



UNIVERSITÀ DI PISA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN
ING. GESTIONALE

Tesi di Laurea Triennale

Potenzialità dei Sistemi CAD
per la Flessibilità dei Sistemi Produttivi

Relatore:

Prof. Ing. Michele Lanzetta

Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare
e della Produzione

Candidato:

Andrea Muolo

Anno Accademico 2011 - 2012

28 Settembre 2011

Sommario

In questo lavoro è stata svolta una ricerca bibliografica su alcuni aspetti del software CAD che ne hanno evidenziato la sua fondamentale importanza negli odierni ambienti di lavoro, i quali devono far fronte alle esigenze diversificate del consumatore e a un mercato sempre più concorrenziale.

E' stata posta l'attenzione su aspetti che possono rendere flessibile un sistema produttivo migliorandone efficienza ed efficacia dei vari reparti: progettazione, produzione, assemblaggio ecc.

In particolare si è visto come sono di grande utilità le tecniche di: prototipazione rapida, che porta vantaggi in termini di tempo e di costi nella fase di progettazione ed assemblaggio; di AR e VR (Augmented and Virtual Reality) che aiutano i progettisti nella pianificare la sequenza di assemblaggio attraverso la manipolazione di prototipi virtuali in un ambiente di lavoro di montaggio vero e proprio. Poi si è fatto riferimento alla tecnica CAPP (Computer Aided Process Planning) che permette l'integrazione tra la fase di progettazione CAD e fabbricazione CAM, ovvero di definire il ciclo di lavoro, cioè la sequenza delle operazioni, a partire dalle informazioni geometriche e tecnologiche associate al modello tridimensionale del pezzo.

Infine è stato introdotto il concetto di sistema produttivo riconfigurabile RMS (Reconfigurable Manufacturing Systems), che è emerso negli ultimi anni come evoluzione dell'FMS (Flexible Manufacturing Systems), e si è evidenziato come questo sia la strada da seguire per rispondere rapidamente alle mutevoli esigenze e ottenere vantaggi di mercato.

Abstract

This work has been performed a literature search on some aspects of the CAD software that have highlighted its importance in today's workplace, which must meet the diversified needs of consumers and an increasingly competitive market.

It 'been paid attention to aspects that can make a flexible production system by improving efficiency and effectiveness of the various departments: design, production, assembly and so on.

In particular we have seen that are very useful techniques: rapid prototyping, which brings advantages in terms of time and costs in the design and assembly; AR and VR (Virtual Reality and Augmented) that help designers in the planning the assembly sequence through the manipulation of virtual prototypes in an environment of real editing work. Then he referred to the technical CAPP (Computer Aided Process Planning) system which enables integration between the CAD design and CAM manufacturing, or to define the duty cycle, that is the sequence of operations, from geometric information and technology associated with the three-dimensional model of the piece.

Finally we introduced the concept of reconfigurable manufacturing system (RMS Reconfigurable Manufacturing Systems), which has emerged in recent years as an evolution of the FMS (Flexible Manufacturing Systems), and there was evidence that this is the way forward to respond quickly to changing requirements and achieve market advantage.

Indice

Sommario	2
Capitolo 1: Introduzione	7
1.1 Computer Aided Design (CAD).....	8
1.2 Categorie di CAD	9
1.3 Settori correlati	11
1.4 Tipologie di rappresentazione	11
1.5 Programmi per calcolatori aziendali.....	13
1.5.1 Programmi per la gestione della produzione	14
1.5.2 Programmi di contenuto tecnico (CAD, CAM, GT)	15
1.5.4 Programmi di simulazione della produzione	20
Capitolo 2: Prototipazione virtuale	23
2.1 Gli strumenti della prototipazione virtuale.....	23
2.2 Problemi di base della prototipazione virtuale	25
Capitolo 3: Impiego del CAD nella realtà aumentata e virtuale	27
3.1 Realtà Aumentata (AR).....	27
3.2 Realtà virtuale (VR)	28
Capitolo 4: Integrazione avanzata tra CAD e CAPP	30
4.1 Necessità di flessibilità, automazione e integrazione	32
4.2 Le fasi del processo manifatturiero	33
4.2.1 La fase di progettazione.....	33
4.2.2 La fase di produzione.....	33
4.2.3 La fase di gestione e pianificazione.....	34
4.3 La funzione di process planning.....	35
4.3.1 L’approccio manuale	35
4.3.2 L’approccio variante	36
4.3.3 L’approccio generativo	37
4.3.4 L’approccio semi-generativo	39
4.4 Tecniche AFR dei sistemi generativi	42
4.4.1 I compiti principali di un sistema AFR.....	42
4.4.2 Vantaggi e svantaggi di un sistema AFR.....	43

Capitolo 5: Il ruolo del CAD nella variabilità dei mercati e dei prodotti	45
5.1 Introduzione.....	45
5.1.1 Le influenze sulla produzione.....	45
5.1.2 L'evoluzione delle fabbriche.....	46
5.1.3 Derivazione dei fattori del cambiamento.....	47
5.1.4 Costituenti della produzione variabile.....	49
5.2 Classificazione della variabilità.....	50
5.2.1 Dalla flessibilità alla variabilità.....	50
5.2.2 Livelli della fabbrica.....	50
5.2.3 Le classi della variabilità.....	51
5.2.4 Variabilità degli obiettivi.....	53
5.2.5 Attivatori di variabilità.....	56
5.3 Produzione flessibile e sistemi riconfigurabili.....	58
5.3.1 Evoluzione dei sistemi di produzione.....	58
5.3.2 Flexible Manufacturing Systems (FMS).....	58
5.3.3 Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS).....	59
5.3.4 Reconfigurable Machine Tools (RMT).....	60
5.3.5 Auto adattamento del sistema di controllo.....	61
5.3.6 Prospettive future.....	61
5.4 Sistemi di assemblaggio riconfigurabili.....	62
5.5 Fabbriche trasformabili.....	65
5.5.1 Progettazione di fabbrica.....	65
5.5.2 Oggetti di fabbrica.....	66
5.5.3 Valutazione di trasformabilità di una fabbrica.....	67
Capitolo 6: Sistema CAD innovativo per colmare il gap della conoscenza tra il progettista e il costruttore	70
6.1 Introduzione.....	70
6.1.1 Motivazioni per lo sviluppo di un sistema innovativo.....	71
6.1.2 Ambiente di un sistema innovativo.....	72
6.1.3 Obbiettivi di un sistema innovativo.....	73
6.2 Panoramica di un sistema innovativo.....	75
6.2.1 Gli input del sistema.....	75
6.2.2 L'output del sistema.....	75
6.3 La regola "costruttore".....	76

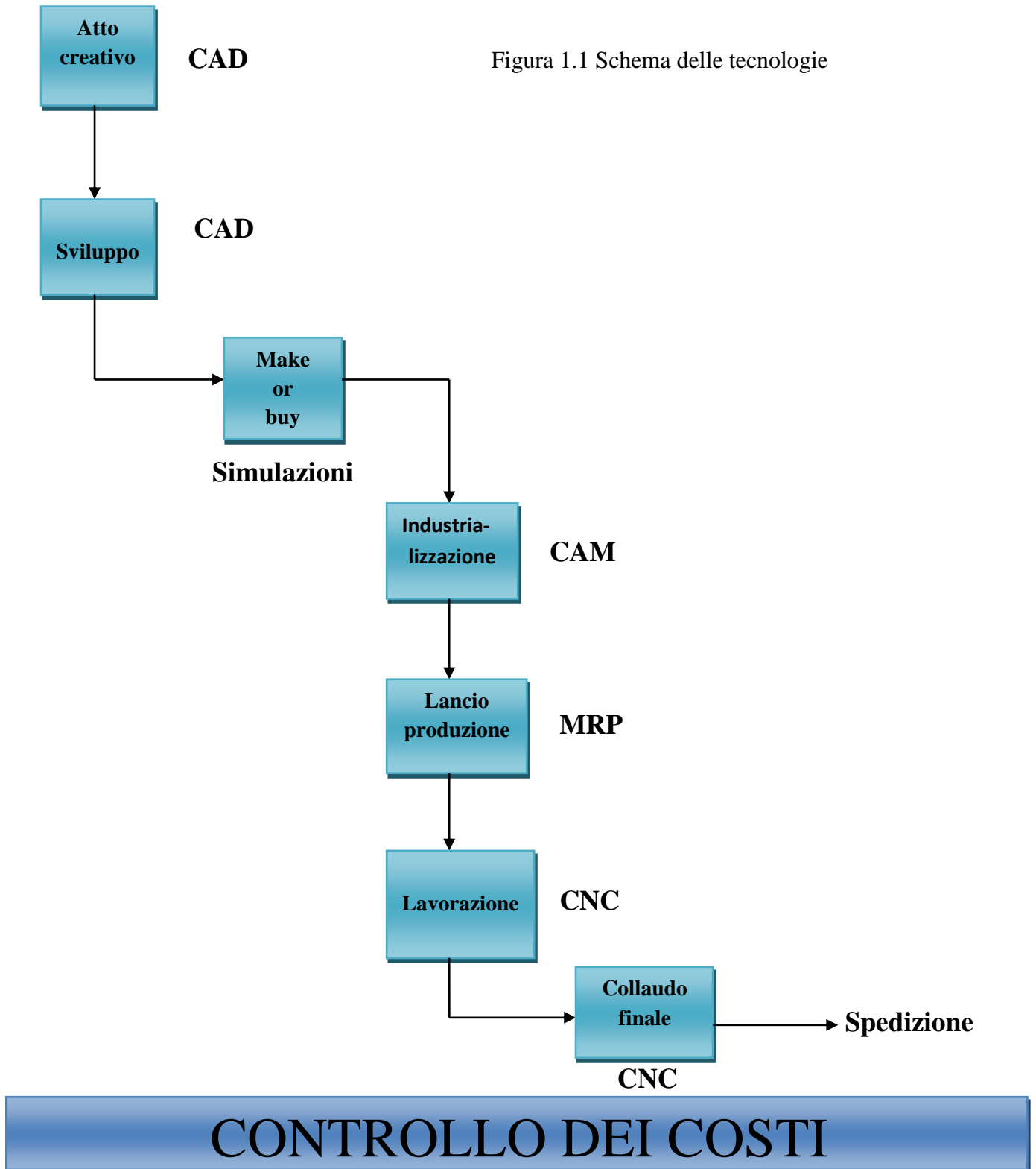
6.3.1 Ontologia	76
6.3.2 Sintassi.....	77
6.3.3 Regola base.....	79
6.4 Il compilatore del sistema innovativo	79
6.5 L'analizzatore.....	80
6.6 Chiusura del ciclo della conoscenza.....	80
Conclusioni	83
Bibliografia	85
Ringraziamenti	Errore. Il segnalibro non è definito.

Alla mia famiglia e a Te

Capitolo 1: Introduzione

La nascita di un prodotto costituisce un processo complesso che ha inizio generalmente con un atto creativo; esso viene poi sviluppato attraverso vari stadi fino a quello della produzione (Fig1.1). Lo schema è significativo per illustrare in che modo le tecnologie oggi disponibili mettono a disposizione strumenti nuovi, potenti e veloci [1].

Figura 1.1 Schema delle tecnologie



L'atto creativo vero e proprio è sostanzialmente una prerogativa umana: oggi però l'uomo trova interessanti ausili nei dispositivi di progettazione assistita dal calcolatore CAD che diventano praticamente insostituibili nella fase successiva di sviluppo del disegno. A livello aziendale la decisione di produrre in proprio il prodotto o di acquistarlo (make or buy) costituisce una scelta difficile da compiere: essa può essere aiutata dall'esecuzione di apposite simulazioni o può essere forzata da situazioni contingenti, come ad esempio, la mancanza di tempo disponibile.

Una volta presa la decisione di fabbricare all'interno dell'azienda il prodotto, si dà inizio alla fase di ingegneria industriale in cui si definiscono le macchine che saranno usate in produzione e gli attrezzi specifici necessari. Questa fase è oggi potentemente aiutata dal calcolatore CAM che mette a disposizione non solo strumenti per disegnare gli attrezzi ma anche, ad esempio, banche di cicli di lavoro, di utensili, di dati connessi all'utilizzo della Group Technology.

La produzione viene lanciata in officina attraverso una programmazione che oggi è gestibile da calcolatore con strumenti tipo MRP o altri che controllano anche la fase di programmazione degli acquisti e la gestione dei magazzini. Finalmente le macchine operatrici possono eseguire la loro produzione governate da controlli numerici (CN, CNC, DNC) intesi in senso lato e anche come componenti di celle di lavorazione flessibile (FMS). Esse utilizzano i programmi operativi preparati da sistemi CAM nel momento richiesto dalla programmazione della produzione.

Il prodotto subisce vari stadi di controllo della correttezza della lavorazione via via eseguita da una fase di collaudo conclusivo che ne autorizza la consegna al cliente finale. Anche in questo caso il controllo numerico e i calcolatori di processo hanno fatto evolvere le operazioni di collaudo ad uno stadio che può essere completamente automatico, con la conseguente elaborazione statistica dei risultati del controllo. Negli stadi opportuni saranno infine disponibili i dati per la preventivazione del costo del prodotto e per la verifica consuntiva del costo stesso a produzione eseguita.

1.1 Computer Aided Design (CAD)

Computer-Aided Design, cioè progettazione assistita dall'elaboratore, indica il settore dell'informatica volto all'utilizzo di tecnologie software e in particolare della computer grafica per supportare l'attività di progettazione (design) di manufatti sia virtuali che reali. I sistemi di Computer Aided Design hanno come obiettivo la creazione di modelli, soprattutto 3D, del manufatto. Ad esempio, un sistema Computer Aided Design può essere impiegato da un progettista meccanico nella creazione di un modello 3D di un motore. Se viene realizzato un modello 3D, esso può essere utilizzato per calcoli quali analisi statiche, dinamiche e strutturali ed in tal caso si parla di Computer Aided Engineering (CAE), disciplina più vasta di cui il CAD costituisce il sottoinsieme di azioni e strumenti volti alla realizzazione puramente geometrica del modello [1].

In informatica, l'acronimo inglese CAD viene usato per indicare due concetti correlati ma differenti:

- *Computer-Aided Drafting*: cioè disegno tecnico assistito dall'elaboratore tale accezione indica il settore dell'informatica volto all'utilizzo di tecnologie software e specificamente della computer grafica per supportare l'attività di disegno tecnico (drafting). I sistemi di Computer Aided Drafting hanno come obiettivo la creazione di un modello, tipicamente 2D, del disegno tecnico che descrive il manufatto, non del manufatto stesso. Ad esempio, un sistema Computer Aided Drafting può essere impiegato da un progettista nella creazione di una serie di disegni tecnici (in proiezione ortogonale, in sezione, in assonometria, in esploso) finalizzati alla costruzione di un motore.
- *Computer-Aided Design*: cioè progettazione assistita dall'elaboratore in questa accezione, la più comune, CAD indica il settore dell'informatica volto all'utilizzo di tecnologie software e in particolare della computer grafica per supportare l'attività di progettazione (design) di manufatti sia virtuale che reali. I sistemi di Computer Aided Design hanno come obiettivo la creazione di modelli, soprattutto 3D, del manufatto. Ad esempio, un sistema Computer Aided Design può essere impiegato da un progettista meccanico nella creazione di un modello 3D di un motore. Se viene realizzato un modello 3D, esso può essere utilizzato per calcoli quali analisi statiche, dinamiche e strutturali ed in tal caso si parla di Computer Aided Engineering (CAE), disciplina più vasta di cui il CAD costituisce il sottoinsieme di azioni e strumenti volti alla realizzazione puramente geometrica del modello.

1.2 Categorie di CAD

I sistemi CAD possono essere classificati secondo differenti criteri. Guardando all'estensione del dominio, inteso come campo di utilizzo, si può distinguere tra:

- Sistemi CAD orizzontali: si tratta di sistemi CAD aventi un dominio molto ampio, utilizzabili con successo in contesti applicativi differenti, come ad esempio progettazione architettonica e quella meccanica. I comandi offerti da questi sistemi sono indipendenti da uno specifico contesto applicativo. Si avranno pertanto comandi come traccia-linea senza alcuna nozione se la linea rappresenta una parete di un edificio o lo spigolo di un supporto metallico.
- Sistemi CAD verticali: si tratta di sistemi con dominio ristretto, orientati ad un particolare contesto applicativo, con comandi e funzionalità specifici per quel contesto. Ad esempio, un sistema CAD verticale per la progettazione di interni offrirà comandi per creare e posizionare differenti tipi di pareti e collocarvi porte e finestre. I CAD orientati

all'ambito industriale e in special modo alle costruzioni meccaniche in senso lato vengono indicati come MCAD.

Una classificazione alternativa, molto utilizzata in ambito commerciale, suddivide i sistemi CAD in tre fasce principali sulla base di prezzo e funzionalità:

- Sistemi di fascia bassa Sono sistemi CAD tipicamente limitati al disegno 2D, venduti a prezzo contenuto (indicativamente inferiore ai 300€) e rivolti ad utenti occasionali o non professionisti.
- Sistemi di fascia medio-bassa Sono sistemi CAD tipicamente limitati al disegno 2D, integrano vari moduli e permettono di gestire proprietà del disegno, venduti a prezzo contenuto (indicativamente inferiore ai 1500€) e rivolti a professionisti artigiani, piccole aziende, impiantisti e tutti coloro che non fanno della progettazione il proprio "core business".
- Sistemi di fascia media Sono sistemi CAD che integrano il disegno 2D con la modellazione 3D, venduti ad un prezzo medio (indicativamente inferiore ai 5000€). Questi sistemi sono usualmente rivolti a piccole o medie aziende e a professionisti, e vengono spesso integrati con moduli "verticali", cioè particolarmente adatti alla velocizzazione dei compiti giornalieri. Spesso sono integrati inoltre con una suite di strumenti come il PDM per la gestione dei dati riguardanti i prodotti progettati (Product Lifecycle Management).
- Sistemi di fascia alta Sono sistemi CAD complessi che integrano la modellazione 3D con il disegno 2D, e offrono una gestione avanzata dei dati supportando processi aziendali che si estendono ben oltre l'ufficio tecnico. Hanno costi elevati e sono tipicamente utilizzati dalle medie e grandi aziende, come per i sistemi di fascia media, anche con un PDM.

1.3 Settori correlati

Settori correlati con il CAD sono il Computer-Aided Manufacturing (CAM), il Computer-Aided Engineering (CAE), Computer Aided Facility Management (CAFM) e il Sistema Informativo Geografico (GIS) [1].

I modelli generati con un pacchetto di CAD possono essere importati:

- In un sistema CAM, per generare le istruzioni per la macchina utensile atte a produrre il modello disegnato. Alternativamente, è possibile utilizzare un sistema CAD/CAM, che integra le funzioni di CAD con quelle di CAM.
- In un sistema CAE, per eseguire i calcoli tecnici per validare e ottimizzare il progetto. Alternativamente, è possibile utilizzare un sistema CAD/CAE, che integra le funzioni di CAD con quelle di CAE.
- In un sistema GIS, per arricchirne la cartografia.
- In un sistema CAFM, per censire, analizzare e riorganizzare il patrimonio immobiliare.

1.4 Tipologie di rappresentazione

I sistemi CAD usano generalmente tre tipologie di rappresentazione di oggetti in tre dimensioni:

1. filo di ferro (*wireframe*);
2. superfici (*surfaces*);
3. solidi (*solids*).

La rappresentazione a **filo di ferro** è di scarso interesse per chi deve sfruttare il modello per effettuare le lavorazioni nell'area CAM. L'oggetto così generato è descritto solamente attraverso i suoi spigoli, i vertici e linee di contorno e assume l'aspetto di un oggetto costituito da fili. I modellatori che lavorano solamente con il modello a fili, in realtà non utilizzano e mantengono in memoria informazioni riguardanti la rappresentazione matematica delle superfici, ma possono essere in grado di produrre immagini tridimensionali del modello stesso. Per lo stesso motivo non possono generare percorsi accurati nelle tre dimensioni, proprio perché non contengono le necessarie informazioni.

Forse la maggiore limitazione di questo tipo di rappresentazione è dovuta alla sua intrinseca tendenza all'ambiguità di interpretazione geometrica, sia da parte del sistema che dell'utente: ci possono essere frequentemente interpretazioni errate circa la parte di superficie appartenente al solido e quella invece che non vi appartiene, così come è di difficile individuazione, specie su oggetti complessi, quale parte dell'oggetto è in primo piano e quale invece è in secondo piano. Inoltre l'eventuale percorso utensile nel modulo CAM non può essere generato perché non è

definita univocamente la superficie compresa tra spigolo e spigolo e quindi non sono ben individuabili le superfici che devono essere lavorate dall'utensile. Pur con questa forte limitazione, la modellazione di tipo "filo di ferro" è largamente utilizzata in domini applicativi diversi (in particolare per applicazioni semplici o bidimensionali), soprattutto in virtù del limitato utilizzo di memoria di massa e del veloce accesso ai dati.

La **modellazione di superfici** (*surface*) si è sviluppata in parallelo con la diffusione delle lavorazioni a controllo numerico e delle relative tecniche di programmazione. In una rappresentazione di tipo *surface* il modellatore crea e utilizza la vera e corretta rappresentazione matematica della superficie, descrivendola completamente. Il modello può essere rappresentato graficamente utilizzando punti e linee di confine, come del resto nel modello di tipo filo di ferro: in questo caso, però, vengono impiegate anche facce per colmare lo spazio compreso tra confini e punti, quindi si ha una esatta definizione della matematica.

Ciascuna faccia può essere descritta da una superficie, che può essere un elemento di quadrica (coni, cilindri, sfere) oppure un insieme di *Spline* (la rappresentazione più nota è quella denominata *B-Spline*, ovvero *Basis Spline*). In questo modo l'oggetto viene rappresentato tramite l'unione di parti di superfici di diversa natura, intimamente connesse tra di loro: con la modellazione di tipo *surface*, in sostanza l'oggetto viene rappresentato a partire dalla sua superficie esterna (la sua "pelle") e l'insieme delle facce e delle superfici va a formare una unica superficie complessa. È questo il concetto di *patch*, cioè insieme di punti, delimitato da curve, le cui coordinate sono date da funzioni matematiche continue a due parametri ad un solo valore. Ad ogni *patch* è associato un insieme di condizioni al contorno, quali per esempio, i quattro punti angolari e le quattro curve di confine (spesso i termini *patch* e superficie sono usati come sinonimi mentre più propriamente una *patch* è una regione limitata di una superficie più estesa; in particolare è una parte di una superficie composta).

Una importante caratteristica di una rappresentazione di questo tipo, è data proprio dall'impiego di superfici di tipo parametrico: è possibile modificare gli oggetti semplicemente mutandone alcune dimensioni caratteristiche (parametri), senza per questo dover ridisegnare il tutto. I modelli di tipo *surface* giocano un importante ruolo in campo industriale, poiché riescono a fornire una descrizione accurata di una superficie di un oggetto che può essere impiegata, ad esempio, per guidare macchine a controllo numerico o altre applicazioni nell'ambito produttivo.

La **modellazione solida** è stato il passo necessario per superare le ambiguità introdotte dai sistemi di tipo *wireframe* nella interpretazione della geometria del pezzo e contemporaneamente introdurre nella rappresentazione il concetto di volume, non presente nei modelli di tipo *surface*. I modelli

adesso sono rappresentati come oggetti realmente solidi, con conseguente forte minimizzazione del rischio di fraintendimento. I modellatori solidi in generale richiedono risorse computazionali (velocità di calcolo e occupazione di memoria) maggiori, però offrono la possibilità di effettuare analisi più estese ed approfondite sul modello. Inoltre, i modellatori solidi sono perfettamente in grado di fornire una definizione matematica della superficie, ma adesso forniscono informazioni sulla modalità in cui sono unite le superfici, perciò è possibile effettuare operazioni booleane (ovvero unione e intersezione) sui volumi, così come del resto sulle superfici. D'altra parte è bene sottolineare come la rappresentazione matematica delle superfici è esattamente la stessa nei modellatori di superficie e in quelli solidi.

1.5 Programmi per calcolatori aziendali

I programmi con cui si alimentano i calcolatori per rendere possibili l'elaborazione dei dati che sono stati loro sottoposti costituiscono uno strumento essenziale per l'operatività di un sistema automatico.

I programmi possono essere suddivisi, sotto l'aspetto della loro utilizzazione, in due grandi categorie:

- 1) Programmi gestionali (controllo produzione, delle scorte, ecc.)
- 2) Programmi tecnici (disegno automatico, CN, ecc.)

In un'entità integrata il disegno del particolare da produrre viene eseguito con l'aiuto del calcolatore, successivamente il suo ciclo di lavorazione viene definito per le macchine operatrici sempre con il supporto del calcolatore, ed infine la sua esecuzione può venir gestita dal calcolatore con il controllo non solo della produzione ma anche degli acquisti dei materiali grezzi o semilavorati e dei magazzini dei prodotti finiti [1].

Se l'unità operativa è veramente integrata occorre che anche i programmi siano tra loro compatibili perché si rende necessaria la loro complementarietà. Anche nei casi in cui, all'interno di una azienda, l'integrazione avvenga per gradi nel tempo aggiungendo successivamente dispositivi automatici o semi-automatici occorre avere l'accortezza di definire a priori le esigenze di compatibilità dei moduli di programma che verranno successivamente implementati. Generalmente le cerniere sui cui ruotano i vari programmi sono costituite dagli archivi dei dati, i quali devono quindi essere compatibili con le esigenze dei vari settori aziendali che accedono agli archivi stessi per utilizzare le informazioni ivi contenute.

L'area di progettazione costituisce l'inizio logico della catena e ad essa è generalmente demandata la responsabilità di definire il prodotto e il suo stato di fornitura in tutti i suoi particolari progettandolo e verificandone il corretto funzionamento, quando e se necessario, con appositi

simulatori. I disegni realizzati dai progettisti con strumenti semiautomatici di disegno vanno poi archiviati su dischi magnetici che costituiscono i più tradizionali archivi a scaffali dove vengono immagazzinati i disegni convenzionali. Gli archivi elettronici presentano numerosi vantaggi rispetto a quelli tradizionali: primo fra tutti la riduzione degli spazi occupati e la rapidità di reperimento e visualizzazione di un disegno precedentemente archiviato. L'archivio disegni a sua volta costituisce la fonte principale di informazioni per i tecnici responsabili della generazione dei cicli di produzione che devono essere eseguiti sulle macchine disponibili nell'officina.

Generalmente i cicli produttivi sono memorizzati in appositi archivi elettronici da cui possono venire facilmente estratti e riprodotti su video proponendosi come suggerimento per la soluzione di problemi contingenti e rendendo quindi disponibile l'esperienza passata. L'area dei metodi di produzione è quindi responsabile delle informazioni contenute negli archivi di natura tecnologica e che comprendono non solo la disponibilità di macchine delle officine produttive e la rispettiva collocazione topografica (layout) ma anche la disponibilità di attrezzature di utensileria nonché dei cicli produttivi per ogni prodotto che viene eseguito in azienda.

Infine in un'azienda integrata dovrebbe esistere un terzo archivio in grado di contenere tutti i dati relativi alla gestione della produzione intesa in senso completo. Il calcolatore che utilizza questi archivi è quello che gestisce la produzione utilizzando come dati in ingresso i programmi produttivi generati dalle esigenze dei diversi mercati. In linea di massima gli archivi elettronici vanno dimensionati in modo dipendente dal numero di dati che devono ritenere tenendo anche in conto la possibilità di espansione modulare da utilizzare in caso di necessità.

Generalmente non è consigliabile avere un unico archivio che contiene tutte le informazioni aziendali perché ne risulta molto difficile la gestione e anche perché non è consigliabile avere tutti i dati tecnici della azienda in un unico punto. Ormai i calcolatori di medie dimensioni disponibili sul mercato sono in grado di gestire quantità impressionanti di informazioni e permettono di costituire sistemi integrati molto agili e decentrati. I dispositivi attuali permettono di realizzare sistemi che sono integrati dal punto di vista dell'unicità del sistema aziendale e sono decentrati dal punto di vista fisico e della responsabilità della gestione dei dati locali.

Come abbiamo già visto i programmi gestionali si differenziano da quelli tecnici, questi ultimi vanno divisi a loro volta fra quelli di progettazione e quelli dei metodi di produzione: ciascuno di questi segmenti utilizza programmi specifici.

