

LEZIONE 1 SIP 06.03.2019

I due concetti fondamentali in questa prima parte del corso sono quelli di automazione e di flessibilità. Innanzitutto, per sistema di produzione si intende un sistema complesso, in cui si trovano diverse risorse che devono collaborare tra loro. Per risorse si intendono sia macchine sia sistemi di trasporto sia risorse umane. Lo scopo di un sistema di produzione è compiere operazioni su un certo pezzo di partenza (i.e. un grezzo o un semilavorato) per giungere ad un prodotto finito. Naturalmente, potrà trattarsi di un sistema di lavorazioni meccaniche (e.g. linea di macchine a controllo numerico dove troviamo fresatrici, torni, trapani, rettificatrici, ecc.) o di assemblaggio (e.g. linea di assemblaggio di una scocca). I macchinari integrati in un sistema di produzione sono:

- Macchine e utensili per la lavorazione;
- Sistemi di movimentazione;
- Attrezzature per il riferimento e il bloccaggio dei pezzi. Sono fondamentali. Difatti, un conto è prendere un componente (magari di geometria complessa) proveniente dalla fonderia, metterlo su una fresatrice (per esempio perché devo spianarne la testa; basti pensare ad un motore) e allora vado a posizionare su quella macchina un sistema di riferimento per orientare correttamente il pezzo nell'area di lavoro nonché un sistema di bloccaggio, in modo che il pezzo rimanga bloccato e riesca a sottostare alle forze che si sviluppano durante la lavorazione. Un altro discorso è invece se quello stesso pezzo deve subire diverse lavorazioni su diverse macchine utensili; in questo caso la questione delle attrezzature di riferimento e bloccaggio diviene più complessa. Non a caso, molto spesso si posiziona il componente su un pallet, in modo tale che essi viaggino insieme sul sistema di produzione ed è il pallet l'elemento che verrà riferito e bloccato in macchina. Questo semplifica notevolmente le cose, in quanto il pallet è una struttura quadrata o rettangolare molto semplice. Vedremo anche come si configura un sistema di riferimento e bloccaggio nel caso in cui il pezzo non viaggia su pallet.
- Computer. Perché tutto funzioni insieme, in modo integrato, abbiamo bisogno di computer, i quali hanno il compito di monitorare e coordinare tutte le operazioni. Quando parleremo della singola macchina, essa rappresenterà per noi la stazione di lavoro (i.e. station).

Procediamo ora con un breve excursus storico. Inizialmente, nel mondo industriale le macchine erano di tipo tradizionale (basti pensare ad un tornio parallelo o ad una fresatrice universale). Per eseguire una produzione con una macchina tradizionale si aveva uno stretto connubio tra l'operatore di macchina e la macchina stessa: la macchina funziona solo se l'operatore la controlla e la comanda. Questa interazione così diretta tra operatore e macchina richiede:

- 1) Un operaio specializzato, che abbia le competenze necessarie a compiere un certo lavoro.
- 2) I tempi di produzione non sono brevi. A titolo di esempio, pensiamo ad un cambio di velocità su un tornio. Il mandrino sta ruotando ad un certo numero di giri e sta lavorando su un determinato diametro. Supponiamo di dover andare a lavorare su un diametro più piccolo, il che richiede che si vada a cambiare il numero di giri del mandrino. Come si fa su un tornio parallelo? C'è tutto un sistema di leve che comandano un treno di ingranaggi costituenti il cambio meccanico. In sostanza, il motore ruota ad una certa velocità, fissa; il moto viene trasferito all'albero del cambio di velocità tramite una cinghia, dopodiché c'è un treno di ingranaggi, con diversi rapporti che vengono comandati manualmente dall'operatore tramite delle leve. Dunque, già il solo eseguire un cambio di velocità vuol dire che l'operatore deve interrompere il movimento, spostare l'utensile rispetto al pezzo nella nuova posizione, cambiare sul comando manuale la posizione della leva e far ripartire il tutto. Ciò non avviene in tempi rapidi, per quanto abile sia l'operatore. Ecco che i tempi di lavorazione di un certo componenti sono lunghi. Questo è accettabile quando la produzione è molto ridotta (per esempio, non abbiamo bisogno di grande ripetibilità perché la produzione è limitata e quindi viene utilizzata un'attrezzatura specifica). Tuttavia, quando si parla di produzione su larga scala questo non è ammissibile. Difatti, se devo rispettare dei tempi di produzione molto ridotti perché va creato un grande numero di componenti per rispettare i tempi di consegna occorre abbandonare l'approccio basato sulle macchine tradizionali. L'esigenza di una maggiore produttività è stata uno dei principali motivi di spinta verso l'automazione.

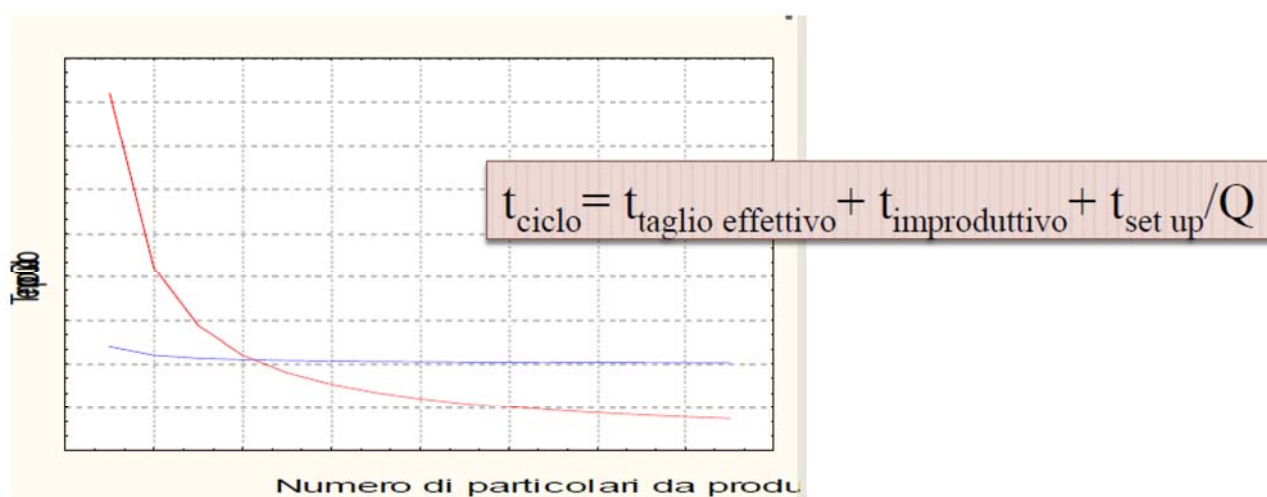
Da cosa dipende il tempo di produzione? Il tempo di produzione dipende essenzialmente da tre termini:

- I tempi legati al taglio (si parla di $t_{\text{taglio effettivo}}$), cioè legati a tutto ciò che riguarda il contatto del pezzo con l'utensile con conseguente produzione di truciolo. Si tratta in sintesi dell'intervallo di tempo durante il quale la macchina sta asportando materiale e quindi è un intervallo di tempo fortemente produttivo. Il tempo $t_{\text{taglio effettivo}}$ dipende essenzialmente dai parametri di taglio (per intenderci, più la velocità di taglio aumenta, più i tempi di produzione di base diminuiscono, tralasciando i discorsi legati all'usura dell'utensile ecc.).
- I tempi improduttivi $t_{\text{improduttivo}}$, durante i quali la macchina è impegnata ma non sta producendo truciolo. Basti pensare a quando si sta scaricando il pezzo finito e si sta caricando il pezzo grezzo pronto ad essere lavorato. Oppure possiamo pensare al cambio utensile, cioè quando si sta montando un utensile diverso. Oppure sto cambiando l'utensile perché si è usurato. A questo si aggiungono tutti i tempi di movimentazione in rapido (prima lavoro in una certa posizione, poi devo spostarmi in un altro punto per poter proseguire la lavorazione; lo spostamento dell'utensile da

una zona all'altra è un tempo improduttivo durante il quale non si sta asportando materiale).

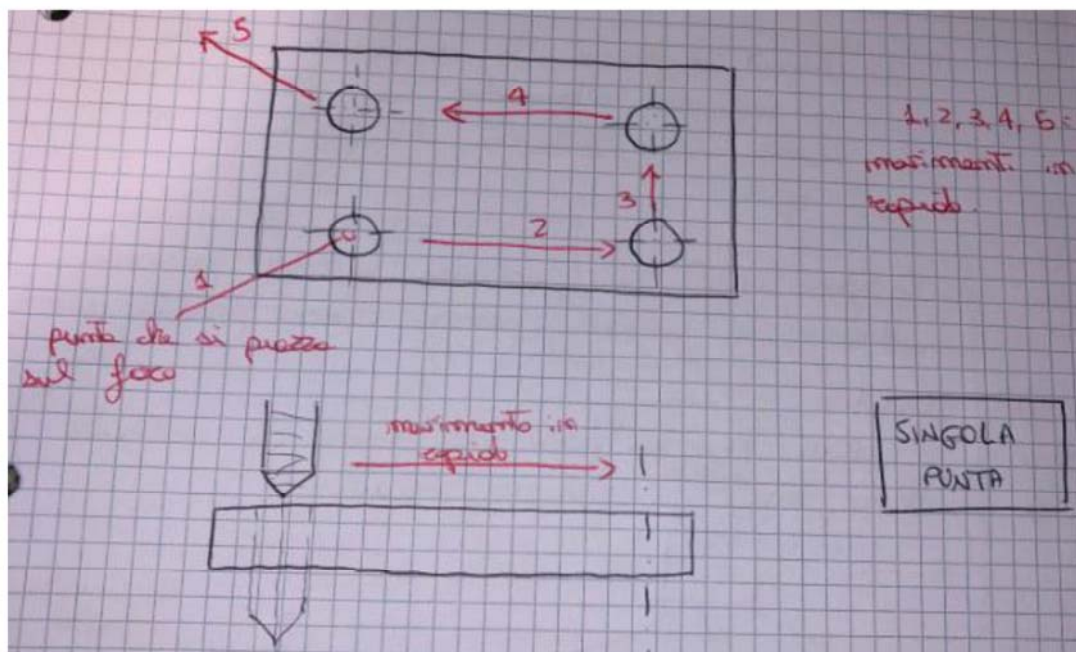
- I tempi di set up $t_{\text{set up}}$. Per poter iniziare la produzione finalizzata alla produzione di un certo lotto è necessario preparare la macchina per quella produzione. Nel dettaglio, occorre avere a disposizione tutti gli utensili che serviranno per la produzione di quel componente. Oltretutto, devo avere a disposizione i grezzi, che mi serviranno per ottenere i prodotti finiti. Devo anche avere a disposizione tutte le attrezzature di riferimento e bloccaggio da montare in macchina. Ecco che prima di iniziare una certa produzione, ci saranno degli operatori che eseguono il set up della macchina (caricano gli utensili, montano l'attrezzatura di riferimento e bloccaggio, preparano la scorta di grezzi, ecc.). L'insieme delle operazioni di set up può richiedere anche ore, che inciderà sui tempi di produzione di un certo lotto e, quindi, sul costo di quel lotto. È chiaro che le operazioni di set up per la produzione di un certo lotto si eseguono una sola volta, dopodiché si comincia a produrre. Ecco perché il tempo di set up $t_{\text{set up}}$ va diviso per il numero di pezzi Q che verrà prodotto con quel determinato set up. Affronteremo tale questione quando si andrà a parlare di gestione della produzione: a volte, per gestire l'impegno delle macchine, si può scegliere di preparare la macchina e produrre tutto il lotto in un intervallo di tempo continuo (cioè esaurire la produzione del lotto prima di produrre altro) oppure preparare la macchina, produrre una certa frazione di quel lotto, poi cambiare tipo di produzione (i.e. fare il set up della macchina per la produzione di un lotto di prodotti differenti) e infine rifare il set up della macchina e completare il primo lotto citato. Va da sé che l'entità del tempo di set up varia da caso a caso, nel senso che dipende da cosa comporta la preparazione della macchina.

Quanto detto è sinteticamente racchiuso nell'illustrazione seguente:



A valle di quanto detto, sorge un interrogativo: che cosa si può fare per cercare di abbattere i tempi sopra discussi e, quindi, rendere il sistema più produttivo? Il discorso prosegue alla pagina successiva.

Per quanto concerne i tempi di taglio $t_{\text{taglio effettivo}}$, tutto si gioca sul materiale degli utensili. Ad esempio, passando dagli acciai ai carburi ai ceramici comporta un incremento della velocità di taglio, nel senso che l'utensile tollera velocità di taglio superiori. Tuttavia, urge una precisazione: aumentare la velocità di taglio e aumentare le sezioni del truciolo indeformato (cioè asportare una quantità maggiore di materiale) va a incidere sulle forze e le potenze, nel senso che sono richiesti motori con potenze più elevate (altrimenti non riusciamo a operare il desiderato aumento della velocità di taglio e della quantità di materiale asportato). Ecco che intervenire sul tempo di taglio effettivo incide anche sulla configurazione della macchina preposta alla lavorazione. In sintesi, l'approccio da seguire per quanto concerne il tempo di taglio effettivo è valutare le possibilità di upgrade della macchina, gli utensili che si hanno a disposizione e cercare di valutare gli interventi possibili (finalizzati alla riduzione dei tempi di taglio). Per quanto concerne i tempi di setup $t_{\text{set up}}$, è chiaro che dobbiamo velocizzare la preparazione della macchina. Come? Dobbiamo ridurre i tempi di attrezzaggio-macchina. Ad esempio, dobbiamo avere già gli utensili pronti su un magazzino che si trova all'interno della macchina (nel senso che non vado a cercare ogni volta gli utensili necessari e li carico sulla macchina; posso avere cioè una macchina flessibile, che può montare tanti utensili in un magazzino in modo tale che di lavorazione in lavorazione vado a recuperare solo quelli necessari dal magazzino stesso, posto nei pressi della macchina). Altra possibile modalità di intervento consiste nel fissare i componenti su strutture standard (e.g. pallet) in modo tale da velocizzarne le operazioni di presa. Un'altra strategia finalizzata alla riduzione dei tempi di set up consiste nell'introduzione di sistemi di scambio automatico del pezzo all'interno della macchina. Quindi non parliamo solo di scambio automatico degli utensili da un magazzino-utensili ma anche ad una soluzione che preveda magazzini-grezzi, con un sistema automatico che, al termina di una lavorazione, porta fuori il pezzo finito dalla macchina e introduce un nuovo grezzo. Dal punto di vista dei tempi improduttivi $t_{\text{improduttivo}}$, possiamo pensare ad esempio di ridurre i tempi di spostamenti in rapido. Per fare ciò, si necessita di assi che si muovono a velocità di rapido elevate e tutto si riconduce di nuovo alla configurazione della macchina (e.g. qual è la massima velocità secondo la quale può muoversi un asse, com'è configurato il motore che comanda quell'asse, ecc.). Ulteriore strategia attuabile per la riduzione dei tempi improduttivi consiste nell'andare a specializzare le operazioni o fare operazioni in simultanea. Per comprendere il concetto, consideriamo l'esempio di una maschera di foratura (foto quaderno). Si supponga di disporre di una piastra, sulla quale occorre eseguire quattro fori identici (i.e. aventi lo stesso diametro). Ciò comporta che usiamo la stessa punta per eseguire ognuno di essi (in questa fase non ci interessa se i fori sono passanti o non passanti) e, quindi, si parla di quattro operazioni di foratura perfettamente identiche. Al fine di semplificare il discorso, consideriamo il tempo ciclo focalizzando esclusivamente l'attenzione sui movimenti dell'utensile rispetto al pezzo.



