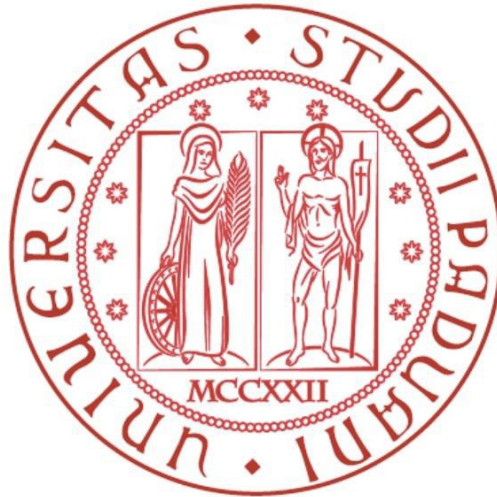


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di laurea in Ingegneria Meccatronica



Flexible Manufacturing Systems: principi per il
dimensionamento delle celle robotizzate.

Relatore: Prof. Ilenia Zennaro

Laureando: Vanessa Giro

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

Sommario.....	5
Capitolo 1: Ottimizzazione di processo tramite Flexible Manufacturing Systems	7
1. Introduzione ai Flexible Manufacturing Systems.....	7
1.1 Cenni Storici.....	7
1.2 Collocazione FMS nel Diagramma P-Q.....	8
1.3 Caratteristiche FMS.....	10
1.4 Vantaggi e Svantaggi.....	14
1.5 Applicazioni industriali degli FMS.....	15
Capitolo 2: Design di FMS: dalle problematiche alla progettazione.....	19
2. Introduzione alla progettazione di FMS.....	19
2.1 Motivazione della scelta di investimento delle macchina CNC.....	20
2.2 Le problematiche delle attrezzature e del layout	22
2.3 La progettazione del layout	23
2.4 Principale tipologia di layout per FMS.....	25
Capitolo 3: La cella robotica: il controllo alla base del robot.....	27
3. Introduzione al robot negli FMS.....	27
3.1 I livelli di controllo della cella robotica.....	28
3.2 Il Livello di Controllo Strategico.....	30
3.3 Sistemi Esperti di Livello di Controllo Strategico (SCLES): caratteristiche.....	32
3.4 Architettura di un sistema esperto ed analisi dei componenti.....	33
Capitolo 4: Scheduling di un sistema FMS.....	35
4.1 Lo scheduling.....	35
4.2 Applicazione.....	38
4.2.1 Scheduling tramite metodologia FIFO.....	40
4.2.2 Scheduling tramite metodologia SRPT.....	42
4.2.3 Scheduling tramite metodologia EDD.....	45
Capitolo 5: Conclusioni.....	49
Referenze	
Bibliografiche.....	53
Indice	
Figure.....	55
Indice	
Tabelle.....	57

SOMMARIO

Il lavoro di tesi presente nelle seguenti pagine si inserisce nel contesto della gestione delle celle flessibili e Flexible Manufacturing System.

Al giorno d'oggi la domanda di mercato richiede una rapida risposta alla clientela. Per soddisfare tali caratteristiche, una soluzione può essere ricorrere a una produzione ridotta, offrente, tuttavia, costi bassi e una elevata variabilità di prodotto. Per sopperire a tale evenienza, in ambito industriale si può ricorrere all'aiuto di un robot e a celle flessibili di produzione.

L'obiettivo della seguente tesi è illustrare un approfondimento del sistema di produzione flessibile (Flexible Manufacturing System), a cui verrà associato un'analisi della cella robotica, del suo funzionamento, e un'analisi di un problema di scheduling tramite FMS. Il presente studio verrà suddiviso in 4 capitoli, a cui seguirà un ulteriore capitolo conclusivo.

Nel capitolo 1 verranno introdotti i Flexible Manufacturing Systems. Seguirà una descrizione della loro struttura, delle caratteristiche, del loro impiego, dei settori in cui vengono maggiormente utilizzati, dei vantaggi e svantaggi.

Nel capitolo 2 si affronterà la tematica del design di un sistema di produzione flessibile. Seguirà lo studio della problematica della scelta delle macchine a controllo numerico, arrivando a definire la disposizione dei macchinari e delle attrezzature per ottenere un layout ottimale.

Il capitolo 3 è finalizzato allo studio della cella robotica. Ne verrà fornita un'illustrazione e ci si focalizzerà sul controllo alla base del robot per analizzarne i movimenti.

Il capitolo 4 analizzerà un problema di scheduling, confrontando tre diverse metodologie per stabilire quale macchinario stia performando in modo migliore in ciascun caso: FIFO (First In First Out), SRPT (Shortest Remaining Processing Time) e EDD (Earliest Due Date). Lo studio verrà affrontato tramite fogli excel, dove verranno illustrati i sequenziamenti dei pezzi, a cui seguiranno grafici e tabelle per verificare l'utilizzo di ciascun macchinario e della cella complessiva in ciascuna metodologia in un primo caso, e infine confrontando i risultati delle tre casistiche presentate. Si osserverà come ogni metodologia presenti benefici e criticità specifiche.

1

OTTIMIZZAZIONE DI PROCESSO TRAMITE FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

1. Introduzione ai Flexible Manufacturing Systems

Un Sistema di Produzione Flessibile (Flexible Manufacturing System) è un sistema di produzione computerizzato, costituito da dispositivi automatizzati e da macchine operatrici a controllo numerico (*Numerically Controlled Machines*), servite da sistemi automatici di movimentazione dei pezzi, semilavorati o grezzi, e comprendenti diverse stazioni di lavoro (centri di tornatura, fresatura...)

L'obiettivo degli FMS è massimizzare la produzione mantenendo un'elevata flessibilità, ed apportarne un miglioramento in termini di qualità e produzione stessa.

1.1.Cenni storici

All'inizio del XX secolo, i Flexible Manufacturing Systems non esistevano ancora. Non era necessario una pressione sull'efficienza di prodotto poiché non c'era alcuna competizione estera. Il potere era in mano ai manifatturieri e i clienti non avevano largo margine di scelta in termine di acquisti.

La prima svolta avvenne dopo la fine della Seconda Guerra Mondiale: per sopperire ai danni, ogni nazione colpita aprì le porte ai confini esteri, per favorire la circolazione del mercato, e alle nuove competizioni tra paesi confinanti e grazie alla scoperta di nuovi materiali che favorirono le tecniche e la qualità di produzione.

La focalizzazione sul mercato si spostò dai manifatturieri ai clienti, che per la prima volta possedevano più libertà di scelta.

La nascita degli FMS risale agli anni '60, decennio in cui si è introdotto il centro di lavoro a controllo numerico.

Infatti, il primo FMS venne brevettato nel 1965 da Theo Williamson, che inventò il macchinario a controllo numerico.

I vantaggi del centro di lavoro inizialmente erano la flessibilità e l'affidabilità, ma presentava uno svantaggio in particolare, ovvero la poca efficienza. Esso risultava insuperabile come flessibilità, ma utilizzava solamente un singolo utensile per eseguire le lavorazioni. Di conseguenza la produttività finale era molto limitata.

Alla fine degli anni '70, a causa dello sviluppo della tecnologia sempre più in crescita, divenne molto forte la richiesta di un sistema che comprendesse sia un'alta flessibilità sia un'alta produttività.

Il cambiamento di produzione è stato dovuto principalmente a due fattori chiave:

- la crescita della competizione internazionale tra paesi;
- la necessità di ridurre il costo e il tempo di ciclo di produzione.

Da qui nacquero i Flexible Manufacturing Systems, sistemi che presentavano diverse prestazioni, quali:

- la capacità di produrre diverse tipologie di prodotti;
- la capacità di adattarsi velocemente ai cambiamenti di produzione.

1.2 Collocazione FMS nel Diagramma P-Q

Stabilire simultaneamente la posizione di decine di entità (come macchine, attrezzature, materiali, utensili, impianti tecnologici, impianti di servizio, persone e risorse) rappresenta uno dei problemi più complessi nel campo della logistica e della produzione. Per riuscire ad ottenere il seguente obiettivo, classifichiamo le principali tipologie di layout. Si tratta della nota **analisi PQ (product-quantity)**, che classifica i prodotti, ovvero le varietà (*variety*) di prodotto. Queste sono riportate sull'asse delle ascisse secondo valori decrescenti del volume produttivo realizzato in un orizzonte temporale storico selezionato (spesso corrispondente a un anno).

La **lista delle tipologie di layout** è la seguente:

1. product layout, ovvero "layout per prodotto" (zona 1). Si caratterizza per **bassa varietà**, spesso riconducibile ad un singolo prodotto, realizzato in **grandi volumi giornalieri**, tali da giustificare un **layout dedicato**, tipico della **produzione di massa in linea**. La

disposizione delle macchine e attrezzature è definita dal ciclo di fabbricazione del prodotto realizzato, ovvero dalla sequenza delle singole lavorazioni;

2. **process layout**, ovvero layout “per processo”, o “**per reparti**” (zona 2). Si caratterizza per una **grande varietà di prodotti e volumi medio-bassi**. La disposizione delle macchine e attrezzature segue il criterio tecnologico: le risorse della stessa tipologia sono raggruppate in un unico reparto e i vari prodotti transitano da un reparto all’altro nel rispetto del loro ciclo di fabbricazione;

3. **product family layout**, ovvero layout multi-cellulare (zona 3). I volumi produttivi di una discreta molteplicità di prodotti (siamo nell’area intermedia del diagramma riportato in Figura 1) non giustificano linee dedicate (layout per prodotto), ma non sono neppure così esigui da richiedere necessariamente un processamento per reparti, ciascuno caratterizzato da un’omogenea tecnologia. Il **raggruppare prodotti differenti ma simili** in gruppi relativamente omogenei offre al prodotto l’opportunità di essere processato da **celle produttive** composte da macchine ed attrezzature differenti **limitando i flussi intercellulari** ed innalzando quelli intracellulari. I primi sono tipici della soluzione “per reparti” e rappresentano il maggior limite perché causano congestioni tra i flussi di materiale. **I Flexible Manufacturing Systems rientrano in tale configurazione.**

4. **fixed layout**, ovvero layout “a punto fisso” (zona 4). La produzione di una singola unità di prodotto può giustificare macchine, attrezzature e risorse in genere si muovano verso quel prodotto per l’**esecuzione del ciclo e programma di lavoro**. Si tratta della soluzione tipica di layout adottata nei cantieri edili, civili, navali, etc.;

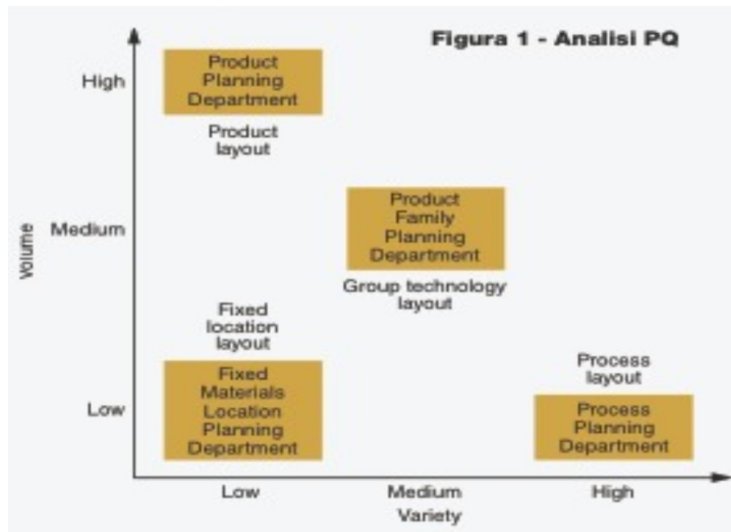


Figura 1: Diagramma P-Q

1.3 Caratteristiche di un FMS

Un sistema di produzione flessibile si differenzia da un qualsiasi altro siste

ma di produzione grazie alla presenza di specifici fattori.