1.5.1 Programmi per la gestione della produzione

La gestione della produzione costituisce un'attività per la quale da tempo sono disponibili numerose varietà di programmi. Ciò non significa che i programmi esistenti siano tutti soddisfacenti ma i tentativi di applicazione dei programmi esistenti a situazioni pratiche se, da una parte, hanno

evidenziato la necessità di ulteriori miglioramenti, dall'altra hanno dimostrato come si riveli fondamentale per il successo del tentativo, la permeabilità della cultura aziendale all'introduzione di questi nuovi dispositivi. I programmi più avanzati disponibili sono di tipo aperto, cioè non completi nei dettagli, ma vanno completati con tutte le esigenze specifiche richieste dall'applicazione che si sta studiando. Un programma completo in generale è in grado di gestire gli acquisti dei materiali necessari alla produzione di un dato prodotto, di lanciare la produzione in officina verificando il carico di lavoro delle macchine, di verificare infine l'avanzamento della produzione nel tempo. Questi programmi devono anche saper gestire le varianti generate da improvvise richieste dei mercati o dell'impossibilità di uso di un mezzo produttivo causata da un guasto improvviso; essi devono inoltre poter generare i dati necessari per il controllo dell'efficienza dell'officina e del costo del prodotto [1].

Sotto questo aspetto i programmi di gestione della produzione devono poter fornire dati agli altri programmi che gestiscono con i costi del prodotto i fatturati dell'intera azienda; ne scaturisce quindi un'ulteriore esigenza di compatibilità fra i programmi stessi. Oltre alla gestione vera e propria della produzione con i programmi citati possono essere posti sotto controllo anche tutti i parametri con cui si controlla l'efficienza dell'officina tramite la produttività, tramite i dati relativi all'utilizzo del macchinario, ecc.

Un altro obiettivo estremamente importante che è possibile in questo modo raggiungere è rappresentato dal controllo del capitale circolante direttamente connesso alla produzione. Infatti, con un uso accurato dei programmi di gestione della produzione il materiale da lavorare può arrivare nella fabbrica nella quantità corretta con un minimo intervallo di tempo in anticipo rispetto all'inizio della sua lavorazione, rendendo così minima la durata della scorta relativa di materiale grezzo sistemato nei magazzini di testa che, a rigore potrebbero essere eliminati.

Analogamente la produzione può essere lanciata al momento più favorevole rispetto al momento di impiego del prodotto finale minimizzando in tal modo l'entità del valore dei magazzini dei prodotti finiti. Infine l'analisi della durata del ciclo di lavoro deve consentire la valutazione critica sull'introduzione di innovazioni tecnologiche che possono ulteriormente ridurre il tempo di ciclo e il tempo solare di transito attraverso il sistema produttivo.

1.5.2 Programmi di contenuto tecnico (CAD, CAM, GT)

Abbiamo finora esaminato in modo generale i contenuti dei programmi che gestiscono la produzione. Esamineremo ora il contenuto dell'ultimo grande settore che abbiamo citato, quello relativo ai programmi tecnici con cui si genera il disegno di un particolare e si gestiscono i cicli di fabbricazione. Questi programmi sono in genere molto sofisticati e la loro comprensione richiede un minimo di attenzione.

Considerazioni generali (CAD)

Se si esamina il campo dei prodotti industriali si può osservare innanzitutto l'enorme varietà di forme realizzate. Andando da un asciugacapelli ad una automobile si presenta sempre il problema di descrivere la geometria degli oggetti non solo per le necessità tecniche relative al progetto degli attrezzamenti produttivi, ma anche per le necessità di verifica estetica necessarie al designer per la valutazione dell'aspetto dell'oggetto finale. Da queste considerazioni scaturiscono importanti deduzioni. Occorre poter ottenere le varie viste del prodotto proiettate sui piani ortogonali classici del disegno tecnico in modo tale da permettere al progettista delle attrezzature di svolgere il suo compito; occorre inoltre poter dotare le figure così ottenute di tutti i dati tecnici che ne costituiscono il classico corredo, dalle quote dimensionali alle note che definiscono le principali caratteristiche dei materiali usati, dei trattamenti termici o altro. Il tecnico progettista deve avere anche la possibilità di ricavare sezioni secondo piani qualsiasi dell'oggetto considerato per poter eseguire le necessarie verifiche dimensionali.

Ecco che allora il programma di designazione deve avere da un lato la possibilità di manipolare le curvature in modo tale da raggiungere la forma richieste dell'oggetto in studio, dall'altro quella di proiettare le immagini dell'oggetto, come se fosse sospeso nello spazio, sui piani cartesiani per poter ottenere le viste necessarie. Nell'eseguire questo processo il programma deve individuare le linee che nelle proiezioni risultano nel retro dell'oggetto e non farle comparire sulla proiezione a meno di non ricevere un ordine esplicito in questo senso.

Queste non semplici capacità del programma in genere presuppongono anche molte altre possibilità come, ad esempio, le trasformazioni speculari, le traslazioni nello spazio di interi settori del disegno iniziale e di deformazioni locali, l'identificazione di linee tangenti od ortogonali alla superficie in un punto dato. Inoltre il programma deve poter dedurre il volume dell'oggetto descritto e il suo peso una volta che sia nota la densità media del materiale che lo compone, la posizione del suo baricentro ed altre informazioni di carattere geometrico o pertinenti i campi della meccanica razionale che sono necessarie in molte applicazioni.

Abbiamo accennato in precedenza alla necessità di eseguire valutazioni estetiche sull'oggetto in fase di studio da parte del designer impegnato allo scopo. Per poter eseguire in modo totalmente soddisfacente dal punto di vista professionale questo compito il programma di designazione dell'oggetto deve possedere altre importanti caratteristiche. Una è rappresentata dalla capacità di muovere l'oggetto nello spazio presentandolo sotto punti di osservazione differenti in proiezioni che generalmente sono dotate di grande efficacia. Un altro importante strumento è dato dalla possibilità di gestire il colore dell'oggetto a piacimento entro determinate gamme, conferendo, se necessari, un colore diverso per ogni particolare per permettere una valutazione estetica di tutto l'insieme. Gli

effetti volumetrici sono poi resi più evidenti potendo ombreggiare automaticamente le zone opposte alla sorgente luminosa generando effetti di straordinario realismo.

Modellatori volumetrici (CAD)

Per descrivere gli oggetti i programmi di designazione si avvalgono di varie tecniche di modellazione. I cosiddetti modellatori volumetrici si pongono come obiettivo la descrizione di oggetti particolarmente predisposti alle classiche lavorazioni di asportazione di truciolo, tramite operazioni logiche compiute su volumi semplici ed elementari.

Queste operazioni sono del tipo:

- intersezione;
- unione;
- interferenza.

Analisi specifiche hanno permesso di stabilire che i particolari di meccanica, sotto l'aspetto della possibilità di descrizione con modellatori geometrici, sono suddivisibili in tre grandi categorie:

- Particolari (di classe A) descrivibili attraverso solidi elementari le cui primitive sono ortogonali fra di loro, cioè particolari costituiti da assi o spigoli paralleli agli assi coordinati.
- particolari (di classe B) descrivibili con gli elementi di cui al punto precedente, ma anche attraverso solidi elementari le cui primitive possono anche non essere ortogonali.
- particolari (di classe C) descrivibili con gli strumenti di cui ai punti precedenti, ma con l'aggiunta di primitive cosiddette sculturale perché non assimilabili a forme geometriche descrivibili esattamente con equazioni.

Ad esempio, un esame effettuato su un campione limitato di particolari meccanici presi dall'industria manifatturiera dell'autocarro ha riscontrato che la distribuzione dei particolari è circa la seguente:

- 1) particolari di classe A 65%
- 2) particolari di classe B 15%
- 3) particolari di classe C 20%

Inoltre si è potuto verificare, durante la stessa ricerca, che i particolari ottenuti attraverso operazioni di tornitura appartengono alla classe di bassa complessità geometrica e sono generalmente descrivibili con poche primitive, viceversa i particolari ottenuti tramite operazioni di fresatura possono essere complessi e appartengono anche alla classe C contraddistinta dal fatto di possedere anche superfici sculturale. In genere la complessità del particolare in esame viene descritta non solo dalla classe di appartenenza ma anche dal numero di primitive geometriche elementari e di operatori necessari.

Le primitive sono raccolte in due grandi categorie:

- 1) costituite da forme geometriche elementari
- 2) costituite da forme racchiuse da superfici di tipo sculturato.

Le primitive di tipo 1) sono generalmente:

- parallelepipedi
- cilindri
- cunei
- sfere
- tori

e possono a loro volta essere ortogonali o no, cioè orientate comunque nello spazio rispetto agli assi di riferimento.

Descrizione di superfici (CAD)

A differenza dei modellatori puramente volumetrici i modellatori di superfici trattano direttamente le linee e le superfici che si appoggiano ai volumi da descrivere. L'identificazione di linee e di superfici non geometriche richiede l'impiego di strumenti matematici complessi che hanno oggi raggiunto un grado di sviluppo soddisfacente. I programmi sono costruiti in modo tale da permetterne l'utilizzo anche da parte di persone che non devono comprendere come è costruito il sistema operativo e come opera, ma che devono solamente apprendere il significato dei comandi [1].

In genere le superfici possono essere identificate in modo diverso, cioè come riempimento di una curva di contorno, oppure come spostamento di un segmento di curva secondo traslazioni anche complesse come superfici di rivoluzione intorno ad un asse, come superfici di raccordo fra due altre date e così via. In definitiva questo genere di modellatori è costituito da dispositivi matematici molto complessi che però possono essere utilizzati in modo relativamente semplice.

Riassumendo, potremmo dire che una superficie può essere descritta in vari modi con l'ausilio di modellatori geometrici se la superficie è relativamente semplice e costruibile come somma logica di superfici geometriche più semplici, oppure può essere descritta tramite linee o superfici vere e proprie quando l'oggetto in esame non possiede una geometria semplice e comunque non esprimibile tramite equazioni.

Al di là di queste caratteristiche strumentali per la descrizione delle superfici tutti i modellatori possiedono incorporata la possibilità di fornire il valore delle caratteristiche fisiche dell'oggetto considerato (volume, peso, ...). Inoltre tutti i modellatori più evoluti sono dotati della possibilità di ruotare l'oggetto in studio, di colorarlo, di lumeggiarlo per poter effettuare considerazioni di carattere prevalentemente estetico.

Cicli di lavorazione (CAM, GT)

Per poter realizzare in forma sistematica i programmi di lavorazione oggi è disponibile una serie di strumenti che comprendono anche la Group Technology (GT). L'introduzione di questa tecnica è avvenuta partendo dalla constatazione che i particolari che sono generalmente prodotti, pur nella enorme varietà di forme e dimensioni, sono raggruppabili in famiglie di forme base omogenee in cui è preponderante un insieme di parametri elementari. Si può facilmente constatare che l'incremento del numero di prodotti, costante nel tempo, non corrisponde all'incremento del numero delle famiglie di forme che tende a raggiungere un livello massimo. Questa constatazione è molto importante e ricca di conseguenze perché sta a significare che anche i cicli produttivi saranno conseguentemente raggruppabili in famiglie connesse alle corrispondenti famiglie di forme geometriche. Il processo di identificazione delle famiglie di appartenenza di un particolare non è semplice da realizzare se si pensa di eseguirlo manualmente; oggi però anche questo processo è realizzabile tramite calcolatore utilizzando programmi interattivi dedicati a questo scopo.

Lo stesso si può dire per il ciclo di fabbricazione del prodotto che dipende dalle macchine esistenti in officina, dalle attrezzature e dalla utensileria. Questi cicli base vanno inizialmente studiati e successivamente conservati in un archivio elettronico che viene via via arricchito con l'introduzione di nuovi cicli o di nuove possibilità determinate dall'acquisto di nuove macchine. Praticamente, in archivi come questi viene a risiedere realmente tutto lo scibile tecnologico dell'azienda interessata. Questo patrimonio risiederà quindi non più nella memoria o nei libretti tascabili di uomini spesso gelosi del proprio sapere, ma costituirà realmente una ricchezza aziendale cui può attingere anche il tecnico neoassunto, il quale ha quindi immediatamente a disposizione lo stato dell'arte aziendale.

Con riferimento anche ai paragrafi precedenti occorre ancora citare la possibilità, attualmente in possesso dei programmi descrittivi di oggetti, di selezionare e descrivere anche il processo dell'eventuale ciclo di asportazione di truciolo che identifica la fase più propriamente esecutiva nella fabbricazione dell'oggetto. In questa fase il programma, utilizzando archivi generati ad esempio con le tecniche GT, è in grado di simulare il processo come se il medesimo fosse eseguito sulla macchina reale le cui caratteristiche sono state rese note al calcolatore. Gli utensili e le caratteristiche del ciclo tecnologico sono state suggerite al calcolatore o il calcolatore stesso le ha individuate in una libreria di cicli scegliendo quello più simile al problema tecnologico in simulazione in quel momento. Con questa possibilità, la simulazione del percorso del centro dell'utensile viene visualizzata su video o su plotter in modo tale da permettere un esame critico da parte del progettista che può intervenire in ogni momento per introdurre modifiche su ogni parametro interessato al processo e che comunque deve dare il benestare definitivo a quanto il calcolatore suggerisce, rendendolo così operante al momento in cui sarà richiesto dai reparti

produttivi. La realistica simulazione del ciclo di asportazione di truciolo viene anche arricchita da altre informazioni necessarie alla valutazione del ciclo stesso. Infatti è reso immediatamente disponibile il valore del tempo totale del ciclo che può essere ripetuto con simulazione di percorsi alternativi per poterne ottimizzare la durata a parità di altre condizioni. Il calcolatore è in grado di utilizzare nella simulazione di operazioni di sgrossatura utensili diversi da quelli usati nelle operazioni di finitura.

In definitiva, l'insieme dei programmi di gestione della forma di un particolare e di gestione dei cicli di produzione costituisce un armonico gruppo di strumenti di lavoro che permette di risolvere tutti i problemi connessi con la progettazione di un pezzo, con lo studio del suo ciclo di fabbricazione e, infine, col lancio della produzione.

1.5.4 Programmi di simulazione della produzione

In precedenza abbiamo esaminato brevemente la possibilità di gestire la produzione tramite calcolatori che programmino la fabbricazione dei particolari con una visione generale delle risorse e dei vincoli dell'officina. Vediamo ora come sia possibile valutare l'efficacia di un ciclo produttivo non solo quando viene realizzato su risorse dedicate ma anche, e specialmente, quando il ciclo in essere condivide le risorse con altri cicli produttivi. Il problema è generalmente complesso perché sullo stesso gruppo di macchine viene prodotto un insieme di particolari, non uno solo, con cicli di diversa lunghezza e complessità in cui le singole operazioni elementari possono alle volte succedersi in una sequenza diversa, pur ottenendo lo stesso prodotto finale.

Il problema di gestire la produzione in modo analitico, cioè cosa far fare alle macchine in un determinato periodo di tempo, è sempre stato risolto basandosi sul buon senso e l'esperienza degli addetti al controllo della produzione e dei responsabili operativi delle officine.

In genere però questo tipo di soluzione porta a costituire sensibili scorte di particolari, in corso di lavorazione e finiti, con cui i responsabili si cautelano a causa dell'impossibilità umana di comprendere in un unico colpo d'occhio l'intreccio delle singole operazioni elementari che si devono svolgere per produrre i lotti richiesti. La difficoltà di valutazione eseguita a colpo d'occhio è resa più difficile dal fatto che il tempo solare di produzione di un determinato lotto viene a essere relativamente lungo per il sovrapporsi di più cicli operativi interessanti particolari diversi. In genere inoltre la priorità richiesta per un particolare a causa di una esigenza improvvisa genera lo sconvolgimento di tutto il settore interessato con conseguente rallentamento della produzione degli altri particolari.

Anche per questo settore però sono stati sviluppati appositi simulatori con cui è possibile a tavolino verificare l'intreccio della produzione di diversi particolari sullo stesso parco macchine generando l'ottimizzazione non della produzione di un solo particolare ma di tutti i lotti interessati.

Ottimizzazione può significare la riduzione al minimo del tempo solare di transito di ogni lotto attraverso il sistema produttivo e la minimizzazione delle scorte dei semilavorati.

Anche la durata di permanenza delle scorte di prodotti finiti può essere resa minima dal fatto che la conoscenza precisa dell'intreccio dei cicli produttivi permette di iniziare la produzione di ogni lotto al momento che rende minima la durata di sosta del lotto completato in attesa dell'utilizzo.

I simulatori del processo produttivo sono generalmente di due tipi: uno di tipo deterministico e uno di tipo statistico. I simulatori del primo tipo ripetono i veri e propri cicli di produzione a velocità molte volte superiore a quella del ciclo effettivo. In questo modo i dati risultanti sono molto precisi ed hanno anche valore i dati intermedi rispetto al periodo di produzione simulato. Questi programmi di simulazione vanno alimentati con le informazioni relative al parco macchine utilizzato dalla produzione dei lotti interessati e dalla reciproca intercambiabilità.

Per ogni macchina va pure fornito il dato concernente l'utilizzazione possibile della macchina stessa dovuta all'incidenza dei guasti o alla assenza di personale specializzato. Per ogni particolare lavorato col parco macchine descritto va fornito inoltre il ciclo totale di produzione riportante l'indicazione del tempo richiesto per ogni operazione elementare eseguita su ogni macchina.

Il calcolatore elabora tutti i dati forniti e completati con l'entità dei lotti di produzione per ogni particolare in esame e fornisce per ogni momento desiderato molti dati tra cui lo stato operativo in cui si viene a trovare ogni macchina o, inversamente, la produzione eseguita fino a quel momento. Inoltre, spesso questi simulatori sono forniti della possibilità di visualizzare fisicamente sul video terminale e in ogni istante le singole macchine in lavoro con l'indicazione delle lavorazioni in corso nel momento in esame.

I simulatori del tipo statistico seguono una logica del tutto diversa con un risultato più impreciso per quanto riguarda, per esempio, la valutazione dei tempi solari di transito di un lotto di produzione attraverso il parco macchine interessato. Questa imprecisione è comunque contenuta in pochi punti percentuali ma tutto il processo di simulazione viene compiuto in un tempo molto più breve di quello impiegato dai simulatori del primo tipo. Entrambi i simulatori, come d'altra parte indica lo stesso termine, sono in grado di simulare la produzione al variare dell'entità dei lotti, dei parametri di utilizzazione, o della varietà delle macchine costituente il parco considerato. Quest'ultima particolarità è molto interessante perché permette di valutare l'effetto delle innovazioni tecnologiche e stimolare l'acquisto di nuove macchine in sostituzione di altre macchine esistenti.

Normalmente questo genere di simulazione, che potremo definire strategico, è meglio eseguibile con i simulatori di tipo statistico che permettono di valutare in modo estremamente rapido gli effetti dovuti alle varianti del parco macchine adottato. La verifica finale della soluzione ottima preciso. Un altro evidente vantaggio consiste nell'individuare quali sono le macchine che costituiscono i

“colli di bottiglia” nella campagna di produzione considerata. Se le macchine evidenziate si propongono come “colli di bottiglia”, in ogni variante occorrerà provvedere a modificare la struttura del parco macchine, che dimostra di non essere più adeguato a smaltire il lavoro nella quantità e nelle varianti richieste.

Capitolo 2: Prototipazione virtuale

La prototipazione virtuale è una metodologia operativa che impiega le tecniche di modellazione e di simulazione numeriche per sviluppare un prodotto in modo da ridurre (o addirittura evitare) la costruzione di prototipi fisici e quindi risparmiare tempi e costi. In sostanza, il prototipo virtuale di un generico sistema meccanico è un modello numerico che contiene il maggior numero possibile delle informazioni di prodotto e di processo necessarie alla sua realizzazione e anche, ricorrendo a tecniche di realtà virtuale, alla sua valutazione estetica e, se del caso, ergonomica.

L'uso della prototipazione virtuale durante la fase di sviluppo di un prodotto è stato finora ostacolato, oltre che dalle difficoltà per modellare correttamente la realtà e dalla limitata circolazione di informazione soprattutto presso le PMI, anche da limiti oggettivi quali:

- risorse computazionali costose;
- scarsa integrazione degli strumenti software (si pensi, ad esempio, alla mole di lavoro generalmente richiesta per passare dal modello CAD, completo di tutti i dettagli di lavorazione, al modello Elementi Finiti che, in generale, deve esserne privo).

Superata la barriera derivante dalle risorse computazionali richieste grazie alla potenza a basso costo dei PC attuali, anche il problema della condivisione del modello con i vari strumenti software utilizzati per le simulazioni dei vari stadi di sviluppo del prodotto è in gran parte risolto, restando solo da valutare il grado di efficienza tra le tecniche (o meglio, “filosofie”) di interscambio dati oggi disponibili.

2.1 Gli strumenti della prototipazione virtuale

Trascurando la Realtà Virtuale, l'impostazione della tecnica di prototipazione virtuale per sistemi meccanici si compone di tre classi di strumenti di base che devono essere ben integrati tra loro:

- sistema CAD con modellatore geometrico tridimensionale;
- sistema di simulazione del prodotto;
- sistema di simulazione dei processi.

Il CAD 3D

Il CAD tridimensionale consente di definire il modello geometrico che è alla base di tutte le attività successive. Un modellatore efficiente deve soddisfare almeno questi requisiti fondamentali:

- consentire la descrizione, senza ambiguità, della geometria dell'oggetto;
- catturare, in maniera non ambigua, l'intento dell'operatore CAD;
- consentire la modellazione guidata da variabili (variable driven modeling), in maniera tale che dopo ogni modifica introdotta sia possibile rigenerare automaticamente il modello;

- supportare il concetto di associatività, ciò che consente la propagazione automatica delle modifiche apportate in un dato stadio di sviluppo (es. nel CAD) a tutte le altre fasi (es. fabbricazione) costituenti il ciclo di sviluppo del prodotto.

La modellazione solida, parametrica, basata su feature, è lo strumento di modellazione che consente più di ogni altro, allo stato attuale, di soddisfare i requisiti sopra elencati.

Gli strumenti di simulazione del prodotto

Questi strumenti, che consentono di simulare il comportamento fisico del modello geometrico realizzato con il CAD 3D, nel caso specifico del sistema meccanico oggetto di benchmark sono:

- simulatore cinetodinamico
- software Elementi Finiti

L'analisi cinetodinamica multibody di un meccanismo è basata sulla formulazione e soluzione di un sistema di equazioni differenziali accoppiate a equazioni algebriche vincolari di cui generalmente non è possibile trovare la soluzione in forma chiusa. Il codice di calcolo, noti i vincoli, le proprietà di massa e i carichi esterni, consente di valutare le reazioni vincolari e le forze di inerzia agenti sui membri del meccanismo.

Appare chiaro che per soddisfare i requisiti della prototipazione virtuale, il simulatore deve fornire non solo la soluzione numerica delle equazioni di moto, ma deve anche essere in grado di:

- realizzare le analisi senza necessità di ricostruire il modello;
- supportare, mediante la ricognizione della geometria del modello CAD, l'automazione delle attività di scrittura delle equazioni di moto (masse, momenti di inerzia, ecc.);
- supportare, mediante la ricognizione dei vincoli posti nel CAD durante l'assemblaggio, l'automazione delle attività di scrittura delle equazioni vincolari o comunque permetterne la definizione mediante approccio grafico;
- supportare il concetto di associatività e variable driven modeling;
- realizzare analisi di collisioni;
- fornire i risultati come simulazione realistica.

I risultati delle simulazioni cinetodinamiche definiscono, insieme ai vincoli ed alle forze esterne, le condizioni al contorno per le analisi agli Elementi Finiti sui componenti del meccanismo. Per essere usati come strumenti di prototipazione virtuale anche questi software devono avere, oltre alle caratteristiche classiche (qualità del solutore, tipi possibili di analisi, metodi di convergenza, algoritmi di generazione di elementi (mesh), possibilità di sottomodellazione o ottimizzazione, ecc.), requisiti specifici per:

- realizzare le analisi senza necessità di ricostruire il modello;

- supportare la possibilità di importare le condizioni al contorno dal simulatore cinematico;
- supportare il concetto di associatività e variable driven modeling.

Gli strumenti di simulazione dei processi

Gli strumenti di simulazione dei processi sono tutte quelle applicazioni che consentono di modellare i procedimenti tecnologici necessari alla realizzazione del prodotto: ad esempio per un gruppo composto da parti ottenute per fusione di leghe metalliche, per stampaggio di materie plastiche e per asportazione di truciolo, sarà necessario disporre di software che consentano di realizzare analisi di castability, moldability e di generare percorsi utensili e programmi NC.

Anche tali applicazioni devono essere in grado di:

- realizzare le analisi senza necessità di ricostruire il modello;
- supportare il concetto di associatività e variable driven modeling.

2.2 Problemi di base della prototipazione virtuale

Il prototipo virtuale è stato definito come un modello numerico contenente tutte le informazioni di prodotto e di processo generate dai software utilizzati nelle diverse fasi di progettazione e di sviluppo. Ciò comporta un'organizzazione della progettazione ben definita e strutturata che si appoggia, in primo luogo, su un sistema di programmi in grado di garantire:

- l'unicità del modello costituente il prototipo virtuale: tutte le applicazioni devono accedere ad un unico modello numerico, sia per limitare il costo in termini di modellazione e occupazione di memoria sia per evitare definizioni ridondanti di dati;
- l'accesso al modello numerico da parte delle varie applicazioni: sebbene il database debba essere unico, non necessariamente le varie applicazioni devono utilizzare il modello numerico completo per le loro analisi (ad esempio informazioni geometriche di dettaglio come smussi, raccordi, ecc. sono del tutto inessenziali in analisi cinetodinamiche, ma fondamentali quando si utilizza un CAM). Sorge dunque la necessità di estrarre dal modello numerico del prototipo virtuale, dei "sottomodelli", qui intesi come modelli "parziali" contenenti solo le informazioni necessarie alle varie analisi;
- l'associatività tra modello e sottomodelli: ogni modifica introdotta sul modello numerico completo si deve ripercuotere su tutti i sottomodelli utilizzati nelle varie analisi e viceversa;
- la congruenza tra i modelli utilizzati: tutte le applicazioni, nello stesso istante di tempo, devono avere accesso alla medesima e più recente versione del prototipo virtuale.

A questi aspetti di gestione del modello di prototipo virtuale si aggiunge, in vista dell'ottimizzazione spinta del processo progettuale, l'opportunità di riorganizzare le attività avendo particolare riguardo alla gestione dei documenti (file, report, archivi, ecc.) legati alle varie fasi di creazione e sviluppo del prodotto.

È di grande importanza, infine, tenere sempre ben presente che gli strumenti software per la prototipazione virtuale, molto spesso dotati di interfacce verso l'utente sempre più "amichevoli", allargano il bacino di utenza delle analisi numeriche spinte anche a operatori non specialisti. Ciò naturalmente è un rischio non indifferente, dal momento che i sistemi software non riconoscono la cultura di chi li usa e che vale il principio "garbage in, garbage out". Quindi è indispensabile che l'utente di questi strumenti abbia in primo luogo una solida cultura tecnica di base oltre che un'adeguata formazione specifica.

D'altra parte esisteranno sempre molte difficoltà a definire con precisione il comportamento di gran parte dei sistemi fisici e quindi a ottenere buoni modelli: allora può diventare utile l'esperienza, grazie alla quale si possono definire procedure guidate per alcune attività quali la modellazione geometrica, la scelta e la generazione degli elementi finiti, la schematizzazione dei vincoli, i criteri di analisi dei risultati e quindi di validazione del modello.

Capitolo 3: Impiego del CAD nella realtà aumentata e virtuale

Lo sviluppo dei sistemi CAD e della loro interfaccia uomo-macchina (HMI) ha portato alla realizzazione di ambienti semi-immersivi e completamente immersivi (multi-schermo) per la visualizzazione e l'interazione completamente tridimensionale. Tali strumenti costituiscono la frontiera della simulazione ingegneristica. In questi ultimi tempi sono state sviluppate competenze nel campo della visualizzazione avanzata attraverso la progettazione e l'utilizzo di vari sistemi di Realtà Virtuale e Realtà Aumentata. A tale scopo, sono stati realizzati numerosi programmi per l'integrazione di motori ad elementi finiti con interfacce virtuali e per la modellazione di superfici in 3D attraverso algoritmi innovativi di contatto curva-superficie.

Un esempio di questi sviluppi è un sistema di addestramento di operatori meccanici (che può essere altrimenti utilizzato durante interventi di manutenzione o montaggio interattivi) basato su un apparato di visione personale (Augmented Reality) in grado di riconoscere gli oggetti esterni e di sovrimporre immagini virtuali sincronizzate alla visione reale come in Fig. 3.1. Il metodo permette di eseguire assemblaggi di componenti meccanici in un assieme ricevendo, in tempo reale, informazioni sulla validità di quanto eseguito ed, eventualmente, messaggi di errore e suggerimenti di correzione.