Prima di tutto, abbiamo il movimento dell'utensile, che si colloca in asse sul primo foro (in posizione di sicurezza naturalmente). La punta per forare (i.e. l'utensile) ha una certa extracorsa in ingresso, nel senso che si è posizionata in rapido appena sopra il pezzo. Terminato il primo movimento in rapido (i.e. posizionamento sull'asse del primo foro), si ha il primo movimento di lavoro. Supponendo di dover realizzare un foro passante, la punta scende, fino a trovarsi al di sotto della piastra (cioè a sporgere dall'altro lato della piastra). Questo è il primo tempo di lavorazione. Dopodiché, la punta deve risalire, nel senso che deve essere estratta dal foro (tale movimento viene fatto in velocità di lavoro, per non compromettere la superficie del pezzo). Segue lo spostamento in rapido sull'asse successivo (cioè sull'asse del futuro foro da eseguire) e la realizzazione del secondo foro. Discorso del tutto analogo per il terzo e per il quarto foro. Una volta terminata la realizzazione dell'ultimo foro, segue un ulteriore movimento in rapido verso la posizione di riposo o di cambio-utensile. Ecco che il tempo ciclo si ottiene moltiplicando per 4 il tempo di realizzazione del singolo foro e aggiungere tutti i movimenti in rapido citati. Sorge spontanea l'idea di realizzare i quattro fori in simultanea, utilizzando un sistema di foratura con un mandrino che dirama il moto attraverso un sistema di ingranaggi con satelliti. Per intenderci, il mandrino va a comandare una serie di alberini collegati alle punte, cosicché è sufficiente la rotazione del primo asse per andare a controllare le rotazioni di un numero n di assi, che andranno tipicamente a ruotare secondo la medesima velocità di rotazione (poi naturalmente dipende dal tipo di applicazione, nel senso che si può anche pensare di variare leggermente le velocità di rotazione di ciascuna punta). In ogni caso (sia nel caso di velocità di rotazione costante delle punte sia nel caso di velocità di rotazione differenziata da punta a punta) il sistema avanza con velocità di avanzamento fissa (tutte le punte scendono in contemporanea ed eseguono i fori in contemporanea). Quando ho terminato questa operazione, la mia testa di foratura multipla si alza e posso cambiare pezzo. Questa soluzione (i.e. testa di foratura multipla) velocizza notevolmente la produzione, in quanto ho specializzato la macchina per eseguire

una specifica configurazione di fori (quattro fori di un certo diametro e disposti secondo un certo interasse). Ciò sta a significare che se volessi cambiare tipo di lavorazione dovrei rimuovere la testa di foratura multipla e mettere qualcos'altro. In sostanza, la soluzione della testa di foratura multipla garantisce elevata produttività (in quanto ho specializzato il sistema per un certo tipo di lavorazione) ma offre un significativo irrigidimento del sistema di produzione (per irrigidimento si intende il fatto che la possibilità di modificare il tipo di operazione eseguita secondo quella configurazione di sistema è molto limitata).

EVOLUZIONE DELL'AUTOMAZIONE

Analizziamo i passi che hanno scandito l'evoluzione dell'automazione. In principio era diffuso un sistema di produzione completamente manuale:

Manuale: tutte le funzioni di controllo e quelle ausiliarie (carico, scarico, collaudo...) sono affidate all'uomo



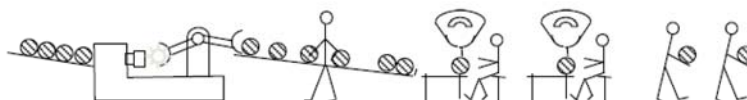
Nella figura sopra riportata si osserva un tornio parallelo, con l'operatore che lo controlla e lo comanda. Si ha un sistema manuale di trasferimento dei pezzi: vediamo l'omino che porta il pezzo grezzo alla macchina utensile, dopodiché, una volta che la lavorazione è terminata, abbiamo un sistema di trasferimento manuale verso l'isola di collaudo (vediamo un omino con un sistema di controllo) e, infine, un sistema di trasferimento manuale verso il magazzino dei pezzi finiti. Possiamo parlare, in sostanza, di un livello di automazione pari a 0. In seguito, la situazione cambia. L'esigenza di produrre un maggiore quantitativo di pezzi, in modo più ripetibile e con una qualità della produzione sotto controllo, porta a sviluppare le macchine di produzione automatiche. Per ritornare all'esempio del tornio parallelo, questo passa da una configurazione manuale ad una configurazione automatica. Il principale vantaggio consiste certamente nell'incremento di produttività (il tornio automatico è certamente più produttivo di un tornio manuale) mentre tutto il resto viene mantenuto in modalità manuale:

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



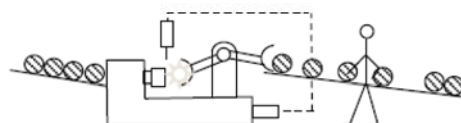
Ciò vuol dire che occorre incrementare le risorse umane preposte al trasporto manuale dei pezzi grezzi e dei pezzi finiti. Si parla di sistema di produzione semi-automatico. Lo step immediatamente successivo prevede di sgravare la risorsa umana dal compito di trasportare i pezzi grezzi/finiti, in quanto questo compito diviene sempre più oneroso a poco a poco che la produttività aumenta. Ecco che si introduce il sistema di trasporto automatico dei pezzi.

Automatico: il processo e la movimentazione del pezzo sono automatiche, il collaudo è affidato all'uomo



Nonostante questa evoluzione, manteniamo ancora manuale il sistema di collaudo (vediamo gli operatori che vanno a collaudare e verificare il pezzo). L'automazione completa si ha quando anche il collaudo viene automatizzato in linea:

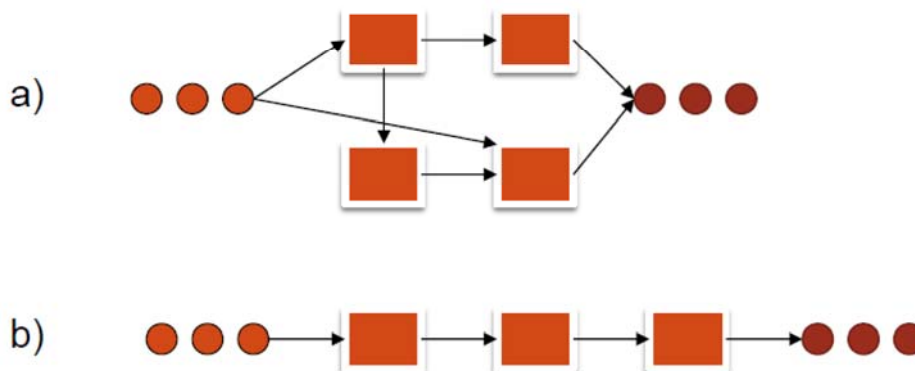
Automatico con controllo in linea: il collaudo è automatizzato, il risultato della misura interagisce col processo, l'intervento umano è richiesto solo in caso di guasto



In sostanza, nel frattempo che il pezzo viene prodotto si dispone di un sistema preposto alla verifica che l'operazione sia stata effettuata correttamente. Nell'illustrazione sopra riportata vediamo tale concetto applicato ad una singola stazione di lavoro. Se vogliamo estendere il discorso all'intera linea di produzione, vuol dire che ci sarà tutta la sequenza di operazioni e introduciamo in linea un sistema di controllo automatico: il pezzo viene sottoposto alle varie lavorazioni, passa nell'isola di controllo e poi esce come finito collaudato. Si parla quindi di sistema automatico con controllo in linea. In quest'ultima configurazione la risorsa umana è rappresentata dall'operatore che esegue il set up del sistema e dal manutentore che tiene sotto controllo il funzionamento della linea. In sostanza, l'operatore interviene eventualmente a inizio (set up della macchina) e a fine (modificare il set up della macchina) produzione, mentre il manutentore interviene quando viene avvisato di un'anomalia o un guasto.

LA MOVIMENTAZIONE

Per quanto concerne la movimentazione, urge una breve considerazione in merito alla configurazione del sistema produttivo. Fino ad oggi abbiamo visto la singola macchina, ma in realtà quando parliamo di sistema di produzione abbiamo diverse macchine, che lavorano in contemporanea. Si consideri lo schema seguente:



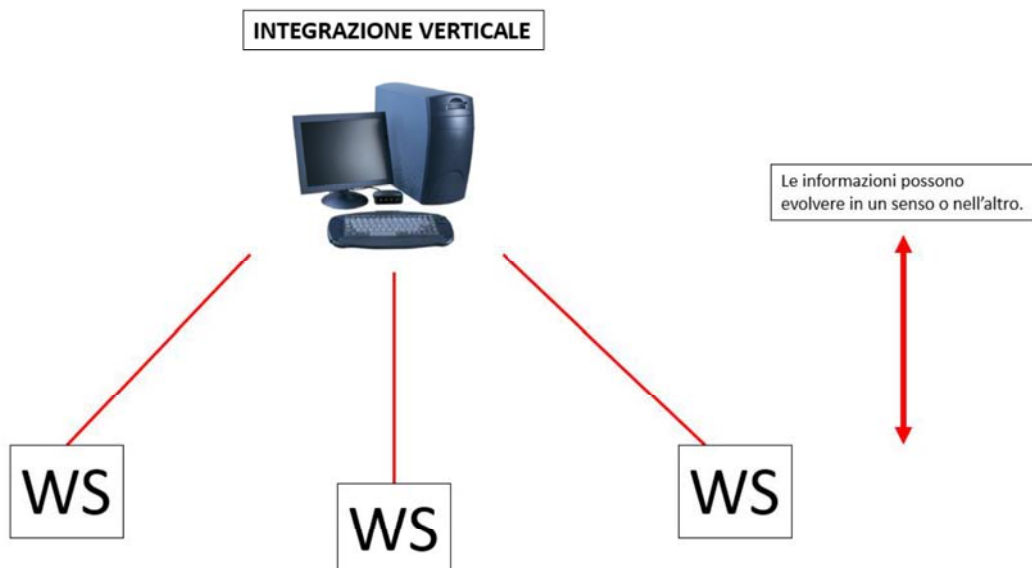
Nella suddetta illustrazione osserviamo dei pallini che rappresentano i grezzi in ingresso e altri pallini che rappresentano i finiti in uscita. Ognuno dei grezzi in ingresso subirà delle lavorazioni all'interno del nostro sistema di produzione. Precisamente:

- Nel caso b) osserviamo un classico layout in linea. Si tratta dello schema classico di una linea di produzione, in cui il componente segue un percorso fisso, passa attraverso le stazioni di lavoro in sequenza ed in ognuna delle stazioni subisce un certo tipo di lavorazione. Tale configurazione è tipica di un sistema automatico *rigido*. Per intenderci, dobbiamo produrre un componente (e.g. un motore) e abbiamo la linea di produzione: il grezzo entra nella prima stazione di lavoro, dove subisce determinate operazioni; dopodiché, passa nella seconda stazione di lavoro e nel frattempo un nuovo grezzo è entrato nella prima stazione di lavoro, cosicché tutte le macchine lavorano nello stesso tempo. Come detto, questo tipo di configurazione è abbastanza rigida.
- Nel caso a) si comprende chiaramente come ogni singolo pezzo possa seguire dei percorsi diversi. Ad esempio, un grezzo potrebbe prima evolvere verso la stazione di lavoro in alto a sinistra, poi scendere e poi andare a destra; il secondo pezzo potrebbe passare direttamente dalla stazione di lavoro in basso a destra; il terzo pezzo potrebbe invece passare dalla stazione di lavoro in alto a sinistra alla stazione di lavoro in alto a destra, ecc. In sostanza, si creano prodotti diversi, facendo viaggiare ciascun prodotto in base a quelle che sono le operazioni cui deve essere sottoposto. Si tratta quindi di un sistema di produzione automatico *flessibile*, in quanto mi consente di avere in uscita prodotti diversi.

Ricordiamo in ognuno dei casi presentati la movimentazione del pezzo può avvenire direttamente oppure attraverso un *pallet*, che è un attrezzo di bloccaggio progettato per essere trasportato insieme al pezzo da lavorare.

FUNZIONE DEL CALCOLATORE

Altro elemento fondamentale in un sistema di produzione è il calcolatore. Che cosa fa il calcolatore? Ne parleremo abbondantemente in futuro, quando affronteremo il discorso del controllo distribuito. Quando si parla di calcolatore non si intende l'unità di governo che si trova a bordo macchina e che fa funzionare quella specifica macchina, bensì un sistema che controlla e coordina il sistema produttivo. In sostanza, è come se avessimo una piramide, in cui in basso troviamo le diverse macchine di lavoro (disposte secondo una certa configurazione), ognuna delle quali ha una propria unità di governo che la controlla e che vanno a comunicare, a livello più alto, con il calcolatore. Il calcolatore non ha il compito di comandare direttamente la macchina (e.g. comandare i movimenti, attivare la lubrorefrigerazione) ma ha la funzione di andare a verificare che cosa stanno facendo le macchine. In sostanza, il calcolatore riceve dei dati con informazioni che procedono dal basso verso l'alto. Naturalmente, l'informazione può procedere anche nel verso opposto: per esempio, il calcolatore può andare ad informare una certa macchina del fatto che sta per arrivare un determinato componente (quindi il calcolatore informa la macchina di prepararsi per una certa lavorazione, caricando il part-program necessario per effettuare quella specifica operazione).

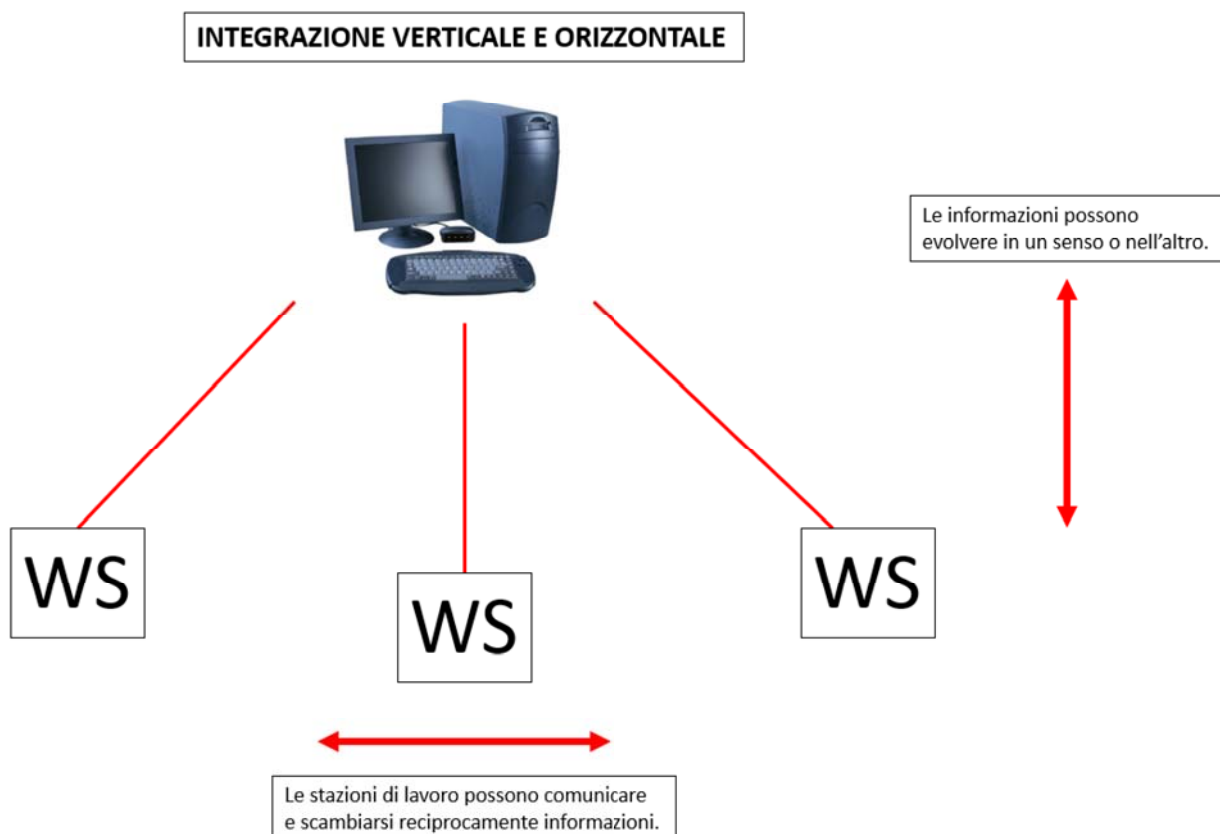


In definitiva, il calcolatore può:

- Fornire alle macchine i part-program (i.e. programmi di lavoro).
- Fornire comunicazioni agli operatori.
- Gestire le operazioni.

