
SISTEMI INTEGRATI DI PRODUZIONE

Sommario

1 - AUTOMAZIONE INDUSTRIALE E INDUSTRIA 4.0	9
1.1 – Automazione.....	9
1.2 – Storia dell’Automazione nell’Industria	9
1.2.1 – Le rivoluzioni industriali.....	9
1.2.2 – Fasi di sviluppo dell’automazione.....	10
1.3 – Situazione attuale	12
1.3.1 – Automazione nell’industria	12
1.3.2 – La quarta rivoluzione industriale	13
1.3.3 – Industria 4.0.....	13
1.3.4 – I nove pilastri dell’innovazione tecnologica	13
1.3.5 – Prospettive.....	16
2 – IL CONTROLLO NUMERICO DELLE MACCHINE UTENSILI	17
2.1 – Introduzione	17
2.1.1 – Sistema di produzione	17
2.1.2 – La riduzione dei tempi	17
2.1.3 – Evoluzione dell’automazione.....	18
2.1.4 – Funzione del calcolatore.....	18
2.1.5 – Livello di automazione.....	19
2.1.6 – Flessibilità	20
2.1.7 – Il Controllo Numerico – Idea di base	21
2.1.8 – Definizione	21
2.1.9 - Cenni storici.....	22
2.1.10 – CNC e DNC	22
2.1.11 - Concetti di base – controllo.....	23
2.1.12 - Campi di applicazione.....	24
2.1.13 - Vantaggi e limiti.....	24
2.1.14 – Giustificazione economica	25
2.1.15 – Classificazione delle MU	25
2.1.16 - Denominazione degli assi macchina.....	26
2.1.17 – Esempi di MU CNC.....	27
2.2 – Struttura meccanica.....	27
2.2.1 – Esempio - Analisi della struttura di una macchina	28
2.2.2 – Caratteristiche richieste.....	30
2.2.3 - Particolari costruttivi delle MU a CN	33
2.2.4 – Gruppi bancali.....	33

2.2.5 – Le guide.....	34
2.2.6 – Gruppo montante	36
2.2.7 – Testa operatrice.....	37
2.2.8 – Mandrino	37
2.3 – Cambio utensile e pezzo	39
2.3.1 – Il portautensile.....	39
2.3.2 – La gestione degli utensili	42
2.3.3 – Presetting dell’utensile	42
2.3.4 – Il cambio utensile.....	44
2.3.5 – Tipologie di magazzino	44
2.3.6 – Sistemi di cambio utensile	46
2.3.7 – Il tempo di cambio utensile	49
2.3.8 - Cambio automatico del pezzo/pallet	50
2.4 – Azionamenti.....	51
2.4.1 – Azionamenti per il mandrino	52
2.4.2 – Azionamenti per gli assi	56
2.4.3 - Motori per tavole girevoli.....	63
2.4.4 - Motore lineare.....	63
2.5 - Trasduttori.....	64
2.5.1 – Trasduttori di posizione: classificazione	65
2.5.2 – Trasduttori per macchine utensili.....	66
2.5.3 – Trasduttori ottici	67
2.5.4 - Quantizer	68
2.5.5 - Encoder.....	69
2.5.6 - Encoder lineare o riga ottica	72
2.5.7 – Encoder assoluto	73
2.6 – Unità di governo.....	74
2.6.1 - <i>Software</i>	75
2.6.2 - <i>Hardware</i>	75
2.6.3 - <i>Funzioni</i>	76
2.6.4 – <i>Controllo posizione</i>	77
2.6.5 - <i>Interpolatore</i>	78
2.6.6 - <i>Sistemi di controllo (continuo)</i>	81
2.7 – Programmazione	85
2.7.1 - <i>Definizioni</i>	86
2.7.2 – <i>Parole</i>	86

2.7.3 – Esempi di programmazione	88
2.7.4 – Il linguaggio APT	89
2.7.5 – Il CAM (Computer Aided Manufacturing)	93
2.8 – Il controllo adattativo	96
2.8.1 – Esempi di C.A.	96
2.8.2 - Quando utilizzare il C.A.	96
2.8.3 – Funzionamento del C.A.	97
2.8.4 – Sorgenti di variabilità nel C.A.	97
2.8.5 - Parametri controllabili	98
2.8.6 – Tipi di controllo adattativo	98
2.8.7 - Controllo adattativo tecnologico di ottimizzazione (ACO)	98
2.8.8 – Controllo adattativo tecnologico di limite (ACC)	100
2.8.9 - Controllo adattativo geometrico (GAC)	103
2.8.10 - Controllo adattativo ad apprendimento (LAC)	104
2.8.11 – Diffusione odierna	105
2.9 – CNC e DNC	105
2.9.1 - Controllo numerico computerizzato (CNC)	105
2.9.3 – Controllo diretto da calcolatore (DNC)	107
3 – LE LINEE DI PRODUZIONE	110
3.1 – Linea a trasferimento	110
3.1.1 - Origini	111
3.1.2 – Archetipi di trasferte	111
3.1.3 – Buffer inter-operazionale	112
3.1.4 – Il controllore	112
3.1.5 - Produttività	113
3.1.6 - Struttura di una linea a trasferimento	118
3.1.7 - Linee transfert con unità flessibili	123
3.2 – Flexible Manufacturing Systems (FMS)	123
3.2.1 – Cenni storici	124
3.2.2 – Schema di FMS	124
3.2.3 – Requisiti dell’FMS	124
3.2.4 - Flessibilità - definizione	125
3.2.5 - Sistema di movimentazione	125
3.2.6 – Il layout	126
3.2.7 – Il sistema di controllo	127
3.2.8 – Il ciclo ad albero	128

3.3 – Mass Customization Manufacturing (MCM) e Sistemi Agili	128
3.3.1 - <i>Mass Customization Manufacturing (MCM)</i>	128
3.3.2 – <i>Sistemi Agili</i>	129
4 – ROBOT INDUSTRIALI	132
4.1 – Definizione	132
4.2 – Ragioni della diffusione	133
4.3 – Considerazioni sul braccio umano e gradi di libertà	133
4.4 - Nomenclatura	134
4.5 – Elementi costitutivi	134
4.6 – La struttura meccanica	135
4.6.1 - <i>Posizionamento del polso</i>	135
4.6.2 – <i>Struttura cartesiana</i>	136
4.6.3 – <i>Struttura cilindrica</i>	137
4.6.4 – <i>Struttura sferica</i>	138
4.6.5 – <i>Struttura articolata o antropomorfa</i>	139
4.6.6 – <i>Struttura SCARA</i>	141
4.6.7 – <i>Il polso</i>	141
4.6.8 – <i>La mano</i>	143
4.7 – Sistemi di azionamento	145
4.7.1 – <i>Azionamento pneumatico</i>	145
4.7.2 – <i>Azionamento oleodinamico</i>	146
4.7.3 – <i>Azionamento elettrico</i>	146
4.8 – Unità di governo	147
4.8.1 – <i>Interfaccia uomo-macchina</i>	147
4.8.2 - <i>Funzioni</i>	147
4.8.3 – <i>Sistema di controllo</i>	148
4.9 - Sensori	148
4.9.1 – <i>Sensori di contatto</i>	149
4.9.2 – <i>Sensori di forza</i>	150
4.9.3 – <i>Sensori di visione</i>	150
4.9.4 – <i>Altri sensori</i>	152
4.10 – Programmazione	153
4.10.1 – <i>Programmazione manuale per autoapprendimento</i>	153
4.10.2 – <i>Programmazione manuale tramite linguaggio</i>	154
4.10.3 – <i>Programmazione assistita Off-Line</i>	154
4.11 – Caratteristiche dei robot	155