Figura 3.1 Applicazioni di realtà aumentata nell'assemblaggio di componenti meccanici

3.1 Realtà Aumentata (AR)

E' in corso una notevole attività nello sviluppo di software per la realtà aumentata. Si tratta di sistemi che permettono la sovrimpressione di immagini virtuali sincronizzate alla visione reale. Possibili applicazioni sono la manutenzione ed il montaggio interattivi con la possibile comparsa di istruzioni e suggerimenti per l'operatore direttamente sul campo. Sono molto indicati anche per l'addestramento "on work" garantendo una riduzione di tempi e costi per le aziende. La AR aumenta la scena del mondo reale in modo che l'utente mantenga comunque un senso di presenza in tale mondo, mira ad arricchire la realtà di informazioni utili per l'espletamento di compiti

complessi. Scopo di AR è di migliorare la percezione del mondo e le prestazioni di un operatore, invece dal punto di vista tecnologico l'obiettivo è la creazione di un sistema in cui non si noti la differenza tra il mondo reale e l'arricchimento virtuale.

3.2 Realtà virtuale (VR)

E' il termine utilizzato per indicare una realtà simulata, anche se, a livello teorico, la realtà virtuale potrebbe essere costituita attraverso un sistema totalmente immersivo in cui tutti i sensi umani possono essere utilizzati (più specificamente realtà virtuale immersiva o RVI), attualmente il termine è applicato solitamente a qualsiasi tipo di simulazione virtuale creata attraverso l'uso del computer e delle applicazioni che richiedono l'uso degli appositi guanti muniti di sensori (wired gloves).

La realtà virtuale, per sua stessa definizione, simula la realtà effettiva. La tecnologia oggi ha raggiunto livelli impensabili qualche anno fa. La VR non mira a ricostruire la realtà, ma mira piuttosto a convincere un utente di essere nella realtà, affinché possa svolgere con naturalezza il compito (task) che gli è stato assegnato. È infatti possibile navigare in ambientazioni foto-realistiche in tempo reale, interagendo con gli oggetti presenti in esse. La realtà virtuale immersiva (un ambiente costruito intorno all'utente) secondo il livello tecnologico attuale e secondo le previsioni possibili per il prossimo futuro potrà essere utilizzata dalla massa grazie ad alcune periferiche come descritto in Fig. 3.2:

- *visore*: un casco o dei semplici occhiali in cui gli schermi vicini agli occhi annullano il mondo reale dalla visuale dell'utente. Il visore può inoltre contenere dei sistemi per la rilevazione dei movimenti, in modo che girando la testa da un lato, ad esempio, si ottenga la stessa azione anche nell'ambiente virtuale.
- *auricolari*: trasferiscono i suoni all'utente.
- *wired gloves (guanti)*: i guanti rimpiazzano mouse, tastiera, joystick, trackball e gli altri sistemi manuali di input. Possono essere utilizzati per i movimenti, per impartire comandi, digitare su tastiere virtuali, ecc.
- *cybertuta - una tuta che avvolge il corpo*: può avere molteplici utilizzi: può simulare il tatto flettendo su se stessa grazie al tessuto elastico, può realizzare una scansione tridimensionale del corpo dell'utente e trasferirla nell'ambiente virtuale.

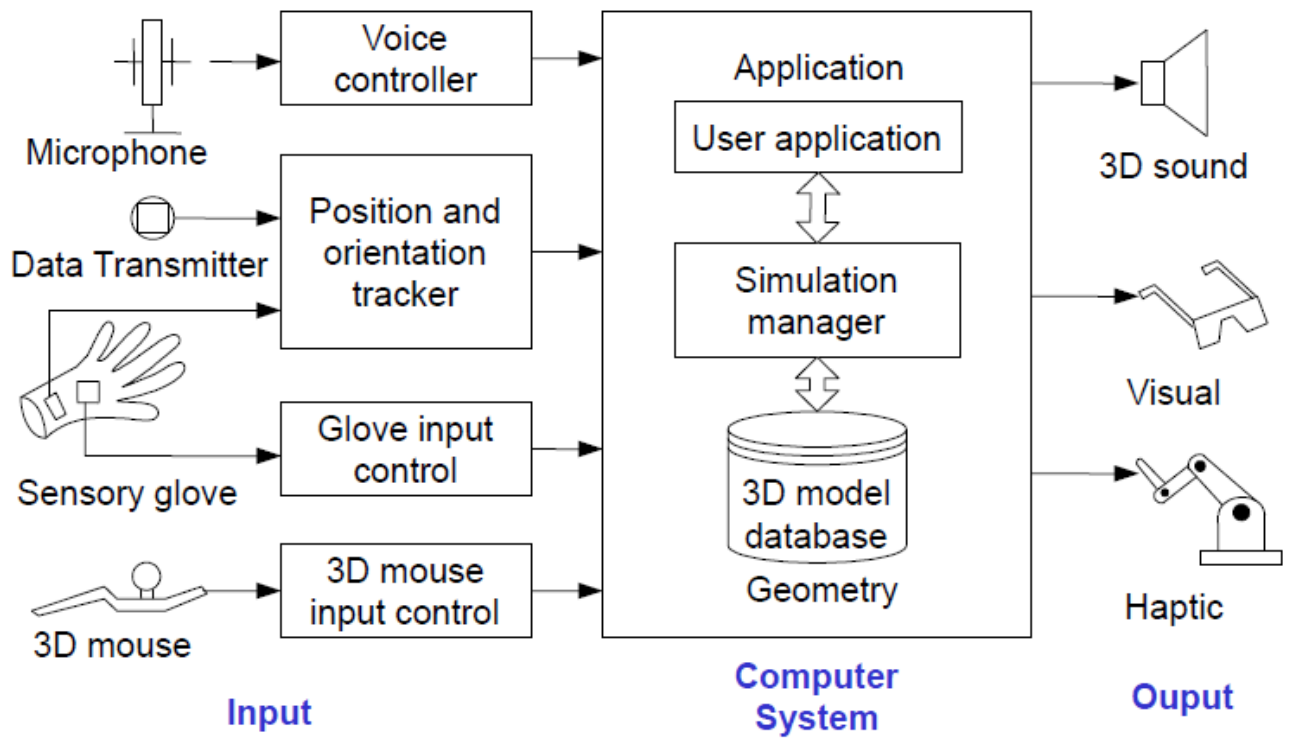


Figura 3.2 Configurazione ed componenti di un sistema VR

Capitolo 4: Integrazione avanzata tra CAD e CAPP

Lo sviluppo di nuovi prodotti è il primo obiettivo da perseguire per aumentare la competitività sul mercato. Le imprese che sono capaci di sviluppare, produrre e introdurre nuovi prodotti tenendo conto della varietà, del prezzo, della qualità e del time-to-market, hanno un ruolo di rilievo nel mercato. La globalizzazione dei mercati esalta la competitività, spingendo le aziende ad aumentare la qualità delle diverse fasi del processo con una sempre maggiore specializzazione delle attività interne o con il ricorso all'esterno quando questo non sia fattibile.

Quindi un'impresa dopo aver valutato le richieste del mercato individua il modello produttivo di riferimento e analizza il sistema di pianificazione e controllo.

Tale sistema è conseguenza del modello produttivo adottato: nel caso di modello *make to stock*, che prevede la presenza di scorte di prodotto finito per assecondare la pronta consegna, il sistema di pianificazione governa il processo di trasformazione controllando i prodotti finiti; nel caso *assembly to order*, che permette di offrire le personalizzazioni più spinte sulla esigenza del cliente finale, la pianificazione controlla i componenti necessari per l'assemblaggio in funzione delle previsioni e degli ordini del cliente tenendo conto della capacità produttiva del montaggio finale.

Il sistema di pianificazione e controllo è strettamente connesso alla gestione dei materiali, che è una delle problematiche delle imprese manifatturiere. La letteratura propone due logiche opposte: la logica push e la logica pull. La prima è detta anche *a fabbisogno* ed è stata considerata la soluzione ottimale per ridurre le scorte presenti nel sistema produttivo, stabilendo, a partire delle previsioni, i materiali necessari attraverso la distinta base. L'esperienza dei nostri giorni ha constatato che i risultati non sempre sono stati in linea con le attese: lo scostamento della realtà dalle previsioni, l'imprecisione delle previsioni degli approvvigionamenti, hanno fatto sì che i flussi produttivi siano soggetti a colli di bottiglia.

La logica pull ha avuto al contrario una notevole diffusione grazie all'affermazione di tecniche Just-in-Time (JIT) e Kanban, e l'introduzione di scuole di pensiero come la Lean Production.

Tale logica consente l'avanzamento del flusso produttivo secondo quanto richiesto dal cliente e non secondo quanto stabilito dall'ufficio programmazione della produzione. La logica "cliente fornitore" considera i processi collegati tra loro e ciascuno di essi è interpretato come "cliente" del processo a monte e come "fornitore" del processo a valle. In questa ottica il cliente deve richiedere il materiale di cui ha bisogno per soddisfare le richieste del processo che si trova a valle, senza bisogno di ricorrere alle previsioni. La logica è molto semplice e garantisce un livello costante di materiale presente nel sistema: tale livello è determinato dal dimensionamento dei buffer dislocati nel processo produttivo.

Il tempo richiesto dal mercato, il tempo di attraversamento, la stabilità dei consumi, il costo dei

materiali sono parametri di progetto che devono essere attentamente valutati per progettare il sistema di pianificazione e controllo e le regole di gestione dei materiali.

Dal punto di vista della Lean Production, l'obiettivo dell'impresa diviene quello di generare "valore per il cliente", più precisamente la creazione delle caratteristiche possedute dal prodotto che consentono di soddisfare le esigenze del cliente.

La competitività delle imprese deve essere giocata su fattori quali l'elevato livello di qualità e di servizio su prodotti innovativi a costi sempre più contenuti, quindi accanto all'innalzamento degli standard di performance appare fondamentale l'offerta di prestazioni legate al servizio al cliente, come il tempo di consegna, l'affidabilità delle consegne, l'innovazione dei prodotti e il servizio post vendita. Il "tempo" come fattore di competitività sta diventando sempre più importante, sia con riferimento al tempo di risposta al mercato che alla capacità di innovare rapidamente i prodotti. La riduzione dei tempi di ideazione, progettazione e industrializzazione dei prodotti consente di inserire in essi un maggiore numero di innovazioni tecniche e di immetterli sul mercato in anticipo rispetto ai concorrenti.

Le prestazioni che oggi sono richieste e che debbono essere raggiunte e migliorate continuamente in modo congiunto sono: i costi totali, la qualità, la tempestività delle consegne, l'affidabilità delle consegne, la rapidità di introduzione di nuovi prodotti, la flessibilità al mix e ai volumi.

Il cliente finale non è disposto a pagare un prezzo superiore al valore che riconosce al prodotto. Questo significa che alti costi determinati dall'elevata movimentazione, dalle scorte, dagli scarti, dalle attese non costituiscono una giustificazione per un prezzo elevato del bene, semplicemente perché non generano valore percepito dal cliente finale. Quindi l'azienda deve rivolgere l'attenzione all'eliminazione degli sprechi che generano costi superflui non giustificabili agli occhi del cliente. La qualità presenta due aspetti fra loro strettamente connessi: le caratteristiche e le prestazioni dei prodotti, e l'aderenza del prodotto alle specifiche del cliente.

Anche per quanto riguarda le consegne, si distinguono due tipi di prestazioni: il tempo di consegna e l'affidabilità delle consegne nel rispetto delle date pattuite.

La rapidità di introduzione di nuovi prodotti riguarda numerosi aspetti: il tempo di sviluppo e progettazione di questi, e quello relativo all'inserimento di modifiche ai prodotti esistenti.

La flessibilità, fa riferimento alla capacità di modificare in tempi rapidi e a costi bassi il volume di produzione e il mix dei prodotti.

4.1 Necessità di flessibilità, automazione e integrazione

L'automazione dei processi di produzione è un passaggio fondamentale per la crescita delle imprese manifatturiere. L'incremento della produttività, la riduzione del costo del lavoro, la diminuzione dei tempi di produzione e il miglioramento della qualità del prodotto, sono tutte ragioni di ordine economico per sostituire l'uomo con la macchina, automatizzando in modo crescente i processi di produzione. L'automazione riguarda due tipi di produzione, quella per processo caratterizzata da cicli tecnologici ben definiti e vincolati, e quella manifatturiera caratterizzate da un'ampia varietà dei cicli tecnologici che comprendono le sotto-fasi di fabbricazione (insieme di lavorazioni che modificano la forma, le dimensioni o lo stato superficiale di parti singole) e il montaggio (insieme delle operazioni di collegamento di parti singole per formare un assieme).

I principali componenti necessari per l'automazione delle produzioni manifatturiere sono le macchine operatrici programmabili, i sistemi di trasporto, manipolazione e immagazzinamento programmabili e la rete informatica di collegamento fra gli uni e gli altri. La variabilità dei mercati ha posto in dubbio la praticabilità economica di realizzare linee dedicate per prodotto, le *transfer line*, che consentono una facile automazione della produzione. Si parla infatti di "automazione rigida" in quanto la transfer line non è in grado di lavorare pezzi diversi da quello per cui è stata progettata. I settori non caratterizzati da produzioni di grande serie sono rimasti a lungo esclusi dalla possibilità di automazione dei loro processi. Per essi il principale ostacolo all'automazione era rappresentato dai bassi volumi unitari di produzione, per i quali non si giustificava economicamente l'impiego di macchine costose ad alta produttività: l'automazione rigida non era perciò la soluzione corretta al loro problema. Solo con la nascita del concetto di automazione flessibile è potuta iniziare la fase di automazione di questi processi.

Per flessibilità si intende la capacità che ha un sistema produttivo di lavorare parti diverse e di adattarsi in tempi limitati ad una modifica delle parti stesse; la flessibilità diventa dunque l'esigenza primaria di quelle aziende che lavorano un numero elevato di differenti parti meccaniche, ciascuno con volumi produttivi limitati e soggetti a frequenti modifiche.

Perciò l'obiettivo competitivo che oggi ci si pone è quello di riuscire a recuperare con la struttura cellulare dei sistemi di automazione flessibile, le caratteristiche di efficienza e controllabilità delle produzioni in serie o continue, eseguite con organizzazioni delle macchine a catena, senza perdere del tutto le caratteristiche di elasticità e flessibilità delle produzioni a piccoli lotti, eseguite con organizzazioni delle macchine per reparto o job shop. La soluzione integrata è costituita dai Sistemi Flessibili di Produzione (FMS), mentre per i montaggi si parla di Sistemi Flessibili di Assemblaggio (FAS). Un sistema flessibile di produzione è un impianto che realizza una gestione integrata del flusso dei materiali e delle informazioni. Il flusso integrato dei materiali è realizzato grazie alla

presenza di un insieme di macchine operatrici integrate e collegate fra di loro da adatti sottosistemi di trasporto e manipolazione. Il flusso integrato delle informazioni è realizzato grazie alla presenza di un sistema software che controlla e coordina l'attività dei sistemi di governo autonomi delle macchine e dei dispositivi componenti [2].

I sistemi FMS fanno parte del sistema di fabbricazione ad alto tasso di automazione con tecnologia integrata che viene denominata Computer Integrated Manufacturing, (CIM).

Quindi possiamo esprimere il CIM come l'integrazione tra i sistemi di automazione industriale ed i sistemi informativi, al fine di gestire in modo ottimale la totalità del processo manifatturiero, dalla progettazione, alla produzione alla fase di gestione e pianificazione.

4.2 Le fasi del processo manifatturiero

Nei sistemi produttivi manifatturieri è in atto un'evoluzione tecnologica, che ha portato dei cambiamenti nei settori industriali. Tale progresso si sviluppa in tre fasi: la fase di progettazione, la fase di produzione e la fase di gestione e pianificazione.

4.2.1 La fase di progettazione

La fase di progettazione ha iniziato ad utilizzare avanzati strumenti software per le procedure di calcolo strutturale automatico per arrivare al completo utilizzo delle tecniche CAD (Computer Aided Design) con modellazione solida. Il CAD può essere definito come l'uso del computer per aiutare il disegno meccanico nel creare, modificare e documentare i modelli geometrici dei particolari. Il CAD è associato ad un sistema interattivo grafico di computer. L'oggetto del disegno è rappresentato nella forma di modelli geometrici. La modellazione geometrica è concepita con l'uso di un sistema CAD per sviluppare una descrizione matematica della geometria dell'oggetto.

4.2.2 La fase di produzione

L'impiego del computer nella fase di fabbricazione di un prodotto viene indicato con il termine Computer Aided Manufacturing(CAM). Esso permette di programmare in modo semplice ed in tempi contenuti percorsi di lavorazione complessi, agendo in tempo reale sulla movimentazione e il controllo degli impianti automatizzati di produzione. Un software di tipo CAM importa da un software di tipo CAD le informazioni geometriche relative al pezzo da realizzare. A partire dal grezzo e da percorsi utensile definiti dall'utente, il CAM consente di descrivere la sequenza di operazioni che deve essere eseguita da macchine utensili come fresatrici, tornitrici, ecc.. Tale sequenza può allora essere tradotta nelle istruzioni necessarie alla macchina utensile per realizzare il manufatto in modo automatico. Idonei moduli software CAM rispondono inoltre a funzioni specifiche quali il cambio automatico degli utensili, la gestione della movimentazione automatica

degli shuttles, i controlli di sicurezza ecc. La fase di progettazione (CAD) si integra efficacemente con la fase di produzione (CAM) attraverso una adeguata pianificazione del processo di produzione (CAPP).

4.2.3 La fase di gestione e pianificazione

La vera integrazione CAD-CAM si ha quando si dispone di un software in grado di interpretare i dati contenuti nel database CAD e di convertirli in programma di lavorazione a CN pronto all'uso. Le tecniche che permettono questa integrazione vanno sotto il nome di Computer Aided Process Planning (CAPP). Il CAPP si occupa della trasformazione delle informazioni di disegno in informazioni necessarie alla produzione. Quando il disegno di un componente meccanico è completato, viene documentato in un file CAD, il quale specifica le features geometriche, le dimensioni, le tolleranze ecc.

Affinché un particolare venga prodotto, è necessario un set di istruzioni riguardante i processi, le risorse, e le persone coinvolte nel processo produttivo. Tali istruzioni sono usualmente riportate in un process plan. Il process plan contenente i dati e il materiale del particolare, riporta la sequenza di operazioni, includendo una breve descrizione delle lavorazioni che devono essere eseguite, le risorse, i set-up e i parametri che devono essere usati durante il processo produttivo.

Quindi possiamo definire la fase di process planning come: *“la funzione che stabilisce la sequenza dei processi produttivi che deve essere usata per convertire un particolare da una forma qualsiasi a una finale, in cui la sequenza del processo produttivo include la descrizione del processo , i parametri del processo, le possibili risorse e la selezione delle macchine utensili”* [3].

La fase di process planning prende in considerazione un numero di fattori che influenza la selezione di differenti processi e i loro parametri. Tali fattori includono la forma e la dimensione del particolare, le tolleranze richieste, la qualità superficiale, il materiale e la quantità da produrre.

Quindi possiamo definire la fase di process planning come una sequenza di attività che comprendono:

- Interpretazione delle specifiche contenute nel disegno di un particolare , come le dimensioni e le tolleranze , la rugosità superficiale tipo di materiale, dimensione del lotto ecc.
- Selezione dei processi e degli utensili rispettando i vincoli imposti nel disegno.
- Determinazione delle tolleranze di produzione e delle dimensioni di montaggio che assicurano l'esecuzione delle tolleranze del disegno. Selezione delle superfici di partenza e di riferimento, e selezione dell'attrezzatura di fissaggio.

- La sequenza delle operazioni tenendo conto dei vincoli tecnologici. Il raggruppamento delle operazioni sulla stessa macchina in modo da ridurre il tempo di lavorazione rispettando la precisione dimensionale.
- Selezione delle macchine per eseguire i processi produttivi prendendo in considerazione il numero di particolari da produrre e dei metodi e degli strumenti di controllo per garantire la conformità finale del componente con le esigenze funzionali.
- Determinazione delle condizioni di lavoro per ogni operazione, in modo da calcolare i tempi di lavoro e i costi per effettuare una valutazione economica.

La fase di process planning richiede l'abilità umana per interpretare un particolare disegno e una certa familiarità con i processi e le risorse produttive. Ma i process plans eseguiti dagli operatori specializzati non sono ottimali. Nasce quindi il bisogno di sistemi computerizzati, i quali genereranno il process plan totalmente o parzialmente.

Tra i vantaggi dell'uso di sistemi CAPP riscontriamo: un più basso costo di produzione dovuto al fatto che il livello di abilità richiesta per produrre process plans è inferiore a quella richiesta per i metodi manuali, una maggiore consistenza in quanto il numero di errori generati durante la fase di process planning è ridotto, un risparmio di tempo in quanto i lead time sono ridotti e una migliore abilità di reagire velocemente ai cambiamenti del mercato.

Le problematiche dei sistemi CAPP sono: l'integrazione con la fase CAD e la rappresentazione della conoscenza tecnologica (generalità e aggiornabilità).

4.3 La funzione di process planning

Nei sistemi CAPP, per generare un process plan vi sono diversi approcci tra cui l'approccio manuale, variante, generativo e semi-generativo.

4.3.1 L'approccio manuale

L'approccio manuale della fase di process planning inizia quando il disegno di dettaglio e i dati sulla dimensione del lotto sono dati al tecnico della produzione. Queste informazioni sono usate per determinare i processi di produzione, le macchine utensili richieste per eseguire questi processi, gli utensili richiesti in ogni fase della lavorazione, le attrezzature di fissaggio, la profondità di passata di ogni operazione, l'appropriato avanzamento e velocità di taglio, il tipo di processo di finitura necessario per ottenere le tolleranze specificate e la qualità superficiale.

Come prima fase, l'ingegnere della produzione esamina il disegno del particolare per identificare le

similitudini con i particolari prodotti precedentemente. Se le similitudini sono riconosciute, un process plan è manualmente recuperato per il particolare simile. Il process plan può essere usato senza modifiche per particolari identici o viene modificato per rispondere alle esigenze di produzione del nuovo particolare. I vecchi process plan sono usati come riferimento per i particolari simili, ma la fase di recupero delle informazioni non è efficiente. Come cambia il disegno di un particolare, durante il ciclo di sviluppo del prodotto, anche il process plan cambia.

Così come cambiano le risorse, i processi e le dimensioni del lotto, cambia anche il metodo ottimale di produzione del particolare e questi cambiamenti si riflettono nei process plans correnti.

L'esperienza del programmatore dei cicli di produzione gioca un ruolo importante, poiché egli seleziona processi e variabili di sistema che hanno dato buoni risultati in situazioni simili in passato. Dato che il process planning manuale è largamente soggettivo, la qualità del process plan è relazionata direttamente con l'abilità e l'esperienza del planner.

Per queste ragioni con questo metodo è difficile o impossibile ottenere process plan consistenti e ottimizzati. Di conseguenza sono aumentati i costi di produzione, le richieste di materiali e il lead time [3].

4.3.2 L'approccio variante

L'approccio deriva dal metodo *GROUP TECHNOLOGY* in cui i particolari lavorati sono classificati e codificati in famiglie di pezzi. Una famiglia di pezzi è definita come un insieme di particolari, aventi similitudini geometriche e tecnologiche, e caratterizzati dallo stesso metodo di produzione. Per ogni famiglia di particolari, un process plan standard, che include tutte le possibili operazioni che devono essere eseguite, è immagazzinato nel database del sistema. Tale process plan viene recuperato e adattato al nuovo particolare [4].

In generale possiamo dividere l'approccio variante in due fasi: la fase preparatoria (Fig. 4.1.a) e la fase produttiva (Fig. 4.1.b).

La fase preparatoria consiste nel codificare, classificare e raggruppare i componenti esistenti in una matrice di famiglie ed associare ad ognuna un process plan che può essere usato o modificato in seguito per divenire il process plan di un nuovo componente [5]. La fase produttiva include la codifica e la classificazione dei nuovi componenti in modo da trovare la famiglia che più si avvicina a loro. Si richiama lo standard process plan e il "planner" modifica questo per adattarlo al nuovo componente. In tale approccio, la qualità del processo dipende dalle conoscenze del process planner, il computer è soltanto uno strumento per assistere il process planning manuale. Tale metodo è adatto per produzioni caratterizzate da poche famiglie di prodotti e un largo numero di particolari per famiglia.

Gli svantaggi di tale metodo sono che un particolare può essere eseguito solo se si riferisce a un

gruppo di famiglia già presente nel database e il fatto che il process plan necessita di alcune modifiche. Ma, nonostante ciò, è ancora molto diffuso.

Le ragioni sono:

- minor investimento in strutture hardware e software
- il tempo di sviluppo è più breve e l'impegno del programmatore è inferiore
- maggiore sicurezza

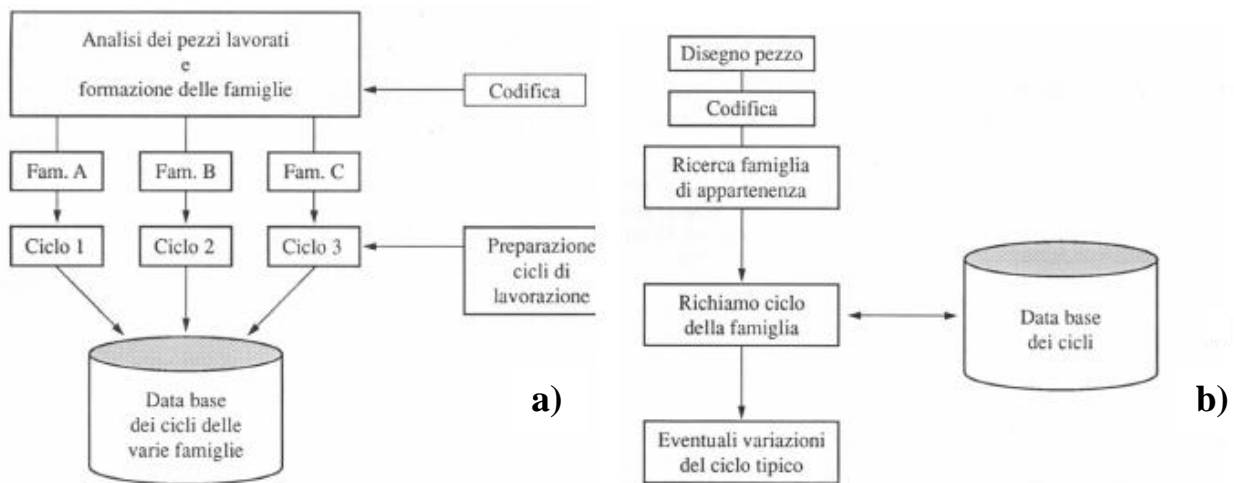


Figura 4.1 Logica di funzionamento di un sistema CAPP variante: a) fase preparatoria, b) fase produttiva [6].

4.3.3 L'approccio generativo

L'approccio generativo è il più alto livello di automazione e sofisticazione nel computer aided process planning. La fase di process planning generativa sintetizza le informazioni di produzione riguardanti le potenzialità dei differenti processi produttivi e crea process plans per i nuovi componenti. Un sistema generativo riceve informazioni sulle specifiche di disegno del particolare e genera il process plan, includendo i processi che devono essere usati e le loro sequenze, senza l'intervento umano.

L'approccio generativo determina quali processi devono essere usati per le differenti features geometriche del componente, mettendo a confronto le caratteristiche del processo con le specifiche del disegno. I metodi sono: alberi decisionali, tabelle decisionali e l'approccio basato sull'intelligenza artificiale. Tali sistemi sono rapidi e consistenti nel generare i process plan. A differenza dei sistemi varianti, che necessitano sempre di uno standard plan dei precedenti componenti, questi creano in modo completo i process plan per i nuovi particolari.

La fase di process planning generativa tenta di imitare la logica seguita dal process planner; per realizzare un tale sistema bisogna analizzare diversi tipi di problemi come:

- La definizione del componente, o la rappresentazione del disegno in modo tale che possa essere capito dal sistema.
- L'identificazione, la cattura e la rappresentazione della conoscenza del process planner, e del ragionamento usato per selezionare le differenti decisioni come la selezione del processo e la sequenza del processo.
- La definizione del componente e la logica del planner dovrebbero essere compatibili con il sistema [3].

Le difficoltà dei sistemi generativi risiedono nella generalità e nella completezza: non esiste attualmente un sistema generativo applicabile validamente in qualunque azienda o che consideri tutte le tecnologie di lavorazione disponibili o che sia in grado di risolvere in maniera completamente automatica un problema produttivo.

A parte queste difficoltà, si può affermare che un sistema generativo è economicamente conveniente per quelle aziende che lavorano un numero elevato di pezzi diversi e appartenenti a famiglie diverse [6].

Analizziamo, dunque, le tecniche che utilizza l'approccio generativo:

1) Alberi decisionali

Un albero decisionale è composto di un'origine e un insieme di rami che iniziano dall'origine. In tal modo sono stabiliti dei percorsi alternativi. I rami sono connessi l'uno con l'altro da nodi. Il percorso decisionale avviene secondo una struttura ad albero fissa, opportunamente tradotta in software: il sistema sulla base dei dati di input, segue la ramificazione fino al termine (Fig. 4.2). Questo metodo ha lo svantaggio di essere poco flessibile, nel senso che tutto va bene fino a quando l'azienda non decide di variare i criteri di scelta insiti nel programma: in tal caso l'unica via d'uscita è modificare il software, con costi elevati [6].