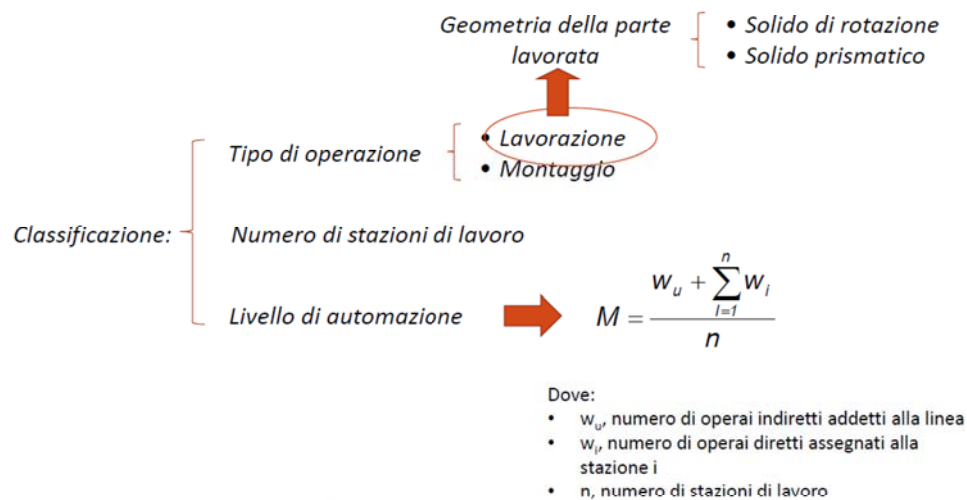
- Andare a controllare il sistema di movimentazione. A titolo di esempio, si pensi ad una produzione flessibile. Dispongo di un componente grezzo, montato su pallet e sistema sul componente stesso un chip (i.e. un'unità di memoria locale) in cui ho descritto il componente. Questo (il componente) arriva sul sistema di movimentazione, dove c'è una testa di lettura che legge il chip (sistemato sul componente) e che, quindi, sa di che componente si tratta. A quel punto, la testa di lettura va a chiedere informazioni al computer centrale informazioni (i.e. ordini) su dove andare a portare quel componente. Il calcolatore centrale conosce la disposizione delle macchine (e il loro utilizzo), ordina al sistema di movimentazione di portare quel componente verso una specifica stazione di lavoro e nel frattempo fornisce a quella stazione di lavoro il programma necessario. Questo esempio consente di comprendere l'importanza di disporre di un coordinatore centrale (i.e. il calcolatore).

Quanto detto è alla base del concetto di controllo distribuito. Dopodiché, l'industria 4.0 amplia tale prospettiva. Prima di tutto perché dà la possibilità di immagazzinare molti più dati ma soprattutto perché all'integrazione verticale alla base del controllo distribuito (la struttura a piramide descritta alla pagina precedente, con informazioni che vanno dal calcolatore alla singola stazione di lavoro e viceversa) si aggiunge un'integrazione orizzontale: in sostanza nell'industria 4.0 non abbiamo soltanto comunicazione verso e dal calcolatore alle singole stazioni di lavoro ma anche tra le stazioni di lavoro (disposte su diversi livelli e con varie funzioni), che possono quindi scambiarsi dati tra di loro.



LIVELLO DI AUTOMAZIONE

Come facciamo a capire se un sistema di produzione ha un livello di automazione più elevato di un altro? Non mi basta dire che in un sistema di produzione ci sono 4 macchine automatiche e nell'altro ce ne sono 3, perché un sistema di produzione si configura sulla base di quella che è la produzione in quell'impianto. Procediamo per step. I sistemi di produzione possono essere classificati in vari modi:



Un primo criterio di classificazione si basa sul tipo di operazione, nel senso che prevede una distinzione tra le operazioni che prevedono lavorazioni meccaniche e le operazioni di montaggio (nelle aziende che eseguono sia lavorazioni meccaniche sia operazioni di assemblaggio molto spesso sono previsti capannoni distinti per le une e per le altre; si parla di reparto *lavorazioni* e di reparto *montaggio*). Per quel che riguarda le lavorazioni meccaniche può eseguirsi un'ulteriore distinzione basata sulla geometria del pezzo lavoro (si distingue tra *solidi di rotazione* e *solidi prismatici*). Un altro criterio di classificazione è quello basato sul numero di stazioni di lavoro.

Infine, un ulteriore criterio di classificazione è quello fondato sul livello di automazione. Il livello di automazione di un sistema di produzione viene definito tramite un indice, detto *indice di presidio M*:

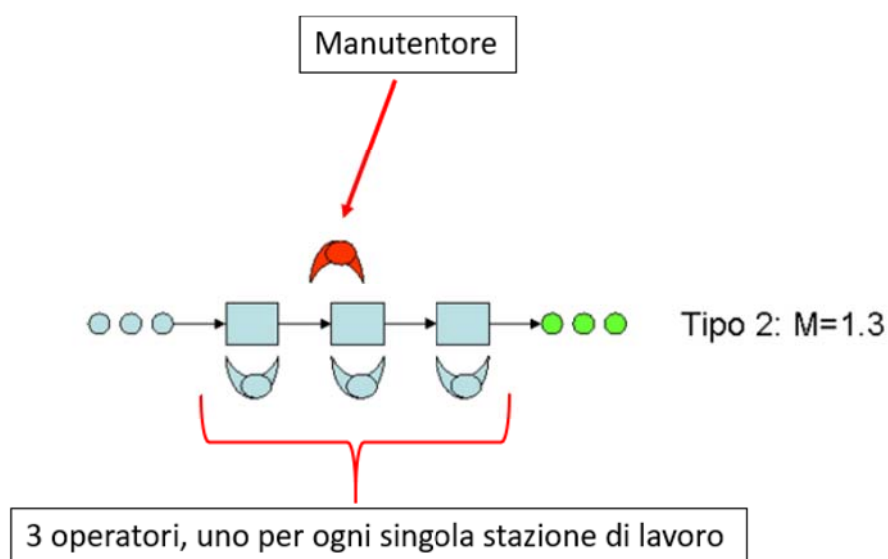
$$M = \frac{w_u + \sum_{i=1}^n w_i}{n}$$

Si tratta di un rapporto dove:

- Al denominatore compare il numero n di stazioni di lavoro.

- Al numeratore andiamo a contare tutte le risorse umane impegnate su quella linea. Per essere precisi, indichiamo con w_i il numero di risorse umane impegnate direttamente su una certa stazione i -sima di lavoro (in sostanza si tratta degli operai addetti al controllo della macchina) e, naturalmente, occorre eseguire una somma (da qui la presenza della sommatoria) sulle n stazioni di lavoro presenti nel sistema. A tali risorse umane vanno aggiunte le risorse umane adibite in generale al sistema produttivo (e.g. il manutentore, che non è impegnato su una singola stazione di lavoro e interviene dove serve) e non ad una singola stazione di lavoro.

In definitiva, l'indice di presidio M ci comunica come sono presidiati i vari elementi di un sistema di produzione. Quali sono i possibili valori che tale indice può assumere? Il primo caso da considerare è il seguente:



Si osserva la presenza di tre stazioni di lavoro. Per ogni stazione di lavoro si ha un operatore impegnato direttamente su quella stazione e figura un operatore (e.g. un manutentore) che non è adibito ad una precisa stazione di lavoro ma è impegnato, in generale, sul sistema di produzione.

In sintesi, risulta:

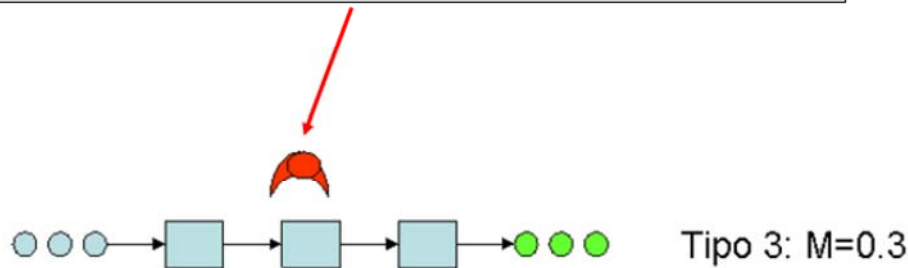
- $w_u = 1$
- $\sum_i w_i = 3$
- $n = 3$

Cosicché:

$$M = \frac{1 + 3}{3} = 1,3$$

Il secondo esempio interessante è il seguente:

3 stazioni di lavoro automatiche, con la presenza di un manutentore che lavora in generale sul sistema di produzione.



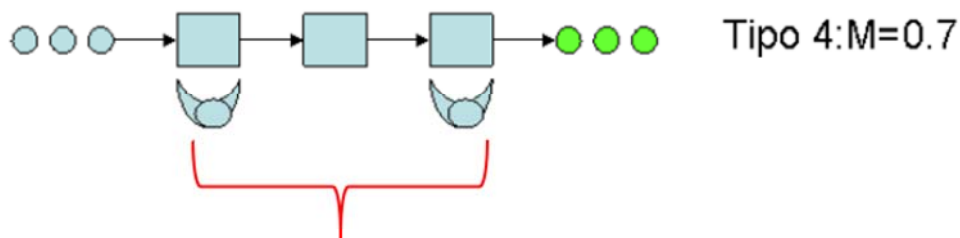
In questo caso:

- $w_u = 1$
- $\sum_i w_i = 0$ (non vi è nessun operatore impiegato nello specifico su una singola stazione di lavoro, in quanto queste sono completamente automatiche)
- $n = 3$

Cosicchè:

$$M = \frac{1 + 0}{3} = 0,3$$

Infine, è interessante considerare la seguente configurazione:



3 stazioni di lavoro, due delle quali asservite da un operatore.

Si osserva la presenza di tre stazioni di lavoro. Due di queste sono manuali, cioè asservite direttamente da un operatore, mentre l'altra (quella centrale) è automatica e quindi non prevede la presenza di un operatore direttamente dedicato ad essa. Il discorso si potrebbe complicare introducendo la frazione di tempo che l'operatore deve trascorrere controllando direttamente la stazione di lavoro che vi compete, ecc. (nel senso che a seconda della percentuale di tempo che l'operatore trascorre presso la macchina che vi compete, esso non vale come 1 ma come 0,6 o 0,7 per esempio; ad ogni modo, non è questo l'obiettivo del discorso corrente, per cui non specializzeremo il discorso ulteriormente). L'assenza di un manutentore, vigile sull'intera linea di produzione, è giustificabile ipotizzando che uno dei due operatori impegnati direttamente su una stazione di lavoro possa intervenire sulla stazione di lavoro automatica in caso di necessità.

In questo caso risulta:

- $w_u = 0$
- $\sum_i w_i = 2$
- $n = 3$

Cosicché:

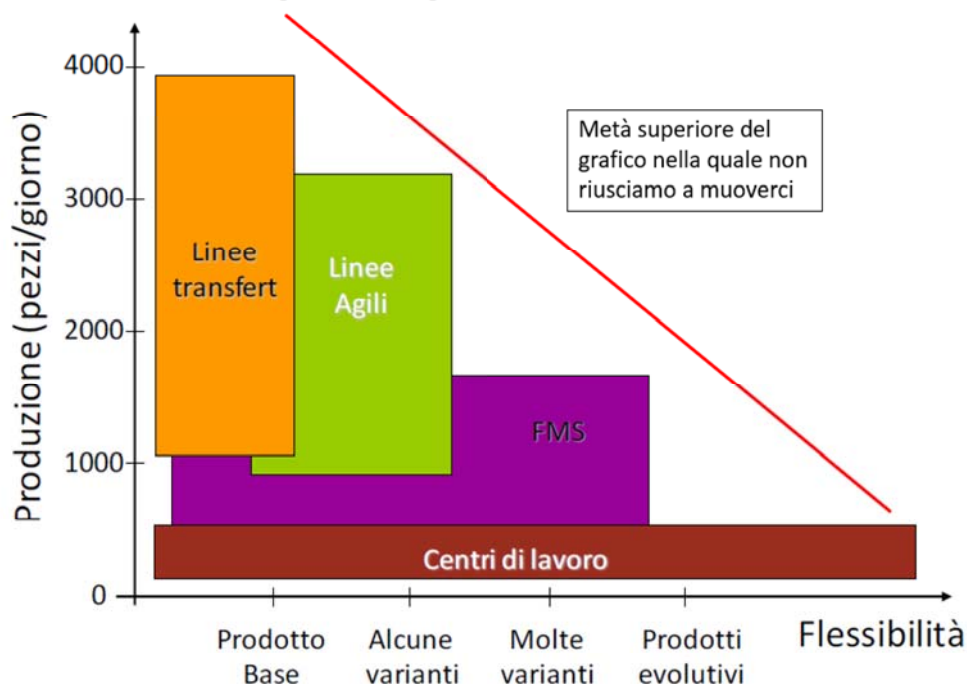
$$M = \frac{0 + 2}{3} = 0,7$$

In generale, può concludersi che tanto più la produzione è manuale, tanto maggiore è l'indice di presidio M. Tipicamente, quando $M=1$ parliamo già di un sistema di produzione manuale. Nel dettaglio, se $M>1$, abbiamo addirittura più di un operatore per ogni stazione di lavoro. Per contro, se l'indice M tende a 0, il sistema di produzione considerato è sempre più automatico. Domanda: è possibile che $M=0$? No, perché non avremo mai sistemi di produzione che lavorano con efficienza pari al 100%, nel senso che ci sarà sempre una possibile causa di guasti o anomalie che solo una risorsa umana può gestire (per intenderci, deve esserci un manutentore preposto al ripristino del funzionamento del sistema). Concludendo il discorso, tramite l'indice di presidio M siamo in grado di confrontare il livello di automazione di sistemi di produzione diversi. È interessante precisare che a seconda del valore dell'indice di presidio, del numero di stazioni e del numero di risorse umane impiegate direttamente in una stazione di lavoro è possibile distinguere tra 4 tipologie di sistemi di produzione:

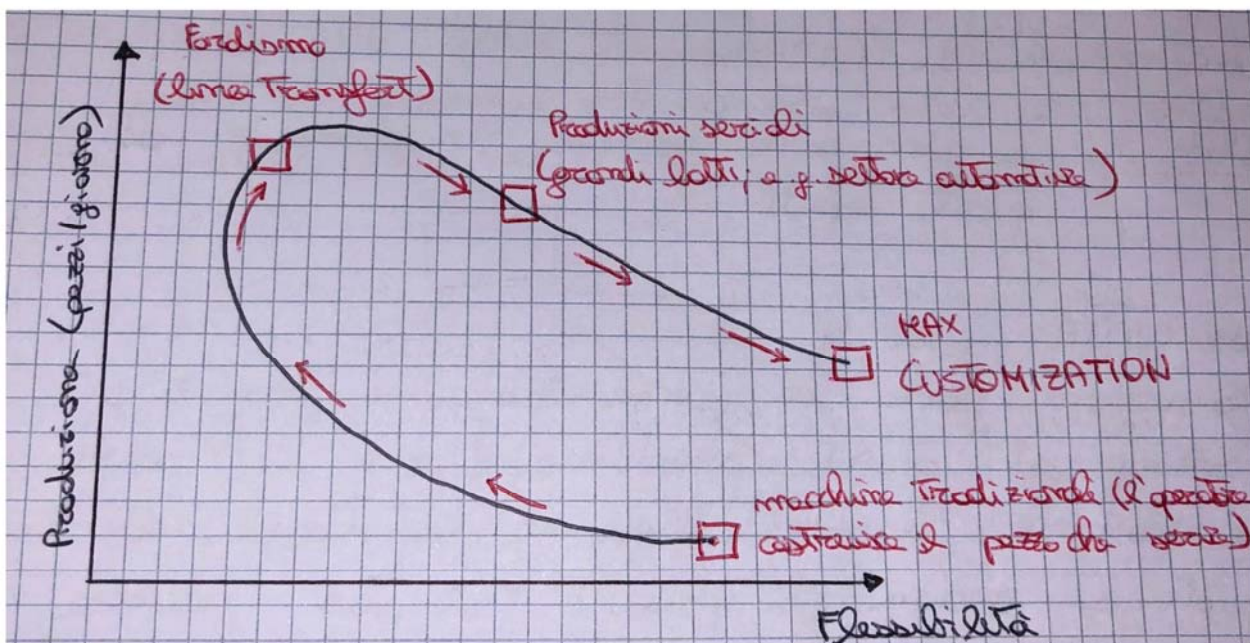
- Tipo 0: Stazione singola con operatore ($n=1, w=1, M=1$)
- Tipo 1: Stazione singola in grado di operare per periodi di tempo lunghi in modalità "non sorvegliata" ($n=1, w_i=0, M<1$)
- Tipo 2: Sistema a più stazioni tutte sorvegliate ($n >1, w_i=1, M>1$)
- Tipo 3: Sistema a più stazioni completamente automatica ($n>1, w_i=0, M<1$)
- Tipo 4: Sistema a più stazioni ibrido (alcune stazioni sono sorvegliate altre sono totalmente automatiche) ($n>1, w_i=0/ w_i=1, M<1$)

FLESSIBILITÀ

Come noto, l'automazione consente di aumentare la produttività del sistema (rendendo le macchine automatiche, cioè capaci di lavorare autonomamente, ovvero in assenza di presidio). Tuttavia, un'elevata automazione (che comporta specializzazione delle macchine, attrezzature particolari, ecc.) comporta inevitabilmente un irrigidimento del sistema produttivo, nel senso che un sistema di produzione con elevato livello di automazione è caratterizzato da elevata produttività ma non riesce a cambiare facilmente il tipo di lavorazioni da eseguire (e, quindi, il tipo di prodotto). Un sistema si dice *flessibile* quando è in grado di adeguarsi (in modo semplice e in tempi rapidi) a cambi di prodotto o a varianti di prodotto. In sostanza, la flessibilità è la capacità di gestire i cambiamenti (e.g. nella sequenza delle operazioni, nelle geometrie che si vogliono ottenere, ecc.). Nel dettaglio, si può passare da un sistema completamente rigido (che non è in grado di cambiare il tipo di operazioni e, quindi, può solo produrre in grandi quantità copie di un unico componente) ad un sistema che è a massima flessibilità (quindi si può adattare istante per istante a geometrie e lavorazioni completamente diverse le une dalle altre, con la conseguenza che i prodotti finali sono tutti di tipologie differenti; oltretutto, il prodotto può cambiare in modo del tutto casuale, senza aver preventivato il cambiamento, nel senso che in un certo momento si decide di introdurre nel sistema produttivo un pezzo grezzo e, cambiando il tipo di lavorazioni eseguite, si ottiene una nuova tipologia di prodotto finito). Naturalmente, nel mezzo vi è un sistema di produzione che è a metà tra l'estrema rigidità e l'estrema flessibilità. La maggior parte dei sistemi produttivi si colloca in questa fascia intermedia. Quando ha avuto luogo la Seconda Rivoluzione Industriale (con il *Fordismo*, ecc.) si parlava di sistemi di produzione totalmente rigidi, ma il futuro è quello della *Max Customization*, ovvero si produce con elevata produttività una grande varietà di prodotti differenti. Attualmente siamo in grado di gestire prodotti diversi ma lavoriamo ancora in lotti, nel senso che non siamo ancora in grado di produrre componenti tutti diversi tra loro e in ordine completamente casuale (quindi non seguendo la logica dei lotti). Per concludere il discorso, è interessante visualizzare il seguente diagramma:



Si tratta di un diagramma in cui sull'asse delle ordinate è riportata la produttività (i.e. pezzi/giorno) mentre sull'asse delle ascisse è riportata la flessibilità. Innanzitutto, le linee ad elevata automazione sono le *linee transfert* (i.e. sistemi *a trasferta*), cioè i sistemi di produzione sono disposti in linea, una dopo l'altra. In questo caso le macchine sono ad altissima specializzazione, tant'è che spesso ogni stazione di lavoro compie una singola operazione del ciclo di lavorazione di quel componente (e.g. il pezzo viene spianato in una stazione di lavoro, dopodiché passa alla stazione di lavoro successiva per subire un'operazione di sgrossatura, ecc. In sostanza ogni macchina monta un certo tipo di utensile ed esegue solo una lavorazione). In questo caso, se volessi cambiare l'ordine con il quale vengono eseguite le lavorazioni dovrei cambiare tutta la configurazione del mio sistema di produzione e questo non è pensabile. Ecco che sistemi di questo tipo permettono di aumentare moltissimo la produttività ma non sono in grado di gestire varianti del prodotto (sono sistemi rigidi!). I sistemi più flessibili sono rappresentati dalle singole macchine di lavorazione a controllo numerico. Queste non sono in grado di avere elevata produttività, ma sono in grado di produrre prodotti completamente diversi gli uni dagli altri, sulla base del programma di lavorazione (cambiando il programma posso cambiare la geometria che intendo realizzare). In questo frangente, la macchina a controllo numerico può essere molto flessibile se ha un magazzino utensili molto grande (esistono magazzini che possono ospitare centinaia di utensili; altre macchine a controllo numerico hanno una flessibilità più bassa, perché magari riescono a montare 40-60 utensili in tutti e quindi mi devo adattare con gli utensili che ho disposizione oppure prevedere dei set up per cambiare gli utensili disponibili in magazzino). Ecco che una macchina a controllo numerico rappresenta il sistema di produzione più flessibile e meno produttivo (si tratta dei *centri di lavoro* che compaiono in basso nel diagramma della pagina precedente). Proseguendo il discorso, c'è stato un periodo storico (anni '60, '70), in cui sono andati in auge i *sistemi flessibili di produzione* (i.e. *FMS*). Si trattava di sistemi dotati di un sistema di trasporto che poteva portare i pezzi a stazioni di lavoro diverse (secondo un layout ad anello oppure con carrelli filoguidati) e che, quindi, riuscivano a gestire lavorazioni diverse. Tutto ciò veniva fatto con un sistema di gestione molto complesso (parliamo di un periodo in cui non esistevano i centri di calcolo attuali, ragion per cui parliamo di un sistema di gestione molto molto complesso). Ad ogni modo, dopo il periodo di massima diffusione, questo tipo di sistemi di produzione (stiamo sempre parlando dei *FMS*) è stato un po' abbandonato. Oggigiorno, il tipo di sistema di produzione maggiormente diffuso è rappresentato dalle *linee agili*, che sono a metà strada tra quello che è una *linea transfert* (dal punto di vista del sistema di movimentazione) e un *FMS* (dal punto di vista della gestione del tragitto dei componenti). Il concetto interessante da sottolineare è che i sistemi di produzione di collocano nella metà inferiore del grafico riportato alla pagina precedente e non riusciamo a muoverci nella metà superiore. Di seguito è riportata una curva che mostra l'evoluzione temporale dei sistemi produttivi in termini di produttività e flessibilità. Il punto di partenza è rappresentato dalle macchine tradizionali, mentre oggi si stanno compiendo sempre più sforzi per evolvere verso il concetto di *max customization*.



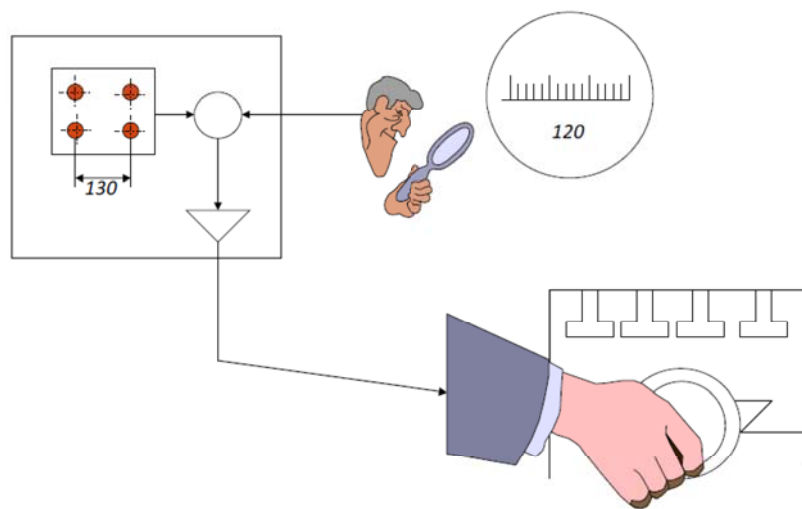
LEZIONE 2 SIP 08.03.2019

Prima di introdurre il controllo numerico è interessante formulare un breve excursus storico. La Prima Rivoluzione Industriale ha comportato una fortissima innovazione tecnologica, nel senso che ha cambiato radicalmente il modo di produrre. Difatti, essa ha comportato il passaggio da una produzione di tipo manuale ad una produzione tramite macchine che, per mezzo di sistemi a vapore, potessero lavorare autonomamente. La Seconda Rivoluzione Industriale ha invece rappresentato semplicemente un ammodernamento (il passaggio alla corrente elettrica) di quanto introdotto dalla Prima. La Terza Rivoluzione Industriale è stata invece di fortissimo impatto (come la Prima), portando ad una significativa automazione della produzione industriale. Oggigiorno, è in atto la Quarta Rivoluzione Industriale, che può considerarsi un mix tra innovazione (introduzione di nuove tecnologie nell'ambiente produttivo, come la fabbricazione additiva) e implementazione all'interno del mondo produttivo di tecnologie digitali già utilizzate in altri settori (solo ora si stanno introducendo anche nell'ambito della produzione industriale). Tutto ciò è molto impattante per i sistemi di produzione. In questo corso tratteremo le macchine automatiche (i.e. macchine a controllo numerico, robot), che sono state il frutto della Terza Rivoluzione Industriale. Non mancheranno però cenni in merito a quanto sta cambiando con la Quarta Rivoluzione Industriale. Si tenga conto che molte industrie (si parla soprattutto di piccole-medie imprese) non sono ancora al cosiddetto livello 3.0, nel senso che sono ancora al livello 2.0 (per intenderci, non hanno ancora introdotto elementi di forte automazione all'interno del loro panorama produttivo). È chiaro che per queste imprese il passaggio al livello 4.0 è particolarmente arduo, nel senso che è richiesto un cospicuo investimento. Esistono poi altre aziende (e.g. la Ferrero di Alba) che sono ad un livello di automazione particolarmente elevato e prossimo (potremmo parlare di livello 3.8) al 4.0.

IL CONTROLLO NUMERICO

Che cosa si intende per controllo numerico e qual è stata l'innovazione apportata da questa tecnologia nel mondo della produzione? Prima di tutto, il controllo numerico offre il vantaggio di rendere la macchina automatica: si passa dal controllo della macchina eseguito da un operatore ad un controllo della macchina eseguito dalla cosiddetta *unità di governo*, ovvero un computer che gestisce la macchina sulla base di un programma inserito al suo interno da un operatore. Per quale ragione si è affermata la tecnologia del *controllo numerico*? Perché serviva flessibilità (esigenza di cominciare a produrre lotti di componenti di tipologie differenti) e automazione (esigenza di mantenere elevati livelli di precisione e ripetibilità nella produzione). Per ottenere flessibilità e allo stesso tempo automazione (nonché precisione e tutte le caratteristiche sopra elencate) non ci si può basare su una risorsa umana (soprattutto quando la produzione aumenta in termini di ritmi). Perché? Naturalmente perché le persone si stancano. Si pensi ad un operaio che per 8 ore al giorno

deve eseguire con continuità operazioni ripetitive e procedere con grande rapidità da un tipo di operazione all'altra; è evidente che le prestazioni dell'operatore diminuiranno progressivamente a poco a poco che si evolve verso il termine della giornata lavorativa. Ciò comporterebbe una qualità della produzione non costante nel tempo. Tale circostanza entra in conflitto con l'uniformità e la ripetibilità (tutti i prodotti devono avere lo stesso standard qualitativo) richiesta nel mondo della produzione. Ecco che emerge con prepotenza l'esigenza di automazione: si fa in modo che una macchina ripeta una determinata lavorazione o ciclo di lavorazione in modalità autonoma (sulla base di un programma inserito al suo interno da una risorsa umana, come un operatore). Orbene, qual rimane il compito della risorsa umana (i.e. l'operatore)? Alla risorsa umana spetta la programmazione, la manutenzione e la sorveglianza della macchina automatica, mentre non è più adibita al controllo manuale della macchina. Ora, è stato affermato che una macchina automatica lavora sulla base di un set di informazioni trasmesse alla macchina stessa sotto forma di programma. Queste informazioni sono ricavate sulla base delle caratteristiche geometriche del componente da produrre e sulla base dei dati tecnologici (per intenderci, se stiamo facendo una lavorazione di taglio, dovremmo indicare alla macchina qual è l'utensile da montare sul mandrino e con quali parametri il citato utensile deve lavorare una certa geometria). Per essere precisi, tali informazioni sono fornite al controllo della macchina sotto forma di numeri e lettere (codifica alfanumerica). È per questa ragione che si parla di macchina *a controllo numerico*. Come faccio a rendere la macchina automatica? Si consideri l'illustrazione seguente:



Occorre pensare a cosa serve per controllare una macchina manuale e trasferire questi compiti ad un sistema di controllo automatico. A titolo di esempio, si pensi ad un'operazione di tornitura cilindrica esterna fatta tramite un tornio parallelo. Come si può eseguire questa operazione? Si supponga che il grezzo sia già stato montato sull'autocentrante collegato al mandrino (quindi abbiamo già il grezzo pronto ad essere lavorato sul tornio). Inoltre, si supponga che il grezzo di interesse abbia un diametro esterno pari a 100 mm. Ora, l'operatore osserva il disegno tecnico del prodotto finito e vede che una certa zona deve

essere lavorata per essere portata ad un diametro di 98 mm (si rende necessaria dunque la rimozione di 1 mm di sovrametallo). L'utensile è già montato sulla torretta porta-utensili e l'operatore comincia a muovere gli assi per avvicinare l'utensile al pezzo. Come compie questa operazione? Essenzialmente, l'operatore muove delle manovelle che sono collegate a dei rotismi i quali permettono la movimentazione dell'asse. Nel dettaglio, la prima operazione avviene in manuale e corrisponde all'appostamento (quindi, l'operatore non collega direttamente gli assi al motore, ma muove a mano i singoli assi, che in un tornio ricordiamo essere in numero pari a 2: la direzione radiale x e la direzione assiale z). In sostanza, ci avviciniamo al pezzo muovendo l'utensile lungo gli assi x e y (si tratta di una sorta di movimento in rapido), e, poiché probabilmente non è stato prima operato un azzeramento manuale degli assi (questo perché siamo in una macchina manuale), tocchiamo con l'utensile la superficie del pezzo (il diametro esterno rappresenta la nostra quota di riferimento) per capire di trovarci effettivamente a quota 100 mm. Dopodiché, ci spostiamo per uscire fuori pezzo (ricordiamo che nella tornitura cilindrica esterna devo partire dalla quota di accostamento e poi muovermi sull'asse z) di 1 mm. In sintesi: sfioriamo il pezzo sul diametro esterno, dopodiché usciamo e ci spostiamo per definire la profondità di passata di 1 mm (è la quantità di sovrametallo che occorre rimuovere). Si pone un interrogativo: come fa l'operatore a capire che si è spostato di 1 mm? Osservando delle tacche graduate: c'è una scala di riferimento nei pressi della manovella per il comando dell'asse. Orbene, l'operatore sa dove si trova inizialmente (quota di riferimento che rappresenta il nostro zero in senso radiale) e si sposta di 1 mm guardando la scala graduata. Naturalmente, l'operatore definisce lo zero anche in direzione assiale. A quel punto, l'operatore può partire con la lavorazione e con un comando manuale collega (tramite una leva) l'asse al motore. Il movimento dell'utensile. In precedenza però l'operatore aveva già settato i parametri di taglio e, quindi, aveva già stabilito (tramite delle leve) quale era il rapporto di trasmissione da utilizzare per far ruotare il mandrino e far avanzare longitudinalmente l'asse secondo una certa velocità. A questo punto l'operatore osserva la lavorazione ed è pronto a fermare il movimento dell'asse quando viene raggiunta la lunghezza totale da lavorare: in sostanza, l'operatore controlla continuamente le scale graduate (che indicano il movimento dell'asse) in modo tale da disabilitare il movimento quando siamo arrivati alla quota finale. Dopodiché, di nuovo manualmente sposta l'utensile rispetto al pezzo. Ora, quali sono gli elementi di base nell'operazione descritta? Per cominciare, si dispone di un disegno che fornisce le informazioni geometriche da cui l'operatore capisce che deve rimuovere 1 mm di sovrametallo per una certa lunghezza. Poi, abbiamo dei comandi per far muovere l'asse. Tali comandi possono essere manuali (il braccio dell'operatore) o automatici (con un sistema di leve collegato direttamente l'asse al motore, ragion per cui sarà l'azionamento, cioè il motore, a muovere l'asse). Infine, abbiamo le scale graduate, che consentono all'operatore di verificare istante per istante le posizioni degli assi e capire quando agire per iniziare a interrompere.

Orbene, disponiamo di:

- Un set di dati (quelli geometrici sono insiti nel disegno, mentre quelli tecnologici sono nella “testa” dell’operatore, nel senso che sulla base della propria esperienza l’operatore sa come impostare la velocità di taglio e il numero di giri del mandrino).
- Un comando manuale (braccio) o automatico (motore).
- Un sistema di feedback da parte della macchina (in questo caso l’occhio dell’operatore che guarda la scala graduata).

L’insieme di tutte le funzioni descritti è naturalmente gestito dall’operatore. Alla luce di quanto detto, come si può tradurre tutto questo in qualcosa di automatico? Prima di tutto, devo fornire alla macchina tutti i dati geometrici e tecnologici. Assolvo a questo compito scrivendo un programma (detto *part program*, cioè “*programma per eseguire delle lavorazioni su una parte*”), che rappresenta la traduzione in un formato standard comprensibile dalla macchina utensile delle citate informazioni geometriche e tecnologiche. Detto ciò, devo avere degli azionamenti (i.e. dei motori) collegati agli assi e devo avere dei trasduttori, che istante per istante mi indicano le posizioni degli assi. Dovrò peraltro disporre di un calcolatore che gestisce e coordina il tutto. Quindi, sulla base dei dati di partenza il calcolatore elabora le informazioni e le trasforma in comandi per il motore: gli assi cominciano a muoversi e, istante per istante, dalla macchina utensile arriveranno i dati dei sensori, che diranno al calcolatore dove si trovano gli assi. Sulla base dei dati che arrivano dai sensori, il calcolatore comanderà il movimento del motore e dirà al motore stesso quando fermarsi (ad esempio, quando ha raggiunto la posizione finale). In soldoni, per rendere la macchina automatica, si necessita di:

- Programma (i.e. *part program*).
- Unità di governo (i.e. il calcolatore di cui si parla sopra).
- Azionamenti.
- Trasduttori.

Senza questi elementi una macchina non può lavorare in modalità autonoma. Si badi bene che quelli elencati sono gli elementi di base di una macchina automatica, nel senso che, a seconda del livello di automazione che si intende conferire alla macchina, si potranno integrare numerosi altri elementi. Chiarito tale discorso, diamo una definizione di *controllo numerico*. Esistono numerose definizioni, tra le quali quella dell’*Electronic Industries Association* (EIA): “*un sistema in cui le azioni sono comandate da un controllore (il computer) sulla base di comandi inseriti nella memoria di questo sistema in forma alfanumerica (un codice, con una sintassi e una semantica predefinite)*”. I dati memorizzati in forma alfanumerica nella memoria del calcolatore verranno poi letti, interpretati ed elaborati dall’unità di governo (che è il nostro calcolatore), per comandare il funzionamento della macchina. Questa è la sintesi di che cos’è il controllo numerico di una macchina utensile. In definitiva, quali saranno le operazioni che faremo su una macchina a controllo numerico? Per esempio, l’avvio del mandrino, la sostituzione dell’utensile, i movimenti in rapido e i

movimenti di lavoro (quindi, far seguire all'utensile dei percorsi predeterminati per ottenere la geometria del componente finale), l'avvio della lubrorefrigerazione, la messa in pausa (i.e. stop), ecc. Tutto ciò sarà controllato dall'unità di governo sulla base del *part program*.

ORIGINI DEL CONTROLLO NUMERICO

Quando è nato il controllo numerico? Il controllo numerico nasce con la Terza Rivoluzione Industriale (siamo nel secondo Dopoguerra). Nel 1947 lo scienziato John Parson, considerato il padre fondatore di questo tipo di tecnologia, partorisce l'idea di creare una macchina automatica. Ma perché? Per comprendere le ragioni dietro l'idea di John Parson occorre inquadrare il periodo storico: siamo nel secondo Dopoguerra e all'inizio della Guerra Fredda, con la corsa agli armamenti. In sostanza, il Secondo Conflitto Mondiale è terminato ma aleggia fortemente il terrore di nuovi dissidi e scontri. Per questa ragione, ogni Nazione cerca di armarsi sempre di più in modo da intimorire le altre Nazioni (che non avrebbero osato sfidare quella determinata Nazione perché sapevano che era molto più armata e che, quindi, in uno scontro avrebbe potuto avere la meglio). Per esempio, le guerre si combattevano molto spesso in area e gli aerei allora diffusi erano molto pesanti (presentavano strutture in acciaio o in legno per alleggerirle): non potevano volare ad alte quote e le velocità raggiungibili erano molto limitate. Dunque, era diffusa l'esigenza di costruire aerei più veloci, in modo da poter sfuggire agli avversari o prenderli alla sprovvista. Nel frattempo, si stavano compiendo studi sugli elicotteri (i citati studi erano finalizzati al miglioramento delle prestazioni di volo degli elicotteri), in quanto mezzi molto utili per le operazioni di soccorso e il trasporto dei soldati nelle zone di guerra. Ora, per riuscire a gestire il movimento e il controllo dell'elicottero occorre costruire delle pale che presentassero geometrie tali da migliorare notevolmente le prestazioni dal punto di vista fluidodinamico. Costruire pale contraddistinte da geometrie curve nello spazio non era un'operazione semplice, soprattutto a causa delle tecnologie diffuse all'epoca. Quali erano le possibili soluzioni all'epoca? Una tecnologia fortemente diffusa era rappresentata dalla fonderia. Tuttavia, la fonderia restituisce componenti contraddistinti da tolleranze molto larghe e da una superficie con elevata rugosità. Quindi, era molto complesso realizzare componenti di questo tipo in fonderia, anche perché avrebbero dovuto essere ripresi alle macchine utensili. Il problema è che con le macchine utensili diffuse all'epoca era praticamente impossibile realizzare delle geometrie complesse. Si trattava infatti delle classiche frese universali (e manuali) dotate di un motore per il mandrino (dunque per la rotazione dell'utensile) e un motore (un solo motore, che può essere collegato alternativamente alla slitta o alla tavola porta-pezzo: posso muovere in modo automatico, tramite il collegamento con il citato motore, l'asse x oppure l'asse y, ricordando che nel caso di fresatrice verticale l'asse z è verticale) per comandare gli assi. Con una macchina di questo tipo riesco a realizzare in maniera benissimo delle superfici prismatiche (o parti piane), ma realizzare una superficie curva non è possibile. Perché? Perché non posso comandare in contemporanea l'asse x e

l'asse y (in questo tipo di macchina o aziono l'asse x o aziono l'asse y). Naturalmente, potremmo avere un operatore particolarmente abile, che comanda manualmente gli assi e riesce a descrivere delle curve complesse, ma si tratta di un'operazione né precisa né ripetibile (non posso pensare di produrre una serie di pale di elicottero con una soluzione di questo tipo). In sostanza, per riuscire ad eseguire delle geometrie più complesse in modo preciso e ripetibile, devo cambiare la gestione della macchina: non posso più avere un operatore che compie l'operazione descritta controllando più assi (non è preciso e ripetibile). Devo trasformare la macchina attraverso una serie di innovazioni. La prima consiste nell'introduzione di un motore per ogni asse, nel senso che abbandoniamo l'idea di avere la possibilità di automatizzare solo il movimento lungo l'asse x oppure quello lungo l'asse y: inserisco due motori e quindi posso comandare sia il movimento lungo l'asse x sia quello lungo l'asse y. Tuttavia, la gestione dei due citati motori deve essere affidata ad un calcolatore: sul calcolatore avrò un programma che stabilisce la traiettoria da seguire con l'utensile e il comando degli assi sarà dato dal calcolatore sulla base di quel programma. Questa è l'idea che ha portato allo sviluppo delle macchine a controllo numerico. Si trattò di un'idea vincente, ragion per cui Parson ottenne subito un contratto (1949) per lo sviluppo di questi sistemi. In particolare, il MIT e l'US Air Force si interessarono particolarmente a questa soluzione e investirono moltissimo in questa ricerca: Parson ebbe un proprio team di collaboratori e poté contare su ingenti finanziamenti. Il risultato è stata la costruzione, nel 1952 (si pensi che all'epoca non c'era tutta la miniaturizzazione della componentistica elettronica: un calcolatore poteva arrivare ad occupare anche una stanza) della prima fresatrice a controllo numerico. Questa fresatrice presentava un motore per ogni asse (x, y e z) e, di conseguenza, riusciva a gestire, in contemporanea, il movimento dei tre assi. A partire da questo evento fu possibile cominciare a realizzare geometrie complesse in lavorazione meccanica. Per capire l'impatto e l'attenzione che la tecnologia del controllo numerico suscitò basti pensare che già nel 1955 cominciano a diffondersi i primi modelli commerciali di macchine utensili a controllo numerico. Nel 1957 il controllo numerico era ormai pienamente accettato da parte del mondo industriale (in soli 5 anni si passa dal prototipo all'implementazione nell'industria). Tra il 1958 e il 1960 abbiamo la diffusione di questi sistemi di produzione all'interno delle aziende. In particolare, si parla di *Direct Numerical Control* (DNC: *controllo numerico diretto*): si ha un calcolatore di grandi dimensioni (poteva occupare anche lo spazio di un'intera stanza) che controlla la nostra macchina utensile. Si tratta però di un sistema molto costoso e complesso da implementare. Inizialmente, le aziende che decidevano di adottare questa tecnologia acquistavano una macchina utensile e la sua cabina di controllo. Magari qualche azienda decideva di investire di più, acquistando una seconda macchina a controllo numerico (di tipo DNC). Tuttavia, non poteva acquistare anche una seconda cabina di controllo (perché i costi erano molto elevati). Quindi, il sistema di controllo era uno e comandava tutto il parco macchine. "Comandava" nel senso che in quell'unità di governo si inseriva il programma (inizialmente sotto forma di schede perforate) e il calcolatore elaborava questa informazione trasferendo i comandi direttamente ai motori delle macchine utensili. In sostanza, nel DNC vi era un collegamento

diretto tra la centrale di controllo e le singole macchine utensile. Nel corso degli anni '60 si è verificata una significativa evoluzione dell'elettronica, con una forte spinta verso la miniaturizzazione. Ciò ha reso possibile la progressiva riduzione delle dimensioni (e del costo) dei sistemi di controllo, portando al moderno concetto di calcolatore (che non aveva più le dimensioni di una stanza, ma poteva assimilarsi ad una grande scrivania). Naturalmente, non eravamo agli attuali livelli di miniaturizzazione. Peraltro, le capacità di calcolo e di memoria di questi calcolatori erano fortemente limitate. Ad ogni modo, si poteva già pensare di cambiare prospettiva, passando da un unico sistema di controllo che comanda tutto il parco macchine ad un sistema di controllo specifico per ogni singola macchina utensile. Si passa quindi dalla logica del *DNC* a quella del *CNC* (i.e. *Computerized Numerical Control*: controllo numerico con calcolatore a bordo macchina; l'unità di governo è a bordo della singola macchina utensile e gestisce soltanto quella macchina utensile). Perché la logica del *CNC* si è rivelata vincente (tant'è vero che la logica del *DNC* è stata rapidamente abbandonata)? Perché il *DNC* aveva il grosso vantaggio di centralizzare il controllo della produzione, ma presentava un enorme inconveniente: se si verificava un guasto al calcolatore centrale, tutta la produzione si fermava, nel senso che nessuna macchina utensile era più controllabile). Al contrario, il *CNC* delocalizza il controllo: non abbiamo più un controllo centrale e localizzato, in quanto le macchine diventano indipendenti le une dalle altre (se una macchina utensile subisce un guasto, questo non inficia sul funzionamento delle altre macchine utensili).

DNC – Controllo Numerico Diretto

Più macchine utensili controllate direttamente da un computer centrale, a cui si accede da terminale remoto

MA: Se il computer centrale si spegne, tutte le macchine utensili sono inattive!