In primo luogo, un FMS è costituito di 3 componenti principali:

- una serie di macchine utensili.
- un sistema di movimentazione dei materiali.
- un computer industriale che controlla il percorso di lavorazione di un prodotto.

La presenza di questi tre fattori consente di denominare un sistema di produzione un vero e proprio FMS.

Un sistema di produzione flessibile può presentare, in aggiunta, dei componenti secondari:

- processo tecnologico basato sul sistema di controllo numerico.
- sistemi di bloccaggio o fissaggio per le attrezzature.
- gestioni delle operazioni.

In secondo luogo, la definizione di FMS è basata anche sulla capacità di lavorare famiglie di prodotti.

Per individuare la famiglia di prodotti simili all'interno del mix produttivo aziendale, si applica la **Group Technology**: l'obiettivo è contemperare i vantaggi della zona 1 (l'elevata produttività) con quelli della zona 2 (elevata flessibilità).

Di conseguenza, si cerca di raggruppare i prodotti in base a caratteristiche comuni (forma, dimensioni) e al ciclo di fabbricazione (ciclo di produzione e attrezzature coinvolte nel processo).

Soltanto nella casistica in cui si riesce a ridurre la varietà di prodotti finiti, evitando di standardizzarli troppo, si ottiene la cella flessibile di produzione.

Struttura di un Flexible Manufacturing System.

I componenti fondamentali che costituiscono un sistema di produzione flessibile sono:

- macchine operatrici CC o CNC (comprendenti macchine singole o identiche in parallelo, speciali, di lavaggio), collegate tra loro in sequenza, permettono le lavorazioni dei pezzi; spesso le più utilizzate sono le macchine CNC, in quanto le funzioni di tali macchine vengono già prestabilite da specifici software (CAD, CAM, CNC). Queste caratteristiche le rendono ottime per eseguire lavorazioni che richiedono tempi molto lunghi, ma impediscono alla macchina di interagire con l'ambiente esterno in caso di collisioni. Per questo devono essere controllate da un operatore.
- stazioni di carico e scarico: rappresentano il punto di ingresso e uscita del pezzo dal sistema. Le stazioni possono essere coincidenti o separate, e le operazioni di carico e scarico normalmente non sono automatizzate.
- pallet portapezzo: vengono movimentati e trasportati da una stazione all'altra tramite carrelli automatici o robot.
- stoccaggio locale utensili: si tratta di un magazzino automatizzato, gestito da un computer e collegato con una base di dati: questo permette di rendere disponibile, in tempo reale, informazioni su ogni unità stoccata.
- buffers: si tratta di un deposito temporaneo di materiale in corso di lavorazione che limita i fenomeni di *blocking* e *starving*.

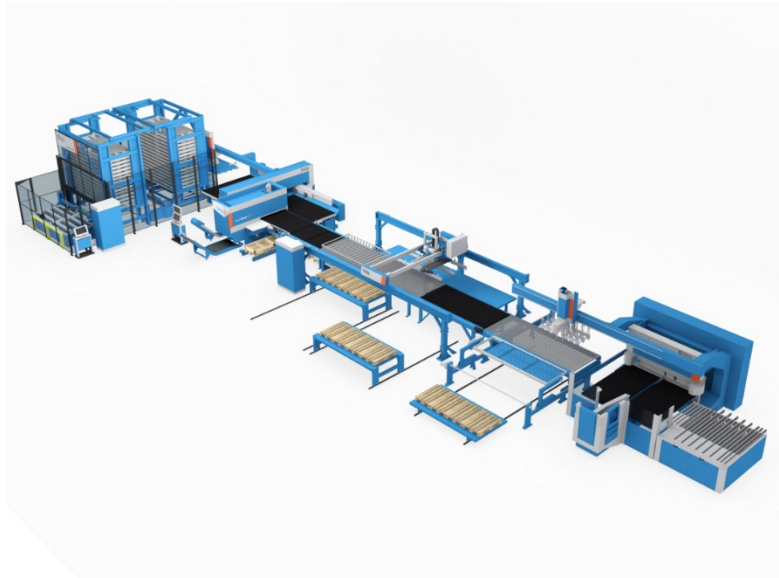


Figura 2: Rappresentazione di un FMS

Tipologie strutturali di pallet portapezzo.

In generale vengono utilizzate due tipologie di pallet portapezzo: un pallet di tipo universale e un pallet dedicato.

Il pallet di tipo universale può essere adeguato a uno specifico pezzo con attrezzature mobili e fisse.

Il pallet di tipo dedicato è, invece, impiegato nel singolo pezzo e ottimizzato nella geometria per facilitarne l'impiego nella fase di bloccaggio o sbloccaggio.

La scelta tra i due tipi di pallet dipende dalla numerosità dei pezzi e dal numero di lavorazioni da eseguire.

Al giorno d'oggi vengono sfruttate tecnologie molto sofisticate per la produzione dei pallet, in tempi ridotti e con costi bassi e contenuti.

Negli ultimi anni, il mercato tende a preferire tipologie di pallet dedicati. Questo è conseguenza della crescita continua degli investimenti nelle macchine operatrici, che portano all'aumento del costo orario.

Stoccaggio locale utensili.

Gli FMS presentano una necessità legata alla sostituzione rapida degli utensili durante i vari cicli di lavoro.

Gli utensili sono allocati all'interno di magazzini disposti all'interno della macchina operatrice.

Il sistema di immagazzinamento automatizzato consente di ottenere vantaggi in termini di riduzione del lavoro umano, dell'occupazione dello spazio disponibile e dell'entità delle scorte.

Tali magazzini possono presentarsi in due diverse configurazioni:

- in configurazione a catena: il presente schema richiede la sostituzione di singoli utensili o di un numero elevato di questi;
- in configurazione a "rack": richiede, invece, la sostituzione dell'intero sistema di utensili.

Logiche di controllo

Il controllo di una macchina operatrice segue uno schema gerarchico suddiviso in diversi stadi in ordine crescente. Sono presenti generalmente quattro livelli di controllo:

1° livello: controllo locale del mezzo produttivo.

Normalmente tale controllo è guidato da un computer industriale o da un PLC (Programmable Logic Controller), installato nei centri di lavoro o nei sistemi di movimentazione. Adibiti al controllo della funzionalità.

2° livello: controllo della cella e del sistema di movimentazione dei pezzi.

Tale livello è gestito nuovamente da un computer o da un PLC, che è finalizzato a gestire le risorse ausiliarie destinate ai mezzi produttivi, quali:

- mezzi di movimentazione dei pezzi;
- stazioni di carico/ scarico;
- possibili stazioni di lavaggio;

3° livello: DNC (Direct Numerical Control)

Tale sistema è costituito da una base hardware e da una serie di moduli di software, che comprendono precise funzioni:

- "monitoring": consente di rilevare in tempo reale le prestazioni dell'impianto;
- "dispatching": schedulazione delle lavorazioni sulle differenti macchine;
- simulazione : effettua una valutazione del funzionamento prima di effettuare un'operazione di run;
- gestione utensili;
- gestione delle macchine di misura (se presenti);

- test ed “editing” del “part program” delle macchine CNC.

Quindi, tale livello è finalizzato all’ottimizzazione della gestione del FMS in tempo reale.

4° livello: CIM (Computer Integrated Manufacturing)

Tale livello prevede l’integrazione del DNC e dell’FMS con il sistema informativo aziendale.

L’obiettivo è la gestione delle attività aziendali, dall’organizzazione produttiva alla gestione dei magazzini, degli approvvigionamenti, alla programmazione della manutenzione.

1.4 Vantaggi e Svantaggi

L’introduzione degli FMS nel mercato e nel mondo del lavoro ha portato a numerosi vantaggi.

In primo luogo, si ha ottenuto una flessibilità maggiore per modificare l’output produttivo. In questo modo risulta più facile rispondere alle richieste del mercato in continua crescita.

Altri vantaggi sono la riduzione dei costi di manodopera diretta e indiretta, grazie all’ampio lavoro svolto dai robot, la riduzione di attrezzature ed utensili (detti *tools*) e dei tempi di produzione. Infatti, la capacità di adattarsi ai cambiamenti aiuta a prevenire i difetti di produzione, lo spreco di tempo e delle risorse.

La riduzione dello spazio di layout occupato è un altro beneficio apportato dalle celle di produzione flessibili. Grazie all’alto utilizzo delle attrezzature presenti, un FMS può completare lo stesso carico di lavoro con meno attrezzature rispetto ad altri sistemi di produzione.

Un sistema di produzione flessibile è preferibile a un sistema di produzione tradizionale grazie a una serie di vantaggi legati al tempo macchina.

Infatti, un sistema di lavorazione tradizionale spende molto più tempo macchina rispetto a un FMS: si passa da un 50% di consumo solo per i macchinari, in assenza di pezzi da lavorare, a un 30% speso nella casistica in cui il pezzo viene processato.

Nel caso peggiore, il consumo passa a un 70% se il pezzo è fermo all’interno dei macchinari, senza essere lavorato. Il tempo di esecuzione, sia che il pezzo si sposti da una stazione all’altra sia nel caso si trovi in attesa di essere movimentato, è pari al 95%.

In termini di consumi, quindi, un sistema tradizionale spende molto tempo macchina, anche se l'intero sistema è fermo.

I sistemi di produzione flessibili consentono di sopperire a tali inconvenienti.

Per quanto concerne il tempo macchina, il tempo speso passa da un 5% in assenza di pezzi (nel caso peggiore, tale valore aumenta al 35%, percentuale più bassa rispetto al sistema tradizionale), al 95% per lavorare i pezzi nelle diverse stazioni.

Se il pezzo è fermo in una stazione senza subire processi di lavorazione, il tempo macchina speso è pari al 7% (nel caso peggiore, tale cifra sale al 35%, drasticamente minore rispetto al 70% del sistema tradizionale). Il tempo di esecuzione rimane a circa 85%.

Valori di consumi ridotti apportano un miglioramento in termini di qualità e rapida risposta al mercato.

Tutti questi benefici portano a un miglioramento della qualità della produzione.

Nonostante i benefici apportati, gli FMS presentano tutt'oggi dei limiti applicativi.

Un primo limite è la focalizzazione di processo: tipicamente, i sistemi di produzione flessibili intervengono per lavorazioni specifiche quali tornitura, fresatura e lavorazione della lamiera.

Un altro svantaggio è la necessità di investimenti elevati. Infatti, se si sceglie di implementare un FMS, i costi iniziali per il collocamento sono piuttosto ingenti a causa della necessità di un design di progettazione molto accurato e dettagliato.

A causa delle problematiche legate alla programmazione dei robot sorgono, inoltre, i costi per i lavoratori dotati di alte capacità di utilizzo dei macchinari e per la manutenzione. I salari per questi dipendenti possono essere molto costosi.

Infine, lo svantaggio più considerevole è il limite di produzione, in quanto la quantità di produzione è ridotta (si limita a piccoli lotti di prodotti).

1.5 Applicazioni industriali degli FMS

Storicamente, la maggior parte delle applicazioni dei sistemi di produzione flessibili riguardava solo operazioni di fresatura e perforazione (non comprendevano parti rotanti nel processo di lavorazione) e venivano impiegate solamente macchine CNC o CN.

Le applicazioni per la tornitura vennero inserite successivamente, e ciò portò a ridurre il numero di macchinari all'interno del sistema di produzione.

Al giorno d'oggi, in ambito lavorativo la richiesta di installazioni di sistemi di produzione flessibile e di isole di lavoro è in forte crescita grazie alle numerose esigenze produttive in ambito meccanico, elettronico ed informatico.

Si considerino ora le isole di lavoro.

Esse non sono propriamente degli FMS, ma rappresentano un passo in avanti nella crescita dell'automazione dei processi produttivi.

Si ricordano le particolari isole di lavoro:

- isola di lavoro VOLVO BN, per la produzione di componenti di macchine adibite per il movimento terra;
- isola di lavoro CATERPILLAR, per la produzione di maglie per mezzi cingolati.