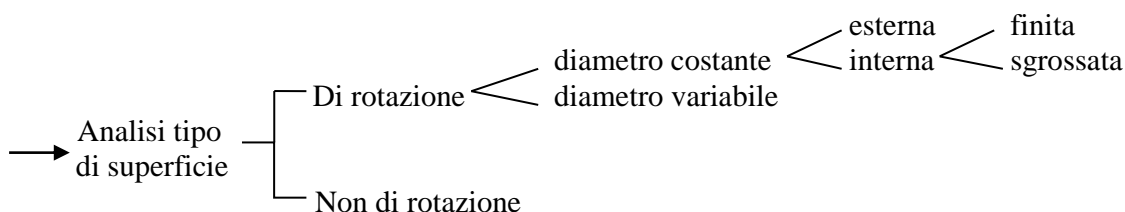


Figura 4.2 Esempio di albero decisionale [6]

2) Tabelle decisionali

Le tabelle decisionali (Tabella 4.1) impiegano tabelle per determinare la scelta, di condizioni e di processi. Le condizioni e i processi rappresentano una dimensione delle scelte, mentre la selezione delle decisioni è messa nelle colonne. La parte superiore della tabella include le condizioni che devono essere considerate affinché i processi, rappresentati nella parte più bassa della tabella, siano

adottati. Quando sono state analizzate tutte le condizioni viene presa una decisione.

Le informazioni di entrambi gli approcci sono le stesse, sebbene le tabelle decisionali hanno una struttura modulare che permette loro di essere facilmente modificata.

Superficie di rotazione	V	V	F
Diametro costante	V	V	F
Superficie esterna	F	V	F
Finita	X		
Sgrossata	X		

Tabella 4.1 Esempio di tabella decisionale relativa alla Figura 4.2.

3) L'approccio basato sull'intelligenza artificiale

Le tecniche di intelligenza artificiale per descrivere i componenti e i sistemi esperti per codificare i processi di conoscenza umana, sono anche applicabili ai problemi del process planning.

Un sistema esperto può essere definito come: *uno strumento che ha le capacità di capire i problemi specifici e usa la conoscenza in modo intelligente per proporre alternative vie d'azioni* [3].

Il sistema opera le sue scelte sulla base di una conoscenza formulata in regole di tipo *if-then* (Tabella 4.2). I sistemi esperti si sono evoluti nei sistemi *fuzzy*, in cui le regole *if-then* sono immesse nel sistema anche se sono verificate con una certa probabilità.

Il vantaggio di questa strutturazione della conoscenza risiede nella flessibilità, cioè nella possibilità, per l'utente finale, di modificare, aggiungere, eliminare le regole, modificando così a piacere le scelte del sistema.

Regola di afferraggio		
IF	La superficie è cilindrica	AND
	La superficie non è filettata	AND
	Il diametro è ≥ 20 mm	AND
	La lunghezza è ≥ 8 mm	
THEN	La superficie può essere afferrata con piattaforma autocentrante.	

Tabella 4.2. Esempio di regole IF THEN

4.3.4 L'approccio semi-generativo

I sistemi semi-generativi combinano la logica decisionale dei sistemi generativi con le operazioni di modifica dei sistemi varianti.

Tale approccio può essere pensato come un'applicazione avanzata della tecnologia variante che usa gli strumenti del sistema generativo.

I sistemi ibridi sono una combinazione dei sistemi generativi e varianti infatti:

- dato un mix di prodotti, possiamo per alcuni di essi eseguire i process plan usando il metodo generativo, mentre per i rimanenti possiamo usare l'approccio variante.
- l'approccio variante può essere usato per sviluppare il process plan generale, mentre l'approccio generativo può essere usato per fare delle modifiche.
- il plan eseguito dal sistema variante, può essere modificato nei dettagli dal sistema generativo.

La scelta di selezionare o l'approccio variante o l'approccio generativo è data al planner, tale scelta avviene in modo da ottenere una rapida generazione del plan [3].

Si riassumono nella Tabella 4.3 le differenze tra l'approccio manuale, variante e generativo e semigenerativo.

Gli step del process planning		Approccio Manuale	Approccio Variante	Approccio Generativo	Approccio Semigenerativo
Esaminare il disegno del particolare		M	M	M	M
Identificazione di particolari simili		M	A	A	A
Se il particolare simile è identificato:	recupero del plan	M	A		A
	modifica del plan	M	M		A
Se nessun particolare simile è identificato	Selezione del materiale	M		A	A
	Selezione dei processi/sequenze	M		A	A
	Selezione delle macchine	M		A	A
	Selezione degli utensili richiesti	M		A	A
	Identificazione delle features	M		A	A
	Determinazione della profondità di passata, velocità, avanzamento	M		A	A
	Selezione del processo di finitura	M		A	A

M = fase manuale A = fase automatica

Tabella 4.3 L'approccio manuale, variante, generativo e semigenerativo dei sistemi CAPP

4.4 Tecniche AFR dei sistemi generativi

L'attività di estrazione delle informazioni geometriche (feature di forma [7]) dal modello CAD, e di traduzione di queste in feature di lavorazione [8] per la pianificazione del processo può essere affrontata attraverso due diversi approcci principali: progettazione per feature DBF (Design By Feature) e AFR (Automatic Feature Recognition).

Analizziamo meglio la tecnica AFR che rappresenta il principale approccio per lo sviluppo di sistemi CAPP completamente automatici (generativi), ovvero in grado di realizzare, senza alcun intervento di un operatore, cicli di lavorazione per pezzi meccanici da lavorare alle macchine utensili. Le tecniche AFR comprendono la ricerca delle geometrie costruttive della parte al fine di estrapolare informazioni che caratterizzano feature di forma generiche (forme tridimensionali nello spazio), alle quali possano essere associati diversi modi di lavorazione a seconda delle relazioni di adiacenza; gli approcci di questo tipo hanno quindi come unico obiettivo quello di creare un algoritmo capace di riconoscere la geometria della parte come unione di diverse feature di forma. Nelle tecniche AFR quindi le feature di lavorazione vengono create a posteriori a partire dall'unione di feature di forma (Fig. 4.3).

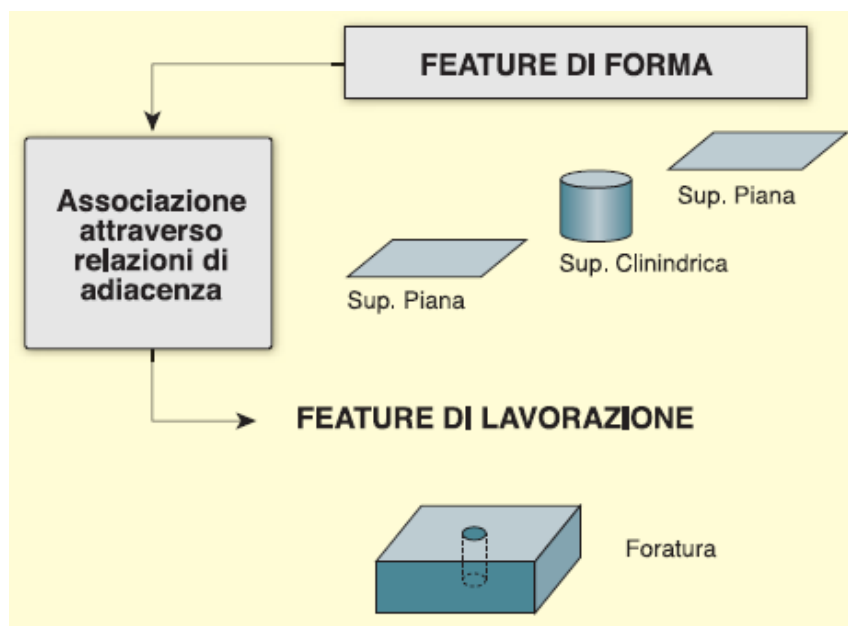


Figura 4.3 Relazione tra feature di forma e di lavorazione [9]

4.4.1 I compiti principali di un sistema AFR

Le tecniche AFR garantiscono lo sviluppo di sistemi più completi e di uso più generale. I sistemi operano secondo tre fasi principali (Fig. 4.4) [9]:

- estrazione delle geometrie elementari (feature di forma) di un componente presente in un file prodotto da software CAD. Tali geometrie sono necessarie per rappresentare il componente in modo da consentire il riconoscimento delle feature di lavorazione. Per fare

- questo la tecnica più usata è quella della Boundary representation³ (B-rep), nella quale le feature di forma sono rappresentate da vertici, spigoli e superfici di forma varia della parte;
- rappresentazione della parte in maniera da rendere possibile l'identificazione delle feature di lavorazione; attraverso il modello B-rep, le feature di forma vengono rappresentate in modo diverso a seconda del metodo AFR che si va a utilizzare;
 - riconoscimento delle feature di lavorazione, attraverso confronto di set di feature di forma adiacenti tra loro con modelli di feature di lavorazione presi da una libreria interna al software; nel caso di sistemi avanzati, basati per esempio su sistemi esperti, è possibile l'acquisizione di know-how da parte del sistema, ovvero nuovi modelli di feature di lavorazione possono essere creati da forme per esempio non riconosciute.

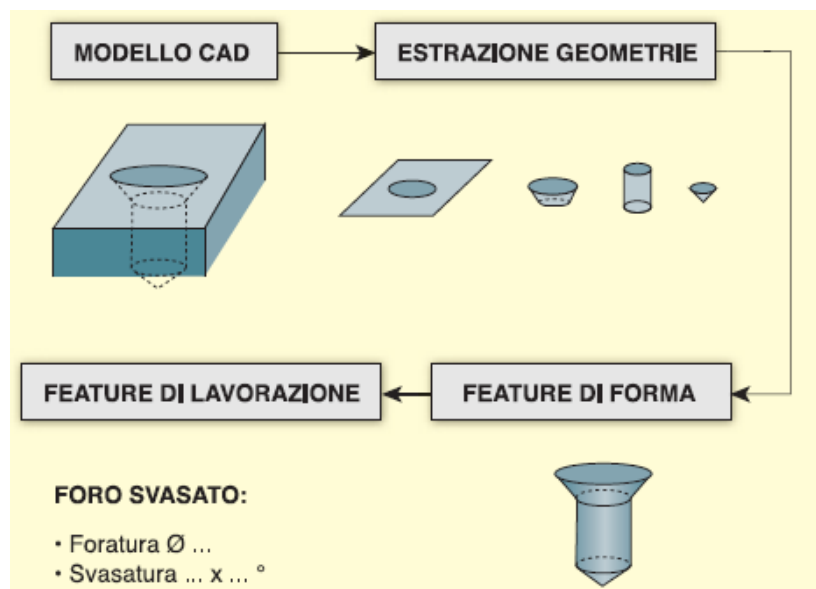


Figura 4.4 Fasi di un processo AFR [9]

Tali tecniche AFR possono essere classificate nelle seguenti principali categorie:

- (1) metodi di riconoscimento sintattico;
- (2) regole logiche (IF-THEN) e sistemi esperti;
- (3) metodi di approccio grafico;
- (4) decomposizione volumetrica tramite il metodo del guscio convesso;
- (5) decomposizione volumetrica basata sulle celle;
- (6) approccio basato su indizi;
- (7) approcci ibridi [9].

4.4.2 Vantaggi e svantaggi di un sistema AFR

L'AFR è il primo e più importante passo nel processo di trasformazione delle informazioni provenienti dal CAD in informazioni di lavorazione; la sua completa automazione è fondamentale per lo sviluppo di un sistema CAPP indipendente [10].

I principali vantaggi di un sistema AFR, come si è visto sono:

- Riconoscimento automatico delle caratteristiche del pezzo grazie all'utilizzo delle feature di lavorazione presenti nella libreria del sistema.
- Immagazzinamento del know-how relativo alle caratteristiche delle feature di lavorazione che vengono usate nell'azienda in cui il sistema è implementato.

Ovviamente sono presenti anche degli svantaggi [11]:

- Grande complessità degli algoritmi di riconoscimento e di conseguenza tempi di analisi elevati.
- Il campo d'applicazione delle feature di lavorazione riconosciute è spesso abbastanza limitato e dipende dalla capacità dell'azienda, che implementa il sistema, di sviluppare una libreria funzionale.

Capitolo 5: Il ruolo del CAD nella variabilità dei mercati e dei prodotti.

5.1 Introduzione

5.1.1 Le influenze sulla produzione

"Il campo della produzione di questo secolo è collegato in rete al mondo dell'informazione e all'interno e all'esterno delle imprese ed è collegato a tutti i partecipanti dei mercati. Il veloce e globale trasferimento di informazioni e dei mercati aperti è, oltre all'aspetto economico, il principale motore del cambiamento globale della struttura della produzione."

Con queste dichiarazioni Westkämper caratterizza in breve il nuovo modello di produzione [12]. La parte sinistra della Fig. 5.1 raffigura i quattro campi più importanti che influenzano l'economia di tutti i paesi industrializzati, mentre la parte destra mette in evidenza i campi in cui deve avvenire un adattamento dinamico della produzione industriale per uno sviluppo sostenibile della competitività.

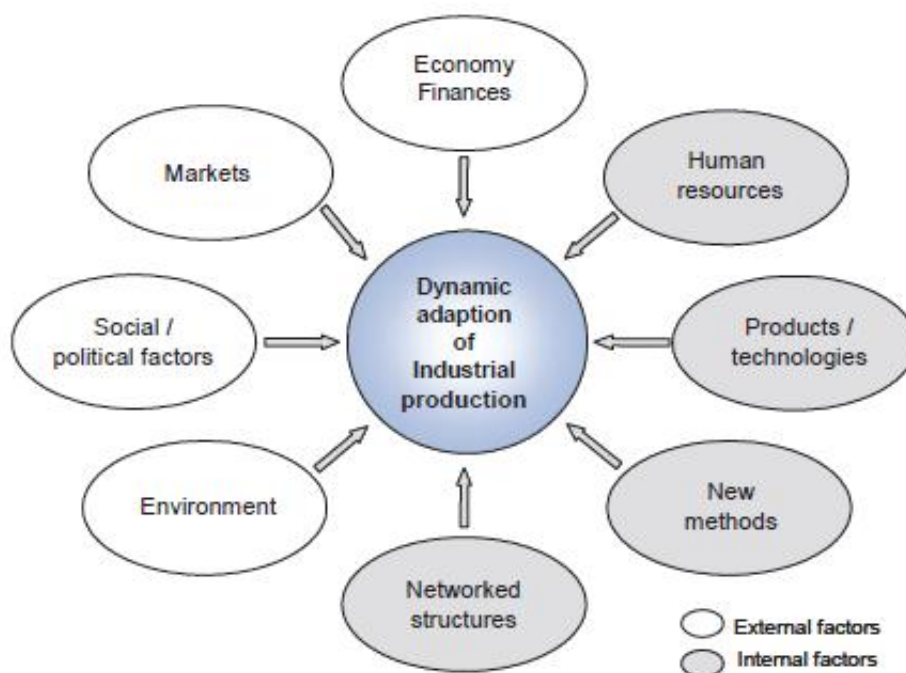


Figura 5.1 Adattamento dinamico delle strutture produttive.

Chryssolouris commenta: "E' sempre più evidente che l'era della produzione di massa è stata sostituita dal periodo delle nicchie di mercato. La chiave per la creazione di prodotti che possono soddisfare le esigenze di una clientela diversificata è uno sviluppo in breve tempo di un ciclo di rendimento a basso costo, cioè merce di alta qualità in quantità sufficiente per soddisfare la domanda, questo rende la flessibilità una caratteristica sempre più importante per la produzione"

[13]. Un risultato delle dinamiche dei mercati è la mutazione del ciclo di vita caratteristico di un prodotto e la crescente divergenza dei cicli di vita degli associati processi e attrezzature.

In passato, abbiamo potuto vedere un costante aumento del volume del prodotto dopo il rilascio, seguito da fasi stabili abbastanza lunghe e in seguito da una rampa di discesa. Al giorno d'oggi, la scalata dei volumi del prodotto è molto più veloce del primo picco, per poi scendere e raggiungere un secondo picco dopo le attività di promozione e spesso di lifting del prodotto, dopo di che una riduzione improvvisa del volume del prodotto si verifica soprattutto dopo l'annuncio del lancio di un nuovo prodotto.

Non solo il nuovo tipo di ciclo di vita e l'esplosione di un numero di modelli e varianti di prodotto, ma anche l'aumento di outsourcing (esternalizzazione) e la produzione in siti diversi portano ad aumentare la complessità dei processi produttivi. Pertanto, per sempre più aziende manifatturiere, l'operazione di fornitura globale diventa realtà. Questo vale non solo per l'industria dell'automobile ed i suoi fornitori, ma anche per piccole e medie imprese che servono i mercati internazionali di prodotti speciali ad alta qualità. Questo porta ad un altro cambiamento fondamentale al ruolo della produzione. In passato, lo sviluppo del prodotto e la gestione degli ordini sono stati considerati come processi primari, mentre l'evasione degli ordini e la distribuzione sono stati visti più come funzioni ausiliarie. Ma al giorno d'oggi, la consegna affidabile di prodotti su misura ha la priorità nei mercati distribuiti a livello globale. Questa priorità determina sempre più lo sviluppo dei prodotti, processi e impianti di produzione, compresa la logistica.

5.1.2 L'evoluzione delle fabbriche

Per rispondere a queste sfide le fabbriche hanno subito diverse fasi dell'evoluzione, che la Fig.5.2 raffigura con le loro principali caratteristiche [14].

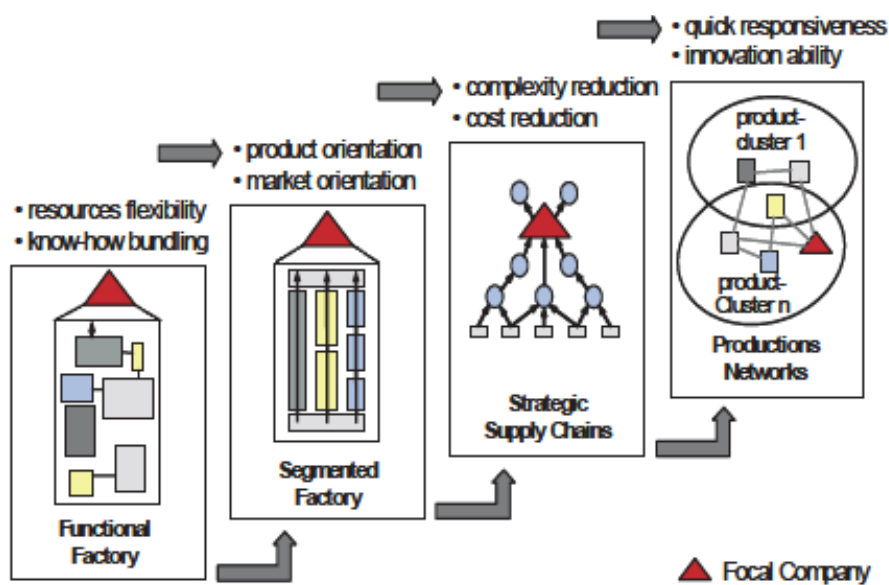


Figura 5.2 Evoluzione di fabbriche

La fabbrica funzionale con risorse altamente flessibili e con un sapere di tecnologie specifiche era abbastanza adattabile ai cambiamenti del prodotto e del volume, ma ciò ha determinato dei tempi di consegna lunghi ed un inventario elevato. Con l'aumentare dell' orientamento verso il fabbisogno dei clienti per una consegna veloce, la risposta strutturale dell' azienda è stata la segmentazione della fabbrica in aree di produzione, con buffer per i semilavorati e un reparto di assemblaggio. La produzione di attività di assemblaggio sono state organizzate in cellule, frattali o segmenti.

Oggi vediamo un'evoluzione delle reti di produzione con una collaborazione per lo più temporanea dedicata alla vita del prodotto o a una famiglia di prodotti. Qui i partner non hanno una relazione gerarchica, anche se per il cliente è visibile una sola società.

Le fabbriche di nuova generazione sono descritte come adattive, trasformabili, ad alte prestazioni e intelligenti. Oltre alla progettazione della struttura produttiva, le imprese devono riflettere profondamente sui loro processi interni. Questo è frequentemente eseguito installando un sistema di produzione, la cui origine è la Toyota Production System [15]. Un risultato è il concetto della lean-production, cioè l'idea centrale è quello di evitare gli sprechi in ogni processo rispetto al tempo, spazio, movimento, energia, materiali, ecc.

5.1.3 Derivazione dei fattori del cambiamento

Come già detto, le imprese di produzione devono capire quali sono i principali fattori necessari al cambiamento e definire le azioni appropriate al momento opportuno. Un aspetto principale è quello di definire gli oggetti, che devono essere “variabili” e il loro adeguato grado di “variabilità”.

Fig. 5.3 riassume i passi principali per raggiungere questo obiettivo.

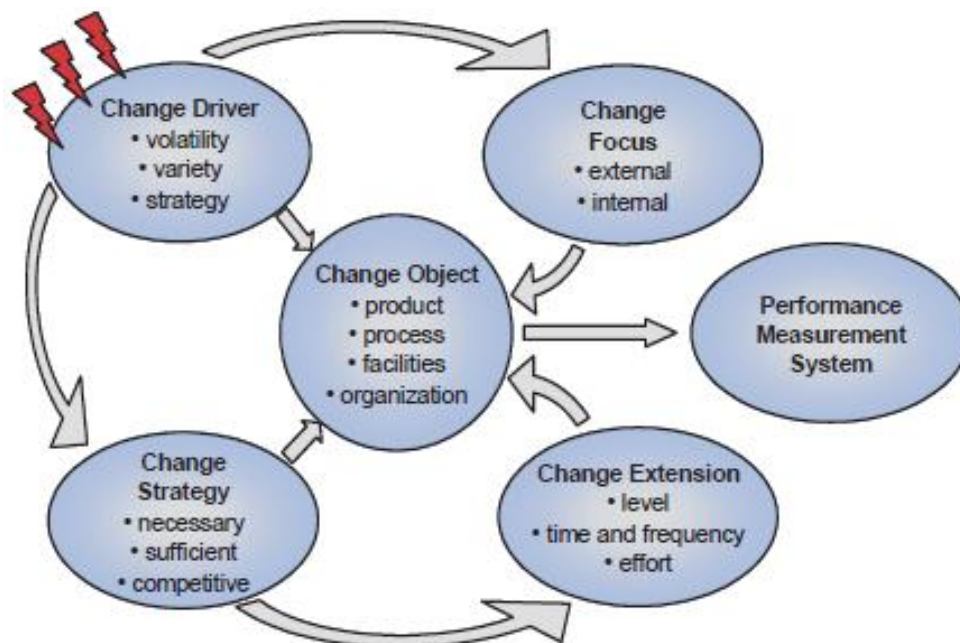


Figura 5.3 Procedura per definire gli oggetti del cambiamento

L'impulso per un cambiamento è innescato da *fattori di cambiamento*, la cui prima categoria è la volatilità del volume misurata dalla fluttuazione nel tempo della domanda. La varietà è la larghezza di durata delle varianti dei prodotti, sia nei modelli di base e sia nelle varianti dei modelli rispetto alle dimensioni, il materiale e le funzionalità aggiuntive. Un fattore importante per il cambiamento è un nuova strategia aziendale, per esempio entrare in un nuovo mercato, per vendere o comprare una linea di prodotti ecc.

Fuori da questi fattori di cambiamento vengono sollevate due questioni.

La prima è la messa a fuoco sul cambiamento, che può essere esterno o interno. L'obiettivo di un focus esterno è il valore aggiunto per il cliente, per esempio un prodotto con basso costo del ciclo di vita o di una consegna più veloce. La messa a fuoco interna è tipicamente rivolta se la performance dell'azienda non è soddisfacente soprattutto riguardo al mancato guadagno causato dalla cattiva organizzazione di processi di business.

La seconda domanda deriva dai fattori di cambiamento ed è l'aspirato cambiamento di strategia.

In caso di variazione come si può soddisfare il bisogno immediato sul piano operativo? Questi cambiamenti sono più sulla difensiva e sono tipicamente effettuati all'interno delle strutture dati e delle procedure, quali l'installazione o la sostituzione delle macchine.

O dovrebbe essere la variabilità più strategica per soddisfare le necessità del prossimo futuro? Questi cambiamenti sono più proattivi e si verificano di solito in processi di business, come l'evasione degli ordini o di servizio.

Oppure è infine un investimento strategico in variabilità scelto con l'obiettivo di essere pronti per una posizione opzionale? Ovviamente il potenziale di cambiamento selezionato determina di molto il cambio di estensione. In primo luogo deve essere determinato il livello della fabbrica su cui la variabilità deve essere garantita. In secondo luogo, deve essere stimata la frequenza e la variazione attesa e il tempo concesso per ogni cambiamento e in terzo luogo, lo sforzo necessario in attrezzature, manodopera, conoscenza e tempo, sono in genere misurate come il costo del cambiamento.

Avendo preso in considerazione questi fattori determinanti della variabilità possono essere ora concordati gli oggetti del cambiamento. Può essere un prodotto o famiglia di prodotti (entrambi possono cambiare rispetto al tipo, volume o miscela), processi tecnologici o logistici, o una parte piccola o grande delle strutture di produzione o l'organizzazione della ditta.

Infine deve essere installato un sistema di misurazione delle performance in modo da misurare l'impatto dell'implementata variabilità rispetto alla prestazione in uscita della fabbrica. Indicatori di performance tipici sono: tempi di consegna, le prestazioni previste, tasso di velocità, inventario, giorni di fornitura e costi generali.

5.1.4 Costituenti della produzione variabile

Dal paragrafo introduttivo è diventato evidente che lo scopo di un sistema che produca vari pezzi di lavorazione, deve essere esteso a tutta la fabbrica per la produzione di diversi prodotti in diverse varianti. D'altra parte la flessibilità è un termine molto generico e deve essere differenziata a seconda del livello di fabbrica.

Questo portò la variabilità ad essere un termine generico e di conseguenza la “produzione variabile” sembra essere un termine appropriato per descrivere il dominio di questo capitolo. La Fig. 5.4 descrive i componenti di tale variabilità di produzione e le loro proprietà specifiche. Si presume che la progettazione del prodotto esista ma che può essere influenzata dalle esigenze della produzione fisica.

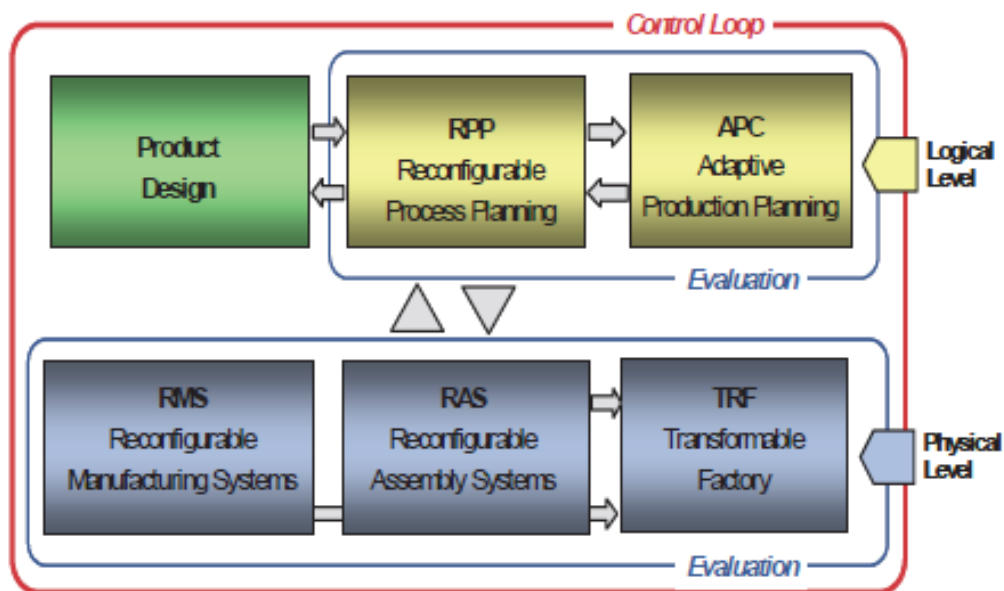


Figura 5.4 Ambito della produzione variabile

A *livello fisico* la produzione e l'assemblaggio dei sistemi (RMS e RAS) devono essere riconfigurabili e la fabbrica, comprese le relative costruzioni di infrastrutture tecniche, deve essere trasformabile (TRF).

A *livello logico* è necessario operare in una fabbrica che richiede la pianificazione dei processi e dei sistemi in grado di reagire ai cambiamenti nella progettazione del prodotto o a livello fisico, ciò è chiamato processo di pianificazione riconfigurabile (RPP) [16].