CNC

Il PC di controllo è parte integrante della macchina utensile. Il programma può essere preparato altrove. L'operatore può agire sul PC di controllo manualmente per operare modifiche, creare nuovi programmi, salvare dati

La crescita delle prestazioni dei PC ha favorito il CNC

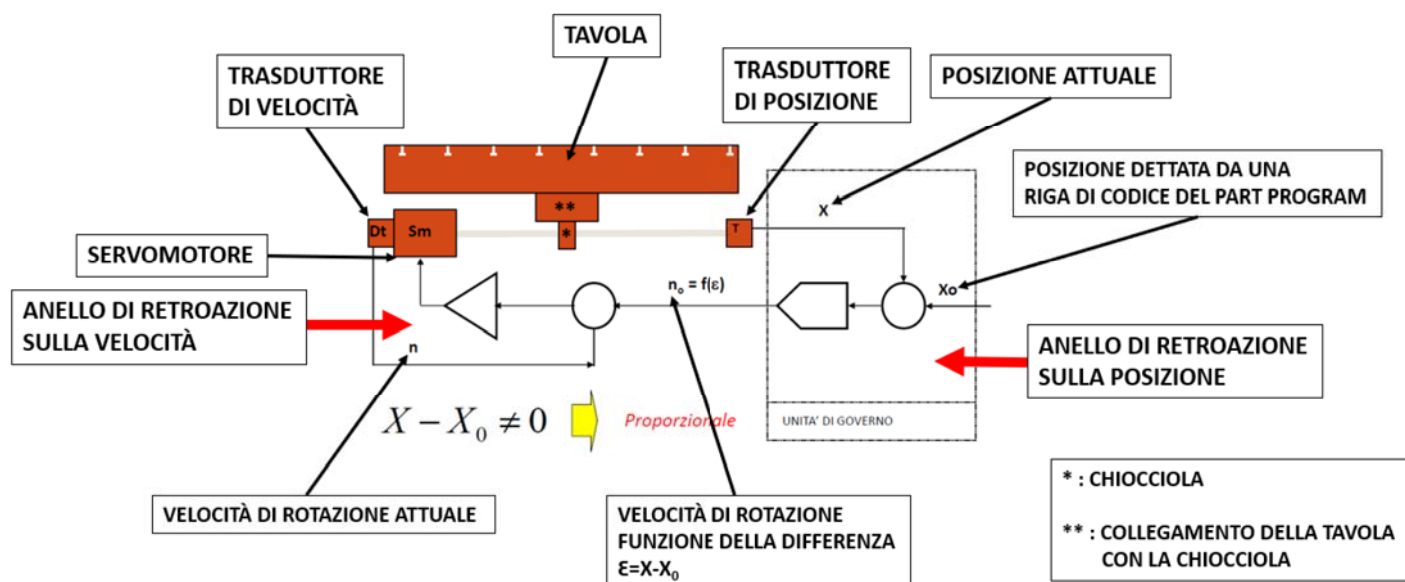
Questa è la ragione per cui la logica del *CNC* ha rapidamente preso il sopravvento. Poi si è verificata una sempre maggiore miniaturizzazione dei controlli fino ad arrivare ad oggi, dove l'unità di governo ha la struttura di un classico pc, con la sua CPU, le sue memorie e varie schede per gestire le varie funzioni (e.g. controllo degli azionamenti, gestione dei segnali che arrivano dai trasduttori, ecc.) di interesse in una macchina a controllo numerico. Peraltro, le

prestazioni dei calcolatori sono migliorate sempre di più, tant'è che oggi, oltre alle funzioni base, possiamo trovare tante altre applicazioni caricate su questi dispositivi (vedremo qualche altro esempio quando parleremo dell'unità di governo). Il concetto fondamentale da sottolineare è la dirompente evoluzione e diffusione della tecnologia del controllo numerico nel mondo industriale. Questo è quello che sta accadendo oggi con la *stampa 3D*, che sta subendo una crescita esponenziale (c'è una crescita del 30% nel giro di pochi anni). In sostanza, quello che è accaduto con il controllo numerico nel corso del secolo scorso ce lo aspettiamo nei prossimi anni per i sistemi di fabbricazione additiva (soprattutto per la parte dei metalli, in quanto è quella che consente di ottenere componenti finali ad alte prestazioni). Ricapitolando:



Come funziona il nostro controllo? Inseriamo le informazioni geometriche e tecnologiche sotto forma di codice alfanumerico (i.e. *part program*). A titolo di esempio, la riga di codice M03 corrisponde la rotazione del mandrino (per intenderci, l'unità di governo interpreta tale riga di comando e invia un segnale al motore del mandrino per avviarne la rotazione). Il codice G1 X100 Y50 Z10 F120 viene invece interpretato nel modo seguente: rispetto alla posizione attuale dell'utensile questo dovrà muoversi, secondo una velocità pari a 120 mm/min (F120), verso la posizione di coordinate (x=100; y=50; z=10) muovendo in contemporanea i tre assi (si tratta di una interpolazione lineare nello spazio). Proseguendo, la riga di codice T46M06 viene interpretata in questo modo: occorre caricare l'utensile (T) che si trova nella posizione 46 all'interno del magazzino degli utensili; una volta individuato l'utensile, va avviato il sistema di scambio dell'utensile (M06) che porterà il nuovo utensile sul mandrino. In sostanza, la sequenza è: input in ingresso (in forma alfanumerica), elaborazione del codice da parte dell'unità di governo, output in uscita (comandi impartiti alla macchina utensile). Riassumiamo che cosa ci occorre per poter gestire quel passaggio tra input in ingresso e output in uscita. Il programma rappresenta il nostro input; nel dettaglio, il programma contiene informazioni geometriche e tecnologiche che vengono lette ed interpretate dall'unità di governo (non va mai dimenticato che l'unità di governo è un'interprete delle informazioni: legge il codice e lo interpreta!). A valle dell'interpretazione del *part program*, l'unità di governo svolge il ruolo di controllo: in sostanza, invia i segnali alla macchina utensile, cioè impartisce comandi a tutti meccanismi che controllano i movimenti delle varie parti (e.g. mandrino, assi, tavole, ecc.) della macchina utensile. Ora, mentre i comandi vengono eseguiti, l'unità di governo, istante per istante, riceve delle informazioni da parte della macchina. Da chi riceve le citate informazioni? Dai trasduttori,

ovverosia dai sensori che ho inserito all'interno della macchina utensile e che di base trasferiscono informazioni sulla posizione degli assi. Per intenderci, ogni spostamento di asse è rilevato da un trasduttore di posizione; i segnali dei trasduttori vengono inviati all'unità di governo, che legge questi segnali, li elabora e, a valle della citata elaborazione, invia altri comandi (e.g. accelerazione, decelerazione, arresto, ecc.) alla macchina. L'elaborazione dei segnali prevede il calcolo della differenza tra la posizione nominale che si vuole raggiungere e la posizione attuale dell'asse. Per essere precisi, istante per istante il trasduttore di posizione invia all'unità di governo il segnale della posizione attuale. A titolo di esempio, supponiamo che una riga di codice del *part program* suggerisca uno spostamento dell'utensile verso un punto a coordinata $x=100$ e che un segnale proveniente dal trasduttore informi l'unità di governo che attualmente l'utensile si trova in un punto a $x=90$. La differenza (i.e. $100-90=10$) fra le ascisse dei due punti è quella che viene utilizzata dall'unità di governo per dire al motore di accelerare (oppure mantenere la sua velocità; oppure decelerare) per arrestarsi poi alla posizione finale a $x=100$. Entrando nel merito della questione, si consideri il seguente schema di controllo del singolo asse:

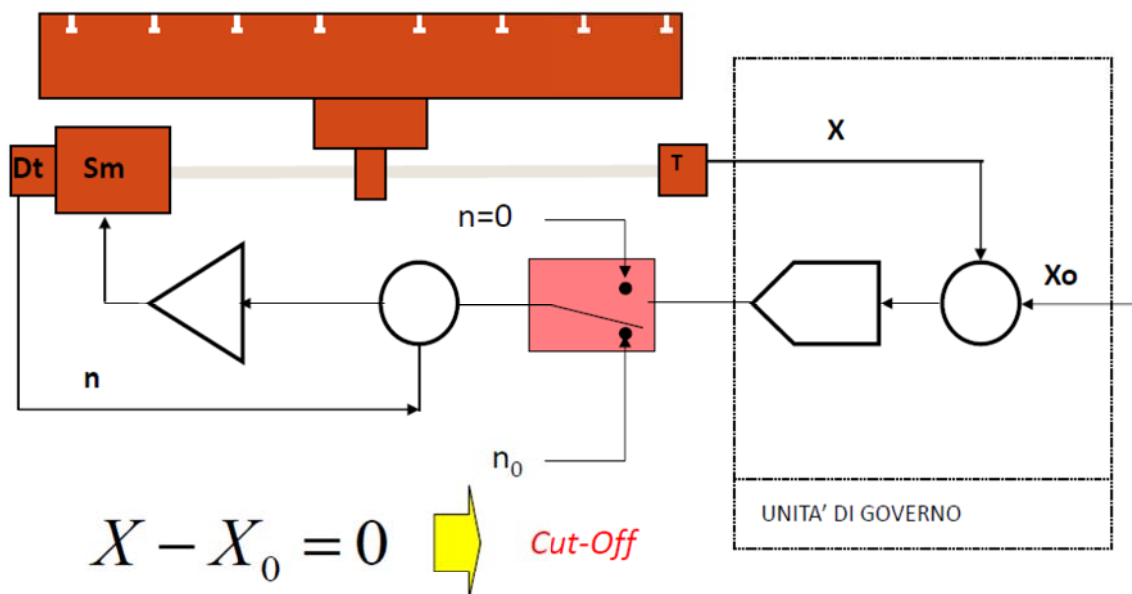


La tavola viene movimentata con un motore rotativo (i.e. il *servomotore* S_m). Poiché la tavola deve eseguire un movimento lineare, occorre disporre di un sistema di trasformazione del moto. È per questa ragione che il motore è collegato ad una vite, a sua volta collegata ad una chiocciola: la chiocciola non può ruotare per cui, quando la vite ruota, la chiocciola fa traslare la tavola. Nelle macchine tradizionali figura un classico sistema vite-madrevite con vite trapezia (vedremo che nelle macchine a controllo numerico si adotta una soluzione lievemente diversa, ma il concetto di fondo è sempre la trasformazione del moto da rotatorio a traslatorio; in sostanza, abbiamo comunque una vite e una chiocciola). Quella appena descritta è la parte strutturale della macchina utensile, con il suo azionamento. Sempre all'interno della macchina vado a collocare i trasduttori. In realtà vediamo due riquadri, che vogliono rappresentare il trasduttore di posizione e il trasduttore di velocità: tengo sotto controllo sia la posizione dell'asse che la velocità con cui l'asse si muove (ricevo un segnale sia di posizione dell'asse che di velocità dell'asse). Il segnale di posizione viene

inviato all'unità di governo e il segnale attuale viene confrontato con la posizione nominale da raggiungere, nel senso che viene calcolata la differenza fra la posizione nominale X_0 e la posizione attuale X . Questa differenza verrà utilizzata, tramite successive elaborazioni, per andare a comandare il servomotore (quindi il movimento dell'asse). In realtà, oltre a questo anello chiuso, che è il comando dell'unità di governo e la retroazione che arriva dalla macchina utensile (e che si chiude sulla posizione), c'è un secondo anello che si chiude sulla velocità (n rappresenta la velocità del motore). Nel dettaglio, l'informazione viene tradotta in comando al motore (l'idea è quella di considerare l'informazione rappresentata dalla differenza di posizione come una velocità n_0 secondo cui deve ruotare il motore). Questa velocità di rotazione, che arriva come comando dell'unità di governo, viene confrontata istante per istante con la velocità di rotazione n misurata effettivamente al motore. Quindi, se la velocità di rotazione misurata corrisponde a quella impartita dall'unità di governo, il motore continua ad andare in quelle condizioni; se la velocità di rotazione misurata è inferiore rispetto a quella impartita dall'unità di governo, ci sarà un'accelerazione; se la velocità di rotazione misurata è superiore rispetto a quella impartita dall'unità di governo, ci sarà una decelerazione. Si badi bene che l'anello di retroazione della velocità non si chiude sull'unità di governo (quindi non entra nell'unità di governo), ma viene semplicemente gestito dai PLC che controllano l'azionamento della macchina utensile. Approfondiremo la questione nelle lezioni successive. Quello che occorre ricordare adesso è che si tratta di un sistema di controllo chiuso, con doppio anello di retroazione (uno sulla posizione uno sulla velocità), perché teniamo sotto controllo sia la posizione sia la velocità di rotazione del motore. Prima di entrare nel merito della descrizione delle macchine a controllo numerico è bene formulare qualche cenno sulla classificazione dei sistemi di controllo. È stato appurato che il controllo numerico opera secondo uno schema chiuso con doppio anello di retroazione. Ora, il comando del motore può avvenire secondo due logiche:

- La prima è quella di tipo *proporzionale* (si tratta del tipo di controllo illustrato a pagina 26). In questo frangente, istante per istante l'unità di governo confronta la posizione attuale con quella nominale. Sulla base della differenza fra posizione nominale e posizione attuale, eseguendo delle amplificazioni di segnale secondo una logica di tipo proporzionale (i.e. moltiplicazione per una costante), il sistema di controllo va a comandare il servomotore. Orbene, in proporzione con la differenza fra posizione nominale e posizione attuale, arriverà una certa tensione di alimentazione al motore. Quanto descritto avviene istante per istante, cioè durante tutto il movimento dell'utensile per generare la geometria desiderata. In sintesi, un sistema di retroazione di tipo *proporzionale* è sempre attivo. Questo ci permette di controllare continuamente il movimento dell'utensile rispetto al pezzo. È per questa ragione che un controllo di tipo *proporzionale* si dice anche controllo *continuo*.
- Per macchine più semplici esiste un tipo di controllo differente, detto *cut-off*. A titolo di esempio, si pensi ad una semplice macchina di foratura (un trapano in sostanza) tramite il quale occorre eseguire dei fori secondo l'asse della punta ad elica (quindi ci

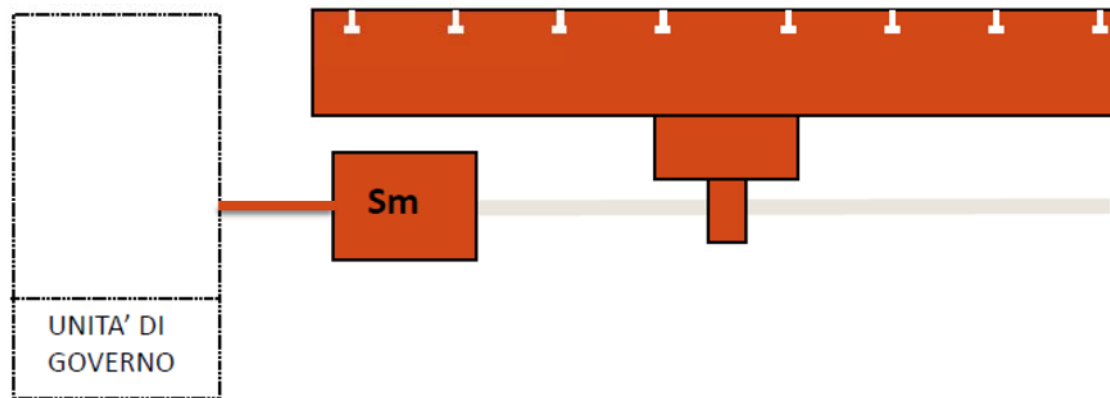
muoviamo lungo un unico asse). Si colloca il pezzo in corrispondenza della posizione del foro (oppure si sposta l'utensile per allinearsi all'asse del foro; questo dipende dalla macchina, cioè da come sono ottenuti i movimenti) e si opera semplicemente l'avanzamento della punta secondo il proprio asse. In questo caso, ai fini della lavorazione potremmo non essere interessati a controllare istante per istante il movimento della punta, nel senso che potremmo essere esclusivamente interessati al corretto raggiungimento della posizione finale (cioè ci interessa che la profondità del foro sia corretta). In sostanza, la punta è posizionata fuori dal pezzo nelle condizioni iniziali e ci interessa soltanto che essa si fermi quando la profondità del foro è quella desiderata. In questo caso il controllo è sempre chiuso, nel senso che istante per istante ricevo dalla macchina informazioni sulla posizione e sulla velocità (quindi questo aspetto rimane invariato rispetto alla logica proporzionale). Tuttavia, queste informazioni vengono tramutate in controllo dell'azionamento solo per definire l'arresto del movimento. In sostanza: arriva l'informazione, la punta è pronta, dò il comando di partire alla punta secondo una certa velocità di avanzamento, seguo il segnale del trasduttore (dunque controllo la posizione della punta) e, quando la punta è vicina alla posizione finale, mando il comando al motore di decelerare e fermarsi. In definitiva, non si tratta di un controllo *continuo* ma *cut-off*, nel senso che la differenza fra posizione nominale e posizione attuale viene tramutata in comando solo quando la differenza stessa raggiunge un certo valore soglia: quando la differenza fra posizione nominale e posizione attuale è prossima a 0, si attiva il comando di arresto del motore.