4.11.1 – Volume di lavoro	156
4.11.2 – Precisione dei movimenti.....	157
4.11.3 – Velocità di lavoro e capacità di carico	159
4.12 - Applicazioni.....	159
4.12.1 - Vantaggi	159
4.12.2 – Giustificazione economica.....	160
4.12.3 – Classificazione in base all'impiego	160
4.12.4 - Robot di verniciatura.....	160
4.12.5 – Robot di saldatura	161
4.12.6 – Robot di manipolazione.....	162
4.12.7 – Robot di montaggio.....	163
4.12.8 – Robot di misura e ispezione	163
4.12.9 – Celle robotizzate	164
4.13 – I co-bot.....	165
4.13.1 – Storia dei co-bot	165
4.13.2 – Standard ISO	167
4.13.3 – Modalità di collaborazione.....	167
4.13.4 – Analisi del rischio.....	168
4.13.5 - Applicazione	170
4.13.5 – Vantaggi dei Cobot.....	170
5 – CMM: MACCHINE DI MISURA A COORDINATE.....	171
5.1 - Definizioni	171
5.1.1 - Esempio di carta di controllo.....	171
5.2 – Il controllo di qualità	172
5.2.1 – Controllo di qualità tradizionale	172
5.2.2 – Controllo di qualità assistito da calcolatore	172
5.3 – Metodi di collaudo	173
5.4 – La macchina di misura a coordinate.....	174
5.4.1 – Tipi di struttura.....	174
5.4.2 – Materiali utilizzati	175
5.4.3 – Le guide.....	176
5.4.4 – Caratteristiche generali.....	176
5.4.5 – Unità di governo.....	177
5.4 - Caratteristiche del luogo d'installazione – sala metrologica.....	177
5.5 – Elementi geometrici e sistemi di riferimento.....	178
5.5.1 – Elementi geometrici	178

5.5.2 – Sistema di riferimento e allineamento	178
5.6 – Il tastatore.....	179
5.6.1 – Principio di funzionamento.....	179
5.6.2 – Tastatore a scansione	180
5.6.3 – Compensazione del raggio	180
5.6.4 – Qualifica del tastatore.....	181
5.7 – Misura di un punto.....	181
5.7.1 - Perpendicolarità alla superficie	181
5.7.2 - Dimensioni della sfera.....	181
5.7.3 - Acquisizione di un punto su un piano inclinato	182
5.8 – Misura di un elemento.....	182
5.8.1 - Esempio.....	183
5.9 – Software per macchine di misura	183
5.9.1 – Esempi di software di misura	183
5.9.2 – Collaudo su matematica 3D	185
6 – LAVORAZIONI NON CONVENZIONALI.....	186
6.1 - Classificazione	186
6.2 – L'elettroerosione - generale.....	188
6.2.1 – Cenni storici.....	188
6.2.2 – Principio e vantaggi.....	188
6.2.3 – Tipologie di elettroerosione	189
6.2.4 – Tempi di lavorazione	189
6.3 – Elettroerosione a tuffo.....	190
6.3.1 – Il processo	190
6.3.2 – Tensione e corrente	191
6.3.3 – Controllo del processo	192
6.3.4 – Il dielettrico	192
6.3.5 – Velocità di asportazione	193
6.3.6 – Circuito a generatore di impulsi	194
6.3.7 – Elettroerosione fresante (o rotante).....	194
6.3.8– La macchina	195
6.3.9 – L'elettrodo	196
6.3.10– Vantaggi e svantaggi	196
6.4 -Elettroerosione a filo	197
6.4.1 – Caratteristiche generali	197
6.4.2 - Parametri	198

6.4.3 – <i>Il filo</i>	198
7 – FABBRICAZIONE ADDITIVA	199
7.1 – Prototipazione.....	199
7.2 – Principio di base	200
7.3 – Storia della fabbricazione additiva	201
7.3.1 – <i>Terminologia</i>	201
7.4 - Valore economico dei componenti.....	201
7.5 - Fasi di costruzione del componente additive	202
7.5.1 – <i>Poligonalizzazione</i>	203
7.5.2 – <i>Elaborazioni software</i>	204
7.5.3 – <i>Avvio della macchina</i>	207
7.5.4 – <i>Post-processing</i>	208
7.6 - Materiali.....	208
7.7 – Vantaggi e svantaggi della fabbricazione additiva.....	209
7.7.1 - <i>Vantaggi</i>	209
7.7.2 - <i>Svantaggi</i>	210
7.8 – Fabbricazione additiva VS CNC.....	210
7.8.1 - <i>Materiali</i>	210
7.8.2 - <i>Velocità</i>	211
7.8.3 – <i>Complessità geometrica</i>	211
7.8.4 - <i>Accuratezza</i>	211
7.8.5 - <i>Programmazione</i>	211
7.9 - STAMPA 4D (curiosità)	212
7.10 - Applicazioni.....	212
7.10.1 – <i>Esempio: pompa Diesel</i>	212
7.10.2 – <i>Esempio: componente fresato</i>	213
7.11 – FDM (Fused Deposition Modeling) – Estrusione a filo	214
7.11.1 – <i>Classificazione delle tecniche</i>	214
7.11.2 – <i>Storia – Il brevetto Stratasys</i>	215
7.11.3 – <i>Il processo</i>	215
7.11.4 - <i>Parametri di processo</i>	217
7.11.5 – <i>Macchine commerciali</i>	218
7.11.6 - <i>Materiali</i>	218
7.11.7 - <i>Finiture</i>	219
7.11.8 – <i>Vantaggi e svantaggi</i>	219
7.11.9 - <i>Applicazioni</i>	220

7.11.10 -Confronto fra tecniche	220
8 – PROGRAMMAZIONE E CONTROLLO DELLA PRODUZIONE.....	221
8.1 - Introduzione al Production Planning.....	221
8.1.1 – Obiettivi del gestore della produzione	221
8.1.2 – Logica Push e logica Pull.....	221
8.1.3 – I sistemi Just In Time (JIT) (o Kanban) – Logica Pull	222
8.1.4 – Logica Push	223
8.1.5 – CONWIP – Constant Work In Progress (Logica Pull)	224
8.2 – MRP (Material Requirement Planning) – Programmazione delle richieste di materiali (MRP)	225
8.2.1 - Esempio.....	226
8.2.2 – Formule generali	228
8.3 – Filosofia JIT	229
8.3.1 – Livellamento della domanda	229
8.3.2 – Schema del JIT	229
8.3.3 – Impatto del setup su buffer e lotti	230
8.4 - Schedulazione della produzione	232
8.4.1 – Centri di lavorazione in serie	233
8.4.2 – Singolo centro di lavorazione	234
8.4.3 – Centri di lavorazione in parallelo	238
8.4.4 – Schedulazione di serie di centri di lavoro	240
8.4.5 – Linee lunghe	241
8.4.6 – Extra.....	241

1 - AUTOMAZIONE INDUSTRIALE E INDUSTRIA 4.0

1.1 – Automazione

L'automazione è la **conversione in automatica** (ossia **senza** o con **ridotto intervento da parte dell'uomo**) di un **processo di lavoro**, di una **procedura** o di una **macchina**.

L'automazione non trasferisce semplicemente le funzioni umane alle macchine, ma comporta una **profonda riorganizzazione del processo di lavoro**, durante la quale vengono ridefinite sia le funzioni umane che quelle delle macchine.

Esempio: officina meccanica, tornio parallelo. Di solito l'operatore attiva manualmente il movimento degli assi. Nel caso automatico l'operatore invece prepara la macchina (gestisce il carico/scarico pezzi) e programma la macchina, non gestisce più le operazioni della macchina, lo fa il computer.

L'automazione **iniziale** si basava su **dispositivi di controllo meccanici** ed **elettromeccanici**.

Negli **ultimi 40 anni**, tuttavia, il **computer** è diventato gradualmente il principale elemento di automazione. Ora, l'automazione include **controlli elettronici e computerizzati**.

1.2 – Storia dell'Automazione nell'Industria

La storia dei dispositivi automatizzati risale all'antica invenzione dei **meccanismi di cronometraggio** degli antichi **greci e persiani**.

Alcuni esperti fanno risalire la **prima catena di montaggio** fino al **1104 d.C.**, all'**Arsenale veneziano**, quando circa 16.000 operai lavoravano per costruire una nave al giorno, per la Repubblica di Venezia.

