tale centro di lavoro di fresatura.

1.1 *Emco-Mecof*

L'azienda MECOF S.r.l., con sede a Belforte Monferrato (AL), fa parte del gruppo internazionale EMCO. È stata fondata nel 1947 e si è specializzata nel tempo nella costruzione di macchine per fresatura ed alesatura orizzontale a montante mobile, macchine a portale *GANTRY* e centri di lavoro verticali, di grande versatilità, precisione e rigidità, divenendo oggi azienda leader a livello internazionale nel settore delle macchine utensili ad alta velocità.

I vantaggi tecnologici legati all'unicità dei concetti strutturali, quali la termo-simmetria, la totale gestione degli errori geometrici, l'affidabilità dell'impiantistica, oltre alla forte customizzazione di ogni singolo progetto porta ad offrire a tutte le tipologie di clientela un prodotto ad altissima qualità che determina un valore aggiunto in tutti gli ambiti legati alla produzione.

Il miglioramento continuo e il costante investimento nella ricerca tecnologica hanno portato la compagnia ad offrire sempre prodotti ad alto contenuto innovativo e soluzioni sempre all'avanguardia per rispondere tempestivamente alle svariate richieste di mercato. Soluzioni di questo tipo hanno determinato il successo della clientela giustificato dall'investimento in un prodotto di valore.

Nel mercato specifico delle macchine utensili, l'azienda MECOF si occupa della progettazione e produzione di centri di fresatura verticali e orizzontali ad alta velocità con grandi zone di lavoro.

I settori industriali che fanno ricorso alla tecnologia della fresatura ad alta velocità, serviti dalla MECOF, sono in particolare quello aerospaziale ed automobilistico, con potenziali applicazioni anche nel settore tecnologico-medicale.

Nel settore *aerospaziale*, dove il materiale da asportare costituisce il 90% del grezzo, uno dei parametri critici nella valutazione della macchina è la quantità di volume di materiale da asportare nell'unità di tempo e la difficoltà della lavorazione di alcuni materiali ostili al taglio.

Nel settore *automobilistico* invece, l'*High Speed Machining* ha trovato inizialmente applicazione per le operazioni di semi-finitura e di finitura, dove si apprezza più facilmente il grosso vantaggio ottenibile in termini di riduzione dei tempi di lavorazione. Inoltre, in tale ambito e lo *stampista* ha dovuto modificare il modo di affrontare le lavorazioni, non pensando più a grosse frese che asportano grossi spessori di materiali molto lentamente, ma frese più piccole che asportano spessori inferiori e che si muovono molto velocemente.

Pertanto, in questi settori le macchine impiegate, in particolare fresatrici, devono essere in grado di lavorare a cinque assi e in continuo per garantire una qualità superficiale molto elevata di tutte le superfici funzionali e una lunga durata degli stampi stessi. La medesima tecnologia trova applicazione nella meccanica generale e si sta diffondendo anche nel settore *tecnologico medicale*, con vari benefici.

1.1.1. *Persone e cultura aziendale*

Ad oggi l'azienda vanta di 130 dipendenti, di cui 71 *addetti all'assemblaggio macchine*, 30 *impiegati tecnici*, 23 *addetti operativi per funzioni* (amministrative, vendite, marketing, acquisti, logistica, qualità), 2 *manager*, 2 *human resources*. La MECOF sostiene periodicamente ingenti investimenti nella formazione del personale con un continuo aggiornamento delle competenze tramite la partecipazione a corsi esterni, a fiere di settore e alla consultazione di riviste specializzate.

Secondo la filosofia aziendale, la formazione del personale è un momento fondamentale e di crescita anche per l'organizzazione, oltre che uno strumento in grado di aumentare l'integrazione dei dipendenti e la percezione della vicinanza all'azienda e di conseguenza il grado di coinvolgimento nel proprio lavoro. L'ambiente lavorativo si presenta quindi alquanto gioviale, flessibile e dinamico, consentendo in questo modo un'ampia valorizzazione e un maggior grado di specializzazione delle *core competence*.

1.1.2. *Tecnologia e mezzi tecnici*

L'azienda si serve di sistemi CAD (CATIA V5, Eplan V8) e di simulatori a supporto della progettazione, sistemi software di tipo CAM per la programmazione e l'interpolazione delle traiettorie degli assi e di un software per il gestionale.

Il *know-how* aziendale è costituito da diversi brevetti, dall'esperienza in più di 60 anni di attività e dalla continua ricerca di componenti innovativi sul mercato.

Ogni addetto al montaggio macchina è equipaggiato di un carrello personale in cui sono presenti tutta una serie di utensili e grezzi utilizzati quotidianamente, come ad esempio:

- Calibri, squadre e cubi di granito, piani di collaudo (strumenti di misurazione manuale);
- Attrezzature di allineamento e di montaggio;

Sono inoltre a disposizione del personale attrezzature per la movimentazione interna dei componenti (per esempio transpallet e carrelli su rotaie) e macchinari per revisione e adattamento pezzi (rettificatrici, torni e frese, con personale specializzato nell'utilizzo degli stessi).

L'azienda dispone di due fabbricati industriali che si sviluppano su una superficie totale di 10000 mq. e su un'altezza media di 10 m, di cui la maggior parte attrezzata con cave standard a pavimento per il posizionamento delle macchine. Sono a disposizione per le movimentazioni delle macchine e dei particolari un totale di dieci carroponti, tre carrelli elevatori e diversi carrelli su rotaie, transpallet e carrelli a mano.

Il magazzino interno si sviluppa su una superficie di 1500 mq ed una scaffalatura fino a 8 m di altezza.

Per le operazioni di collaudo dei particolari meccanici sono utilizzate due macchine di misura a coordinate e diversi strumenti di misurazione manuale.

Le operazioni di assemblaggio sono organizzate attorno a dei banchi di lavoro per i sottogruppi fondamentali della macchina, mentre ruotano attorno alla macchina per il montaggio finale con l'aiuto di due piattaforme aeree. Di particolare importanza risulta l'attrezzatura per il controllo degli allineamenti, costituita da mandrini e comparatori.

Per le prove di fresatura sono disponibili diversi set di utensili e semilavorati grezzi.

2. Automazione industriale

Si andrà così trattare in maniera adeguatamente approfondita l'argomento relativo all'automazione industriale, soffermandosi sugli aspetti di principale interesse per la trattazione; ciò risulta utile soprattutto per la definizione dei concetti fondanti lo studio della presente tesi, poiché garantisce la definizione della filosofia che ha portato all'introduzione di sistemi automatici all'interno di un qualunque sistema produttivo.

Per prima cosa occorre definire cosa si intende con il termine "Automazione" al fine di determinare con certezza l'ambiente su cui si focalizza questa parte di trattazione; in particolare risulta alquanto complicato darne una spiegazione esauriente poiché questo argomento è caratterizzato di diverse sfumature. Il termine introdotto in precedenza è nato principalmente per identificare tutto ciò che garantisce il corretto funzionamento di una macchina o di un processo, in maniera automatica; da ciò ne consegue che il contributo dell'uomo risulta alquanto marginale, o almeno ridimensionato rispetto a quanto riscontrabile nell'industria tradizionale.

Per fare in modo che tutto questo sia applicabile, si rivela necessaria l'applicazione di conoscenze specifiche di diversi ambiti, partendo da basi di meccanica fino all'elettronica e all'informatica; tutti questi rami dovranno necessariamente interfacciarsi, rendendo infine possibile l'attuazione e il controllo di ogni processo produttivo industriale. Si rende possibile in questo modo la valutazione dello stato della macchina automatica in ogni sua parte, la produttività, eventuali anomalie e altri fattori di cui si discuterà successivamente.

Per quanto riguarda le motivazioni che stanno alla base dell'applicazione dell'automazione sia nel mondo industriale che in altri settori, si può fare riferimento a quanto indicato nell'enciclopedia TRECCANI, dove si afferma che l'automazione *[...viene applicata, oltre che a processi di produzione industriale per conseguire aumento di produttività, migliore qualità e maggiore uniformità dei prodotti, minor costo di produzione ecc., e a problemi d'ambito militare, anche a servizi pubblici e privati per ottenere riduzione dei costi e miglioramento di qualità e sicurezza, all'organizzazione aziendale per perfezionare la funzionalità dei diversi servizi, nella realizzazione di congegni e dispositivi di protezione della vita umana (specie in alcune lavorazioni meccaniche e nella manovra di macchinari e di apparecchiature elettriche).]*¹

La citazione appena fornita mette a disposizione una definizione alquanto generale del termine "Automazione", rendendo difficoltosa la sua applicazione diretta nella presente tesi; allo stesso tempo permette però di osservare come questi concetti, se applicati correttamente, siano in grado di portare forti benefici in diversi ambiti.

Per quanto riguarda il settore industriale, risultano necessari degli approfondimenti sul tema, con l'obiettivo di caratterizzare l'argomento che è alla base dell'applicazione di sistemi come quello in esame e del contributo che essi sono in grado di garantire all'interno di un sistema produttivo.

Si andrà così a sviluppare una trattazione completa, volta a definire nella maniera più approfondita possibile il concetto di automazione industriale e i principi fondanti la sua applicazione; al fine di non appesantire in maniera eccessiva il discorso principale, gli approfondimenti ai principali argomenti trattati verranno forniti nei capitoli dedicati in seguito.

Il primo problema da affrontare risulta essere quello relativo al miglioramento del sistema produttivo della singola azienda; a causa dell'elevato numero di variabili presenti, non sempre esiste una soluzione univoca, ma potrebbero esservene molteplici. Si farà così riferimento al concetto di

¹ Per approfondimenti, prendere visione della pagina web <http://www.treccani.it/enciclopedia/automazione/>

Lean Production, il quale fornisce delle linee guida per la scelta di sistemi in grado di garantire miglioramenti netti della realtà industriale.

Si cercherà di semplificare il più possibile questo argomento, per quanto ampio, andando ad individuare tutti gli aspetti che lo caratterizzano; parallelamente risulterà necessario analizzare quanto proposto, per registrare la relazione presente tra questi concetti e l'applicazione di sistemi automatici.

Si possono così elencare i cinque principi fondanti la Lean Production:

1. Identificazione del valore per il cliente;
2. Eliminazione degli sprechi;
3. Creazione del flusso di attività generanti valore;
4. Miglioramento continuo;
5. Flusso del valore tirato dal cliente.

Il principio fondamentale che tende a collegare tutti questi aspetti risulta essere l'abbattimento degli sprechi, soprattutto per quanto concerne i tempi improduttivi legati alle macchine utilizzate; ciò risulta possibile una volta applicati correttamente i principi esposti nella Lean Production, nei limiti imposti anche dall'ambiente produttivo in cui essa verrà applicata.

Perché questi concetti risultino applicabili, risulta necessario un interfacciamento continuo tra l'ambiente gestionale-amministrativo e l'area produttiva; ciò permette di strutturare in maniera efficiente il ciclo di produzione, unitamente alla tipologia di macchine a disposizione e alle caratteristiche di ognuna di esse.

Questi concetti risultano applicabili in molte situazioni, sia che si parli di reparti specializzati sia di linee produttive dedicate ad una famiglia di prodotti; risulta però altrettanto vero che si devono implementare concetti relativi all'ambiente specifico in cui si andrà ad operare.

Giusto a titolo di esempio si possono citare altre due filosofie di gestione, le quali risultano più "giovani" rispetto alla precedente **Lean Production**:

1. **Agile Manufacturing**.
2. **Teoria dei vincoli**.

Entrambe le proposte elencate precedentemente sono nate per sopperire a richieste relative ad un settore specifico, come verrà poi presentato in seguito; solo successivamente esse hanno trovato applicazione in maniera più generale, risultando altresì utili qualora implementate alla filosofia di partenza.

La prima proposta citata, ovvero l'approccio identificato con il termine **Agile**, risulta essere estremamente recente; infatti solo nei primi anni del XXI secolo sono stati identificati i principi tecnici fondamentali, in seguito alla pubblicazione del "*Manifesto per lo sviluppo agile di software*". Lo scopo principale, all'inizio, risultava essere quello di snellire e velocizzare la procedura di gestione nella creazione di software o programmi IT. Successivamente questa filosofia è stata applicata anche in altri settori con ottimi risultati; si riscontrano in ogni caso diverse analogie con la **Lean Production** precedentemente introdotta e si rimanda al capitolo dedicato per ulteriori informazioni a riguardo.

Si riscontrano in ogni caso ottimi benefici in caso di applicazione di questa filosofia di gestione, i quali potranno essere incrementati qualora le venissero affiancati alcuni concetti relativi alla **Lean Production**. Entrambe infatti ricercano un miglioramento della competitività, anche se attraverso percorsi differenti:

- **Agile**: incremento della flessibilità per sopperire ad una domanda variabile;
- **Lean**: Riduzione sprechi per ottimizzare il valore aggiunto del prodotto.

Risulta in questo modo possibile integrare le due filosofie, adeguandole al contesto di applicazione e all'obiettivo da conseguire.

Successivamente si potrebbe citare anche la **Teoria dei vincoli** (o “Theory of Constraints-TOC” di Eliyahu M. Goldratt), la quale fornisce preziose indicazioni sulla gestione dei colli di bottiglia e delle risorse critiche. Come in precedenza, si rimanda al capitolo dedicato per ulteriori approfondimenti; per quanto riguarda la presente trattazione, si può dire che questa teoria trova maggiore applicazione nei sistemi produttivi organizzati in reparti o isole produttive. Al contrario per sistemi produttivi sviluppati “per linee” si tende a preferire l’approccio proposto dalla Lean Production; si rivela di estrema efficacia una loro applicazione congiunta sull’analisi della produzione, poiché complementari, una volta bilanciato adeguatamente il contributo dei due approcci. Risulta infatti possibile ottenere ottimi risultati in qualsiasi ambito produttivo, sia per quanto riguarda il processo produttivo (flusso continuo, per commessa) sia le possibili configurazioni dello stesso (reparti, celle, linee, postazione fissa, ecc.).

Si nota così che l’ottimizzazione del processo produttivo passa attraverso l’applicazione di queste due filosofie, singolarmente oppure in maniera congiunta; in questo modo risulta possibile effettuare la scelta migliore per quanto riguarda le risorse da adottare all’interno del sistema considerato.

Parallelamente alle filosofie appena introdotte, si è osservato un continuo sviluppo della tecnologia implementabile all’interno di un sistema produttivo; ciò è riscontrabile sia per quanto riguarda le macchine presenti in un ambiente produttivo, sia per i sistemi di gestione delle informazioni.

Il concetto di automazione industriale risulta strettamente legato a quanto proposto dai concetti descritti in precedenza; essa infatti ebbe origine con l’intento di sostituire l’uomo in compiti nocivi per l’operatore oppure laddove la forte ripetibilità avrebbe portato alla sua alienazione. Successivamente però tali sistemi vennero implementati nei sistemi produttivi al fine di ottenere forti miglioramenti in termini di efficienza e produttività, con una conseguente riduzione degli scarti; tutto questo risulta in linea con quanto prescritto dalla **Lean Production**.

Per fare in modo che l’automazione venga applicata nella maniera corretta all’interno di un ambiente industriale, si deve prevedere un’organizzazione aziendale riconducibile ad un semplice modello a piramide; alla base sono presenti i macchinari e i dispositivi utili alla produzione, fino a giungere alla direzione (apice della piramide, vedi “Figura 2.1”) passando attraverso i vari livelli di gestione e controllo.



Figura 2.1: Modello piramidale per organizzazione automazione industriale. Fonte Treccani, Enciclopedia della Scienza e della Tecnica.

Si osserva comunque che l’automazione industriale, anche se applicata in forme diverse in funzione dell’ambiente e delle finalità, risulta utile laddove permette di conseguire gli obiettivi proposti dalle filosofie gestionali precedentemente indicate; per fare in modo che tutto questo sia possibile, ogni sistema utilizzato si comporrà di alcuni componenti fondamentali.

Essi si possono suddividere in diverse categorie² in funzione dei compiti assegnati, elencate di seguito:

1. Sensori:
 - a. Misurazione grandezze di processo;
 - b. Acquisizione feedback;
 - c. Diagnostica.
2. Attuatori:
 - a. Comandi, segnalazioni;
 - b. Azionamenti;
 - c. Controllo variabili di processo (riscaldatori, umidificatori, ecc.).
3. Sistemi di elaborazione:
 - a. Unità intelligenti per comando;
 - b. Unità intelligenti per supervisione e interfaccia operatore;
 - c. Unità intelligenti per il rilevamento, memorizzazione, trasmissione e gestione dei dati.

Per quanto generica, questa classificazione permette di delineare quali sono i componenti principalmente utilizzati in ognuno dei sistemi automatici presenti in un ambiente industriale; tutti questi elementi devono poter comunicare ed interfacciarsi tra loro al fine di garantire il corretto funzionamento del processo.

Perché la loro applicazione risulti utile all'interno di un sistema produttivo, si deve far riferimento al modello piramidale proposto in "Figura 2.1"; risulta infatti sempre più importante l'interfaccia tra ambiente produttivo e direzione aziendale al fine di raggiungere gli obiettivi prefissati. Si rivela così fondamentale il flusso di informazioni tra i due ambienti appena citati, al fine di combinare il processo produttivo automatizzato con l'obiettivo di ottimizzazione dei costi e degli scarti.

Proseguendo con questo discorso, si potrebbe ricadere nel concetto di *Industria 4.0* e la conseguente interconnessione tra macchine automatiche e ambiente gestionale; seguendo questa logica, si nota come l'obiettivo finale sia quello di centralizzare ogni informazione del processo automatico, macchine comprese.

In questo modo tutti i dati risultano direttamente accessibili da chiunque, permettendo di controllare l'efficienza dell'intero sistema.

In definitiva, maggiore è il grado di automazione del sistema in esame, più facile risulterà la verifica dello stesso per perseguire quanto prescritto da **Lean Production** e **Teoria dei vincoli** in termini di miglioramento continuo³; nel caso venissero riscontrate delle inefficienze, esse si potranno valutare e successivamente apportare le dovute correzioni in tempi di molto più brevi rispetto a quanto era possibile fare nel passato.

Una volta completata la trattazione principale, si andrà ad approfondire quanto proposto dalle diverse filosofie di gestione del processo produttivo introdotte, con l'obiettivo di presentarle nella loro interezza. In maniera più generale verranno invece presentati i concetti di **Industria 4.0**, poiché risulterà utile principalmente sotto l'aspetto di centralizzazione delle informazioni.

² Le medesime categorie verranno ritrovate all'interno del controllo numerico relativo alle macchine utensili; si rimanda perciò al capitolo 3.4.2 *Architettura CNC* per informazioni più approfondite.

³ Identificato con il termine giapponese *kaizen*.

2.1 *Lean Manufacturing*

La Lean Production (o Lean Manufacturing), concepita e sviluppata presso gli stabilimenti Toyota a metà del secolo scorso, è un insieme di principi e metodi applicabili in un sistema produttivo, con l'obiettivo finale di migliorare il rendimento globale dell'azienda interessata.

Al fine di comprendere quanto questo principio risulti indispensabile al giorno d'oggi, si rivela necessario analizzare le metodologie di produzione applicate negli ambienti produttivi del passato.

Si osserva innanzitutto come l'area produttiva del passato si basava su una strategia di produzione massiva, con conseguente sfruttamento degli impianti presenti fino al loro limite. In questo modo si era in grado di ottenere un'elevata produttività della singola macchina, accettando però una qualità di produzione non eccelsa e, di conseguenza, un certo quantitativo di scarti e/o rilavorati; il fine ultimo di questa impostazione produttiva risultava essere alla fine la saturazione del magazzino prodotti finiti⁴.

La variazione delle esigenze di mercato ha determinato la nascita di uno studio volto alla definizione di una nuova filosofia produttiva, incentrata non più su di una produzione massiva, ma focalizzata sul valore del venduto; in questo modo diventò di maggiore interesse il sistema produttivo nel suo complesso. L'obiettivo finale risultava comunque legato alla riduzione degli sprechi, sia dal punto di vista produttivo (riduzione scarti e aumento qualità) che logistico.

Fu così che tra gli anni '40 e '50 del Novecento il *TPS (Sistema Produttivo della Toyota)* risultò essere il primo luogo di applicazione di una nuova filosofia produttiva incentrata sull'ottimizzazione del processo produttivo dal punto di vista degli sprechi; solo successivamente le venne assegnata la denominazione tutt'oggi in uso.

Si tende così a sviluppare il processo produttivo tenendo come riferimento il consumatore finale; in questo modo si prevede la produzione di ciò che si necessita nel momento in cui esso risulta necessario.

Entrando maggiormente nel dettaglio di ciò che viene definita *Lean Manufacturing*, si osserva che essa può essere riassunta da soli cinque punti principali:

1. Eliminazione degli sprechi (*muda*).
2. Definizione del valore (*Value Stream*) dato dal consumatore finale, identificando le fasi che aggiungono valore ed eliminando quelle che non lo fanno.
3. Creazione di un flusso che permetta alle varie fasi che aggiungono valore di interfacciarsi.
4. Lasciare che sia il cliente finale a "tirare" il processo (*Sistema PULL*), ovvero produrre unicamente quando è necessario e farlo con estrema rapidità.
5. Miglioramento continuo (*kaizen*), ricercando la perfezione.

Normalmente per rappresentare il *TPS*, nel particolare, e il *Lean Manufacturing*, nel generale, si prende la semplificazione di una casa, con il tetto appoggiato su due pilastri; una rappresentazione schematica verrà fornita in "Figura 2.2".

⁴ *Make to stock*.

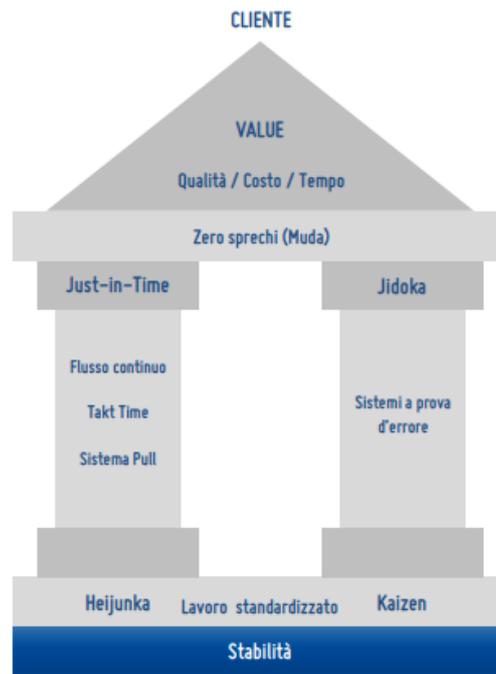


Figura 2.2: Rappresentazione schematica del *Lean Manufacturing*.

Risulta del tutto logico pensare che, affinché il sistema funzioni nel modo corretto, si deve prima rafforzare le fondamenta al fine di garantire stabilità all'intero metodo; solo successivamente si potranno rendere operativi i concetti relativi a Just-in-Time e Jidoka. Al fine di garantire al cliente finale il prodotto da lui "tirato", si devono ridurre al massimo gli sprechi con l'obiettivo di ottimizzare il valore del prodotto finale.

Si possono trattare singolarmente i vari aspetti del *Lean Manufacturing*, i quali risultano trattati nei prossimi sotto-capitoli dedicati.

2.1.1 Zero sprechi (MUDA)

Il concetto di spreco è l'aspetto più importante su cui focalizzare la filosofia produttiva analizzata; in particolare con questo termine si possono considerare tutte le forme di utilizzo di una risorsa che non determinano un incremento di valore del prodotto offerto al cliente.

Per individuare ed eliminare questi sprechi sono state identificate sette aree principali su cui operare per ridurre al minimo il problema; di seguito si fornisce l'elenco di queste categorie:

1. **Sovrapproduzione:** spreco molto pericoloso, poiché si sfruttano risorse aziendali per la produzione di prodotti finiti in quantità superiore alla domanda; conseguente sovraffollamento magazzini.
2. **Attese:** Operatore che non svolge lavoro (no valore aggiunto) per mancanza di materiale o mezzi di produzione liberi.
3. **Trasporti:** attività non a valore aggiunto (non comporta trasformazioni al prodotto), si trasforma in spreco a causa di layout obsoleti, spazi occupati da linea produttiva eccessivi, lavoro disorganizzato in relazione alle sequenze di prelievo e attrezzature non sviluppate per ottimizzare i trasporti.
4. **Processo:** mancanza di mezzi (operatori, attrezzature, macchinari) e procedure adeguate.
5. **Scorte:** presenza di prodotti in eccesso rispetto al reale fabbisogno; pericoloso per possibile peggioramento di qualità e/o obsolescenza.

6. **Movimenti superflui:** movimenti che non producono valore; causati normalmente da layout sbagliati, sovradimensionamento delle strutture e postazioni di lavoro che non rispettano il principio di ergonomia.
7. **Rilavorazioni:** grossi oneri per azienda a causa di pezzi non conformi che necessitano una seconda lavorazione; questi difetti tendono a rallentare la produzione.

Una volta presa visione di questa classificazione degli sprechi, si osserva che i problemi principali sono da ricercare in layout aziendale non organizzato in maniera ottimale, procedure di lavoro obsolete, processo produttivo non strutturato in maniera ottimale.

Per trovare una soluzione per tutte queste sedi di perdita si dovranno seguire le prescrizioni date dai pilastri che sorreggono la struttura di “Figura 2.2”.

2.1.2 *Just-in-Time*

Con il termine “*Just-in-Time*” si considera la metodologia da applicare in un ambiente aziendale con l’obiettivo di eliminare stock e giacenza di materiale in fabbrica; con questo sistema si possono apportare miglioramenti sia sull’area produttiva sia su quella logistica.

Si basa sul principio di produrre unicamente quando perviene la domanda del cliente, andando successivamente a ritroso nel flusso di processo; in questo modo sarà possibile ridurre in maniera netta la quantità di materiale in attesa di essere lavorato.

Perché questo sistema sia applicabile in maniera corretta, esso deve necessariamente essere suddiviso in tre parti principali:

1. **Sistema Pull:** il sistema produttivo dipenderà strettamente con la domanda dei clienti; non si produce nulla finché a valle il cliente non lo richiede. Questo sistema verrà comandato dal *kanban* o *cartellino*), il quale permette di trasmettere una serie di istruzioni ai livelli più a monte del flusso produttivo (richiesta materiale, componenti da produrre, ecc.).
2. **Sistema One-Piece-Flow:** metodo per organizzare l’avanzamento dei materiali da lavorare in maniera singola, così da ottenere un flusso continuo; in questo modo si evitano accumuli tra le macchine, con conseguente riduzione delle scorte e recupero dello spazio all’interno della linea⁵.
3. **Takt Time:** parametro che lega la produzione al mercato; indica il tempo in cui deve essere ottenuta un’unità di prodotto, regolando il ritmo dell’area produttiva. Viene calcolato come rapporto tra il tempo totale disponibile in un giorno e la quantità di pezzi richiesti in quella giornata⁶.

Prendendo visione di questi tre punti fondamentali, si osserva come si richieda la realizzazione di un sistema produttivo dotato di una grande flessibilità, così da garantire tempi di attrezzaggio ridotti con conseguente calo dell’incidenza sul costo produzione di un singolo pezzo.

2.1.3 *Jidoka*

L’obiettivo del *Jidoka* (letteralmente “*automazione con un tocco umano*”) risulta essere la ricerca della qualità di processo, con il fine di ridurre al minimo le unità difettose o non conformi; inoltre risulta necessario che quest’ultime non vengano utilizzate nel processo successivo.

Perché questo obiettivo sia realizzabile si dovranno garantire due condizioni:

⁵ Riduzione sostanziosa degli spazi occupati dai *buffer* di semilavorati tra due stazioni successive.

⁶ Noto inoltre il tempo ciclo, ovvero il tempo necessario al completamento del processo, sarà possibile ricavare il numero di operatori necessari effettuando il rapporto tra tempo ciclo e takt time.

- La macchina si deve poter arrestare qualora non sia garantita la qualità ricercata.
- La qualità del prodotto deve essere garantita anche in seguito ad interventi di manutenzione.

Per permettere che quanto appena introdotto sia fattibile, risulta necessario dotare le macchine di dispositivi che ne garantiscano l'arresto nel caso in cui venga rilevata un'anomalia o una non conformità. Questa soluzione deve essere adottata anche laddove siano presenti linee di montaggio manuale; infatti per ogni pezzo si prevede una fase di controllo da parte dell'operatore per mezzo di dispositivi "a prova di errore" (*Poka Yoke*), e sarà autorizzato a sospendere la produzione nel caso sia stata riscontrata una non conformità.

L'obiettivo del *Jidoka* sarà raggiunto una volta realizzate le due condizioni citate in precedenza; infatti in questo modo si prevede l'eliminazione del legame presente tra uomo e macchina. Per l'operatore sarà così possibile dedicarsi ad attività a valore aggiunto per il prodotto finale, riducendo allo stesso tempo gli sprechi legati alle attese.

2.1.4 Principi fondanti il *Lean Manufacturing*

Precedentemente sono stati analizzati tutti i criteri da seguire al fine di ottenere una riduzione degli sprechi all'interno di un ambiente sia produttivo che logistico; perché tutto questo sia applicabile con continuità all'interno dell'azienda, l'intera struttura creata si deve caratterizzare di basi molto forti e stabili.

Anche in questa fase si prende come riferimento quanto impostato inizialmente all'interno del sistema produttivo della Toyota, seguendo i tre principi fondanti la produzione snella, quali:

- *Heijunka*: l'obiettivo risulta essere il livellamento della produzione con il fine di equilibrare il carico di lavoro all'interno di una cella produttiva.
- *Lavoro standardizzato*: con questo termine si indica quel tipo di lavoro organizzato seguendo un processo efficiente, ricercando la migliore qualità produttiva e al contempo assicurando un elevato grado di sicurezza del lavoro.
- *Kaizen*: con questo termine di origine giapponese si indica il concetto per cui si debba continuamente ricercare il miglioramento della situazione attuale; ciò è applicabile anche all'interno di un ambiente produttivo, dove risulta ovvio che tutto ciò che verrà fatto potrà essere ulteriormente migliorato.

Si nota così che tutta la struttura della *Lean Manufacturing* risulta applicabile correttamente solo nel caso in cui sussistano le condizioni appena elencate; in caso contrario non si possono ottenere i miglioramenti desiderati, rischiando anzi di peggiorare la situazione di partenza.

2.2 *Agile Manufacturing*

Come già detto in precedenza, con il termine **Agile Manufacturing** si identifica una serie di concetti che hanno l'obiettivo di snellire e migliorare lo sviluppo di software e programmi IT; si rivela in questo modo necessario ridefinire sia la pianificazione che l'esecuzione del processo di sviluppo del prodotto, al fine di fornire ad esso più valore.

Per garantire la corretta applicazione di questa metodologia si deve necessariamente fare riferimento ai punti fondamentali elencati di seguito:

1. Viene data maggiore importanza alle interazioni tra gli individui.
2. Stretta collaborazione tra il cliente finale e chi sviluppa il progetto.
3. Capacità di adattamento al cambiamento.
4. Predilezione per team performanti in grado di autogestirsi.

Come si può facilmente osservare, questi sono tutti concetti legati all'ambiente in cui questa filosofia ha avuto origine; si osserva però che questo modo di pensare può essere utilizzato anche in altri settori, con le dovute differenze ed implementazioni ai concetti originali.

Si provvede così all'applicazione dell'**Agile Manufacturing** nello sviluppo di modelli di gestione della produzione; si focalizza così l'attenzione sulla capacità della catena produttiva di rispondere in maniera rapida alla variabilità della domanda.

Il concetto di Supply Chain Agile risulta legato all'obiettivo di avvicinare quanto più possibile il punto di disaccoppiamento al prodotto finale; in questo modo si rende possibile lo sviluppo di un processo produttivo incentrato su più piattaforme comuni (o *moduli*), lasciando la personalizzazione del prodotto all'assemblaggio finale.

Si possono riscontrare diversi vantaggi legati all'applicazione di questi concetti, quali:

- Forte riduzione dei magazzini prodotto finito.
- Ampia gamma di prodotto, dipendente dal vasto numero di combinazioni effettuabili con i sotto-assiemi.
- Previsioni di mercato più facili per i sotto-prodotti che per i prodotti finiti; possibilità di adottare strategie di "customizzazione".

Questa strategia di gestione della produzione risulta essere ottima sotto molti aspetti, ma si rivela strettamente legata all'utilizzo congiunto di sistemi informatici propedeutici per la pianificazione della produzione. Ciò risulta necessario al fine di garantire la formulazione di un piano che permetta l'ottimizzazione delle risorse, al fine di massimizzare flessibilità e rapidità.

Al fine di rendere maggiormente comprensibile la trattazione dell'argomento relativo alla **Agile Manufacturing**, si prevede un confronto di questa filosofia di gestione del processo produttivo con quanto visto in precedenza per quanto riguarda la **Lean Manufacturing**.

Per prima cosa si osserva che entrambe le filosofie di gestione ricercano un miglioramento del sistema produttivo, al fine di ottimizzare il risultato finale; l'unico obiettivo risulta perciò la creazione di valore aggiunto per il cliente, limitando al massimo tutte le operazioni che non lo incrementano.

Le prime differenze cominciano a sorgere per quanto riguarda la definizione degli elementi di principale interesse per ottenere il suddetto miglioramento.

Si osserva infatti che la prima (**Lean**) si focalizza sulla riduzione degli sprechi per mezzo di una standardizzazione della produzione; si prevedono ad ogni modo delle variazioni del processo qualora esse garantiscano un ulteriore miglioramento della produzione.

La seconda (**Agile**) invece si caratterizza per un'elevata flessibilità e rapidità della produzione, con l'obiettivo di accontentare il cliente nel caso di richieste *custom*; come detto in precedenza, si cerca di portare il punto di disaccoppiamento vicino al prodotto finito al fine di lasciare la personalizzazione unicamente all'assemblaggio finale.

Si osserva in questo modo che i due strumenti analizzati possiedono caratteristiche diverse, volte però all'ottenimento del medesimo risultato; perciò, se l'applicazione di una sola metodologia porta ad ottimi benefici, a maggior ragione ciò succederà qualora venissero combinate in maniera appropriata al settore di interesse.

2.3 Teoria dei vincoli (TOC)

Come introdotto in precedenza, per quanto riguarda i sistemi produttivi organizzati in reparti o isole produttive si tende a preferire quanto prescritto dalla teoria dei vincoli; l'obiettivo finale di questa teorizzazione punta alla massimizzazione dei risultati ottenibili a fronte degli sforzi assunti.

A livello puramente teorico, questo metodo di gestione risulta essere estremamente valido ed efficace, se applicato nella maniera corretta; ciò non risulta semplice e si devono per questo motivo seguire le linee guida prescritte.

In particolare il percorso iniziale consiste nell'identificazione delle risorse necessarie alla produzione, e quali di esse risultano essere realmente dei vincoli; ciò si rivela fondamentale per tutta la successiva valutazione, poiché una risorsa soggetta ad un miglioramento, ma non risultante come vincolo, non determina un'ottimizzazione nelle performance produttive. In questo modo si attua una prima distinzione tra le risorse presenti in un sistema produttivo, focalizzando poi l'attenzione su quegli elementi che costituiscono un *vincolo*.

Una volta introdotta la suddetta analisi delle risorse e determinate quelle su cui focalizzare l'attenzione, risulta necessario capire come questa teoria possa essere applicata in un generico sistema aziendale.

Per prima cosa risulta necessario abbandonare i sistemi di controllo tradizionali, i quali prevedevano la saturazione delle risorse disponibili; con questa nuova concezione risulta evidente come l'attenzione si sposta invece sugli elementi che costituiscono un *vincolo*, al fine di delineare quali di questi andranno a costituire dei colli di bottiglia (o criticità) su cui poi agire.

Andando a considerare l'ambiente produttivo, si devono determinare le azioni correttive da eseguire sulle suddette criticità al fine di migliorare le performance di queste e, cosa non marginale, evitare regimi di sovrapproduzione per quegli elementi che non costituiscono colli di bottiglia.

Perché tutto questo risulti possibile è stato delineato un sistema di gestione dell'area produttiva suddiviso in due parti, definite *DBR (Drum Buffer Rope)* e *BM (Buffer Management)*.

Parlando della prima parte citata, essa permette di identificare i colli di bottiglia presenti nel processo produttivo; essi vengono identificati come *Drum*, poiché queste risorse impostano il "ritmo" dell'intera produzione. Di conseguenza si ottiene una riduzione delle performance degli altri elementi a causa di questa criticità, riscontrabile come limitazione della produttività (elementi a monte del *Drum*) oppure direttamente con dei fermi macchina (elementi a valle, in attesa del prodotto proveniente dal *Drum*).

Una volta identificata una criticità, come descritto in precedenza, si rivela necessario valutare se il sistema produttivo è stato adeguato in maniera efficiente a tale *vincolo*; per fare questo si deve focalizzare l'attenzione sui magazzini temporanei di semilavorati o *WIP (Work In Progress)*. Partendo da questo parametro di valutazione, risulta poi possibile analizzare lo stato del *Buffer* (o inventario), ovvero il lavoro programmato per la risorsa che costituisce una criticità. Esso non si valuta più come quantità di unità fisiche prodotte, come veniva effettuato nel passato, ma in tempo di sosta dei semilavorati nel magazzino temporaneo. Perché il sistema produttivo lavori in maniera efficiente si deve fare in modo che il tempo di sosta nel *Buffer* risulti limitato; in caso contrario si rischia di ottenere una saturazione delle risorse a valle del *Buffer*, mentre il vincolo rimane fermo per permettere lo svuotamento del magazzino temporaneo.