La pianificazione e il controllo della produzione devono reagire ai cambiamenti del volume del prodotto, omogeneizzare o riconfigurare i piani di processo. Pertanto viene chiamata pianificazione della produzione e controllo adattativo (APC). Uno specifico componente aggiuntivo è un ciclo di controllo per monitorare i fattori di cambiamento esterni o interni e per innescare l'attività di cambiamento sia a livello fisico che logico. Infine una procedura di valutazione è necessaria per giustificare le ulteriori spese a causa della variabilità degli oggetti fisici e logici.

5.2 Classificazione della variabilità

5.2.1 Dalla flessibilità alla variabilità

Tolio commenta sulla necessità di definire chiaramente i limiti della flessibilità e riconfigurabilità allorché osserva: “Tradizionalmente la flessibilità è interpretata come la capacità di un sistema di cambiare il suo comportamento senza cambiare la sua configurazione. Al contrario la riconfigurabilità viene interpretata come la possibilità di modificare il comportamento di un sistema, modificando la sua configurazione. Queste definizioni, tuttavia, possono essere utilizzate solo se il confine del sistema è chiaramente definito. Infatti a seconda del confine possiamo interpretare un tipo di variabilità, di riconfigurabilità o flessibilità. Pertanto, anche se in una situazione specifica, è possibile distinguere tra flessibilità e riconfigurabilità non è possibile definire affermazioni generali per queste caratteristiche. Quindi è meglio fare riferimento a dichiarazioni generali sulla variabilità termine che comprende entrambe le caratteristiche” [17].

Per distinguere questa capacità, in questo capitolo il termine variabilità sarà utilizzato come un termine generale al posto di flessibilità. Variabilità in questo contesto è definita come la caratteristica per compiere regolazioni precoci e preventivi delle strutture della fabbrica e dei processi su tutti i livelli per modificare gli impulsi economici.

5.2.2 Livelli della fabbrica

Come già giustificato l'applicazione della variabilità deve essere estesa a tutta la fabbrica. E' così opportuno distinguere non solo i livelli, ma anche due punti di vista ossia la visualizzazione delle risorse e dello spazio Fig. 5.5.

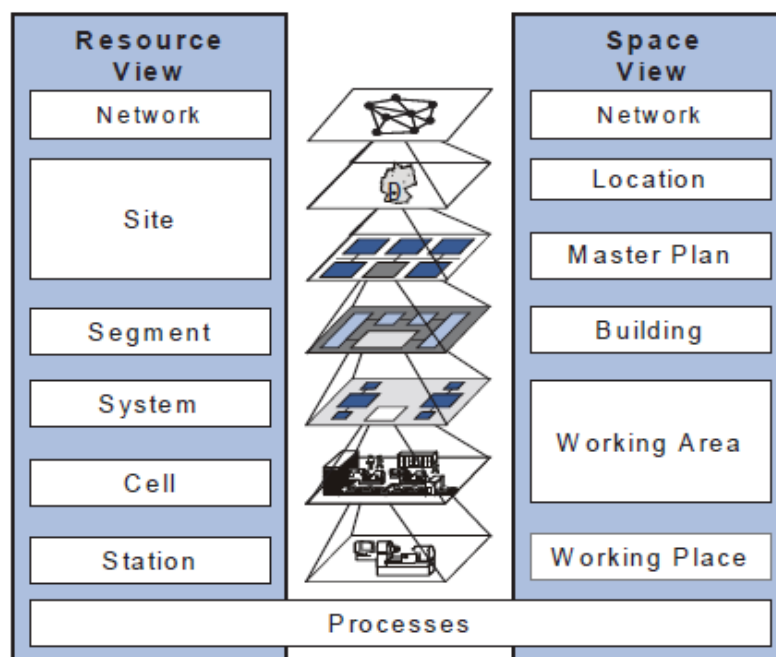


Figura 5.5 Livelli di strutturazione e vedute di una fabbrica

La visualizzazione delle risorse cerca le risorse tecniche ed umane, che conservano i processi, mentre il punto di vista dello spazio considera gli oggetti architettonici che devono essere progettati in conformità con queste risorse. Il terreno comune per entrambi i punti di vista è data dalla base dei processi, che vengono eseguiti da ciascuna macchina e/o lavoratore.

Il più alto livello di strutturazione è il network che può essere interpretato dal punto di vista delle risorse come le unità di produzione collegate rispettivamente da flussi di materiali e informazioni per la fornitura, siti separati geograficamente e collegati da mezzi di trasporto che agiscono per vie di traffico. La preoccupazione principale del livello precedente è da un lato le risorse con le stazioni di lavoro unico e il loro valore aggiunto delle operazioni tra il pezzo e la manipolazione degli strumenti, dall'altro l'aspetto principale è lo spazio, l'ergonomia e la sicurezza per i dipendenti nei luoghi di lavoro individuali. Spesso le diverse risorse sono organizzate in cellule che normalmente eseguono la maggior parte delle operazioni necessarie per terminare un lavoro di un pezzo, compresi il montaggio e la garanzia della qualità. Le operazioni sono eseguite in parte da macchine e in parte dai lavoratori. Se i processi sono più o meno automaticamente collegati, i termini sistema di produzione e assemblaggio di sistema sono di uso comune. Classi tipiche della produzione dei sistemi sono descritti in Fig. 4.11 e saranno trattati più in dettaglio nel paragrafo 4.3, mentre i sistemi di montaggio sono esaminati nel paragrafo 4.4. Le cellule e i sistemi possono essere uniti dal punto di vista degli spazi negli ambienti di lavoro, che descrivono una zona con le stesse condizioni in merito al piano di carico, altezza, clima, luce e la fornitura di energia.

Il livello successivo si riferisce a segmenti in cui i prodotti finiti in genere sono prodotti pronti per la spedizione. I segmenti sono comunemente strutturati in produzione, assemblaggio, buffer, dispositivi di misurazione della qualità, ecc. Di solito hanno bisogno di uno o più edifici che contengono anche uffici di tecnici e del personale.

Un sito descrive un'unità produttiva con più di un segmento di mercato e funge da nodo per una produzione di rete o una catena di approvvigionamento. La posizione descrive dal punto di vista dello spazio come il sito è integrato geograficamente e politicamente e come è collegato alle infrastrutture locali.

5.2.3 Le classi della variabilità

Come già accennato, non appare opportuno utilizzare il termine flessibilità a tutti i livelli di una fabbrica. Se i cinque livelli di strutturazione sono combinati con i relativi livelli di prodotto, emerge una gerarchia che permette la definizione di cinque tipi di variabilità [18] (Fig. 5.5).

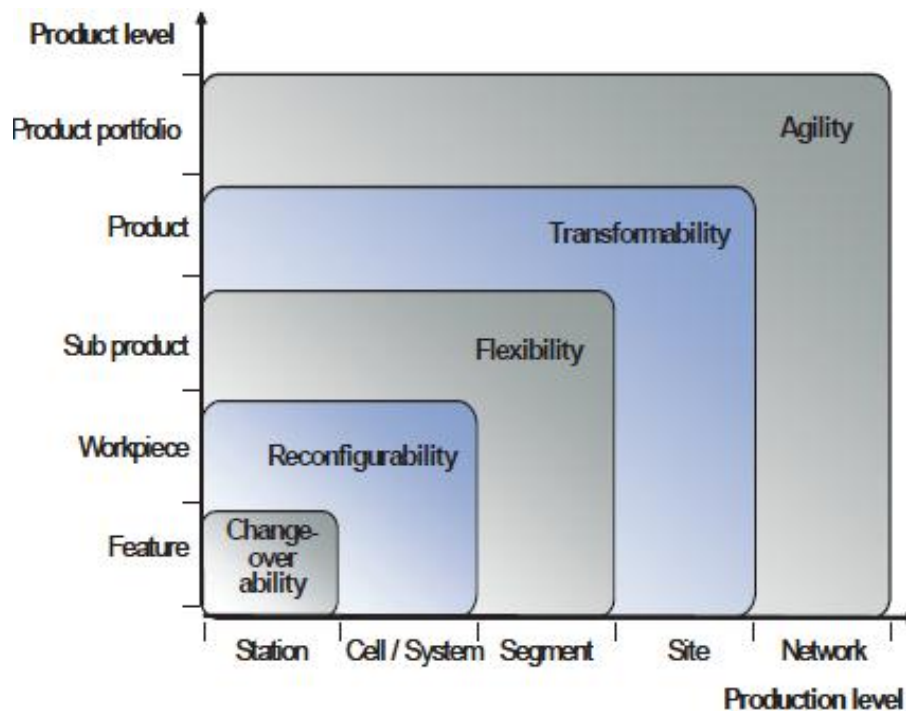


Figura 5.6 Classi di variabilità di fabbrica

Ogni tipo ad un livello superiore riunisce i tipi sotto di esso. La gerarchia dei livelli del prodotto inizia dalla parte superiore con la gamma di prodotti che una società offre al mercato. Poi il prodotto o una famiglia di prodotti segue verso il basso. Il prodotto di solito è strutturato in sottoprodotti o in gruppi di montaggio che ne contengono i pezzi. Gli stessi pezzi consistono in funzioni. La gerarchia della produzione segue i livelli dal punto di vista delle risorse in Fig. 5.6. Sono cinque le classi di variabilità che si evolvono da questa matrice:

- *Capacità di scambio*: definisce la capacità operativa di un singola macchina o stazione di lavoro di eseguire operazioni particolari su un pezzo noto o su un sottoinsieme in qualsiasi momento desiderato con il minimo sforzo e ritardo.
- *Riconfigurabilità*: descrive la capacità operativa di un produzione o di un sistema di montaggio di cambiare con il minimo sforzo e ritardo una particolare famiglia di pezzi o sottoinsieme mediante l'aggiunta o la rimozione di elementi funzionali.
- *Flessibilità*: si riferisce alla capacità tattica di un'intera area di produzione e logistica di passare con ragionevolmente tempo e fatica per nuove - anche se simili - famiglie di componenti, modificando i processi di produzione, flussi di materiali e funzioni logistiche.
- *Trasformabilità*: indica la capacità tattica di un'intera struttura della fabbrica per passare ad un'altra famiglia di prodotti. Ciò richiede interventi strutturali nel settore della produzione e sistemi logistici, nella struttura e negli edifici, nella struttura organizzativa e di processo e a livello del personale.

- *Agilità*: la capacità strategica di un'intera società di aprire nuovi mercati, per sviluppare i prodotti richiesti e i servizi, e per costruire una capacità necessaria per la produzione.

5.2.4 Variabilità degli obiettivi

Dopo aver definito i livelli di fabbrica e le classi di variabilità il passo successivo è quello di chiedere agli obiettivi un componente fisico o logico, spiegato in Fig. 5.4, che deve adempiere a una produzione variabile.

Per scopi pratici sembra opportuno concentrarsi su tre obiettivi di flessibilità, la Fig. 5.7 ne fornisce una panoramica:

- *Flessibilità del prodotto*: consente a un sistema di produzione di fare una varietà di tipi di parti con la stessa attrezzatura.
- *Flessibilità di funzionamento*: si riferisce alla capacità di produrre una serie di prodotti che utilizzano diverse macchine, materiali, operazioni e sequenza delle operazioni.
- *Flessibilità della capacità*: consente a un sistema produttivo di variare i volumi di produzione di prodotti diversi da adattarsi ai cambiamenti della domanda, pur rimanendo redditizia.

Non solo la tecnologia ma anche l'organizzazione e le capacità umane sono necessarie per tutti gli obiettivi da raggiungere.

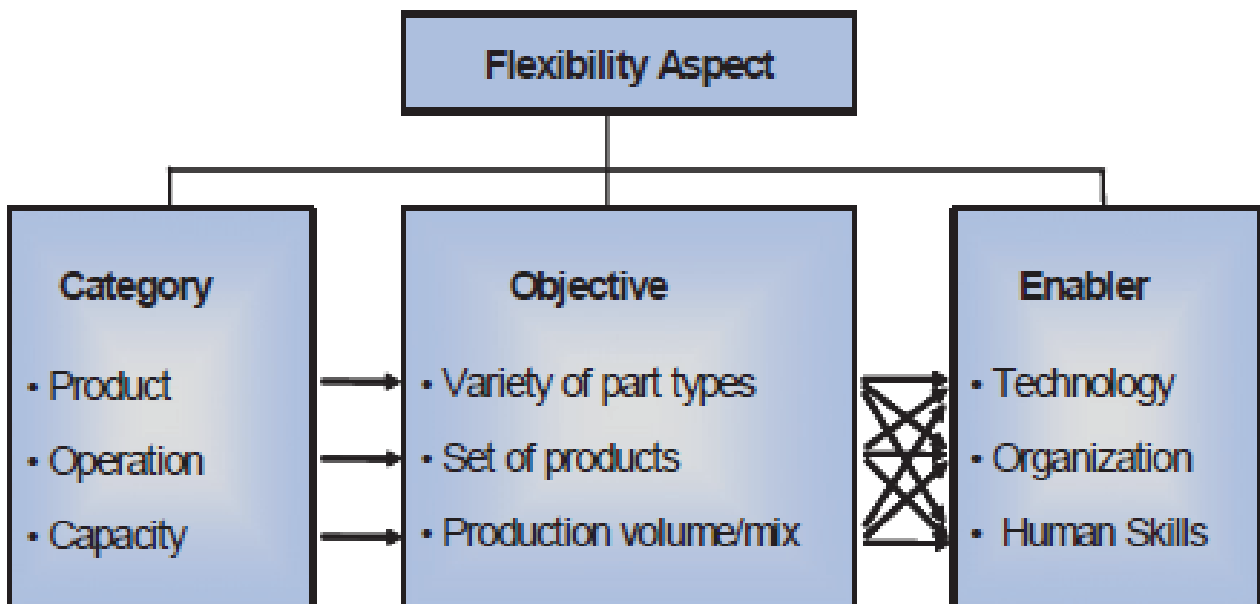


Figura 5.7 Aspetti della flessibilità dei sistemi di produzione

Chrysolouris discute la flessibilità dei sistemi di produzione [19], le definizioni e misure. Egli indica che la quantificazione della flessibilità è stata ricercata ampiamente in tutto il mondo accademico, ma le applicazioni industriali sono state scarse [20]. Questi obiettivi saranno discussi più in dettaglio per i livelli di produzione, assemblaggio e fabbrica.

Livello di produzione

Esistono una miriade di pubblicazioni sulla flessibilità, la maggior parte delle quali è dedicata alla flessibilità di produzione. Chryssolouris definisce la flessibilità di un sistema di produzione come la sua sensibilità al cambiamento e afferma: “Più bassa è la sensibilità, maggiore è la flessibilità” [19]. Una revisione della letteratura effettuata da H. ElMaraghy identifica 10 tipi di flessibilità produttiva [21].

Questi sono:

- Flessibilità di macchina: vengono effettuate varie operazioni senza cambiamento di set-up.
- Flessibilità nella gestione dei materiali: numero di percorsi usati per numero totale di percorsi possibili tra tutte le macchine.
- Flessibilità operativa: numero differenti di piani di lavorazioni a disposizione per la fabbricazione di pezzi.
- Flessibilità di processo: insieme di tipi di pezzi che possono essere prodotti senza grandi modifiche al set up.
- Flessibilità di prodotto: facilità (tempo e costi) di introdurre prodotti in un mix di prodotti esistenti.
- Flessibilità di routing: numero di percorsi possibili di tutti i tipi di pezzi e numero di tipi di pezzi.
- Flessibilità di volume: la capacità di variare il volume di produzione con profitto all'interno della capacità produttiva.
- Flessibilità di espansione: facilità (sforzo e costo) di aumentare la capacità, quando necessario, attraverso i cambiamenti fisici al sistema.
- Flessibilità di controllo del programma: la capacità di un sistema di lavorare praticamente senza interruzioni (durante il secondo e terzo turno) grazie alla disponibilità di macchine intelligenti e un software di controllo.
- Flessibilità di produzione: numero di tutti i tipi di pezzi che possono essere prodotti senza l'aggiunta di grandi capitali e apparecchiature.

Livello di montaggio

Eversheim definisce cinque tipi di obiettivi di flessibilità per il montaggio dei sistemi mostrati in Fig. 5.8 [22].

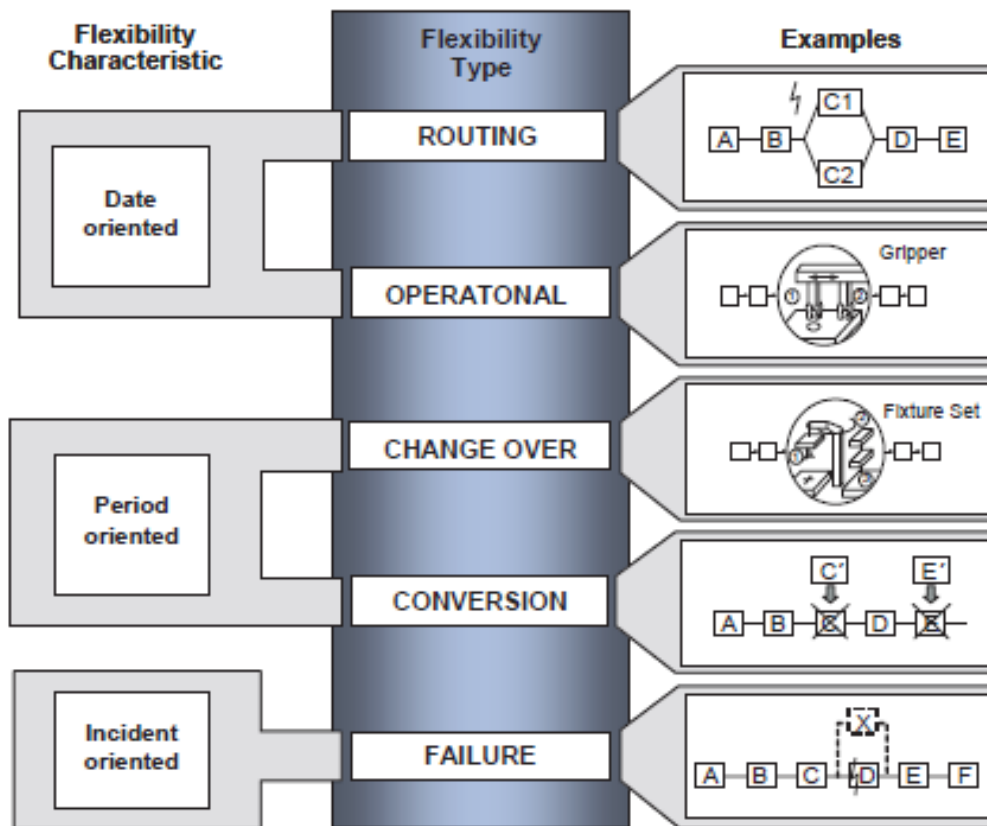


Figura 5.8 Obiettivi di flessibilità per i sistemi di assemblaggio

Sono utilizzate tre caratteristiche per raggruppare i tipi di flessibilità. Data-oriented flessibilità ha un breve lasso di tempo. Se le varianti del prodotto portano a un cambiamento nella linea e alcune varianti devono essere trattate nelle stazioni specifiche, la flessibilità di routing è necessaria. La flessibilità operativa è necessaria quando varie operazioni di montaggio vengono eseguite su un oggetto in sequenza in un breve periodo di tempo, per esempio cambiando da pinze ad altri strumenti in alcuni secondi.

Period-oriented flessibilità ha un arco di tempo più lungo. Questo è di solito in situazioni in cui lotti di prodotti vari sono assemblati per ore o anche giorni e un cambio formato flessibilità viene utilizzata, per esempio per lo scambio di supporti pezzo. Flessibilità di conversione è molto simile alla riconfigurabilità. Qui, postazioni di lavoro complete vengono scambiate e sostituite, esempio dalle stazioni automatiche alle stazioni manuali.

La terza caratteristica di flessibilità è orientata all'incidente. La flessibilità associata al fallimento mira ad reazione rapida in caso di una stazione che ha una grave perturbazione e le esigenze di sostituzione rapida di un'intera unità di assemblaggio.

Livello di fabbrica

A livello di fabbrica gli obiettivi di variabilità comprendono gli obiettivi della produzione a livello di assemblaggio. Ma ci sono più fattori di cambiamento possibili ed è necessario ampliare il cambiamento a un livello superiore a questo. I seguenti obiettivi sono i più importanti per una fabbrica:

- Trasformabilità del prodotto: permette ad un'azienda di produrre un varietà di prodotti diversi.
- Trasformabilità tecnologica: è la capacità di integrare e disintegrare il prodotto e le tecnologie di produzione.
- Trasformabilità capacità: permette una variazione dei volumi di produzione di ogni prodotto di una fabbrica.
- Trasformabilità logistica. permette ad una fabbrica di rispondere alle nuove esigenze logistiche.
- Trasformabilità di integrazione verticale: è il capacità di adattare il livello di valore aggiunto all'interno della fabbrica, esempio dalla fornitura di precedenti o seguenti fasi di produzione o logistiche.

5.2.5 Attivatori di variabilità

Una fabbrica che è stata progettata per essere variabile deve avere alcune caratteristiche intrinseche o proprietà che saranno chiamate attivatori di variabilità. Consentono ad oggetti fisici e logici di una fabbrica di cambiare la loro capacità verso un obiettivo predefinito in un tempo predefinito e sono da non confondere con i tipi di flessibilità o suoi obiettivi. La Fig. 5.9 fornisce una panoramica dei fattori abilitanti fisici e sottosistemi logici di produzione variabile spiegato in Fig. 5.4.

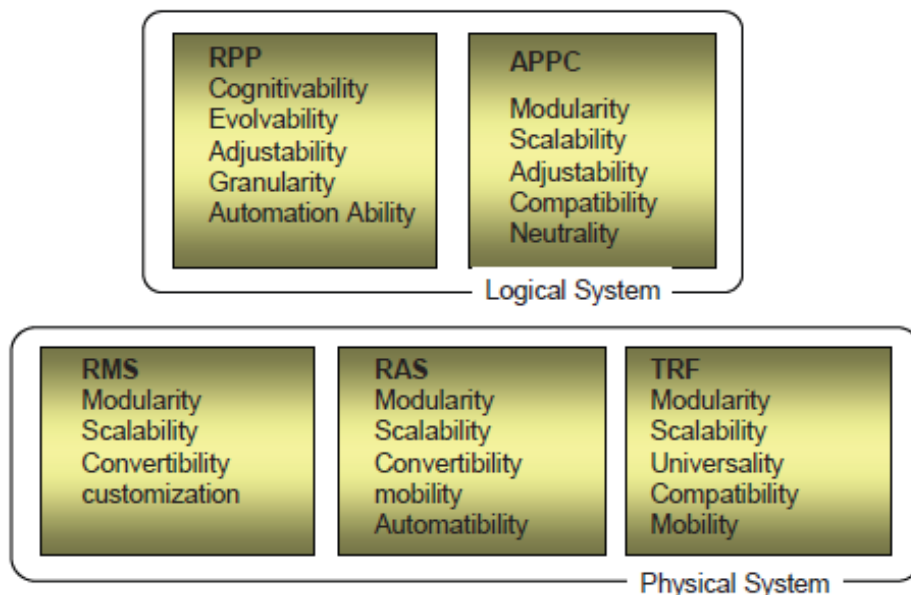


Figura 5.9 Attivatori di produzione modificabile

Livello di produzione

A questo livello i sistemi di produzione sono riconfigurabili e si presume siano la risposta appropriata alla variabilità. Koren afferma che per ottenere un'esatta flessibilità in risposta alle fluttuazioni delle richieste, un RMS deve essere progettato considerando alcune proprietà qualitative e quantitative le cosiddette caratteristiche principali: modularità, integrabilità, personalizzazione, scalabilità, convertibilità e diagnosticabilità [12], [16], [23]. Nel contesto di questo scritto possono essere interpretati come attivatori. Queste caratteristiche possono essere divise in essenziali e di supporto al RMS. Così le tre caratteristiche di personalizzazione, scalabilità e convertibilità sono viste come caratteristiche essenziali di RMS, mentre le altre quelle di modularità, integrabilità e diagnosticabilità costituiscono le caratteristiche di supporto [23]. In aggiunta Koren afferma: "La modularità, integrabilità e diagnosticabilità riducono il tempo di riconfigurazione e sforzo, la personalizzazione e convertibilità invece riducono i costi".

Livello di assemblaggio

A livello di montaggio principalmente i fattori abilitanti sono applicabili per gli stessi sistemi di produzione riconfigurabile. Si devono aggiungere due specifiche abilitanti. Una è la mobilità, che è importante per riconfigurare le stazioni singole o moduli di un sistema di montaggio o addirittura per spostare l'intero sistema in un'altra posizione. L'altro è la capacità di aggiornare o declassare il grado di automazione. Per le operazioni di assemblaggio, in contrasto con le operazioni di lavorazione, vi è spesso la possibilità di eseguirle manualmente o automaticamente. Dipende da diversi fattori come il tasso di produzione, livello dei salari, ecc.

Livello di fabbrica

A livello di fabbrica il cambiamento degli oggetti possono principalmente avvenire attraverso i cosiddetti cinque abilitatori di trasformazione. Con la sua esistenza, un abilitatore contribuisce alla realizzazione di un processo di trasformazione. Inoltre, i fattori abilitanti caratterizzano il potenziale della capacità di trasformazione e diventano attivi solo quando necessario. Le caratteristiche di un abilitatore influenzano positivamente o negativamente la capacità di una fabbrica all'adattamento. Sono stati trovati cinque abilitatori che la fabbrica pianificatrice può utilizzare per scopi di variabilità e conseguire nella fase di progettazione.

5.3 Produzione flessibile e sistemi riconfigurabili

5.3.1 Evoluzione dei sistemi di produzione

ElMaraghy H. riassume i risultati di una produzione riconfigurabile su sistemi per quanto riguarda il loro sviluppo come segue [21]:

“I sistemi di produzione si sono evoluti da botteghe di lavoro, che dispongono di macchine a basso volume, alta varietà e significativo coinvolgimento umano, a macchine ad alto volume, bassa varietà, dedicati a linee di produzione (DMS) e guidati da economia di scala.

Negli anni Ottanta il concetto di produzione flessibile è stato introdotto in risposta alla necessità di personalizzazione di massa e per una maggiore reattività ai cambiamenti nei prodotti, tecnologia di produzione e mercati. Sistemi flessibili di produzione (FMS) sono stati sviluppati anche per affrontare mid-volume, mid-varietà delle esigenze di produzione. Le analogie tra le parti nella progettazione e/o fabbricazione sono state utilizzate per realizzare economie di portata. Sistemi flessibili di produzione previsto queste variazioni e flessibilità a priori; quindi essi sono più robusta, ma hanno costi elevati investimenti di capitale iniziale. Negli anni novanta, ottimalità, agilità, la riduzione dei rifiuti, qualità e lean manufacturing sono stati identificati come i principali obiettivi per garantire la sopravvivenza in un mercato competitivo globale. Il concetto di produzione riconfigurabile (RMS) è emerso negli ultimi anni nel tentativo di raggiungere la funzionalità “variabile” e la capacità scalabile [24], [25], [26]. Esso propone un sistema di fabbricazione in cui i componenti di macchine, macchine, cellule, unità di movimentazione dei materiale possono essere aggiunti, rimossi, modificati, o scambiati per rispondere rapidamente alle necessarie mutevoli esigenze. Tale sistema completamente riconfigurabile non esiste ancora oggi ma è oggetto di grandi sforzi di ricerca in tutto il mondo, con particolare attenzione agli aspetti di controllo sull'hardware e sulla macchina. I fautori di questo approccio ritengono che ha il potenziale per offrire una soluzione più economica, in lungo periodo, rispetto al FMS, in quanto si può accrescere la durata e l'utilità di un sistema di produzione. In sintesi, un sistema di produzione riconfigurabile è un sistema produttivo flessibile e personalizzato e FMS è un sistema produttivo con flessibilità generale”.

5.3.2 Flexible Manufacturing Systems (FMS)

La tradizionale produzione di apparecchiature è stata dominata Dedicated Manufacturing Systems (DMS) e Product Specific Machine Tools che si basano sulla fissa automazione producendo prodotti di base di un'azienda o prodotti ad alto volume con un basso costo per pezzo [27]. FMS è stato sviluppato come mezzo per conciliare le fluttuazioni e turbolenze in produzione. Un FMS è progettato per un possibile cambiamento rapido della struttura hardware così come nella struttura del software, al fine di regolare velocemente capacità di produzione e funzionalità all'interno di una

famiglia di pezzi [16]. Quindi FMS può essere conforme alle diverse esigenze di produzione [28], e contiene spesso eccessiva capacità di risultati in costi inutili per i clienti. In genere, le macchine utilizzate in un FMS sono progettate per operare in maniera flessibile, ma sono progettate per una gamma di pezzi. L'adattamento per superare questo spettro può richiedere settimane o mesi. Perché la maggior parte dei sistemi FMS hanno più capacità e caratteristiche di quelle normalmente utilizzate, sono abbastanza complesse e non adattabili alle esigenze variabili in termini di capacità e cambiamenti gradualmente nella funzionalità [29]. Gli FMS sono configurabili ma non riadattabili dopo alcuni anni.