1.2.1 – Le rivoluzioni industriali

La prima Rivoluzione Industriale

Nel periodo **tra il 1760 e il 1840**, vi fu la transizione da abili artigiani, che fabbricano prodotti a mano, a **lavoratori (relativamente) non qualificati** che utilizzano macchine alimentate da una **ruota idraulica** o da un **motore a vapore**.

La transizione fu prevalente nell'**industria tessile**, ma gli effetti della prima rivoluzione industriale furono avvertiti in quasi tutti gli aspetti della vita quotidiana.

La seconda rivoluzione industriale

La seconda rivoluzione industriale ebbe luogo **tra il 1870 e il 1914** (inizio della Prima guerra mondiale).

A differenza della prima rivoluzione industriale, che fu caratterizzata dall'avvento di nuove tecnologie, la seconda rivoluzione industriale ebbe più a che fare con il **miglioramento delle tecnologie esistenti e delle sinergie fra loro**.

Ad esempio, l'**elettricità** sostituì l'acqua e il vapore come fonte di energia primaria nelle fabbriche.

La seconda rivoluzione industriale segnò anche l'inizio della **catena di montaggio**, delle **parti intercambiabili** e, con esse, della **produzione in serie**.

Si ha un **cambiamento della domanda**: servono **grandi quantità e pezzi tutti uguali**. L'automazione nasce per rispondere a quest'esigenza.

Fu centrale il contributo di **Frederick Taylor** (vedi dopo) e la sua organizzazione scientifica del lavoro. In generale, la **specializzazione di uno strumento** lo rende **più efficiente** a svolgere un certo compito, ma lo rende anche più rigido, **meno flessibile** per essere usato in altri ambiti, caratteristica che invece può essere utile.

La terza rivoluzione industriale

La terza rivoluzione industriale ha visto l'introduzione di nuove tecnologie dirompenti, in questo caso **l'automazione e il computer**.

Questi progressi portarono a **profondi cambiamenti** nella produzione, consentendo **livelli di flessibilità** (grazie ai robot industriali) e **accuratezza** (grazie ai controlli numerici computerizzati (CNC)), mai visti prima in officina.

L'inizio può essere fatto risalire ai **primi anni '60**, che ha visto l'introduzione del primo robot industriale e dei primi CNC commerciali

1.2.2 – Fasi di sviluppo dell'automazione

Fase I: Meccanizzazione e razionalizzazione del lavoro

La **meccanizzazione** sostituisce la forza umana o animale con la **potenza fornita dalla macchina**; quei meccanismi, tuttavia, non erano automatici ma **controllati dagli operai**.

Alla fine del XIX secolo, **Frederick W. Taylor** razionalizzò il sistema industriale introducendo i principi della **gestione scientifica**. La gestione scientifica **separava rigorosamente il lavoro mentale dal lavoro manuale**: i lavoratori non dovevano pensare, ma seguire istruzioni dettagliate preparate per loro dai dirigenti.

Nel 1913 la **Ford Motor Company** introdusse una **catena di montaggio mobile**, riducendo drasticamente i tempi di assemblaggio. La catena di montaggio ha imposto un rigoroso ordine alla produzione costringendo i lavoratori a tenere il passo con il movimento del nastro trasportatore. La catena di montaggio Ford divenne un simbolo di **efficienza della produzione** americana; per i lavoratori e i critici sociali, tuttavia, incarnava la **monotonia e la pressione incessante** del lavoro meccanizzato.

Fase II: Automazione della produzione

Nel 1947 la Ford Company istituì il primo dipartimento di automazione, incaricato di progettare **sistemi di movimentazione** dei componenti, di tipo **elettromeccanico, idraulico e pneumatico**, nonché il carico e lo scarico dei componenti in macchina, in modo da collegare macchine indipendenti e aumentare il tasso di produzione. Nel 1950 Ford mise in funzione il **primo impianto automatico**.

Per soddisfare le richieste della US Air Force per un aereo da combattimento ad alte prestazioni, i cui **complessi componenti** strutturali non potevano essere fabbricati con metodi di lavorazione tradizionali, nei primi anni '50 fu sviluppata una **tecnologia di controllo numerico (NC) delle macchine utensili**.

Progettate secondo le specifiche militari, le prime apparecchiature NC si rivelarono **troppo complesse** e quindi inaffidabili, oltre che **proibitivamente costose**, e furono applicate principalmente nell'industria aeronautica sovvenzionata dallo stato.

La tecnologia NC ha permesso a ingegneri e manager di esercitare un **maggiore controllo sul processo di produzione**.

Fase III: Computer-Aided Manufacturing (CAM)

Le prime applicazioni industriali dei **computer digitali** si sono verificate nelle industrie elettriche, lattiero casearie, chimiche e delle raffinerie di petrolio per il controllo automatico dei processi. Nel 1959, TRW ha installato il primo computer digitale progettato specificamente per il **controllo dell'impianto produttivo** nella raffineria di Port Arthur di Texaco.

Alla fine degli anni '60, con lo sviluppo del time-sharing su computer mainframe di grandi dimensioni, le macchine a controllo numerico venivano poste sotto il **controllo numerico diretto (DNC)** di un **computer centrale**.

Con l'introduzione dei microprocessori negli anni '70, i sistemi DNC centralizzati furono in gran parte sostituiti da **sistemi di controllo numerico computerizzato (CNC)**, in cui ogni macchina NC era controllata dal **proprio computer**.

La **robotica** ha combinato le tecniche di controllo remoto e NC per sostituire i lavoratori umani con **manipolatori meccanici a controllo numerico**. I primi robot commerciali apparvero nei primi anni '60.

Fase IV: Automazione nei processi di Ingegneria

Negli anni '60 i grandi produttori aerospaziali, come McDonnell-Douglas e Boeing, svilupparono **sistemi proprietari di progettazione assistita da computer (CAD)**, che fornivano strumenti di **computer grafica** per la stesura, l'analisi e la modifica di progetti di aeromobili.

Nel 1970 Computer Vision Corporation ha introdotto il **primo sistema CAD commerciale** chiavi in mano, completo per i progettisti industriali, che ha fornito tutto l'hardware e il software necessari in un unico pacchetto.

Negli anni '70 emersero **sistemi CAD/CAM combinati** che utilizzavano i parametri di un modello geometrico creato con l'aiuto del CAD per generare programmi per macchine utensili a controllo numerico e sviluppare piani e programmi di produzione.

Con l'introduzione dei sistemi di **Computer Aided Engineering (CAE)** per le tecniche standard di analisi ingegneristica, **l'intera gamma di attività ingegneristiche**, dalla progettazione concettuale all'analisi, dalla progettazione dettagliata alla stesura e alla documentazione alla progettazione manifatturiera, **è stata automatizzata**.

Fase V: Gestione automatizzata

Una tra le prime applicazioni dell'informatica fu l'**automazione delle attività di elaborazione dei dati**.

Il primo computer digitale a programma memorizzato acquistato da un cliente non governativo è stato UNIVAC, installato da GE nel 1954 per automatizzare l'**elaborazione di base delle transazioni**: gestione

stipendi, controllo delle scorte e pianificazione dei materiali, fatturazione e gestione degli ordini e contabilità generale.

A metà degli anni '60 apparvero i primi **sistemi di gestione delle informazioni (MIS)**, che fornivano alla direzione dati **modelli di analisi e algoritmi** per il processo decisionale; alla fine sono diventati uno strumento standard per il controllo delle operazioni, il controllo di gestione e la pianificazione strategica.

Fase VI: Computer-Integrated Manufacturing (CIM)

Alla fine degli anni '80 iniziò l'**integrazione della fabbrica automatizzata**.

Il **CIM** combina **automazione flessibile** (robot, macchine a controllo numerico e sistemi di produzione flessibili), **sistemi CAD / CAM** e **sistemi di gestione delle informazioni** per costruire sistemi di produzione integrati che coprono le operazioni complete di un'azienda manifatturiera, inclusi acquisti, logistica, manutenzione, ingegneria e operazioni commerciali.

