

POLITECNICO DI TORINO - PROFESSORESSA ARIANNA ALFIERI

# ANALISI E GESTIONE DEI SISTEMI PRODUTTIVI

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Autrice: Lombardo Martina

## Sommario

LEZIONE 1 – INTRODUZIONE .....	3
Che cos'è un sistema di produzione?.....	3
Tipologie di legame che possono avere le strutture.....	4
Sistemi ad approccio a struttura operativa.....	6
LEZIONE 2 – CONTINUAZIONE .....	9
Multiprodotto .....	16
LEZIONE 3 – CONCLUSIONE DELLE STRUTTURE OPERATIVE.....	19
METODI QUANTITATIVI PER LA MODELLAZIONE E L'ANALISI DEI SISTEMI.....	24
Metodo analitico – modello esatto .....	25
LEZIONE 4 – LEGGE DI LITTLE E MODELLI .....	28
LEZIONE 5 – SISTEMI CON VARIABILITA' .....	39
Sistemi aperti.....	41
Modelli a grafo degli stati (del sistema).....	42
LEZIONE 6 – CATENE DI MARKOV .....	48
Sistemi a buffer $\infty$ .....	50
$M/M/1$ .....	50
$M/M/m$ .....	52
Serventi paralleli non identici .....	55
$M/M/2/5$ .....	55
LEZIONE 7 – SERVENTI PARALLELI NON IDENTICI .....	57
$M/M/2/4$ .....	57
Sistema con singolo serve e job diversi .....	59
Uso della distribuzione esponenziale per approssimare i tempi.....	59
Approssimazioni analitiche: approssimazioni singolo servente .....	65
Approssimazione P-K (Pollaczek and Khintchine) .....	65
Approssimazione di Kingman (equazione VUT).....	66
LEZIONE 8 – VARIABILITA' DEL TEMPO DI ELABORAZIONE .....	67
Continuazione delle approssimazioni.....	67
Approssimazione $G/G/c$ .....	68
Approssimazione Mopp-Spearman .....	70
Variabilità tempi di processo .....	71
Fonti di variabilità .....	72
Variabilità naturale .....	73
Guasti.....	73
Approssimazione guasti Hopp-Spearman .....	76

LEZIONE 9 – GUASTI, SISTEMI MULTISTADIO .....	78
Interazione uomo – macchina .....	79
Modelli di fabbrica monoprodotto a più stadi.....	82
Linea .....	82
LEZIONE 10 – ALTRI MODELLI DI FABBRICA MONOPRODOTTO A PIU’ STADI .....	85
Sistemi Merge .....	87
Sistemi Split .....	89
Reti di topologia generale.....	91
LEZIONE 11 – RETI GENERALI MONOPRODOTTO .....	93
Modelli di fabbrica di più prodotti.....	98
LEZIONE 12 – SISTEMI MULTIPRODOTTO .....	100
Tempi di servizio .....	101
Coefficiente di variazione in ingresso .....	102
Misure di performance .....	103
LEZIONE 13 – RETI GENERALI MULTIPRODOTTO .....	107
Group Technology e Cellular Manufacturing .....	111
Confronto sistema tradizionale vs GT/CM .....	112
LEZIONE 14 – GROUP TECHNOLOGY.....	114
LEZIONE 15 – MODELLI DI PROCESSI A LOTTI (BATCHING) .....	122
Lotti di trasferimento (move batch).....	123
LEZIONE 16 – SISTEMI A LOTTI.....	129
Serial Batch .....	131
Lotto di processo parallelo .....	135
LEZIONE 17 – SIMULAZIONE.....	139
Simulazione appendice del testo.....	149
Simulazioni basate su eventi.....	149
LEZIONE 18 – FASI DELLA SIMULAZIONE .....	151
LEZIONE 19 – SOSTENIBILITA’ .....	158
LEZIONE 20 – PRINCIPI DI PRODUZIONE SOSTENIBILE .....	166

# LEZIONE 1 – INTRODUZIONE

Oggi iniziamo il corso che avrà assonanze con Programmazione e Controllo della Produzione (PCP) della Triennale. Non lasciate stratificare i dubbi, perché gli argomenti sono collegati.

## Programma

1. Strutture operative
  - Albero prodotto
  - Sequenza di lavoro
  - Layout di processo
2. Metodi quantitativi per la modellazione e l'analisi dei sistemi
  - Metodi esatti ed approssimati basati su reti di code
  - Cenni di simulazione ad eventi discreti
3. Sostenibilità (da definire)
  - Concetti base
  - LCA
  - Sostenibilità di processo

Per il primo punto il testo di riferimento è Villa A., “Analisi dei sistemi di produzione industriali”, CLUT, 2006. Per il secondo punto il testo di riferimento è Curry G.L., Feldman, R.M., “Manufacturing Systems Modeling and Analysis”, Springer, 2011. L'ultima parte invece avrà delle slide e degli articoli che saranno caricati sul portale.