5.3.3 Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)

Attuali sviluppi del mercato sono caratterizzati da imponderabilità, che in gran parte non può essere influenzato dalla società [29]. Essi rappresentano il 20-30% del volume di produzione e gli aumenti futuri non possono essere esclusi. Le conseguenze di questo sono notevoli cambiamenti della produzione programmata che sono un problema per FMS [54]. Koren afferma che un adeguamento veloce, specifico ed economico dei sistemi riguardanti la struttura, la capacità, la tecnologia e la funzione richiede un Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) [26], [27] per il quale ha offerto soluzioni globali. Invece di fornire una flessibilità generale attraverso il tempo di vita delle apparecchiature con funzionalità integrate come FMS, RMS fornisce una flessibilità personalizzata [23]. RMS mira a combinare un'uscita scalabile e funzionalità regolabile con un minimo di tempo e di elevata produttività [28]. Gli RMS sono progettati per far fronte a situazioni dove la produttività e la capacità di reagire ai cambiamenti del sistema sono di vitale importanza. In sintesi, un ideale RMS comprende i già trattati DMS e FMS [27]. L'architettura di RMS può essere gerarchicamente strutturata come mostrato in Fig. 5.10. A livello di sistema Riconfigurabile Macchine Tools (RMT) sono collegati in parallelo o linee di produzione [28].

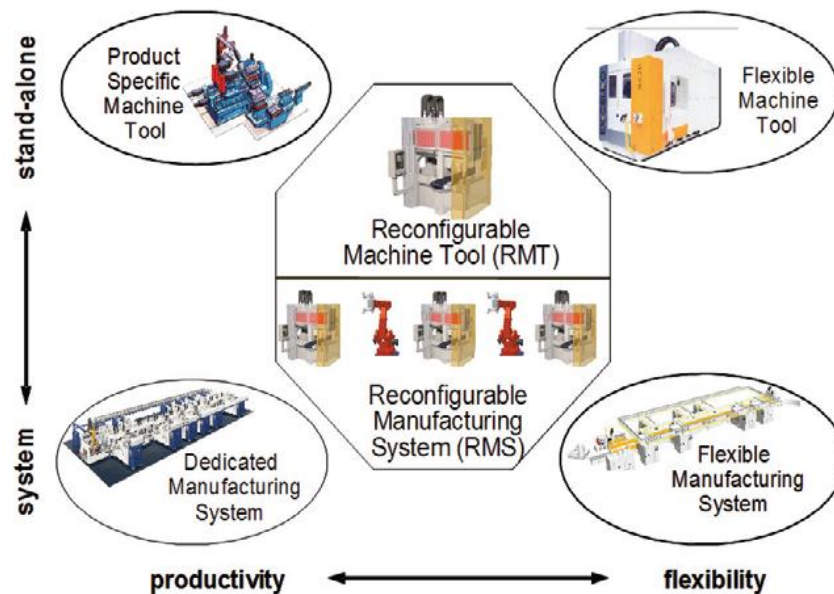


Figura 5.10 Classificazione dei sistemi di produzione [12]

In questi ultimi anni, tuttavia, due principali tecnologie si sono rivelate necessarie attivatori di RMS. Nell'hardware della macchina Reconfigurable Machine Tools (RMT) e nel software della macchina l'architettura aperta a controlli, sono visti come fattori abilitanti richiesti [27].

5.3.4 Reconfigurable Machine Tools (RMT)

RMTs visto come abilitatori essenziali di RMS non sono ancora ampiamente utilizzati in sistemi di produzione. Esistono due motivi principali. Primo, i costi iniziali di RMT sono superiori ai costi di investimento in un prodotto specifico e inflessibili macchine utensili [30]. La seconda ragione è che la tecnologia necessaria è ancora in vari stati di sviluppo [16]. Perché una macchina utensile sia integrata nel sistema di produzione, deve soddisfare le esigenze di qualità e di produttività. Inoltre, deve soddisfare i requisiti di rigidità strutturale, vitalità cinematica e accuratezza geometrica [31]. Esistono solo approcci per migliorare ognuno di questi requisiti, ma un metodo sistematico per configurare RMT partendo dai requisiti funzionali è ancora mancante. Un prototipo RMT è stata sviluppato da parte di Abele et al., il cui concetto di una multi-tecnologia riconfigurabile (METEOR) integra diverse tecnologie di lavorazione in una sola area macchina [30]. Basato su una piattaforma, la RMT con il suo i moduli può essere configurato mediante un kit di costruzione. I moduli sono costituiti da sotto-moduli e sono inoltre riconfigurabili. La Fig. 5.11 mostra il kit di costruzione modulare e le possibili configurazioni di lavoro. Al fine di ottenere molti benefici RMS senza l'RMT, esperti del mondo accademico e dell'industria suggeriscono investimenti paralleli in Non-Reconfigurable Machine Tools (NRMT). Questi dovrebbero essere in grado di essere rimossi e sostituiti in un breve periodo di tempo [16].

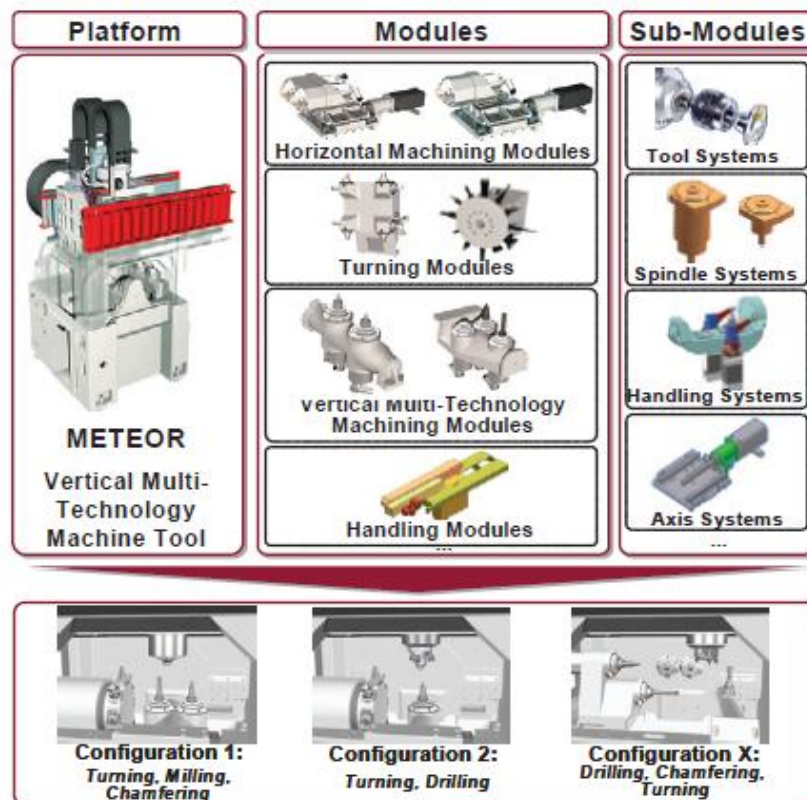


Figura 5.11 Macchine utensili riconfigurabili [1]

5.3.5 Auto adattamento del sistema di controllo

Le sfide sono anche imposte al secondo principale fattore abilitante di RMS, i sistemi di controllo. Lo Stato dell'arte dei sistemi di controllo può essere configurato solo per una struttura meccanica; quindi una riconfigurazione meccanica richiede una riconfigurazione del sistema di controllo. Un approccio per far fronte a queste sfide è stato introdotto da Pritschow et al. Hanno descritto un sistema di autocontrollo adeguato supportato con un metodo di riconfigurazione. Ma sistematicamente ancora mancano gli strumenti per realizzare sistemi di controllo riconfigurabili [31].

5.3.6 Prospettive future

A parte i citati principali attivatori di RMS - RMT e sistemi di controllo - esistono altri attributi che consentono la riconfigurabilità. Koren descrive quella attuale tempo off-line ispezione deve essere sostituita da macchine di controllo riconfigurabile in-processo. Il concetto di riconfigurazione di un nuovo paradigma produttivo ha incoraggiato gli esperti attivi nel settore della ricerca accademica e industriale. Per ricapitolare, Heisel predice che “la riconfigurabilità è un obiettivo per macchine future” [32]. Anni fa i processi riconfigurabili di fabbricazione sono stati anticipati da esperti di livello internazionale come la più importante tecnologia per il 2020 [33]. Oggi, la maggior parte degli utenti di sistemi dedicati sono soddisfatti con FMS, che sono noti da 30-35 anni [32]. La maggior parte di loro hanno riluttanza a cambiare un sistema in esecuzione. Ma FMS e RMS

possiedono in comune filosofia e applicazione [16]. Stecke predice che il futuro dei sistemi di produzione riconfigurabili sarà “più flessibile” [34]. ElMaraghy sottolinea che le funzioni logiche di supporto e riconfigurazione e un software di fabbricazione intelligente sono necessari per realizzare un’effettiva riconfigurazione fisica [16]. Un approccio di questo tipo comincia con l’idea di una produzione modulare che è completamente in grado di operare in modo autonomo [35].

Oltre alle risorse reali per la realizzazione di un processo sono considerati anche gli obiettivi, i lavoratori, nonché la struttura e la connessione alla gerarchia dell’organizzazione. Tuttavia, la modularità mira a consentire una rapida riconfigurazione di tutta la produzione dei sistemi a livello del pavimento del negozio. In futuro il designer di prodotto dovrà affrontare sfide elevate. Nel corso di una vita diversi prodotti RMS saranno realizzati e prodotto nuovo designer per progettare i loro prodotti hanno la struttura e le capacità del sistema produttivo in mente [25]. Un’indagine condotta dal CER/CIRP fra esperti del settore automotive e industria delle macchine utensili per l’importanza dei vari elementi in sistemi di produzione ha individuato una rapida accelerazione per il terzo classificato caratteristica importante. Dopo la riconfigurazione, ogni macchina deve passare attraverso un periodo di accelerazione al fine di ricalibrare l’intero sistema. Pertanto, la riduzione del tempo di set-up della macchina offre importanti possibilità di miglioramento. Un modo per affrontare questo problema è l’utilizzo di una macchina utensile e modelli dinamici in tempo reale in combinazione con un hardware in grado di rilevare algoritmi di collisione in un “anello di simulazione”. Oltre a tutte le sfide tecniche, il ruolo dell’uomo nell’automazione dei sistemi di produzione sono da considerarsi probabilmente la componente più flessibile di un sistema produttivo [16]. Questo impone nuove sfide considerando il design di funzionamento e di controllo dei futuri sistemi di produzione. Un’accurata modellazione delle interazioni dell’uomo con le macchine avrà un ruolo importante per la futura evoluzione dei sistemi di produzione. Tuttavia, rimangono aperti molti interrogativi e diverse sfide concrete che rappresentano settori “fertili” di ricerca che sono elencate in dettaglio in [16].

5.4 Sistemi di assemblaggio riconfigurabili

Sistemi flessibili di assemblaggio sono più facili da realizzare a causa di sistemi di fabbricazione flessibili e riconfigurabili, precisione e rigidità non sono requisiti così elevati. Il fornitore dell’industria ha offerto sistemi di montaggio modulari, scalabili e mobili per molti anni. Negli ultimi anni, la sfida è stata più incentrata sulla flessibilità per ottenere un volume con bassi investimenti. Un approccio interessante è il cosiddetto sistema ibrido di montaggio automatico in cui i dispositivi sono combinati con il lavoro manuale in un unico sistema. Rispetto al volume, la diversità di varianti, della produttività e flessibilità sono posizionati tra il sistema di montaggio automatico e l’assemblaggio manuale. Tali sistemi di montaggio ibrido ben si adattano, dal punto di

vista economico, per l'assemblaggio di un numero medio di prodotti. La giustificazione per l'applicazione di sistemi di montaggio ibrido non è solo sulla base del tasso di produzione desiderato, ma anche su fattori come il lavoro contenuto e la complessità delle operazioni di assemblaggio. La Fig. 5.13 illustra come sistema ibrido di montaggio. In questo caso le stazioni sono collegate con un sistema di trasferimento lineare. Le stazioni possono essere scambiate in pochi minuti, quindi adattare il sistema a un altro prodotto o modificare parti del sistema da funzionamento manuale ad automatico [36].

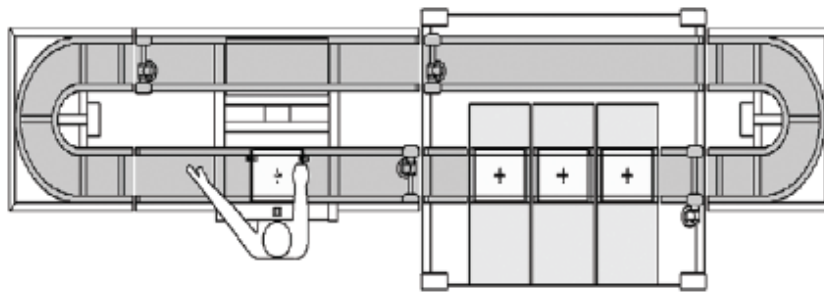


Figura 5.13 Montaggio riconfigurabile

La Fig. 5.14 mostra un esempio di un modulo ibrido di assemblaggio nel quale il trasferimento di materiale è fornito da un disco rotante. In questo modulo di base è occupato un solo operatore di montaggio. Stazioni automatiche per il controllo, pressione e ingrassaggio completano l'attività del lavoratore. Il ritmo del lavoratore di montaggio innesca il giradischi che posiziona il prossimo assemblaggio di fronte a lui. Se il numero di parti da essere assemblati supera lo spazio disponibile per memorizzare i loro in contenitori vicino al lavoratore, un secondo piatto rotante è installato sopra il primo, che porta i contenitori. Il sistema è economico perché i movimenti dell'operatore sono ridotti al minimo e quindi la percentuale di non-valore-aggiunto di operazioni secondarie è ridotto al minimo.

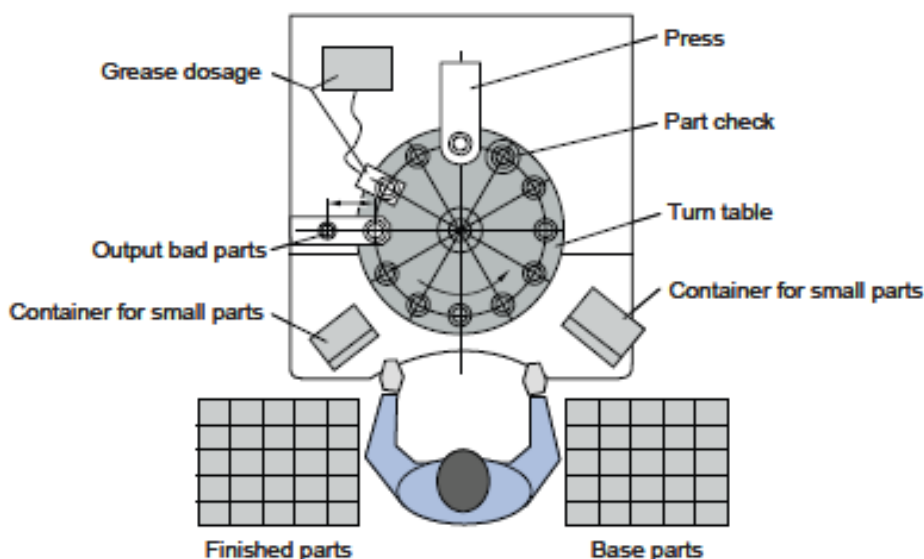


Figura 5.14 Sistema di assemblaggio ibrido con giradischi

Un particolare vantaggio risiede nella scalabilità del sistema. Ciò consente di aumentare la produzione in piccole fasi di costruzione che si ottengono da un lato con l'automazione di singole operazioni e dall'altra dalla combinazione di diversi moduli in un sistema. La Fig. 5.15 illustra le possibilità di espansione in un tale sistema [37]. In base alla fase di costruzione B1, il completo assemblaggio finale è effettuato manualmente in un'unica tabella di assemblaggio. Nella successiva fase di costruzione B2, le viti sono automaticamente inserite utilizzando fasi automatizzate. In seguito nella fase di costruzione B3, l'approvvigionamento delle viti è automatizzato utilizzando vibrazioni bowl-feeders. Il costo del montaggio utilizzando un sistema automatizzato è stato confrontato con il costo utilizzando un sistema di montaggio modulare ibrido in un esempio specifico [37]. Una gamma di quantità tra 1.000 e 10.000 prodotti al giorno doveva essere coperta, con un costo indicativo fissato di EURO 0,21 per ogni pezzo.

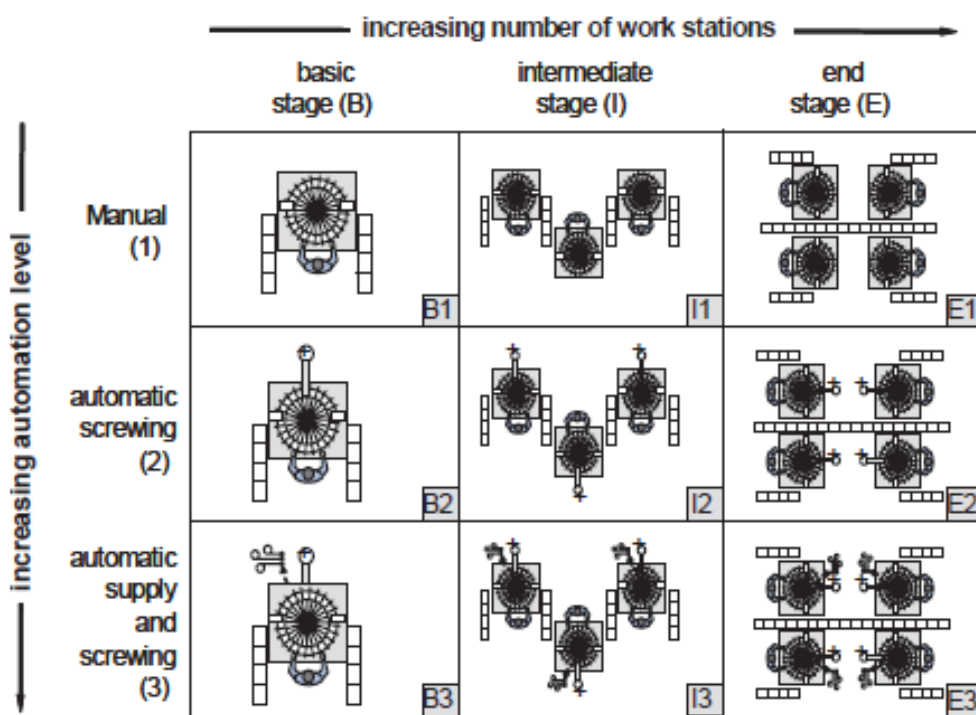


Figura 5.15 Fasi di costruzione di un sistema di assemblaggio [38]

La Fig. 5.16 mostra le curve di costo corrispondente, che rivelano che il sistema automatizzato raggiunge l'obiettivo con un tasso di produzione tra 6.000 a 9.500 pezzi al giorno. Notevoli costi aggiuntivi si può aspettare sotto queste quantità. D'altra parte, il sistema modulare, che viene ampliato con l'aggiunta di cellule di montaggio, raggiunge la zona dei costi obiettivo, una volta che il tasso di produzione è superiore a 2500 pezzi al giorno. quando la seconda cella è installata, il costo di montaggio rimane vicino all'obiettivo e dopo la terza cella la curva dei costi è la stessa del sistema automatizzato.

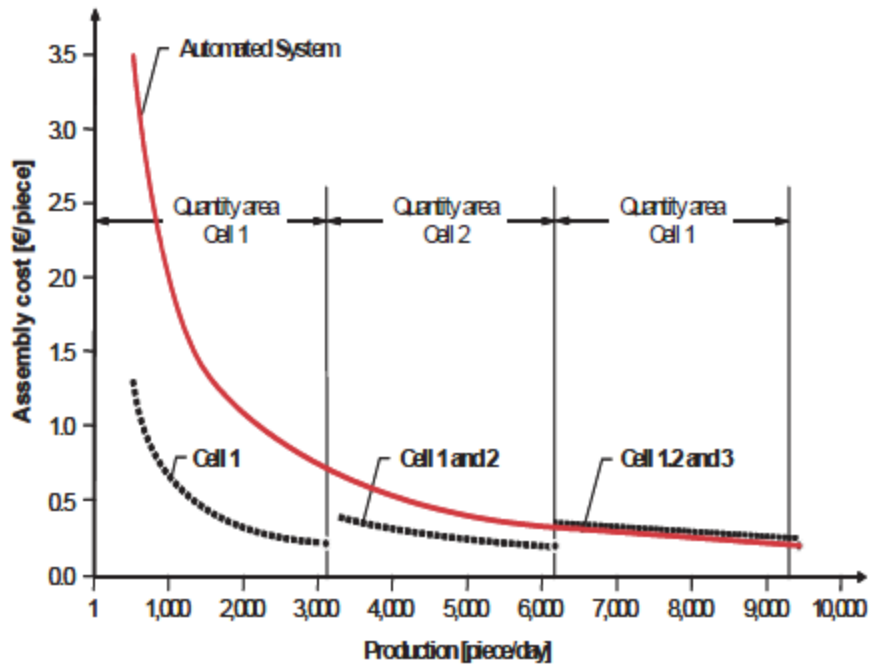


Figura 5.16 Comparazione di montaggio per assemblaggio automatizzato sistema vs cellule ibride

Tali concetti sono particolarmente adatti per i prodotti e le quantità rapidamente variabili:

- L'investimento iniziale nel sistema modulare è notevolmente inferiore rispetto a un sistema automatizzato per la quantità finale.
- Il rischio di un cattivo investimento è inferiore.
- I costi di montaggio sono già in uso con la zona obiettivo della prima cella.
- Lo sviluppo può essere gradualmente effettuata in risposta alla crescita della domanda effettiva.
- Le singole cellule di assemblaggio possono essere utilizzate in maniera differente se la domanda diminuisce.

5.5 Fabbriche trasformabili

5.5.1 Progettazione di fabbrica

I campi di progettazione dello stabilimento per la pianificazione e la realizzazione della necessaria sono mostrati in Fig. 5.17 [39]. Lo scopo di tutta la fabbrica deve essere orientata al servizio di mercati con prodotti. Ciò comprende prodotti fisici così come prodotti-servizi integrati. Lo scopo principale della progettazione della fabbrica rimane la progettazione di impianti, organizzazione e dei dipendenti. Gli impianti sono costituiti da un equipaggiamento per la produzione e l'assemblaggio, oltre che alla manutenzione delle attrezzature per la logistica e l'informazione tecnologica. L'organizzazione comprende i principi della struttura organizzativa, i loro processi

all'interno della fabbrica e l'interfaccia esterna. Aspetti come l'ambiente di lavoro, il sistema di pagamento e il modello di orario di lavoro sono i compiti principali del campo della pianificazione dei dipendenti. Questi campi del design tuttavia, non possono essere trattati separatamente. Il materiale, informazioni, personale, lavoro, energia, mezzi di comunicazione (ICT) e il flusso di capitale collegano questi campi del design. La posizione di fabbrica e dei suoi edifici sono il fondamento dei campi del design. Per questo motivo, è particolarmente importante per sincronizzare la progettazione della posizione e degli edifici da al momento giusto con i tre campi principali di progettazione.

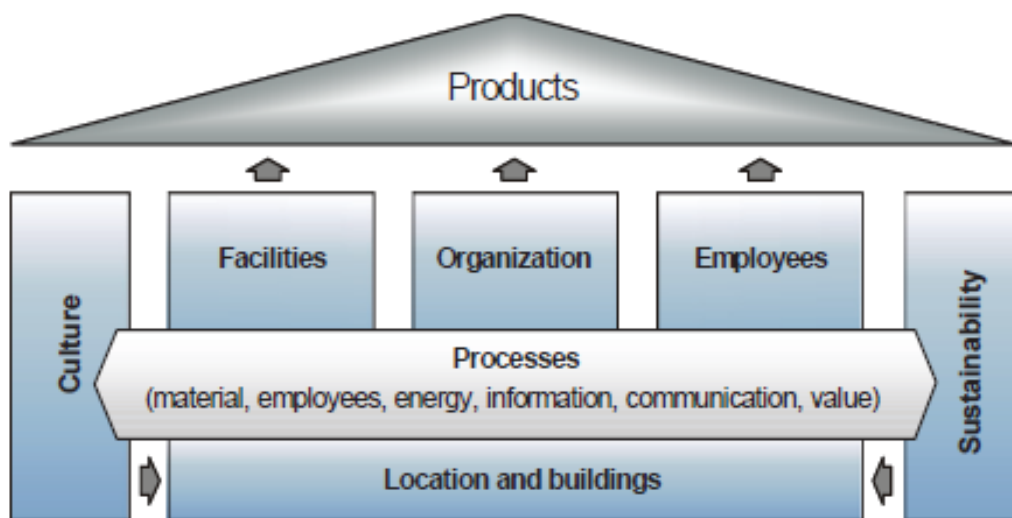


Figura 5.17 Campi di progettazione delle Fabbriche

5.5.2 Oggetti di fabbrica

Una fabbrica può essere definita come “il luogo di valore aggiunto da parte produzione con l'aiuto di fattori di produzione” [40]. Il campo del design nella progettazione di fabbrica (Fig. 5.17) mostra che una fabbrica può essere descritta come un complesso sistema socio-tecnico costituita da elementi o oggetti. Al fine di derivare oggetti ben definiti che sono oggetti di variabilità, essi possono essere classificati in mezzi, organizzazione e spazio e distribuiti a seconda dei livelli della struttura della fabbrica. I livelli più bassi e più alti sono lasciati fuori perché sono al di fuori dell'ambito di pianificazione della fabbrica.

Con questo approccio è possibile separare e valutare gli oggetti coinvolti all'interno della fabbrica. Sulla base del lavoro di Hernandez [41], Wiendahl et al. [42], e Nyhuis Reichardt [43] e Heger [44] tutti insieme hanno individuato 261 oggetti e aggregati in 25 categorie. Altre categorie sono possibili anche, per esempio la differenziazione tra risorse, processi e organizzazione utilizzati da Schuh et al. [45]. Le aziende di produzione devono reagire alle turbolenze dell'ambiente, modificando le loro fabbriche sempre con minor tempo. L'entità del cambiamento necessario oggi spesso supera la mera possibilità di un singolo sistema tecnico (ad esempio una singola macchina),

ma deve includere aree correlati e all'interno di un sito [46]. Questo porta alla concetto di fabbrica trasformabile. In questo contesto, i sistemi di produzione riconfigurabili e i sistemi di assemblaggio riconfigurabili possono essere visti come una base per una fabbrica trasformabile. Esempi di tale cambiamento dei processi sono l'ampliamento degli edifici, l'adeguamento del organizzazione aziendale o il trasferimento di una sub-fabbrica in un paese a bassi salari.

5.5.3 Valutazione di trasformabilità di una fabbrica

Con la decisione di investire in diversi tipi di trasformabilità si devono considerare i costi [47]. In primo luogo, ci sono gli investimenti per l'oggetto all'inizio e un passo ulteriore è la trasformazione. Un esempio è l'investimento in un edificio industriale e i passi per la prevista espansione. Questi investimenti sono abitualmente considerati nella decisione, ma spesso vengono ignorati gli altri fattori che coprono le spese di trasformazione dirette e indirette. Spese di trasformazione diretta sono quelle spese necessarie per il processo di trasformazione come il trasporto speciale di attrezzature, il personale per il processo di trasformazione ecc. Le spese indirette sono costituite dai salari aggiuntivi per straordinari al fine di aggregare un più elevato livello di stock di prodotti prima che una macchina sia spenta per la ricollocazione o i costi per lo stoccaggio di questi prodotti aggiuntivi. Questo confronto dei costi (Fig. 5.18) chiarisce la necessità di posizionare lo stabilimento in un adeguato grado di trasformabilità. Da questa necessità possono sorgere tre domande principali [47]:

Quale grado di trasformabilità ha una fabbrica specifica oggi (trasformabilità reale)?

Qual è il grado di trasformabilità per una fabbrica (trasformabilità target)?

Qual è l'impatto economico di un investimento nella trasformabilità?