TABLE 37.1

Development in the History of the Automation of Manufacturing Processes	
Date	Development
1500–1600	Water power for metalworking; rolling mills for coinage strips
1600–1700	Hand lathe for wood; mechanical calculator
1700–1800	Boring, turning, and screw-cutting lathe; drill press
1800–1900	Copying lathe, turret lathe, universal milling machine; advanced mechanical calculators
1808	Sheet-metal cards with punched holes for automatic control of weaving patterns in looms
1863	Automatic piano player (Pianola)
1900–1920	Geared lathe; automatic screw machine; automatic bottle-making machine
1920	First use of the word <i>robot</i>
1920–1940	Transfer machines; mass production
1940	First electronic computing machine
1943	First digital electronic computer
1945	First use of the word <i>automation</i>
1947	Invention of the transistor
1952	First prototype numerical-control machine tool
1954	Development of the symbolic language APT (Automatically Programmed Tool); adaptive control
1957	Commercially available NC machine tools
1959	Integrated circuits; first use of the term <i>group technology</i>
1960s	Industrial robots
1965	Large-scale integrated circuits
1968	Programmable logic controllers
1970	First integrated manufacturing system; spot welding of automobile bodies with robots
1970s	Microprocessors; minicomputer-controlled robot; flexible manufacturing systems; group technology
1980s	Artificial intelligence; intelligent robots; smart sensors; untended manufacturing cells
1990–2000	Integrated manufacturing systems; intelligent and sensor-based machines; telecommunications and global manufacturing networks; fuzzy-logic devices; artificial neural networks; internet tools

1.3 – Situazione attuale

1.3.1 – Automazione nell'industria

L'automazione è un **concetto evolutivo** piuttosto che rivoluzionario ed è stata implementata con successo nelle seguenti aree (praticamente tutti i settori industriali):

- Settore automobilistico
- Settore Aeronautico
- Costruzioni
- Sistemi di comunicazione
- Beni di consumo
- Industria chimica
- Energia

- Settore alimentare
- Confezioni
- Farmaceutico e medico (dosaggio di sostanze chimiche per compresse, monitoraggio della pressione arteriosa e della frequenza cardiaca e apparecchi acustici)
- Robotica
- Semiconduttori ed elettronica

1.3.2 – La quarta rivoluzione industriale

L'industria 4.0 è la **trasformazione digitale della produzione**, sfruttando le tecnologie quali i Big Data/Analytics o l'Internet of Things (industriale); e richiede la **convergenza di IT (Information Technology) e OT (Operational Technology)**, dispositivi IoT, sensori e attuatori, robotica, dati, intelligenza artificiale e processi di produzione per realizzare fabbriche connesse, produzione decentralizzata intelligente, sistemi di auto ottimizzazione e fornitura digitale della catena nell'ambiente informatico cibernetico della 4° rivoluzione industriale (a volte chiamata 4IR).

È necessario **modificare la struttura** e il contenuto dei sistemi produttivi. Si introducono dei **sensori** per raccogliere informazioni che vengono trasferite a **sistemi di raccolta e analisi dati**. Sono necessari perciò anche **sistemi di trasmissione dati**, cablati o wireless.

Le fabbriche diventano **connesse** e si può anche **decentralizzare la produzione**.

1.3.3 – Industria 4.0

La cancelliera tedesca Angela Merkel ha definito l'Industria 4.0 "**la trasformazione globale dell'intera sfera della produzione industriale attraverso la fusione della tecnologia digitale e di Internet con l'industria convenzionale**".

In breve, **tutto**, all'interno e intorno a un'operazione di produzione (fornitori, impianto, distributori, persino il prodotto stesso), è **collegato digitalmente**, fornendo una catena del valore altamente integrata. Implementare l'industria 4.0 è un'operazione a tappeto, coinvolge molti aspetti.

Il termine Industry 4.0 è nato in Germania, ma il concetto si sovrappone ampiamente agli sviluppi che, in altri paesi europei, possono essere etichettati in vari modi: **fabbriche intelligenti, Industrial IoT, Smart Industry o produzione avanzata**.

1.3.4 – I nove pilastri dell'innovazione tecnologica

Nell'Industria 4.0, le tecnologie digitali offrono **velocità e comunicazione senza precedenti** lungo la catena del valore. Di seguito è riportato un elenco dei **nove pilastri del progresso tecnologico** (anche noti come **tecnologie abilitanti** (Key Enabling Technologies)). Sono riconosciuti come fondanti dell'implementazione dell'industria 4.0.

1 – Fabbricazione additiva

Si riferisce alla tecnologia 3D che **crea oggetti/assemblati** aggiungendo **strati successivi di materiale**.

2 – Realtà aumentata

Si ha un software che **aggiunge informazioni a una certa immagine**.
In alternativa si ha anche la **realtà virtuale**, con un visore.

Offre vantaggi per l'**addestramento**, la **risoluzione dei problemi** e le **riparazioni** (manutenzione)
Esempio di manutenzione: arriva il messaggio di diagnostica dal sistema produttivo, il segnale arriva tramite smartwatch/tablet al manutentore. L'operatore può ottenere/visualizzare la posizione dell'elemento che richiede l'intervento e visualizzare tutte le informazioni necessarie alla risoluzione del problema.

3 - Robot autonomi.

Il robot acquisisce capacità in più rispetto al robot di base.
Normalmente il robot è solo un manipolatore programmato ed esegue dei movimenti sempre uguali sulla base di un programma inserito nel suo sistema di controllo.
In virtù di ciò, se ad esempio c'è un ostacolo, il robot non è in grado di rilevarlo e può esserci una collisione, perciò è necessario che il campo di lavoro del robot sia isolato rispetto all'esterno (gabbie di protezione).

Con la tecnologia digitale (capacità autonome) si può rendere il robot **in grado di interagire con l'ambiente esterno**. I **sensori** (di contatto, visione, ecc.) fanno percepire al robot cosa sta accadendo nel suo ambiente, perciò può compiere azioni/prendere decisioni sulla base di cosa gli accade intorno (es. se gli si avvicina un carrello con un pezzo da prelevare).

Si hanno 2 principali applicazioni:

1. **Co-bot (robotica collaborativa)**: il robot ha sensori che sentono la presenza degli operatori. Si può avere un ambiente in cui robot e operatori convivono, e il robot diventa un assistente alla persona.
2. **Robot mobili (AGV)**: oltre a prendere componenti e attrezzature, posso spostarsi nella fabbrica per portare componenti a una stazione di lavoro o a un operatore. La funzione non è solo di trasporto ma si ha anche un braccio che consente di effettuare delle manipolazioni.

Grazie a linee e macchine che si collegano all'ERP dell'azienda, si può **gestire la produzione in base agli ordini** anziché alle proiezioni, riducendo i tempi e i costi di consegna.

4 - Big data e Analytics.

Non è un concetto nuovo/recente, è recente la sua implementazione nel mondo industriale (idem per i prossimi 2 pilastri, strettamente collegati).
Esempio: analisi del traffico stradale per la regolazione dei semafori.

Enormi volumi di dati e **capacità avanzate di analisi** dei dati significano maggiore qualità e servizio. Le aziende possono **raccogliere dati in ogni fase della catena** (le macchine sono già sensorizzate), per migliorare il processo e risparmiare risorse.

Esempi: valutare frequenza di anomalie/guasti su una MU, tempo necessario per risolvere un certo guasto, tempo in cui il sistema operativo è occupato e tempo in cui una stazione di lavoro è invece scarica.

Le tecnologie intelligenti consentono la **manutenzione predittiva**. L'Industria 4.0 combina la manutenzione predittiva con le capacità di comunicazione avanzate, per aumentare l'efficienza e il risparmio energetico nelle linee e nelle fabbriche.