Per quanto riguarda i sistemi di produzione flessibile, essi vengono applicati in diversi settori, quali:

- automazione dei veicoli: per la produzione di componenti per motori, cambi, differenziali di autovetture di alta gamma;
- elettronico, per la produzione di motori in corrente alternata per applicazioni speciali (gruppi elettrogeni, trazione ferroviaria...)
- marina e aerospaziale;

Se ne deduce che la distinzione maggiore nei sistemi di produzione flessibile viene eseguita in funzione dell'ambito di applicazione.

Infatti, la classificazione di un FMS consente di capire dove e in quale ambito può essere collocato per apportare benefici migliori.

Una prima classificazione suddivide gli FMS in tre categorie:

1. FMS dedicati.
2. FMS sequenziali
3. Celle di produzione.

Le tre categorie si differenziano in base al numero di pezzi per famiglia di prodotto e alla quantità media dei lotti finiti. La flessibilità, invece, è media in tutti i casi.

Un FMS dedicato racchiude un massimo di dieci pezzi in una famiglia di prodotti e produce un'elevata quantità di lotti (dai 1000 ai 10000); una cella di produzione, invece, comprende fino a un massimo di 500 pezzi per famiglia di prodotti e produce fino a un massimo di 500 lotti.

Date le diverse casistiche, si può dedurre che un FMS può essere installato se:

- la dimensione di un pezzo eccede i valori standard prefissati.
- il volume di produzione eccede il numero di lotti finali prefissati.
- sono richieste più di cinque stazioni di lavoro.

Più richieste si desiderano soddisfare, maggiore è la necessità di trasformare un sistema di produzione tradizionale in un FMS.

Un esempio di applicazioni di FMS riguarda l'azienda statunitense Prince.

Tale azienda, fondata nel 1959 a Chicago in Illinois, dal 1997 ha sede anche Carol Stream e a Shangai ed è specializzata nella produzione di componenti di macchinari, assemblaggi, valvole idrauliche, finalizzati ad aumentare la produzione e la qualità dei prodotti finiti.

Recentemente, l'azienda ha sfruttato un sistema di produzione flessibile per ridurre i tempi di setup, per standardizzare i processi produttivi per esportare velocemente nel mercato i prodotti finali.

Il sistema di produzione flessibili è stato costituito da un macchinario modulare, dotato di 161 stazioni pallet, due centri di lavoro orizzontali dotato di un sistema automatico per il cambio delle attrezzature, due centri di lavoro per lavorazione su ghisa e uno verticale adatto a un'operazione di doppio cambio pallet.

L'installazione del sistema flessibile ha apportato un'efficienza del 95% e una riduzione del tempo ciclo da 20 al 30%.



Figura 3: FMS dell'azienda Prince

L'installazione di un robot al centro del sistema di produzione flessibile è sempre più all'avanguardia. Infatti, permette di conferire maggiori flessibilità all'intero sistema, riducendo allo stretto necessario la manodopera e i costi associati.

Un altro esempio di installazioni di FMS riguarda l'azienda tedesca KUKA, specializzata nella produzione di robot industriali.

Nel 2017, l'azienda ha installato presso l'azienda danese Multicut il robot più grande mai realizzato, a supporto di un sistema di produzione flessibile comprendente quattro centri di lavoro a controllo numerico.



Figura 4: Robot KUKA nell'FMS di Multicut

2

DESIGN E PROGETTAZIONE DI SISTEMI FMS

2. Introduzione alla progettazione di FMS

Un sistema di produzione flessibile, come affermato precedentemente, è dotato di tre componenti principali che permettono di distinguerlo da un qualsiasi altro sistema di produzione: un computer industriale, un sistema di movimentazione del materiale raggruppante le diverse stazioni di lavoro, e macchine utensili e operatrici CC o CNC.

L'investimento delle macchine CNC, nonostante i benefici che apportano in termini di riduzione del tempo di lavorazione di un pezzo in una determinata stazione, costituisce un problema. Infatti, le selezioni dei pezzi da processare e le operazioni da svolgere all'interno del CNC devono essere giustificate dall'*Economic Justification Method*.

Si tratta di un metodo che possiede il fine ultimo di spiegare la motivazione dietro alla necessità di installare una macchina CNC per migliorare i processi produttivi annessi all'automazione.

L'Economic Justification Method, nel caso di investimenti di macchine CNC, viene posto come un problema "*part-operation allocation*", ovvero consiste nel capire come e dove allocare i pezzi durante le lavorazioni associate all'interno di un FMS. Tale problema viene affrontato e spiegato tramite il modello di giustificazione di Bokhorst, Slomp e Suresh (2002), che prevede due stadi di analisi: in primo luogo, vengono fornite le caratteristiche di una macchina CNC, mentre in secondo luogo viene spiegata la motivazione dietro alla scelta di investire le macchine CNC per il sistema. La scelta ricade principalmente sulla disponibilità dei macchinari già presenti, sulle richieste di

nuovi prodotti e sui costi operativi e del capitale. Inoltre, in condizioni ottime, l'installazione di macchine CNC permette di migliorare la qualità, l'efficienza e la flessibilità.

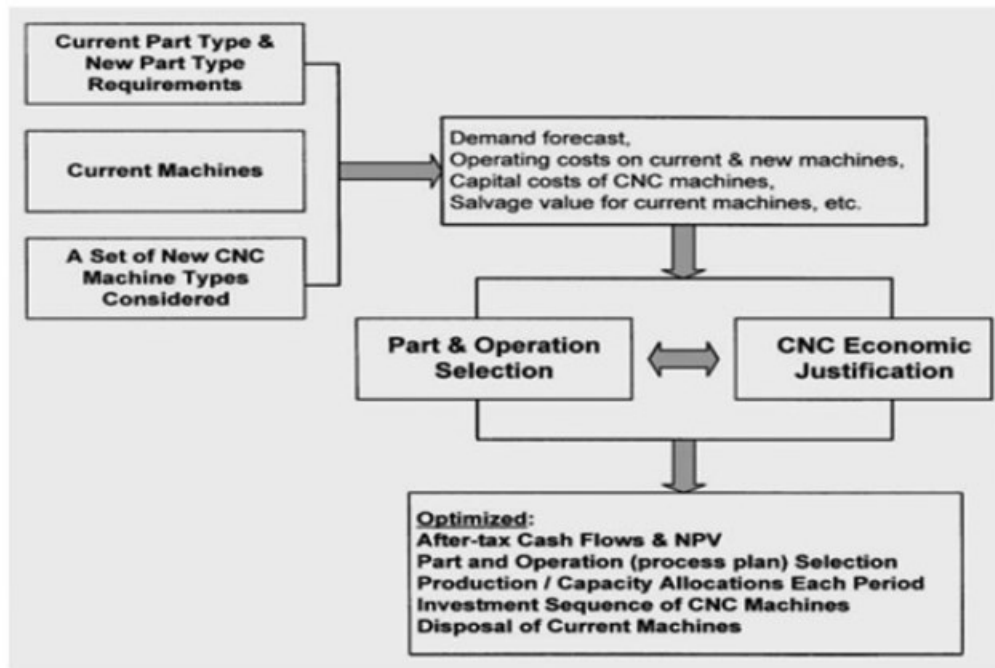


Figura 5: Metodo di Giustificazione di Bokhorst, Slomp e Suresh (2002)

2.1 Motivazione della scelta di investimento delle macchine CNC

Le macchine CNC possiedono un ruolo centrale in un FMS: grazie a un dispositivo elettronico contenuto al loro interno, sono in grado di comandare i movimenti e di svolgere lavorazioni ad alta precisione per tempi prolungati seguendo un determinato schema di lavoro. Di conseguenza, se una macchina CNC lavora correttamente e viene controllata da un operatore in caso di collisioni o interventi necessari, può migliorare la produzione totale del sistema. Esempi di macchinari CNC sono: tornio, fresatrice, rettificatrice, pressa, saldatrice...

La macchina CNC è caratterizzata da funzioni fondamentali, che producono un impatto positivo sulla produzione finale. È controllata da un computer. I movimenti e le funzioni vengono prestabiliti attraverso specifici software (da qui CNC, ovvero “controllo numerico computerizzato”) e la macchina li conserva in memoria. In questo modo, consente un trasporto dei pezzi automatizzato. L'intervento dell'operatore si riduce alla

sola predisposizione iniziale dei pezzi e alla supervisione. Tali funzionalità producono un miglioramento su diversi aspetti della produzione, quali: riduzione dei tempi di processo, dei tempi di setup, dei tempi di throughput; forniscono una maggiore accuratezza, minori costi operativi e dimensioni ridotte dei lotti prodotti.

Alla base dell'installazione di tali macchine, innanzitutto, si analizza quale pezzo produrre (parzialmente o totalmente), in quale quantità e in quanto tempo. Dopo aver stabilito il pezzo da processare, si scelgono due possibilità:

- si decide di quali delle già presenti macchine servirsi per la produzione. Quindi si sceglie di lavorare i pezzi con macchinari già in atto.
- in alternativa, si decide se introdurre nuove macchine CNC e in quale momento utilizzarle nel processo. In questo caso si sceglie di investire per questi macchinari.

L'ipotesi di sfruttare già in vigore viene stata scartata. Infatti, l'installazione di nuove macchine CNC assicura la flessibilità, la rapidità delle risposte al mercato e la sopravvivenza di piccole e medie imprese. Tuttavia, è importante sottolineare i costi aggiuntivi per l'investimento e costi operativi sulle macchine in vigore, su quelle nuove e il loro valore di recupero.

A seguito delle motivazioni fornite dell'investimento di tali macchine, se il problema pezzo-assegnazione viene approvato dall' Economic Justification è possibile procedere con l'investimento per ottimizzare il processo produttivo, che comprende le seguenti condizioni:

- selezioni dei pezzi e delle lavorazioni (*process plan*).
- assegnazioni produzione/quantità per ogni periodo di processo.
- sequenza di installazione delle macchine CNC.
- cessione dei macchinari non adibiti alla produzione.

La corretta disposizione della sequenza dei macchinari e macchine CNC per la scelta delle lavorazioni e delle attrezzature per un determinato pezzo definisce il layout di un sistema.

2.2 Le problematiche delle attrezzature e del layout

Un sistema di produzione flessibile raggruppa tre sistemi principali: il sistema di fabbricazione, di lavorazione e di assemblaggio. Vengono integrate componenti aggiuntive, quali un sistema di stoccaggio automatizzato e un sistema di progettazione assistito da un computer, che interagiscono con i sistemi principali dell’FMS.

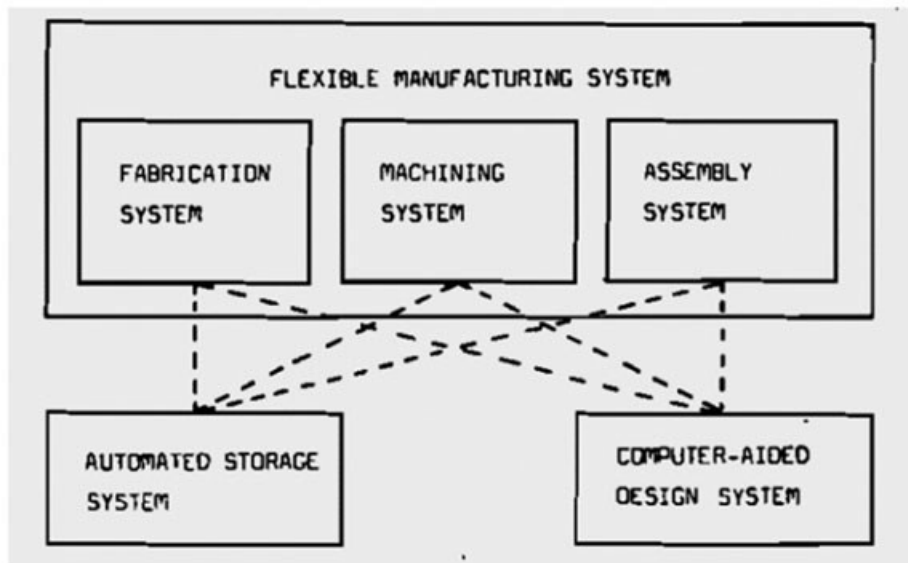


Figura 6: Sistemi che costituiscono un FMS (Anupma Yadav & S.C. Jayswal (2018) Modelling of flexible manufacturing system: a review,)

Il primo sistema, in ordine di sequenza, è quello di fabbricazione, che viene attuato tramite la Group Technology. Le famiglie di prodotto vengono allocate nelle celle di fabbricazione specifiche attraverso l'identificazione, le caratteristiche e il raggruppamento di pezzi, dotati di similitudini morfologiche o tecnologiche, e in base alla capacità tecnologica per processare la famiglia di prodotti in corso.