Naturalmente, entrambe le tipologie di controllo descritte devono garantire che la posizione finale sia raggiunta correttamente (cioè con precisione). Dopodiché, il controllo *continuo*, a differenza del controllo *cut-off*, verifica istante per istante che il movimento dell'utensile sia corretto (in sostanza segue tutto il percorso dell'utensile).

NOTA

In alcune macchine molto semplici (e.g. plotter, macchine che eseguono tracciature, macchine che eseguono lavorazioni con il laser) è possibile che si utilizzi uno schema di controllo aperto, cioè privo di anelli di retroazione:



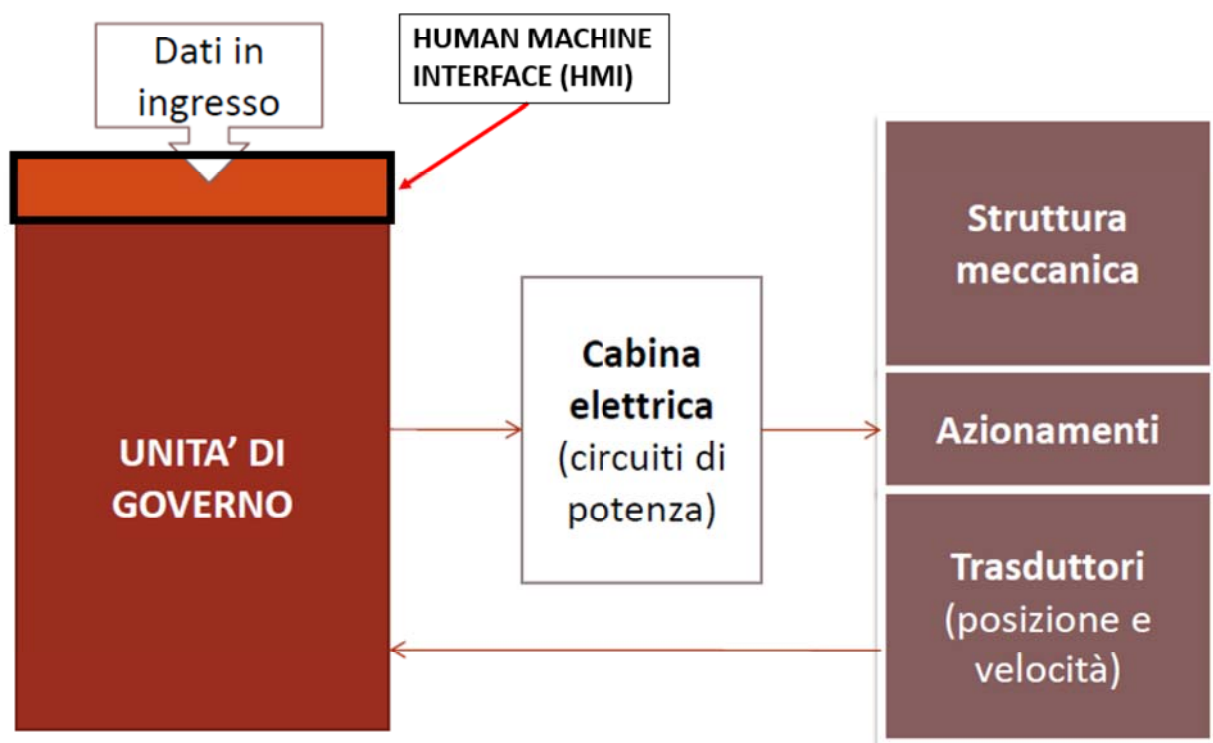
Le macchine che utilizzano un controllo di questo tipo prevedono come *servomotore* un particolare tipo di motore, detto *motore passo-passo*. Si tratta di un motore di modeste dimensioni, che non esercita grandi coppie e in cui peraltro la coppia cala bruscamente al diminuire della velocità di rotazione (quindi un motore di questo tipo non permette di compiere operazioni pesanti). Pur non offrendo grandi prestazioni, il motore passo-passo ha il pregio di essere estremamente preciso. Difatti, tale motore funziona ad impulsi: ogni volta che viene dato un impulso, il citato motore subisce una certa rotazione, che viene convertita in movimento lineare (in sintesi, la recezione del citato impulso causa un movimento molto preciso). Ecco perché uno schema di controllo aperto non prevede la presenza di sensori (*ci fidiamo che il movimento sia corretto e preciso*). Ci sono solo dei limiti sulle frequenze massime con cui comando gli impulsi, perché se il motore non coglie un impulso, l'operatore non se ne accorge.

ELEMENTI DI UNA MACCHINA UTENSILE A CONTROLLO NUMERICO

In una macchina utensile possono individuarsi due elementi fondamentali:

- La parte meccanica, cioè la macchina vera e propria (dove si lavora, per intenderci).
- L'unità di governo, cioè il computer di bordo.

In più c'è tutta una parte di componenti elettrici ed elettronici. All'interno della parte meccanica, oltre alla struttura (quindi l'insieme di basamento, bancale, montante) si ha tutto il sistema degli azionamenti (per azionamenti si intendono i motori, il sistema di controllo dei motori, cioè la parte di PLC, e tutta la parte di conversione del moto; in sostanza, per azionamenti si intende tutto ciò che riceve i comandi provenienti dall'unità di governo e fa muovere gli assi) e i trasduttori (di posizione e di velocità). In sostanza, gli azionamenti ricevono i comandi dall'unità di governo e i trasduttori inviano le informazioni istantanee di posizione e velocità all'unità di governo. Parliamo di parte meccanica anche se al suo interno rileviamo una certa componentistica elettronica. Ad ogni modo l'insieme di struttura meccanica, azionamenti e trasduttori va considerato separato rispetto all'unità di governo. Tutto è schematicamente riassunto nell'illustrazione seguente:



È interessante focalizzare l'attenzione sulla cosiddetta *human machine interface* (HMI), la quale rappresenta l'interfaccia dell'unità di governo con l'esterno: devo avere la possibilità di comunicare con la macchina utensile e questo è reso possibile dalla HMI. Difatti, se osserviamo una macchina a controllo numerico, possiamo rilevare la presenza di uno schermo video (che permette di visualizzare quello che sta facendo la macchina), una pulsantiera, delle porte USB (consentono di collegare una pen drive per il trasferimento di

dati). In sintesi, c'è una parte che permette uno scambio di informazioni con l'esterno (tipicamente con l'operatore; ecco perché si parla di *human machine interface*). Anche la citata interfaccia ha subito una significativa evoluzione nel corso degli ultimi anni. All'inizio erano presenti delle schede perforate, ragion per cui il grado di interazione era molto bassa. In seguito, si ha avuto il passaggio alle schermate tipo DOS (si tratta di un prompt in cui si inseriscono delle informazioni in modalità testuale) e progressivamente si è verificato il passaggio alla modalità grafica. Oltretutto, le interfacce citate sono sempre più sicure ed efficienti, nel senso che quando l'operatore utilizza una determinata interfaccia, viene messo nelle condizioni di non poter sbagliare (sono abilitati soltanto i comandi che possono servire all'operatore; ad esempio, i comandi preposti alle operazioni di manutenzione, che non servono all'operatore attivo sulla macchina, non vengono abilitati). *Domanda d'esame: quali sono gli elementi di base di una macchina a controllo numerico?*

CAMPI DI APPLICAZIONE

Come noto, la tecnologia del controllo numerico è nata in fresatura (1952, primo prototipo di fresatrice a controllo numerico; si trattava di una fresatrice a tre assi). Trattandosi di una tecnologia vincente, essa viene rapidamente estesa ad altri ambiti della produzione. Si diffondono rapidamente altre tipologie di macchine di taglio a controllo numerico (i.e. foratrici a controllo numerico, alesatrici a controllo numerico, torni a controllo numerico, rettificatrici a controllo numerico). Ma non solo. Difatti, questa tecnologia può essere estesa anche ad altri tipi di lavorazione, come tutta la parte del taglio delle lamiere oppure tutta la parte di realizzazione delle saldature. Si tenga a mente che nel Secondo Dopoguerra nascono le *lavorazioni non convenzionali* (macchine per l'elettroerosione, macchine per il taglio laser, macchine per il taglio a getto d'acqua): tali tecnologie maturano nello stesso periodo della tecnologia del controllo numerico, ragion per cui sono tutte implementate con il controllo numerico e non esiste una loro versione tradizionale. Successivamente, viene introdotta la robotica industriale. I robot sono arrivati un po' in ritardo rispetto alle macchine a controllo numerico, perché occorre disporre di soluzioni tecnologiche un po' più avanzate per riuscire a costruire strutture articolate, cioè strutture poco rigide ma che riescano ad eseguire operazioni con delle precisioni accettabili. Anche i robot (nascono per operazioni di manipolazione, cioè per afferrare oggetti e spostarli; dopodiché, vengono progressivamente utilizzati per altre applicazioni) sono controllati da un'unità di governo (quindi sono sistemi automatici). Infine, il controllo numerico entra anche nel settore del *controllo qualità*: anche la misura può quindi essere gestita con sistemi automatici (cioè sistemi controllati da un calcolatore). Detto ciò, parallelamente allo sviluppo delle macchine per diversi processi e diverse applicazioni, si sviluppano degli strumenti software per la programmazione di queste macchine. Per intenderci, inizialmente si faceva tutto a mano, nel senso che i codici visti prima (ricordiamo le righe di comando analizzate nelle pagine precedenti) venivano scritti a mano su un editor di testo. Tuttavia, si pensi che un semplice programma di lavorazione (e.g.

contornitura di una geometria non molto complessa) può richiedere anche 1000 righe di codice. In sostanza, i programmi in questione sono molto lunghi e articolati, cosicché il rischio di commettere errori è estremamente elevato. Ecco che appare più conveniente disporre di software di supporto. Per essere precisi, inizialmente nascono dei sistemi di verifica (essendo alto il rischio di commettere errori nella scrittura a mano dei codici) dei file scritti (si scrive il file e lo si passa al software, che controlla la correttezza della sintassi). In seguito nascono dei software di verifica sempre improntati allo stile classico della programmazione, ma basati sull'utilizzo di termini della lingua inglese e non di codici alfanumerici (quindi abbiamo una certa semplificazione della programmazione di questi software di verifica degli errori): il software esegue la verifica del programma (scritto con termini tratti dalla lingua inglese) e lo traduce in linguaggio alfanumerico (questo semplifica notevolmente la programmazione). Progressivamente si evolve verso software sempre più *user-friendly*, sempre più ricchi di dati al loro interno e sempre più semplici da utilizzare. Si arriva dunque ai sistemi CAM (*Computer Aided Manufacturing*), che sono ormai software di tipo grafico. Tali software consentono di caricare geometrie disegnate con software CAD, dopodiché, all'interno del software CAM, abbiamo tutta una serie di informazioni tecnologiche che possiamo associare. A titolo di esempio, un software CAM è dotato di una libreria di utensili e per ogni utensile ha associati tutti i parametri di taglio. Quindi, chi utilizza il software va ad indicare il tipo di lavorazione (e.g. spianatura) da realizzare su una certa superficie; il software suggerisce l'utensile da utilizzare, dopodiché suggerisce dei parametri di taglio (che l'utente può accettare o modificare). È così che piano piano costruisco graficamente il ciclo di lavorazione: sarà poi il software a trasformare quanto implementato graficamente nel linguaggio alfanumerico da caricare sulla macchina a controllo numerico. Peraltro, i software attuali possono anche eseguire delle simulazioni grafiche tridimensionali per mostrare l'utensile mentre asporta materiale dal pezzo lavorato, per verificare eventuali collisioni fra utensile e porta-utensile (se rileva una collisione, il software manda un messaggio di allerta), ecc. Quanto detto in questo paragrafo è sinteticamente riassunto di seguito:

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

Alcuni campi di applicazione sono:

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

VANTAGGI E LIMITI DEL CONTROLLO NUMERICO

Di seguito sono elencati i vantaggi offerti dalla tecnologia del controllo numerico:

- Flessibilità della struttura produttiva. È sufficiente cambiare il *part program* caricato nell'unità di governo per cambiare il tipo di lavorazione eseguita.
- Ripetibilità. Una macchina a controllo numerico esegue sempre lo stesso programma (i.e. il *part program* caricato nell'unità di governo che le compete) e sempre allo stesso modo.
- Una macchina a controllo numerico è configurata in modo da andare a velocità di lavorazione molto più elevate rispetto alle macchine tradizionali. Non a caso oggi si parla di lavorazioni ad alte prestazioni o alte velocità. Si pensi che la velocità di rotazione del mandrino può superare i 30000-40000 giri/min mentre le macchine tradizionali arrivano a 4000-5000 giri/min.
- Elevata qualità del prodotto. Urge una precisazione: in tecnologia si parla di qualità intendendo che sono rispettati i requisiti di prodotto. In sostanza, non ci interessa che le rugosità o le tolleranze rispettate dal pezzo siano dell'ordine del centesimo di micron ma semplicemente che il pezzo obbedisca ai requisiti funzionali per i quali è stato progettato. Se questi vengono rispettati il pezzo è considerato *di qualità* (se li rispettiamo di più abbiamo semplicemente perso tempo e soldi).
- Riduzione degli scarti.
- Riduzione dei costi diretti di manodopera e attrezzature.
- Più operazioni con singolo setup e minore tempo per riposizionamenti.
- Non si necessita di personale altamente specializzato come quello che invece richiede il controllo diretto di una macchina tradizionale (programmare una moderna macchina a controllo numerico rispetto a gestire una macchina tradizionale).
- Ottimizzazione del layout aziendale.
- Lavoro non presidiato, nel senso che anche una sola persona può controllare più macchine.