5 – Cloud

Per gestire tutti i dati (**raccolta, analisi, archiviazione, monitoraggio**) si usa un cloud.

Questo può richiedere collaborazione e contatto **oltre i confini della struttura e dell'azienda** (appoggio ad aziende esterne).

Il passaggio risulta critico poiché industrialmente è fondamentale la **secretazione dei dati**, perciò l'azienda preferisce in alcuni casi **tenere i dati in sistemi interni**.

6 - Cybersecurity

Il passaggio dai sistemi chiusi all'interconnessione (su cloud interno o esterno) richiede **livelli più elevati di sicurezza informatica**, per le reti che trasmettono dati di precisione e controllano le macchine.

7 – Integrazione orizzontale e verticale

Originariamente si ha un **controllo di tipo diretto**: il calcolatore centrale istruisce le singole postazioni di lavoro, il reparto manageriale pensa e quello produttivo fa.

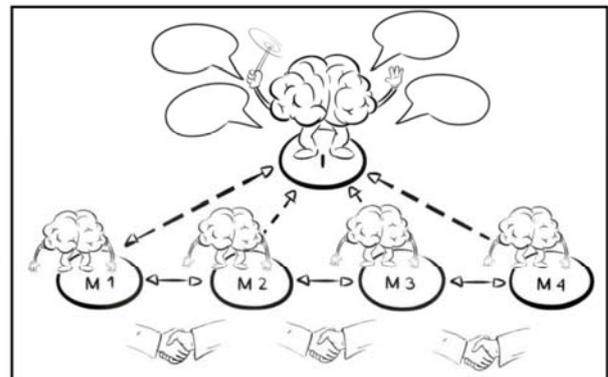
Questo aumenta la produttività e l'efficienza del sistema, ma lo rende **rigido**, poiché ogni workstation è in grado di eseguire una sola operazione.

Il **mercato però richiede anche flessibilità**, prodotti diversi, personalizzati per il cliente.

Per ottenerla è necessaria una certa **integrazione orizzontale**: si dà un'**intelligenza locale alle singole stazioni** e si **connettono le stazioni fra loro** (comunicazione machine-to-machine (M2M)).

Ciascuna stazione è in grado di controllare la propria produzione, modificando autonomamente le proprie istruzioni senza aspettare che gli arrivino dal sistema centrale.

Inoltre, poiché le stazioni sono connesse fra loro, ciascuna stazione conosce lo stato del componente all'uscita della stazione precedente, e dopo aver completato le operazioni comunica lo stato del componente alla stazione successiva, in modo che questa possa effettuare le proprie operazioni di conseguenza.



Il **flusso di informazione è inoltre semplificato/velocizzato**: il **controllo** non è diretto ma è **distribuito**, non passa ogni volta dal livello superiore. Sono necessari però strumenti informatici, di analisi dei dati.

Una volta svolta l'ultima operazione il prodotto è già validato e può uscire dalla linea senza dover passare per la fase di validazione al sistema centrale.

L'**integrazione orizzontale e verticale** viaggiano insieme. Ci sono informazioni che devono passare a livello orizzontale, ma altre **informazioni di coordinamento** devono arrivare verticalmente dal sistema centrale che ha una visione a 360° del sistema produttivo.

Si ha il **coordinamento completo di tutti i dipartimenti e le entità lungo la catena di fornitura**. Ad esempio, i produttori ricevono informazioni dalla loro catena di approvvigionamento e dalle organizzazioni di vendita e i dipartimenti di ingegneria mantengono un collegamento con la produzione. Il cloud computing abilita molte di queste funzionalità.

8 - Internet of Things (IoT)

Con i **sensori IoT**, i **dispositivi lungo la linea** di produzione e i **centri di controllo** possono interagire tra loro per fornire dati e risposte più rapide.

Con la **tecnologia IoT**, questi dispositivi possono **comunicare con il cloud** (in maniera cablata o wireless) e offrire manutenzione predittiva.

Il **cablato** si preferisce per evitare la perdita di dati.

Con il **5g** ci sono risvolti interessanti, ma poiché in uno stabilimento ci sono molte macchine si rischia di interferire con le comunicazioni, bisogna stare attenti alle frequenze.

9 - Simulazione

Le simulazioni 3D di **prodotti, materiali e processi di produzione** possono sfruttare i dati in tempo reale per presentare **modelli virtuali** di interi sistemi di produzione.

Con la simulazione avanzata, è **possibile testare e ottimizzare i processi prima dell'effettiva implementazione** in linea, calcolando ad esempio i tempi nei dettagli.

Esempio: più robot saldatori su una scocca contemporaneamente, si può fare in modo che lavorino tutti contemporaneamente e nessuno stia mai fermo, distribuendo i punti di saldatura fra i robot in modo opportuno.

1.3.5 – Prospettive

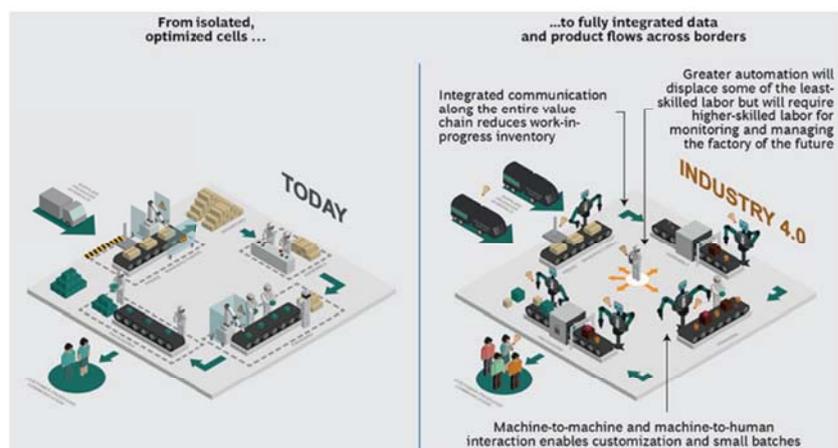
Man mano che le aziende adottano gli approcci dell'Industria 4.0, gli esperti prevedono un **aumento della produttività**, favorendo così la **crecita economica**. Se non ci si aggiorna si rischia di rimanere indietro e perdere le proprie quote di mercato.

I **nove pilastri del progresso tecnologico** che costituiscono la base dell'Industria 4.0. **sono già utilizzati nella produzione industriale**, ma con il crescente dominio di Industria 4.0, **trasformeranno la produzione**: celle di per sé isolate e ottimizzate si uniranno a realizzare un flusso di produzione completamente integrato, automatizzato e ottimizzato, portando a maggiore efficienza e cambiando i tradizionali rapporti di produzione tra fornitori, produttori e clienti, nonché tra uomo e macchina.

L'integrazione va **al di fuori dello stabilimento**: si possono integrare celle di lavoro che si trovano in diverse parti del mondo.

Esempio: progettazione in una nazione e la produzione in un'altra, non ci sono problemi a inviare i dati di progettazione nel secondo paese e monitorarne la produzione.

Si parla di un sistema che mette **l'uomo al centro della produzione**: è la produzione che si adatta alle esigenze dell'uomo (es. postazioni che si adattano alla statura dell'operatore, esoscheletri attivi o passivi).



2 – IL CONTROLLO NUMERICO DELLE MACCHINE UTENSILI

2.1 – Introduzione

2.1.1 – Sistema di produzione

Si definisce Sistema di produzione un **insieme integrato di macchinari e risorse umane** (più uno o l'altro a seconda del livello di automazione) che compie una o più operazioni di trasformazione o di montaggio su un grezzo, una parte o un insieme di parti.

I macchinari integrati includono:

- macchine e utensili per la lavorazione;
- sistemi di movimentazione;
- attrezzature di bloccaggio;
- computer, in grado di coordinare e/o controllare gli altri componenti.

2.1.2 – La riduzione dei tempi

Come visto, un primo punto chiave dell'automazione è la ricerca di **elevata produttività**, ovvero produrre nel **minor tempo possibile**.