Successivamente, segue il sistema di lavorazione. Vi vengono selezionati i vari macchinari adibiti alla produzione dei pezzi con le rispettive lavorazioni da attuare in sequenza.

Infine, l'ultimo sistema è quello di assemblaggio. Viene realizzato tramite una serie di operazioni di inserzione e unione dei pezzi. Si tratta di un processo che non richiede

trasformazioni particolari, in quanto i pezzi che vi prendono parte sono già lavorati e finiti.

Lo sviluppo del design di un FMS deve soddisfare diversi obiettivi legati alla produzione, quali la garanzia di un buon bilanciamento delle linee di produzione, della flessibilità ed elasticità, ridurre il costo di trasporto del materiale, ridurre al minimo le scorte di produzione, evitare la congestione di materiale e sfruttare lo spazio disponibile nel modo più efficace.

Tuttavia, persistono delle specifiche problematiche da risolvere per garantire l'ottimizzazione della produzione e lo sfruttamento totale del sistema flessibile.

In primo luogo, la prima problematica riguarda la scelta delle **attrezzature**.

Quando ci si riferisce alle attrezzature di un sistema di produzione flessibile, si intende valutare: il numero di robot coinvolti nel processo di lavorazione e ciascun task che svolge, i numeri di macchinari da servire, e i *tools*, ovvero le attrezzature che intervengono per il trasporto del materiale o dei pezzi.

La seconda problematica riguarda il **layout** dell'FMS. Con il termine *layout* si indica la disposizione planimetrica di tutte le risorse necessarie allo svolgimento delle lavorazioni. Pertanto, è fondamentale comprendere la progettazione e il posizionamento degli spazi, dei macchinari e degli impianti allocati coerentemente con il sistema produttivo che si desidera attuare. Lo studio del layout viene applicato per diverse motivazioni, quali la riprogettazione totale o parziale del prodotto, a causa dell'obsolescenza delle attrezzature, per necessità di ridurre i costi, per ampliare un impianto già esistente, per la variazione della domanda di mercato. Inoltre, consente di facilitare lo scorrimento del flusso produttivo, quindi devono essere considerati anche spazi aggiuntivi per le attività di supporto alla produzione (bufferizzazione di carico/scarico, gestione delle attrezzature per setup o manutenzione).

2.3 La progettazione del layout

La progettazione di un layout di un sistema di produzione flessibile si colloca in un orizzonte temporale medio-lungo.

Il progetto del layout è determinato da quattro fasi principali:

- 1) Ubicazione: consiste nel determinare l'allocazione topografica dello stabilimento;
- 2) Layout generale: consiste nell'improntare una prima disposizione dei macchinari, dei magazzini, degli uffici, e dei reparti produttivi coinvolti nella produzione;
- 3) Layout dettagliato: è la determinazione delle risorse coinvolte (ovvero, le attrezzature, quali numero macchinari, operatori...), dei punti di sosta dei materiali e della disposizione degli operatori a supporto del sistema;
- 4) Installazione: è la valutazione delle possibili alternative di layout, a cui segue l'installazione degli impianti.

La seconda e la terza fase, a seconda delle esigenze, possono essere stimate tramite la determinazione degli spazi da assegnare ad ogni attività di produzione, che permettono di minimizzare i tempi di trasporto da una stazione all'altra e di identificare tutte le attrezzature coinvolte.

Quattro metodologie in funzione dell'investimento richiesto, del tempo totale a disposizione e del grado di precisione che si desidera ottenere sono presentate per stimare il layout ottimale:

1. Il primo metodo è il *metodo dei calcoli diretti*. Esso consiste nel determinare il numero di attrezzature e macchinari necessari alla produzione richiesta, ciascuna area occupata fisicamente, il numero di operatori per ciascun macchinario e il rispettivo spazio a disposizione, l'area richiesta per la manutenzione e per il deposito interoperazionale dei materiali.
2. Seguendo il *metodo degli spazi standard*, si sceglie di ricorrere a spazi standard dettati dalla pratica industriale. Ne possono essere aggiunti ulteriori fissati sulla base di applicazioni passate che hanno riscontrato un esito positivo.
3. Attraverso il *metodo del layout schematico* si procede con la disposizione dei vari macchinari e delle varie attrezzature all'interno dello spazio disponibile utilizzando opportune sagomature.

4. Il *metodo delle conversioni* mira ad attuare, invece, una modifica del layout già stabilito. Consiste, quindi, nel convertire le esigenze dello spazio della situazione in atto con esigenze di spazio prevedibili per il futuro. Tale metodologia viene applicata solamente nel caso di riprogettazione del layout, a partire da uno già esistente.

La disposizione corretta dei macchinari deve, inoltre, soddisfare diversi criteri, quali la massimizzazione della produzione, la minimizzazione del ritardo massimo delle macchine e dei costi di trasporto del pezzo da una stazione all'altra. Di conseguenza, il layout ideale è quello che minimizza anche il tempo per trasportare il pezzo, ovvero che è costituito da un breve percorso tra un macchinario all'altro, in relazione alla disposizione e all'intensità dei flussi:

Tempo per minimizzare il trasporto = $\text{distanza tra i due macchinari [m]} / \text{velocità di trasporto del pezzo [m/s]}$

2.4 Principale tipologia di layout per FMS

I sistemi di produzione flessibile rientrano nella configurazione del **layout a celle**, o Group Technology. Le macchine sono disposte in modo da produrre una specifica famiglia di prodotti, che sono accumulati da caratteristiche simili per geometria, forma e processi di lavorazione.

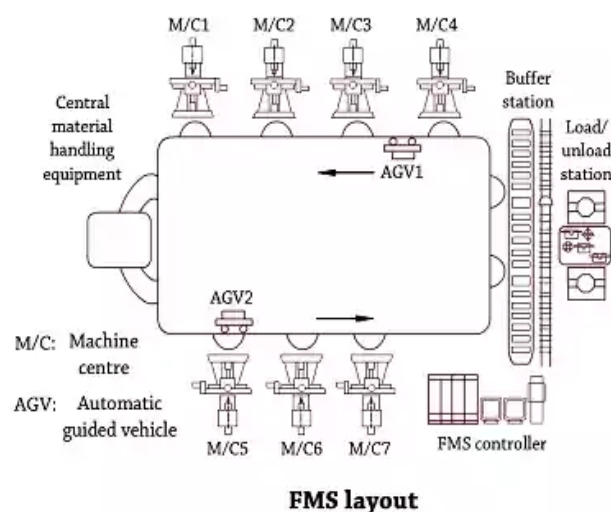


Figura 7: Tipico layout di un FMS

Tramite il layout a celle, il costo dei trasporti tra le stazioni, il work-in-process (WIP) e il lead time di produzione vengono ridotti. Di conseguenza, vengono risolte le principali problematiche legate al design del sistema di produzione flessibile.

Gli FMS dipendono da un principio fondamentale della Group Technology: posizionandosi nella zona 3 del diagramma P-Q sono in grado di produrre una sola famiglia di prodotti o in un volume limitato intermedio.

Tuttavia, raggruppare e identificare tutti i prodotti in base alle caratteristiche proprie è un task notevole e richiede un tempo di analisi dalla media-lunga durata.

3

LA CELLA ROBOTICA: IL CONTROLLO ALLA BASE DEL ROBOT

3. Introduzione al robot negli FMS

Un sistema di produzione flessibile è munito di uno o più robot industriali.

Ogni robot è dotato di un proprio magazzino utensili, ed è in grado di svolgere una serie di lavorazioni in sequenza autonomamente.

Esso, quindi, rappresenta una parte integrante e autonoma per il sistema flessibile.

L'inclusione del robot riscontra numerosi risvolti positivi: grazie all'intervento sui trasporti e sui cicli di lavorazione, vengono ridotti i costi di produzione (ad esempio, il costo della manodopera si restringe in quanto l'operatore è adibito a svolgere mansioni minime o di supporto), e viene assicurata una maggiore precisione lavorativa e flessibilità operativa.

Il vantaggio maggiore consiste nella riduzione del lavoro dell'operatore. Il ruolo se ne riduce alla sola sorveglianza e supervisione, alla manutenzione in caso di guasti, all'approvvigionamento dei materiali e delle attrezzature necessarie, e alla elaborazione e programmazione del robot, ovvero stabilire quali compiti dovrà svolgere autonomamente.

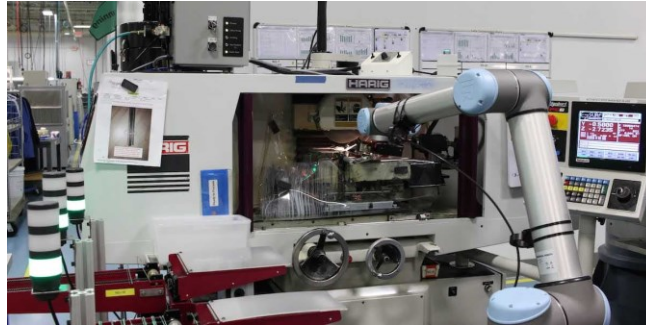


Figura 8: Esempio di cella robotica

3.1 I livelli di controllo della cella robotica

Il controllo del robot è suddiviso in più livelli di controllo, organizzati secondo una struttura gerarchica.

Ogni livello di controllo ha l'obiettivo di interpretare gli input che riceve in ingresso (ovvero dal suo livello logico superiore), analizzarli, e inviare la sequenza di comandi al livello sottostante.

Il livello di controllo più alto, C1, è definito *FMC Control Level*, ovvero *Livello di Controllo della Cella Robotica Flessibile*.

Esso è finalizzato all'analisi delle lavorazioni e dei task di tutti i macchinari che costituiscono la cella robotica, e della loro sincronizzazione, in modo da non fermare i processi di lavorazione sottoposti al controllo.

Esempi di task imposti dal processo possono essere: carico/scarico dei pezzi, fissaggio... Si tratta di task semplici, che in questo livello non richiedono ancora l'intervento del robot.

Il secondo livello di controllo, C2, è regolato e controllato dal robot.

Esso ha il compito di intervenire per adempiere a specifiche mansioni all'interno della cella robotica, quali: afferrare o rilasciare i pezzi, trasportarli da una stazione di lavoro all'altra.

Il livello di controllo viene regolamentato grazie a una serie di comandi che mirano a definire la programmazione del robot, per stabilire quale specifico task deve svolgere.

Il terzo livello di controllo, C3, è il *Strategic Control Level (SCL)*, ovvero *Livello di Controllo Strategico*.

È finalizzato ad elaborare un algoritmo per risolvere i task assegnati al robot nel livello di controllo precedente. Ne definisce, inizialmente, le traiettorie e gli spostamenti all'interno del sistema.

Il livello C4 è il *Tactical Control Level, Livello Tattico di Controllo*.

Viene performato l'algoritmo stabilito nel terzo livello, ovvero si attuano le traiettorie e i movimenti del robot.

L'ultimo livello C5 è l'*Executive Control Level, Livello esecutivo di Controllo*.

L'obiettivo è verificare il funzionamento corretto del robot: se i controlli ai livelli sono stati eseguiti correttamente, il braccio robotico si sposterà presso la posizione desiderata, seguendo la traiettoria e il percorso definito in precedenza.