I limiti del controllo numerico sono invece i seguenti:

- Elevato costo iniziale. Il concetto di fondo da sottolineare è che in ambito aziendale la decisione di adottare o meno una certa tecnologia, di fare o meno innovazione è profondamente legata ai costi. Questo perché dalla produzione occorre trarre guadagno e se ciò non avviene l'azienda non sopravvive. Si pensi che il costo di una macchina a controllo numerico semplice (e.g. fresatrice a tre assi) si aggira intorno a 100000 euro; macchine a controllo numerico più complesse (ad alte prestazioni) hanno costi che oscillano tra 350000 e 400000 euro. Tale cifre vanno inquadrare come investimento sostenuto dall'azienda. Tipicamente, si assume un periodo di ammortamento (i.e. di recupero dell'investimento) pari a 10 anni (quindi, si va dai 10000 euro/anno ai 35000-40000 euro/anno).

- Al costo legato all'acquisto della macchina occorre sommare i costi legati alla manutenzione (su una macchina da 100000 euro si considera tipicamente un costo di manutenzione di 50000 euro spalmati su 10 anni; questa cifra aumenta chiaramente quando si parla di macchine più sofisticate). La manutenzione di una macchina a controllo numerico è più delicata rispetto a quelle tradizionali (in quanto la componente elettronica è abbondante).
- Occorre prevedere gli aggiornamenti del sistema di controllo della macchina. Questo perché, mentre la parte meccanica è più o meno stabile nel corso degli anni, la parte del controllo (e.g. dell'interfaccia uomo-macchina) è in continua evoluzione. Per questa ragione occorre pianificare degli upgrade periodici (ogni tot anni). Il consumo energetico, invece, non è molto elevato.

CLASSIFICAZIONE DELLE MACCHINE A CONTROLLO NUMERICO

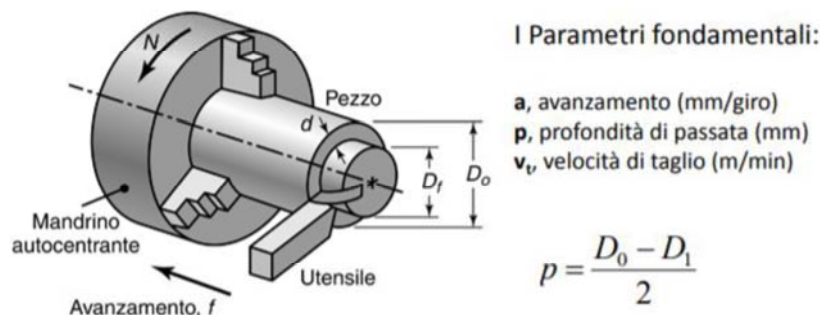
L'applicazione del *controllo numerico* avviene su macchine utensili appositamente realizzate. Ora, le macchine a controllo numerico possono essere classificate in due macro-categorie:

- *Macchine monoscopo*. Una macchina a controllo numerico monoscopo è in grado di eseguire un solo tipo di lavorazione (e.g. fresatrice a controllo numerico; tornio a controllo numerico; alesatrice a controllo numerico).
- *Macchine multiscopo o centri di lavorazione*. Si badi bene che i *centri di lavorazione* non rappresentano la totalità delle macchine a controllo a numerico, in quanto rappresentano quella categoria di macchine a controllo numerico che possono compiere operazioni diverse all'interno della stessa macchina. A titolo di esempio, un tornio che è in grado di eseguire anche operazioni di fresatura rappresenta un *centro di lavorazione di tornitura*. Altro esempio è rappresentato da fresatrici che possono eseguire forature oppure macchine per lavorazioni di superfici complesse che vengono poi utilizzate per la realizzazione di superfici assialsimmetriche (si pensi alla realizzazione di una filettatura tramite una fresatrice). Il vantaggio di utilizzare un centro di lavorazione è la possibilità di eseguire operazioni diverse senza dover cambiare macchina utensile: per un certo tipo di operazioni non devo smontare il pezzo dalla macchina, trasferirlo in un'altra stazione di lavoro, eseguirne nuovamente il posizionamento e cominciare una nuova lavorazione. Difatti, occuperei due macchine per la realizzazione di un certo tipo di prodotto; peraltro, dovrei considerare i tempi di trasferimento da una macchina all'altra, che sono notoriamente tempi improduttivi, e, gravissimo, occorre smontare e rimontare il pezzo, il che implica la perdita degli allineamenti con conseguente introduzione di errori in lavorazione: eseguire tutte le operazioni sulla stessa macchina e con lo stesso bloccaggio del pezzo implica certamente una maggiore precisione della lavorazione.

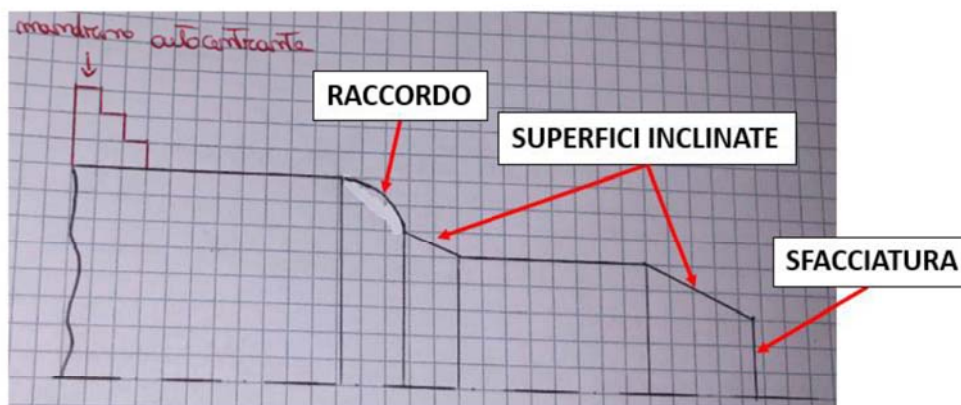
Detto ciò, esistono altre possibili modalità di classificazione di una macchina a controllo numerico:

- Macchine orizzontali (il mandrino è orizzontale; quindi l'asse dell'utensile è orizzontale) e macchine verticali (il mandrino è verticale; quindi l'asse dell'utensile è verticale).
- Macchine dotate di testa operatrice a due posizioni (e.g. macchina universale in cui il mandrino può essere posizionato orizzontale e verticale).
- Macchine con testa operatrice (collegata chiaramente al mandrino) inclinabile in modo discreto o continuo entro una certa angolazione. Sia nel caso di macchina con testa operatrice a due posizioni, sia nel caso di macchina con testa operatrice inclinabile, si tratta di macchine dotate di ulteriori assi.
- Macchine con cambio automatico dell'utensile.
- Macchine con tavole girevoli ad asse verticale o orizzontale.
- Macchine con controllo su 2, 2 e mezzo, 3, 4, 5 e più assi.

La classificazione in base al numero di assi controllati è la più importante tra quelle elencate in questa pagina. Con la dicitura *assi controllati* si intendono gli assi che possono essere controllati contemporaneamente dall'unità di governo. Per intenderci, quando si parla di macchina a controllo numerico a due assi, si intende una macchina tale per cui l'unità di governo può controllare contemporaneamente due assi. Un esempio è rappresentato dal tornio parallelo a controllo numerico, in cui l'unità di governo può controllare contemporaneamente gli assi x e z. Ricordiamo lo schema di un'operazione di tornitura:



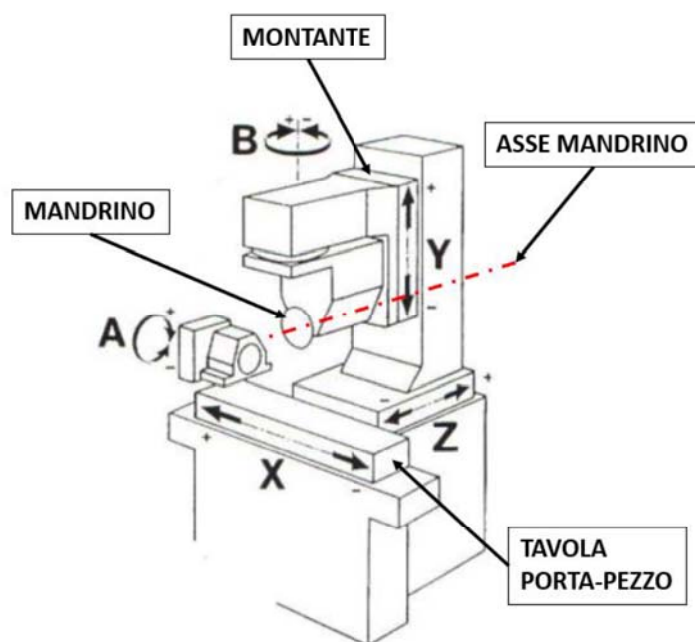
Si consideri il seguente profilo di tornitura:



Il profilo di tornitura riportato alla pagina precedente è caratterizzato da una serie di riduzioni di diametro (vengono realizzate tramite un'operazione di tornitura cilindrica esterna), da una sfacciatura, da una porzione di profilo curvilinea (si osserva la presenza di un raccordo) e da due superfici inclinate. Un profilo di tornitura siffatto potrebbe anche essere realizzato tramite un tornio parallelo tradizionale (quindi controllando manualmente l'avanzamento della torretta e ruotandola, per quel che riguarda le superfici inclinate; per quanto concerne la porzione di profilo raccordata occorre sfruttare degli utensili di forma, altrimenti non riesco a realizzarla). Tuttavia, sfruttando un tornio a controllo numerico è possibile muovere in contemporanea i due assi x , z e far seguire, sfruttando un unico utensile, un qualsivoglia percorso di interpolazione nel piano. In sostanza, senza cambiare l'utensile, su un tornio a controllo numerico riesco ad eseguire il profilo sotto esame, mentre in un tornio parallelo tradizionale la realizzazione del citato profilo risulterebbe più complessa (possibile, ma più complessa; come detto prima, per le superfici inclinate occorre ruotare la torretta e per la porzione raccordata vanno sfruttati degli utensili di forma).

DENOMINAZIONE DEGLI ASSI MACCHINA

Urge una premessa. Gli assi macchina vengono designati secondo normativa (nel mondo industriale le normative sono essenziali; senza le normative le tecnologie non si diffondono, in quanto altrimenti non possono essere accettate). Alle macchine utensili sono riversate diverse norme: la denominazione degli assi macchina è definita nelle norme EIA RS-267-A conformi alla UNI ISO 841. Nell'ambito del controllo numerico, il numero di assi (che sono chiaramente controllati) di una macchina utensile può arrivare fino a 5. Nel dettaglio, gli assi di traslazione sono 3 e vengono indicati con x, y, z. Si badi bene che l'asse z è quello attorno al quale si verifica la rotazione del mandrino. Detto ciò, la rotazione dell'utensile (e, quindi, del mandrino) non è conteggiata tra gli assi macchina. Pertanto, quando si parla di asse z si intende la direzione indicata dalla rotazione del mandrino. Proseguendo, le direzioni x e y definiscono il piano perpendicolare all'asse z: la normativa stabilisce che l'asse x corrisponde all'asse contraddistinto da corsa più lunga, mentre l'asse y è l'asse con la corsa più breve. Oltre a definire le direzioni degli assi macchina, è importante stabilirne anche i versi positivi. Il verso positivo dell'asse z è individuato dal movimento dell'utensile che si allontana dal pezzo. Per comprendere il concetto, si consideri lo schema seguente:



Si evince chiaramente che il mandrino ha asse orizzontale. Il montante può traslare secondo la direzione che definisce l'asse di rotazione del mandrino (i.e. asse z); inoltre, esso (il montante) può traslare secondo la direzione y. La tavola porta-pezzo, invece, può traslare secondo la direzione x (corsa più lunga rispetto a y). Nell'illustrazione sono anche riportati i versi positivi di ciascun asse (ricordiamo che il verso positivo è quello per cui ci si allontana dal pezzo): il verso positivo dell'asse z è quello per cui ci si sposta verso il retro della macchina; il verso positivo dell'asse y è quello che procede verso l'alto (quando la testa operatrice si alza, essa si allontana dal pezzo); infine, il verso positivo dell'asse x si definisce banalmente ricorrendo alla regola della mano destra. Ai tre assi macchina di traslazione possono

aggiungersi i tre assi macchina di rotazioni. Si badi bene che è possibile avere, al più, due assi macchina di rotazione (nel caso di 4 assi macchina, si ha la rotazione intorno a uno degli assi coordinati; nel caso di 5 assi macchina, si ha la rotazione intorno a due degli assi coordinati). La normativa stabilisce che la rotazione intorno a x sia indicata con a ; la rotazione intorno a y è indicata con b ; la rotazione intorno a z è indicata con c . Per quale ragione non si ammette anche un sesto asse macchina? La circostanza secondo cui non è previsto un sesto asse macchina non è legata all'impossibilità di implementare una macchina utensile con sei assi macchina, bensì alla difficoltà di gestire un numero di assi macchina superiore a 5 da parte dell'unità di governo. Il rischio è di compromettere il livello di precisione e ripetibilità offerto dalla macchina utensile a controllo numerico (questo perché, prevedendo un numero di assi superiore a 5, abbiamo aumentato le flessibilità di movimentazione). Ad ogni modo, un numero di assi macchina pari a 5 è più che sufficiente. Quando si va oltre i 5 assi macchina? Quando si passa a sistemi automatici di minor precisione, cioè ai robot industriali. In sostanza, nelle macchine utensili abbiamo un numero massimo di assi macchina pari a 5, mentre nei robot industriali si hanno 6 assi macchina. In realtà, qualche costruttore di macchine utensili aggiunge assi ulteriori rispetto ai 5 di base. La particolarità è che gli assi aggiuntivi sono ridondanti. Per intenderci, è possibile avere una macchina utensile in cui si ha la tavola porta-pezzo che può traslare lungo la direzione x , dopodiché permetto anche all'utensile di traslare lungo l'asse x : in questo caso è possibile scegliere se far traslare la tavola porta-pezzo o l'utensile. Per gli assi ridondanti si utilizzano tipicamente le lettere u , v , w . Va sottolineato che raramente si prevede la presenza di assi ridondanti; questo perché la presenza di meccanismi secondari rendono la programmazione di queste macchine estremamente complicata (ricordiamo che la gestione degli assi è garantita da un software), ragion per cui è preferibile rendere univoca la scelta di un asse e non duplice (o addirittura triplice). In sostanza, gli assi ridondanti vengono tipicamente evitati perché incrementano il numero di variabili di movimentazione e rendono troppo complicata la programmazione della macchina utensile (che è già complicata di per sé), senza offrire un grosso valore aggiunto dal punto di vista delle lavorazioni. Torniamo a noi. In base al numero di assi macchina possiamo avere:

- Macchine a due assi macchina. È il caso dei torni, per i quali gli assi macchina sono x (direzione radiale) e z (ricordiamo che l'asse z corrisponde alla direzione intorno alla quale ruota il mandrino). In sostanza, poiché in tornitura si realizzano superfici assialsimmetriche, si lavora sul profilo piano, che poi viene proiettato dalla rotazione del pezzo.
- Macchine con tre assi macchina di traslazione (x , y e z), che vengono classificati come macchine a due assi e mezzo o tre a seconda del numero di assi effettivamente controllati. Qual è la differenza tra una macchina a 3 assi e una macchina a 2 assi e mezzo? In una macchina a 2 assi e mezzo l'unità di governo è in grado di gestire in simultanea solo due degli assi macchina (e.g. x e y oppure x e z oppure y e z), mentre il terzo viene soltanto posizionato (perché l'unità di governo non è in grado di gestire