Gli ultimi elementi da analizzare risultano essere le *Ropes* (o corde), le quali indicano gli eventi che collegano le varie parti del sistema produttivo e quest'ultimo con gli elementi esterni (clienti e fornitori). In particolare si può identificare la corda di spedizione, la quale governa il lavoro da svolgere al fine di soddisfare la domanda proveniente dall'esterno, e la corda di vincolo; quest'ultima fornisce informazioni al magazzino materie prime per garantire successivamente il *Buffer* ideale in termini temporali.

In questo modo è stato identificato il *vincolo* e il suo contributo all'interno del processo produttivo; in questo modo risulta possibile adeguare la produzione ad esso, garantendo la massima efficienza dell'impianto.

In secondo luogo, questa filosofia permette di impostare gli ordini di produzione in modo tale da soddisfare la domanda proveniente dall'esterno, riducendo allo stesso tempo i *Buffer*; questo pensiero si allinea con il concetto di *Sistema Pull* visto in precedenza nella filosofia della **Lean Manufacturing**.

2.4 *Industria 4.0*

I concetti di automazione industriale e **Industria 4.0** si stanno sviluppando in maniera parallela; con l'automazione si tende infatti a perseguire una sempre maggiore innovazione del sistema produttivo. Lo sviluppo della tecnologia applicata a questi sistemi e delle capacità di gestione autonoma delle macchine utilizzate porterà ad una conseguente riduzione del personale richiesto per il loro funzionamento⁷. Tutto questo non fa altro che portare a quanto proposto dalla cosiddetta *quarta rivoluzione industriale*.

La trasformazione dell'intero settore industriale con l'obiettivo di giungere a sistemi completamente automatizzati deve per forza di cose basarsi sulle idee fondanti il concetto di **Industria 4.0**; in particolare si possono ritrovare i seguenti pilastri:

- Raccolta e analisi di tutti i dati di processo, con il fine di utilizzarli come risorsa per il miglioramento continuo del processo produttivo.
- Sistemi adattativi applicati alle macchine automatiche, con conseguente riduzione dei tempi di ottimizzazione delle stesse; le macchine analizzano i dati e apportano le dovute correzioni in autonomia.
- Passaggio da fisico a digitale per quanto riguarda il monitoraggio dello stato della macchina e della lavorazione affidata ad essa.

Basandosi su quanto appena introdotto, si nota come il punto fondamentale consista nella possibilità di raccogliere in maniera efficace tutti i dati provenienti dal processo produttivo; si rivela così fondamentale il corretto utilizzo dei suddetti dati a livello informatico, nel tentativo di centralizzarli il più possibile. Tali informazioni devono poi essere valorizzate nella maniera corretta, al fine di ottenere miglioramenti netti in tutte le aree degne di questa attenzione.

I vantaggi ottenibili attraverso l'applicazione di questi sistemi automatici in maniera combinata con quanto prescritto dall'**Industria 4.0** risultano molteplici.

In primo luogo si possono ottenere miglioramenti dal punto di vista qualitativo, soprattutto grazie all'introduzione di intelligenze artificiali nei sistemi automatici; esse permettono infatti di ottimizzare il processo facendo affidamento sui dati elaborati, ottenendo infine prodotti caratterizzati da un'elevata qualità. Al netto di questo si registreranno delle perdite per prodotti difettosi scartati molto ridotte.

Secondariamente si possono ottenere miglioramenti dal punto di vista delle tempistiche per lo sviluppo del prodotto finito; di conseguenza si garantiscono vantaggi importanti sia a livello economico che strategico.

Facendo riferimento a quanto appena descritto sul concetto di **Industria 4.0** e sulla sua applicazione all'interno del processo produttivo, si può introdurre il termine *Fabbrica 4.0*; con questa terminologia si indicano quelle strutture produttive per le quali viene prevista una composizione di sole macchine automatiche connesse tra loro, in grado di dialogare e fornire informazioni al calcolatore centrale. Si presume inoltre che il progresso tecnologico permetterà al sistema

⁷ Non è propriamente corretto parlare di riduzione del personale in maniera assoluta; nella realtà si svilupperanno nuovi posti di lavoro negli ambiti informatici e ingegneristici, oltre all'ampliamento del terziario avanzato. Sul breve periodo perciò la contrazione dei posti occupazionali risulta una conseguenza dell'applicazione di sistemi automatici, mentre sul medio-lungo termine ciò non risulta necessariamente corretto.

automatizzato di gestire in maniera autonoma il grado di efficienza di ogni macchinario, l'adozione di misure cautelative e la manutenzione.

L'obiettivo finale è il raggiungimento di una fabbrica completamente *smart*, caratterizzata da una elevata flessibilità; si parla di un sistema produttivo in grado di valutare in maniera autonoma il processo produttivo, al fine di garantire la migliore efficienza in termini di consumi e qualità. In relazione a questa innovazione, si propone una suddivisione della struttura su tre diversi livelli tecnologici:

- **Smart production**: tecnologie produttive atte a garantire interazioni tra i vari elementi presenti, permettendo una corretta collaborazione tra uomo e macchina/sistemi.
- **Smart services**: gestione dei sistemi per mezzo di nuove infrastrutture di tipo informatico e tecnico, portando ad una forte interazione tra i vari livelli *supply chain*.
- **Smart energy**: sfruttamento di nuovi sistemi di alimentazione, con annesso monitoraggio dei consumi; l'obiettivo risulta essere l'ottimizzazione di tutti i sistemi dal punto di vista economico ed ecologico.

3. Automazione nelle macchine utensili

Quanto esposto nel capitolo **2. Automazione industriale** ha permesso di definire le linee guida che devono essere seguite per garantire un miglioramento del sistema produttivo, facendo riferimento a quanto prescritto da teorie quali **Lean Production** e **Teoria dei vincoli**; la soluzione ideale per seguire queste filosofie risulta essere l'adozione di sistemi automatici, tendendo alla realizzazione di quanto idealizzato dai concetti di **Industria 4.0**. Partendo da questi concetti, risulta necessario valutare quali sistemi possono essere implementati alle macchine utensili tradizionali, ricercando infine un'ottimizzazione del processo produttivo.

Per garantire una maggiore comprensione del problema, si sviluppa la trattazione partendo dalla classificazione delle macchine utensili tradizionali al fine di caratterizzare in maniera appropriata ognuna di esse; non si prevede in ogni caso una descrizione completa di ogni macchina, ma verranno trattate nel dettaglio unicamente quelle caratteristiche interessanti per lo sviluppo del discorso.

Successivamente si prevede di analizzare i principali fattori di valorizzazione di un generico processo produttivo attuabile su una macchina utensile; anche se di scarso interesse nell'immediato, essi forniscono l'input principale per l'ottimizzazione dei suddetti macchinari in termini di produttività ed efficienza.

Da questo punto risultano evidenti le motivazioni che hanno portato all'implementazione di sistemi automatici sulle macchine utensili; tutto questo si rivela strettamente legato all'utilizzo di sistemi di controllo numerico a bordo macchina e allo sviluppo tecnologico degli stessi. Si rende così necessario un focus di carattere storico sul progresso legato al controllo numerico, soffermandosi successivamente sulla struttura che lo caratterizza attualmente (vedi **Architettura CNC**).

Solo successivamente si prevede di scendere maggiormente nel dettaglio, introducendo i centri di lavoro di fresatura; essi verranno descritti in maniera approfondita, essendo la macchina utensile di riferimento per lo sviluppo della presente tesi. In questo modo vengono presentati i componenti principali di queste macchine, soffermandosi su tutti gli aspetti che le differenziano dalle macchine utensili tradizionali. In particolare, l'attenzione si focalizza su sistemi automatici di cambio utensile (vedi **Automatic Tool Changer (ATC)**) e di cambio pallet⁸, i quali a bordo delle macchine utensili tradizionali risultavano assenti oppure effettuati manualmente.

3.1 *Macchine utensili tradizionali*

Come già introdotto in precedenza, al fine di comprendere in maniera approfondita l'impatto che i sistemi automatici hanno determinato sullo sfruttamento delle macchine utensili, risulta necessario partire da quanto veniva originariamente proposto in quelle tradizionali. Si rivela così fondamentale introdurre tutte le macchine utensili e caratterizzarle, approfondendo il discorso laddove si richiede; normalmente si attua la seguente suddivisione:

1. **Macchine utensili convenzionali**: sono normalmente utilizzate per l'esecuzione di diverse lavorazioni su materiali metallici attraverso l'utilizzo di operazioni di taglio e asportazione di truciolo; tra di esse si possono elencare le principali:
 - a. Tornio;
 - b. Limatrice;
 - c. Piallatrice;
 - d. Fresatrice.

⁸ Per quanto riguarda i sistemi di cambio pallet si rimanda al capitolo **4 Cambio pallet**.

2. **Macchine non convenzionali:** utilizzate di solito per la lavorazione di leghe pesanti, caratterizzate da grandi difficoltà in fase di lavorazione (per esempio leghe di titanio e tungsteno, solo per citarne alcune); sono macchine più moderne e si affidano a tecniche quali per esempio:
 - a. Operazioni con laser;
 - b. Elettroerosione;
 - c. Ultrasuoni.
3. **Macchine per deformazione plastica:** come si può facilmente intendere dalla denominazione, queste macchine non eseguono operazioni di taglio con conseguente asportazione di truciolo, ma effettuano lavorazioni di deformazione plastica sui semilavorati; rientrano in questa categoria macchine come:
 - a. Pressa;
 - b. Trafilatrice;
 - c. Piegatrice.

Risulta immediatamente evidente come il primo gruppo è anche quello che maggiormente si adatta alla trattazione che si vuole sviluppare, ben sapendo la tipologia di macchine utensili proposte dalla ditta ospitante per la stesura della seguente tesi.

Per quanto riguarda le macchine utensili definite “convenzionali” si può osservare come esistono altre classificazioni interne, principalmente legate al tipo di *moto lavoro* ottenibile; esso risulta essere una combinazione dei diversi movimenti eseguibili dalla macchina, quali:

1. Moto di taglio;
2. Moto di avanzamento;
3. Moto di registrazione.

Una volta identificati i vari moti, si osserva che le macchine utensili convenzionali possono essere suddivise in vari gruppi dipendenti dal tipo di moto lavoro, quali:

1. **Moto circolare uniforme:** risulta caratterizzato da un moto di taglio rotatorio affidato al pezzo (tornitura) oppure all’utensile (foratura, fresatura, alesatura), mentre normalmente i moti di avanzamento e registrazione sono affidati all’utensile.
2. **Moto rettilineo alternato:** si caratterizza di un moto rettilineo alternativo fornito all’utensile (limatura) o al pezzo (piallatura), mentre in maniera inversa viene fornito quello di avanzamento; il moto di registrazione viene invece affidato all’utensile.
3. **Moto speciale:** caratteristico di macchine utensili quali brocciatrice e smerigliatrice, si osserva un moto di avanzamento ottenibile dalla combinazione di moti lineari e rotativi dati a utensile o pezzo (in funzione della lavorazione considerata); in funzione della macchina utensile esaminata, si potranno anche definire i moti di taglio e registrazione.
4. **Moto circolare variabile:** caratterizzato dal moto di taglio rotatorio imposto all’utensile (fresatura) o al pezzo (tornitura), è una peculiarità delle macchine utensili di ultima generazione; lo sviluppo tecnologico ha infatti permesso di realizzare azionamenti a velocità variabile, grazie all’impiego di motori elettrici e di componenti elettronici adatti a tale scopo.

Si nota quindi che più si scende nel dettaglio, più sono i parametri che garantiscono una certa caratterizzazione per ogni singola macchina utensile presa in esame durante la trattazione; infatti non solo sono state fornite informazioni circa i principali moti che caratterizzano le macchine ad asportazione di truciolo, ma anche come ogni macchina realizzi questi movimenti. Si nota infatti come il taglio si può ottenere da una combinazione di tutti i moti precedentemente elencati. Si osserva comunque che tutte queste lavorazioni prevedono l’utilizzo simultaneo di un massimo di 3 assi lineari, limitando il numero di geometrie ottenibili con un unico piazzamento del semilavorato.

Originariamente nelle suddette macchine utensili, definibili “tradizionali”, era l’operatore che andava ad impostare i parametri di taglio e avanzamento per riprodurre le forme richieste dal progettista e riportate sul disegno; si può facilmente osservare come questo processo, oltre ad

accumulare errori in caso di riposizionamento del pezzo, determinava tempi persi elevati se rapportati al tempo effettivo di taglio.

Si può infatti ricordare che negli anni '70 del secolo scorso Merchant, esperto americano nelle lavorazioni meccaniche, pose l'attenzione sui tempi di utilizzo di una macchina utensile; osservò infatti che il tempo effettivo di taglio corrispondeva a circa il 4-5%⁹ del tempo realmente disponibile. Il restante risultava perso principalmente in tempi di attrezzaggio, cambio o riposizionamento pezzo, cambio utensile, guasti e turni non coperti.

3.2 Tempo e costo di taglio

Al fine di inquadrare nel migliore dei modi il rendimento di una macchina utensile dal punto di vista dell'operazione di taglio, esso deve essere studiato in maniera congiunta in termini sia di tempo che di costo.

Per prima cosa conviene andare ad analizzare il tempo richiesto per effettuare l'operazione di taglio, il quale può essere definito con la seguente equazione.

$$t_{ciclo} = t_{te} + t_{impr} + t_{su} + t_{cu} \quad (3.1)$$

Con:

1. **Tempo di taglio effettivo t_{te}** : dipendenza diretta dai parametri di taglio e dallo stato di usura dell'utensile; corrisponde al 4-5% del tempo ciclo totale, teorizzato da Merchant.
2. **Tempo improduttivo t_{impr}** : relativo al tempo perso durante le fasi di trasposto e attrezzaggio del componente grezzo, oltre a fasi di fermo macchina (per esempio guasti o manutenzione).
3. **Tempo di set-up t_{su}** : tempo relativo alla lettura del disegno e alla definizione del ciclo di lavorazione, scrittura codice numerico (per macchine a CNC); esso viene suddiviso sugli N pezzi che verranno prodotti con la medesima configurazione.
4. **Tempo di cambio utensile t_{cu}** : tempo necessario all'operazione di cambio utensile, dipendente sia dalle caratteristiche del sistema adottato per la suddetta operazione sia dal numero di volte che viene effettuato per il singolo ciclo produttivo considerato.

Una volta definite queste grandezze temporali, risulta possibile introdurre il concetto di costo di taglio con l'obiettivo di fornire una panoramica completa delle motivazioni principali che hanno portato all'applicazione di sistemi automatici a bordo delle macchine utensili. In particolare, il costo di un singolo ciclo produttivo può essere riassunto in maniera semplificata dalla seguente formula.

$$C_{ciclo} = C_{te} + C_{impr} + \frac{C_{su}}{N} + C_{cu} \quad (3.2)$$

Dove:

1. **Costo ciclo di produzione C_{ciclo}** : costo relativo al singolo ciclo produttivo necessario per ottenere il prodotto desiderato.
2. **Costo di taglio effettivo C_{te}** : costo da imputare all'effettiva operazione di taglio dell'oggetto in lavorazione.
3. **Costo tempo improduttivo C_{impr}** : costo relativo ai tempi improduttivi precedentemente identificati.
4. **Costo di setup macchina C_{su}** : costo imputabile al setup iniziale della macchina, al fine di garantire la correttezza delle operazioni di taglio; il presente costo deve essere suddiviso per gli N prodotti ottenibili con il medesimo ciclo di lavorazione

⁹ Dato preso da articolo su sito <https://automationstory.com/2-4-la-robotica-e-le-macchine-utensili/>

5. **Costo totale utensile C_{ut}** : costo legato agli utensili utilizzati, sia in termini di prezzo d'acquisto dell'elemento sia in termini di tempo perso per le fasi di sostituzione.

Risulta perciò necessaria un'analisi approfondita dell'efficienza della macchina utensile sia dal punto di vista dei tempi ciclo sia dal punto di vista del costo di produzione. Si cerca in questo modo di identificare i parametri su cui focalizzare l'attenzione al fine di ottenere un'ottimizzazione del processo produttivo; perché quest'analisi risulti efficace, si rivela necessario l'utilizzo di indicatori studiati appositamente per questo tipo di applicazioni.

Per questo motivo si fornirà di seguito la descrizione del principale indice di valutazione dell'efficienza di un processo produttivo, denominato **OEE**.

3.3 OEE

Risulta così evidente che le aziende devono porre maggiore attenzione sul miglioramento del sistema produttivo; in particolare si tende inizialmente a focalizzare l'attenzione sul tempo di taglio effettivo, teorizzato da Merchant essere pari al 4-5% del tempo totale del ciclo di produzione di una macchina utensile tradizionale. Passano così in secondo piano gli studi relativi al miglioramento delle condizioni "ideali" di taglio.

Per questo motivo risulta alquanto importante l'applicazione di parametri di valutazione del processo quale, per esempio, l'indice **OEE** (*Overall Equipment Effectiveness*), il quale permette di ottenere una valutazione alquanto completa dell'efficienza di una macchina.

Si teorizza che una macchina ideale dovrebbe lavorare, per quanto necessario, alla velocità standard, senza generare alcun tipo di problema relativamente alla qualità dei prodotti finali; nella realtà invece nessuna macchina è in grado di raggiungere queste condizioni, a causa della presenza di tempi di arresto (spesso necessari) e di pezzi difettosi (o non conformi).

Si rende così necessaria una valutazione completa dell'efficienza del singolo macchinario, al fine di determinare quali sono le condizioni (definite "*equipment-related losses*") che causano queste perdite; queste motivazioni stanno alla base dell'adozione di indici di valutazione del ciclo produttivo come quello trattato in questo capitolo.

Nell'analisi di questo indice risulta necessario focalizzare l'attenzione su tre aspetti principali di un lotto produttivo, definiti *Disponibilità*, *Qualità* e *Prestazioni*; per ognuno di questi elementi è anche possibile identificare quali sono le possibili sedi di perdita, come per esempio:

- **Disponibilità**: Perdite per inattività (guasti, tempi di Set-up);
- **Qualità**: Perdite per difetti (scarti e rilavorazioni, tempo di Start-up);
- **Prestazioni**: Perdite di velocità (arresti per piccoli inconvenienti, ridotta velocità di lavorazione).

Risulta così possibile differenziare le varie sedi di perdita e l'efficienza della macchina legata ad ognuno dei tre aspetti appena elencati; si deve così impostare un calcolo dell'indice OEE introdotto precedentemente, fornito di seguito nell'equazione (3.3).

$$OEE = \frac{B}{A} * \frac{D}{C} * \frac{F}{E} * 100 \quad (3.3)$$

Con:

- *A*: Tempo operativo netto;
- *B*: Tempo di funzionamento (minore di *A* per presenza di perdite di *Disponibilità*);
- *C*: Obiettivo di produzione;
- *D*: Produzione reale (minore di *C* per presenza di perdite di *Prestazioni*);
- *E*: Produzione reale;

- *F*: Produzione conforme (minore di *E* per presenza perdite di Qualità).

Attraverso l'uso di questo indice si rende così possibile l'ottenimento di una valutazione dell'efficienza globale della macchina presa in esame; risulta così facilmente identificabile quale dei tre aspetti analizzati rappresenta la principale criticità del processo produttivo considerato.

Una volta analizzato quanto offerto dal coefficiente calcolato, risulta possibile determinare gli interventi da effettuare sulla macchina e/o sul ciclo produttivo al fine di garantire un miglioramento nell'efficienza complessiva.

Per quanto riguarda le macchine utensili, argomento centrale di questa parte di trattazione, risulta evidente che l'attenzione viene posta inizialmente sulla riduzione dei tempi improduttivi; per cominciare vengono considerate tutte quelle operazioni che determinano un aumento del tempo ciclo senza che venga incrementato il valore aggiunto del componente lavorato¹⁰, come per esempio cambio utensile, riattrezzaggio pezzo, set-up macchina, ecc.

Sono state così identificate le principali cause di inefficienza delle macchine utensili, le quali concorrono a determinare il rapporto presente tra tempo di taglio effettivo e tempo ciclo teorizzato in precedenza da Merchant. A questo punto conviene analizzare lo sviluppo storico di questi macchinari, con l'obiettivo di valutare su quali degli aspetti elencati è stata focalizzata maggiormente l'attenzione con il fine ultimo di ottenere miglioramenti in termini sia di tempi che di costi.

3.4 *Controllo numerico nelle macchine utensili*

Si rivelò così necessaria un'analisi approfondita delle sedi di perdita riscontrabili durante il funzionamento di una macchina utensile, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza di taglio e incrementare l'indice *OEE*.

Per prima cosa si studiarono dei sistemi di gestione della macchina utensile al fine di controllare ogni singolo movimento della stessa; ciò risultava necessario al fine di ottenere una maggiore precisione e ripetibilità nella produzione dei componenti meccanici, distaccandosi così dall'ambiente artigianale.

Nella successiva trattazione si rivela necessario fare affidamento a nozioni prettamente storiche, relative allo sviluppo dei sistemi di controllo delle macchine utensili; per fare questo si fa riferimento a quanto ricavabile da testi e siti web specifici per l'argomento trattato, i quali sono ovviamente riportati in maniera dettagliata nel capitolo dedicato. Con l'obiettivo di non appesantire eccessivamente la trattazione con nozioni superflue, verranno riportate unicamente le informazioni principali, evitando di elencare ogni singolo step di miglioramento dei sistemi CN nel tempo.

3.4.1 *Storia del controllo numerico*

Normalmente la nascita del controllo numerico viene datata 1942 ad opera di John T. Parsons e Franck L. Stulen¹¹; come si può leggere sull'articolo fornito in nota, il sistema CN si rivelò necessario, come anche precisato in precedenza, per ridurre i tempi di spostamento manuale lungo gli assi e i relativi errori. Ciò risultò possibile automatizzando il controllo dei movimenti per mezzo di un'unità elettronica facente riferimento ad un programma di lavoro memorizzato precedentemente.

Solo nel 1952 però venne presentato sul mercato il primo tornio completamente a controllo numerico, seguito negli anni successivi da numerose altre macchine concepite per funzionare con

¹⁰ In linea con quanto prescritto dalla filosofia della **Lean Manufacturing**.

¹¹ Per approfondimenti, vedi articolo completo su sito web <http://it.sdfortune.net/info/history-of-numerical-control-25345621.html>

sistemi di controllo elettronici; in questi sistemi il programma di lavoro era salvato su nastri di carta adeguatamente perforati.

Nonostante gli ottimi responsi dalle poche aziende che subito si sono dotate di queste macchine utensili, i sistemi CN faticarono a trovare subito posto all'interno della maggioranza dei sistemi produttivi; questo era dovuto al fatto che, secondo un rapporto economico del MIT, il tempo risparmiato in termini produttivi era stato spostato alla creazione dei nastri forati. Quest'ultimi richiedevano anche uno sforzo non indifferente per la loro realizzazione, introducendo possibilità di errori all'aumentare della complessità del ciclo di lavorazione studiato.

Si cercò per questo motivo di sviluppare sistemi precisi e ripetibili per la produzione di questi nastri. La prima proposta arrivò dal MIT, dove un programmatore utilizzò la strumentazione presente per sviluppare delle subroutine per ottenere questi elementi sotto il controllo di un computer; ciò risultava possibile una volta inserito un elenco di punti e velocità. Si rivelò così subito necessario sviluppare dei linguaggi di programmazione standard per il controllo numerico; per approfondimenti relativi alla storia del linguaggio *APT* si rimanda all'articolo fornito precedentemente in nota 11, poiché risulta essere di scarso interesse per la seguente trattazione.

Solo verso la fine degli anni '60 del secolo scorso si riscontrò la presenza dei primi computer affiancati alle macchine utensili; nasce così la definizione usata tuttora di "*macchine utensili a CNC*". Risultò infatti più conveniente a livello economico la gestione del sistema di controllo del motore (anello aperto o anello chiuso in base all'applicazione) attraverso l'utilizzo di un programma ad-hoc sviluppato sul calcolatore.

A partire dalla metà degli anni '70 cominciarono ad essere proposti sul mercato i primi microprocessori, i quali semplificarono ulteriormente l'applicazione di computer nel controllo delle operazioni delle macchine utensili.

Negli anni successivi questa struttura è stata migliorata grazie allo sviluppo di microprocessori più potenti, dotati di una frequenza di campionamento più elevata (maggiore numero di operazioni al secondo), memorie interne più capienti e maggior numero di operazioni controllabili.

In parallelo a questi sviluppi a livello hardware del controllo numerico, cominciarono a svilupparsi i primi progetti sperimentali relativi alla digitalizzazione e archiviazione dei numerosi schizzi e disegni bidimensionali; questo studio fu condotto a partire da un'idea nata all'interno di General Motors nel 1959 in collaborazione con IBM. Venne così avviato il progetto *DAC-1 (Design Augmented by Computer)*, di cui una parte consisteva nella conversione dei disegni cartacei in modelli virtuali tridimensionali; essi vennero poi convertiti in linguaggio macchina (definito precedentemente *APT*) al fine di verificare tutto il processo con il taglio per mezzo di fresatrice.

Come per la parte hardware, anche il lato software ha subito diversi aggiornamenti, permettendo di passare dai nastri forati (presenti agli albori del controllo numerico) ad elementi sempre più compatti quali floppy disk, periferiche esterne con interfaccia USB oppure anche reti locali; oggi giorno risulta anche possibile poter sviluppare dei CNC basati su sistemi operativi quali Windows o Linux¹².

3.4.2 Architettura CNC

Risulta necessario definire in maniera approfondita la struttura del controllo numerico relativo alle macchine utensili presenti sul mercato, al fine di valutare quanto esso abbia impattato sull'automazione delle stesse.

¹² In questo modo risulta possibile l'interfaccia diretta con personal computer dotati di tali sistemi operativi.

Focalizzando l'attenzione su quanto proposto sul mercato, si osserva che il controllo viene effettuato in maniera continua, grazie anche allo sfruttamento della potenza di calcolo fornita dai sistemi elettronici odierni. Si può così valutare, istante per istante, la legge del moto caratterizzante ognuno degli assi macchina; in questo modo risulta possibile la realizzazione di una ben determinata traiettoria dell'utensile rispetto al pezzo, attraverso la combinazione dei diversi movimenti controllabili.

Parallelamente a ciò, è possibile controllare tutte le altre funzioni della macchina (generalmente identificate come "funzioni ausiliarie"), quali avviamento e cambio velocità di rotazione del mandrino, flusso di liquido refrigerante durante la lavorazione, cambio utensili, ecc.

Risulta perciò di grande importanza la caratterizzazione globale del sistema di controllo delle odierne macchine utensili; in particolare la struttura considerata si compone di diverse funzioni complementari tra loro, come viene anche ricordato in un testo di riferimento quale il "Manuale delle macchine utensili"¹³, di cui verrà riportata di seguito una citazione: [*... il CNC ha due gruppi fondamentali di funzioni da svolgere per eseguire la lavorazione:*

- *Il calcolo della traiettoria (interpolazione), dopo la lettura del programma pezzo, che ancora viene fatto, con qualche aggiunta specifica per le nuove funzioni, secondo la norma internazionale ISO risalente alla fine degli anni Sessanta;*
- *L'automazione specifica della macchina utensile cui è collegato e l'attuazione di tutte le altre funzioni di macchina.]*

Si attua perciò una forte differenziazione tra la parte che interpreta e traduce il programma di lavorazione del pezzo e quella relativa alle funzioni prettamente automatiche.

Facendo riferimento a quanto detto fino ad ora, si osserva che il CNC può essere scomposto nelle sue componenti principali, quali:

1. Unità di governo;
2. Sistemi di misura o trasduttori di posizione;
3. Azionamenti.

Il sistema di controllo numerico appena introdotto possiede il compito di tradurre il *part-program* in linguaggio macchina, con l'obiettivo di far compiere ad essa i movimenti corretti; le informazioni richieste viaggeranno tra controllo numerico e macchina per mezzo di collegamenti via cavo.

Prima di descrivere nel dettaglio ognuna delle componenti facenti parte di un generico controllo numerico, si propone un esempio di controllo di un asse lineare della macchina ("Figura 3.1").

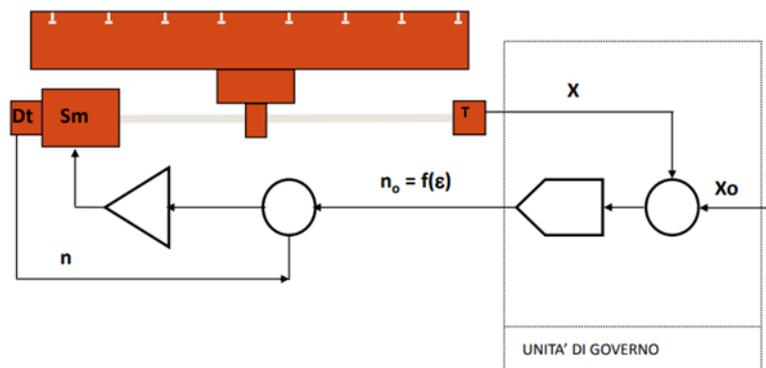


Figura 3.1: Esempio di controllo di posizione e velocità in anello chiuso applicato su un asse lineare della macchina utensile.

¹³ Maiocchi B., Rossi M., *Manuale delle macchine utensili*, II edizione, gennaio 2014, pp. 846, Tecniche Nuove

La prima cosa che si può notare è come generalmente ogni asse di una macchina utensile a *CNC* risulta caratterizzato da due anelli di retroazione; uno dedicato a controllo di posizione e uno per il controllo di velocità. Lo schema fornito si rivela essere estremamente semplificato e permette unicamente di avere un'idea di massima di come venga effettuato il controllo sull'asse considerato.

L'unità di governo possiede il compito di controllare l'intera macchina utensile; grazie al processo di sviluppo dell'elettronica, questo elemento ha subito un continuo miglioramento nelle sue caratteristiche. Nei moderni controlli numerici, l'*UG* è in grado di gestire un elevato numero di assi contemporaneamente.

L'unità di governo si comporrà di alcune parti principali, visibili anche in "**Figura 3.2**"; si osserva che tutte le schede che verranno elencate risulteranno collegate le une alle altre per mezzo di un canale di comunicazione o *bus*.

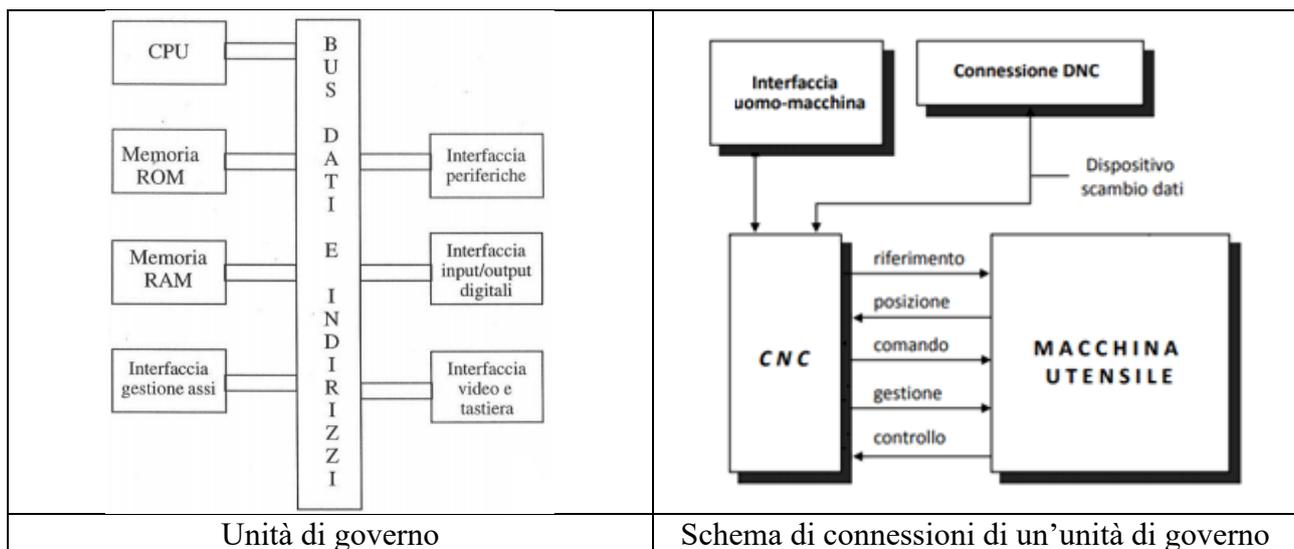


Figura 3.2: Raffigurazione schematica dell'unità di governo e delle interfacce con macchina utensile, operatore e sistema *DNC*.

1. **CPU:** letteralmente *Central Processing Unit*, è il blocco funzionale che si occupa e controlla tutte le funzioni della macchina; si tratta di un microprocessore che esegue tutte le operazioni di calcolo, rivelandosi il principale parametro di valutazione delle prestazioni del *CNC*.
2. **RAM:** acronimo di *Random Access Memory*, risulta essere la memoria con cui si interfaccia direttamente la *CPU*, poiché possiede una velocità di scrittura elevata; risulta però essere una memoria temporanea.
3. **ROM:** acronimo di *Read Only Memory*, sono dispositivi di memoria di sola lettura; contengono normalmente dati e programmi necessari al corretto funzionamento dell'unità di governo.
4. **Memoria di massa:** componente che permette di immagazzinare i dati e di riutilizzarli anche in sessioni diverse, a differenza della *RAM*; ne esistono di diverse tipologie in funzione della tecnologia costruttiva e dello spazio disponibile. Elemento non indispensabile sull'*UG* di una macchina utensile, soprattutto se il *part-program* viene caricato da una memoria centrale (vedi capitoli 3.4.3 e 3.4.4).
5. **Interfaccia gestione assi:** schede elettroniche che ricevono i segnali dai trasduttori di posizione e rielaborano il segnale da inviare al drive del motore elettrico.
6. **I/O:** schede con capacità di lettura e scrittura di segnali digitali, necessari al corretto funzionamento della macchina.
7. **HMI (Human-Machine Interface):** composta normalmente da un video, attraverso il quale l'operatore può interfacciarsi con la macchina, da una tastiera alfanumerica e da un pannello di

controllo; lo sviluppo tecnologico ha portato all'utilizzo di schermi dotati di sensori a pressione tattile (definiti "touchscreens") che permettono di legare le prime due componenti citate.

8. **Connessione DNC:** presenza di un'interfaccia RS232 e/o di una scheda di rete che permettono al CNC di interfacciarsi con un calcolatore centrale con l'obiettivo di centralizzare tutte le informazioni di lavorazione¹⁴. Sistema DNC non necessariamente presente.

La struttura di base risulta essere del tutto in linea con quanto appena descritto; si rivela però necessaria la presenza di alcune funzioni che permettano alla macchina utensile di lavorare nella maniera corretta.

All'interno dell'unità di governo sarà presente un blocco funzionale, definito *comparatore*, che permetterà di comparare appunto la posizione registrata rispetto a quella desiderata. In funzione del tipo di controllo voluto, si potranno elencare due diverse strategie:

1. Cut-off: viene emesso un segnale che inibisce il movimento; adatto a controlli di tipo punto a punto.
2. Proporzionale: segnale al servomotore finché non si è nella posizione voluta; adatto a controlli di tipo continuo.

Per macchine molto semplici si tende ad applicare il primo punto, mentre il secondo trova applicazione nella maggioranza dei casi. Per quanto riguarda il secondo caso, si osserva che deve esistere una precisa relazione tra le coordinate dei vari assi e deve essere rispettata istante per istante; risulta così necessaria la presenza di un ulteriore elemento per garantire il controllo degli assi, definito *interpolatore*. Esso permetterà di valutare, note le coordinate iniziali e finali, i punti intermedi necessari al controllo del moto; esistono diversi tipi di questo elemento, quali:

- Interpolatore lineare;
- Interpolatore circolare;
- Interpolatore elicoidale;
- Interpolatore parabolico;
- Interpolatore spline.

Perché tutto questo sia possibile, si rivela necessario dotare l'asse da controllare di un trasduttore che fornisca in uscita un segnale che possa essere rielaborato dall'unità di governo, ottenendo infine un'informazione di posizione aggiornabile in funzione della frequenza di acquisizione dell'informazione.

In particolare questi elementi possono essere distinti tra di loro in funzione del:

1. **Segnale:** il segnale può essere digitale o analogico.
 - a. Digitale: viene registrato come incrementi finiti della risoluzione di cui è caratterizzato; viene direttamente elaborato dall'unità di governo.
 - b. Analogico: segnale variabile in funzione della posizione dell'asse; ogni valore è univoco, ma risulta necessaria la presenza di un convertitore A/D per poter sfruttare l'informazione.
2. **Modalità indicazione posizione:** il segnale può essere incrementale o assoluto.
 - a. Incrementale: valore dipendente dai valori assunti in precedenza dal segnale; presente un contatore che varia il proprio valore in funzione del segnale in arrivo dal trasduttore.
 - b. Assoluto: distanza dall'origine fornita in maniera assoluta; non dipende dai movimenti effettuati in precedenza.
3. **Modalità di misura:** misura effettuata in modo diretto o indiretto.
 - a. Diretto: precisione maggiore, legata ad un costo maggiore; misura fatta direttamente sull'elemento mobile.