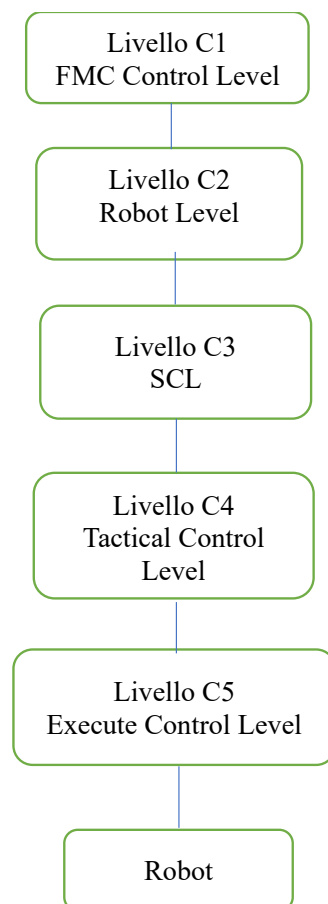


Figura 9: Distribuzione dei livelli di controllo del robot

3.2 Il Livello di Controllo Strategico

Il livello di controllo strategico descrive il percorso che deve seguire il robot per risolvere uno specifico task.

Tale livello è costituito da una serie di blocchi, collegati tra loro, che definiscono i vari step per l'ottimizzazione del percorso dell'algoritmo.

Il primo blocco consiste nell'aggiornamento dei comandi, ovvero vengono revisionate o confermate le informazioni iniziali acquisite dal blocco precedente, in modo da inviarle al successivo blocco.

Il secondo blocco è il più complesso, e racchiude tre principali operazioni da attuare:

- identificare quale tipo di task il robot deve svolgere. L'informazione del tipo di funzione o compito viene acquisita dal blocco precedente.
- stimare il tempo complessivo per completare l'intero task.
- scegliere l'algoritmo adatto a risolvere il task nel tempo disponibile. La scelta dell'algoritmo dipende dal tipo di funzione a cui il robot deve adempiere, quindi dalle caratteristiche specifiche e dallo spazio di lavoro complessivo.

In tale blocco confluiscono ulteriori tre blocchi:

1. *Knowledge base*. Vi vengono raggruppate le informazioni riguardanti il robot: applicazioni, spazio di lavoro disponibile, ambiente circostante, analisi di tutte le attrezzature che potrebbero essere necessarie.
2. *Models and Algorithms*. Vi sono raggruppati gli algoritmi, caratterizzati da precisi parametri che stabiliscono il tempo preciso per risolverne ciascuno e le accelerazioni e velocità di reazione del robot o del suo braccio robotico.
3. *Current World Model*. È uno stadio che riassume lo stato del processo, ovvero raccoglie tutte le informazioni fornite o scelte per risolvere correttamente il task.

Il successivo step è la pianificazione del task, ovvero si procede ad inizializzare i compiti e le funzioni del robot e ad inviare le informazioni al livello tattico di controllo.

Questa fase è relativamente lunga: per stabilire quale algoritmo è ottimale, è necessario ripetere il procedimento più volte, cambiando i dati e informazioni fino a ottenere un algoritmo accurato che raggiunga anche la massima efficienza.

Per correggere, aggiornare o aggiungere informazioni si ricorre a un ulteriore blocco di *Correction/ Updating*, dove vengono revisionati o corretti parametri per migliorare l'algoritmo scelto per il task.

Generalmente, gli input che il *System Control Level* riceve in ingresso rimangono invariati fino a quando il task non viene completato.

Se l'algoritmo è stato scelto correttamente, esso può essere performato e inizializzato nel quarto livello per procedere al completamento del task.

Tuttavia, se gli input vengono cambiati durante la compilazione del task, ciò comporta a un malfunzionamento della cella robotica o a guasti che potrebbero bloccare il processo. Per evitare tale inconveniente, il primo livello di controllo ordina al robot di modificare le proprie funzioni.

Quindi, si interviene direttamente sul secondo livello: il robot modifica i comandi e gli input dell'SCL prima che il task, in corso, venga completato.

Si genera un nuovo task, mentre il precedente viene interrotto e scartato.

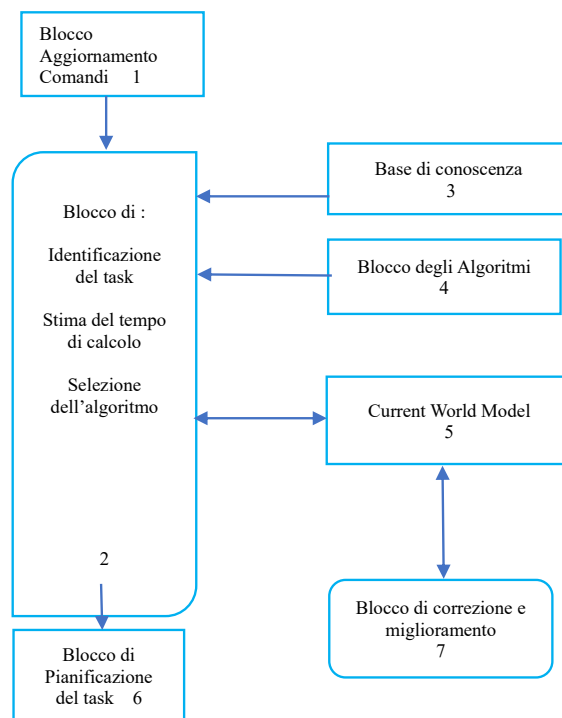


Figura 10: Analisi dei blocchi di SCL

3.3 Sistemi Esperti di Livello di Controllo Strategico (SCLES): caratteristiche

I blocchi presenti nel livello di controllo strategico costituiscono un sistema basato sulla conoscenza delle informazioni e dei parametri coinvolti in tempo reale, per cui il sistema prende il nome di Real Time Knowledge-Based System (KBS).

Un programma che consente di implementare un KBS è un sistema esperto di livello di controllo strategico (*SCLES, Strategic Control Level Expert System*).

Un sistema esperto è un programma finalizzato a riprodurre prestazioni di operatori esperti in un determinato settore o attività. Si tratta di un'applicazione dell'intelligenza artificiale che adempie alla risoluzione di un problema complesso che potrebbero essere risolto soltanto da un operatore esperto nel settore.

In questo paragrafo, si analizzeranno i sistemi esperti per il livello di controllo strategico per la definizione e ricerca dell'algoritmo adeguato.

Un sistema esperto possiede caratteristiche proprie che lo differenziano da qualsiasi altro sistema.

In primo luogo, si tratta di un sistema basato su regole. Infatti, per risolvere correttamente l'algoritmo è necessario raggruppare conoscenze specifiche, quali: identificazione dei task, stima del tempo di calcolo disponibile. In breve, ha bisogno delle informazioni raccolte nel Current World.

In secondo luogo, il sistema può essere attivato secondo due modalità:

1. Modalità off-line. Seguendo tale modalità, l'utente può cambiare o aggiornare le informazioni correnti del sistema o la scelta dell'algoritmo. Inoltre, l'utente può iniziare ad analizzare il comportamento del sistema grazie alle simulazioni di più task per volta, imposti dal livello di controllo strategico. Durante la simulazione, SCLES può richiedere informazioni aggiuntive all'utente se la soluzione non viene trovata.

Seguendo la modalità corrente, è possibile aggiornare in qualsiasi momento i parametri di cui il sistema necessita, senza incorrere a inconvenienti.

2. Modalità online. Seguendo, invece, tale modalità, gli interfaccia utenti non necessari vengono eliminati. A differenza della modalità off-line, per risolvere i

task sfruttando tale modalità, si ricorre soltanto alle informazioni contenute nel blocco di *Knowledge Base*, quindi non è prevista l'aggiunta di ulteriori informazioni. Tuttavia, se in modalità online intervengono condizioni inattese, il programma interagisce con il livello di controllo superiore o con l'utente per avvertire del malfunzionamento.

L'utilizzo di un sistema esperto apporta notevoli vantaggi: aiuta a migliorare l'efficienza e l'accuratezza della cella.

Tuttavia, lo sviluppo di un sistema esperto è complesso e richiede un lasso di tempo molto lungo, oltre alla richiesta di numerose risorse e costi aggiuntivi per lo sviluppo dei software.

3.4 Architettura di un sistema esperto e analisi dei componenti

Un sistema esperto è costituito da tre componenti principali:

- Una base di conoscenza.
- Un motore inferenziale.
- L'interfaccia utente.

La base di conoscenza è un database in cui sono archiviate le conoscenze o le informazioni del sistema. Vengono sfruttate per implementare l'algoritmo grazie a regole programmate seguendo il linguaggio di programmazione C e strutturate secondo l'istruzione IF/THEN.

L'istruzione corrente è caratterizzata da due o più condizioni che indirizzano a una conclusione.

Un esempio è il seguente:

```
IF      Piece Out
THEN   RoboticGripper On
```

L'istruzione è decifrata nel seguente modo: se il pezzo è stato lavorato in una stazione di lavoro ed è pronto, allora il braccio robotico si attiva per raccoglierlo.

A seguire, il motore inferenziale è la componente del software che elabora la conoscenza contenuta nel knowledge base, interpreta l'esigenza dell'utente e fornisce una soluzione. Il compito del motore è analizzare tutte le possibili regole contenute nella base di conoscenza e scegliere quella più appropriata per la soluzione dell'algoritmo, salvandola in memoria.

Infine, l'interfaccia utente consente l'interazione tra il sistema e l'operatore esterno.

La comunicazione tra SCLES e l'utente avviene per mezzo di due modalità, che consentono di abilitare la comunicazione con due livelli diversi:

- Attraverso *Shell*
- Attraverso *Task*

Lo Shell è un sistema privo di conoscenza: infatti, se non vengono fornite informazioni, non è eseguibile.

Quindi, per interagire con l'utente, deve contenere tutte le informazioni, regole, parametri e funzioni ricavati e determinati sia dalla base di conoscenza sia dal motore inferenziale. In questo modo, l'utente può intervenire e decidere di aggiornare o cambiare parametri e regole in base alla necessità.

Se si desidera performare i task o attivarne simulazioni, l'utente deve abilitare la seconda opzione.

L'esecuzione dei task può avvenire sia in modalità online sia off-line.

Generalmente, come analizzato precedentemente, l'esecuzione del task avviene solamente in modalità off-line per evitare inconvenienti durante la simulazione o prestazione del task.

4

SCEDULING DI UN SISTEMA FMS

4.1 Lo scheduling

Al giorno d'oggi l'obiettivo del mercato è soddisfare i bisogni dei clienti e dei consumatori, concentrando l'attenzione sulla riduzione dei costi e sulla rapida risposta alla domanda di mercato.

I prodotti richiesti sono ormai sempre più diversificati e personalizzati, e questo richiede sistemi di produzione sempre più flessibili ed in grado di produrre molteplici varietà diverse. Le aziende pertanto producono un numero sempre più elevato di prodotti diversi in lotti sempre più piccoli, fino all'unità, rendendo difficile e critica la programmazione della produzione e quindi la schedulazione delle macchine.

In particolare un sistema che produce sempre lo stesso prodotto (Single Model, Figura 11), non avrà particolari criticità di programmazione. Al contrario sistemi che producono a lotti o a pezzi singoli (Multi Model o Mixed Model, Figura), devono determinare in che ordine processare i vari prodotti diversi sulla base di differenti strategie.