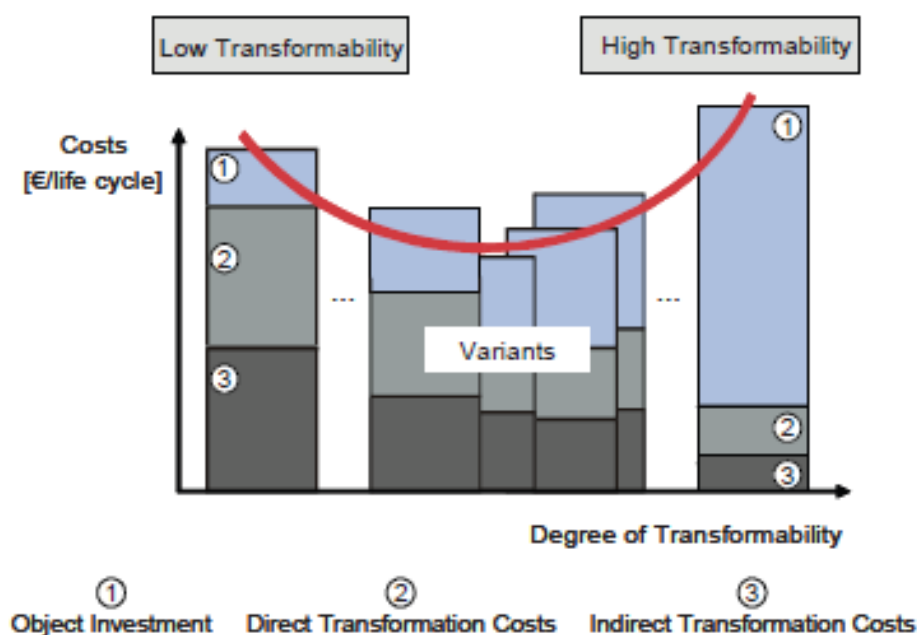


Figura 5.18 Confronto dei costi di diversi gradi di trasformabilità

La capacità di trasformare una fabbrica si basa sul generale cambiamento dei fattori abilitanti come indicato in Fig. 5.9. Questi possono essere combinati con gli oggetti di una fabbrica che porta alla cosiddetta trasformazione a blocchi. Considerano una specifica attributo di un oggetto e può quindi essere utilizzato come base per la valutazione della trasformabilità reale e di destinazione. Esempio di blocchi questi trasformazione comprende la scalabilità di un layout o l'universalità di un IT-system all'interno dello stabilimento. Sulla base di questi elementi costitutivi trasformazione uno sevenstep procedura di valutazione la trasformabilità di una misure di fabbrica e che derivano per l'azione è stata sviluppata da Wiendahl, Heger e Nyhuis [48], [49]. Si inizia con un'analisi di fabbrica (fase 1) per quantificare la trasformabilità reale. Per questo scopo, le caratteristiche qualitative e quantitative sono stati sviluppati sistemi che consentano una valutazione della trasformabilità di ogni trasformazione individuale building block, e quindi ogni oggetto di fabbrica (fase 2).

Sulla base di scenari, che devono essere sviluppati per la fabbrica, gli oggetti più importanti sono indentificati nella trasformazione (fase 3). Questa identificazione è supportata da una cosiddetta trasformazione portafoglio in cui la profondità del cambiamento e il cambiamento della varianza degli oggetti formano degli assi, Fig. 5.19. Il cambiamento relativo alla profondità quantifica il grado complessivo di cambiamento necessario previsto dai diversi scenari.

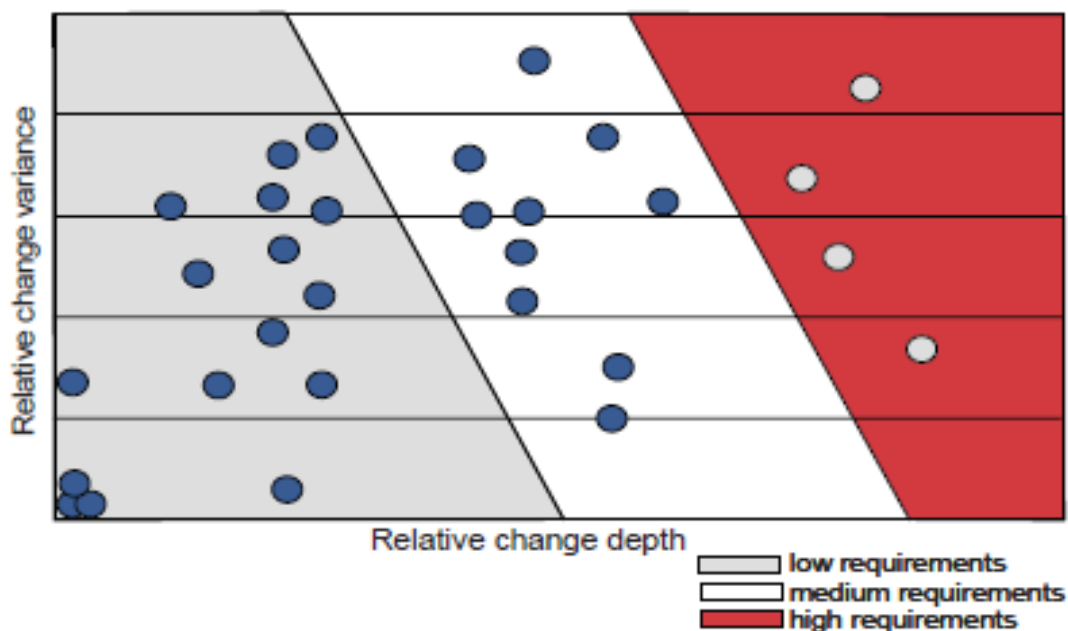


Figura 5.19 Portafoglio trasformazione degli oggetti di fabbrica [96]

Gli oggetti trasformazione che cadono nel segmento del portafoglio con valori elevati su entrambe le scale hanno trasformazione alta requisiti e l'attenzione necessità di ulteriori analisi. Successivamente scenari (fase 4) si sviluppano e profili di requisiti (punto 5) e la trasformabilità bersaglio per quegli oggetti trasformazione rilevanti (punto 6) sono derivate. Infine, le misure per

elevare la fabbrica per la grado desiderato di trasformabilità (punto 7) sono raccomandati. Queste raccomandazioni devono essere valutate dal punto di vista economico in seguito. I risultati della procedura possono essere indicati come profili di trasformabilità per gli oggetti della singola fabbrica. L'esempio in Fig. 5.20 mostra la realtà e l'obiettivo di trasformabilità dei più importanti oggetti di trasformazione di un caso reale.

Il cambiamento è la varianza del necessario grado di cambiamento per una singolo oggetto nei diversi scenari. Il grado di trasformabilità è per tutti gli oggetti meno il 100% a causa dell'ambiente specifico del fabbrica. Le soglie di classificazione sono stati ottenuti da esperienza del progetto e può essere impostato come necessario. Sono stati sviluppati diversi altri metodi per valutare la flessibilità e la trasformabilità di diversi obiettivi.

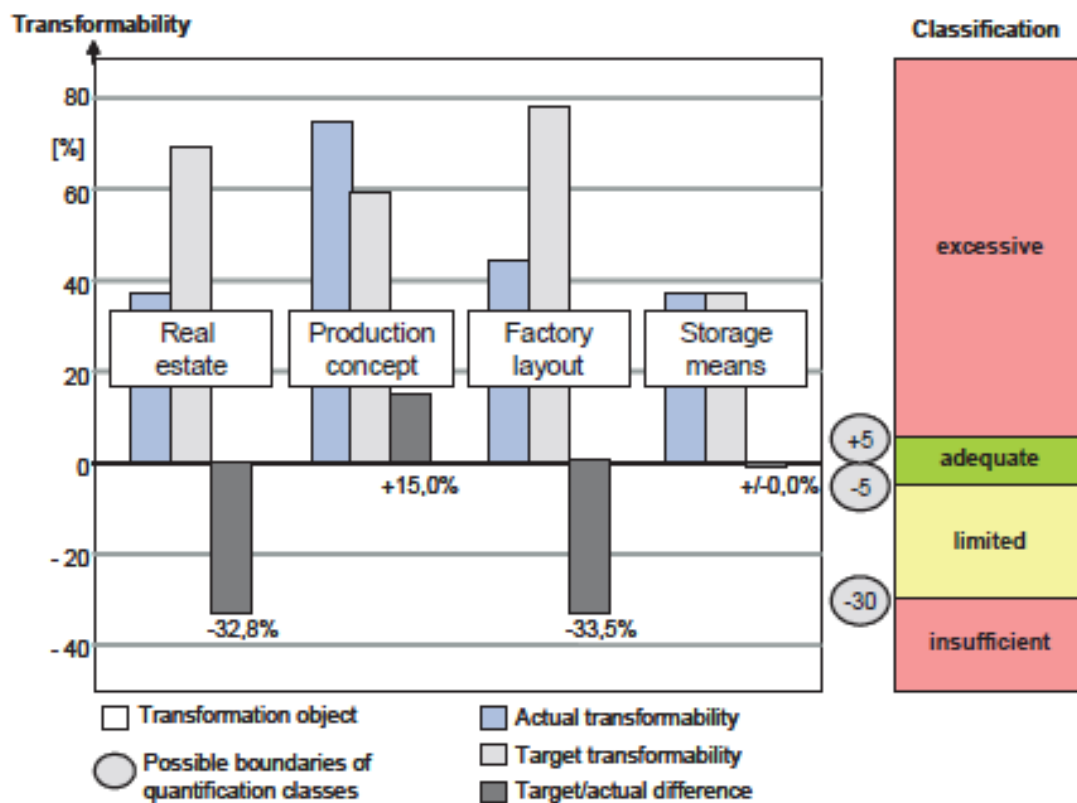


Figura 5.20 Esempio di profili di trasformabilità

Capitolo 6: Sistema CAD innovativo per colmare il gap della conoscenza tra il progettista e il costruttore

6.1 Introduzione

In risposta ai progressi tecnologici, alla feroce concorrenza di mercato e al cambiamento del mondo degli affari, l'industria moderna deve migliorare continuamente la funzionalità e la qualità dei prodotti per ottenere un vantaggio di mercato [50]. A tal fine, sono state sviluppate nel corso degli anni varie metodologie Design for X (DFX) per affrontare le "più calde" problematiche di design o strozzature in marketing. Il Design for X (DFX) è un'espressione inglese utilizzata in ambito industriale per indicare un metodo di progettazione pensato in base al ciclo di vita del prodotto al fine di migliorare la qualità e ridurre i costi ed i tempi di realizzazione di un progetto. Si cerca, con tale approccio, di abbattere i muri della progettazione seriale, al fine di ottenere, appunto, un approccio integrato.

Ogni etichetta Design for X incorpora una ampia raccolta di specifiche linee guida di progettazione. Ogni linea guida affronta gli aspetti di progettazione sia causati che influenzati dalle caratteristiche del prodotto. Le stesse linee guida di solito propongono un approccio e i corrispondenti metodi per generare e applicare conoscenze tecniche di controllo e miglioramento, o addirittura per inventare specifiche caratteristiche del prodotto. Tali linee guida rappresentano una forma esplicita di conoscenza che contiene informazioni sul "know-how-to". Al margine della corrente scientifica, quindi risiede nell'integrazione di questo know-how, nonché ulteriori esigenze del cliente, l'esperienza produttiva e altri aspetti legati al ciclo di vita del prodotto nella progettazione dei nuovi prodotti. In particolare, tenendo in considerazione dei fattori sopra citati, nella prima fase di progettazione è previsto in modo significativo un aumento della redditività del prodotto. Nonostante i benefici attesi, solo pochi strumenti sono disponibili per sostenere i progettisti nella definizione delle funzionalità del prodotto e della struttura che incorpora ulteriori considerazioni di DFX [51].

Descriviamo ora un sistema innovativo di analisi che affronta questo tema cruciale. Questo sistema di analisi è in grado di acquisire diversi DFX "know-how" in modo strutturato. Inoltre consente la valutazione di un modello CAD di un prodotto per la conformità a un DFX scelto, in particolare DFM negli stadi iniziali della progettazione, quindi migliorando notevolmente la tempestività dei prodotti e la redditività

6.1.1 Motivazioni per lo sviluppo di un sistema innovativo

Chiudere il divario di conoscenze tra progettazione e produzione

La progettazione e la pianificazione di un prodotto sono processi che richiedono la collaborazione tra tutte le parti. Per raggiungere tale collaborazione, la tecnologia e i processi di business devono essere migliorati attraverso un approccio più sistematico e strutturato [52]. Questo sistema nasce dalla metodologia Design for Manufacturing (DFM). La necessità del sistema è stata individuata grazie ai risultati di una indagine tra produttori, fornitori e progettisti, effettuata come parte di questa ricerca. I risultati dell'indagine hanno evidenziato la conoscenza e la cooperazione tra progettisti e costruttori, ma la mancanza di adeguati strumenti software di supporto a tale cooperazione [53]. Fornitori di soluzioni come PTC e UGS, Dassault hanno riconosciuto la necessità di migliorare la collaborazione tra la progettazione, il processo di pianificazione e gli ambienti di produzione. A tal fine, stanno lavorando in tre direzioni:

- Fornendo caratteristiche ben definite riconosciute dal sistema CAPP, da utilizzare come elementi fondamentali nella progettazione dei prodotti, insieme ad un piano di processo consigliato [54]
- Norme di attuazione per il trasferimento della progettazione KID tra i diversi sistemi CAD / CAPP / CAM / PLM (ad esempio, tolleranze, trattamenti termici, verniciatura), ad esempio inserendo questo KID aggiuntivo nello standard STEP [55]
- Includendo le funzionalità CAPP nei sistemi CAM, colmando così il divario tra la progettazione e il processo produttivo

Tuttavia, i fornitori di soluzioni devono ancora sfruttare i benefici attesi di una maggiore collaborazione tra i progettisti (CAD) e i processi di pianificazione (CAPP) nelle fasi iniziali della progettazione. Colmare il divario di conoscenza e collaborazione nello sviluppo del prodotto è previsto per ridurre i tempi e migliorare la qualità dei prodotti e delle prestazioni, fornendo così una soluzione più opportuna e proficua per l'industria.

Questo sistema innovativo elimina il divario di conoscenze tra progettista e costruttore, integrando considerazioni di produzione nella fase di progettazione iniziale, ed è un sistema adattivo che consente una continua acquisizione di conoscenze di produzione. Il sistema inoltre facilita l'inserimento strutturato di questo KID all'interno dell'ambiente progettista.

Affrontare le metodologie di progettazione

Iniziative del passato finalizzate esclusivamente a migliorare il costo del prodotto, la qualità, o il time to market non sono più sufficienti per ottenere un vantaggio di mercato. Oggi il focus è sull'innovazione: i prodotti differenziati da quelli dei concorrenti che siano anche accessibili, affidabili e presto sul mercato. Anche se il sistema nasce per sostenere la metodologia di

progettazione DFM, lo strumento si è evoluto per incorporare ulteriori metodi DFX, compresa la progettazione per il montaggio (DFA) e il design per lo smontaggio (DFD). Sono possibili molteplici analisi, sia in parallelo che consecutivamente. I designer che cercano di sviluppare, produrre, commercializzare e vendere prodotti innovativi, economici e rispettosi dell'ambiente devono considerare tutti questi aspetti. La maggior parte dei designer, tuttavia, non hanno le capacità cognitive per integrare le considerazioni e le linee guida di tutti i questi paradigmi. L'obiettivo di questo sistema è, pertanto, consentire ai designer di concentrarsi sulle funzionalità del prodotto e sull'innovazione, mentre il software analizza i CAD-model e i punti dove il modello non è conforme ai requisiti del metodo di progettazione scelto.

6.1.2 Ambiente di un sistema innovativo

Poiché le organizzazioni odierne diventano sempre più distribuite, il divario tra l'industria basata sulla conoscenza e l'industria basata sulle risorse è in crescita. Di conseguenza, si dovrà fare attenzione ad acquisire e memorizzare le competenze fondamentali e di colmare il divario crescente tra le funzionalità KID. Questa necessità è ancora più urgente quando produzione e assemblaggio sono esternalizzate, spesso generando così un conflitto di interessi economici. L'interfaccia tra la progettazione e le funzioni dei processi di pianificazione può di solito essere riassunta in tre flussi KID Fig. 6.1.

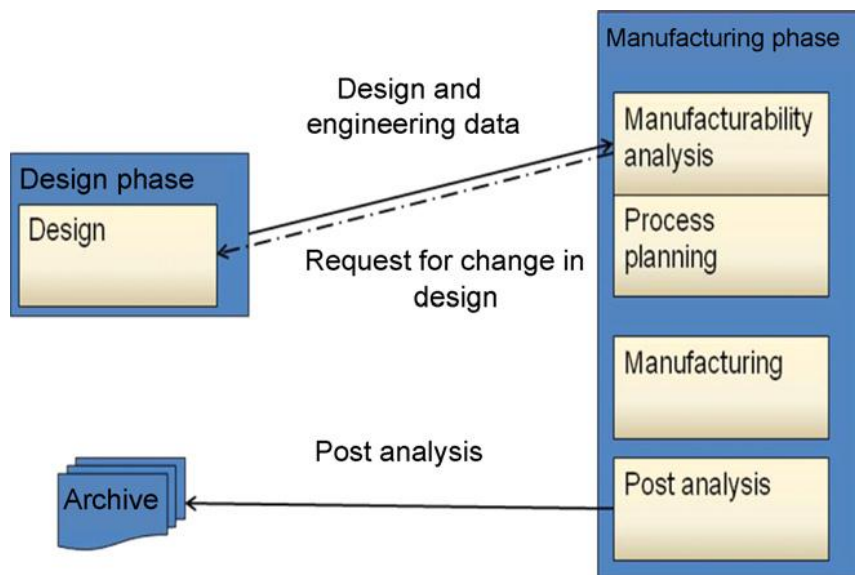


Figura 6.1 Flusso KID tra fasi di progettazione e produzione

Il primo flusso è un flusso di dati tecnici forniti dal progettista per il pianificatore di processo. Questo flusso di solito è supportato da un meccanismo di controllo. Il secondo flusso comporta interazioni tra i cambiamenti o le correzioni necessarie sulla base di questioni di producibilità, che vengono poi accettati o respinti dal progettista. Questo flusso varia a seconda di come “cresce” il prodotto. Nelle prime fasi della progettazione del prodotto, prototipazione e rilascio la

comunicazione è generalmente limitata, informale e non ben documentata a causa delle differenze di status tra progettisti di processo e designer, così come i vincoli di tempo o di conflitti di interesse. Queste interfacce spesso diventano evidenti in una organizzazione solo quando un nuovo set di dati di progettazione e di ingegneria è formalmente liberato e pertanto, non si verifica in questa fase dell'apprendimento organizzativo. Infatti, uno dei principali talloni “d'Achille” delle piccole e medie imprese (PMI) è che gli errori tendono a ripresentarsi [53], come il prodotto “cresce” questa comunicazione diventa più formale e prende la forma di ordini di modifica (ECO). Il terzo flusso è un KID post-rapporto di analisi dal produttore al dipartimento di design (di solito garanzia di qualità). Questa relazione, generalmente disponibile solo per le imprese in posizione dominante sul mercato, incorpora tutte le difficoltà incontrate nella progettazione e fabbricazione. Questi rapporti di analisi sono utilizzati principalmente per garantire che le procedure corrette per completare i dati mancanti siano effettuate per il rilascio di una nuova versione del prodotto. Questi feedback generalmente non comprendono le interazioni informali che hanno avuto luogo tra le parti e in particolare, non sono registrate le necessarie modifiche sostanziali in un prodotto a causa di tali interazioni. Inoltre, non esiste un meccanismo strutturato per acquisire e analizzare questo feedback o per fornire ai progettisti l'effetto di apprendimento non raggiunto.

6.1.3 Obiettivi di un sistema innovativo

Il nostro sistema innovativo mira a diminuire il numero di flussi/iterazioni molteplici tra designer e progettisti di processo, riducendo così gli sforzi da parte di queste due fondamentali e costose risorse. In particolare, lo scopo è quello di diminuire il numero dei flussi KID nell' interfaccia informale (flussi 1 e 2) fino a quando non si arriva al prodotto finale (Fig. 6.2)

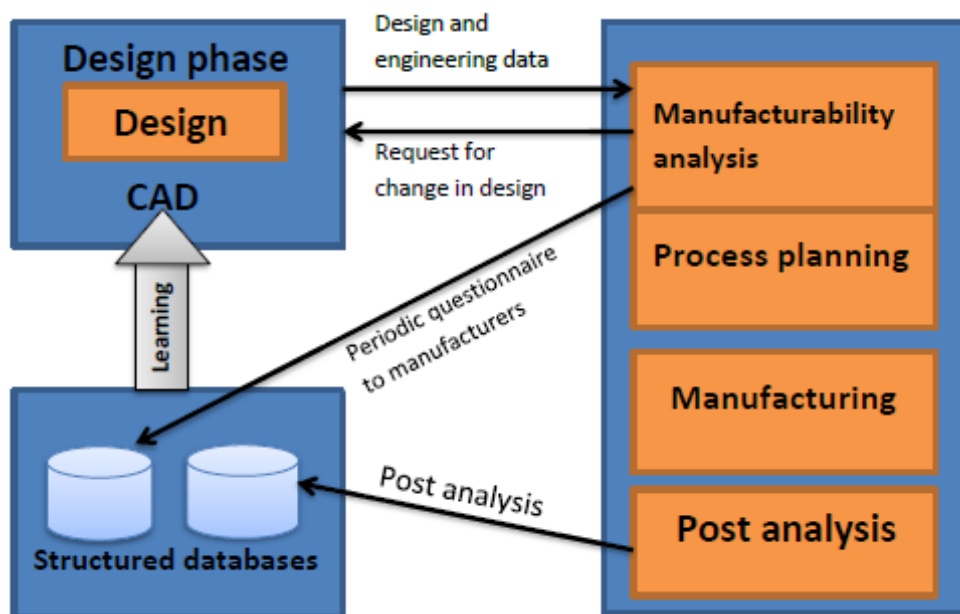


Figura 6.2 Chiusura del ciclo KID

Un ulteriore obiettivo del sistema è di acquisire, conservare e riutilizzare la conoscenza creata in questa fase del ciclo di vita del prodotto. Questi obiettivi saranno raggiunti attraverso:

- Creazione di un meccanismo strutturato per acquisire le interazioni tra il designer e il progettista di processo o produttore.
- La creazione di un meccanismo strutturato per acquisire la post-analisi.
- La creazione di una capacità per analizzare questi database strutturati.
- Incorporando un componente intelligente nell'ambiente del progettista. A richiesta, questo componente può valutare la conformità del prodotto con una metodologia di progettazione selezionato, in particolare, DFM basata sulle conoscenze acquisite nel sistema.
- Incorporando la capacità di modificare continuamente le conoscenze acquisite nel sistema.

L'attuazione di queste funzioni garantisce non solo l'acquisizione della conoscenza, ma anche la sua capitalizzazione. Inoltre, la conoscenza acquisita è sempre aggiornata per non diventare stagnante come l'industria si evolve. Inoltre, ogni settore specifico può dare priorità diverse e può, con il minimo sforzo, analizzare la conformità di ogni ulteriore DFX in qualsiasi momento.

6.2 Panoramica di un sistema innovativo

Il sistema fornisce ai progettisti la capacità di analizzare se un modello prodotto è conforme al “know-how” delle varie metodologie di progettazione. Un accento particolare è posto sulla DFM, che è il nucleo del sistema. L'analisi del sistema rimane a livello delle caratteristiche del modello e degli attributi e non include ulteriori analisi geometriche.

Il sistema comprende tre componenti principali (Fig. 6.3):

- I. Una regola-base e la capacità di aggiornamento continuo per modificare la regola-base a seconda delle esigenze dell'industria.
- II. Una capacità di analisi dei modelli CAD sulla base della regola-base, attualmente sviluppata sul PTC Pro-Engineer ambiente.
- III. Una capacità di interfaccia che converte l'acquisita regola-base in un codice di un programma riconosciuto dal Pro-Engineer tool kit, permettendo l'analisi del modello.

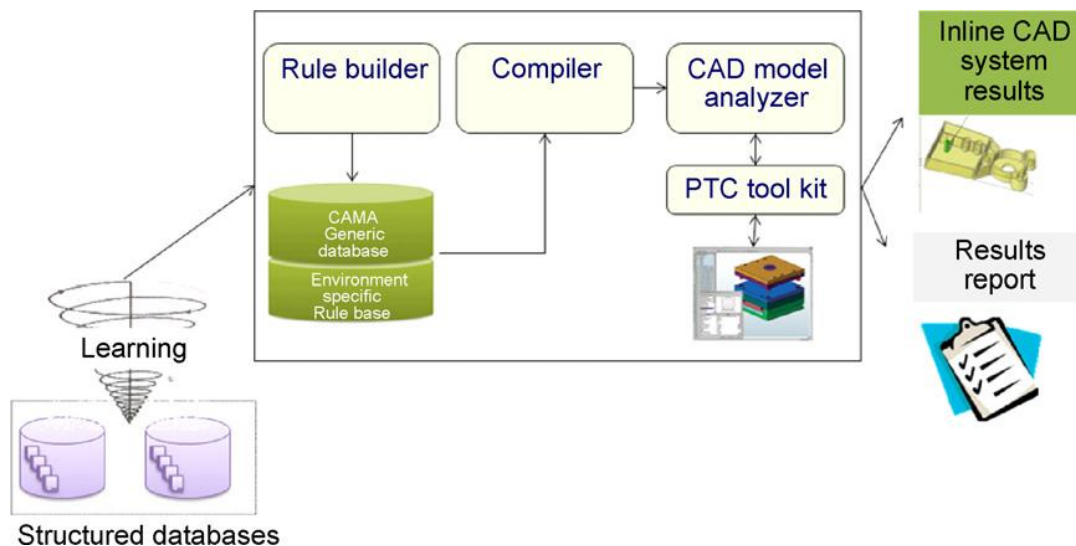


Figura 6.3 Componenti di un sistema innovativo

6.2.1 Gli input del sistema

La nuova conoscenza è incorporata in questo sistema innovativo da tecnologi, progettisti, ingegneri o pianificatori di processo. La nuova conoscenza può essere disponibile dopo l'analisi della strutturata BASI KID, oppure essere adottata da fonti esterne (ad esempio, introduzione di nuove tecnologie o materiali) o creata nella società (cioè, nuova manodopera).

6.2.2 L'output del sistema

L'output del sistema è sotto forma di una relazione digitale che riassume le non conformità, per indicare le caratteristiche problematiche che richiedono modifiche. In contrasto con le soluzioni software CAD, CAM e CAPP, questo sistema innovativo affronta i seguenti due fattori:

- La regola-base del sistema è comprensibile, consentendo una regolare revisione e modifica, facilitando così la capitalizzazione delle conoscenze.
- La definizione di nuove regole nel sistema è intuitiva e non richiede notevole abilità di programmazione.

6.3 La regola “costruttore”

Le regole non possono essere scritte in linguaggio naturale, siccome il sistema deve essere in grado di interpretare queste regole e reagire di conseguenza. Inoltre, il linguaggio naturale può portare alla scrittura di norme equivalenti in modi diversi, la quale dovrebbe essere evitata al fine di evitare molteplicità e ambiguità. Pertanto, al fine di garantire un intuitivo aggiornamento della regola-base e la sua comprensibilità, sono necessari tre componenti (Fig. 6.4): (a) ontologia, (b) sintassi e (c) regola-base. L'ontologia è il dizionario delle parole che comprende la lingua della regola. La sintassi è la frase regola. La regola-base è una digitale KID-base che memorizza tutte le regole del sistema in modo strutturato.

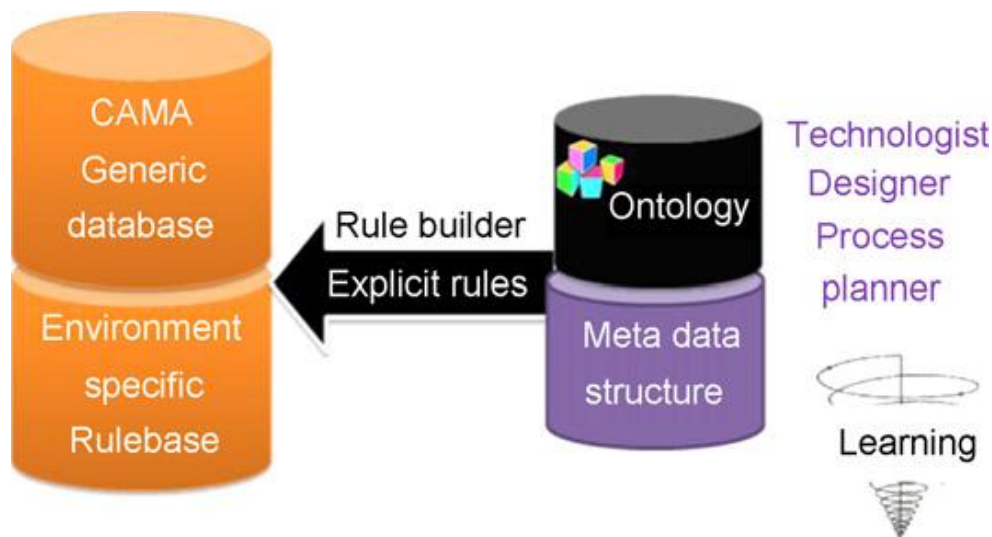


Figura 6.3 La regola “costruttore”

6.3.1 Ontologia

Nel campo dell'intelligenza artificiale (AI), l'ontologia viene definita come: “la specificazione di concettualizzazioni utilizzati per aiutare i programmi e gli esseri umani a condividere le conoscenze. Si tratta di una descrizione dei concetti e delle relazioni che possono esistere per un agente o una comunità di agenti” [56]. Questa ricerca ha sviluppato un'ontologia dedicata per questo sistema su due fonti principali: (a) un ambiente di pianificazione ontologica del processo sviluppato come parte di questa ricerca [53] e (b) un insieme di regole-base raccolte nel sistema, basato sulla letteratura e sui sondaggi dell'industria. Questa ontologia costituisce l'unità sintattica

per lo sviluppo della regola-base. Per esempio, la regola DFM “foro di profondità non deve essere superiore a tre volte il diametro del foro” [57], e comprende una serie di diversi tipi di unità sintattiche o elementi ontologici, come dimostrato nella Tabella 6.1.