Un primo passaggio è quello di **parallelizzare le operazioni** (catena di montaggio), in modo che esca dalla linea un pezzo ogni pochi minuti (**cadenza della linea**, corrispondente all'operazione più lenta).

Facendo riferimento a una singola stazione, i vari contributi che compongono il **tempo ciclo** sono:

1. **Tempo di preparazione del sistema produttivo** $t_{\text{set up}}$: caricamento utensili, bloccaggio componente, ecc.
2. **Tempo improduttivo** $t_{\text{improduttivo}}$: trasporto, carico e scarico del componente.
3. **Tempo produttivo** $t_{\text{taglio effettivo}}$.

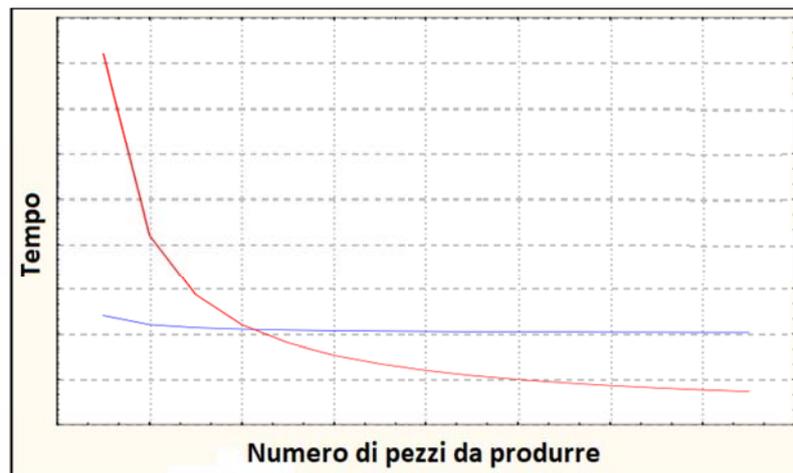
$$t_{\text{ciclo}} = t_{\text{taglio effettivo}} + t_{\text{improduttivo}} + t_{\text{set up}}/Q$$

Per **ridurre i tempi** di lavorazione è necessario agire sui tre termini, rispettivamente:

1. **Riduzione dei tempi di attrezzaggio** usando dei **sistemi flessibili** di bloccaggio/sbloccaggio e di cambio utensile in lavorazione
2. **Riduzione dei tempi improduttivi** utilizzando:
 - a. **Automazione della movimentazione dei pezzi**
 - b. **Specializzazione delle operazioni** (a costo di avere un sistema più rigido).
Esempio: va realizzato un foro, normalmente servono centratura, foratura, allargamento, alesatura con strumenti diversi. Si può usare allora (nel caso di un foro passante) un solo strumento con una punta che abbia diametri via via crescenti. Lo strumento si può però usare solo per fare un foro di quel diametro.
Esempio 2: per fare più fori su una piastra si può spostare l'utensile, oppure realizzare una maschera di foratura che scende in contemporanea con diverse punte. Lo strumento si può usare solo per quel tipo di piastra.
3. **Riduzione del tempo produttivo** effettuando **operazioni contemporanee**.



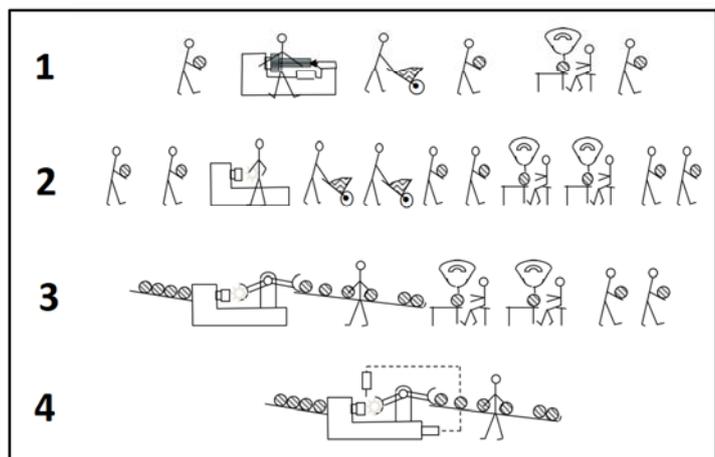
Più è elevato il numero di pezzi da produrre, più si punta alla specializzazione delle operazioni e minore è il tempo ciclo.



2.1.3 – Evoluzione dell'automazione

Si hanno le seguenti fasi:

1. **Manuale:** tutte le funzioni di controllo e quelle ausiliarie (carico, scarico, collaudo...) sono affidate all'uomo.
2. **Semi-automatico:** la macchina semiautomatica riduce l'intervento dell'uomo nel ciclo ma, a causa della maggior produttività, richiede un maggior impegno nelle attività ausiliarie.
3. **Automatico:** il processo e la movimentazione del pezzo sono automatiche, il collaudo è affidato all'uomo.



4. **Automatico con controllo in linea:** il collaudo è automatizzato, il risultato della misura interagisce col processo, l'intervento umano è richiesto solo in caso di guasto.

2.1.4 – Funzione del calcolatore

L'automazione è permessa dall'utilizzo di **sistemi di controllo basati su hardware e software** (in pratica dei computer).

Le funzioni svolte sono sia di **controllo diretto della macchina**, che di tipo **gestionale**:

- Comunicazione e istruzione all'operatore.
- Download di programmi di lavoro.
- Gestione delle operazioni.
- Controllo del sistema di movimentazione.
- Schedulazione della produzione.
- Diagnostica dei guasti.
- Controllo della qualità.

- Statistica.

2.1.5 – Livello di automazione

Si possono classificare i sistemi di produzione, in generale, in base a diversi criteri:

1. **Tipo di operazione**
 - a. Lavorazione (meccanica)
 - i. Solido di rotazione (tornitura)
 - ii. Solido prismatico (fresatura)
 - b. Montaggio (saldatura, assemblaggio)
2. **Numero di stazioni di lavoro**
3. **Livello di automazione**

Il livello di automazione è quantificato con l'indice di presidio **M**:

$$M = \frac{W_u + \sum_{i=1}^n W_i}{n}$$

Dove:

- w_u , numero di operai indiretti addetti alla linea (es. manutentori, coordinatori).
- w_i , numero di operai diretti assegnati alla stazione i
- n , numero di stazioni di lavoro

Si possono avere vari casi:

(non chiede all'esame di sapere a memoria tutti i tipi, può chiedere invece la formula)

- **Tipo 0:** Stazione singola con operatore manuale ($n=1, w=1, M=1$).
- **Tipo 1:** Stazione singola in grado di operare per periodi di tempo lunghi in modalità non sorvegliata (stand-alone), senza l'ausilio dell'operatore. L'operatore agisce solo per una ridotta percentuale del tempo di lavoro (es. carico-scarico-setup) ($n=1, w_i=0, M<1$).
L'indice sarà tanto più vicino a 0 quanto minore è il tempo richiesto a quell'operatore.
- **Tipo 2:** Sistema a più stazioni tutte sorvegliate (manuali), con manutentori ($n > 1, w_i=1, M>1$).
- **Tipo 3:** Sistema a più stazioni completamente automatica. Si può avere qualche w_u , o un operatore che gestisce diverse macchine, M tende a 0. ($n>1, w_i=0, M<1$)
- **Tipo 4:** Sistema a più stazioni ibrido (alcune stazioni sono sorvegliate altre sono totalmente automatiche) ($n>1, w_i=0/ w_i=1, M<1$)
L'indice è tanto più vicino a 1 o a 0 a seconda che siano preponderanti le stazioni manuali o quelle automatiche.

In sostanza, si ha:

- **$M \rightarrow 0$** quando la stazione è **automatica**
- **$M \geq 1$** quando la stazione è **manuale**
- **$0 < M < 1$** quando la stazione è **ibrida**

L'indice permette perciò di fare dei confronti fra sistemi diversi.

Figura 3: una delle due risorse potrebbe impiegare una parte del suo tempo per svolgere azioni di coordinamento/manutenzione.