¹⁴ Vedi capitolo 3.4.3 e 3.4.4 per maggiori informazioni.

- b. Indiretto: misura fatta su elemento diverso dall'asse da controllare (per esempio vite a ricircolo di sfere), precisione minore legata all'operazione numerica da effettuare; di solito costo minore rispetto a trasduttori a misura diretta.

A questo punto della trattazione non conviene approfondire un argomento vasto come quello relativo ai trasduttori di posizione, poiché semplicemente non si rivela necessario in questa fase; per approfondimenti si consiglia la consultazione di testi specifici.

Una volta classificati i trasduttori di posizione, risulta necessario descrivere quelli che sono gli azionamenti degli assi presenti su una macchina utensile; come già introdotto in precedenza, su di essi viene normalmente controllata la velocità di traslazione/rotazione. Con il termine azionamento non si intende infatti il solo motore elettrico, ma anche il relativo sistema di comando e controllo.

Il sistema maggiormente utilizzato per la movimentazione degli assi risulta essere il servomotore rotativo; esso risulta composto da un motore elettrico dotato di un albero rotante in uscita, il quale viene di norma accoppiato con una vite a ricircolo di sfere¹⁵ per ottenere un moto di traslazione. Nel caso in cui si voglia ottenere un movimento rotativo, di solito il motore viene posizionato direttamente sull'asse interessato oppure accoppiato con un rotismo che permette di variare velocità di rotazione e coppia all'albero¹⁶.

Di seguito si può osservare la “**Figura 3.3**”, dove viene rappresentato un azionamento elettrico completo di controllo e comando.

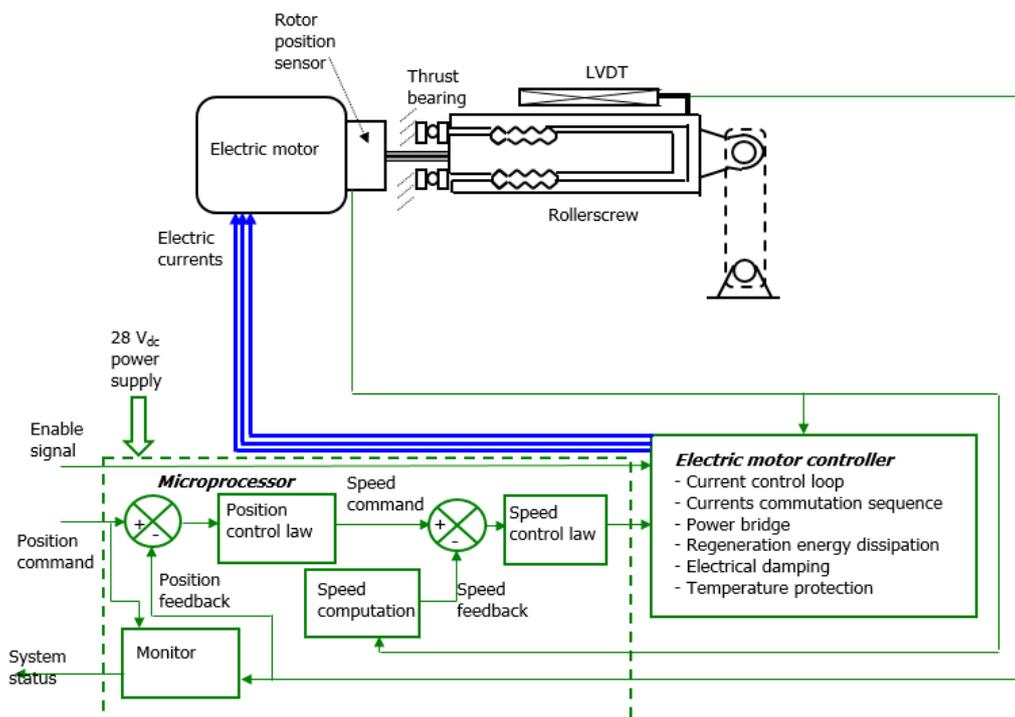


Figura 3.3: Rappresentazione di un attore elettromeccanico (EMA). Immagine ricavata da presentazione del corso di “Meccatronica”.

Una volta presa visione dell'immagine fornita, risulta praticamente immediata la distinzione dei diversi componenti presenti all'interno di un azionamento elettrico; in particolare essi verranno elencati di seguito:

¹⁵ Più raramente si trova il motore elettrico accoppiato con ad una ruota dentata che si impegna con una cremagliera.

¹⁶ Soluzione adottata anche nel caso in cui non fosse possibile collocare il motore coassialmente all'asse da movimentare.

1. **Microprocessore:** elemento elettronico con compito di elaborazione dei segnali di comando e di feedback. In particolare riceve in ingresso un segnale in arrivo dall'unità di governo, il quale deve essere rielaborato per poi essere inviato al controllo del motore; all'unità di governo vengono invece inviate informazioni sullo stato del sistema. Un sensore invia istante per istante un segnale di feedback al microprocessore, il quale deve essere rielaborato così da ottenere un'informazione di velocità di rotazione/traslazione dell'asse; si ottiene così un controllo ad anello chiuso sulla velocità.
2. **Controllore:** componente che elabora i segnali in tensione provenienti dal microprocessore e invia al motore elettrico un segnale in corrente elettrica tale da ottenere quanto richiesto dall'unità di governo. Il segnale in corrente genera una risposta del sistema meccanico in termini di coppia magnetica che mette in rotazione il rotore. Spesso questo elemento risulta inglobato nella carcassa del motore elettrico, identificando così i sistemi definiti come "Servomotori".
3. **Motore elettrico:** elemento a cui viene affidato il compito di generare movimento lungo l'asse prescelto; ne esistono di diverse tipologie in funzione dell'applicazione e delle caratteristiche che si tendono a favorire. Si possono trovare sistemi a corrente continua o alternata, i quali sono quelli maggiormente utilizzati; negli ultimi anni sono stati sviluppati motori lineari a magneti permanenti, con l'obiettivo di eliminare il problema legato alla trasformazione del moto da rotativo a traslatorio. La scelta di un motore viene di solito effettuata tenendo conto delle prestazioni (velocità di rotazione massima, coppia massima, potenza assorbita), della caratteristica coppia-velocità, degli ingombri e del peso, oltre ovviamente al costo dello stesso.

Quella fornita risulta essere una descrizione alquanto generale di sistemi di questo tipo, ma estremamente utile per lo sviluppo del discorso. Essi permettono di sviluppare un controllo continuo su tutti gli assi, sia lineari che rotativi, presenti in una macchina utensile; ai fini della trattazione non si rivela necessario un ulteriore approfondimento di questi sistemi. Laddove si renderà indispensabile una descrizione più approfondita, si provvederà a fornirla.

In questo modo è stata fornita un'immagine ampia su come risulta strutturato un controllo numerico applicato nelle moderne macchine utensili; la trattazione proseguirà con un discorso approfondito sui sistemi di centralizzazione delle informazioni e del controllo stesso, del tutto in linea con il concetto di *Industria 4.0*.

3.4.3 DNC e Industria 4.0

Si può a questo punto ricordare quanto precedentemente illustrato relativamente al concetto di *Industria 4.0* e centralizzazione delle informazioni, il quale si adatta perfettamente allo sviluppo tecnologico seguito dalle macchine utensili e dal relativo sistema di controllo.

Con il termine *DNC (Direct Numerical Control)* si tende ad indicare un sistema di produzione dove un conglomerato di macchine utensili viene controllato da un unico calcolatore centrale. Inizialmente ciò risultò estremamente vantaggioso a causa della scarsa memoria di cui erano caratterizzati i controlli numerici presenti a bordo macchina, di cui si è già ampiamente parlato in precedenza¹⁷ (sotto la denominazione *CN* o *NC*). Infatti tra gli anni '50 e gli anni '70 del secolo scorso, i programmi venivano di norma caricati sul controllo numerico a bordo macchina per mezzo di nastri forati; gli *NC* possedevano dei lettori appositi per questo scopo.

Normalmente esso conteneva tutti i part-program richiesti per svolgere le corrette lavorazioni sulle macchine utensili; risultava così possibile trasferire su richiesta tutte le informazioni necessarie ad una lavorazione, compreso anche il controllo. Il *DNC* successivamente poteva ricevere delle informazioni di diagnostica ed efficienza delle stesse macchine.

¹⁷ Capitolo 3.4.1 Storia del controllo numerico.

Il suddetto sistema (esempio di architettura disponibile in “**Figura 3.4**”) possedeva diverse caratteristiche estremamente vantaggiose per migliorare la gestione delle macchine utensili; risultava infatti possibile:

- Controllare un insieme di macchine;
- Operare su di esse in tempo reale;
- Gestire archivi dei part-program;
- Ridurre i tempi necessari per il trasferimento dei part-program (forniti sotto forma di nastri forati).

In questo modo l’unità di governo presente a bordo macchina *NC* venne sostituita da un terminale *DNC*, il quale risulta essere un’interfaccia tra la linea di trasmissione dati e la macchina utensile stessa. Tutti i compiti che fino a quel momento venivano affidati all’unità di governo, vennero così spostati sul calcolatore centrale.

A causa della struttura e dei compiti richiesti al *DNC*, sorsero diversi problemi applicativi; infatti si può facilmente osservare come il corretto funzionamento delle macchine utensili presenti in una generica officina dipendeva strettamente dal corretto funzionamento del terminale centrale. Di conseguenza un guasto di quest’ultimo avrebbe provocato il completo arresto della produzione sulle macchine utensili collegate ad esso. In secondo luogo il minor costo imputabile al computer centrale rispetto all’unità di governo non era in grado di compensare tutta la struttura, sia hardware che software necessaria alla gestione dell’intero sistema.

Questo progetto venne così accantonato inizialmente, anche a causa del forte sviluppo a cui furono soggette le unità di governo a bordo macchina e la componentistica elettronica che rese obsoleta la tecnologia legata ai nastri forati; non risulta necessario dilungarsi in questo discorso, essendo già stato trattato nel capitolo dedicato alla storia del controllo numerico (capitolo 3.4.1 *Storia del controllo numerico*).

A partire dagli anni ’80 del Novecento sono state attuate delle modifiche sostanziali al sistema *DNC*, il quale venne applicato in maniera diversa rispetto all’originale (esempio di architettura disponibile in “**Figura 3.5**”); si osserva infatti che è sempre presente un calcolatore centrale nel quale saranno contenuti tutti i part-program necessari all’attuazione delle lavorazioni, il quale però deve necessariamente interfacciarsi con l’unità di governo presente a bordo macchina.

Si passa così da un controllo diretto ad un controllo distribuito (*DNC: Distributed Numerical Control*), con conseguenze anche sull’unità di governo della singola macchina utensile; essa infatti deve essere dotata di nuove funzioni, con l’obiettivo di garantire un continuo dialogo con il calcolatore centrale.

Si possono così ottenere informazioni sul funzionamento di ognuna delle macchine utensili, soprattutto per quanto riguarda la diagnostica (analisi anomalie e guasti, tempi di lavorazione e tempi improduttivi, consumi, ecc.); in questo modo risulta possibile una conoscenza approfondita del sistema produttivo, con l’obiettivo di distribuire in maniera efficiente la produzione.

In particolare con i sistemi *DNC* moderni si deve garantire il corretto salvataggio e smistamento dei part-program, ricevendo come feedback informazioni relative allo stato di ogni singola macchina, compresi i tempi di fermo macchina e le cause ad essi legate (per esempio guasti e manutenzione); inoltre risulta fondamentale l’acquisizione di dati connessi allo stato di avanzamento della produzione, allo stato di usura degli utensili e alla produttività delle macchine.

Riassumendo quanto detto in precedenza, la presenza dell’unità di governo a bordo macchina permette al calcolatore centrale di non operare in tempo reale su tutta la produzione; si rivela così possibile affidare nuovi compiti al *DNC*, soprattutto in ambito gestionale:

- Archiviazione dei part-program in linguaggio evoluto;
- Post-processing del part-program per mezzo di un elaboratore intermedio tra calcolatore centrale e *UG*;

- Elaborazione di dati relativi alla produzione, con particolare attenzione allo stato macchina, avanzamento della produzione e analisi consumi.

Risultano perciò facilmente valutabili i vantaggi che questo sistema possiede rispetto al singolo controllo numerico a bordo macchina; in particolare essi sono riconducibili ad una migliore gestione delle risorse disponibili:

- Eliminazione sistemi di trasferimento part-program e utilizzo massiccio della rete locale del *DNC*;
- Ottima capacità di elaborazione dati di lavorazione;
- Flessibilità elevata in caso di aggiunta macchine utensili *CNC*;
- Memorie molto capienti, in grado di immagazzinare un elevato numero di part-program in linguaggio evoluto;
- Monitoraggio prestazioni di ogni singola macchina utensile;
- Integrazione informazioni sia con unità di governo (miglioramento prestazioni nel tempo) sia con ambienti aziendali diversi.

Una volta descritto il sistema *DNC*, è alquanto difficile non rapportare questa struttura di gestione della produzione con quanto ricercato nell'ambito di **Industria 4.0**; sono infatti presenti molti punti di incontro, soprattutto per quanto riguarda la centralizzazione delle informazioni e il loro sfruttamento con l'obiettivo di migliorare l'efficienza delle macchine grazie ai dati ricevuti dal monitoraggio delle stesse.

Per maggiori informazioni sul concetto di **Industria 4.0**, si rimanda al capitolo dedicato; non risulta infatti necessario riportare di seguito quanto già descritto in precedenza in maniera approfondita.

3.4.4 Architettura *DNC*

Al fine di comprendere appieno quanto descritto nel capitolo precedente relativamente al *DNC*, si propongono di seguito le strutture assunte da esso nel suo sviluppo da controllo *diretto* a controllo *distribuito*.

Iniziando da quello definito *diretto*, si ricorda che esso prevedeva la totale assenza dell'unità di governo presso la macchina utensile, sostituita da un terminale *DNC* direttamente collegato con il calcolatore centrale; quanto appena detto risulta visibile in “**Figura 3.4**”.

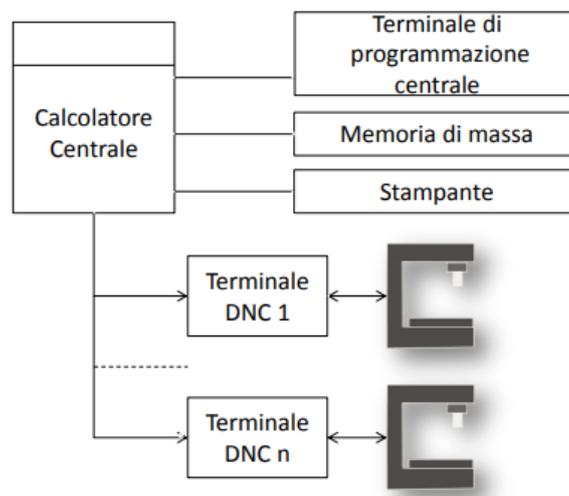


Figura 3.4: Struttura HW del *DNC* (*Direct Numerical Control*).

Si può facilmente osservare, come detto in precedenza, che ogni singola macchina utensile si può interfacciare al calcolatore centrale per mezzo di un terminale DNC, il quale ha il compito di connettere i due elementi citati.

Tutte le operazioni di gestione dei part-program venivano affidate al computer centrale, il quale normalmente possedeva una memoria estremamente capiente per contenere un gran numero di file. Data l'assenza di unità di governo a bordo macchina, tutte le operazioni di programmazione e scrittura dei part-program doveva essere affidata al calcolatore, risultando così necessaria l'implementazione di un terminale per la programmazione (come indicato).

Tutti i componenti risultavano collegati per mezzo di cablaggi, i quali permettevano di trasferire i dati dal calcolatore centrale alle varie macchine utensili; il terminale DNC assunse così importanza, con il compito di rielaborare i part-program in un linguaggio adeguato (da calcolatore a MU) e di inviare le informazioni di produzione (da MU a calcolatore).

Con lo sviluppo tecnologico sono state introdotte modifiche sia relative all'applicazione del sistema *DNC* (passaggio a controllo *distribuito*), sia ai componenti previsti per esso; si otterrà una modifica rispetto alla proposta precedente, osservabile in "Figura 3.5".

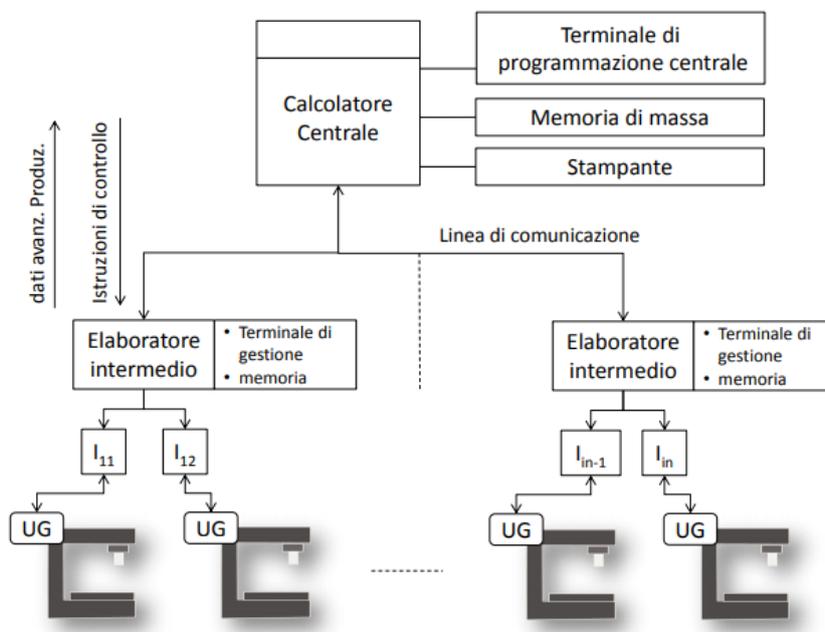


Figura 3.5: Struttura HW del *DNC* (*Distributed Numerical Control*).

Da questa rappresentazione schematica si può osservare come l'idea di base sia rimasta pressoché invariata rispetto al sistema originale; la differenza principale riguarda l'interfaccia presente tra calcolatore centrale e macchina utensile.

In particolare, si osserva che ogni macchina utensile, in linea con quanto detto nel capitolo precedente, possiede una propria unità di governo; risulta così necessaria la presenza di un *elaboratore intermedio* che permetta di mettere in comunicazione i due elementi. Ad esso viene affidato il compito di immagazzinare i part-program principalmente utilizzati sulle macchine utensili in funzione; inoltre permette di gestire tutte le informazioni di feedback provenienti dalla MU e di inviarle al calcolatore centrale. Sono inoltre presenti delle interfacce operative che connettono la singola macchina utensile con l'elaboratore intermedio.

La principale innovazione rispetto al predecessore riguarda però il metodo di trasferimento dei dati; infatti, mentre nel passato tutti i componenti venivano collegati per mezzo di cavi dedicati, nei sistemi più evoluti si tendono a privilegiare sistemi di comunicazione wireless. In questo modo si ha la possibilità di ridurre i rischi di perdita di informazioni a causa di difetti o malfunzionamenti nel

collegamento via cavo¹⁸; si riscontrano inoltre velocità di trasferimento dati estremamente elevate con questo tipo di collegamento.

3.5 *Macchine utensili a CNC*

Facendo riferimento a quanto detto in precedenza per quanto riguarda lo sviluppo storico delle macchine utensili, solo verso la fine degli anni '60 del Novecento si trovarono i primi computer a bordo macchina con il compito di controllare i movimenti della stessa.

Si è passati attraverso diverse tipologie di *CNC*, come già descritto nel dettaglio nel capitolo dedicato (*3.4.1 Storia del controllo numerico*), fino a giungere ai controlli numerici utilizzati nelle più moderne macchine utensili.

Al fine di non appesantire questa trattazione introduttiva, si provvederà ad introdurre una prima classificazione delle macchine utensili a *CNC* maggiormente diffuse al giorno d'oggi¹⁹. Successivamente si provvede ad analizzare nel dettaglio la categoria di macchine utensili su cui si registra il maggiore utilizzo di sistemi automatici.

In prima analisi si possono classificare le macchine utensili a controllo numerico in funzione del numero di assi controllati simultaneamente:

- **2 assi**: si possono identificare torni e macchine ad elettroerosione a filo; risulta possibile controllare simultaneamente due movimenti su un piano.
- **2.5 assi**: ne sono un esempio le foratrici e le alesatrici; si possono combinare movimenti su due dei tre piani cartesiani, mentre per il terzo asse risulta possibile controllare unicamente posizione finale e velocità.
- **3÷5 assi**: in questa categoria vengono identificate le fresatrici; in funzione della complessità della superficie da lavorare, si sceglie la macchina adatta in base al numero di assi simultaneamente controllabili. In queste macchine vengono controllati tutti e tre gli assi lineari e fino ad un massimo di due assi di rotazione.
- **Più di 5 assi**: normalmente si identificano in questa classe i robot, i quali però non sono delle macchine utensili.

Per quanto riguarda la trattazione risultano di scarso interesse le prime due categorie; l'ultima categoria invece si rivela interessante per applicazioni di manipolazione, con particolare interesse nelle operazioni di movimentazione dei pallet da magazzino a zona di lavoro²⁰.

Escluso tutto ciò che si rivela di scarso interesse, non resta che analizzare quanto sviluppabile dalle fresatrici a controllo numerico; ne esistono ovviamente di diversi tipi, in funzione della struttura della macchina, delle prestazioni e, naturalmente, del numero e tipo di assi controllati.

Ai fini della trattazione risulta però di scarso interesse una descrizione approfondita di ogni singola tipologia di fresatrice esistente, poiché solo alcune macchine si rivelano interessanti per lo sviluppo del discorso.

Per questo motivo nel capitolo fornito nella pagina seguente si propone nel dettaglio una trattazione relativa ai centri di lavorazione di fresatura, in grado di controllare fino a 5 assi in maniera simultanea.

¹⁸ Oltre ovviamente ad una riduzione degli ingombri.

¹⁹ Maggiore attenzione verrà posta sulle tipologie di macchine utensili visionate e studiate all'interno dell'azienda ospitante.

²⁰ Per approfondimenti vedi capitolo *4.2.2 Sistemi robotizzati*.

3.6 Centri di lavoro di fresatura a 5 assi simultanei

Per concludere il discorso relativo all'automazione nelle macchine utensili, delineato nel corso della trattazione sviluppata fino a questo punto, si rivela necessario descrivere in maniera approfondita la categoria di macchine utensili che maggiormente si presta all'applicazione di sistemi automatici.

Si sviluppa così un discorso dedicato ai centri di lavoro per la fresatura, soffermando l'attenzione su quelli dove risulta possibile sviluppare lavorazioni di parti complesse grazie al controllo simultaneo di 5 assi²¹.

Per agevolare la comprensione, si fornirà di seguito una rappresentazione tridimensionale di uno dei centri di lavoro presenti nel parco macchine della ditta ospitante (vedi “**Figura 3.6**”).



Figura 3.6: Centro di lavoro di fresatura Umill 1800, prodotto da Emco-Mecof.

La logica che sta alla base dello sviluppo di questa categoria di macchine utensili risulta essere legata allo sfruttamento massimo dello spazio disponibile; in questo modo le sue dimensioni in pianta risultano contenute nella maggior parte dei casi, mentre verrà favorito lo spazio di lavoro in termini di volume occupabile.

Nonostante ne esistano diverse tipologie e dimensioni (in funzione degli aspetti favoriti), i componenti principali sono quasi sempre gli stessi; si possono infatti elencare:

²¹ Tipologia di macchina utensile analizzata durante la permanenza all'interno dell'azienda ospitante.

1. **Basamento**: componente soggetto ad elevato studio dal punto di vista strutturale (analisi di rigidità, stabilità termica e meccanica), consente di ancorare la macchina al terreno; normalmente viene dotato di canali dedicati alla raccolta di trucioli e liquido refrigerante, indispensabile durante le operazioni di taglio. Sono normalmente previste delle fasce lavorate per l'inserimento di guide lineari per l'ottenimento di uno dei tre assi cartesiani.
2. **Montante (mobile o fisso)**: elemento a cui viene normalmente affidato il compito di sorreggere carro porta testa, testa di fresatura ed, eventualmente, magazzini utensili di piccole dimensioni²² (per esempio magazzini a torretta); esso può essere previsto mobile in accoppiamento alle guide presenti sul basamento, mobile lungo un asse longitudinale ad esso oppure fisso. Negli ultimi due casi si deve imporre il moto lungo il secondo asse orizzontale al supporto su cui si installerà la tavola/pallet.
3. **Carro porta testa**: ulteriore componente soggetto ad analisi approfondite, a cui viene affidato il compito di sostenere la testa di fresatura; normalmente a questo elemento viene imposto il moto lungo l'ultimo asse lineare.
4. **Testa**: Elemento più importante all'interno di una qualunque macchina utensile, il quale permette di ottenere un'ampia gamma di possibilità per le lavorazioni ad asportazione di truciolo; ne esistono diverse tipologie in funzione degli aspetti premiati e delle specifiche richieste. Al suo interno viene installato il mandrino, il quale potrà essere mosso da un motore periferico o da uno integrato, garantendo così l'attuazione della lavorazione per mezzo di un moto rotatorio.
5. **Mandrino**: perché una qualunque lavorazione risulti possibile, si deve prevedere la presenza di un motore elettrico che garantisca la rotazione del mandrino e dell'utensile ad esso collegato. Si possono classificare in:
 - a. Mandrino con motore esterno: il motore che movimenta il mandrino è posto in posizione periferica e di solito vengono collegati per mezzo di una catena cinematica²³; nel passato era prevista la presenza di un cambio a più gamme di velocità abbinato ad un motore elettrico asincrono. Nelle macchine utensili moderne verranno invece previsti motori sincroni dotati di cambi velocità elettronici²⁴, permettendo in questo modo di semplificare il sistema senza riscontrare perdite in termini di prestazioni.
 - b. Mandrino con motore integrato (elettromandrino): elemento direttamente montato sulla testa di fresatura, con la conseguente eliminazione di tutti i componenti di trasmissione del moto. Il trasduttore di posizione potrà essere installato direttamente sull'asse mandrino, riducendo in questo modo gli errori legati alla trasmissione²⁵.
6. **Guide**: ne esistono diverse tipologie in funzione del sistema previsto per la riduzione dell'attrito con i pattini; permettono l'ottenimento del movimento lungo un asse lineare.
7. **Magazzino utensili**: elemento accessorio, caratterizzato da varie misure e forme, che può contenere al suo interno un numero variabile di utensili utili per l'attuazione di diversi tipi di lavorazioni; normalmente viene abbinato ad un sistema automatico di cambio utensile al fine di garantire un miglioramento nella produttività della macchina.
8. **Tavola/pallet**: elemento su cui viene fissato il pezzo da lavorare, dotata nella maggior parte dei casi di un moto di rotazione intorno all'asse verticale al fine di garantire operazioni di fresatura

²² Soluzioni molto particolari, normalmente adottate su macchine estremamente compatte.

²³ La catena cinematica è necessariamente presente nel caso in cui l'asse mandrino non coincide con quello del motore; negli altri casi risulta utile qualora si riveli necessaria una variazione nel valore di coppia sull'asse mandrino.

²⁴ Motori elettrici direct-drive.

²⁵ In precedenza trasduttore posizionato su motore mandrino esterno.

di profili complessi o, in casi specifici, operazioni di tornitura verticale; in alcune tipologie di macchina si può dotare il supporto tavola di un moto traslatorio. Nel caso di utilizzo di pallet, si devono ovviamente prevedere dei sistemi di centraggio e bloccaggio sull'elemento di riferimento; questo sistema permette di incrementare la produttività nel caso in cui alla macchina venisse implementato un sistema automatico di cambio pallet.

9. **Altri elementi.**

Una volta caratterizzate le componenti principali di un centro di lavoro di fresatura, risulta possibile descrivere le varie macchine utensili in funzione delle soluzioni adottabili per l'ottenimento del quarto e quinto asse; si ricorda infatti che i tre assi lineari sono già controllabili nelle fresatrici tradizionali.

In particolare, esistono diverse combinazioni tra testa di fresatura e tavola che permettono infine di ottenere i 5 assi controllati; di seguito si possono presentare quelle più diffuse:

- **Testa a forcella/ monospalla + tavola rotante**: si sfrutta una testa a forcella fissata sul carro porta testa, la quale permette di orientare l'asse dell'utensile mediante una rotazione del corpo mobile; il quinto asse viene invece affidato alla tavola rotante, la quale può garantire in questo modo operazioni di fresatura o tornitura verticale in funzione della velocità di rotazione che può raggiungere.
- **Testa birotativa a posizionamento continuo + tavola rotante**: stesso discorso fatto in precedenza, con la differenza che in questo caso l'asse di rotazione della testa non corrisponde a nessuno degli assi lineari di riferimento della macchina utensile. Il discorso sulla tavola rotante risulta del tutto identico a quanto visto in precedenza.
- **Testa fissa + tavola roto-basculante**: questa combinazione risulta poco utilizzata nei centri di lavoro poiché il sistema previsto non permette di sorreggere pesi confrontabili con quelli prescritti nei casi precedenti; anche per questo motivo, questa soluzione trova applicazione in macchine caratterizzate da corse e dimensioni ridotte. Con questa soluzione si otterranno i due gradi di libertà di rotazione direttamente sulla tavola; si potrà utilizzare così una testa di fresatura fissa, normalmente montata verticalmente.

Di seguito in “**Figura 3.7**” viene fornita una rappresentazione grafica per ognuna delle tre casistiche proposte nell'elenco precedente.

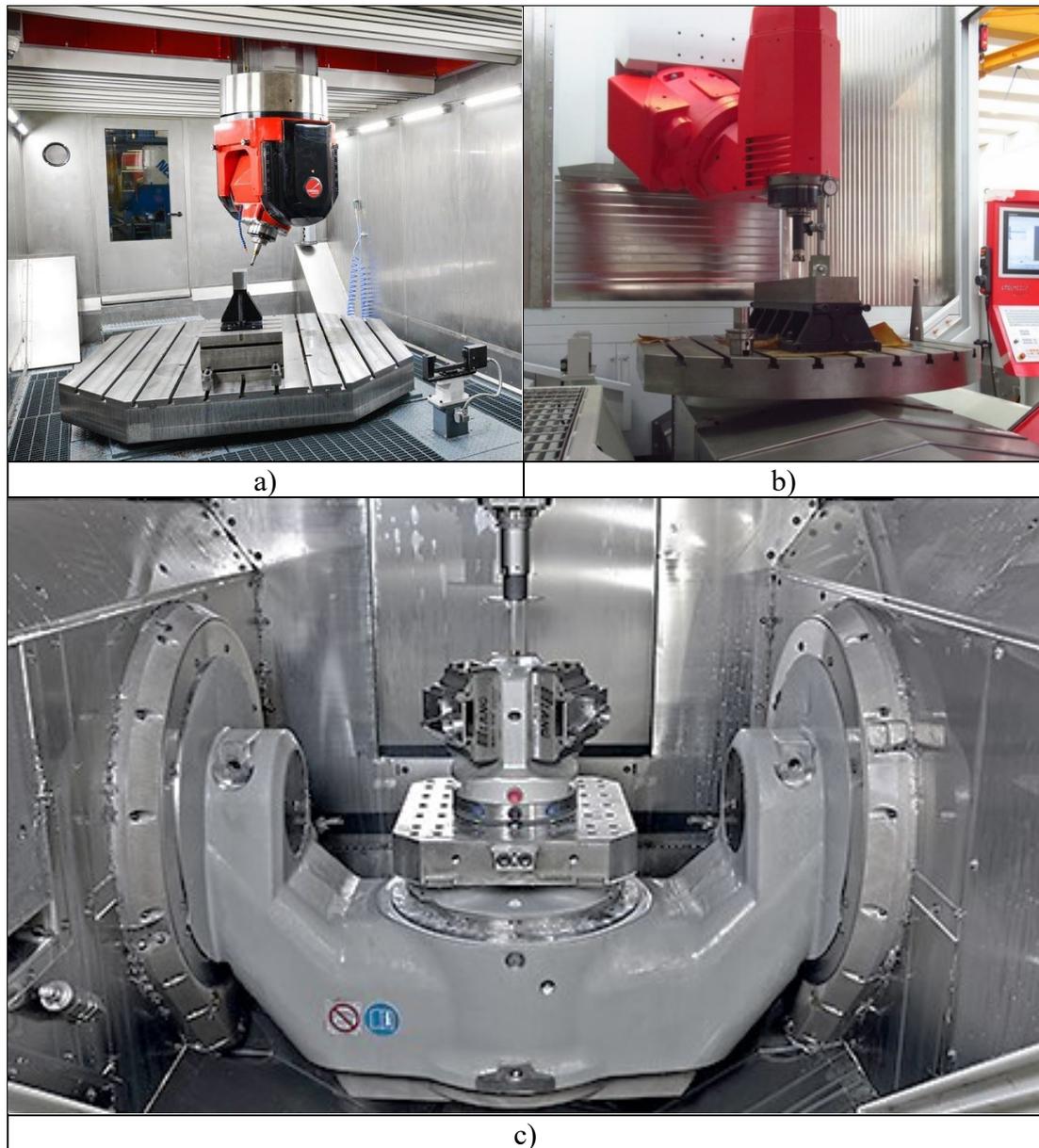


Figura 3.7: Rappresentazione delle tre soluzioni più comuni per garantire il controllo di 5 assi su un centro di lavoro di fresatura.

Le soluzioni appena descritte e fornite in figura permetteranno di limitare gli errori dovuti al riattrezzaggio dei pezzi, tipico delle vecchie fresatrici a tre assi controllati; in questo modo infatti si potranno ricavare forme anche complesse con un singolo attrezzaggio. Si ridurranno così anche i tempi improduttivi legati al posizionamento del pezzo sulla tavola per la lavorazione.

Seguendo sempre questo principio di incremento della produttività, già introdotto in precedenza nel capitolo **3.1 Macchine utensili tradizionali**, si cerca di implementare alle suddette macchine utensili dei sistemi automatici al fine di ridurre sempre di più i tempi improduttivi legati all'attrezzaggio della tavola e al cambio utensile, entrambi svolti manualmente.

Si sono così sviluppate nel tempo delle innovazioni rispetto a quanto proposto nelle macchine utensili tradizionali, con l'obiettivo di ridurre al minimo gli errori dovuti all'intervento umano.

In particolare sono due le innovazioni principali, basate sull'automazione di azioni quali il cambio utensile e il cambio pallet; per il primo si dedica un sotto-capitolo proposto successivamente, mentre per il secondo, elemento centrale della presente tesi, si svilupperà una trattazione più dettagliata in un capitolo completamente dedicato ad esso.

3.6.1 Modularità

Prima di parlare delle soluzioni automatiche applicabili a bordo di una generica macchina utensile, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza della stessa riducendo i tempi improduttivi, conviene introdurre un concetto preliminare, relativo all'applicazione di sistemi modulari sulla macchina.

Se si analizza la macchina del punto di vista prestazionale, si può facilmente notare che la ricerca di miglioramento dei parametri di processo ottenibili cozza con la concezione modulare dei sistemi produttivi; essa infatti prevede una separazione tra i vari moduli, i quali devono necessariamente essere studiati separatamente in termini di sviluppo, fabbricazione e verifica qualitativa.

Per evidenziare i principali motivi per l'introduzione di sistemi modulari, si devono osservare le macchine utensili inserite all'interno di un contesto produttivo; si potranno infatti considerare come:

1. Oggetti di un processo produttivo industriale;
2. Output di un settore che necessita di una struttura adeguata ai mercati di riferimento;
3. Risorse utilizzate all'interno di un processo produttivo;
4. Beni strumentali di investimento.

Facendo riferimento ad ognuno di questi concetti, si può facilmente osservare come un'opportuna concezione modulare della macchina utensile permette di creare un maggior valore ad un costo più contenuto. Focalizzandosi sul concetto di macchina utensile come prodotto finale di un processo produttivo, si osserva che possono essere attuati specifici sistemi di gestione, definiti anche "economie di comunanza"; in questo modo risulta possibile:

- Gestire un minor numero di disegni.
- Minore varietà degli articoli, con conseguenti maggiori quantitativi su singolo ordine di acquisto.
- Possibilità di sviluppare mini-serie produttive per moduli comuni a più macchine.
- Specializzazione nella costruzione dei singoli moduli.
- Distinte basi più "snelle".

Per garantire una corretta scomposizione di un prodotto finito in moduli, si deve in ogni modo sottostare a dei precisi criteri che ne andranno a definire la concezione di base; in particolare se ne possono elencare due:

- Modularità tecnico-strutturale: la macchina utensile viene scomposta in diversi moduli facendo riferimento alla forma e alla collocazione finale dei componenti.
- Modularità funzionale: vengono identificati i vari moduli relativamente alla funzione prevista per essi.

Nella maggior parte dei casi viene preferita la prima opzione, la quale in ogni caso permette di ottenere diversi vantaggi tra quelli identificati in precedenza.

Facendo invece riferimento a quanto riportato dal testo di riferimento "Manuale delle macchine utensili", già ricordato in precedenza, in relazione al progetto MAREA, risulta possibile analizzare la struttura di un centro di lavorazione di fresatura, identificando fino a 13 funzioni principali²⁶ per garantire l'attuazione del processo di taglio.

1. *Feed motion*
2. *Cutting motion*
3. *Workpiece holding*
4. *Tool holding*
5. *Process cooling*
6. *Lubrication*
7. *Chip removal*

²⁶ Ognuna di queste funzioni necessiterà di uno specifico modulo.