SISTEMA SINGLE MODEL	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA
SISTEMA MULTI MODEL	AAAAABBBBBBCCDDDDAAAACCCFFRRRB
SISTEMA MIXED MODEL	ABCFRDGHBVFCSAEDRFVBCBMCFRDEGB

Figura 11: Confronto di diverse strategie di produzione

Tale attività è detta *scheduling*, ovvero la sequenza secondo la quale deve essere eseguita la produzione, in termini di prodotti e quantità. Consiste, quindi, nell'individuazione dei tempi di inizio e di completamento per ciascuna operazione svolta nei macchinari, e per ciascun prodotto. Determinare il corretto ordine di esecuzione di una produzione di diversi prodotti significa decidere in che ordine eseguire un prodotto piuttosto che un

altro, con che logica saturare le macchine e di conseguenza con che strategia servire i clienti. La grandezza dei lotti, i set-up, i tempi di lavorazione e la domanda dei clienti sono sicuramente tutti fattori critici per determinare l'ottima sequenza di esecuzione nei sistemi di produzione. Nelle macchine FMS si hanno solitamente lotti molto piccoli e prodotti molto diversi tra loro (zona III) che richiedono numerose lavorazioni diverse in termini sia temporali che di tipologia. Due diversi prodotti possono subire le stesse lavorazioni nello stesso ordine ma con tempi diversi. Quale prodotto verrà quindi prodotto per primo? Quale fattore sarà più decisivo? Si possono considerare varie strategie. Ad esempio processare prima il prodotto più veloce, oppure quello con scadenza più vicina, oppure il primo che arriva in ordine casuale, o quello più costoso, o quello che è in attesa da più tempo, etc. Ogni strategia influenza il coefficiente complessivo di utilizzo del sistema FMS e quindi i costi.

Diversi studi hanno analizzato performance, costi e benefici di queste tre strategie di scheduling, attraverso modelli matematici, casi studio e simulazioni.

Stecke e Stolberg (1981) hanno effettuato uno dei primi studi sui sistemi di produzione flessibili, analizzando diverse strategie operative applicate ad un caso studio reale, utilizzando la simulazione. Essi hanno identificato 16 strategie, tra cui:

- LPT Longest processing Time first
- SPT Shortest Processing Time first
- FOPR Fewest Operation Remaining
- MOPR Most Operation Remaining
- LRPT Longest Remaining Processing Time
- SRPT Shortest Remaining Processing Time
- SPT TOT Smallest Value of operation time multiplied by the total processing time for the job
- LPT TOT Longest Processing Time for the processing times multiplied by the total processing time for the job
- SPT/TOT Shortest Processing Time for the operation divided by the total processing time for the job
- LPT/TOT Longest Processing Time for the operation divided by the total processing time for the job

Come risultato, hanno osservato che è possibile ottenere un risultato migliore dividendo la Shortest Processing Time per il tempo totale disponibile per un ciclo di lavorazione. Choi e Malstrom (1988) hanno condotto un'analisi simile, aumentando il numero di

strategie considerate, aggiungendo ad esempio delle strategie che includessero la data di consegna, il tempo di attesa (SLACK time) o il valore economico del prodotto. Ne risultò che le strategie di EDD (Earliest due date), SLACK e SPT erano le più performanti in termini di pezzi prodotti nell'unità di tempo.

Chan (2003) ha riscontrato che il Shortest Processing Time assicura la regola di scheduling migliore nel caso di tempo di flusso medio, mentre EDD è migliore per quanto concerne il ritardo medio. Lo studio di Chan e Bhagwat (2014) ha poi dimostrato che tramite lo Shortest Processing Time (SPT), lo scheduling performa in modo migliore, rispetto alla tecnica First In First Out (FIFO), in un livello specifico di routing flexibility che, se viene variato, non è più ideale.

Joseph e Sridharan (2012), infine, hanno analizzato gli effetti di scheduling in un problema di routing flexibility. Essi hanno riscontrato che la metodologia Earliest Due Date (EDD) performa in maniera migliore per quanto concerne le misure di prestazione relative al tempo flusso e i pezzi in ritardo al livello di flessibilità considerato.

Il problema di scheduling in un FMS è quindi molto critico in presenza di una sequenza specifica di pezzi da processare, e determinarne l'ordine può incidere sulle performance della produzione. A tal proposito viene qui trattato ed approfondito un caso studio di He et al. (2016).

Le strategie di scheduling considerate in questo caso sono tre:

1. **FIFO (First In First Out):** seguendo tale strategia, il primo prodotto ad essere processato è quello che aspetta da più tempo.
2. **SPRT (Shortest Remaining Processing Time):** questa strategia prevede che venga processato per primo il prodotto col tempo di lavorazione inferiore.
3. **EDD (Earliest Due Date):** questa strategia prevede che venga processato per primo il prodotto con data di consegna più prossima.

Le tre strategie presentate performano in modo migliore a seconda di specifiche casistiche e profili d'ordine. Di conseguenza, nessuna delle tre tecniche è universalmente migliore, dipende dal caso considerato.

4.2 Applicazione

In questo capitolo verrà esposta un'applicazione del problema dello scheduling tratto dal lavoro di He et al. (2016).

Si considerino 25 diversi prodotti P_j , con $j = 1 \dots n$, n è il numero di prodotti totali, nel nostro caso 25. Questi prodotti vengono tutti processati da una macchina FMS composta da 9 macchinari m_i , con $i = 1 \dots m$, m numero totali di macchinari presente nella FMS, ovvero numero di lavorazioni, nel nostro caso 9. La Figura 11 indica lo schema della macchina FMS; l'FMS è costituito da una stazione di carico/scarico, e da un robot che permette di spostare i pezzi dalle stazioni ai rispettivi macchinari.

Sono poi noti i tempi di lavorazione di ciascun prodotto su ciascun macchinario e i volumi giornalieri, riportati in tabella 1. La tabella 2, invece, riporta l'ordine di lavorazione, ovvero il ciclo tecnologico, di ogni prodotto. Ad esempio il prodotto 1 verrà processato prima dal macchinario 1, poi dal 6, poi dal 3 ed infine dal macchinario 8. L'obiettivo è schedulare la produzione di una giornata con le tre diverse strategie, e confrontare i risultati ottenuti. Al fine di confrontare le diverse strategie, verrà calcolato per ogni macchinario l'indice di utilizzo, ovvero:

$$U_{m,i} = \frac{\sum_{j=1}^n T_{reale j}}{T} \quad (1)$$

dove $T_{reale j}$ è il tempo reale di produzione j data una certa strategia, ovvero il tempo in cui la macchina i -esima ha effettivamente prodotto, mentre T è il tempo complessivo di produzione impiegato.

Pezzi in ingresso

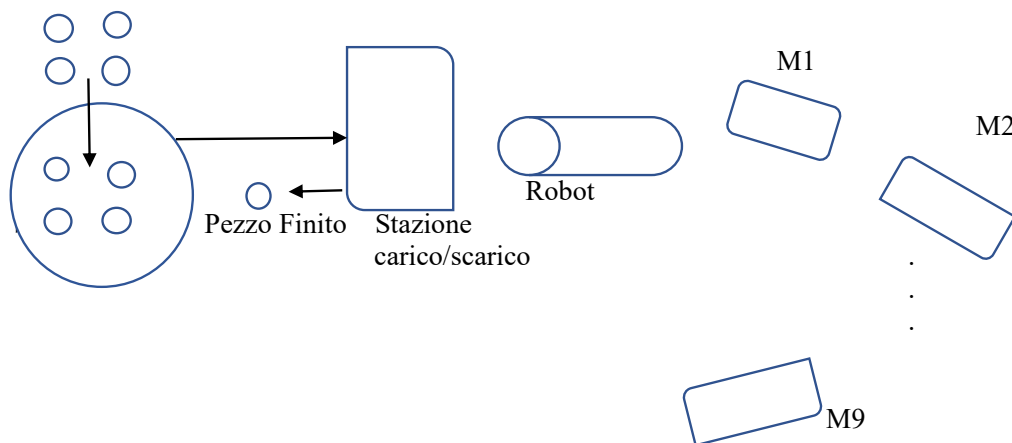


Figura 12: Ciclo tecnologico FMS per lo scheduling

Prodotto	pz/gg	scadenza	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Tot [sec]
1	1	27	460		540			660		1140		2800
2	1	30	460	500	540	580	620	660	700	740	780	5580
3	1	4	60	100		180	220	260				820
4	1	25	460	500		580	620	660		740		3560
5	3	16	60	900		980		1060		740		3740
6	1	2	60		140					340		540
7	1	3	460	500	540	180	620	260	700			3260
8	1	25		1300		1380				740		3420
9	1	13	460	900	540	980	1020	660				4560
10	2	13	460						700	740	780	2680
11	2	2	460	900	140	980	1020	660	1100	740	1180	7180
12	1	29	60		540		620	260	700	740	780	3700
13	1	5		500	540		620	660	700			3020
14	1	25	440	1680		1760	1800	640	1880			8200
15	1	3	840		520		1000		280			2640
16	1	3	440	480		560		640		720		2840
17	1	5	440	1280	520		1400			720		4360
18	1	1	40		120	160		240		320		880
19	1	12	440	1680	520	1760		640	1880	720		7640
20	2	1	60	500		580	620	660		740	780	3940
21	1	17		900	540		1020		1100			3560
22	1	11	440	480	520		600	640	680			3360
23	1	19	460	500		580	620		700			2860
24	1	14	60			180			300		380	920
25	1	14	460	900	940	980	1020	660		340	1180	6480

Tabella 1: Tempi di lavorazione dei prodotti per ogni macchinario

Prodotto	Ciclo tecnologico	Prodotto	Ciclo tecnologico
1	1, 6, 3, 8	14	5, 1, 4, 7, 6, 2
2	6, 8, 9, 4, 7, 1, 2, 5, 3	15	7, 1, 3, 5
3	4, 1, 2, 5, 6	16	6, 4, 1, 8, 2
4	5, 1, 4, 2, 6, 8	17	3, 5, 2, 8, 1
5	4, 2, 6, 8, 1	18	6, 3, 1, 8, 4
6	3, 1, 8	19	1, 7, 6, 8, 2, 4, 3
7	6, 7, 4, 5, 1, 3, 2	20	9, 6, 5, 1, 8, 4, 2
8	8, 4, 2	21	2, 7, 5, 3
9	2, 5, 6, 3, 1, 4	22	7, 5, 6, 2, 3, 1
10	9, 1, 7, 8	23	4, 1, 7, 2, 5
11	4, 5, 3, 1, 9, 7, 2, 8, 6	24	7, 4, 1, 9
12	8, 5, 6, 3, 9, 1, 7	25	8, 3, 5, 2, 6, 4, 1, 9
13	3, 2, 6, 7, 5		

Tabella 2: Cicli tecnologici dei prodotti da He et al. (2016)

La tabella presentata fornisce tutti i dati necessari per eseguire lo scheduling. Le tre metodologie seguenti verranno analizzate con un foglio Excel, in cui ciascun pezzo verrà

rappresentato da uno specifico colore sullo specifico macchinario coinvolto nel processo di lavorazione.

4.2.1 Scheduling con strategia FIFO

Come spiegato precedentemente nel paragrafo 4.1, scegliendo questo metodo, il primo pezzo che viene caricato è il primo a subire le lavorazioni nei rispettivi macchinari. Si è ipotizzato che l'arrivo dei prodotti sia sequenziale, 1, 2, 3,..etc. La figura 12 mostra un estratto della simulazione costruita, dove ogni quadretto rappresenta un tempo di 20 secondi, ogni riga un macchinario ed infine il robot, e i vari prodotti sono caricati sequenzialmente.



Figura 13: Estratto carta FIFO

Il tempo totale impiegato sono 23'880 secondi, ovvero circa 7 h. Per ogni spostamento del robot sono stati considerati i tempi di scarico carico pezzo (1 min), indicati con la lettera "R". Il tempo impiegato da ciascun macchinario per lavorare tutti i pezzi coinvolti è illustrato nella tabella 3.