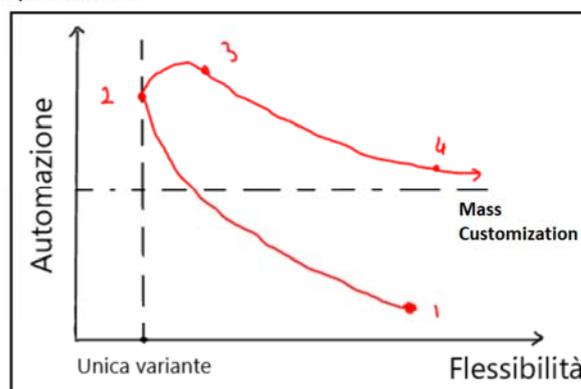


2.1.6 – Flessibilità

Oltre all'**automazione/produktività** il mercato richiede anche **flessibilità**.

C'è stata un'**evoluzione nel tempo** della richiesta ai sistemi produttivi:

1. Inizialmente (primi del '900) si chiedevano diversi prodotti con una produttività non molto elevata (artigiani).
2. Con l'avvento dell'automazione (3° rivoluzione industriale, catene di montaggio), l'esigenza si è spostata all'opposto, con grande quantità (automazione) e poca varietà (flessibilità) (un solo modello).
3. Il mercato è poi ancora cambiato, si riduce il tempo di permanenza di un prodotto sul mercato e aumenta il numero di varianti disponibili (es. automotive). È difficile avere insieme elevata flessibilità e automazione, ci si è mossi in tale parte del diagramma (3→4) con la globalizzazione dei mercati, in cui è iniziata la ricerca di sistemi flessibili per la produzione industriale (FMS).
4. Oggi la richiesta di flessibilità continua ad aumentare, ma si cercano di mantenere elevati livelli di automazione (mass customization). Il cliente fa una richiesta e il produttore lo accontenta. In alternativa si possono avere richieste di flessibilità più limitate ma con ancora una produttività alta (es. car sharing).

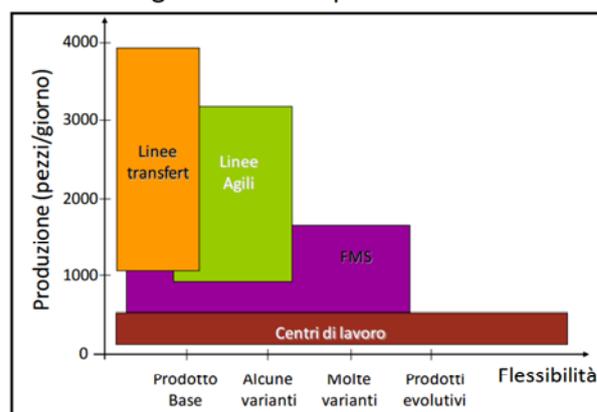


Possiamo pensare a 3 situazioni tipiche:

1. **Sistema rigido:** impossibilità a gestire alcuna variante, cioè capacità di lavorare un unico prodotto.
2. **Sistema intermedio:** possibilità di gestire diverse tipologie di prodotti a lotti (con un risetup/riorganizzazione/riattrezzaggio del sistema produttivo)
3. **Sistema flessibile:** possibilità di gestire parti diverse in modo del tutto casuale (mix di prodotti) (verso cui tende il mercato attuale, è il più complesso da realizzare).

Sulla base del loro livello di flessibilità/automazione, si possono distinguere i sistemi produttivi:

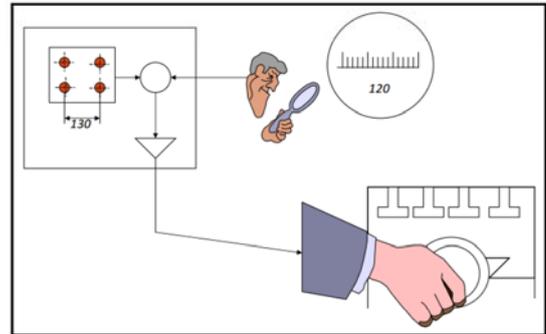
- **Linea trasferta:** bassa flessibilità e alta produzione (figlia delle catene di montaggio del Fordismo)
- **Centro di lavorazione** (singola stazione, tutti gli altri sono insieme di stazioni): bassa produzione e alta flessibilità (macchina automatica controllata dal calcolatore, la macchina cambia operazioni sulla base del programma inserito)
- **Sistemi Flessibili di Produzione (Flexible Manufacturing Systems):** configurazioni di produzione in cui si integrano l'automazione delle macchine e dei sistemi di trasporto per gestire la produzione di componenti diversi tra loro, non si ha la flessibilità totale ma si raggiunge un buon livello.
- **Linee agili:** sistemi in grado di gestire alcune varianti del prodotto, come una linea trasferta ma riconfigurabile, è possibile modificare il percorso del pezzo fra le varie stazioni, o spostare proprio le singole stazioni in altre posizioni.



Ciò che conferisce la flessibilità al sistema globale interconnesso è il **singolo centro di lavoro** e la sua capacità di cambiare operazioni.

2.1.7 – Il Controllo Numerico – Idea di base

Normalmente, si ha un certo **disegno tecnico** con tutte le informazioni necessarie. L'**operatore** della macchina tradizionale studia il disegno, capisce che utensile usare, lo monta, muove gli assi della macchina (le parti mobili) azionando dei comandi (manovelle), verifica di essersi posizionato alla quota leggendo la scala graduata in corrispondenza dell'asse.



Ci sono **3 elementi di base**:

1. **Analisi e decisione** (cervello dell'operatore)
2. **Azionamento** (mani dell'operatore)
3. **Feedback/misura** (occhio dell'operatore). Quando la quota è raggiunta viene avvisato il cervello che aziona il braccio per fermare la macchina.

Questo si traduce, nella **macchina**, rispettivamente, in:

1. **Unità di governo**
2. **Motori**
3. **Sensori (di posizione e velocità).**

La necessità di **macchine flessibili** e versatili atte alla fabbricazione di piccoli lotti di pezzi diversi tra loro e di **macchine ad elevata precisione** che svincolassero l'uomo dalla macchina stessa, lasciandogli solo la sorveglianza, ha determinato lo sviluppo delle **Macchine Utensili a Controllo Numerico**.

La denominazione deriva dal fatto che le informazioni trasmesse alla macchina (posizionamento tavole, movimenti utensile...) sono ricavate dal disegno e dal ciclo di lavorazione del pezzo e **memorizzate in forma alfanumerica** nella memoria dell'Unità di Governo della macchina stessa.

2.1.8 – Definizione

Definizione della Electronic Industries Association (EIA): **“a system in which actions are controlled by the direct insertion of numerical data at some point”**.

Macchine controllate da un sistema elettronico progettato per accettare dati alfanumerici codificati (codice ISO, standardizzato), **interpretarli e convertirli in segnali di OUTPUT, trasmessi agli attuatori** (es. avvio/arresto mandrino, cambio utensile, movimenti del pezzo o dell'utensile secondo un certo percorso, ecc.)



2.1.9 - Cenni storici

Nasce **intorno agli anni '50** (avvento della 3° rivoluzione industriale), in **ambito militare**, per realizzare **componenti non realizzabili con macchine tradizionali** (eliche con curvature particolari, non ottenibili con frese tradizionali). L'ideatore è **John Parson**.

L'**idea** è questa:

La fresa può muoversi secondo due assi ortogonali orizzontali + uno verticale.

I movimenti sono realizzati mediante un motore che viene connesso a un sistema vite-madrevite in modo alternativo, o all'asse x, o all'asse y. Non si possono muovere entrambi gli assi contemporaneamente, perciò si possono fare solo superfici piane: la fresa si accosta al componente e segue un movimento lineare.

Per avere delle curvature si dovrebbero azionare in contemporanea entrambi gli assi (anche il terzo per curvature complesse nello spazio).