8. *Power supply (electric)*
9. *Power supply (hydraulic)*
10. *Power supply (pneumatic)*
11. *Central control*
12. *Tool exchange*
13. *Pallet exchange*

Queste funzioni hanno però bisogno di essere gestite e coordinate nella maniera più adatta; per questo motivo si devono prevedere degli elementi che permettano il corretto scambio di forze (*mechanical interfacing*), di energia e fluidi (*multiple resources network*), oltre che di informazioni (*communication network*).

Tutto questo è stato studiato ovviamente a livello teorico; all'atto pratico sorgono diverse criticità, identificate durante lo sviluppo del progetto MAREA:

- **Processo di derivazione delle specifiche**: sorgono problemi durante il processo che permette di individuare le specifiche dei singoli moduli partendo dalle caratteristiche d'uso della macchina finale; specifiche troppo rigide potrebbero determinare dei costi eccessivi per i singoli moduli, limitando la concorrenzialità della macchina.
- **Interdipendenze tra i moduli**: risulta comunque necessario gestire le connessioni tra i diversi moduli al fine di evitare il mancato raggiungimento delle prestazioni impostate a monte della fase di progettazione.

Nonostante queste difficoltà appena elencate risultino di estrema importanza, si riscontrano comunque molti vantaggi dovuti all'applicazione di una concezione modulare nella struttura di una macchina utensile. Per prima cosa si osserva che risulta estremamente semplificata la manutenzione a bordo macchina; infatti, una volta identificato il modulo compromesso, si rivela molto veloce una sua sostituzione, riducendo in questo modo i tempi di fermo macchina.

Secondariamente si nota come i sistemi risultano facilmente personalizzabili; infatti, una volta definite le specifiche, diventa facile definire la combinazione di moduli che permette di ottenerle. Allo stesso tempo si osserva che anche una macchina finita può essere, in un secondo tempo, "rimodulata" mediante la sostituzione, soppressione o aggiunta di nuovi moduli funzionali.

Facendo riferimento al concetto di modularità, si può passare a questo punto alla descrizione dei principali sistemi automatici installati sui centri di lavoro di fresatura, già citati nella parte introduttiva del capitolo.

Di seguito viene proposta una descrizione adeguata alla trattazione dei sistemi automatici di cambio utensile utilizzati su questa tipologia di macchine; per quanto riguarda i sistemi di pallettizzazione si rimanda al capitolo dedicato (*4 Cambio pallet*), dove invece essi verranno trattati in maniera approfondita.

3.6.2 *Automatic Tool Changer (ATC)*

All'interno di un centro di lavoro di fresatura risulta evidente che, per ottenere geometrie complesse con un solo attrezzaggio del pezzo da lavorare, si richiede un elevato numero di cambi utensile durante l'intero ciclo di lavorazione.

Si osserva quindi che se l'operazione fosse lasciata ad intervento umano si otterrebbero tempi lunghi di fermo macchina, con una conseguente riduzione della produttività della macchina utensile. L'obiettivo si riconduce all'ottimizzazione dei tempi passivi legati a cambio utensile e messa a punto dello stesso; sono stati così sviluppati i primi sistemi automatici di cambio utensile basati su meccanismi a camma.

Questi sistemi sono ritenuti i più adatti per ottenere caratteristiche di affidabilità, velocità e precisione molto elevate; con questi meccanismi si riscontrano diversi vantaggi, quali:

- Leggi del moto opportunamente studiate e ottimizzate;
- Movimentazione precisa e con elevata ripetibilità;
- Non sono necessari sistemi di controllo di velocità e posizione elettronici;
- Ridotta rumorosità;
- Elevata affidabilità;
- Ridotti ingombri.

Esistono diversi sistemi di cambio utensile automatico, ognuno dei quali ha delle peculiarità utili in alcuni tipi di applicazioni; di seguito se ne possono elencare alcuni:

1. **Centri di lavoro:**

- a. A navetta fissa;
- b. A navetta mobile;
- c. A pantografo;
- d. A camme (o CUT).

2. **Centri di tornitura:**

- a. A disco;
- b. Braccio robotizzato a doppia pinza.

Si può osservare così che una prima distinzione viene fatta sul tipo di macchina su cui si prevede l'installazione del sistema di cambio utensile; successivamente si rivela necessaria la scelta del sistema più adatto alla singola applicazione. Nei centri di lavoro più moderni si osserva un largo impiego dei sistemi a camme, di cui ne viene fornita una rappresentazione in “**Figura 3.8**” con un esempio di sequenza delle operazioni che dovrà svolgere.

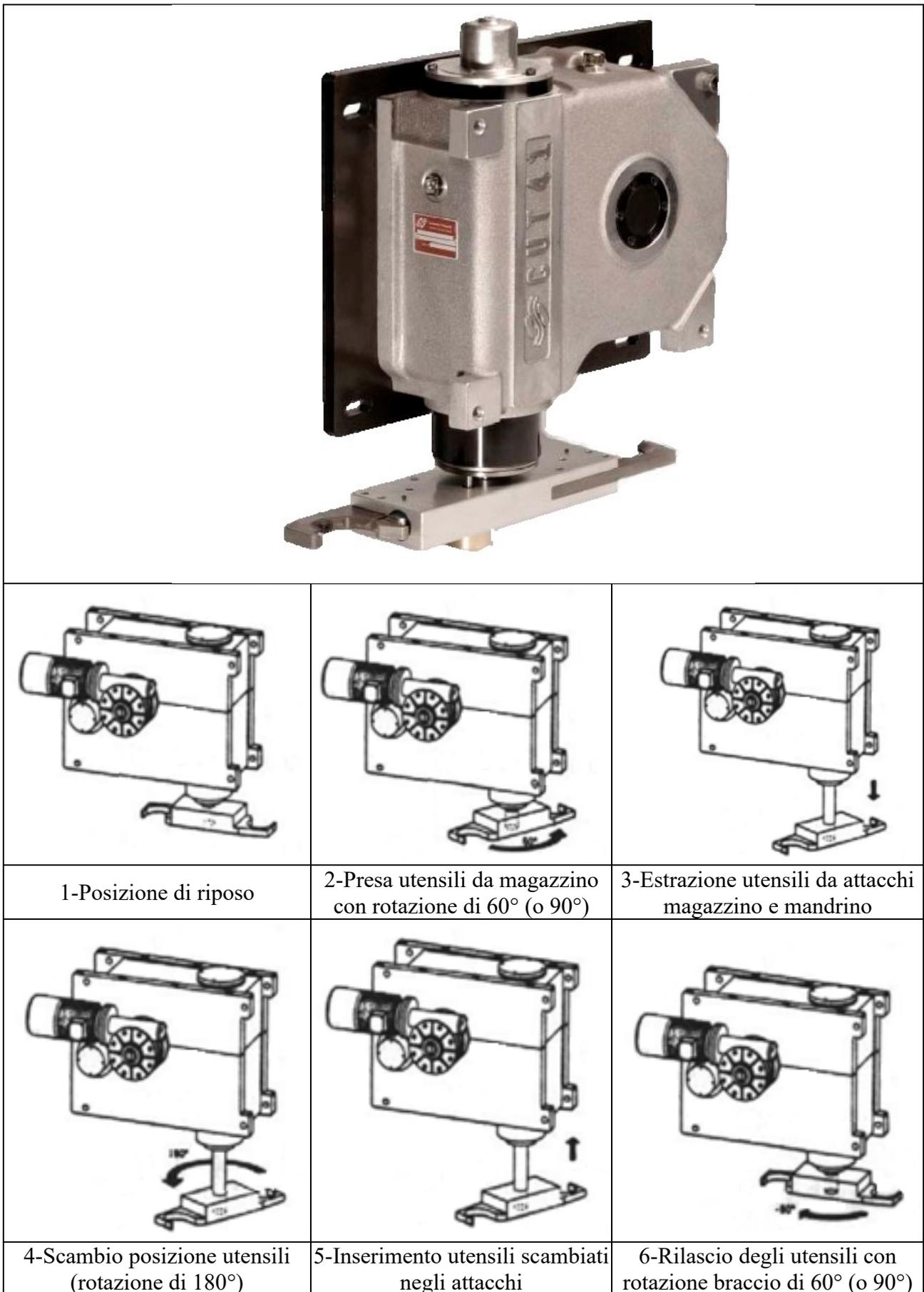


Figura 3.8: Sistema di cambio utensile a camma (o CUT).

Questi sistemi, a cui è stata fornita la denominazione *CUT*, hanno permesso di ridurre in maniera drastica il tempo necessario al cambio dell'utensile, con conseguente aumento della produttività.

Rispetto al passato, dove normalmente era il mandrino stesso ad eseguire le operazioni di posa e presa degli utensili, si ottengono così dei sensibili miglioramenti con i nuovi sistemi *CUT*.

Come risulta facilmente deducibile, un sistema automatico di cambio utensile trova maggiore spazio laddove si prevede l'installazione di un magazzino utensili, al fine di automatizzare l'operazione di presa e posa dell'utensile; l'intero processo viene gestito dal controllo numerico della macchina, permettendo così di comandare il cambio utensile attraverso specifiche funzioni inseribili all'interno del part program caricato in memoria.

Non risulta necessario scendere maggiormente nel dettaglio per quanto riguarda la descrizione di questi sistemi, non essendo oggetto della presente tesi; per maggiori informazioni si consiglia la consultazione di testi specifici²⁷ come quelli già richiamati in precedenza e riportati in nota.

²⁷ Maiocchi B., Rossi M., *Manuale delle macchine utensili*, I edizione, ottobre 2002, Capitolo 13, Tecniche Nuove
Maiocchi B., Rossi M., *Manuale delle macchine utensili*, II edizione, gennaio 2014, pp. 938, Tecniche Nuove

4. Cambio pallet

Fino a questo momento la trattazione è stata sviluppata con l'obiettivo di identificare in principio l'ambiente di studio in cui si va ad operare per la stesura della seguente tesi; per questo motivo si è rivelato necessario introdurre il concetto di automazione industriale, il quale deve necessariamente essere affiancato dalle teorie di Lean Manufacturing e Industria 4.0 come spiegato in precedenza. Solo successivamente si è cominciato a parlare di macchine utensili, partendo dal generale fino a caratterizzare i centri di lavoro di fresatura e i sistemi automatici che vengono normalmente previsti all'interno di essi.

A questo punto si può finalmente iniziare la descrizione dettagliata dei sistemi di cambio pallet, partendo da quelli manuali presenti nelle macchine più semplici, fino a quelli automatici (di seguito definiti *APC* o "Automatic Pallet Changer") o persino robotizzati. L'obiettivo finale è quello di caratterizzare il tutto sia a livello concettuale che a livello di funzionamento; ciò permetterà di introdurre nella maniera più adeguata possibile l'applicazione di sistemi simili su macchine realmente funzionanti.

Si sviluppa perciò una trattazione che permetta di valutare in primis l'idea che sta alla base all'adozione di questi sistemi automatici; si cercherà di sviluppare per questo motivo un discorso che, partendo da quanto visto in precedenza, permetta di giungere alle corrette conclusioni. Si deve infatti fare ricorso a conoscenze di diversi ambiti al fine di comprendere per quale motivo questo sistema automatico risulti tanto efficace, sempre sottostando a determinate condizioni d'utilizzo. Risulta così fondamentale quanto già descritto in precedenza relativamente al concetto di Lean Manufacturing, il quale garantisce delle fondamenta solide per l'applicazione di sistemi automatici in linee produttive, nel generale, e in macchine utensili, nel particolare.

Successivamente si cercherà di classificare i diversi sistemi di cambio pallet combinati alle macchine utensili, con particolare attenzione a quelli sviluppati appositamente per i centri di lavoro di fresatura. Per fare questo si prendono in considerazione tutti i componenti caratteristici di un sistema cambio pallet, partendo da ciò che permette la movimentazione fino agli elementi che garantiscono il centraggio e bloccaggio del singolo pallet.

Al fine di garantire una conoscenza approfondita di questi sistemi, verranno forniti esempi anche relativi alle tipologie di magazzini porta-pallet abbinabili ai vari moduli di cambio pallet; ciò permetterà di valutare quali combinazioni risultano possibili, oltre a fornire delle indicazioni sull'utilizzo degli stessi in associazione all'applicazione prevista per un dato centro di lavoro.

Una volta descritte tutte le tipologie di cambio pallet e relativi magazzini, oltre ad aver presentato una serie di specifiche relative a questi moduli, si forniranno dei generici schemi pneumatici ed idraulici che garantiscono il corretto funzionamento di questi sistemi; ciò permetterà di visualizzare come questi sistemi verranno controllati e il livello di automazione raggiungibile su di essi.

4.1 *Introduzione*

Nei capitoli precedenti sono stati delineati i concetti che stanno alla base dell'utilizzo sempre più ampio di sistemi automatici all'interno di ambienti industriali, con l'obiettivo di migliorare la resa di ogni processo produttivo; per questo motivo, si è registrato un incremento della presenza di centri di lavoro, sia di fresatura che di tornitura. Questo risulta facilmente intuibile data la possibilità di ottenere con queste macchine pezzi anche molto complessi, in un unico serraggio e con accuratissime e molto elevate.

Successivamente è stato analizzato il percorso seguito a livello storico per il miglioramento delle macchine utensili in termini di efficienza e controllo; sono così state introdotte varie innovazioni legate al controllo dei movimenti della macchina utensile (indicato in precedenza come controllo numerico *CN* o, successivamente, *CNC*) e alla riduzione dei tempi improduttivi legati al cambio utensile (sistemi *ATC*) e al cambio del pezzo da lavorare (sistemi *APC*).

Prendendo in considerazione quest'ultimo sistema, si osserva che grazie ad esso risulta possibile ridurre i tempi di fermo macchina grazie alla possibilità di attrezzaggio del pallet presente nella zona dedicata, mentre il secondo si trova ancora all'interno dello spazio di lavoro.

Generalmente un sistema di pallettizzazione, visto come modulo funzionale, si compone di due parti principali e distinte:

1. Sistema di cambio pallet;
2. Meccanismo di bloccaggio e sbloccaggio del pallet.

La suddetta divisione risulta estremamente utile al fine di suddividere le competenze di movimentazione delle parti da quelle di centraggio e bloccaggio del pallet presso gli alloggiamenti dedicati; ovviamente queste due parti dovranno interagire l'una con l'altra, con l'obiettivo di garantire il corretto funzionamento dell'intero sistema²⁸.

Perché l'applicazione di questo modulo risulti completa, si devono analizzare anche i moduli funzionali relativi all'approvvigionamento elettrico, idraulico e pneumatico²⁹ al fine di rendere possibile ogni singola azione necessaria per il funzionamento del sistema. Facendo riferimento a quanto proposto dai vari produttori di sistemi automatici di cambio pallet, oltre a quanto è stato possibile osservare all'interno dell'azienda ospitante, si possono definire i seguenti compiti:

1. Alimentazione idraulica: bloccaggio e sbloccaggio coni, sollevamento pallet, lavaggio anelli di centraggio (poco comune);
2. Alimentazione pneumatica: pulizia elementi mobili e di centraggio da trucioli e sporcizia.

La presente introduzione risulta essere estremamente sintetica, avente in ogni caso l'obiettivo di fornire un'indicazione sui sistemi oggetto del presente capitolo; per approfondimenti relativamente ai vari sistemi di cambio pallet, magazzini abbinabili ed elementi di centraggio, si rimanda ai prossimi sotto-capitoli dedicati.

4.2 *Classificazione sistemi di cambio pallet*

Risulta a questo punto necessario individuare le caratteristiche che maggiormente possono impattare sulla definizione di un sistema di cambio pallet. Si rivela infatti necessario caratterizzare nella maniera più completa possibile i suddetti sistemi, focalizzando l'attenzione sugli aspetti che ne determinano l'utilizzo su una macchina utensile.

Per quanto riguarda la trattazione che segue, essa si svilupperà con la seguente parte introduttiva sulla classificazione dei sistemi trattati; ognuno degli aspetti che vengono introdotti verrà poi descritto in maniera approfondita nel relativo sotto-capitolo.

Per prima cosa si può fornire un elenco delle diverse tipologie di cambio pallet presenti sul mercato, ponendo l'attenzione sul livello di automazione previsto:

1. Sistemi manuali;
2. Sistemi automatici;
3. Sistemi robotizzati.

²⁸ Il part-program deve essere scritto in maniera tale da garantire il funzionamento in esercizio.

²⁹ Vedi 3.6.1 *Modularità*.

In seguito ad analisi sull'efficienza delle macchine utensili in termini di rapporto tra tempo di taglio effettivo e tempo totale di produzione, è stato riscontrato un notevole miglioramento qualora venisse adottato un qualunque sistema di cambio pallet. Tale ottimizzazione risulta tanto più marcata quanto più il sistema automatico in esame risulta rapido nell'operazione; ovviamente la scelta della tipologia di sistema di cambio pallet deve sottostare anche ad altre necessità, in funzione degli ingombri e della macchina a cui viene abbinato, tanto per fare un paio di esempi.

Con l'obiettivo di fornire una base di conoscenza per ognuno dei sistemi citati, si sviluppa una trattazione dedicata a ciascuno di essi; come risulta ovvio, si tende a favorire le ultime due categorie proposte, essendo la prima di scarso interesse per quanto riguarda la presente tesi.

4.2.1 Sistemi manuali

Questi sistemi risultano essere quelli a maggior impiego umano, con limitate implementazioni di sistemi automatici; nonostante questo, si osserva comunque una forte riduzione dei tempi improduttivi e di set up, soprattutto se rapportato a macchine utensili dove questi sistemi sono completamente assenti.

Scendendo nel dettaglio, si osserva che tutti i compiti sono affidati all'operatore presso la macchina utensile; infatti ad esso sono richiesti sia i compiti di carico (con connesso attrezzaggio) e scarico pezzo, oltre alla movimentazione dei pallet stessi. Normalmente si prevede la presenza di un'isola di carico di fronte alla macchina utensile, o comunque in corrispondenza delle porte mobili di accesso alla zona di lavoro.

Tra le proposte fatte in precedenza, questa risulta essere quella a minor livello di automazione, oltre ovviamente ad essere soggetta a tutto ciò che risulta connesso all'intervento umano.

Questi sistemi, per loro stessa natura, vengono utilizzati in combinazione con pallet di dimensioni ridotte e pezzi da lavorare caratterizzati da un peso contenuto; tali sistemi occupano in questo modo uno spazio molto ridotto al netto di un elevato numero di pallet disponibili, come si può vedere in "Figura 4.1" proposta di seguito.

Si può facilmente osservare come questi sistemi vengono installati frontalmente alla macchina utensile, in modo da permettere all'operatore di effettuare le operazioni di cambio pallet seguendo i dettami normativi in termini di ergonomia e sicurezza. Si deve prevedere in ogni caso la presenza di guide che permettano la mobilità del pallet da area di lavoro a zona di attrezzaggio e viceversa.

Come già detto in precedenza, il livello di automazione non è molto elevato, permettendo allo stesso tempo un costo molto inferiore rispetto alle altre tipologie elencate in precedenza; inoltre tende ad occupare uno spazio molto ridotto rispetto a quanto invece impegnato dalla macchina utensile.



Figura 4.1: Macchina utensile *CNC* con aggiunta di un sistema di cambio pallet manuale.

4.2.2 Sistemi robotizzati

Sistemi a più elevato livello di automazione, all'interno dei quali l'intervento di un operatore umano risulta essere alquanto limitato. Si osserva infatti la presenza di robot a cui viene affidato il compito di carico e scarico pezzo presso la macchina utensile di interesse³⁰; la tipologia di robot da adottare in uno specifico caso varia in funzione della precisione richiesta e dei pezzi da movimentare. Eventualmente, si può prevedere la presenza di uno o più robot per l'asservimento di diverse macchine utensili all'interno di un'isola produttiva.

Ogni robot possiede una propria unità di governo, differente da quella presente sulla macchina utensile, la quale possiede un proprio linguaggio di programmazione, nella maggior parte dei casi diverso per ogni produttore; ad oggi infatti non sono presenti normative che impongano l'uso di uno specifico linguaggio³¹, determinando per l'azienda, nella maggior parte dei casi, costi aggiuntivi per far istruire l'operatore su un linguaggio di programmazione³².

³⁰ All'operatore umano verranno in ogni caso affidate le operazioni di attrezzaggio del pezzo nella maggior parte dei casi.

³¹ Diverso dai controlli numerici per macchine utensili, per le quali il linguaggio è ben specificato da normativa.

³² Sono state sviluppate dai produttori di controlli numerici per macchine utensili nuove soluzioni per implementare il linguaggio ISO anche alla programmazione dei robot collaborativi.

La precisione che questi sistemi possono garantire non è molto elevata³³ e si aggira intorno al decimo di millimetro; ciò è dovuto alla presenza di un elevato numero di gradi di libertà, dati dai giunti, oltre ad una ridotta rigidità di cui si caratterizza la struttura di un robot industriale³⁴. Si cerca di compensare la precisione non elevata, di cui sono caratterizzati questi sistemi, con un'elevata ripetibilità nel posizionamento; l'obiettivo finale risulta essere quello di compensare l'errore di precisione tramite software con un controllo adattativo.

In questo modo il robot industriale trova impiego principalmente come manipolatore, al fine di collaborare o sostituire l'operatore umano, soprattutto in lavori ad elevata ripetibilità; lo si può trovare inoltre in ambienti non salubri oppure laddove vi siano problemi di sovraccarico per la persona.

Risultano essere sistemi caratterizzati da costi abbastanza elevati, se rapportati alle altre due classi, e ciò ne ha limitato l'utilizzo in ambienti produttivi estremamente sensibili al costo di produzione; allo stesso tempo però si prevede che, grazie al costante progresso registrato in campo tecnologico, si potranno sviluppare sistemi con rapporti costo/efficienza migliori di quanto offerto in precedenza.

Questi sistemi risultano storicamente ottimali in ambienti dove è presente una produzione standardizzata, o almeno con poche modifiche per un periodo lungo; in questo modo si suddivide il costo di programmazione del robot su una maggiore quantità di prodotti finiti. Si osserva infatti che la riprogrammazione del robot richiede la presenza di operatori altamente specializzati, con costi abbinati molto elevati; inoltre si deve tenere in considerazione il tempo di fermo del robot in questa fase, il quale risulta completamente improduttivo.

Lo sviluppo dei sistemi di controllo numerico a bordo macchina, come indicato anche in precedenza, ha permesso di bypassare questo inconveniente; sono infatti disponibili moduli di controllo del braccio robotico mediante il sistema di comando macchina.

Per questo motivo, i sistemi robotici hanno trovato sempre più spazio per compiti di asservimento di macchine utensili; lo sviluppo tecnologico connesso a questi sistemi ha inoltre garantito una riduzione dei costi di produzione, rendendoli convenienti nella maggior parte dei processi produttivi.

Si osserva in ogni caso che i sistemi di palletizzazione robotizzati risultano un'ottima soluzione per garantire un aumento della flessibilità all'interno di un processo produttivo; come già detto, contribuiscono ad una forte riduzione dei tempi improduttivi, oltre a garantire un funzionamento continuo, anche su tre turni, con una limitata presenza di operatori.

Per questo motivo assume sempre maggiore rilievo l'iterazione che deve essere presente tra i sistemi di presa, presenti sul robot industriale, e quelli di serraggio del pallet, presenti invece sulla tavola rotante; risulta in questo modo necessario uno studio approfondito del ciclo di produzione e, in particolare, del processo di cambio pallet per garantire il corretto funzionamento di ogni singolo elemento.

Nel passato questi sistemi venivano normalmente adottati laddove era prevista la produzione di lotti grandi, poiché solo in questo modo risultava possibile abbattere i costi legati ad essi.

Lo sviluppo tecnologico ha comunque permesso di applicare questi sistemi anche nel caso in cui siano previsti lotti di piccole dimensioni, permettendo comunque una riduzione del costo legato al personale e dei tempi improduttivi.

³³ Ovviamente se rapportato a quanto ottenibile con una macchina utensile moderna.

³⁴ Tutte queste caratteristiche risultano ridotte se rapportate a quanto riscontrabile su una macchina utensile; per contro un robot si caratterizzerà di un'elevata flessibilità e ridotti ingombri.

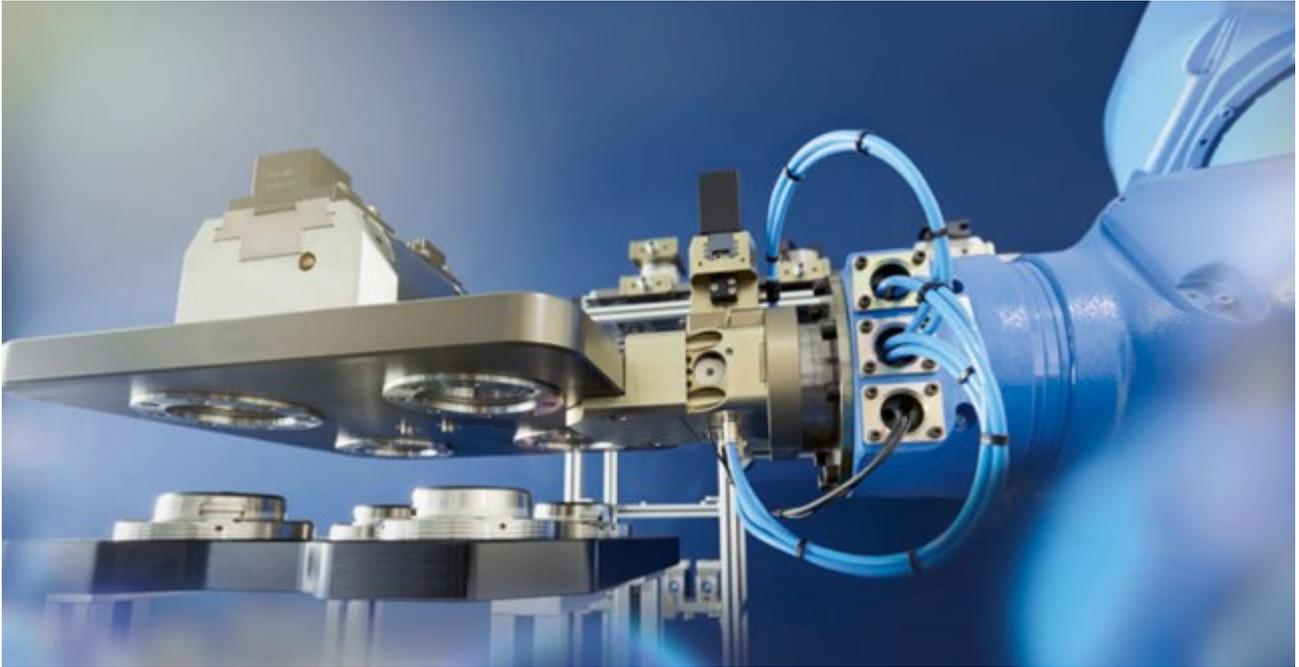


Figura 4.2: Braccio robotico articolato in fase di sollevamento pallet.

Nonostante sistemi di questo tipo risultino ancora molto costosi se rapportati al costo totale della macchina, tutto questo si spiega una volta valutato il risparmio in termini di personale, senza ovviamente dimenticare l'ottimizzazione in termini di tempo ciclo di produzione.

Risulta comunque evidente che sistemi di questo tipo non possono essere applicati su ogni tipo di macchina³⁵, ma si rivela necessaria un'analisi di fattibilità sia dal punto di vista tecnico che dal punto di vista economico.

4.2.3 Sistemi automatici

Risultano essere i sistemi maggiormente utilizzati all'interno delle macchine utensili e operano in maniera automatica, interfacciandosi con la macchina stessa. L'intervento umano si riscontra unicamente nelle fasi di attrezzaggio della parte sul pallet; normalmente si prevede una stazione di carico e scarico per permettere all'operatore di eseguire le operazioni richieste mentre la macchina utensile esegue le operazioni richieste sul pezzo presente nell'area di lavoro. Vengono così ridotti i tempi improduttivi legati alla macchina utensile, poiché il tempo di attrezzaggio diventa un tempo mascherato³⁶ e non viene conteggiato nel calcolo descritto nel capitolo **3.2 Tempo e costo di taglio**.

Conseguentemente all'elevata richiesta di sistemi automatici a bordo delle macchine utensili, sono stati dedicati all'**automatic pallet changer (APC)** diversi studi, i quali hanno portato allo sviluppo di sistemi anche molto differenti tra loro.

Non risulta necessario proseguire la descrizione di questi sistemi, poiché di seguito viene fornito un capitolo interamente dedicato ad essi.

³⁵ Normalmente a causa di limiti in termini di pesi trasportabili.

³⁶ Fase di attrezzaggio del pallet eseguita mentre la macchina effettua le lavorazioni sul pezzo presente nell'area di lavoro.

4.3 *Automatic pallet changer (APC)*

Come già introdotto in precedenza, questi sistemi automatici risultano essere quelli maggiormente sfruttati al giorno d'oggi all'interno delle macchine utensili, per quanto riguarda il processo di cambio pallet.

In fase di progettazione di un sistema di cambio pallet automatico si deve tener conto di diversi aspetti fondamentali per il corretto funzionamento del centro di lavoro, quali il preciso posizionamento del pezzo da lavorare, la posizione relativa tra utensile e pezzo, la rimozione del truciolo e la rigidità della struttura.

In quanto sistemi automatici, essi saranno dotati di tre componenti principali³⁷:

1. Attuatori;
2. Sensori;
3. Controller.

In questo modo, il sistema descritto può essere controllato direttamente dal controllo numerico della macchina utensile per mezzo di apposite funzioni.

A livello funzionale, i diversi sistemi automatici di cambio pallet possiedono delle caratteristiche comuni tra loro; per prima cosa, ovviamente, si riscontra la presenza di almeno due pallet in ogni sistema *APC*, anche se la loro movimentazione risulta estremamente diversa da una tipologia all'altra. Secondariamente si ritrovano delle caratteristiche comuni per quanto concerne la zona di attrezzaggio, la quale dovrà risultare facilmente accessibile sia dall'operatore (con le dovute protezioni) sia per mezzo di carroponti.

Finite le somiglianze tra i vari sistemi, si possono valutare invece le diverse peculiarità che contraddistinguono le diverse applicazioni presenti sulle macchine utensili

Una prima classificazione dei sistemi di cambio pallet automatico può essere fatta andando a considerare il movimento che il corpo mobile è tenuto ad effettuare:

1. Shuttle: sistema normalmente dotato di un movimento lineare dato al pallet; eventualmente di rotazione.
2. Manipolatore: sistema composto da un elemento mobile che preleva il pallet dal magazzino utensili e lo posiziona nell'area di lavoro e viceversa.
3. Forca rotante: sistema formato da una doppia forca, alla quale viene permessa una rotazione di 180°.

Questi sistemi automatici possono anche essere caratterizzati in funzione del numero di pallet che sono in grado di gestire; ciò risulta molto importante in termini di costo per presenza operatore. Risulta infatti logico pensare che ad un numero maggiore di pallet gestiti corrisponda un numero di ore più elevato di funzionamento autonomo della macchina; per contro ovviamente si riscontrano delle difficoltà costruttive all'aumentare della complessità del sistema.

Parlando del sistema di cambio pallet, si osserva che esso porta indubbi benefici alle macchine a controllo numerico; in primo luogo, come è già stato introdotto in precedenza, permette di sviluppare un processo produttivo continuo con un ridotto tempo improduttivo, legato ovviamente al movimento di scambio dei pallet da zona lavoro a zona di attrezzaggio. In particolare, la fase di attrezzaggio (o *set-up*) viene effettuata mentre la macchina è in funzione, risultando così un tempo mascherato; ciò non è possibile nelle macchine utensili in cui i sistemi di cambio pallet sono assenti.

L'azione di cambio del pallet risulta estremamente semplificata, poiché direttamente comandabile dal controllo numerico, e caratterizzata da tempi di movimentazione estremamente brevi. La

³⁷ Descritti anche in precedenza nel capitolo 3.4.2 *Architettura CNC*.

possibilità di automatizzare tutto il processo permette anche di ridurre al minimo il numero di interventi degli operatori, limitando così gli errori di natura umana.

Una volta fornita una panoramica dei vantaggi forniti da questi sistemi automatici, risulterà utile una descrizione approfondita delle soluzioni comunemente adottate per rendere possibili questi processi.

4.3.1 Shuttle pallet changer

Sono i sistemi di cambio pallet automatico più tradizionali; il pallet viaggia su delle guide sia in ingresso che in uscita dalla macchina utensile.

Questo sistema risulta così dotato di un movimento di traslazione che permette di prelevare il pallet dalla zona di lavoro e di portarlo su una postazione esterna prevista appositamente per le operazioni di carico e scarico; successivamente viene trasportato il pallet su cui è montato il pezzo da lavorare e posizionato all'interno della zona di lavoro.

Sono così dotati nella maggior parte dei casi di un moto di traslazione che permette la presa del pallet dalla zona dedicata e di una rotazione per garantire l'allineamento delle guide con la destinazione designata per il pallet precedentemente prelevato.

Di seguito viene fornita la “Figura 4.3” con un esempio piuttosto tradizionale di un sistema di cambio pallet automatico dotato di uno shuttle roto-traslante.



Figura 4.3: Centro di lavoro asservito da un sistema di cambio pallet con *shuttle* roto-traslante.

Risultano essere generalmente dei sistemi abbastanza lenti, soprattutto se rapportati a sistemi più moderni; a causa di questi tempi relativamente prolungati, questo sistema viene utilizzato principalmente su macchine utensili a controllo numerico di grandi dimensioni³⁸.

³⁸ Si rivela in ogni caso ottimale nel caso in cui i pesi da movimentare siano estremamente elevati.

4.3.2 Manipulator pallet changer

Sistema diverso da quello descritto precedentemente, sia a livello di funzionamento che di concept; infatti in questo caso si osserva la presenza di un elemento mobile, la cui forma può variare da una forca a due bracci laterali fissi a un elemento dotato di bracci telescopici.

Risulta essere una soluzione intermedia tra le altre due elencate in precedenza, osservando che trova applicazione principalmente in asservimento macchina partendo da un magazzino porta-pallet.

In funzione della soluzione adottata per l'elemento di presa si ha la possibilità di spostare elementi di peso e ingombri variabili, anche se spesso di valore contenuto; risulta infatti ovvio che non esiste paragone tra questo sistema e quello dotato di *shuttle* per quanto riguarda pesi e dimensioni movimentabili. Se da una parte si perde in capacità di carico, dall'altra si ottengono benefici in termini di inerzie, permettendo così di ridurre considerevolmente i tempi di cambio pallet rispetto a sistemi come quello visto nel capitolo 4.3.1.

Se ne può fornire una rappresentazione generica di questi sistemi, come in “Figura 4.4”.



Figura 4.4: Sistema di cambio pallet automatico con manipolatore polare e telescopico integrato nel magazzino porta-pallet.

Una volta presa visione della figura fornita, risulta di facile comprensione il discorso relativo al ridotto peso movimentabile; infatti la struttura presentata risulta caratterizzata da rigidità strutturali non elevate quanto quelle ottenibili con sistemi *shuttle*. Per contro, si possono ottenere sistemi di cambio pallet estremamente compatti e rapidi (basse inerzie da movimentare).

Per quanto riguarda il caso specifico fornito in figura, si osserva che il “manipolatore” possiede in tutto tre gradi di libertà, due di traslazione e uno di rotazione; attraverso l'uso del braccio telescopico si sarà poi in grado di asservire la macchina utensile, mantenendo le dimensioni di manipolatore e magazzino estremamente compatte.

4.3.3 *Swing pallet changer*

Impostazione comune a molti sistemi di cambio pallet, anche soprattutto per la notevole disponibilità di varianti presenti, per dimensioni e portate, in base alle caratteristiche che si tendono a privilegiare.

La costante in tutti questi sistemi la si può ricondurre al movimento imposto al corpo mobile per prelevare il pallet all'interno della zona di lavoro e sostituirlo con quello presente nella zona di attrezzaggio.

Prima di descriverne il funzionamento, conviene fornire una rappresentazione tridimensionale del sistema appena citato al fine di migliorare la comprensione del problema trattato.

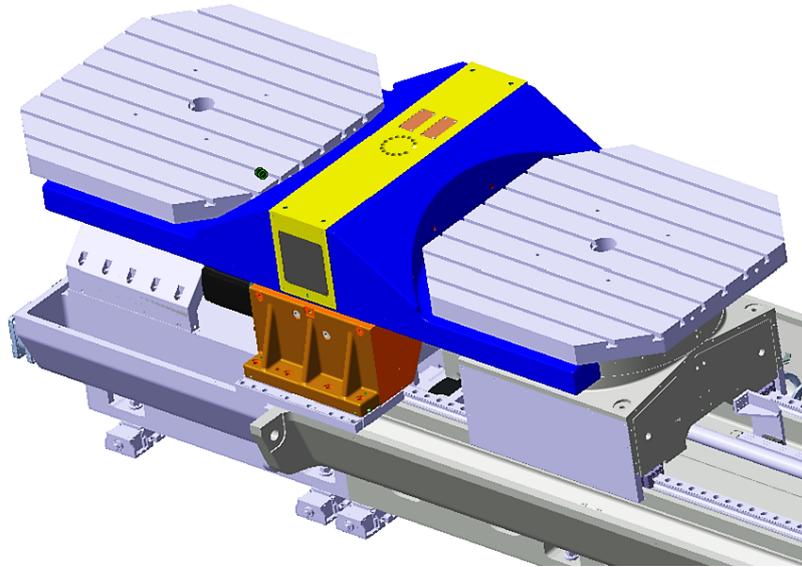


Figura 4.5: Sistema di cambio pallet con forca a rotazione di 180°. Immagine da Emco-Mecof.