Macchinario	Tempo Utilizzo [sec]	% Utilizzo [%]
1	10000	42%
2	18780	79%
3	8240	35%
4	16880	71%
5	16040	67%
6	14380	60%
7	14000	59%
8	14820	62%
9	9020	38%
R	8280	35%

Tabella 3: Dati raccolti dalla carta FIFO

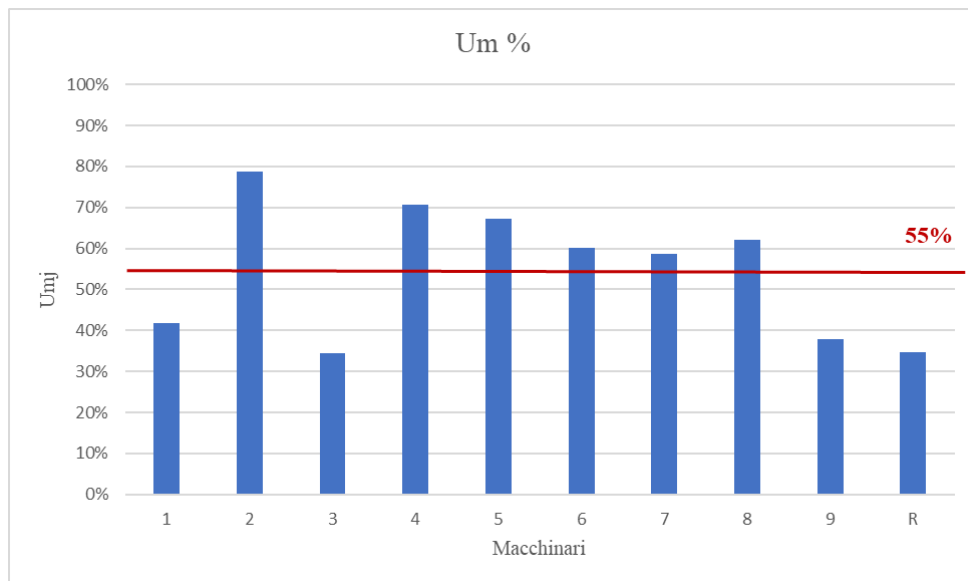


Figura 14: Istogramma delle % di Utilizzo Umj carta FIFO

La % di utilizzo di ciascun macchinario è rispetto al tempo di funzionamento totale del sistema FMS, ovvero 23'880 secondi. La figura 14 evidenzia come il macchinario più utilizzato sia il macchinario 2, 79%, mentre quello meno utilizzato è il macchinario 3 con il 35%, come il robot. Tuttavia il sistema complessivamente ha un utilizzo del 55%, idoneo alla zona 3, ovvero tra il 40% e l'80%. La tabella 4 illustra il tempo impiegato per la produzione di ogni prodotto coinvolto nel processo. Vengono distinti due tempi: il tempo teorico richiesto, ricavato dalla somma del tempo di lavorazione di ogni prodotto nel singolo macchinario e il tempo di utilizzo del robot, ovvero il tempo che il robot impiega per spostare il pezzo da un macchinario all'altro (carico/scarico); l'altro tempo di confronto è il tempo reale di attraversamento del sistema FMS di ogni prodotto.

Il tempo di attraversamento reale è sempre maggiore del tempo teorico di produzione. Il tempo totale impiegato presenta delle percentuali maggiori rispetto a casistiche ideali: si passa da un solo 6%, fino ad un massimo del 1321%. Mediamente un pezzo impiega il **246%** del suo tempo di lavorazione teorico per essere prodotto in un sistema con questa strategia.

Prodotto	T lavorazione [sec]	T carico/scarico (Robot) [sec]	T teorico richiesto [sec]	T attraversamento [sec]	%
1	2800	240	3040	4360	43%
2	5580	540	6120	8100	32%
3	820	300	1120	3800	239%
4	3560	360	3920	12660	223%
5	11220	300	11520	12160	6%
6	540	180	720	2360	228%
7	3260	420	3680	9260	152%
8	3420	180	3600	8660	141%
9	4560	360	4920	7400	50%
10	5360	240	5600	8740	56%
11	14360	540	14900	23880	60%
12	3700	420	4120	8380	103%
13	3020	300	3320	9700	192%
14	8200	360	8560	15900	86%
15	2640	240	2880	6120	113%
16	2840	300	3140	14160	351%
17	4360	300	4660	14900	220%
18	880	300	1180	12260	939%
19	7640	420	8060	15300	90%
20	7880	420	8300	18140	119%
21	3560	240	3800	15900	318%
22	3360	360	3720	17520	371%
23	2860	300	3160	17820	464%
24	920	240	1160	16480	1321%
25	6480	480	6960	22680	226%

Tabella 4: Tempo impiegato per la produzione di ogni prodotto, carta FIFO: teorico vs reale

4.2.2 Scheduling con strategia SRPT

Considerando, invece, la metodologia SRPT, si carica inizialmente il pezzo che possiede il tempo di lavorazione minore. La figura 15 mostra un estratto della simulazione fatta.

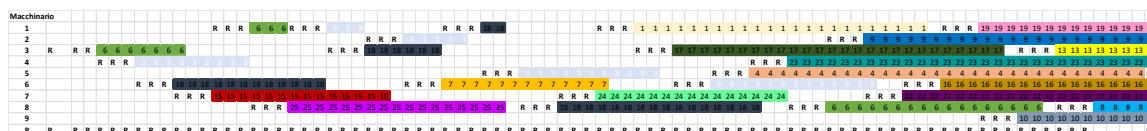


Figura 15: Estratto carta SRPT

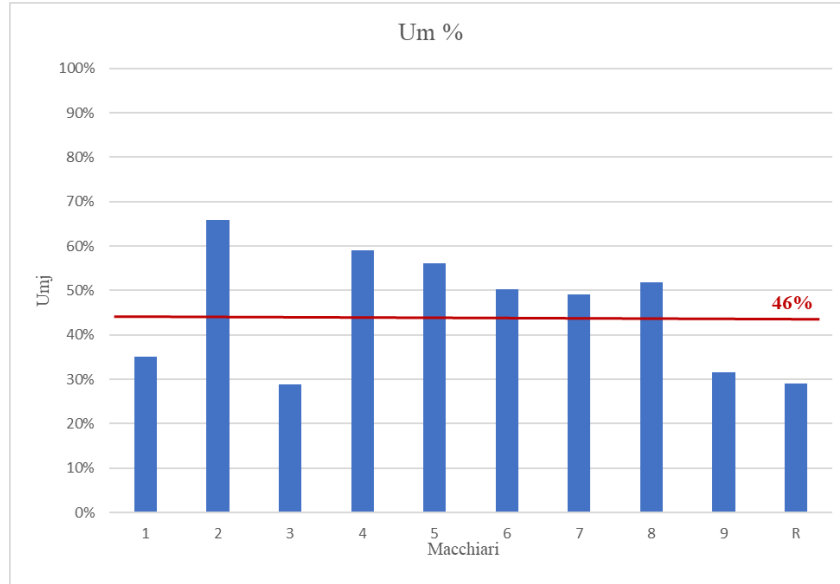
Tramite metodologia SRPT risulta che il tempo totale impiegato equivale a **28'560** secondi, ovvero circa 8 ore. Se ne deduce che, tramite questa strategia, si ha un tempo totale di utilizzo del sistema FMS più grande, ovvero complessivamente la produzione è più lenta.

Il tempo impiegato da ciascun macchinario per lavorare ogni pezzo ad esso associato è rappresentato in tabella 5:

Macchinario	Tempo Utilizzo [sec]	% Utilizzo [%]
1	10000	35%
2	18780	66%
3	8240	29%
4	16880	59%
5	16040	56%
6	14380	50%
7	14000	49%
8	14820	52%
9	9020	32%
R	8280	29%

Tabella 5: Dati raccolti carta SRPT

I tempi complessivi di lavorazione sono gli stessi di prima, derivando dai cicli tecnologici e dai tempi di processo dei singoli prodotti. Pertanto confrontandoli con un tempo di



utilizzo maggiore, risulteranno meno sfruttati. Il macchinario con utilizzo maggiore è il macchinario 2 (66%), mentre quello meno sfruttato è il 3 con il 29%, come il robot. Il sistema complessivamente ha un utilizzo del 46% (Figura 16), più bassa rispetto a prima ma sempre accettabile.

Figura 16: Istogramma % di Utilizzo Umj carta SRPT

Per quanto riguarda i pezzi prodotti, invece, dando precedenza a chi ha un tempo di attraversamento minore rispetto ai pezzi più lenti, si vede come il pezzo più veloce ha un tempo di attraversamento del processo produttivo del 14%, mentre il peggiore arriva al 314% (tabella 6). La media % del tempo di attraversamento rispetto al tempo teorico di produzione è del 128%, molto più bassa della strategia precedente. Tuttavia, complessivamente, i macchinari risultano meno sfruttati.

Prodotto	T lavorazione [sec]	T carico/scarico (Robot) [sec]	T teorico richiesto [sec]	T di attraversamento [sec]	%
1	2800	240	3040	6540	115%
2	5580	540	6120	12940	111%
3	820	300	1120	1280	14%
4	3560	360	3920	8120	107%
5	11220	300	11520	21460	86%
6	540	180	720	1540	114%
7	3260	420	3680	6820	85%
8	3420	180	3600	8840	146%
9	4560	360	4920	12100	146%
10	5360	240	5600	9940	78%
11	14360	540	14900	28560	92%
12	3700	420	4120	9860	139%
13	3020	300	3320	7040	112%
14	8200	360	8560	23780	178%
15	2640	240	2880	9180	219%
16	2840	300	3140	6260	99%
17	4360	300	4660	11220	141%
18	880	300	1180	1980	68%
19	7640	420	8060	18040	124%
20	7880	420	8300	16560	100%
21	3560	240	3800	9260	144%
22	3360	360	3720	8440	127%
23	2860	300	3160	13080	314%
24	920	240	1160	3500	202%
25	6480	480	6960	17340	149%

Tabella 6: Tempo impiegato per la produzione di ogni prodotto, carta SRPT: teorico vs reale

4.2.3 Scheduling con strategia EDD

Infine, tramite la strategia EDD, viene processato per primo il prodotto che presenta la data di consegna più prossima. La figura 17 riproduce un estratto della carta EDD in analisi.

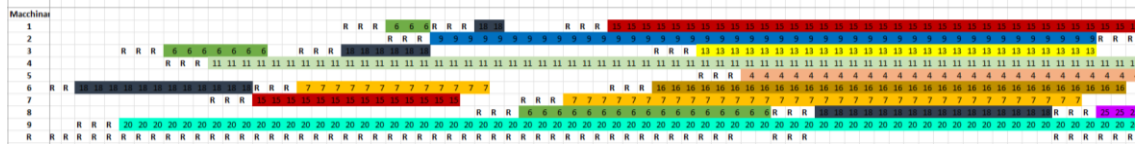


Figura 17: Estratto carta EDD

Seguendo la strategia EDD, il tempo totalmente impiegato dal sistema per produrre i pezzi richiesti è di **22'200** secondi, ovvero circa 6 ore.

Tra le tre strategie presentate, quest'ultima risulta essere la migliore in termini di tempo di attraversamento. La tabella 7 mostra le % di utilizzo di ciascun macchinario rispetto al tempo di lavorazione dell'intero sistema. Ne risulta che il macchinario meglio utilizzato è sempre il secondo con una percentuale dell'85%, mentre il peggiore è il terzo con il 37%. Complessivamente, il sistema FMS è utilizzato al 59%.