Si può fare dando un motore a ciascun asse, ma è necessario poi potere gestire il movimento simultaneo dei tre assi, e un operatore non ne è in grado, è necessario un calcolatore.



I **tempi sono stati rapidi**, in una decina di anni si è passati dall'idea alla diffusione delle aziende ('57).

1947	John Parson concepisce l'idea di una macchina comandata automaticamente con informazioni numeriche per la costruzione di eliche per elicotteri
1949	Parson ottiene un contratto su metodi di produzione veloce
1952	Il MIT, su incarico dell'US Air Force, costruisce la prima fresatrice a controllo numerico e realizza un pezzo con movimento simultaneo dell'utensile su tre assi
1955	Primi modelli commerciali di macchine utensili a controllo numerico
1957	Il controllo numerico è accettato dalle industrie
1958-1960	Inizio della diffusione presso le aziende
1960	DNC - Direct Numerical Control
1970	Il controllo numerico diventa CNC - Computerized Numerical Control

2.1.10 – CNC e DNC

Inizialmente si ha avuto un **controllo numerico diretto (DNC)**.

Poiché i computer avevano grandi dimensioni (stanze), c'era una **separazione fisica** fra la macchina utensile e il sistema di controllo, che comandava i motori della macchina e ne riceveva i feedback dai sensori.

In caso di **più MU**, il controllo è affidato sempre allo **stesso calcolatore centrale**.

Solo negli anni '70, con gli sviluppi dell'elettronica si è potuto un **controllo numerico computerizzato (CNC)**: si ha un calcolatore dedicato localizzato sulla macchina utensile, che la rende autonoma.

Il **DNC** ha il vantaggio di avere sotto controllo tutta la produzione, ma un **eventuale guasto** blocca tutta la produzione.

Il **CNC** si svincola da questo problema, ma perde il controllo centrale.

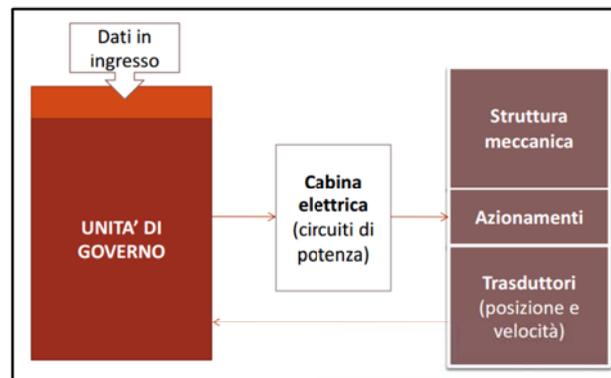
Questo sarà sviluppato negli anni '80 con il **controllo numerico distribuito**, in cui si ritorna alla prima struttura gerarchica, ma lasciando autonomia alla macchina.

2.1.11 - Concetti di base – controllo

Sulle macchine a CN si verificano **movimenti lineari e angolari** (traslazioni rettilinee delle tavole e della testa operatrice, rotazioni di tavole girevoli e della testa). Ciascuno degli spostamenti è controllato da un **trasduttore di posizione**, che rileva una quota (lineare o angolare) rispetto a un'origine prestabilita con una determinata precisione.

Dal disegno, tramite la **programmazione**, si fornisce all'**unità di governo (UG)** un certo numero di informazioni geometriche e tecnologiche. L'unità di governo le interpreta e trasmette segnali ai **servomeccanismi** che comandano i movimenti delle tavole e della testa operatrice

I trasduttori di posizione segnalano all'UG la **posizione delle tavole rispetto al punto prefissato (feedback)**. La differenza tra posizione attuale e posizione stabilita viene elaborata per determinare la cinematica degli assi.



Il Controllo Numerico opera secondo uno **schema ad anello chiuso con retroazione di posizione, velocità e accelerazione** del tutto simile a quello impiegato da un uomo nell'esecuzione della stessa funzione.

In figura:

- **Tavola portapezzo** con le scanalature per il bloccaggio dei pezzi.
- **Sm** = Servomotore + sistema di conversione del moto vite-madrevite: la rotazione del motore è convertita in traslazione dell'asse.
- **T** = Trasduttore di posizione
- **Dt** = Dinamo-tachimetrica, trasduttore di velocità.

L'UG riceve dal programma l'informazione sulla **posizione da raggiungere X_0** , e la confronta con il **segnale di feedback X** in arrivo dal trasduttore di posizione T.

- **Se $X = X_0$** l'asse è nella sua posizione e non deve muoversi, perciò **nessun segnale** viene inviato al motore.
- **Se $X \neq X_0$** , il valore della differenza (errore di posizione ϵ) viene convertito in un **segnale di velocità** per il motore.

La **velocità richiesta al motore** è confrontata con il **feedback in arrivo dal trasduttore di velocità**, e l'errore è convertito da un blocco di elaborazione in una **tensione di alimentazione del motore**.

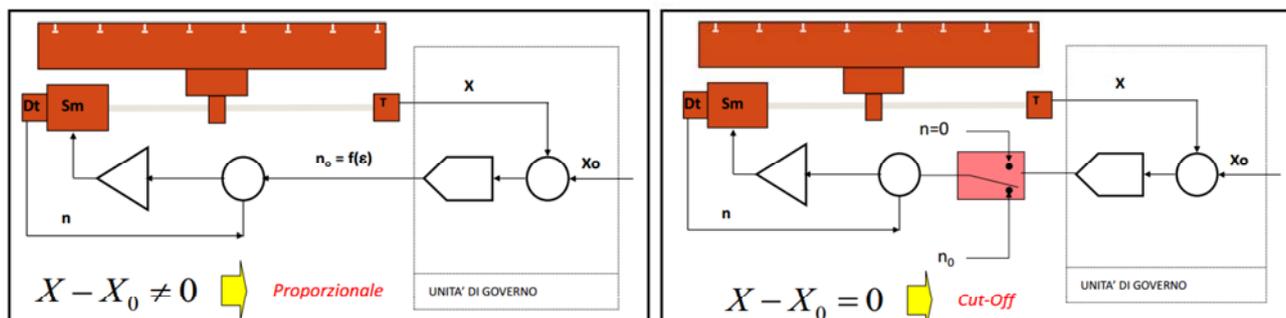
Ci sono perciò **2 anelli**, uno che si chiude sulla **posizione** e uno che si chiude sulla **velocità**.

Si hanno due modi per comandare il movimento degli assi:

1. **Cut-off (punto a punto):** il segnale di velocità per il motore è sempre costante e pari a n_0 . Viene inviato se $\epsilon \neq 0$, indipendentemente dal suo valore. Si gestisce solo il punto di partenza e di arrivo. Utile per operazioni di foratura.
2. **Proporzionale (continuo):** si varia in tempo reale la velocità al motore in funzione di ϵ . Si gestisce istante per istante il movimento dell'asse. Utile per una lavorazione di fresatura più complessa.

Le fresatrici hanno sempre controlli continui, macchine più semplici possono avere controlli di tipo cutoff.

Si potrebbe avere anche un **controllo in anello aperto**, senza il feedback/trasduttore. Va bene solo per macchine molto semplici, come dei plotter.



2.1.12 - Campi di applicazione.

Il Controllo Numerico è l'inizio del **Computer Aided Manufacturing (CAM)**, ossia l'impiego del computer nella produzione.

È nato in **fresatura** e poi si è esteso agli altri ambiti:

- Foratura
- Alesatura
- Tornitura
- Rettificazione
- Taglio lamiera
- Elettroerosione
- Tranciatura
- Saldatura
- Manipolazione
- Montaggio
- Misura

2.1.13 - Vantaggi e limiti

Vantaggi:

- **Flessibilità della struttura produttiva:** basta cambiare il programma per cambiare la lavorazione.
- **Ripetibilità:** eseguo sempre le stesse operazioni.
- **Alta velocità di produzione.**
- **Elevata qualità del prodotto** (il prodotto corrisponde meglio alle specifiche del disegno), **riduzione scarti.**
- **Riduzione costi diretti** di manodopera e attrezzature.