Una volta presa visione della figura proposta, risulta possibile descrivere nel dettaglio il suddetto sistema di cambio pallet; in particolare la denominazione assegnata a questo sistema si riferisce al movimento imposto all'elemento mobile, che garantisce il cambio pallet. Nel caso in cui al supporto del pallet (nel caso di tavola roto-traslante³⁹) presente all'interno dell'area di lavoro sia assegnato un moto lineare, allora si deve impostare una posizione ben definita dove far avvenire lo scambio.

In questo caso si nota come la tavola deve necessariamente essere dotata di elementi specifici (vedi **Sistemi di centraggio e bloccaggio pallet**), dedicati alla definizione di una posizione di "zero" del pallet rispetto sia al riferimento sia al supporto fisso (posto nella zona di attrezzaggio); essi permettono inoltre il bloccaggio dello stesso per garantire la corretta lavorazione del pezzo. Essi inoltre sono dotati di ugelli collegati, normalmente, al sistema idraulico; si fornisce in questo modo una pulizia accurata della parte inferiore del pallet per garantirne il corretto accoppiamento con i coni di centraggio.

Si può ora descrivere come avviene questo scambio durante il funzionamento della macchina; per prima cosa la tavola su cui è bloccato il pallet con il pezzo lavorato si muove verso la zona di scambio. Successivamente si comanda lo sbloccaggio del pallet, permettendo in questo modo il disaccoppiamento tra i due elementi. La forca inizia così ad alzarsi, sollevando in questo modo entrambi i pallet; come detto in precedenza, dai coni di centraggio uscirà un flusso di fluido che garantisce la pulizia delle cave e degli anelli presenti sotto i pallet. Una volta sollevati i pallet la forca compie una rotazione di 180°, scambiando in questo modo i due componenti; viene poi effettuato il

³⁹ Vedi descrizione in capitolo 3.6 *Centri di lavoro di fresatura a 5 assi simultanei*.

percorso inverso, adagiando il pallet con il pezzo da lavorare sulla tavola (in questo caso roto-traslante).

Quello appena descritto è il sistema tradizionale, il quale però può subire delle modifiche in funzione dell'applicazione prevista; in particolare si riscontrano alcune differenze nel caso in cui uno di questi sistemi venisse utilizzato in asservimento di macchine utensili dotate di un supporto tavola roto-basculante. In questo caso, dato che a tale supporto difficilmente verrà assegnato anche un moto lineare, si devono prevedere delle guide su cui si può muoversi linearmente la forza per il cambio pallet; questo caso viene evidenziato di seguito in “Figura 4.6”.

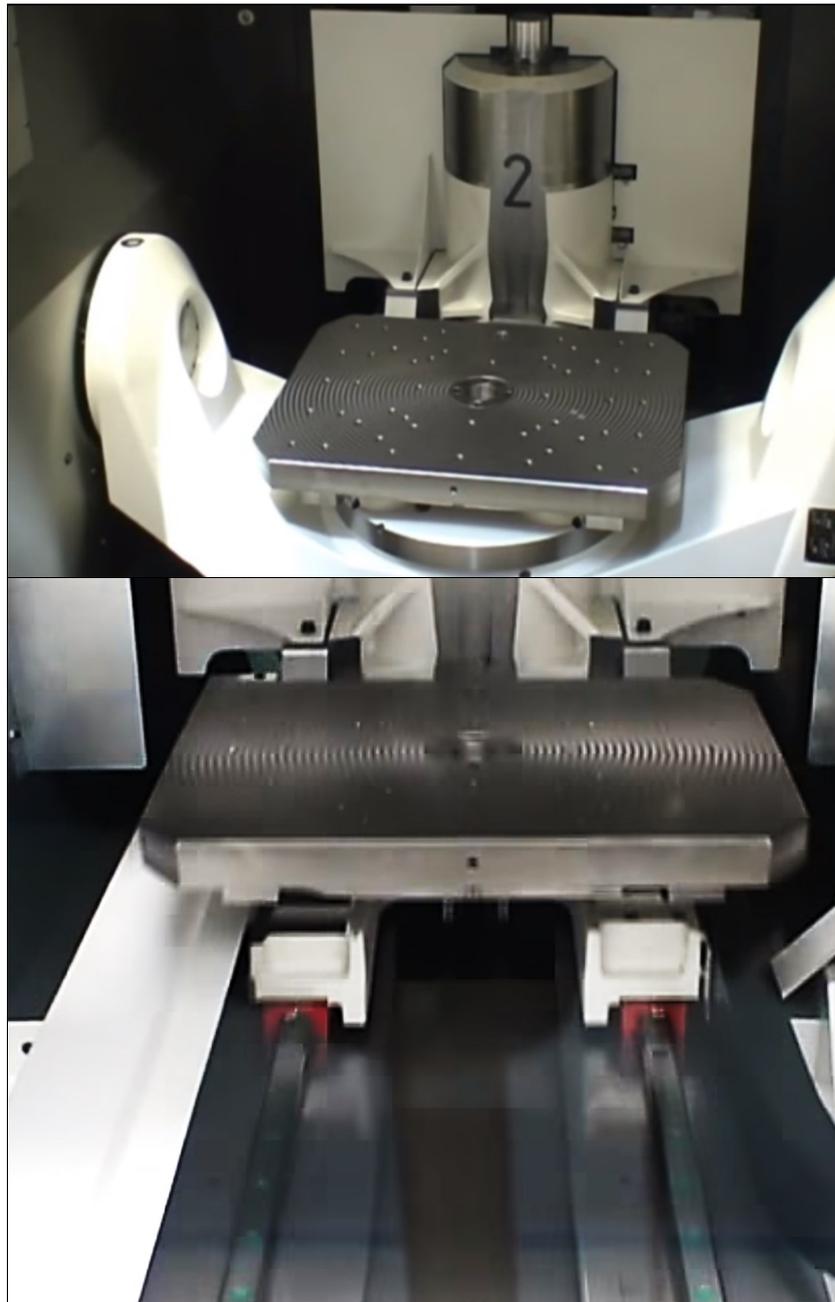


Figura 4.6: Esempio di applicazione di un sistema di cambio pallet a forza roto-traslante in una macchina utensile dotata di un supporto pallet brandeggiabile.

Considerando entrambi gli esempi proposti, si nota comunque come l'utilizzo di questi sistemi garantisca la riduzione dei tempi improduttivi legati al funzionamento della macchina utensile; infatti tutti i tempi di attrezzaggio del pallet risultano “mascherati”, poiché svolti mentre all'interno della zona di lavoro viene attuata la lavorazione.

4.4 *Magazzini porta-pallet*

Si osserva che il solo sistema automatico di cambio pallet permette di garantire, come già detto in precedenza, un maggiore livello di automazione del processo produttivo; si riscontra, una volta implementato tale sistema, un grosso calo del tempo improduttivo legato alle fasi di attrezzaggio della macchina utensile. Il tempo richiesto all'operatore per l'asservimento macchina in un turno di lavoro risulta comunque alquanto elevato, poiché con sistemi di cambio pallet semplici si hanno a disposizione normalmente solo due elementi intercambiabili.

Al fine di ottenere dei centri di lavorazione il più indipendenti possibile dall'intervento umano, si può prevedere l'implementazione alla macchina utensile di magazzini porta-pallet, in grado di interagire con il sistema di cambio pallet esistente oppure sostituirlo.

In funzione delle caratteristiche privilegiate, si ottengono diverse tipologie di magazzino; in particolare si possono distinguere in:

- Magazzino lineare:
 - Fisso;
 - A ricircolo di pallet.
- Magazzino circolare:
 - Fisso;
 - A tavola rotante.

In maniera congiunta con il magazzino, anche l'elemento mobile di carico e scarico pallet varia la sua configurazione per adeguarsi al sistema utilizzato; al fine di rendere il tutto più facile da comprendere, per ognuna delle tipologie elencate verrà fornita una descrizione il più esauriente possibile.

Dalle descrizioni fornite di seguito si può facilmente osservare che vengono considerati principalmente magazzini ad un piano singolo; ovviamente esistono anche magazzini a più piani, per i quali è prevista la presenza di un manipolatore in grado di muoversi anche verticalmente (vedi "Figura 4.7"). La complicità costruttiva che ne deriva viene compensata in parte dalla compattezza di questi elementi e dalla ridotta superficie occupata, con un conseguente miglior sfruttamento dello spazio.

Risulta inoltre presente in ognuno dei magazzini proposti una zona dedicata al carico e scarico del singolo pallet da parte di un operatore; ciò permette di ridurre al minimo i tempi di fermo macchina per operazioni di attrezzaggio, osservando che si deve sottostare al solo tempo di cambio pallet.

4.4.1 *Magazzino lineare fisso*

Probabilmente la categoria più semplice tra quelle proposte, dove i pallet vengono immagazzinati su scaffali dedicati, con posizioni codificate; il numero di posti disponibili dipende ovviamente dalle dimensioni del pallet e da quelle dello scaffale, oltre al numero di scaffali presenti.

Il compito di prelievo del pallet viene normalmente affidato ad un braccio articolato oppure da un trasportatore dotato dei gradi di libertà necessari al corretto asservimento di macchina utensile e magazzino.

Il manipolatore preleva in questo modo un pallet appositamente attrezzato e allocato all'interno del magazzino, e provvede a caricarlo all'interno della zona di lavoro della macchina utensile, precedentemente liberata; il posizionamento del pallet dovrà risultare estremamente preciso e, soprattutto, ripetibile. Perché questo sia possibile, il supporto per il pallet (sia all'interno del magazzino che nella zona di lavoro) viene dotato di appositi sistemi di centraggio e bloccaggio del pallet, al fine di garantire un posizionamento standard e automatizzabile; parallelamente, la zona inferiore del pallet risulta appositamente sagomata per adattarsi a questi elementi.

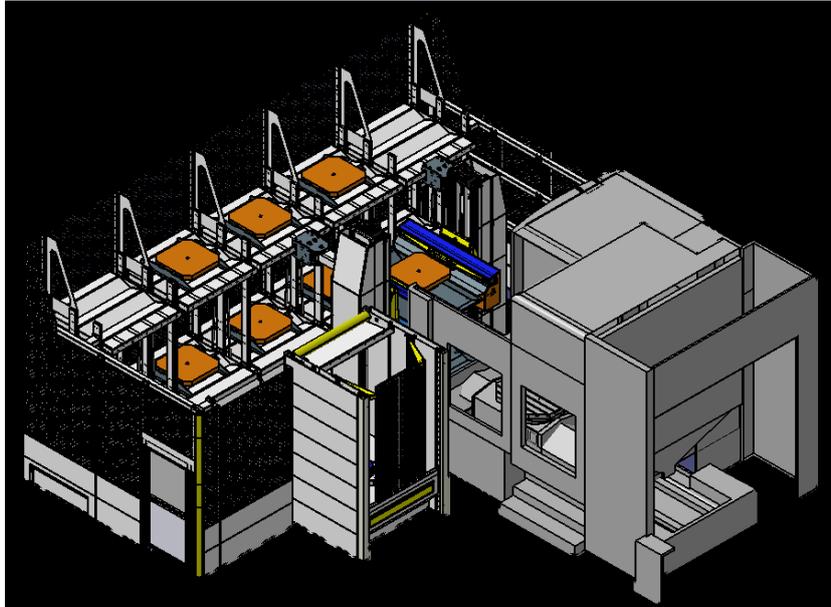


Figura 4.7: Rappresentazione virtuale 3D di magazzino lineare fisso applicato ad un centro di fresatura. Immagine fornita da Emco-Mecof.

4.4.2 *Magazzino lineare a ricircolo di pallet*

Sistema molto diverso rispetto a quello presentato in precedenza, si caratterizza della presenza di una struttura in acciaio tubolare e di una lamiera su cui scorrono i pallet; la motorizzazione è fornita normalmente da motori passo-passo, i quali risultano ideali in applicazioni del genere.

Per questa applicazione si prevede l'utilizzo di pallet autocentranti dotati di un doppio sistema di sollevamento.

Di seguito si fornisce una rappresentazione (“Figura 4.8”) di una macchina utensile a controllo numerico interfacciata con un magazzino del tipo appena descritto.

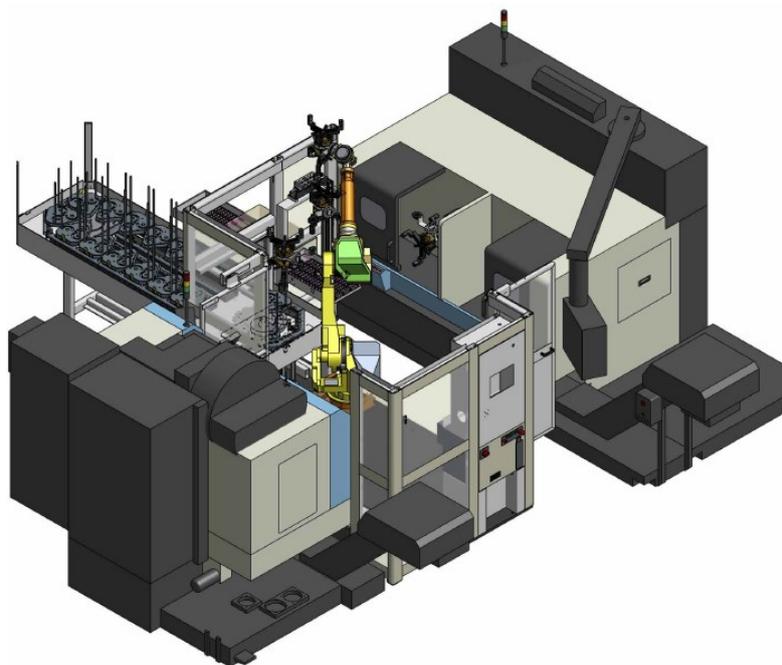


Figura 4.8: Rappresentazione virtuale tridimensionale di un centro di lavoro con un magazzino a ricircolo di pallet, con presenza di un robot antropomorfo.

Si può facilmente osservare che i pallet presenti all'interno del magazzino possiedono una forma piuttosto particolare, legata ovviamente alla loro funzione; infatti risulta necessario dare una posizione univoca al pezzo al fine di renderlo manipolabile dal robot antropomorfo avente funzione di "interfaccia" tra il magazzino e la macchina utensile.

In particolare, essi sono dotati di fessure di varie forme, all'interno delle quali vengono posizionati dei tubolari; essi hanno il compito di centrare il pezzo rispetto ad un asse di riferimento ben definito.

Si nota così che questo tipo di magazzino per pallet si abbina molto bene con pezzi assial-simmetrici, sui quali vengono effettuate nella maggior parte dei casi operazioni di tornitura.

Il robot antropomorfo permette una facile manipolazione del pezzo da lavorare; per contro i pesi movimentabili risultano ridotti rispetto a sistemi di cambio pallet più rigidi.

4.4.3 *Magazzino circolare fisso*

Altro sistema comunemente utilizzato nei centri di lavorazione di fresatura, dove si prevede la presenza di diverse postazioni fisse poste radialmente rispetto ad un riferimento centrale; in questo punto si va a posizionare, nella maggior parte dei casi, uno shuttle che permette la movimentazione dei pallet. Generalmente è direttamente l'elemento mobile (o shuttle) che va a posizionare il pallet con il pezzo da lavorare al di sopra della tavola porta-pallet presente all'interno della macchina utensile. Il suddetto componente deve essere dotato anche di un grado di libertà di rotazione sull'asse verticale al fine di permettere l'allineamento con le varie postazioni fisse.

Anche in questo caso risultano essere magazzini estremamente compatti, con la possibilità di sfruttare anche più piani sovrapposti; in questo caso si sostituisce lo shuttle con un manipolatore adeguato.

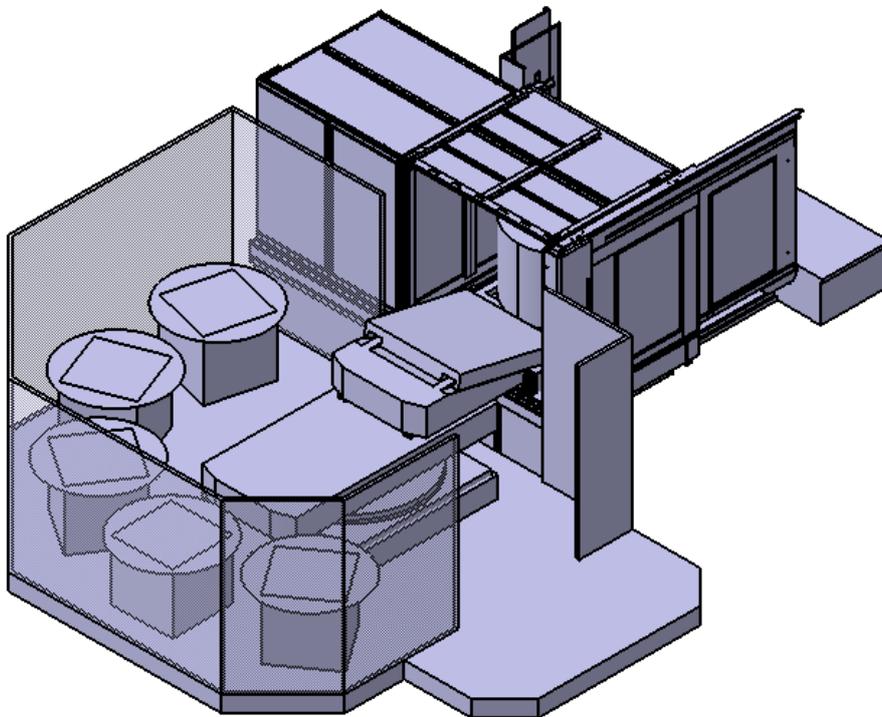


Figura 4.9: Rappresentazione virtuale 3D di magazzino circolare fisso applicato ad un centro di fresatura. Immagine fornita da Emco-Mecof.

4.4.4 Magazzino circolare a tavola rotante

Sistema diverso da quello appena presentato nel capitolo 4.4.3, poiché il moto di rotazione non viene più affidato allo *shuttle*; i pallet infatti trovano locazione presso delle postazioni dedicate, le quali si trovano su di una tavola a cui viene fornito il moto rotatorio attorno all'asse centrale.

Risulta necessario affiancare a questo magazzino rotante un sistema di cambio pallet come quelli che sono stati descritti precedentemente; in particolare, si può prevedere l'utilizzo di un sistema a forza rotante sia per il cambio pallet che per la zona di attrezzaggio (vedi "Figura 4.10 (a)").

Si trovano anche sistemi impostati in maniera differente, dove si prevede la presenza di un manipolatore generico che preleva il pallet dal magazzino e lo depositerà all'interno della zona di lavoro (vedi "Figura 4.10 (b)").

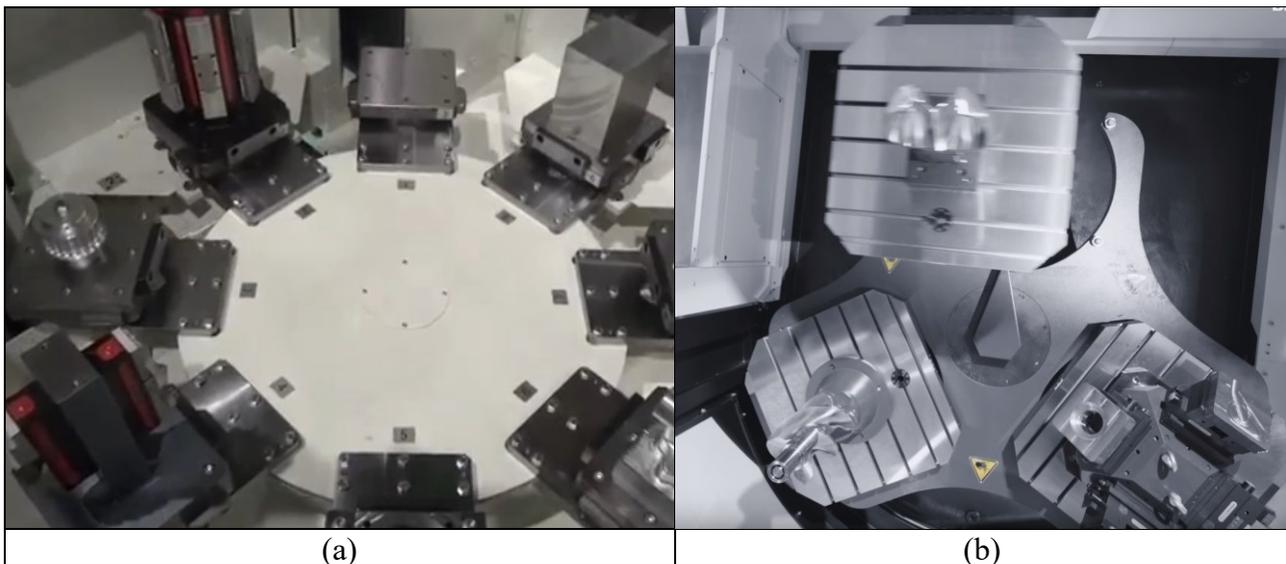


Figura 4.10: Magazzino circolare a tavola rotante con (a) *swing pallet changer* oppure (b) *manipulator pallet changer*.

Questi sistemi risultano particolarmente adatti se implementati a macchine in grado di lavorare componenti di ridotte dimensioni; infatti la tavola rotante si può applicare laddove le inerzie da muovere non siano esageratamente elevate.

Per macchine su cui si prevede la lavorazione di pezzi di dimensioni e pesi elevati, si consigliano principalmente magazzini porta-pallet con zone di attesa fisse (inerzie molto elevate); solo al sistema di cambio pallet viene fornita la possibilità di muoversi al fine di ridurre costi e complessità dei sistemi di movimentazione.

4.5 Sistemi di centraggio e bloccaggio pallet

Una volta descritti i principali sistemi di cambio pallet e di immagazzinamento degli stessi, si rivela necessaria una trattazione approfondita sui componenti utilizzati per garantire il corretto posizionamento e bloccaggio degli elementi da movimentare.

Ciò risulta fondamentale poiché nelle macchine utensili più moderne si vanno a ricercare precisioni estremamente elevate; per questo motivo il posizionamento del pallet deve essere il più possibile preciso e ripetibile, al fine di garantire la corretta lavorazione del pezzo.

Analizzando tutte le applicazioni di cambio pallet precedentemente presentate, si osserva che trovano maggiore impiego una serie di gruppi funzionali che garantiscono sì un corretto centraggio del pallet, permettendo allo stesso tempo il bloccaggio dello stesso.

Perché ciò risulti possibile, si deve prevedere la presenza di appositi coni di centraggio, posti sull'elemento porta-pallet, e dei relativi anelli sagomati, i quali vengono invece installati sulla faccia inferiore del pallet; in questo modo si può garantire la massima ripetibilità di posizionamento. Di seguito può essere fornita una rappresentazione di questi due elementi (“Figura 4.11”).



Figura 4.11: Raffigurazione di un cono di centraggio (a) e del relativo anello di riferimento (b).

Quelli forniti sono degli esempi generici di sistemi di bloccaggio per pallet, utilizzabili all'interno di macchine utensili; esistono molteplici proposte e differenze tra i vari sistemi, riconducibili ad alcuni fattori di scelta:

1. Peso gestibile;
2. Forza di serraggio;
3. Orientazione prevalente del pallet (differenze tra tavola rotante e tavola brandeggiabile);
4. Precisione e ripetibilità di posizionamento;
5. Tecnologia di bloccaggio.

Esistono diverse tipologie di sistemi di centraggio in funzione dell'applicazione prevista per essi; in particolare, per quanto riguarda i sistemi *APC* a bordo di centri di lavoro di fresatura si prenderà come riferimento quanto proposto al fine di vagliare ogni possibile soluzione.

La prima valutazione, per forza di cose, si focalizza sulla tecnologia di bloccaggio più adatta in funzione dell'applicazione prevista; in particolare, si deve tener conto dell'orientazione spaziale che caratterizzerà il pallet durante la lavorazione. Si possono delineare alcuni casi:

1. Tavola orizzontale: caso più comune, trattato in maniera estremamente ampia nelle pagine precedenti; per questo caso si possono applicare diversi sistemi di cambio pallet, senza limitare la scelta relativa ai coni di bloccaggio. Si possiede perciò libertà sulla scelta, potendo valutare l'opzione migliore in termini di ingombri⁴⁰, forza di serraggio e tecnologia prevista.
2. Tavola brandeggiabile: applicazione meno comune della precedente, ma per la quale sono comunque previsti sistemi di cambio pallet (nella maggior parte dei casi vengono sfruttati dei bracci robotici); in questo caso non tutti i sistemi sono ugualmente adatti, poiché si deve tenere in considerazione la possibilità che la tavola venga orientata anche verticalmente. Per questo motivo si deve prevedere l'utilizzo di sistemi in grado di garantire il bloccaggio del pallet anche in caso di mancanza di energia⁴¹.

⁴⁰ Per esempio, un sistema di bloccaggio a molla occupa meno spazio di un sistema idraulico, per il quale si deve anche prevedere un collettore rotante.

⁴¹ Nel caso in cui si verifichi un caso simile, si osserva che in un sistema idraulico vi sarebbe una veloce perdita di pressione, con conseguente impossibilità di mantenere il pallet bloccato.

Entrando maggiormente nel dettaglio, si possono citare le soluzioni maggiormente utilizzate per garantire il corretto bloccaggio dei pallet:

1. **Bloccaggio irreversibile a molla:** sistemi normalmente previsti sia su tavole rotanti che su quelle basculanti; sono dotati di pinze caratterizzate da un profilo tale da garantire il bloccaggio del pallet in assenza di olio in pressione. Il sistema di alimentazione risulta di solito essere estremamente compatto, ottimizzando in questo modo gli ingombri; serraggio garantito anche in assenza di energia.
2. **Bloccaggio con pistone idraulico a doppio effetto:** sistema di serraggio del pallet completamente idraulico, normalmente previsto per centri di lavoro con tavola e pallet orientati orizzontalmente; infatti in assenza di energia non garantisce il bloccaggio del pallet, non rendendolo applicabile su macchine dotate di pallet installati su tavole basculanti.
3. **Bloccaggio irreversibile meccanico:** sistemi previsti principalmente per pallet orientati verticalmente; serraggio di tipo idraulico come nel caso precedente, con l'aggiunta di un sistema meccanico per mantenere la forza di serraggio anche nel caso di assenza di pressione. In questo modo si può mantenere un elevato livello di sicurezza nel serraggio del pallet.

Una volta caratterizzati i diversi sistemi proposti in funzione del tipo di applicazione prevista, si passa all'analisi delle specifiche tecniche del singolo sistema, al fine di legare le caratteristiche di bloccaggio con quelle applicative previste per il sistema di cambio pallet.

Si rivela in questo modo necessario impostare un ciclo di lavorazione di riferimento al fine di valutare le forze di reazione che i coni di bloccaggio dovranno esercitare per mantenere in posizione il pallet presente all'interno della zona di lavoro. Ovviamente la considerazione viene fatta in termini di forza o coppia in funzione dell'orientamento spaziale dello stesso pallet⁴². Assieme ai valori di forza/coppia massima sopportabile dal supporto, di solito è prevista un'indicazione della pressione massima⁴³ dell'olio da prevedere per l'utilizzo del cono.

Per quanto riguarda la precisione e la ripetibilità, si tende a preferire l'indicazione della seconda, riprendendo quanto detto in precedenza nel capitolo dedicato ai sistemi robotizzati (vedi capitolo 4.2.2 *Sistemi robotizzati*); infatti una precisione non eccelsa può comunque essere compensata via software laddove sia invece presente una ripetibilità molto elevata. Per quest'ultima, mediamente nei cataloghi dei vari produttori specializzati si trovano valori minori del centesimo di millimetro.

In ultima analisi si osserva che per garantire i parametri di precisione e ripetibilità del centraggio, si deve fare in modo che i suddetti elementi risultino estremamente puliti. Per questo motivo vengono normalmente previsti degli utilizzi sui coni di centraggio per permettere il passaggio di un flusso di aria compressa⁴⁴; ciò permette di effettuare la pulizia sia del cono sia dell'anello e codolo montati sul pallet, eliminando eventuali impurità come polvere o trucioli.

4.6 *Caratterizzazione macchina utensile dotata di sistema APC*

Una volta descritti in maniera esaustiva tutti i componenti facenti parte di un sistema di cambio pallet automatico, non resta che delineare tutte quelle specifiche che permettono di distinguere tra le diverse tipologie, al fine di effettuare la scelta migliore in fase di progetto.

⁴² Si parla di forza quando il pallet è posizionato orizzontalmente, coppia (di ribaltamento) quando è installato verticalmente.

⁴³ Per il circuito idraulico si deve prevedere una valvola regolatrice di pressione.

⁴⁴ In alcuni casi può essere previsto anche l'utilizzo di fluido idraulico per questo scopo.

Si devono infatti valutare alcune caratteristiche e impostare i valori di riferimento in funzione di quello che si vuole ottenere una volta applicato il suddetto “modulo” su una macchina utensile a controllo numerico⁴⁵.

Di seguito si riporta un elenco dei dati normalmente presi in considerazione per la valutazione di un sistema di cambio pallet:

1. **Dimensioni piano di lavoro (pallet) e tipologia;**
2. **Dimensioni massime del pezzo da lavorare;**
3. **Carico massimo sopportabile dalla tavola (pallet compreso);**
4. **Tipologia di sistema cambio pallet;**
5. **Magazzino:**
 - a. Tipologia magazzino;
 - b. Numero pallet gestiti.
6. **Tempo di scambio;**
7. **Precisione di posizionamento;**
8. **Forza serraggio coni;**
9. **Massima differenza di peso movimentabile (solo per *swing pallet changer*).**

Facendo riferimento alle specifiche impostate per la macchina finale, si devono definire le dimensioni del pallet anche in funzione delle dimensioni spaziali massime previste per il pezzo lavorabile all'interno della zona di lavoro; il massimo peso sopportabile verrà determinato di conseguenza, anche in funzione della struttura della macchina (basamento e tavola porta-pallet)⁴⁶.

Una volta impostati questi valori, risulta possibile effettuare la scelta relativamente al sistema di cambio pallet più adatto per garantire la corretta movimentazione dei pallet, comprensivi dei pezzi da lavorare; infatti, in funzione di peso e dimensioni da movimentare, un sistema di cambio pallet risulta più vantaggioso rispetto ad altri.

Successivamente si può decidere se implementare o meno un magazzino porta-pallet per ampliare il numero di pallet gestiti; ciò determina ovviamente una maggiore complessità della struttura e del controllo della macchina, con miglioramenti invece dal punto di vista dell'automazione. In ogni caso, anche la scelta del magazzino porta-pallet deve sottostare alle limitazioni imposte dalle specifiche del pezzo lavorabile, oltre all'abbinamento richiesto con il sistema di cambio pallet.

Una volta definite le tipologie di cambio pallet e, eventualmente, di magazzino, risulta indispensabile la definizione del sistema di movimentazione, al fine di valutare il tempo richiesto per effettuare l'operazione di scambio. Questa specifica dipende ovviamente dall'inerzia dell'intero sistema, comprensivo di pallet e pezzi caricati, oltre alla tipologia di cambio pallet utilizzata. A titolo di esempio, si può osservare come un sistema a forca (*swing type*), nonostante le inerzie da movimentare siano di solito elevate, in genere impiega un tempo minore per effettuare lo scambio rispetto a quello impiegato da sistemi quali *shuttle* o *manipulator*⁴⁷.

Si deve prevedere ovviamente un azionamento per rendere possibile il moto del sistema di cambio pallet adottato; la posizione viene controllata per mezzo di un sensore, il quale invia dei segnali di

⁴⁵ Si veda il capitolo 3.6.1 *Modularità* per differenza tra specifiche macchina e specifiche modulo.

⁴⁶ Si devono garantire in ogni caso i parametri di precisione e ripetibilità previsti da normativa.

⁴⁷ Questi sistemi devono prima prelevare il pallet presente nella zona di lavoro e depositarlo all'interno del magazzino; solo successivamente prenderanno il nuovo pallet e lo porteranno da una sede all'altra.

feedback al controllo numerico. Di conseguenza, la precisione nel posizionamento del pallet dipenderà dall'accuratezza che caratterizza il sensore e dal tipo di sistema di movimentazione.

Per quanto riguarda i coni di centraggio da adottare, fare riferimento al capitolo **4.5 Sistemi di centraggio e bloccaggio pallet** proposto in precedenza, dove questi sistemi sono stati trattati in maniera approfondita.

In questo modo sono state delineate le specifiche principali del sistema di cambio pallet necessarie per sopperire a quanto ricercato per la macchina utensile. In fase di progettazione si deve tener conto di queste caratteristiche per la definizione del sistema più idoneo da adottare.

5. Caso di studio: Umill 1500

Il percorso seguito fino a questo punto ha permesso di caratterizzare nel dettaglio sia il tipo di macchina utensile preso come riferimento, sia le possibilità offerte per quanto riguarda i sistemi di cambio pallet automatico disponibili. In questo modo, molte delle informazioni fondamentali per la comprensione del tema trattato sono già state introdotte in precedenza, permettendo di snellire quanto verrà proposto nel presente capitolo.

Per prima cosa si rivela necessario introdurre la macchina utensile, oggetto fondamentale della trattazione; si tratta del centro di lavoro di fresatura a 5 assi simultanei sviluppato e prodotto all'interno dello stabilimento Emco-Mecof e denominato *UMILL 1500*. Si procede così all'elenco delle specifiche della suddetta macchina utensile nella sua versione standard⁴⁸ al fine di caratterizzare al meglio l'oggetto dello studio e il campo di applicazione della stessa.

Successivamente, al fine di compiere uno studio approfondito e completo per l'implementazione di un sistema automatico di cambio pallet su un centro di lavoro di fresatura, si rivela fondamentale una fase preliminare di benchmarking; l'obiettivo risulta essere quello di registrare informazioni su quanto offerto dai competitors nella medesima fascia di mercato e con macchine simili a quella su cui verte lo studio, almeno dal punto di vista delle specifiche tecniche.

In questo modo risulta possibile creare un database, tanto più ampio quante più macchine vengono analizzate, contenente tutte le informazioni di riferimento per quanto riguarda un generico centro di lavoro di fresatura⁴⁹; questo risulta fondamentale per garantire lo sviluppo di uno studio in linea con le specifiche estrapolate dall'analisi di benchmarking, tale da risultare concorrenziale sul mercato preso come riferimento.

Successivamente si prevede una fase di valutazione preliminare per la possibile implementazione di un sistema *APC* al centro di lavoro in esame; essa verrà sviluppata sia dal punto di vista tecnico, ovvero convenienza in termini di tempo ciclo e produttività, sia da quello economico, con approfondimenti su aspetti quali *Make or Buy*⁵⁰.

Una volta introdotti questi aspetti di valutazione, si fornisce una descrizione approfondita sugli step affrontati per la definizione dei diversi sistemi di cambio pallet applicabili sul centro di lavoro di fresatura preso in esame.

Successivamente si prenderà un singolo caso specifico relativo ad una commessa in lavorazione, per la quale viene ovviamente prevista l'applicazione di un sistema *APC*; in questo modo risulta possibile identificare tutti gli aspetti che concorrono alla definizione del sistema di cambio pallet ottimale per la singola applicazione.

Una volta effettuata la scelta della tipologia di cambio pallet automatico da affiancare alla macchina utensile e del relativo magazzino pallet, si rivela necessaria una valutazione approfondita dal centro di lavoro in ogni sua parte; in questo modo risulta possibile identificare le criticità ancora presenti ed apportare le dovute correzioni per garantire il funzionamento e l'ottimizzazione dell'intero sistema.

⁴⁸ Nella versione base risulta assente il sistema automatico di cambio pallet.

⁴⁹ Vedi 3.6 *Centri di lavoro di fresatura a 5 assi simultanei*.

⁵⁰ Non si scende nel dettaglio per quanto riguarda le analisi economiche poiché non di competenza del sottoscritto.

A questo punto le valutazioni per l'implementazione di un sistema di cambio pallet su un centro di lavoro di fresatura sono terminate, garantendo la definizione del migliore sistema a dati parametri di ingresso.

In ogni caso nel capitolo conclusivo verranno tirate le somme dell'intero processo di scelta, sviluppo ed implementazione di un sistema *APC*.

5.1 *UMILL 1500: caratteristiche tecniche*

Al fine di valutare al meglio la convenienza per l'applicazione di un nuovo sistema di cambio pallet automatico a bordo di un centro di lavoro di fresatura, risulta fondamentale la caratterizzazione della stessa macchina utensile nella sua versione standard; in questo modo si possono delineare le sue specifiche tecniche e partire in questo modo da un riferimento ben chiaro.

L'obiettivo risulta sì quello di delineare in maniera chiara la macchina utensile nella sua totalità, fornendo il maggior numero di dati possibili; allo stesso tempo però si rivolge maggiore attenzione a quei parametri che per forza di cose saranno soggetti a variazione in seguito all'applicazione di un sistema *APC*.

Prima di iniziare la trattazione, si fornisce di seguito un render tridimensionale della macchina utensile presa in esame (vedi “**Figura 5.1**”).