Syntax unit types	Specific value
Feature	Hole
Feature.characteristic	Hole.Depth
Severity	Must
Condition	Not be longer than
Value	Three
Action	Times
Feature	Hole
Feature.characteristic	Hole.Diameter

Tabella 6.1 Tabella dell’unità sintassi

I tipi di unità sintattica individuate nel sistema includono le funzionalità, caratteristiche, azioni, condizioni, operazioni logiche, gravità, il processo di fabbricazione, DFX e valori. Ad ogni tipo di unità sintattica è associato con un set fissato di valori. Per esempio, l’unità sintattica “feature” comprende i seguenti valori: modello, buche, rotonda, superficie, asse, estrusione, la portata e la fusione. Ogni caratteristica ha un set di funzionalità connessi a valori caratteristici. Ad esempio, la “feature.characteristics” per la caratteristica "buco" include: asse, diametro, tipo di foro, tipo di foro inferiore, profondità buco, profondità di foratura reale. Le “feature.characteristics” sono ulteriormente suddivise in due tipi: proprietà e metodo. Per esempio, un foro profondo, è caratterizzato da un’effettiva profondità trapano, che può essere più breve rispetto alla profondità del foro. La prima è una proprietà della funzione, mentre la seconda richiede un calcolo geometrico (un metodo). Per consentire la registrazione automatica della banca dati nello strumento di analisi del nostro sistema, l’ontologia è difficilmente codificata e memorizzata nel database, e ogni nuova aggiunta richiede un ulteriore sviluppo del software. Di conseguenza, un’ampia costruzione dell’ontologia è necessaria per consentire la costruzione di tutte le feature-based.

6.3.2 Sintassi

Per sintassi si intende l’insieme di regole grammaticali astratte in una lingua, per governare l’ordine delle parole in una frase corretta. La sintassi è direttamente correlata alla semantica, dal momento che il significato di una frase dipende dalla sua struttura sintattica. La sintassi gestisce la struttura delle regole del sistema e quindi determina la modalità con la quale si combinano le unità sintattiche per definire nuove regole. Le regole sono costruite selezionando le unità sintattiche dall’ontologia e quindi aggiungendole in una frase secondo le regole formali. L’interfaccia del generatore è la regola

intuitiva che mette a disposizione solo i valori delle unità sintattiche per la selezione. Per esempio, una volta che un elemento è stato selezionato, solo le rilevanti caratteristiche di funzionalità saranno visualizzate per la selezione. Le specifiche della sintassi dettano la regola “costruttore”. Per esempio, una regola deve iniziare con una “feature” seguita da una corrispondente “feature.characteristic”. La Tabella 6.2 mostra la sintassi di una regola che detta il raggio esterno minimo richiesto per un’efficiente ed economica produzione.

Structure	Specific value
Feature	Round
Feature.characteristic	Round.Radius
Action	>
Value	1.5 mm
Logical	And
Feature	Round
Feature.characteristic	Round.isConvex
Action	=
Value	TRUE

Tabella 6.2 La sintassi e i valori corrispondenti della norma esempio

Questa regola è stata identificata durante la costruzione e investigazione di una grande post-produzione del database di feedback (vedi sezione 6). Questa regola definisce che il raggio esterno dovrebbe essere maggiore di 1,5 mm. “Round.Radius” è una funzionalità di una caratteristica Round che rappresenta il valore del raggio. “Round.isConvex” è una funzionalità di una caratteristica Round che rappresenta un valore booleano (TRUE se convessa Round e FALSE altrimenti). Dopo che una regola è stata costruita, devono essere definite le opzioni di regola per determinare le informazioni supplementari necessarie per la classificazione delle regole. Queste opzioni sono:

- Gravità: rappresenta la severità della regola (errore, avvertimento, raccomandazione).
- DFX: la metodologia di progettazione, produzione, montaggio, smontaggio, ambiente, ecc.
- Processo di fabbricazione: specifica il previsto processo di fabbricazione, quando le limitazioni.
- Subappaltatore: se la regola è generica o specifica di un certo ambiente- subappaltatore.
- Regola i dettagli:
 1. Dettagli approvazione: composta da, approvata da, modifica data, ecc.
 2. Nome della regola.
 3. Descrizione: la definizione esplicita della regola.

6.3.3 Regola base

Basato sul “know-how” di DFM e DFA, oltre 50 norme sono state incorporate nella regola base. Queste norme sono state raccolte dalla letteratura disponibile [56], da indagini industriali di fabbricanti di PMI, post-analisi e feedback da parte dei produttori di designer. Tutte le regole sono basate sulle caratteristiche e pertanto non sono norme che richiedono analisi geometrica. Le regole sono acquisite in un database per consentire un facile look-up durante la fase di progettazione e una facile modifica quando richiesta. La regola “costruttore” consente a un’organizzazione di aggiornare o espandere la regola-base di nuove conoscenze.

6.4 Il compilatore del sistema innovativo

In generale, i compilatori consentono la traduzione da una lingua all'altra. Il compilatore è il legame tra la regola-base e lo strumento di analisi di progettazione del nostro sistema. Dopo che una regola è definita usando la regola “costruttore”, il compilatore è attivato. Il compilatore converte ogni regola in una regola-base che consiste in un set di comandi C/C++ e Pro/Toolkit. Il Pro/Toolkit è una grande libreria di funzioni C che consente applicazioni esterne per accedere al database Pro/ENGINEER e all’interfaccia utente. Le funzioni della libreria Pro/Toolkit sono utilizzate per recuperare le informazioni e i dati dal modello di progettazione[58]. Il compilatore converte quindi la regola-base in: (a) serie di comandi toolkit per il recupero di informazioni sulla geometria e (b) in comandi logici e aritmetici per ulteriori operazioni di recupero dei dati. Simili ai programmi per elaboratore, che non sono testo, ma piuttosto composizioni gerarchiche delle strutture di calcolo [59], le regole del sistema non sono frasi scritte in un linguaggio naturale e quindi possono essere facilmente convertite in una composizione gerarchica delle unità sintattiche delle regole.

La procedura di compilazione:

- Dividere gerarchicamente la regola in base alle priorità d’operazione (operazioni logiche, condizioni, azioni) e costruire un albero binario che rappresenta l'ordine delle operazioni.
- Analizzare l'albero da sinistra a destra in post-ordine e costruire una lista delle operazioni sequenziali.
- Traduci ogni operazione ad un insieme di comandi C / C + + e Pro / Toolkit.

6.5 L'analizzatore

Il processo di analisi è incorporato nel design del sistema CAD Pro/Engineer menù standard, in modo che il designer può attivare l'analisi design delle applicazione in linea. Il primo passo per attivare l'analisi è filtrare le regole pertinenti DFX, regola gravità o altri settori di classificazione nella finestra di dialogo del filtro. L'analizzatore controlla il modello CAD per eventuali incongruenze con le regole selezionate eseguendo le appropriate funzioni. I risultati dell'analisi del design possono essere presentati graficamente in Pro/E. Come evidenziato in Fig. 6.4, le caratteristiche che non sono conformi con una particolare regola sono evidenziate in colori diversi in base alla regola di gravità. Inoltre vengono visualizzati i dettagli in una finestra separata. Infine, i risultati delle analisi sono anche salvati in un file CSV per ulteriori analisi o uso.

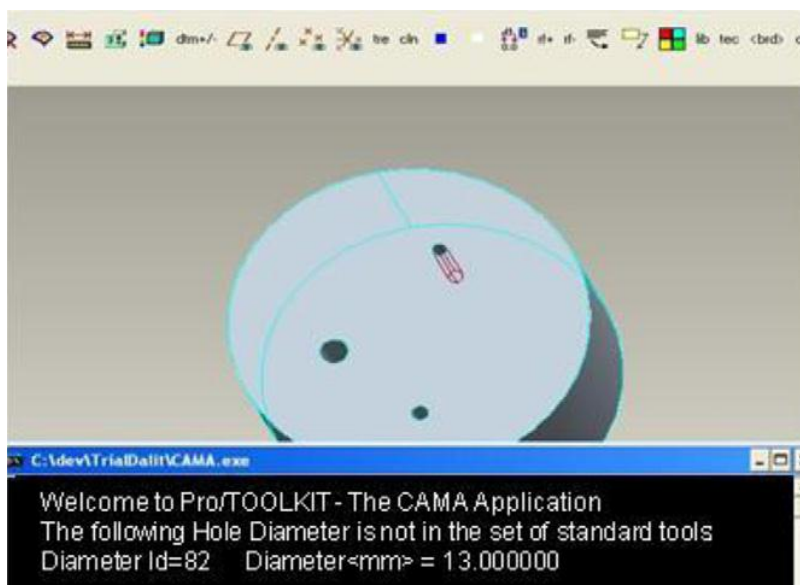


Figura 6.4 Analizzatore

6.6 Chiusura del ciclo della conoscenza

Parte integrante e importante del sistema è il feedback strutturato del costruttore che viene sistematicamente acquisito e messo a disposizione per l'organizzazione di ulteriori analisi. La strutturazione di questo meccanismo di feedback è stato basato su una revisione di più di 1200 post-analisi feedback e da più di 50 forme di fabbricazione dei subappaltatori. Con la creazione di un database digitale di queste forme e raccolta in una struttura di database, si sono così gettate le basi per la conoscenza e l'analisi dell'apprendimento organizzativo. Sono iniziati i lavori per identificare i nuovi vincoli di produzione e le raccomandazioni sulla base di queste forme in ingresso. Ogni nuova raccomandazione individuata è verificata con esperti per determinare: (a) se si tratta di un requisito specifico locale/subappaltatore o una generica limitazione e (b) la corretta gravità di

queste raccomandazioni. Tali norme sono quindi pronte per l'inserimento all'interno della regola-base e per essere attuate con l'analizzatore, con conseguente capitalizzazione istantanea sul processo di apprendimento organizzativo. Contrariamente alla post-fase di analisi, dove il feedback strutturato può essere applicato, la raccolta di tali feedback strutturati in fase di analisi preliminare di producibilità sembra essere meno praticabile perché, come osservato in precedenza (punto 6.1.2), la comunicazione in questa fase è più problematica e informale. Proponiamo, quindi, di introdurre periodiche interviste strutturate e questionari ai progettisti di processo al fine di non perdere questa conoscenza e di essere in grado di capitalizzare su di essa.

Il processo di pianificazione e progettazione del prodotto sono processi concorrenti che richiedono la collaborazione tra tutte le parti per ottimizzare il prodotto, il time-to-market, costi e qualità. In questo documento abbiamo presentato un sistema innovativo, un sistema aperto e flessibile che facilita l'acquisizione, la modifica e l'applicazione della conoscenza di producibilità, che permette non solo l'aggiornamento dell'esplicita regola-base, ma fornisce anche una regola automatica per la raccolta e la diffusione delle regole per la progettazione nell'ambiente CAD. Quindi questo sistema rende il "know-how" a disposizione dei progettisti nell'ambito delle loro specifiche attività di progettazione e può in tal modo influenzare le decisioni prima che il design del prodotto sia rilasciato alla produzione. Il sistema inizialmente era incentrato sul sostegno DFM, ma si è evoluto per includere ulteriori metodologie DFX. Questo sistema dimostra la forza di sviluppare le ontologie semantiche. Questo elemento di forza comprende: (a) il beneficio comune della creazione di un'ontologia per la creazione di una terminologia comune che sia condivisa tra i lavoratori o collaboratori di diverse discipline e (b) la scoperta della macchina (computer trattabili) per la comprensione della terminologia. Questo passo avanti è stato raggiunto attraverso lo sviluppo di una sintassi complementare e di un compilatore sulla piattaforma ontologica. Lo sviluppo e l'applicazione dell'ontologia semantica, della sintassi e del compilatore all'interno del prodotto e delle procedure del processo di progettazione consentono non solo la conoscenza aggiornata ma anche l'inserimento di nuove conoscenze all'interno dell'ambiente CAD. Questo assicura che lo strumento della conoscenza non diventi rapidamente stagnante e irrilevante. Inoltre, permette non solo processi efficienti ma anche continue istruzioni organizzative e la capitalizzazione della conoscenza, dimostrando così la prova del concetto di questa dinamica basata sulla conoscenza.

Inoltre, mentre tradizionalmente ogni metodologia DFX è studiata separatamente e richiede una ri-educazione dei progettisti, questo sistema innovativo consente, con una graduale integrazione delle new design, raccomandazioni nell'ambiente della progettazione. Così, non solo si analizza un prodotto di progettazione secondo un new set di linee guida, ma anche contemporaneamente si educa il progettista per quanto riguarda queste nuove linee guida o semplicemente rinfresca la

consapevolezza del progettista così che le linee guida non vengono trascurate. Il sistema analizzato consente anche una rapida analisi di un progetto in accordo con diversi DFX “know-how”, fornendo così informazioni per quanto riguarda il compromesso di adottare una serie di linee guida piuttosto che un altro. Infine un feedback complementare strutturato di processo è stato attuato per colmare il divario di conoscenze tra produzione e design. Questa struttura organizzativa dell'apprendimento, strutturata in forma di moduli digitali e interviste, consente massima conoscenza e acquisizione e la capitalizzazione è richiesta per chiudere il ciclo della conoscenza. In conclusione, per migliorare la producibilità del prodotto e la redditività nel contesto economico attuale, gli strumenti appropriati, le procedure e la cultura d'impresa devono essere sviluppati per fornire ai progettisti di prodotto feedback sistematici da parte dei produttori secondo le linee guida della producibilità. Questa conoscenza deve essere incorporata in una struttura organizzativa con un processo di apprendimento e inserita nell'ambiente di progettazione per garantire una maggiore qualità del prodotto e una migliore redditività.

Conclusioni

In conclusione, l'analisi bibliografica svolta ha evidenziato alcuni elementi di innovazione dei sistemi CAD che si ritiene possano rappresentare una significativa opportunità evolutiva per i sistemi industriali flessibili, e proposto un sistema CAD che possa far fronte all'elevata varietà di domanda e di prodotti che caratterizza l'età odierna.

Abbiamo analizzato la tecnica della prototipazione virtuale cioè è una metodologia operativa che impiega le tecniche di modellazione e di simulazione numeriche per sviluppare un prodotto in modo da ridurre (o addirittura evitare) la costruzione di prototipi fisici e quindi risparmiare tempi e costi; questo è possibile attraverso il CAD tridimensionale che consente di definire il modello geometrico che è alla base di tutte le attività successive.

Lo sviluppo dei sistemi CAD e della loro interfaccia uomo-macchina (HMI) ha portato alla realizzazione di sistemi per la visualizzazione e l'interazione completamente tridimensionale. Tali strumenti costituiscono la frontiera della simulazione ingegneristica attraverso la progettazione e l'utilizzo di vari sistemi di Realtà Virtuale e Realtà Aumentata. Queste tecnologie facilitano la pianificazione della sequenza di assemblaggio e verificano quanto si può risparmiare in termini di tempo e materiale necessari per produrre i componenti di montaggio veri e propri per testare le sequenze. Inoltre, l'utente può gestire oggetti reali direttamente e assemblare i componenti virtuali con parti reali, che facilitano la progettazione e la sequenza di montaggio.

Successivamente è stata analizzata l'integrazione tra CAD e CAM attraverso la tecnica CAPP che si occupa della trasformazione delle informazioni di disegno in informazioni necessarie alla produzione. In particolare si è posto l'accento sull'innovativo approccio AFR completamente automatico (generativo), ovvero in grado di realizzare, senza alcun intervento di un operatore, cicli di lavorazione per pezzi meccanici da lavorare alle macchine utensili. Le tecniche AFR comprendono la ricerca delle geometrie costruttive del pezzo da lavorare, al fine di estrapolare informazioni che caratterizzano feature di forma generiche, alle quali possano essere associati diversi modi di lavorazione; gli approcci di questo tipo hanno quindi come unico obiettivo quello di creare un algoritmo capace di riconoscere la geometria del pezzo come unione di diverse feature di forma.

In conclusione si è visto che per far fronte ai progressi tecnologici, a una produzione caratterizzata da una maggiore concorrenza e a una globalizzazione delle organizzazioni, c'è bisogno di una maggiore collaborazione tra progettazione e produzione. E' stato proposto un modello CAD che sopperisca a questa carenza fondamentale per ottenere vantaggi di mercato ponendo il CAD al centro di un sistema produttivo riconfigurabile (RMS). In questo modo le potenzialità dei sistemi

CAD possono rendere un sistema flessibile che possa fronteggiare efficacemente la variabilità al fine di aumentare la competitività. Per queste ragioni si ritiene strategico il CAD per le aziende. Il sistema CAD proposto tuttavia richiede ulteriori investimenti in ricerca al fine di incorporare le caratteristiche illustrate nella tesi.

Bibliografia

- [1] G. Motta. Tecnologie avanzate di produzione. Petrini editore Torino 1985
- [2] A. Siamesi, A. Brandolese, M. Garetti. FMS sistemi di produzione per la fabbrica automatica. Editrice Il Rostro, Milano 1987.
- [3] George Chryssolouris, Manufacturing System Theory and Practice. Spinger Verlag, New York, 2005 .
- [4] G. Halevi, R.D. Weill. Principles of process planning: a logical approach. Chapman & Hall, London, 1995.
- [5] Hong Chao Zhang, Leo Alting. Computerized Manufacturing Process Planning Systems. Chapman & Hall, London, 1994.
- [6] Giusti, M. Santochi. Tecnologia Meccanica E Studi Di Fabbricazione. Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 1992.
- [7] E. Gawlik, The analysis of methods for Computer Aided Process Planning, International Workshop CA Systems and Technologies n.17 (2002).
- [8] V.B. Sunil, S.S Pande, Automatic recognition of features from freeform surface CAD models, Computer-Aided Design n. 40 (2008) 502-517.
- [9] Francesconi, Andrea and Matteucci, Gianluca and Pagni, Maurizio and Lanzetta, Michele (2009) Cicli di lavorazione automatizzati tramite sistemi AFR. *Macchine Utensili*, 30/200 (6). pp. 78-82. ISSN 1126-3377
- [10] Francesconi, Andrea and Matteucci, Gianluca and Pagni, Maurizio and Lanzetta, Michele (2009) Cicli di lavorazione automatici: i principali metodi AFR (2a parte). *Macchine Utensili*, 30/200 (9). pp. 166-170. ISSN 1126-3377
- [11] Y.S. Kim, E. Wang, Recognition of machining features for cast then machined parts, *Computer-Aided Design* 34 (2002) 71–87.
- [12] Abele, E., Liebeck, T., Wörn, A., 2006, Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems, *Annals of the CIRP*, 55/1: 433-440.

- [13] Chryssolouris, G., 2005, Manufacturing Systems: Theory and Practice, 2. Ed., Berlin / Heidelberg, Springer Verlag.
- [14] Wiendahl, H.-P., Hernández, R., 2001, The Transformable Factory - Strategies, Methods and Examples, 1st International Conference on Agile, Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, USA, 20.- 21.5.2001.
- [15] Ohno, T., 1988, The Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production, Portland, USA, Productivity Press.
- [16] ElMaraghy, H. A., 2006, Reconfigurable Process Plans for Responsive Manufacturing Systems, 3rd International CIRP Conference on Digital Enterprise Technology, Setúbal, Portugal, 18.-20.9.2006.
- [17] Tolio, T., Valente, A., 2006, An Approach to Design the Flexibility Degree in Flexible Manufacturing Systems, 16th Int. Conf. on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, University of Limerik, Ireland, 26.-28.06.2006.
- [18] Wiendahl, H.-P., 2002, Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik (Transformability: key concept of a future robust factory), wt Werkstattstechnik online, 92/4: 122-127.
- [19] Chryssolouris, G., 2005, Manufacturing Systems: Theory and Practice, 2. Ed., Berlin / Heidelberg, Springer Verlag.
- [20] Alexopoulos, K., Mamassioulas, A., Mourtzis, D., et al., 2005, Volume and Product Flexibility: a Case Study for a refrigerators Producing Facility, 10th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFa 2005), Catania, Italy, 19.- 22.09.2005.
- [21] ElMaraghy, H. A., 2005, Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms, International Journal of Flexible Manufacturing Systems. Special Issue: Reconfigurable Manufacturing Systems, 17/4: 261-276.
- [22] Eversheim, W., Kettner, P., Merz, K.-P., 1983, Ein Baukastensystem für die Montage konzipieren (Design a modular system for assembly), Industrie Anzeiger, 92/105: 27-30.
- [23] Hu, S., Koren, Y., Stecke, K., 2006, Introduction, International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 17/2: 259-260.

- [24] Fujii, S., Morita, H., Kakino, Y., et al., 2000, Highly Productive and Reconfigurable Manufacturing System, Pacific Conference on Manufacturing, 06.- 08.09.2000.
- [25] Koren, Y., 2005, Reconfigurable Manufacturing and Beyond (Keynote Paper), CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, Michigan, 11.-12.05.2005.
- [26] Koren, Y., Jovane, F., Heisel, U., et al., 1999, Reconfigurable Manufacturing Systems. A keynote paper, Annals of the CIRP, 48/2: 527-540.
- [27] Koren, Y., 2006, General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems, In: A. I. Dashchenko (ed.), Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories, Berlin / Heidelberg, Springer Verlag: 27-46.
- [28] Abele, E., Wörn, A., Martin, P., et al., 2006, Performance evaluation methods for mechanical interfaces in reconfigurable machine tools, 2006 International Symposium on Flexible Automation, Osaka, Japan, 10.-12.07.2006.
- [29] Mehrabi, M., Ulsoy, A. G., Koren, Y., et al., 2002, Trends and Perspectives in Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems, Journal of Intelligent Manufacturing, 13/2: 135-146.
- [30] Abele, E., Wörn, A., Stroh, C., et al., 2005, Multi Machining Technology Integration in RMS, CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, USA, 10.-12.05.2005.
- [31] Landers, R. G., Ruan, J., Liou, F., 2006, Reconfigurable Manufacturing Equipment, In: A. I. Dashchenko (ed.), Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories, Berlin / Heidelberg, Springer Verlag: 79-110.
- [32] Heisel, U., Michaelis, M., 2004, Progress in Reconfigurable Manufacturing Systems, 2nd International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, USA, 20.-21.08.2004.
- [33] National-Research-Council, 1998, Visionary Manufacturing Challenges for 2020, National Academies Press.
- [34] Stecke, K. E., 2005, Reconfigurability is the future of flexibility, CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, USA, 10.- 12.05.2005.

- [35] Drabow, G., 2006, Modulare Gestaltung und ganzheitliche Bewertung wandlungsfähiger Fertigungssysteme (Modular design and holistic evaluation of transformable manufacturing systems), Universität Hannover, PhD thesis.
- [36] Rosskopf, M., Reinisch, H., 2004, Prozessmodulare Gestaltung von Produktionssystemen (Design of modular process production systems), In: H.-P. Wiendahl, D. Gerst, L. Keunecke (ed.), Variantenbeherrschung in der Montage - Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe (Mastering variants in assembly - concept and practices of the flexible production final segment), Berlin / Heidelberg, Springer Verlag: 231-260.
- [37] Lotter, E., 2006, Hybride Montagesysteme (Hybrid assembly systems), In: B. Lotter, H.-P. Wiendahl (ed.), Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis (Assembly in industrial production - A handbook for practise), Berlin / Heidelberg, Springer Verlag.
- [38] Hartel, M., Lotter, B., 2006, Planung und Bewertung von Montagesystemen (Planning and evaluation of assembly systems), In: B. Lotter, H.-P. Wiendahl (ed.), Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis (Assembly in industrial production - A handbook for practise), Berlin / Heidelberg, Springer Verlag: 407-432.
- [39] Wiendahl, H.-P., 2002, Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik (Transformability: key concept of a future robust factory), wt Werkstattstechnik online, 92/4: 122-127.
- [40] VDI, 2006, Entwurf VDI-Richtlinie "Fabrikplanung" (Concept of a VDI-guidance for factory planning), Association of German Engineers (VDI).
- [41] Hernández, R., 2003, Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung (Systematics of transformability in factory planning), VDI Verlag, Düsseldorf, PhD thesis.
- [42] Wiendahl, H.-P., Nofen, D., Klußmann, J. H., et al., 2005, Planung modularer Fabriken - Vorgehen und Beispiele aus der Praxis (Planning of modular factories - approach and practical examples), München / Wien, Carl Hanser Verlag.
- [43] Nyhuis, P., Reichardt, J., Elscher, A., 2005, Synergetische Fabrikplanung (Synergetic factory planning), 6. Deutsche Fachkonferenz Fabrikplanung, Fabriken für den globalen Wettbewerb (6th german symposium factory planning, factories for the global competition), Ludwigsburg, 08.-09.11.2005.

- [44] Heger, C., 2007, Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten (Evaluation of the transformability of factory objects), Hannover, PZH-Verlag.
- [45] Schuh, G., van Brussel, H., Boer, C., et al., 2003, A Model-Based Approach to Design Modular Plant Architectures, 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Saarbruecken, Germany, 03.-05-07.2003.
- [46] Wiendahl, H.-P., 2006, Global Supply Chains – A New Challenge for Product and Process Design, 3rd International CIRP Conference on Digital Enterprise Technology, Setúbal, Portugal 18.-20.9.2006.
- [47] Schuh, G., Harre, J., Gottschalk, S., 2004, Design for Changeability (DFC) in product-oriented production, 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Budapest, Hungary, 19.-21.05.2005.
- [48] Nyhuis, P., Kolakowski, M., Heger, C. L., 2005, Evaluation of Factory Transformability, 3rd International CIRP Conference on Reconfigurable Manufacturing, Ann Arbor, USA, 11.-12.05.2005.
- [49] Wiendahl, H.-P., Heger, C. L., 2004, Justifying Changeability: A Methodical Approach to Achieving Cost Effectiveness, The International Journal For Manufacturing Science & Production, 6/1/2: 33-39.
- [50] Kimura F, Matoba Y, Mitsui K (2007) Designing Product Reliability Based on Total Product Lifecycle Modelling. *Annals of the CIRP* 56(1):163–166.
- [51] Zwolinski P, Tichkiewitch S, Sghaier A (2007) The Use of Virtual Reality Techniques During the Design Process: From the Functional Definition of the Product to the Design of its Structure. *Annals of the CIRP* 56(1):135–138.
- [52] Susman GI (1992) *Integrating Design and Manufacturing for Competitive Advantage*. Oxford University Press, USA.
- [53] Denkena B, Shpitalni M, Kowalski P, Molcho G, Zipori Y (2007) Knowledge Management in Process Planning. *Annals of the CIRP* 56(1):175–180.
- [54] Li WD, Ong SK, Nee AYC (2002) Recognizing Manufacturing Features from a Design-by-feature Model. *Computer Aided Design* 34(11):849–868.

- [55] Newman ST, Allen RD, Rosso Jr RSU. (2003) CAD/CAM Solutions for STEPcompliant CNC Manufacture. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 16(7/8):590–597.
- [56] Gruber TR (1993) A Translation Approach to Portable Ontologies. *Knowledge Acquisition* 5(2):199–220.
- [57] Bralia JG (1986) *Handbook of Product Design for Manufacturing: A Practical Guide to Low-cost Production*. McGraw-Hill Book Company.
- [58] Srikumaran S, Sivaloganathan S (2005) Proving Manufacturability at the Design Stage Using Commercial Modeling Software: Through Feature Mapping and Feature Accessibility. *Computer-Aided Design and Applications* 2(1– 4):507–516.
- [59] Teitelbaum T, Reps T (1981) The Cornell Program Synthesizer: A Syntaxdirected Programming Environment. *Communications of the ACM* 24(9): 563–573.