Macchinario	Tempo Utilizzo [sec]	% Utilizzo [%]
1	10000	45%
2	18780	85%
3	8240	37%
4	16880	76%
5	16040	72%
6	14380	65%
7	14000	63%
8	14820	67%
9	9020	41%
R	8280	37%

Tabella 7: Dati raccolti carta EDD

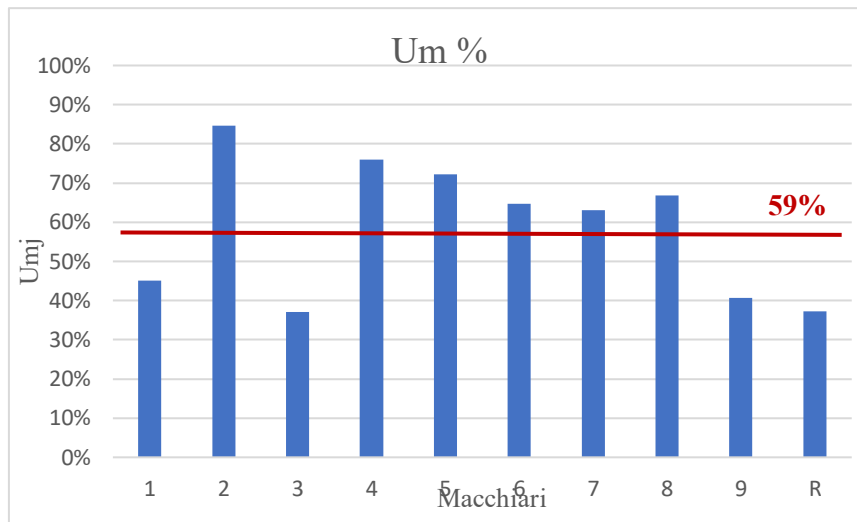


Figura 17: Istogramma % di Utilizzo Umj carta EDD

T lavorazione [sec]	T carico/scarico (Robot) [sec]	T teorico richiesto [sec]	T di attraversamento [sec]	%
2800	240	3040	8900	193%
5580	540	6120	21160	246%
820	300	1120	8640	671%
3560	360	3920	20180	415%
11220	300	11520	19080	66%
540	180	720	1000	39%
3260	420	3680	5820	58%
3420	180	3600	19160	432%
4560	360	4920	7640	55%
5360	240	5600	10460	87%
14360	540	14900	17880	20%
3700	420	4120	20580	400%
3020	300	3320	9060	173%
8200	360	8560	22200	159%
2640	240	2880	8040	179%
2840	300	3140	5280	68%
4360	300	4660	14420	209%
880	300	1180	2420	105%
7640	420	8060	11360	41%
7880	420	8300	11720	41%
3560	240	3800	14060	270%
3360	360	3720	16620	347%
2860	300	3160	17860	465%
920	240	1160	11680	907%
6480	480	6960	20940	201%

Tabella 8: Tempo impiegato per la produzione di ogni prodotto, carta EDD: teorico vs reale

Per quanto riguarda i prodotti, invece, quello col minor tempo di attraversamento ha un aumento del 20% rispetto al normale tempo di transizione, mentre quello peggiore arriva al 907%. Complessivamente la media del tempo di attraversamento in % è il 243% in più rispetto al normale tempo di lavorazione.

5

CONCLUSIONI

Confrontando le tre strategie è possibile riscontrare benefici e criticità in entrambe. Nel caso studio si è visto come, se si dovesse prediligere il tempo totale di processamento del sistema FMS, la soluzione EDD risulta quella più rapida complessivamente.

Prodotto	% FIFO	% SRPT	% EDD
1	43%	115%	193%
2	32%	111%	246%
3	239%	14%	671%
4	223%	107%	415%
5	6%	86%	66%
6	228%	114%	39%
7	152%	85%	58%
8	141%	146%	432%
9	50%	146%	55%
10	56%	78%	87%
11	60%	92%	20%
12	103%	139%	400%
13	192%	112%	173%
14	86%	178%	159%
15	113%	219%	179%
16	351%	99%	68%
17	220%	141%	209%
18	939%	68%	105%
19	90%	124%	41%
20	119%	100%	41%
21	318%	144%	270%
22	371%	127%	347%
23	464%	314%	465%
24	1321%	202%	907%
25	226%	149%	201%
MEDIA	246%	128%	243%

Tabella 9: Confronto tempo di attraversamento dei prodotti con le tre strategie

Tuttavia, analizzando il tempo di processamento dei singoli prodotti (tabella 9) e la media di attraversamento di un prodotto per strategia, risulterebbe migliore la seconda strategia, che complessivamente penalizza i prodotti con una % media del 128%.

Macchinario	% Umj FIFO	% Umj SRPT	% Umj EDD
1	42%	35%	45%
2	79%	66%	85%
3	35%	29%	37%
4	71%	59%	76%
5	67%	56%	72%
6	60%	50%	65%
7	59%	49%	63%
8	62%	52%	67%
9	38%	32%	41%
R	35%	29%	37%
MEDIA	55%	46%	59%

Tabella 10: Confronto utilizzo sistema FMS con le tre strategie

Infine analizzando l'utilizzo dei singoli macchinari nelle tre strategie, questo risulta migliore nella terza. Pertanto la strategia con più fattori positivi risulterebbe la strategia EDD, seguita dalla SRPT. Ovviamente al variare dell'arrivo dei prodotti (FIFO), dei tempi di processamento nel caso di nuovi prodotti (SRPT) e delle date di consegna (EDD), queste valutazioni potrebbero cambiare.

E' interessante tuttavia vedere come l'ordine di processamento di prodotti diversi porti a risultati di performance ed utilizzo completamente diversi. La dinamicità e la flessibilità dei diversi sistemi di produzione FMS assicurano sicuramente un'elevata varietà di produzione e tempi di attraversamento ridotti dovuti all'elevato grado di automazione. Tuttavia tali performance e velocità di attraversamento possono variare molto al variare dello scheduling. E' pertanto fondamentale definire la strategia più adatta al profilo dei prodotti e degli ordini e ciclicamente verificare che al variare degli ordini e dei prodotti questa rimanga la strategia ottimale.

In conclusione, questo studio ha permesso di evidenziare come gli FMS rappresentino un ottimo sistema di produzione grazie ai numerosi vantaggi apportati in termini di flessibilità, rapidità ed efficienza produttiva. Ulteriori aspetti positivi emergono grazie all'aggiunta di un robot meccanico in supporto alla produzione totale, favoreggiando in questo modo la continua crescita dei sistemi produttivi al giorno d'oggi.

Inoltre, si è osservato come gli FMS siano in grado di processare prodotti raggruppati per famiglie. La performance totale può essere migliorata a seconda dell'ordine di sequenziamento di specifici lotti di produzione coinvolti in un processo lavorativo.

Una raccomandazione per le prospettive future potrebbe essere quella di effettuare uno studio su quanto l'effettiva collaborazione dei sistemi flessibili e robot possa migliorare ulteriormente la produzione, evidenziando nuovi aspetti che potrebbero diventare importanti all'efficienza produttiva finale.

BIBLIOGRAFIA

A. Pareschi, A. Persona, E. Ferrari, A. Regattieri, *Logistica Integrata e Flessibile per i sistemi produttivi dell'industria e del terziario. Con applicazioni numeriche e progettuali*, Bologna, Società Editrice Esculapio, 2014

Anupma Yadav & S.C. Jayswal (2018) Modelling of flexible manufacturing system: a review, *International Journal of Production Research*, 56:7, 2464-2487, 2

Appunti del Corso Impianti Meccanici, Anno Scolastico 2020/2021

Chan, F. T. S. 2003. "Effects of Dispatching and Routeing Decisions on the Performance of a Flexible Manufacturing System." *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21: 238–338.

Chan, F. T. S., R. Bhagwat, and H. K. Chan. 2014. "The Effect of Responsiveness of the Control-decision System to the Performance of FMS." *Computers & Industrial Engineering* 72: 32–42.

Choi, R. H., and E. M. Malstrom. 1988. "Evaluation of Traditional Work Scheduling Rules in a Flexible Manufacturing System with a Physical Simulator." *Journal of Manufacturing Systems* 7: 33–45.

Joseph, O. A., and R. Sridharan. 2012. "Effects of Flexibility and Scheduling Decisions on the Performance of an FMS: Simulation Modelling and Analysis." *International Journal of Production Research* 50: 2058–2078.

Mehdi Kaighobadi, Kurapati Venkatesh, *Flexible Manufacturing Systems: An Overview*, Florida Atlantic University, Fort Lauderdale, Florida, 5-10, 1993

Stecke, K. E., and J. J. Solberg. 1981. "Loading and Control Policies for a Flexible Manufacturing System." *International Journal of Production Research* 19: 481–490.

VLADAN DEVEDZIC, A Knowledge-Based System for the Strategic Control Level of Robots in Flexible Manufacturing Cells, *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 2, 263-287, 1990

Yumin He, Kathryn E. Stecke & Milton L. Smith (2016) Robot and machine scheduling with state-dependent part input sequencing in flexible manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 54:22, 6736-6746

INDICE FIGURE

Figura 1: Diagramma P-Q.....	10
<i>Riccardo Manzini, Università degli Studi di Bologna</i>	
https://www.logisticaneews.it/files/2019/05/Cattura-2.png	
Figura 2: Rappresentazione di un FMS.....	12
<i>Sistemi di produzione flessibili PrimaPower</i>	
https://www.primapower.com/en/technologies/systems/flexible-manufacturing-systems/lpbb#media-modal-player-212	
Figura 3: FMS dell'azienda Prince.....	17
<i>Prince Industries Uses Flexible Manufacturing System To Quickly Bring Products To Market</i>	
http://www.makino.com/images/case_study/Prince25.jpg	
Figura 4: Robot KUKA nell'FMS di Multicut.....	18
<i>KUKA's largest robot at Multicut</i>	
https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/industries/case-studies/faw/faw-handling-kurbelwelle.jpg?rev=-1&w=767&hash=0F1A4CAF767235B98131F902B0ACBCB5	
Figura 5: Metodo di giustificazione di Bokhorst, Slomp e Suresh.....	20
<i>Anupma Yadav & S.C. Jayswal (2018) Modelling of flexible manufacturing system: a review, International Journal of Production Research, 56:7, pp 2467, 2017</i>	
Figura 6: Sistemi che costituiscono un FMS.....	22
<i>Anupma Yadav & S.C. Jayswal (2018) Modelling of flexible manufacturing system: a review, pp 2468.</i>	
Figura 7: Tipico layout di FMS.....	25
<i>I.Mahdavi, B Shirazi, A Review of Simulation -based Intelligent Decision Support System Architecture for the Adaptive Control of Flexible Manufacturing Systems. Journal of Artificial Intelligence , 3: 201-219.</i>	
Figura 8: Esempio di cella robotica.....	28
<i>Cella robotica, collaborativa o tradizionale? Definizioni, vantaggi e potenzialità: ecco tutto quello che c'è da sapere.</i>	
https://www.alumotion.eu/wp-content/uploads/2019/09/cella-robotica-collaborativa.jpg	

Figura 9: Distribuzione dei livelli di controllo del robot.....	29
Figura 10: Analisi dei blocchi di SCL.....	31
Figura 11: Confronto di diverse strategie di produzione.....	35
Figura 12: Ciclo tecnologico FMS per lo scheduling.....	38
Figura 13: Estratto carta FIFO.....	40
Figura 14: Istogramma delle % di Utilizzo Umj carta FIFO.....	41
Figura 15: Estratto carta SRPT.....	42
Figura 16: Istogramma % di Utilizzo Umj carta SRPT.....	43
Figura 17: Estratto carta EDD.....	45
Figura 18: Istogramma % di Utilizzo Umj carta EDD.....	46

INDICE TABELLE

Tabella 1: Tempi di lavorazione dei prodotti per ogni macchinario.....	39
Tabella 2: Cicli tecnologici dei prodotti da He e al. (2016).....	39
Tabella 3: Dati raccolti dalla carta FIFO.....	40
Tabella 4: Tempo impiegato per la produzione di ogni prodotto, carta FIFO: teorico vs reale	42
Tabella 5: Dati raccolti carta SRPT.....	43
Tabella 6: Tempo impiegato per la produzione di ogni prodotto, carta SRPT: teorico vs reale.....	44
Tabella 7: Dati raccolti carta EDD.....	45
Tabella 8: Tempo impiegato per la produzione di ogni prodotto, carta EDD: teorico vs reale.....	46
Tabella 9: Confronto tempo di attraversamento dei prodotti con le tre strategie.....	49
Tabella 10: Confronto utilizzo sistema FMS con le tre strategie.....	50



Foglio di lavoro di
Microsoft Excel