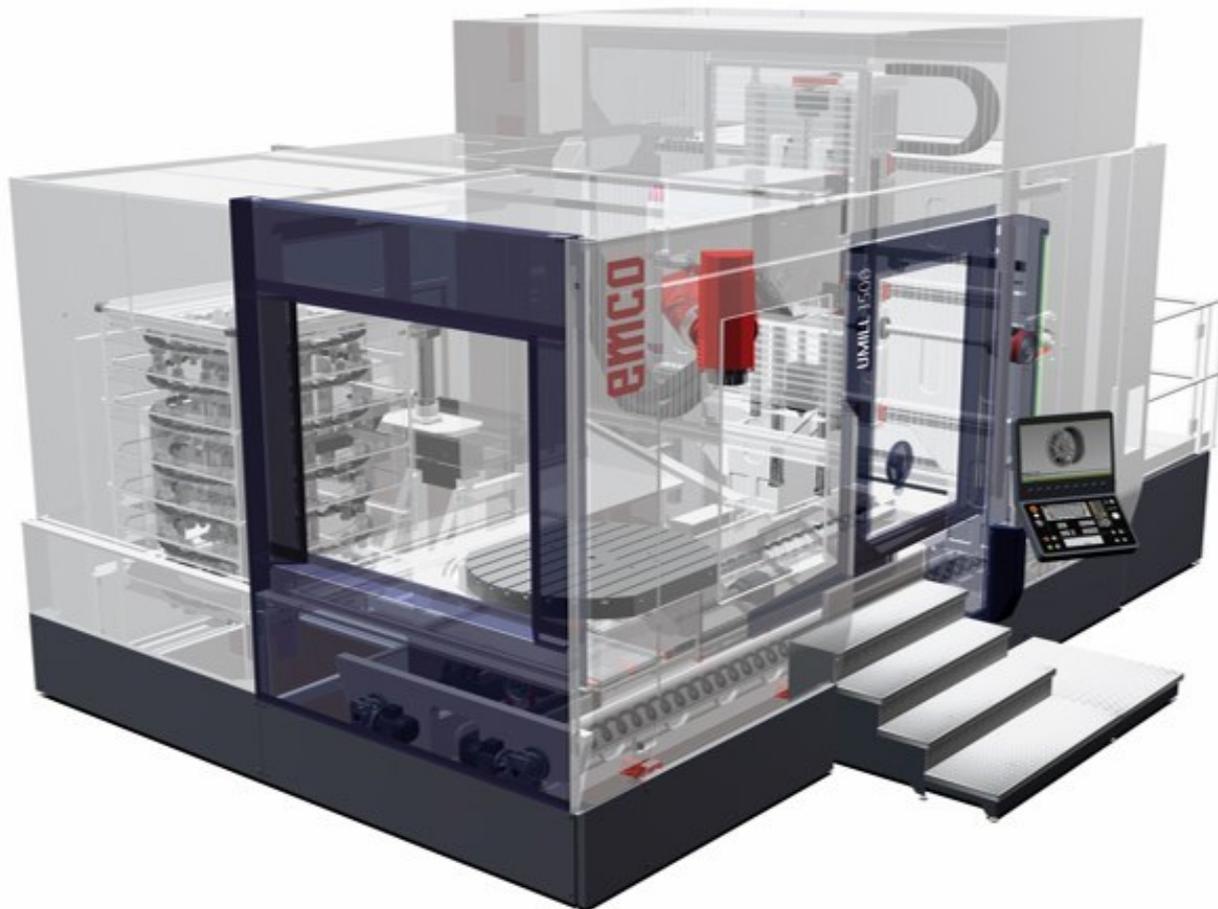


Figura 5.1: Render tridimensionale del centro di lavoro Umill 1500 prodotto da Emco-Mecof.

Il centro di lavoro di fresatura denominato *UMILL 1500* è caratterizzato da corse per gli assi lineari pari a 1500 mm per gli assi x e y , mentre per l'asse z verticale si può ottenere una traslazione

massima di 1100 mm. A questi due assi lineari verranno poi affiancati due assi di rotazione per garantire il controllo simultaneo di 5 assi, come d'altronde già indicato nel capitolo dedicato a queste macchine utensili⁵¹; in particolare, i due assi di rotazione si ottengono seguendo la configurazione proposta in “**Figura 3.7 (b)**”.

Il primo asse di rotazione viene infatti ottenuto tramite la rotazione relativa dei due semi-corpi di cui è composta la testa di fresatura, garantendo l'orientazione dell'asse mandrino nello spazio; in particolare l'inclinazione tra i due semi-corpi⁵² è tale da dare la possibilità di orientare il mandrino verso l'alto fino ad un'angolazione di 15°, garantendo in questo modo anche lavorazioni in sottosquadro senza il riposizionamento del pezzo. L'asse di rotazione ottenuto sulla testa di fresatura viene valutato in termini di:

- Ampiezza totale di rotazione: normalmente valutata nei due versi di rotazione, essa dipende fortemente dall'ingombro e flessibilità dei cavi elettrici presenti all'interno/esterno.
- Velocità di rotazione massima.
- Precisione e ripetibilità di posizionamento.
- Coppia massima in lavorazione.
- Coppia di bloccaggio.

Sempre mantenendo l'attenzione sulla testa di fresatura, si rivela necessario indicare quali sono le caratteristiche più importanti per una sua valutazione completa; al fine di non ripetere più volte le medesime valutazioni, si rimanda al capitolo 5.2.3 *Testa di fresatura* per una trattazione completa. Dal tipo di elettromandrino e dall'attacco utensile di cui è caratterizzato dipende ovviamente anche il tipo di utensili utilizzabili; infatti questi elementi determinano i valori massimi di diametro, lunghezza e peso per gli utensili utilizzabili in lavorazione.

Il secondo asse di rotazione viene invece ottenuto sulla tavola portapezzo⁵³ per mezzo di un motore coppia posto in asse; su questo elemento si deve rivolgere l'attenzione maggiore, poiché l'applicazione di un sistema di cambio pallet ne determina una forte variazione sia strutturale che per caratteristiche tecniche.

In particolare, si possono elencare le seguenti specifiche:

- Dimensioni piano di lavoro.
- Carico massimo.
- Velocità massima di rotazione.
- Precisione di posizionamento e ripetibilità.
- Coppia massima in lavorazione.
- Coppia di bloccaggio.
- Tolleranze e caratteristiche cave.
- Coppia di ribaltamento.

Esiste inoltre la possibilità di sfruttare la tavola roto-traslante anche per operazioni di tornitura verticale; in questo caso si nota come c'è una differenza nella forma del piano di lavoro (in questo caso normalmente previsto circolare con le cave di fissaggio poste radialmente), oltre alle caratteristiche cinematiche e dinamiche previste. Infatti, la velocità di rotazione⁵⁴ è normalmente di

⁵¹ Vedi 3.6 *Centri di lavoro di fresatura a 5 assi simultanei*.

⁵² Accorgimento previsto con la testa standard per questa macchina.

⁵³ In questa macchina essa è installata su un carro traslante; per questo motivo viene definita successivamente con “*Tavola roto-traslante*”.

⁵⁴ La diversa motorizzazione porta a differenze anche sulla coppia disponibile in lavorazione.

molto maggiore rispetto al caso di sola fresatura; si possono inoltre riscontrare differenze anche sul carico massimo e sulla coppia di ribaltamento.

Risulta di minore interesse il sistema automatico di cambio utensile e il magazzino ad esso associato; in ogni caso vengono riportate le specifiche più importanti per completezza.

Si rimanda così alla “**Tabella 5.1**”, nella quale si riportano tutti i dati della macchina utensile standard appena descritta.

Tabella 5.1: Specifiche *UMILL 1500* standard

Machine model	UMILL 1500
X-axis [mm]	1500
Y-axis [mm]	1500
Z-axis [mm]	1100
Rapid Feed [m/min]	60
Acceleration [m/s ²]	6
Max thrust X-Y-Z [kN]	18
Machine bed material	Cast iron
Milling head	
Head Tipology	Universal 52.5°
A-axis	±185°
Max spindle Power [kW] (S6/S1)	58/45
Max spindle torque [Nm] (S6/S1)	372/300
Max spindle rot [rpm]	12000
Spindle taper	HSK-100
NC Rotary table	
Dimension [mm]	Ø1400x1200
Max. rotary diameter [mm]	Ø2100
Feed/Rapid feed [rpm]	20
Max load [kg]	4500
Max load for pallet changer [kg]	-
NC Turning table (option)	
Dimension [mm]	Ø1400
Max. rotary diameter [mm]	Ø2100
Feed/Rapid feed [rpm]	260
Max load [kg]	3500
Max load for pallet changer [kg]	-
Tool changer	
Type	Rack
Tool change, places	88
Max. tool length [mm]	600
Max. tool diameter [mm]	Ø250
Max. tool weight [kg]	25
Chip to chip time [s]	-
Control	Heidenhain/ Siemens
Dimensions: length x width x height [mm]	7200 x 6200 x 4200

Sono state in questo modo riportate le principali caratteristiche del centro di lavoro di fresatura *UMILL 1500* nella sua versione standard; ovviamente sono previste delle opzioni in grado di aggiungere delle funzioni oppure modificare alcune delle specifiche appena riportate, le quali però non risultano di estremo interesse per il discorso da affrontare.

Una volta introdotta la suddetta macchina utensile, non resta che iniziare il discorso relativo all'analisi di benchmark per quanto riguarda sia le macchine utensili standard posizionate nello stesso settore di mercato, sia sulle proposte di cambio pallet ad esse abbinate.

5.2 *Benchmark*

Una volta introdotta la macchina utensile che fornisce le specifiche tecniche di riferimento, non resta che avviare un'analisi approfondita su quanto presente sul mercato; per fare questo si devono prendere in esame tutte gli elementi che caratterizzano un centro di lavoro di fresatura, già visti in precedenza nel capitolo **3.6 Centri di lavoro di fresatura a 5 assi simultanei**. Per questo motivo, occorre concentrarsi sulle soluzioni adottate dai maggiori concorrenti presenti, al fine di valutare quali caratteristiche premiare e quali invece lasciare in secondo piano.

La suddetta analisi preliminare dei competitors presenti sul mercato può essere facilmente ricondotta alla definizione di *Benchmarking competitivo*; infatti, questa valutazione viene effettuata facendo riferimento a quanto dichiarato dagli altri produttori di macchine utensili, con l'obiettivo di migliorare quanto proposto.

Al fine di migliorare la comprensione del problema trattato, si fornisce di seguito un estratto del programma sviluppato appositamente per questa analisi, completo di componenti principali su cui basare il confronto tra le varie proposte presenti sul mercato; al fine di evitare la presenza di troppi dati inutili, nella "**Tabella 5.2**" si fornisce unicamente uno schema generico, mentre nei capitoli dedicati si forniscono maggiori dettagli. Inoltre, come risulta facilmente comprensibile, i nomi dei competitors e delle relative macchine utensili prese come riferimento sono stati cancellati al fine di evitare qualunque problema.

Tabella 5.2: Tabella di riferimento per valutazione di *BENCHMARKING*

Company	EMCO MECOF	competitor 1	competitor 2	competitor 3	competitor n
Machine model						
X-axis [mm]						
Y-axis [mm]						
Z-axis [mm]						
Rapid Feed [m/min]						
Acceleration [m/s ²]						
Max thrust X-Y-Z [kN]						
Machine bed material						
Milling head						
Head Tipology						
A-axis						
Max spindle Power [kW] (S6/S1)						
Max spindle torque [Nm] (S6/S1)						
Max spindle rot [rpm]						
Spindle taper						
NC Rotary table						
Dimension [mm]						
Max. rotary diameter [mm]						
Feed/Rapid feed [rpm]						
Max load [kg]						
Max load for pallet changer [kg]						
NC Turning table						
Dimension [mm]						
Max. rotary diameter [mm]						
Feed/Rapid feed [rpm]						
Max load [kg]						
Max load for pallet changer [kg]						
Number of palettes (standard & option)						
Tool changer						
Type						
Tool change, places						
Max. tool length [mm]						
Max. tool diameter [mm]						
Max. tool weight [kg]						
Chip to chip time [s]						
Control						
Machine weight [kg]						
Dimensions length x width x height [mm]						

Una volta evidenziata la struttura della tabella per lo studio di benchmark, si prevede di seguito un'analisi dettagliata dei vari aspetti presi in considerazione; al fine di agevolare ognuna delle osservazioni che verranno fatte, si fornisce un estratto dalla tabella per ogni singolo sotto-capitolo.

5.2.1 Caratteristiche assi lineari

La prima valutazione viene fatta sulla corsa dei tre assi lineari, al fine di fornire una valutazione dello spazio di lavoro disponibile per ognuna delle macchine analizzate.

Tabella 5.3: Caratteristiche assi lineari

Company	EMCO MECOF	Competitor 1	Competitor 2	...	Competitor n
Machine model	UMILL 1500				
X-axis [mm]	1500	1400/1800	1600		
Y-axis [mm]	1500	1800	1600		
Z-axis [mm]	1100	1210	1100		
Rapid Feed [m/min]	60	40	60		
Acceleration [m/s ²]	6	-	5		
Max thrust X-Y-Z [kN]	18	-	18		

Si nota facilmente che non solo risulta importante la corsa fornita ad ognuno dei tre assi lineari, ma sono fondamentali anche le specifiche cinematiche e dinamiche ad essi abbinate, con particolare attenzione alle performance ottenibili.

5.2.2 Concept macchina e basamento

Si deve poi analizzare la macchina nel suo complesso al fine di valutare gli aspetti positivi e negativi relativamente ad ogni configurazione sviluppabile; in particolare, si sono osservati i seguenti concept di partenza:

1. Montante fisso:

- Moto sui tre assi lineari fornito a tavola di fresatura, a carro mobile (su guide⁵⁵ orizzontali presenti sul montante) ed a supporto testa installato sulle guide verticali presenti sul carro (vedi "Figura 5.2 (a)").
- Portale fisso fissato al basamento, traversa mobile collegata alle guide verticali presenti sulle spalle del portale, carro porta testa installato su guide orizzontali della traversa; ultimo asse lineare affidato alla tavola (vedi "Figura 5.2 (b)").

2. Montante mobile:

- Tavola roto-traslante: il montante si muoverà sulle guide dedicate, presenti ovviamente sul basamento; gli altri due assi lineari potranno essere ottenuti movimentando tavola e carro porta testa (vedi "Figura 5.2 (c)").
- Piano di lavoro: nel caso in cui si preveda l'utilizzo di un piano di lavoro fisso, allora si prevederà la presenza di uno slittone in grado di scorrere su delle guide presenti su un carro, il quale invece potrà traslare verticalmente sul montante; il montante infine potrà scorrere sulle guide presenti sul basamento (vedi "Figura 5.2 (d)").

⁵⁵ Ovviamente sull'elemento mobile sono presenti dei pattini che garantiranno lo scorrimento dello stesso sulle guide.

Si forniscono di seguito delle rappresentazioni grafiche per ognuna delle proposte elencate in precedenza.

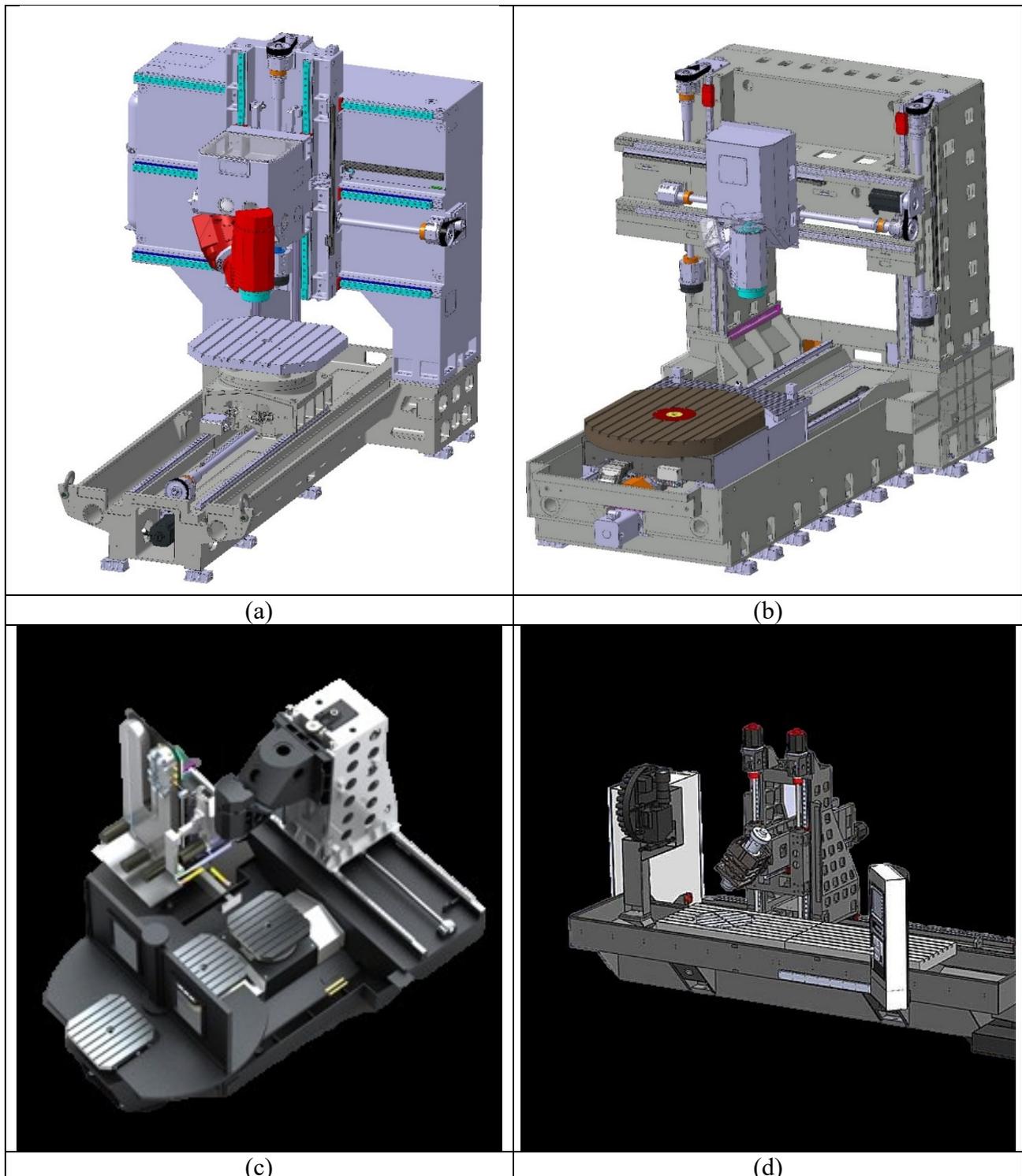


Figura 5.2: Concept macchina diversi per la movimentazione lungo i tre assi lineari.

Per quanto riguarda invece il basamento, l'analisi si è incentrata sul tipo di materiale da utilizzare per il suddetto componente; si propone di seguito quanto offerto sia per il centro di lavoro *UMILL 1500* sia per le macchine concorrenti.

Tabella 5.4: Materiale basamento

Company	EMCO MECOF	Competitor 1	Competitor 2	...	Competitor n
Machine model	UMILL 1500				
Machine bed material	Cast iron	Mineral casting	Cast iron		

Come si può facilmente osservare grazie alla tabella fornita, la maggior parte dei centri di lavoro proposti e analizzati sono caratterizzati da basamenti realizzati in ghisa, ottenuti per fusione. Perché una struttura sia utilizzabile come basamento per una macchina utensile che lavora per asportazione di truciolo, si deve garantire un'adeguata rigidità sia statica che dinamica. Inoltre si richiede un'elevata stabilità dimensionale della struttura contro le variazioni di temperatura, al fine di evitare l'insorgenza di distorsioni che ridurrebbero la precisione di lavorazione.

Solitamente si eseguono delle analisi FEM (metodo degli elementi finiti) con l'obiettivo di ottimizzare l'elemento a livello strutturale, massimizzando rigidità e risposta in frequenza.

La ghisa è dotata di un coefficiente di smorzamento elevato, il che permette di attenuare sensibilmente le vibrazioni durante la lavorazione; risulta inoltre facilmente lavorabile in ogni momento.

Con lo sviluppo tecnologico degli ultimi anni, si sono introdotti nuovi metodi e materiali per la produzione di basamenti di macchine utensili; sono i cosiddetti "mineral casting" o ghise minerali. Sono materiali compositi, costituiti normalmente da un insieme di minerali di diverso tipo, legati mediante l'uso di una resina epossidica e di un reagente; hanno elevate capacità di smorzamento, paragonabili a quelle della ghisa, però con ridotta sensibilità alle variazioni della temperatura. Esiste però una problematica legata all'elevata durezza, che ne impedisce quasi totalmente la rilavorazione; si può però prevedere in fase di colata l'inserimento di inserti metallici per il successivo collegamento ad altri elementi.

5.2.3 Testa di fresatura

Si deve ora porre l'attenzione sulla soluzione adottata per le varie macchine utensili considerate per quanto riguarda la testa di fresatura installata.

Già in precedenza sono state fornite delle indicazioni su alcuni tipi di soluzioni combinate tra la testa di fresatura e la tavola porta pezzo⁵⁶ al fine di ottenere i due assi di rotazione aggiunti ai tre lineari già impostati e visti in precedenza.

Focalizzando in ogni caso l'attenzione sulla singola testa di fresatura, si devono analizzare diversi aspetti fondamentali per la caratterizzazione della stessa; in particolare, si possono prendere in considerazione i seguenti aspetti:

1. Tipologia della testa:

- a. Testa birotativa (*Universal head*): testa di fresatura composta da due corpi distinti in grado di ruotare relativamente uno rispetto all'altro; la rotazione avviene intorno ad un asse obliquo rispetto al piano identificato dagli assi lineari, permettendo al naso mandrino di orientarsi nello spazio di lavoro e di passare liberamente da posizione verticale a

⁵⁶ Vedi capitolo 3.6 *Centri di lavoro di fresatura a 5 assi simultanei*.

orizzontale⁵⁷. Normalmente viene abbinata ad una tavola rotante per garantire il quarto e il quinto asse controllato.

- b. Testa a forcella (*Fork head*): anche in questo caso sono presenti due corpi, con il secondo che è in grado di muoversi relativamente al primo; il mandrino/elettromandrino viene installato sul corpo centrale⁵⁸. Si può facilmente riscontrare il grado di libertà del secondo corpo rispetto alla forcella, la quale invece può ruotare rispetto all'asse verticale⁵⁹. Risulta essere una soluzione normalmente adottata in macchine di grandi dimensioni, destinate di solito per lavorazioni su grandi stampi; in ogni caso sono presenti casi in cui essa trovi applicazione all'interno di centri di lavoro di fresatura.
- c. Testa cilindrica: testa normalmente composta da un corpo assialsimmetrico all'interno della quale viene montato il mandrino o elettromandrino⁶⁰. Non possiede gradi di libertà di rotazione; per questo motivo viene normalmente prevista in combinazione con una tavola roto-basculante per l'ottenimento del quarto e quinto asse.

2. **Escursione asse rotazione principale**: l'escursione dell'asse di rotazione principale della testa di fresatura dipende ovviamente dai componenti presenti all'interno di essa; in particolare, si può facilmente dedurre che gli elementi limitanti tale moto saranno principalmente i cavi elettrici e le tubazioni idrauliche e pneumatiche. Esistono in ogni caso diverse soluzioni che permettono di ampliare l'escursione totale, laddove ovviamente risulti utile.

3. **Caratteristiche mandrino/elettromandrino**: nella definizione delle caratteristiche di un elettromandrino o di un mandrino mosso da un motore elettrico si fa riferimento a quanto fornito dai diagrammi di servizio; in particolare, nella maggior parte dei casi viene fornito l'andamento di coppia e potenza al variare del numero di giri in condizione di *S1* (servizio continuo) e di *S6* (servizio ininterrotto periodico). Nella caratterizzazione dell'elemento in studio verranno normalmente analizzati i seguenti valori:

- a. Potenza massima: potenza massima assorbita dal motore elettrico nelle condizioni specificate.
- b. Coppia massima: coppia massima ottenibile sull'asse fresa; valore costante a basso numero di giri fino al ginocchio, salvo poi decrescere con andamento iperbolico rispetto alla velocità di rotazione.
- c. Velocità di rotazione massima: massima velocità ottenibile con il motore elettrico analizzato.
- d. Velocità di rotazione (ginocchio): valore di riferimento, in corrispondenza del quale si osserva la potenza massima assorbita, con in uscita la coppia massima sull'asse di rotazione.

4. **Attacco utensile**: elemento fondamentale nell'analisi della testa di fresatura, poiché fornisce anche indicazioni sul tipo di utensili che tale testa è in grado di utilizzare; infatti questa caratteristica, legata al mandrino/elettromandrino previsto, risulta normata secondo norma DIN 69871 o DIN 69893, ognuna con le sue peculiarità:

⁵⁷ Risulta ovvio che durante il moto di rotazione, l'asse mandrino si troverà anche in posizioni intermedie rispetto alle due principali citate, permettendo di ottenere anche lavorazioni lungo assi obliqui. Inoltre si potrebbero prevedere anche configurazioni per garantire lavorazioni in condizioni di sottosquadro.

⁵⁸ Ovviamente si riscontreranno differenze strutturali nei due casi, oltre alle soluzioni per la trasmissione del moto.

⁵⁹ O sull'asse orizzontale, in funzione della configurazione adottata.

⁶⁰ Nella maggior parte dei casi l'asse fresa risulterà coincidente con l'asse motore.

- a. DIN 69871 (attacco conico ISO): risulta ancora oggi la soluzione più diffusa nella sua variante ISO 40, applicata su circa il 70% delle macchine utensili⁶¹; la trasmissione del moto viene ottenuta grazie al contatto superficiale tra i coni maschio e femmina rispettivamente di porta-utensile e mandrino. In funzione delle tolleranze costruttive dei due elementi elencati si può migliorare la superficie di contatto, osservando però che la flangia non va mai in battuta; per questo motivo possono sorgere diversi problemi sul posizionamento assiale del supporto a causa di dilatazioni del cono femmina per effetti termici e forza centrifuga⁶². Ad alte velocità di rotazione sorgeranno in questo modo problemi sulla posizione dell'utensile, con conseguenti errori di precisione in lavorazione; per questo motivo le velocità raggiungibili risultano limitate.
- b. DIN 69893 (attacco conico HSK): concezione completamente differente rispetto a quanto proposto nel caso precedente; infatti il cono risulta più corto e cavo⁶³ al suo interno, e viene previsto il contatto sia sulla superficie inclinata che sulla flangia posteriore del porta-utensili. Il bloccaggio si ottiene per mezzo di una pinza esercitante una forza radiale sulla superficie interna del supporto, opportunamente sagomato. Esistono diverse varianti di porta-utensili HSK (DIN 69893) in funzione di quale aspetto (coppia, velocità di rotazione, momento flettente) viene favorito.

Una volta definite le caratteristiche principali per l'analisi di una testa di fresatura, risulta possibile valutare l'offerta di ognuno dei concorrenti delineati a monte della presente analisi di benchmarking nello stesso modo visto in precedenza per le altre parti.

Si fornisce di seguito il modello di tabella riassuntiva con gli elementi presi in esame e l'offerta di ogni competitor.

Tabella 5.5: Testa di fresatura

Company	EMCO MECOF	Competitor 1	Competitor 2	...	Competitor n
Machine model	UMILL 1500				
Milling head					
Head Tipology	Universal 52,5°	Universal 45°	Universal 45°		
A-axis	Continuo 360°	Continuo 360°	Continuo 360°		
Max spindle Power[kW] (S6/S1)	58/45	38	35/25		
Max spindle torque[Nm] (S6/S1)	372/300	135/105	130/86		
Max spindle rot [rpm]	12000	16000	18000		
Spindle taper	HSK 63	HSK 63	ISO 40		

La tabella appena presentata fornisce preziose indicazioni su quanto adottato dai vari produttori analizzati per quanto riguarda la versione base della macchina; possono in ogni caso essere previste

⁶¹ Dato ricavato da Maiocchi B., Rossi M., *Manuale delle macchine utensili*, II edizione, gennaio 2014, pp. 929, Tecniche Nuove

⁶² Tanto più evidente quanto più la velocità è elevata.

⁶³ Essendo cavo, il porta-utensili HSK non soffre degli effetti di dilatazione per forza centrifuga; anzi, tale effetto permette di incrementare la forza di bloccaggio tra i due elementi.

delle opzioni sia per la tipologia di testa sia per il mandrino/elettromandrino adottato⁶⁴. Per questo motivo risulta necessario compilare una tabella come quella proposta per ognuna delle opzioni previste sia dai concorrenti che per la macchina in studio.

5.2.4 Tavola rotante (fresatura e tornitura)

Fino a questo momento sono state analizzate tutte le caratteristiche che risultano fondamentali nella scelta di un centro di lavoro di fresatura; ricordando quanto detto in precedenza nel capitolo 3.6 **Centri di lavoro di fresatura a 5 assi simultanei**, i due assi di rotazione vengono ottenuti per mezzo di una combinazione tra testa di fresatura e tavola portapezzo.

In particolare, per quanto riguarda il caso specifico trattato, si osserva che non viene presa in considerazione la configurazione con tavola brandeggiabile, poiché di scarso interesse per la tipologia di macchina utensile in studio⁶⁵.

Si vanno in questo modo a studiare le principali caratteristiche da prevedere per la tavola rotante al fine di allinearsi con quanto già presente sulle macchine identificate come possibili concorrenti.

Risulta altrettanto importante prevedere uno studio sull'applicazione della tavola rotante per lavorazioni di tornitura verticale, valutando quali specifiche hanno bisogno di un aggiornamento rispetto a quanto previsto per la sola operazione di fresatura.

Si fornisce di seguito una tabella riassuntiva con i parametri di maggiore interesse per l'analisi appena descritta.

Tabella 5.6: Tavola rotante (fresatura e tornitura)

Company	EMCO MECOF	Competitor 1	Competitor 2	...	Competitor n
Machine model	UMILL 1500				
NC Rotary table					
Dimension [mm]	Ø1400x1200	Ø1400	Ø1600x1250		
Max. rotary diameter [mm]	Ø1400	Ø1900	Ø1600		
Feed/Rapid feed [rpm]	20	-	15		
Max load [kg]	4500	5000	4500		
Max load for pallet changer [kg]	-	4000	4000		
NC Turning table					
Dimension [mm]	Ø1400	-	Ø1600		
Max. rotary diameter [mm]	Ø1400	-	Ø1600		
Feed/Rapid feed [rpm]	260 (400 (S6))	-	400		
Max load [kg]	3500	-	4500		
Max load for pallet changer [kg]	-	-	3500		

⁶⁴ Con esso può variare anche l'attacco utensile.

⁶⁵ Tecnologia normalmente applicata su macchine utensili di dimensioni più compatte, a causa del ridotto peso massimo del pezzo lavorabile su questo tipo di tavola.

Una volta presa visione della precedente tabella, risulta possibile valutare quelli che sono i parametri di interesse per la valutazione delle specifiche relative alla tavola rotante; in particolare, si devono valutare:

- **Dimensioni**: dimensioni della tavola su cui vengono fissati i pezzi da lavorare; ne esistono di diversi tipi e dimensioni in funzione dell'applicazione richiesta.
- **Diametro massimo di rotazione**: parametro molto importante poiché imposta un limite sulle dimensioni massime del pezzo da lavorare; ciò risulta fondamentale al fine di garantire il corretto funzionamento della macchina⁶⁶.
- **Velocità di rapido (rotazione)**: velocità di rotazione massima ottenibile per la tavola rotante considerata; tale valore risulta di molto superiore nel caso in cui venisse prevista l'opzione di tavola rotante per operazioni di tornitura⁶⁷ verticale.
- **Carico massimo**: valore del peso massimo supportabile dalla tavola rotante durante la lavorazione.
- **Carico massimo (versione cambio pallet)**: peso massimo supportabile dal sistema di cambio pallet; di solito tale valore risulta comprensivo del peso del pallet stesso e risulta essere un riferimento ai fini di un'applicazione di un sistema *APC*.

Sono tutti parametri normalmente indicati nei cataloghi dei produttori, per quanto riguarda la singola macchina utensile; meno frequentemente vengono fornite informazioni relative alla coppia di bloccaggio⁶⁸ e al metodo utilizzato per la trasmissione del moto rotatorio⁶⁹.

Tutti i dati indicati nella precedente tabella permettono in ogni caso di ricavare informazioni utili su quanto offerto da altri centri di lavoro in termini di carico e dimensioni massime, oltre ovviamente alle caratteristiche cinematiche.

Risulta inoltre di estremo interessante la valutazione del carico massimo disponibile nel caso di applicazione di un sistema di cambio pallet; risulta facilmente deducibile che in una simile situazione il peso massimo caricabile risulti più basso rispetto alla controparte dotata di tavola rotante. Ciò risulta ovvio a causa della necessità di movimentare il pezzo comprensivo di pallet con sistemi meccanici che ne possono limitare in maniera più o meno importante sia le dimensioni che il peso stesso⁷⁰.

⁶⁶ In caso contrario, la tavola non potrebbe traslare e/o ruotare a causa di interferenza tra il pezzo e la struttura interna del centro di lavoro.

⁶⁷ Di solito prevista una tavola circolare con cave radiali, dotata di sistemi di bilanciamento e rilevazione di vibrazioni.

⁶⁸ Difficoltà nel reperire informazioni sulla coppia di bloccaggio applicata sull'asse di rotazione della tavola e il sistema utilizzato per garantirla (per esempio motore coppia, freno idraulico, freno pneumatico, ecc.).

⁶⁹ Per quanto riguarda la motorizzazione dell'asse di rotazione della tavola porta pezzo, può essere previsto un motore coppia direttamente sull'asse oppure uno o più motori elettrici collegati all'asse per mezzo di una catena cinematica (normalmente con sistemi di recupero del gioco); si possono ottenere diverse caratteristiche in termini di coppia, velocità di rotazione e precisione di posizionamento in funzione del sistema utilizzato.

⁷⁰ In funzione del tipo di sistema considerato per il cambio pallet si possono riscontrare limitazioni su uno o più parametri; prendere visione del capitolo *4.3 Automatic pallet changer (APC)* per maggiori informazioni.

5.2.5 *Magazzino utensili*

Si va ora a valutare la tipologia di magazzino utensili adottata dai maggiori concorrenti presenti sul mercato. In particolare, si focalizza l'attenzione su diversi aspetti caratterizzanti sia il magazzino che il sistema di cambio utensile; si prendono così in considerazione:

- **Tipologia di magazzino**: configurazione del magazzino utensili e disposizione spaziale delle postazioni occupabili; ne esistono di diversi tipi:
 - A torretta.
 - A disco (o *whell*).
 - A tamburo.
 - A catena (o *chain*).
 - A matrice (o *rack*).
- **Tipologia porta-utensile**: valutazione del tipo di supporto utensile utilizzato; elemento che va ad accoppiarsi al mandrino e risulta caratterizzato da limiti in termini di velocità di rotazione massima.
- **Numero di posti disponibili**: caratteristica importante a cui far riferimento; indica il numero massimo di utensili gestibili dal magazzino utensili.
- **Lunghezza massima dell'utensile**: lunghezza massima dell'utensile gestibile dal magazzino; normalmente questa dimensione viene definita a partire dalla faccia mandrino e valutata prendendo il blocco comprendente utensile e porta-utensile normato.
- **Diametro massimo dell'utensile**: dimensione massima dell'utensile in termini di ingombro radiale; normalmente vengono forniti due valori, relativi ai casi di posti adiacenti liberi oppure occupati.
- **Peso massimo dell'utensile**: Peso massimo dell'utensile gestibile dalla singola postazione; di solito vengono forniti anche dati relativi alla portata massima del magazzino in termini di peso.
- **Tempo fermo lavorazione (chip to chip time)**: tempo necessario al completamento dell'intera fase di cambio utensile, a partire dall'interruzione della lavorazione fino all'avvio della successiva.

Ogni singola tipologia di magazzino utensili risulta caratterizzata da diversi aspetti, alcuni in positivo mentre altri in negativo, almeno a livello assoluto; si tratta perciò di fare la scelta più corretta in funzione del tipo di macchina che si vuole studiare, oltre ovviamente alle richieste provenienti dai clienti. Un punto fondamentale che non risulta elencato in precedenza farà riferimento agli ingombri dell'intero sistema magazzino e cambio utensile; difficilmente questo dato risulta valutabile per quanto riguarda l'offerta dei concorrenti, a meno di non approssimarlo una volta presa visione dei layout macchina. Risulta però estremamente importante una sua definizione per quanto riguarda la macchina in esame, poiché in funzione del tipo di concept cambia la strategia da adottare; per esempio, andando a considerare una macchina compatta, un magazzino di grandi dimensioni previsto per la macchina base ne potrebbe compromettere il concept di partenza⁷¹.

Non sempre però quanto appena detto risulta vero; infatti, al fine di ovviare al problema degli ingombri del magazzino utensili, sono state introdotte soluzioni alternative volte a migliorare quanto offerto dai sistemi tradizionali. Per questo motivo, si possono trovare configurazioni con magazzini a ruota con utensili alloggiati radialmente ad essa e sistema di cambio utensile dotato di movimento rotatorio e traslatorio (tipo *shuttle*).

⁷¹ Attenzione, ciò non vuol dire che non risulti applicabile, ma che non conviene fare un ragionamento simile per quanto riguarda l'offerta della macchina base; configurazioni diverse potranno essere previste come optional, a discrezione del compratore e delle sue necessità.

Mentre il numero di posti deve essere valutato in funzione della tipologia di magazzino scelta e degli ingombri, le altre caratteristiche relative all'utensile e al porta-utensile abbinato si devono valutare in maniera congiunta con la testa di fresatura scelta; esistono infatti casi particolari in cui specifiche quali, per esempio, peso massimo e lunghezza massima dipendano dal tipo di testa di fresatura. In maniera del tutto simile si deve studiare il tempo di fermo per cambio utensile; esso infatti risulta essere tanto più grande quanto più le dimensioni della macchina aumentano⁷², almeno a livello teorico.

Di seguito si proporrà quanto è stato ricavato relativamente al magazzino utensili per quanto riguarda i maggiori competitors.

Tabella 5.7: Magazzino utensili

Company	EMCO MECOF	Competitor 1	Competitor 2	...	Competitor n
Machine model	UMILL 1500				
Tool changer					
Type	Rack	Chain	whell		
Tool changer,places	88	92	63		
Max. tool length [mm]	650	600	650		
Max. tool diameter [mm]	Ø125 / Ø250	Ø125 / Ø250	Ø80 / Ø160		
Max. tool weight [kg]	25	-	15		
Chip to chip time [s]	-	-	4.2		

Questa tabella permetterà di valutare sia l'offerta base di ogni singolo concorrente che quanto proposto con le varie opzioni; in questo modo si ottiene una visione piuttosto ampia di quanto risulterà necessario offrire per la macchina utensile in studio al fine di renderla competitiva rispetto agli altri produttori presi come riferimento.

5.2.6 Dimensioni e peso macchina base

Come ultima valutazione, per quanto riguarda la macchina base, risulta necessaria la definizione del peso totale della macchina e dell'ingombro sia in pianta che volumetrico.

Nella valutazione di peso e ingombri vengono ovviamente conteggiati anche tutti quegli elementi accessori che non sono stati affrontati nei precedenti sotto-capitoli, come per esempio il sistema di evacuazione e raccolta dei trucioli e armadi elettrici, pneumatici e idraulici⁷³.

Tabella 5.8: Dimensioni e peso macchina

Company	EMCO MECOF	Competitor 1	Competitor 2	...	Competitor n
Machine model	UMILL 1500				
Machine weight [kg]		42000	37000		
Dimensions length x width x height [mm]	7200 x 6200 x 4200	6886x7001x3871	6062x8683x3900		

⁷² Infatti il *chip to chip time* viene calcolato seguendo i dettami dati da normativa, mentre durante una lavorazione i tempi di fermo taglio per il cambio utensile risultano di solito più lunghi.

⁷³ In questa valutazione non rientreranno ovviamente tutti gli elementi indicati come opzioni, poiché per ogni diversa configurazione corrispondono delle caratteristiche diverse.

Questa tabella può dare utili informazioni riguardo quanto effettuato dai maggiori competitors del settore in cui si sta effettuando la valutazione di benchmarking, almeno dal punto di vista sia spaziale di peso totale. In questo modo, risulta più semplice una valutazione sia degli ingombri delle macchine standard che di quelle dotate di sistemi di cambio pallet, con o senza magazzino, con l'obiettivo di delineare dei limiti strategici per l'applicazione di sistemi modulari APC.

5.2.7 Caratteristiche cambio pallet automatico

Tutti i sotto-capitoli proposti in precedenza hanno permesso di delineare in maniera alquanto completa quanto offerto dai concorrenti in termini di macchina utensile in versione standard.

La definizione delle macchine utensili concorrenti ha inoltre permesso di osservare le diverse soluzioni che possono essere applicate in termini di sistemi APC; ciò permette di delineare quali sistemi risultano maggiormente concorrenziali in termini di concept e caratteristiche tecniche.

Per fare in modo che questa analisi risulti il più completa e utile possibile, si deve riprendere quanto già introdotto nei capitoli precedenti⁷⁴, in particolar modo per quanto riguarda i diversi sistemi automatici di cambio pallet esistenti e i magazzini ad essi abbinabili; tutto questo risulta infatti fondamentale, poiché la soluzione adottata fornirà indicazioni utili sul tipo mercato che la macchina analizzata è in grado di coprire.

Si fornisce di seguito una tabella riassuntiva contenente quanto utilizzato dai maggiori produttori di macchine utensili dotate di sistemi di cambio pallet automatico.

Tabella 5.9: Caratteristiche cambio pallet automatico competitors

Company	Competitor 1	Competitor 2
Machine model		
APC 1		
Number of table	2	2
Pallet changer type	Shuttle type + fixed locations warehouse	Swing type
Pallet dimension [mm]	Ø1400x1200	1250 x 1000
Max. rotary diameter [mm]	ø1900	Ø1600
Max height [mm]	1210	1350
Max. load [kg]	4000	4000
APC 2		
Number of table	3	6
Pallet changer type	Shuttle type + fixed locations warehouse	Shuttle type + fixed locations warehouse
Pallet dimension [mm]	Ø1400x1200	1250 x 1000
Max. rotary diameter [mm]	ø1900	Ø1600
Max height [mm]	1210	1350
Max. load [kg]	4000	4000
APC 3		
Number of table	4	5-99
Pallet changer type	Shuttle type + fixed locations warehouse	Manipulator + fixed locations warehouse
Pallet dimension [mm]	Ø1400x1200	1250 x 1250
Max. rotary diameter [mm]	ø1900	Ø1600
Max height [mm]	1210	1350
Max. load [kg]	4000	4000

⁷⁴ Vedi 4.3 Automatic pallet changer (APC) e 4.4 Magazzini porta-pallet.

Per prima cosa si può facilmente notare come i sistemi automatici di cambio pallet appena indicati risultano essere tutti elementi modulari aggiunti alla macchina utensile standard proposta nei capitoli precedenti; risulteranno infatti presenti poche modifiche al concept di base presentato durante la fase di benchmarking.

Essendo macchine di medie dimensioni, sviluppate sfruttare al massimo lo spazio a disposizione, anche le soluzioni adottate per i sistemi di cambio pallet automatico seguiranno questa filosofia; si va così a gestire un ridotto numero di pallet con sistemi APC più semplici. Si nota infatti che entrambi i produttori presi in considerazione adottano come prima scelta dei sistemi estremamente compatti, con cambio pallet effettuato per mezzo di forche rotanti o di shuttle; si può anche prevedere l'implementazione di un magazzino porta-pallet circolare a postazioni, rispettivamente, mobili o fisse in funzione della scelta fatta in precedenza.

Si nota in ogni caso che vengono proposte anche soluzioni in grado di gestire un numero maggiore di pallet, con alcune differenze rispetto a quanto proposto con la prima soluzione; si può facilmente osservare che, al fine di mantenere gli ingombri ridotti, si sfruttano dei magazzini a postazioni fisse, strutturati su più livelli e gestiti per mezzo di manipolatori⁷⁵.

Entrambi i produttori analizzati propongono anche l'implementazione alla macchina base di sistemi di immagazzinamento lineare; ciò ovviamente va a compromettere in parte quanto proposto in precedenza in termini di ingombri. Allo stesso tempo però questi sistemi permettono di ottenere sistemi ad elevata flessibilità, oltre ovviamente alla possibilità di lavorare per lunghi periodi in maniera autonoma.

5.3 *Cambio pallet: valutazioni preliminari*

Una volta effettuata nella sua completezza l'analisi di benchmarking proposta nelle pagine precedenti, risulta fondamentale la definizione di un percorso da seguire per garantire la valutazione e scelta del sistema di cambio pallet più adatto all'applicazione richiesta.

In particolare, come già ampiamente trattato nel capitolo dedicato⁷⁶, ogni sistema possiede delle ben definite caratteristiche che ne privilegiano l'utilizzo in casi specifici; al fine di garantire l'adozione del modulo più adatto, in fase di studio si deve prendere in considerazione ogni singolo aspetto relativo al funzionamento in esercizio.

La prima analisi importante in fase di studio della macchina utensile per quanto riguarda l'implementazione di un sistema di cambio pallet risulta relativa alla valutazione del cosiddetto *Make or Buy*; tale scelta si compone di diverse fasi da affrontare in maniera sequenziale, permettendo alla fine di prendere la migliore decisione per lo studio in questione.

Per quanto riguarda il percorso da seguire per garantire la più completa valutazione di *Make or Buy*, si rimanda al capitolo dedicato (vedi 5.3.1 *Make or Buy*), nel quale si espongono principali vantaggi e svantaggi delle due possibili scelte e punti fondamentali da affrontare.

Nel caso specifico del centro di fresatura a 5 assi denominato *UMILL 1500* prodotto presso l'azienda ospitante, inizialmente non erano state previste applicazioni con sistemi di cambio pallet automatico; questa scelta fu dettata anche dalla richiesta di mercato al momento dello sviluppo della macchina utensile, la quale non imponeva l'implementazione di tali sistemi⁷⁷.

⁷⁵ Vedi 4.3.2 *Manipulator pallet changer*.

⁷⁶ Capitolo 4 *Cambio pallet*

⁷⁷ Sistemi di cambio pallet erano già presenti sul mercato nel momento del lancio della suddetta macchina utensile, ma la loro applicazione era limitata ai centri di lavoro di dimensioni ridotte, poiché i pezzi da lavorare previsti erano caratterizzati da ingombri e pesi ridotti.

Con lo sviluppo dei sistemi di cambio pallet disponibili e dei forti miglioramenti in termini di tempo ciclo anche per pesi maggiori, questi sistemi sono diventati sempre più diffusi e importanti anche su macchine con caratteristiche simili a quella appena citata⁷⁸.

Per questo motivo sono stati avviati degli studi di fattibilità dapprima per l'applicazione di questi sistemi su un centro di lavoro come quello citato e della possibile richiesta sul mercato di competenza.

Una volta valutata la possibile convenienza nella proposta di sistemi di questo tipo in opzione a quanto ottenibile con la macchina standard, la valutazione per l'implementazione di un sistema automatico di cambio pallet è passata per forza di cose attraverso un'analisi di *Make or Buy*, come d'altronde era già stato introdotto in precedenza.

A causa della elevata mole di lavoro, dovuta soprattutto ad un ampio parco macchine che l'ufficio tecnico è tenuto a gestire e ottimizzare, la scelta finale è stata quella di appoggiarsi ad un produttore esterno per l'implementazione di un sistema di cambio pallet automatico.

Una volta fatta questa scelta, si rivela di fondamentale importanza tanto la selezione del sistema di cambio pallet quanto quella del fornitore; un ottimo rapporto con quest'ultimo⁷⁹ infatti può garantire la nascita di una linea di comunicazione grazie alla quale si possono migliorare i sistemi da implementare alla macchina, portando ad una collaborazione soddisfacente.

Una volta presa questa decisione, sono state valutati diversi profili di fornitori specializzati in sistemi ad alta automazione, al fine di valutare in maniera approfondita le diverse soluzioni disponibili. Questo processo risulta inizialmente molto lungo e si può suddividere in diverse parti:

1. Valutazione macchina utensile standard da parte del fornitore: si devono fornire indicazioni di massima della macchina in termini di ingombri, altezza da terra della tavola roto-traslante, apertura portellone; eventualmente il fornitore può visionare la macchina standard di persona al fine di valutare ogni possibilità.
2. Valutazione disponibilità fornitore: verificare volontà del fornitore di sviluppare un sistema da abbinare alla macchina standard in linea con quanto richiesto.
3. Definizione caratteristiche richieste per sistema APC: una volta valutata la disponibilità del fornitore, si procede con la definizione delle specifiche di base del sistema voluto, cosicché egli abbia la possibilità di formulare un'offerta.
4. Valutazioni offerte fornitori a date specifiche: una volta definito le specifiche e ricevuto le offerte dei vari fornitori contattati, si prevede una fase di valutazione di quanto è stato ricevuto al fine di valutare pro e contro di ogni offerta.
5. Definizione fornitore e tipologia APC: alla fine si giunge ad una decisione, sia relativamente al fornitore, sia alla tipologia di sistema da adottare; non si esclude ovviamente lo sviluppo parallelo di più sistemi, i quali possono adattarsi a diverse situazioni e richieste.

Il percorso da seguire risulta essere estremamente semplificato, ma permette di comprendere in maniera piuttosto chiara le valutazioni da effettuare per garantire infine una scelta migliore sotto i diversi punti di vista.

Perché questa fase venga attuata in maniera ottimale, devono essere definite a monte delle specifiche di massima per garantire lo sviluppo di un sistema ottimale sia dal punto di vista tecnico che rispetto a quanto offerto dai rispettivi competitors identificati durante la fase di benchmarking.

⁷⁸ Si ricorda che il centro di lavoro UMILL 1500 è in grado di caricare pezzi fino ad un peso pari a 4500 kg; la maggior parte dei centri di lavoro nei quali è previsto un sistema di cambio pallet automatico come opzione permettono la lavorazione di componenti fino ad un peso massimo di

⁷⁹ Non solo dal punto di vista economico, ma anche da quello progettuale, con conseguente interfaccia tra i diversi tecnici.

In ogni caso il presente capitolo permette di valutare quelle che sono state le valutazioni preliminari in fase di studio; per quanto riguarda la scelta e lo sviluppo del sistema di cambio pallet si rimanda al capitolo dedicato (vedi **5.4 Cambio pallet: scelta e sviluppo**).

5.3.1 *Make or Buy*

Con il termine *Make or Buy* si indica la possibile alternativa per un'azienda di produrre al proprio interno un elemento (*Make*) oppure se acquistare la medesima attrezzatura da un produttore esterno (*Buy*).

Questa valutazione risulta estremamente importante, poiché [*...assume un carattere strategico perché porta a un confronto diretto fra i costi unitari di produzione di un bene realizzato all'interno della stessa organizzazione aziendale, e quelli di un bene fornito da un produttore esterno più specializzato.*]⁸⁰

In ogni caso esistono diversi vantaggi e svantaggi per ognuna delle due possibilità, rendendo necessaria una valutazione approfondita su tutti gli aspetti che caratterizzano tale studio. Infatti, non si tratta unicamente di scegliere quale aspetto privilegiare tra la completa produzione interna o l'assemblaggio di componenti provenienti da fornitori esterni, ma risulta necessario anche approfondire quanto questa scelta si ripercuota su aspetti economici e imprenditoriali.

Si rivela così fondamentale una prima analisi dal punto di vista economico, prendendo in considerazione quanto la scelta di *Make or Buy* si rifletta su aspetti quali **costi, magazzino e vendite**; per rendere possibile tutto questo risulta fondamentale una conoscenza approfondita sia dei dati contabili che delle capacità di produzione di un'azienda.

Al fine di non appesantire la trattazione, si fornisce di seguito una tabella riassuntiva con i principali vantaggi e svantaggi delle due possibili scelte.

⁸⁰ **Citazione da** Bianchi Patrizio, Dizionario di Economia e Finanza, **in** Enciclopedia Treccani ,2012, http://www.treccani.it/enciclopedia/make-or-buy_%28Dizionario-di-Economia-e-Finanza%29/

Tabella 5.10: Vantaggi e svantaggi *Make or Buy*

	<i>MAKE</i>	<i>BUY</i>
V A N T A G G I	1. NESSUN COSTO DI APPROVVIGIONAMENTO: legati ai costi amministrativi per la gestione della commessa esterna.	1. RAPIDITA': normalmente un fornitore esterno possiede una maggiore velocità di sviluppo legata alla maggiore esperienza nello specifico campo.
	2. CONTRATTUALISTICA EVITATA: nel caso di commessa esterna si deve inoltre prevedere la presenza di contratti per la gestione degli aspetti legali.	2. RIDOTTE RESPONSABILITA': l'azienda si scarica di ogni problema operativo, salvo il controllo qualitativo di quanto proposto dal fornitore.
	3. INCREMENTO CAPACITA' TEAM DI PROGETTO: risulta ovvio che un nuovo progetto permette anche una valorizzazione degli individui che ne prendono parte, soprattutto se integrato con corsi di formazione dedicati.	3. SUPERVISIONE ESTRNA: un fornitore esterno qualificato può inoltre fornire preziose indicazioni per il corretto utilizzo e sulla qualità del lavoro da svolgere.
S V A N T A G G I	1. RIDUZIONE RISORSE DISPONIBILI: la formazione di team di progetto determina anche la riduzione di risorse necessarie per altri progetti o lavori presenti all'interno dell'azienda.	1. CONTROLLO AVANZAMENTO: in ogni caso si possiede lo stesso controllo del processo di un fornitore rispetto a quanto riscontrabile internamente; ovviabile predisponendo adeguatamente il contratto di fornitura, a cui ovviamente l'esterno deve sottostare.
	2. RISCHIO DI SCARSA QUALITA': se il nuovo progetto si discosta dal <i>know-how</i> aziendale, il rischio che il prodotto finale sia di qualità scadente è molto elevato.	2. CONOSCENZA RIDOTTA: le risorse interne possiederanno una ridotta conoscenza del prodotto sviluppato esternamente, con conseguente limitazione delle conoscenze acquisibili.
	3. RALLENTAMENTI: la scarsa esperienza porta anche a tempi di sviluppo più dilatati rispetto a quelli necessari per risorse di maggiore esperienza.	3. FORTE DIPENDENZA: se il prodotto necessita di un'attività di supporto e non è stato previsto un piano di trasferimento delle conoscenze necessarie, la conseguenza è una completa dipendenza dal fornitore stesso.

Quelli elencati sono aspetti generici legati a vantaggi e svantaggi riscontrabili per ognuna delle possibilità disponibili, aspetti che risultano strettamente legati alle capacità e competenze presenti all'interno dell'azienda (il cosiddetto *know-how*) o presso l'eventuale fornitore esterno.

In fase di progetto tale scelta potrebbe risultare estremamente ardua se non affiancata da alcuni passaggi fondamentali per garantire una completa valutazione delle risorse a disposizione; in particolare, si possono elencare alcuni punti fondamentali su cui risulta utile focalizzarsi:

- **Analisi competenze a disposizione all'interno dell'azienda;**
- **Valutazione delle tempistiche richieste** per lo sviluppo interno del progetto rapportato a quanto ottenibile con un fornitore esterno;
- **Analisi dei costi** legati a tale applicazione e alle differenti scelte;
- **Analisi qualitativa** dei due possibili scenari;
- **Analisi dei rischi** connessi alla scelta di un fornitore esterno rispetto a quanto sviluppabile internamente.

Grazie all'elenco appena fornito, a cui vanno ovviamente aggiunte le considerazioni fatte per ognuna delle due possibili scelte (vedi **Tabella 5.10**), si può facilmente notare come la suddetta analisi deve essere eseguita in maniera estremamente approfondita e accurata, al fine di effettuare la scelta migliore sia per il presente che per il futuro.

Infatti, non solo risulta importante definire se un progetto conviene svilupparlo internamente oppure per mezzo di un fornitore esterno, ma nel caso in cui si facesse affidamento ad elementi esterni, si rivela necessario instaurare un rapporto forte al fine di garantire un'ottima collaborazione anche per il futuro.

5.3.2 Specifiche macchina per sistema cambio pallet

Si rivela successivamente necessaria la definizione delle principali caratteristiche richieste al sistema di cambio pallet al fine di garantire un miglioramento in termini di produttività ed efficienza della macchina utensile, senza tuttavia compromettere quanto garantito dalla macchina base. Relativamente a questo si ricorda quanto già indicato nel capitolo dedicato alla modularità⁸¹ delle macchine utensili, nel quale si afferma che sussistono forti difficoltà qualora si cerchi di derivare le caratteristiche del singolo modulo da quelle previste per la macchina finale.

Nel caso specifico trattato si nota come alcune caratteristiche possono essere scelte liberamente, poiché non determinano differenze rispetto a quanto visibile sulla macchina base (per esempio il tempo totale di cambio pallet); altre specifiche devono invece essere trattate in maniera più attenta, poiché definiscono le prime differenze con la macchina standard (per esempio portata del pallet, dimensioni massime del pezzo da lavorare, ...).

Per questo motivo risulta necessario delineare quali sono le principali caratteristiche da privilegiare per l'applicazione di un sistema APC sul centro di lavoro preso in esame; un elenco di specifiche è già stato fornito in precedenza nel capitolo **4.6 Caratterizzazione macchina utensile dotata di sistema APC**, e su esso si fa riferimento.

In particolare sono state impostate solo alcune delle specifiche elencate nel capitolo dedicato, poiché un numero di parametri troppo elevato potrebbe portare a difficoltà nel reperimento di sistemi in grado di soddisfare tutte le richieste, oppure a costi di sviluppo esageratamente elevati; per questo motivo l'attenzione è stata focalizzata su:

- Tipologia di sistema di cambio pallet: *Swing type (doppia forca rotante)*.
- Carico massimo (pallet compreso): *4500 kg*.
- Precisione di posizionamento: *0.015 mm*.
- Tempo di scambio: ≤ 22 s.
- Massima differenza peso movimentabile: *1250 kg*.

Come si può facilmente visionare dalle specifiche fornite, l'idea iniziale risulta essere quella di sviluppare un sistema di cambio pallet con una forca rotante⁸² con delle specifiche estremamente esigenti sia dal punto di vista della precisione sia per quanto riguarda il carico da movimentare.

Una volta definite queste specifiche, sono state richieste le offerte dei diversi fornitori per questa tipologia di cambio pallet, il quale però non risulta nella produzione abituale per la maggior parte di essi⁸³; perciò parallelamente sono anche state valutate soluzioni diverse che si potessero combinare con il centro di lavoro *UMILL 1500*, che però rientrano nel *know-how* dei diversi fornitori contattati.

⁸¹ Vedi 3.6.1 Modularità.

⁸² Vedi 4.3.3 *Swing pallet changer*.

⁸³ Ridotta applicazione di questi sistemi su carichi tanto elevati; di solito preferito un manipolatore o trasportatore.

Per quanto riguarda i sistemi che si differenziano dall'applicazione con forza rotante, si osserva che si cerca di rispettare in ogni caso parametri quali carico massimo e precisione di posizionamento; allo stesso tempo si riscontra un risparmio in termini sia di tempo che di costo nell'utilizzo di un sistema standard piuttosto che uno sviluppato ad hoc per la macchina utensile in esame.

Tenendo a mente quanto appena detto, si procede con il successivo capitolo, dove viene effettuata una scelta tra le varie proposte pervenute, con conseguente sviluppo del sistema macchina e APC.

5.4 *Cambio pallet: scelta e sviluppo*

Una volta effettuate le valutazioni di *Make or Buy* e definite le principali specifiche da rispettare per l'applicazione di una sistema APC per la macchina utensile in esame, risulta necessario sviluppare la soluzione ideale per il centro di lavoro.

In particolare, come detto anche in precedenza⁸⁴, è stato deciso di affidarsi al *know-how* di un produttore esterno⁸⁵ per lo sviluppo di un sistema automatico di cambio pallet da implementare al centro di lavoro in esame.

Per questo motivo sono state valutate diverse soluzioni, sia per tipologia di cambio pallet che di magazzino ad esso associato, valutando le offerte pervenute dai diversi fornitori. Molteplici sono stati i tipi di scambiatori, sia considerando il metodo di scambio pallet⁸⁶ che la tipologia di magazzino abbinabile⁸⁷.

Risulta in ogni caso evidente come, soprattutto a causa delle specifiche della macchina standard in termini di dimensioni tavola e massimo peso caricabile, sistemi con pallet posizionati su una tavola rotante non risultano ottimali⁸⁸, a meno di limitare dimensioni e peso dei pezzi caricabili. Per questo motivo sono state favorite soluzioni con postazioni fisse all'interno del magazzino, con la presenza di un manipolatore integrato ad esso.

Prima di proseguire il discorso, si fornisce di seguito una serie di immagini con diverse soluzioni abbinabili al centro di lavoro *UMILL 1500*, prese in considerazione durante lo studio.

⁸⁴ Vedi capitolo 5.3 *Cambio pallet: valutazioni preliminari*.

⁸⁵ In seguito all'analisi di *Make or Buy* effettuata dai dipartimenti competenti.

⁸⁶ Vedi capitolo 4.3 *Automatic pallet changer (APC)* per informazioni relative ai diversi sistemi di cambio pallet esistenti e alle peculiarità di ognuno di essi.

⁸⁷ Sia magazzini modulari che sistemi scambiatore-magazzino integrati.

⁸⁸ Ciò è dovuto alle inerzie elevate di cui risulterebbe caratterizzato il sistema, con conseguenti potenze elevate per permettere la movimentazione dei pezzi.

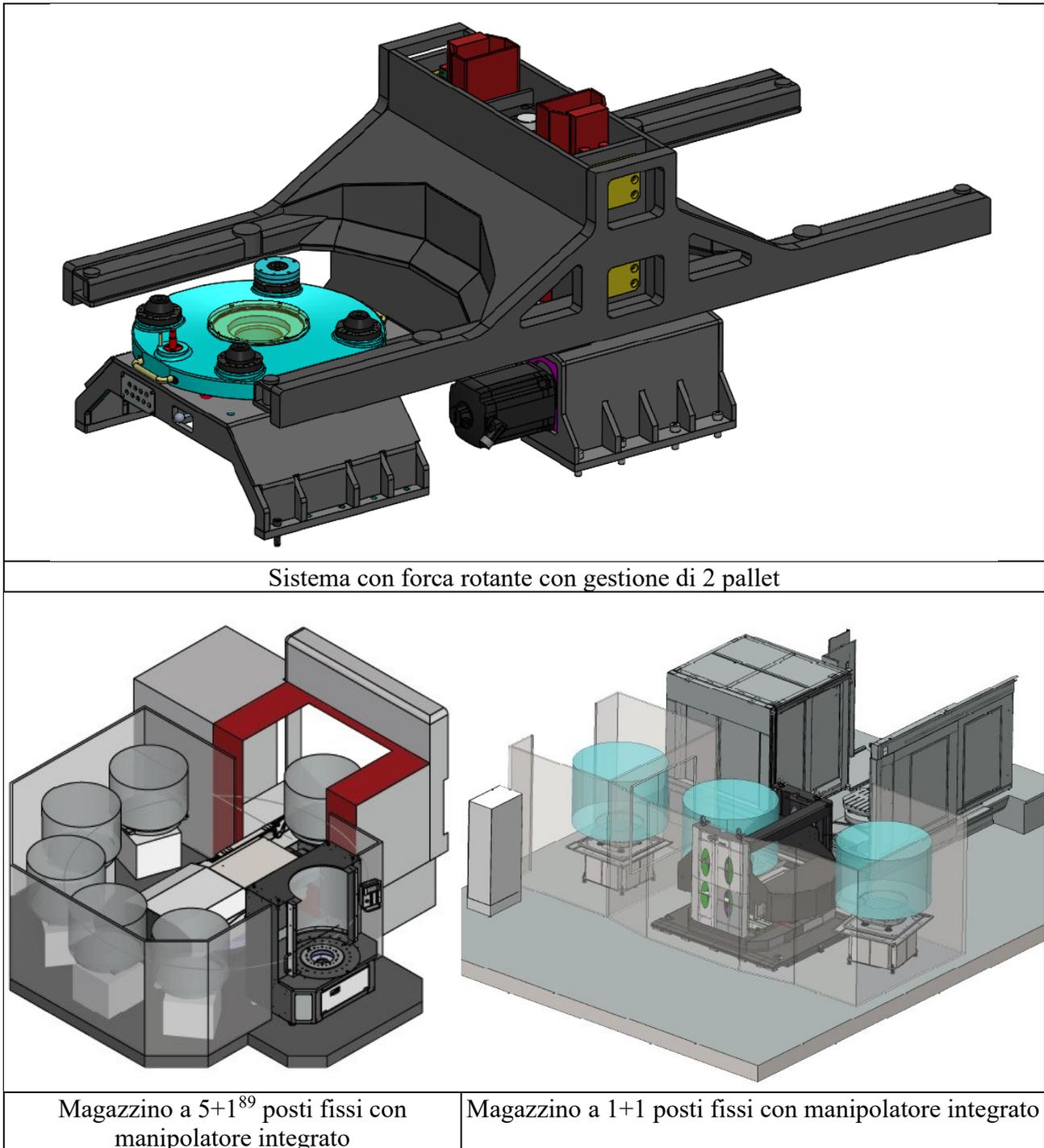


Figura 5.3: DuMe esempi di proposte di sistemi di cambio pallet valutate durante lo studio.

Una volta identificata la tipologia di scambiatore e magazzino più appropriati all'applicazione studiata, si rivela necessario valutare quale delle varie offerte risulta più vantaggiosa; per fare questo si devono toccare diversi aspetti, quali:

- Ingombri: si valuta l'area occupata dal sistema, ovviamente sommandola a quanto già utilizzato dalla macchina utensile standard; risulta importante anche la valutazione della massima altezza raggiunta dal sistema per una definizione completa del volume necessario per l'installazione.

⁸⁹ Vengono identificate le postazioni presenti all'interno del magazzino e non accessibili dall'operatore, con in aggiunta l'area di attrezzaggio del pallet, la quale invece risulta accessibile per chi si trova esternamente.

- Applicabilità a macchina standard: minori sono le modifiche da apportare alla macchina utensile standard, più facile risulta l'applicazione di un sistema anche successivamente alla messa in servizio del centro di lavoro.
- Controllo: risulta necessario valutare la presenza o meno di un software di controllo del magazzino pallet e la possibilità di interfacciamento con il controllo numerico della macchina.
- Futuri ampliamenti: la capacità di un magazzino pallet di poter essere ampliato per mezzo di interventi futuri corrisponde ad un valore aggiunto per un possibile acquirente.
- Tempi ciclo: dipendente da diversi fattori, quali tipologia di cambio pallet, dimensioni magazzino e carichi da trasportare per citarne alcuni; parametro di riferimento per la valutazione della produttività raggiungibile con il sistema abbinato alla macchina utensile.
- Costo: aspetto fondamentale sia per quanto riguarda la scelta del sistema di cambio pallet, sia per l'offerta dell'intera macchina utensile sul mercato di riferimento.

Prendendo in considerazione i punti appena introdotti, risulta possibile effettuare una valutazione piuttosto completa dei diversi sistemi automatici di cambio pallet, permettendo in questo modo di effettuare la scelta migliore in relazione al centro di lavoro a cui questo sistema verrà integrato.

Risulta evidente che la limitazione maggiore viene data dagli ingombri, poiché ad essi si fa riferimento in fase di installazione della macchina presso il cliente; il luogo in cui il centro di lavoro troverà locazione fornisce preziose indicazioni su quale sistema privilegiare⁹⁰.

Si rivelano così di estrema importanza altri aspetti, quali l'applicabilità del sistema alla macchina standard e l'affidabilità del fornitore, che possono fornire una maggiore flessibilità nella scelta dei diversi sistemi da proporre durante la presentazione del centro di lavoro.

In ogni caso, il discorso appena fatto risulta fortemente dipendente dalle necessità del cliente sia in termini di ingombri sia in termini di specifiche dell'intero sistema (per esempio numero totale di pallet, dimensioni e peso massimo caricabile, tempo ciclo, ecc.).

Per questo motivo risulterebbe molto difficile sviluppare un discorso ben definito mantenendo i parametri di valutazione completamente generali; si rivela così di maggiore interesse impostare il ragionamento prendendo come riferimento un centro di lavoro *UMILL 1500* in lavorazione, al quale verrà implementato un sistema di cambio pallet sviluppato congiuntamente con un fornitore esterno.

Si prende così come riferimento la commessa per cui era richiesta l'implementazione di un sistema di cambio pallet automatico; per forza di cose, alcune informazioni non possono essere condivise sulla presente tesi, le quali però non dovrebbe creare problemi ai fini della comprensione del percorso di valutazione.

Per la definizione degli ingombri massimi accettabili per il sistema di cambio pallet, con relativo magazzino, si deve valutare congiuntamente al cliente lo spazio a disposizione presso quest'ultimo per il posizionamento della macchina utensile e degli elementi accessori. Una volta impostate le dimensioni di massima, risulta possibile valutare i sistemi di cambio pallet compatibili con tali limitazioni.

Successivamente i sistemi presi in considerazione devono essere rapportati con le richieste in termini di dimensioni massime del pezzo lavorabile, sia in pianta che in altezza, e peso massimo⁹¹ movimentabile; ovviamente risulta di estrema importanza anche il tempo di cambio pallet che si è in grado di garantire con il sistema considerato.

⁹⁰ Per questo motivo si rivela fondamentale prevedere diverse soluzioni di sistema di cambio pallet e magazzino, al fine di proporre soluzioni ad hoc per ogni possibile applicazione.

⁹¹ Normalmente nel caso di cambio pallet si indica un peso massimo movimentabile, comprensivo del peso proprio del pallet.

Sono state così vagliate diverse soluzioni, ognuna con le sue specifiche e peculiarità; ogni configurazione è stata sviluppata in stretta collaborazione con il fornitore scelto come riferimento, con l'obiettivo di soddisfare le richieste del cliente in termini di ingombri e tempi ciclo macchina, oltre alla possibilità di futuri ampliamenti del magazzino pallet.

Date queste richieste, è stato deciso di applicare al centro di lavoro di fresatura un sistema di cambio pallet integrato ad un magazzino pallet completamente automatico; se ne fornisce una rappresentazione in "Figura 5.4".

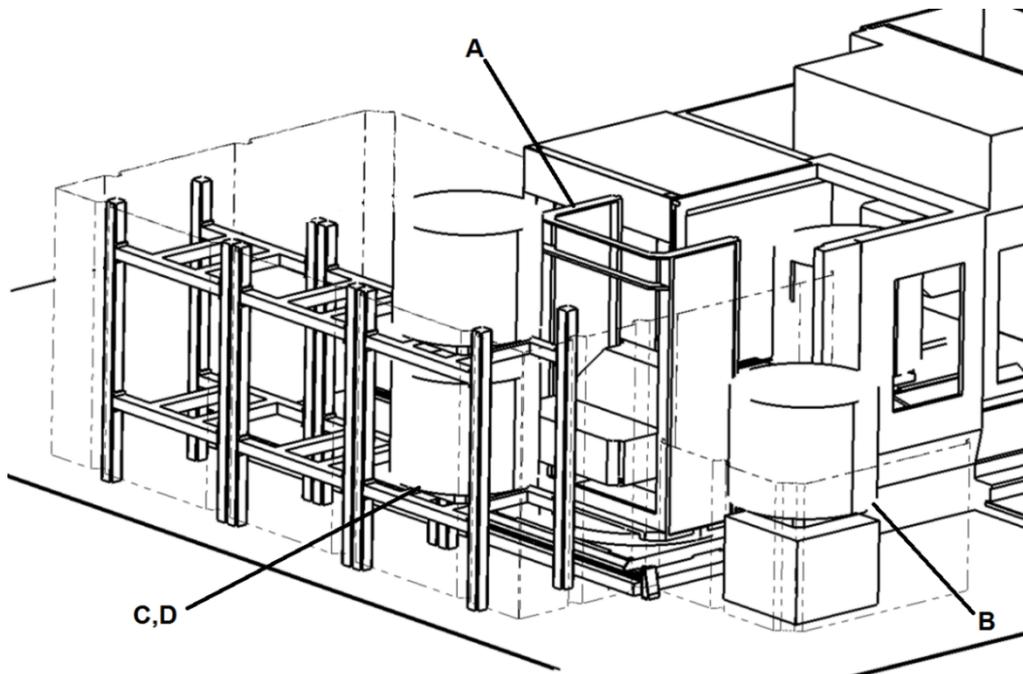


Figura 5.4: Rappresentazione schematica del magazzino pallet applicato ad *UMILL 1500*.

Una volta presa visione della rappresentazione, si possono notare diversi elementi ben definiti, quali:

- A. Stazione di movimentazione pallet (manipulator pallet changer⁹²);
- B. Stazione di preparazione e attrezzaggio pallet.
- C. N°6 pallet 800x800
- D. N°6 zone dedicate al deposito del pallet, sviluppate su due piani.

Come già detto in precedenza, il manipolatore che permette il cambio pallet risulta integrato all'interno del magazzino pallet. Ad esso vengono forniti tre gradi di libertà di traslazione con l'obiettivo di permetterne la traslazione longitudinale lungo il magazzino, quella verticale per garantire lo sfruttamento dei due piani e la terza per permettere il prelievo dei pallet sia dalle postazioni dedicate che dall'area di lavoro. Risulta inoltre presente un grado di libertà di rotazione lungo l'asse verticale per permettere al manipolatore di orientare adeguatamente gli elementi di presa.

Durante il normale funzionamento della macchina utensile, il magazzino risulta inaccessibile, al fine di garantire la sicurezza dell'operatore; l'unica zona esclusa da questo è la stazione di preparazione, dove l'operatore stesso può eseguire operazioni di carico e scarico del componente dal pallet.

Una volta che viene completato l'attrezzaggio del pezzo, per mezzo di un comando manuale risulta possibile l'esecuzione automatica delle operazioni di prelievo e deposito del pallet appena preparato; perché venga garantita la sicurezza dell'operatore, quest'ultimo si deve trovare al di fuori

⁹² Vedi capitolo 4.3.2 *Manipulator pallet changer* per maggiori informazioni

della griglia di protezione, e potrà accedere nuovamente a quella zona una volta ultimate tutte le movimentazioni necessarie.

Il software di gestione del magazzino e del manipolatore risulta integrato alla macchina e si interfaccia continuamente con il controllo numerico del centro di lavoro; in questo modo risulta possibile gestire tutti i cicli di movimento e posizionamento del pallet, sia all'interno del magazzino che con la macchina utensile⁹³.

Per il suddetto sistema di gestione magazzino sono previste diverse funzioni, quali:

- Gestione operazioni carico e scarico;
- Codifica pallet (risulta possibile identificare pallet e componente caricato su di esso⁹⁴);
- Lista di esecuzione automatica con annesse priorità di scambio pallet⁹⁵;
- Stato pallet e lavorazione.

Per terminare, si possono identificare alcune specifiche del sistema di cambio pallet appena descritto, al fine di valutare quale contributo questo sistema può garantire su un centro di lavoro standard come quello proposto; in “**Tabella 5.11**” si forniscono i dati principali.

Tabella 5.11: Caratteristiche principali del sistema *APC* scelto

Parametro	Valore	Unità di misura
Portata manipolatore (pallet incluso)	3000	kg
Diametro massimo pezzo	Ø 1500	mm
Massima altezza (incluso pallet) ⁹⁶	1300	mm
Precisione di posizionamento	0,015	mm
Tempo di scambio	≤ 250	s

In particolare il primo dato importate si rivela essere quello di massima portata del trasportatore per garantirne il corretto funzionamento del manipolatore e tempi ciclo più brevi; risulta infatti ovvio che a pesi e ingombri maggiori corrispondono tempi più dilatati per il completamento delle operazioni. Di pari passo si può sviluppare il discorso relativo alla precisione di posizionamento del pallet, la quale risulta tanto meglio quanto più la struttura del manipolatore risulta in grado di sopportare senza flessioni il peso movimentato.

In ultima analisi risulta necessario fare una valutazione sul tempo ciclo necessario al completamento delle operazioni di scambio del pallet presente all'interno dell'area di lavoro con uno posizionato in una delle sei zone dedicate del magazzino. Si rivela infatti necessario che una postazione all'interno del magazzino oppure la zona di carico sia libera per rendere possibile la movimentazione del pallet presente all'interno della zona di lavoro; una volta completata questa operazione, può essere prelevato uno degli elementi presenti nelle altre zone dedicate e depositato all'interno del centro di lavoro. In funzione del percorso che il manipolatore deve effettuare, il tempo di scambio risulta più o meno elevato; il dato fornito indica il massimo tempo necessario al completamento di tutte le operazioni elencate.

⁹³ Risulta necessario studiare adeguatamente la comunicazione tra i due controlli.

⁹⁴ Opzione comoda ai fini dell'identificazione delle operazioni da svolgere anche in lavorazione, nel caso fossero previsti componenti diversi sui diversi pallet.

⁹⁵ Si deve in ogni caso prevedere la sincronizzazione di questo con la lista programmi in macchina, non essendo previsto in maniera automatica.

⁹⁶ Limite definito dal magazzino pallet, soprattutto per quanto riguarda il livello inferiore.

Una volta valutate tutte le principali caratteristiche del sistema di cambio pallet scelto per lo studio, si rivela necessaria una fase di valutazione delle principali criticità, con l'obiettivo di ottimizzare la nuova applicazione.

5.5 *Macchina standard vs applicazione APC*

Una volta scelto il sistema di cambio pallet automatico che meglio si adatta alle richieste pervenute per il centro di lavoro di fresatura in questione, l'ultimo step risulta essere quello di adattamento della macchina standard all'implementazione del suddetto sistema.

Al fine di comprendere meglio il discorso che verrà sviluppato nelle prossime pagine, si fornisce di seguito l'applicazione del sistema automatico di cambio pallet con relativo magazzino al centro di lavoro di fresatura *UMILL 1500* (vedi "Figura 5.5").



Figura 5.5: Applicazione del sistema *APC* con magazzino lineare a *UMILL 1500* (particolare di carenatura e basamento).

Tutte le valutazioni relative al sistema di cambio pallet e al magazzino ad esso abbinato sono state affrontate nel capitolo precedente⁹⁷, comprese le modifiche richieste per rispettare eventuali vincoli costruttivi o prestazionali.

Per garantire il corretto funzionamento della macchina utensile e del processo di cambio pallet, si devono studiare gli ingombri del nuovo sistema *APC* al fine di valutare eventuali modifiche da apportare alla carenatura della macchina e, eventualmente, al basamento e al carro porta-pallet.

Ogni singolo aspetto deve essere gestito in combinazione con gli altri al fine di garantire lo sviluppo della soluzione ottimale per quanto riguarda l'applicazione del sistema *APC* in esame; però, al fine di ottenere una trattazione il più possibile fluida e leggera, ogni singola variazione dal caso standard verrà gestita in un capitolo dedicato proposto di seguito.

⁹⁷ Vedi 5.4 *Cambio pallet: scelta e sviluppo*.

5.5.1 Carenatura

Il primo discorso da affrontare risulta legato allo spazio necessario al sistema di cambio pallet per accedere alla zona di lavoro della macchina utensile; esso deve essere garantito per mezzo del portellone anteriore che, oltre ad avere dimensioni adeguate allo scopo, dovrà anche essere comandabile in apertura e chiusura.

Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, già la versione base è dotata di un sistema motorizzato per l'apertura del portellone anteriore, come viene anche mostrato in “**Figura 5.6**”.

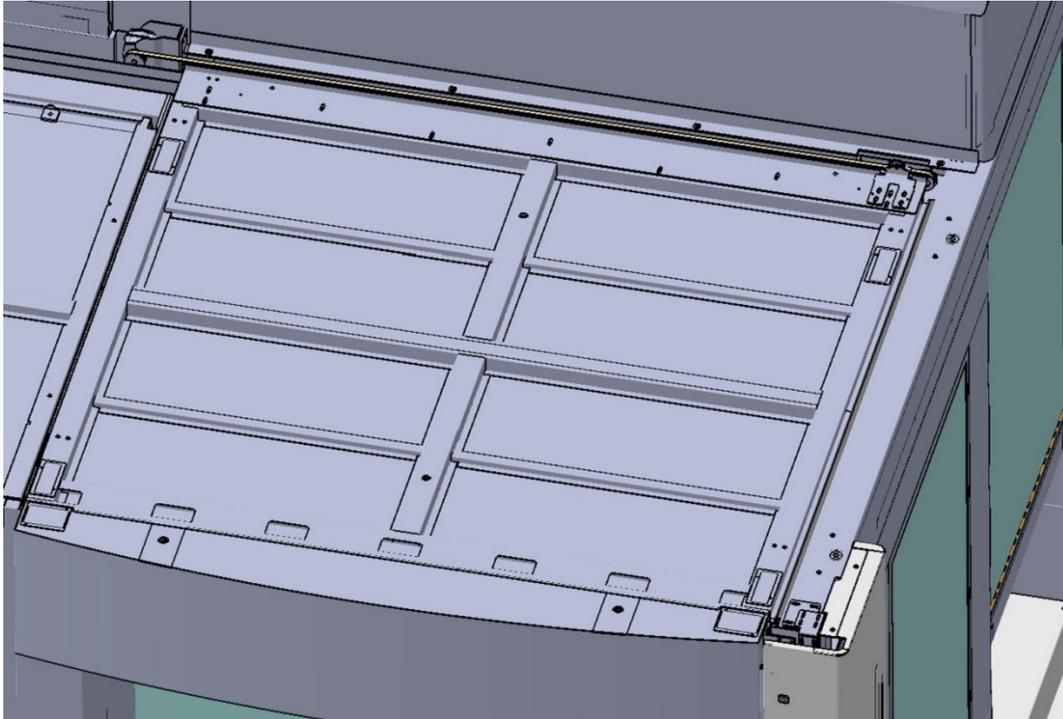


Figura 5.6: Dettaglio del portellone dell'UMILL 1500 con sistema di apertura motorizzato.

In seguito alla presa visione dell'immagine appena fornita si può notare come al di sopra della carenatura sia presente un sistema di movimentazione automatico del portellone anteriore; il piccolo motore elettrico mette in rotazione una cinghia che trascina una piastra. Questa piastra viene avvitata sul portellone e ne permette il movimento lineare; sono in ogni caso previste delle rotelle montate sul portello che ne facilitano il movimento lungo delle guide.

La traslazione di quest'ultimo risulta in questo modo comandabile per mezzo del controllo numerico della macchina utensile, rendendo perciò automatizzabile il processo di apertura del portellone stesso; nel caso specifico trattato, questo accorgimento permette l'interfaccia con il magazzino pallet senza eseguire modifiche alla macchina standard.

Legato a questo aspetto, risulta importante valutare anche la serratura che garantisce la chiusura del portellone anteriore, al fine di permettere una corretta interfaccia tra la zona di lavoro e il magazzino pallet. Per fare questo si rivela necessario l'utilizzo di un'elettro-serratura dotata di un transponder in grado di garantire chiusura e apertura del portellone unicamente in seguito ad un comando del controllo numerico; allo stesso tempo fornisce informazioni utili al software di controllo del magazzino sullo stato del portellone (aperto o chiuso) al fine di garantire le corrette tempistiche di cambio pallet.

Secondariamente risulta necessario valutare se la carenatura, soprattutto dal punto di vista degli ingombri di portellone e copertura del basamento, può creare problemi durante la fase di cambio pallet; per agevolare la comprensione del problema si fornisce di seguito un dettaglio della macchina (vedi “**Figura 5.7**”).



Figura 5.7: Dettaglio della carenatura del centro di lavoro *UMILL 1500*.

Una volta visionata la zona da verificare, si rivela necessario simulare quello che sarà il movimento del manipolatore al fine di valutare la presenza di criticità o meno. Ciò risulta estremamente semplice per mezzo dei sistemi di modellazione tridimensionale utilizzati all'interno dell'ufficio tecnico, ed è stato possibile verificare che la carenatura si adatta perfettamente al sistema di cambio pallet senza che vi siano interferenze; si riporta una presa immagine nella “**Figura 5.8**”.

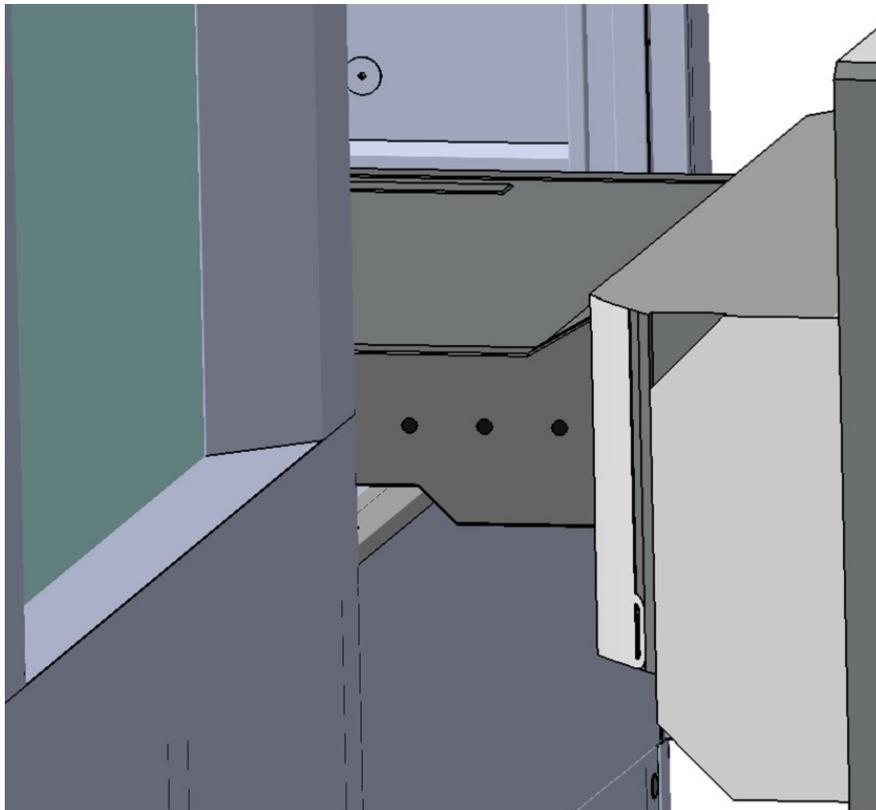


Figura 5.8: Focus su gioco tra manipolatore e carenatura in fase di scarico pallet.

5.5.2 Carro porta-pallet

Si passa ora all'analisi del carro porta pallet da prevedere sulla macchina in sostituzione alla tavola roto-traslante presente sulla versione standard della macchina utensile; come già fatto in precedenza, si fornisce di seguito un'immagine della versione base della tavola con l'obiettivo di rendere di maggiore comprensione i concetti trattati successivamente.

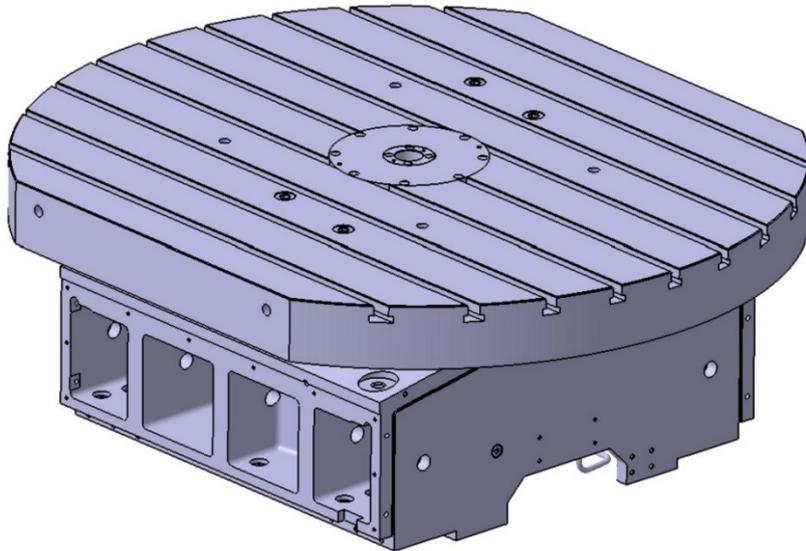


Figura 5.9: Tavola roto-traslante presente su versione standard del centro di lavoro di fresatura *UMILL 1500*.

Come risulta ovvio anche dalla “**Figura 5.9**” appena fornita, le modifiche non riguardano il sistema di movimentazione del carro né in traslazione né in rotazione⁹⁸, ma “unicamente” nella sua struttura; si devono infatti prevedere delle lavorazioni aggiuntive al fine di garantire l'installazione di sistemi per l'alloggiamento del pallet.

Al fine di rendere la trattazione il più corretta possibile dal punto di vista concettuale, l'analisi delle lavorazioni aggiuntive sul componente esistente non verranno separate dalla valutazione dei componenti aggiuntivi da prevedere sia sul carro stesso che su ogni singolo pallet; questo perché la quasi totalità delle modifiche risulta dipendente dagli elementi inseriti per l'applicazione.

Come già introdotto nel capitolo **4.5 Sistemi di centraggio e bloccaggio pallet**, per garantire la corretta applicazione di un sistema di cambio pallet, si deve prevedere l'utilizzo di un certo numero di elementi adibiti al centraggio e al bloccaggio del pallet rispetto al carro; prendere visione del capitolo dedicato per maggiori informazioni.

In ogni caso si devono prevedere delle cave dedicate sia sul carro che sul pallet per ospitare tali elementi; per questo motivo esse devono essere adeguatamente lavorate, al fine di garantire precisione e ripetibilità nell'operazione di cambio pallet.

Nell'applicazione studiata si prevede la presenza di quattro cave dedite al montaggio di altrettanti coni di centraggio sul carro porta-pallet; inoltre è presente sulla tavola girevole un perno meccanico che garantisce la corretta orientazione del pallet⁹⁹.

⁹⁸ Moto di rotazione attorno all'asse verticale ottenuto per mezzo di un motore coppia (o torque) posto coassialmente alla stessa tavola rotante.

⁹⁹ Per fare in modo che questa operazione risulti ripetibile, si deve impostare un'orientazione ben definita del carro porta-pallet per l'operazione di cambio pallet.

Una volta valutate tutte le modifiche da apportare al componente, risulta possibile modellare il componente voluto; in questo modo si può ottenere quanto mostrato in “**Figura 5.10**”.

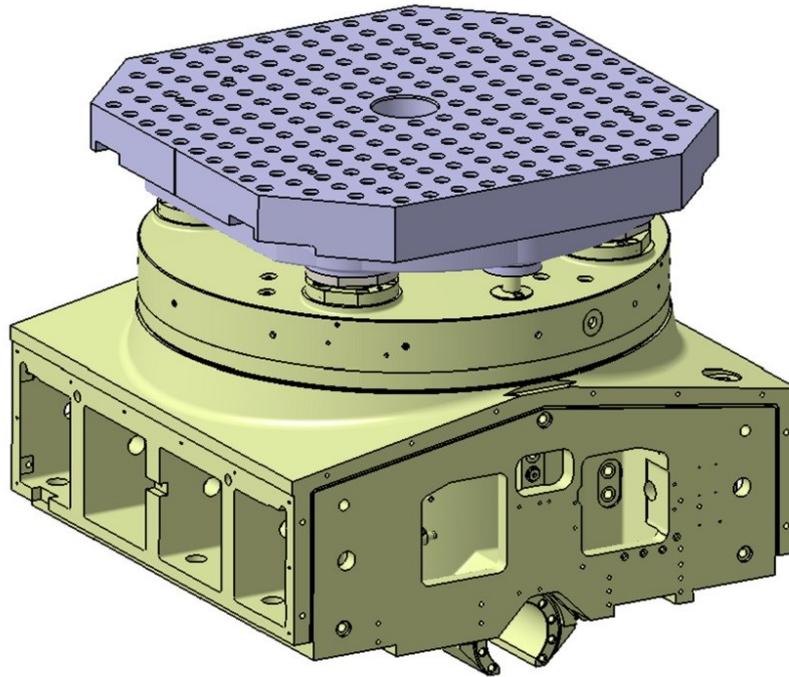


Figura 5.10: Carro porta-pallet roto-traslante previsto per applicazione sistema di cambio pallet su centro di lavoro *UMILL 1500*.

5.5.3 Armadio idraulico e pneumatico

In ultima analisi si deve valutare quanto il nuovo sistema automatico di cambio pallet richieda variazioni tanto nella componentistica presente all'interno dell'armadio idraulico e pneumatico quanto nelle linee presenti tra quest'ultimo e gli utilizzi.

Anche in questo caso conviene, ai fini della trattazione, suddividere le modifiche dovute all'introduzione di un magazzino pallet da quelle necessarie al corretto funzionamento dei componenti aggiuntivi presenti sul carro porta-pallet, introdotti nel capitolo precedente¹⁰⁰.

In particolare, per prima cosa si valutano i componenti aggiunti all'interno dell'armadio idraulico e pneumatico che permettono di sfruttare al massimo i sistemi di centraggio e bloccaggio installati sul carro porta-pallet. Per la presente applicazione sono stati scelti dei coni di centraggio caratterizzati da un sistema di bloccaggio irreversibile a molla; questi elementi sono dotati ognuno di una pinza sagomata in modo tale da adattarsi al perno presente nella relativa sede sul pallet e garantirne il bloccaggio anche in assenza di liquido idraulico in pressione. Ovviamente per sbloccare il pallet si deve prevedere una linea di fluido idraulico che contrasti la forza di ogni molla presente all'interno dei coni di bloccaggio. Il suddetto processo può essere automatizzato prevedendo la presenza di un'elettrovalvola idraulica, comandabile dal controllo numerico, che permette lo sbloccaggio dell'elemento mobile per il successivo scambio.

Di non secondaria importanza risulta essere la pulizia sia dei coni presenti sul carro porta-pallet sia delle controparti che invece vengono installate sul pallet. Per garantire questo è presente sugli elementi montati sul carro dei passaggi per aria compressa che permettono l'asportazione di trucioli e polvere presenti sulle superfici da accoppiare. Risulta così necessario un utilizzo dedicato sul carro

¹⁰⁰ Vedi 5.5.2 Carro porta-pallet.

e una linea fluida che porti l'aria compressa dall'alimentazione al cono di centraggio; infine si deve prevedere un'elettrovalvola pneumatica nell'armadio dedicato al fine di comandare questo flusso.

In successiva analisi risulta necessario garantire il corretto funzionamento del magazzino pallet; si osserva che, essendo questo elemento connesso alla macchina ma non integrato ad essa¹⁰¹, non si prevedono complicanze né a livello di controllo numerico né tantomeno per l'armadio idraulico e pneumatico. L'unica differenza in questo senso risulta essere la necessità di rendere funzionanti gli utilizzi pneumatici presenti presso il magazzino; risulta per questo motivo necessario passare attraverso l'armadio pneumatico per intercettare l'alimentazione di aria compressa per portarla a bordo magazzino per mezzo di un'apposita tubazione che verrà fatta passare sotto al basamento. Per questione di sicurezza dell'intero impianto, tra l'alimentazione pneumatica e la linea fluida diretta al magazzino viene prevista un'elettrovalvola posizionata all'interno dell'armadio; in questo modo si può bloccare l'alimentazione pneumatica diretta al magazzino nel caso di un malfunzionamento di quest'ultimo.

Infine, si devono prevedere delle modifiche nella configurazione di tubi e cavi posti all'interno della catena porta cavi presente sul basamento; essa infatti risulta fissata alla tavola porta pallet e ne garantisce il funzionamento collegando gli utilizzi ai vari armadi. L'aggiunta di collegamenti elettrici e tubazioni idrauliche e pneumatiche determinano una variazione negli elementi presenti all'interno della catena, richiedendone per questo motivo una modifica rispetto a quanto presente sulla macchina utensile standard.

5.6 *Caratteristiche previste per versione definitiva*

A questo punto sono stati valutati sia il sistema di cambio pallet da abbinare alla macchina utensile standard sia le modifiche da apportare a quest'ultima per garantire il corretto interfacciamento tra i due diversi elementi.

Non resta quindi che confrontare quanto risulta possibile ottenere con il centro di lavoro appena studiato rispetto a quanto è ottenibile attraverso l'uso della macchina standard.

Prendendo come riferimento quanto proposto in precedenza nella "**Tabella 5.1**", si può osservare come specifiche quali corse e cinematica degli assi lineari, oltre alle caratteristiche dell'elettromandrino¹⁰², risultino invariate tra una soluzione e l'altra; si rivela per questo motivo di maggiore interesse il confronto di quei fattori soggetti a forti variazioni nel passaggio da un'applicazione all'altra. Si propone così di seguito in "**Tabella 5.12**" il confronto tra le due soluzioni.

¹⁰¹ Vedere capitolo **5.4 Cambio pallet: scelta e sviluppo** per maggiori informazioni sul sistema di cambio pallet scelto e sul relativo magazzino.

¹⁰² A parità di elettromandrino montato sulla testa di fresatura, essendo disponibili diverse soluzioni.

Tabella 5.12: Macchina standard vs applicazione APC

Machine model	UMILL 1500	UMILL 1500 + APC
X-axis [mm]	1500	
Y-axis [mm]	1500	
Z-axis [mm]	1100	
Rapid Feed [m/min]	60	
Acceleration [m/s ²]	6	
Max thrust X-Y-Z [kN]	18	
Machine bed material	Cast iron	
Milling head		
Head Tipology	Universal 52.5°	
A-axis	±185°	
Max spindle Power [kW] (S6/S1)	58/45	
Max spindle torque [Nm] (S6/S1)	372/300	
Max spindle rot [rpm]	12000	
Spindle taper	HSK-100	
NC Rotary table		
Dimension [mm]	Ø1400x1200	-
Max. rotary diameter [mm]	Ø2100	-
Feed/Rapid feed [rpm]	20	-
Max load [kg]	4500	-
Operating torque [Nm]	3000	
Clamping torque [Nm]	12000	
Tilt torque [Nm]	28000	
Tool changer		
Type	Rack	
Tool change, places	88	
Max. tool length [mm]	600	
Max. tool diameter [mm]	Ø250	
Max. tool weight [kg]	25	
Chip to chip time [s]		
Control	Heidenhain/ Siemens	
Dimensions: length x width x height [mm]	8700 x 6050 x 4100	11718 x 10510 x 4100
APC		
Number of pallets	-	6
Pallet changer type	-	Manipulator + fixed locations
Pallet dimension [mm]	-	800 x 800
Max. rotary diameter [mm]	-	ø1500
Max height [mm]	-	1300
Max. load [kg]	-	3000
Pallet change time [s]	-	≤250 (120)
Clanping cones	-	4

6. Conclusioni

L'analisi descritta nel dettaglio nelle pagine precedenti ha in questo modo permesso di valutare i passi da seguire per effettuare un corretto studio per l'applicazione di un sistema automatico di cambio pallet su un centro di lavoro di fresatura. In questo modo, risulta possibile affrontare singolarmente ogni criticità, con l'obiettivo di rendere la soluzione il più modulare possibile.

Su quest'ultimo concetto è stato basato l'intero studio, poiché un'elevata modularità della macchina utensile può garantire sia una vasta gamma di opzioni aggiuntive al modello standard, sia la possibilità di studiare l'implementazione di elementi come quello proposto nella trattazione.

In ogni caso, lo studio affrontato all'interno dell'ufficio tecnico è stato estremamente approfondito ed è stato affrontato solo in parte nelle pagine precedenti; inoltre, come già anche indicato nel discorso, alcuni aspetti devono ancora essere definiti in maniera più precisa, essendo questa applicazione ancora da testare e implementare al controllo numerico della macchina utensile.

Si nota in ogni caso che l'applicazione di sistemi automatici come quello proposto non può che portare a miglioramenti importanti sotto molti aspetti, soprattutto per quanto riguarda aspetti legati a tempi ciclo e produttività; come è già stato detto, la macchina standard dovrà essere "adattata" a tale applicazione, con conseguenze su alcune specifiche quali capacità di carico e dimensioni massime del pezzo da lavorare.

Per questo motivo, dalle necessità del cliente dipende la scelta dell'opzione di cambio pallet automatico da abbinare al centro di lavoro standard; allo stesso tempo, la concezione fortemente modulare di questi sistemi permette l'applicazione degli stessi anche in un secondo momento rispetto all'installazione della macchina utensile.

7. Bibliografia

Rossi M., Maiocchi B., *Manuale delle macchine utensili*, II edizione, gennaio 2014, Tecniche Nuove, Milano

Rossi M., Mandelli B., *Manuale delle macchine utensili*, I edizione, gennaio 2002, Tecniche Nuove, Milano

Grimaldi F., *Manuale delle macchine utensili a CNC*, novembre 2018, Editore Ulrico Hoepli, Milano

7.1 Sitografia

7.1.1 Capitolo 2

- L. Menini, *Automazione industriale*, in Enciclopedia Italiana, IX Appendice (2015), <http://www.treccani.it> (http://www.treccani.it/enciclopedia/automazione-industriale_res-ba9fd0ce-dd65-11e6-add6-00271042e8d9_%28Enciclopedia-Italiana%29/)
- A. Di Napoli, *Automazione industriale*, in Enciclopedia della Scienza e della Tecnica, 2008, <http://www.treccani.it> (http://www.treccani.it/enciclopedia/automazione-industriale_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/)
- Automazione: <http://www.treccani.it/enciclopedia/automazione/>, ultima visita 17/01/2020
- P. Di Medio, <https://www.organizzazioneaziendale.net/lean-production>, ultima visita 17/01/2020
- P. Di Medio, <https://www.organizzazioneaziendale.net/teoria-dei-vincoli-theory-of-constraints>, ultima visita 17/01/2020
- Industria 4.0 e Lean Production: http://www.logisticamente.it/Articoli/10313/Industria_40_e_Lean_Production_verso_la_convergenza/, ultima visita 17/01/2020
- Lean Production: https://fomir.it/wp-content/uploads/2017/11/Approfondimenti-sulla-Lean_Production.pdf
- Teoria dei vincoli: https://it.wikipedia.org/wiki/Teoria_dei_vincoli
- Dragan Bosnjak, <http://www.encob.net/blog/2010/11/12/teoria-dei-vincoli-dbr-drum-buffer-rope/>, ultima visita 17/01/2020
- Industria 4.0 e automazione: <https://www.logisticaefficiente.it/fabbrica-4-0/automazione-industriale/industry-4-0-e-automazione-industriale.html>, ultima visita 17/01/2020
- L. Zanotti, <https://www.digital4.biz/executive/industria-40-storia-significato-ed-evoluzioni-tecnologiche-a-vantaggio-del-business/>, ultimo aggiornamento 19/09/2019
- L. Maci, <https://www.economyup.it/innovazione/cos-e-l-industria-40-e-perche-e-importante-saperla-affrontare/>, ultimo aggiornamento 27/11/2019
- Industria 4.0: <https://tecnologia.libero.it/i-concetti-chiave-alla-base-dello-sviluppo-dellindustria-4-0-15010>, ultima visita 17/01/2020

- Agile e Lean: <https://www.makeitlean.it/blog/agile-e-lean-filosofie-a-confronto>, ultima visita 17/01/2020
- Pescatore, <https://www.felicepescatore.it/alm/142-lean-e-agile-similitudini-e-differenze>, ultimo aggiornamento 07/01/2015
- David Ingram, <https://smallbusiness.chron.com/similarities-between-lean-agile-manufacturing-70619.html>, ultima visita 17/01/2020
- Lean e Agile: <https://twproject.com/it/blog/lean-e-agile-differenze-e-similitudini/#agile>, ultimo aggiornamento 12/11/2018
- Agile manufacturing: <https://blog.cybertec.it/i-benefici-della-metodologia-agile>, ultimo aggiornamento 11/02/2019
- Agile e Lean: <https://www.iessolutions.eu/agile-e-lean-due-filosofie-a-confronto/>, ultimo aggiornamento 21/06/2019

7.1.2 Capitolo 3

- Macchine utensili: <http://www.retecamere.it/macchine-utensili-quali-sono-e-come-funzionano/>, ultima visita 17/01/2020
- OEE: <https://www.leanmanufacturing.it/strumenti/oeec.html>, ultima visita 17/01/2020
- Automazione nelle macchine utensili: <https://automationstory.com/2-4-la-robotica-e-le-macchine-utensili/>, ultima visita 17/01/2020
- P. Di Medio, <https://www.organizzazioneaziendale.net/oeec-significato-definizione-calcolo/2671>, ultima visita 17/01/2020
- Storia controllo numerico: <http://it.sdfortune.net/info/history-of-numerical-control-25345621.html>, ultimo aggiornamento 09/02/2018
- DNC: https://en.wikipedia.org/wiki/Direct_numerical_control, ultimo aggiornamento 19/08/2019
- Macchine utensili CNC: <https://www.electroyou.it/asdf/wiki/le-macchine-utensili-e-il-controllo-numerico>, ultima visita 17/01/2020
- DNC: https://prezi.com/vunhc_eqj17/dnc-direct-numerical-control/, ultima visita 17/01/2020
- Fresatura: <https://www.meccanicaneews.com/fresatura/>, ultima visita 17/01/2020
- Modularità: <https://www.tecnelab.it/approfondimenti/macchine/soluzioni--modulare-per-vocazione>, ultimo aggiornamento 01/08/2015

7.1.3 Capitolo 4

- Benefici sistemi APC: <https://hwacheonasia.com/how-automatic-pallet-changers-enhance-cnc-machine-production/>, ultimo aggiornamento 01/10/2018
- Robot a CN: <https://www.meccanicaneews.com/2018/12/11/siemens-robot-a-controllo-numerico/>, ultimo aggiornamento 11/12/2018
- Evans Jones Thorne, <https://www.ctemag.com/news/articles/pallet-changers-help-vmcs-hold-their-own-production-environments>, ultimo aggiornamento 01/04/2016

- Pallettizzazione con robot: <https://www.ilprogettistaindustriale.it/sistemi-di-pallettizzazione-robotizzati-per-produrre-24-ore-su-24/>, ultimo aggiornamento 29/05/2018
- MECCANO, <https://www.meccanorobotica.it/automazioni-e-robotica/sistema-di-cambio-pallet/sistema-di-cambio-pallet-con-manipolatore-polare/>, ultima visita 16/02/2020
- OVERMACH:
https://www.overmach.it/ZeusInc/FlipBookPdf_SourceFiles/ipad_ver_5_light36705.pdf, ultima visita 16/02/2020
- Sistemi di centraggio: <https://www.berg-spanntechnik.de/it/produktprogramm/sonderanwendung/>, ultima visita 16/02/2020

7.1.4 Capitolo 5

- Benchmark: [https://it.wikipedia.org/wiki/Benchmark_\(economia\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Benchmark_(economia)), ultima visita 17/02/2020
- Sistemi di pallettizzazione: <https://it.dmgmori.com/prodotti/automazione/movimentazione-pallet/sistema-di-immagazzinaggio-circolare/rps>, ultima visita 17/02/2020
- Caratteristiche mandrini: <https://www.sandvik.coromant.com/it-it/knowledge/machine-tooling-solutions/tooling-considerations/pages/spindle-selection.aspx>, ultima visita 17/02/2020
- P. Bianchi, *Make or Buy*, in Dizionario di Economia e Finanza, 2012, http://www.treccani.it/enciclopedia/make-or-buy_%28Dizionario-di-Economia-e-Finanza%29/
- Make or Buy: <https://farenumeri.it/make-or-buy-quali-scegliere/>, ultima visita 17/02/2020
- Make or Buy: <https://www.humanwareonline.com/project-management/center/analisi-make-or-buy/>, ultima visita 17/02/2020

7.2 Dispense universitarie e articoli

- Atzeni E. (2018), Sistemi integrati di produzione, DIGEP, Politecnico di Torino, inedito
- Atzeni E. (2016), Tecnologia meccanica, DIGEP, Politecnico di Torino, inedito
- Ippolito R. (2018), **Dispense di** Sistemi integrati di produzione, Politecnico di Torino
- Sorli M. (2018), Meccatronica, DIMEAS, Politecnico di Torino, inedito
- Pastorelli S. P. (2018), Dispositivi e sistemi robotici, DIMEAS, Politecnico di Torino, inedito
- Mihaila L., Stan G., Funaru M., Obreja C., Andrioaia D., *AUTOMATIC PALLET CHANGER MECHANISM USED ON MACHINING CENTRES*, in Journal of Engineering Studies and Research, No. 1, Volume 19 (2013)

8. Ringraziamenti

Vorrei ringraziare per prima la Professoressa Atzeni Eleonora sia per la possibilità di preparare la tesi di laurea sia per la preparazione data nei corsi da lei tenuti; è stata inoltre di prezioso aiuto durante l'intera stesura del presente elaborato.

Secondariamente sono immensamente grato alla Mecof S.r.l. e a tutti coloro che mi hanno aiutato e durante l'intero periodo di permanenza, non solo per la stesura della tesi, ma anche per aver reso di grande semplicità il primo approccio con un ambiente lavorativo. In particolare, sono estremamente grato di tutte le persone presenti nell'ufficio tecnico, sia per i consigli e confronti di lavoro sia per le molte risate fatte durante i momenti di pausa; per questo motivo non mi sembra corretto citarne solo alcuni di loro.

Ci tengo tanto a ringraziare la mia famiglia, che mi ha sempre dato un grande supporto durante questi anni di università, sia nei periodi più semplici che in quelli di difficoltà. In particolare, mi sento di ringraziare i miei nonni per tutte le chiamate fatte per sapere l'esito degli esami, o anche solo le mie sensazioni. Una menzione se la merita anche mia sorella Francesca per tutte le volte che è stata presente quando probabilmente chiunque altro si sarebbe allontanato. Dank u wel Franci. Per ultimi, ma sicuramente non per importanza, mi sento di ricordare i miei genitori per tutte le attenzioni, i consigli e gli aiuti in questi anni, oltre che per tutte le risate fatte insieme.

Vorrei ringraziare tutti gli amici che sono stati presenti al mio fianco in questi anni; ricordo Bonvi, Cape, Ale, Gianca e mio cugino Dale per il sostegno datomi nei momenti difficili di questi anni, rivelandosi dei veri e propri fratelli. Inoltre, mi sento di citare Richi, Tisco, Patu, Soni, Favone e Grellone per le tutte le serate passate in compagnia a ridere e scherzare. Vorrei anche dare un grandissimo ringraziamento a tutte le bellissime persone conosciute in questi anni universitari a Torino e i momenti passati insieme, partendo da Alex e i nostri pranzi al KFC (oltre che alle innumerevoli risate fatte in tutti questi anni) e passando per Mattia, Giovanni, Marta, Stefano, Gabri e Margherita per un anno davvero speciale. Infine, una menzione speciale la meritano Giacomo e Matteo e tutte le risate, gli scherzi e le cavolate fatte insieme che hanno reso più leggere le giornate all'università, oltre ai tanti momenti passati in aula studio.

Non mi resta che ringraziare la persona che più di tutte mi è stata vicina in questi anni, spronandomi a dare il meglio di me in ogni momento e in ogni occasione che si è presentata negli ultimi anni. Non riesco ad immaginare una sola giornata passata senza leggere un suo messaggio, senza sentire la sua voce in una pausa durante la giornata lavorativa, senza poterla abbracciare dopo una giornata faticosa. Sono alla fine di un percorso e sento che con lei ne inizierà un altro, probabilmente pieno di insidie e difficoltà; ma saranno proprio questi momenti che, sono sicuro, mi permetteranno di apprezzare sempre di più la splendida persona che ho il piacere di avere al mio fianco. Difficilmente potrò esprimere tutto quello che provo per lei e ogni parola sarebbe limitante. Non posso però che ringraziarla per tutto quello che ha fatto per me, con la speranza di poterle dare nel futuro almeno tanto quanto lei ha fatto per me in questi ultimi anni.

Ti amo Didi