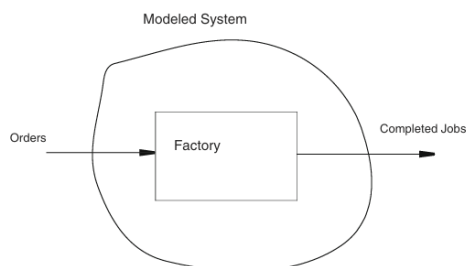
## Modalità dell'esame

Durata pari a 1.5/2 ore.

Contenuto: soluzione di esercizi numerici, domande aperte sugli aspetti teorici (qualitativi e quantitativi), domande a risposta multipla sia su aspetti teorici sia su casi numerici. Durante l'esame scritto non è possibile consultare alcun supporto (dispense, testi, etc.) ma verrà fornito un formulario. Il formulario sarà di tipo cieco.

## Che cos'è un sistema di produzione?

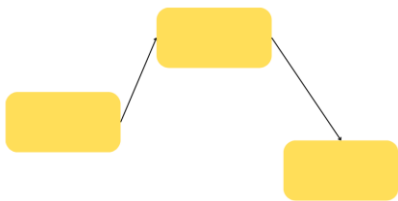
Un sistema di produzione è assimilabile a una scatola nera in cui entrano degli input ed escono degli output. Quindi possiamo dire che è un *processo di trasformazione* in cui gli input sono generalmente materie prime o semilavorati e gli output sono prodotti finiti o semilavorati. A seconda di cosa e come viene trasformato ho sistemi di produzione diversi.



Cosa c'è dentro la scatola nera non sarà di nostro interesse, non vedremo oltre il layout, infatti diremo “a macchina singola o no”. Non ci interesserà la tecnologia, quindi cosa fa esattamente la linea (se avremo torni o fresatrici), ma per noi le operazioni verranno rappresentate semplicemente dalle caratteristiche temporali e se è indeterministico, come questo tempo è variabile. Quindi ci interessa come sono disposte, legate le risorse, ovvero la *disposizione reciproca* tra le macchine. Non ci interessa come sono disposte fisicamente le macchine all'interno di un impianto. Noi, per esempio, disegniamo una linea in questo modo:



Ma magari fisicamente il layout è così



Noi ci focalizziamo sulla modellazione dei sistemi per avere delle **misure di performance aggregate** tipo: WIP, Tempo di attesa, quanti ordini saranno insoddisfatti. Queste misure servono per **fare strategia**, per fare concorrenza e per cercare di catturare una certa percentuale di clienti. Le strategie vengono fatte partendo da come sono fatti i sistemi produttivi.

### Tipologie di legame che possono avere le strutture

- A singola stazione o singolo centro: non diciamo “a singola macchina” perché possiamo avere macchine in parallelo. C'è un processo di allocazione, quindi, quando arriva materia prima da lavorare questo andrà sulla macchina in alto o su quella in basso. Su una delle due, no su entrambe.

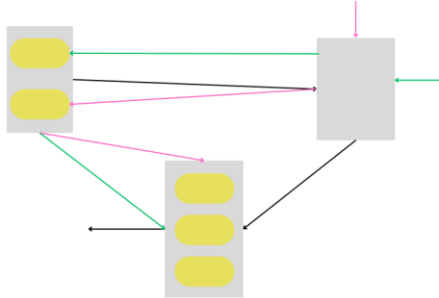


- Linea: un layout così si chiama **per prodotto** e si usa quando avete *poche varianti* in volumi molto alti. Perché? Perché le varianti potrebbero richiedere dei setup. Di solito sono ad *alto intensità di capitale* in quanto ci sono i nastri trasportati che costano parecchio. Ognuna di queste scatole può essere composta da un parallelo di risorse, ovvero il prodotto va in una delle due macchine gialle. Di solito le varianti sono simili da non richiedere setup o i setup sono mascherabili.

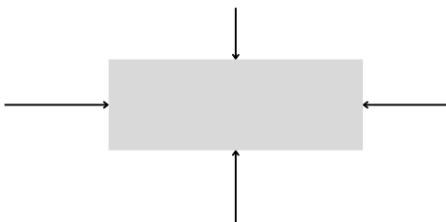
**Una linea è quando le varie stazioni sono collegate da un flusso unidirezionale.**



- A processo: si ha quando ci sono *tante varianti* ma *bassi volumi*. Quindi ogni prodotto deve poter attraversare le stazioni in modo diverso. Avremo delle stazioni in cui vi possono essere dei paralleli. Anche in questo caso avremo un input e un output, ma gli input verranno processati in maniera diversa. In questa configurazione, le configurazioni sono molto differenti e solitamente avete problemi di scheduling e di setup, perché le varianti sono diverse.

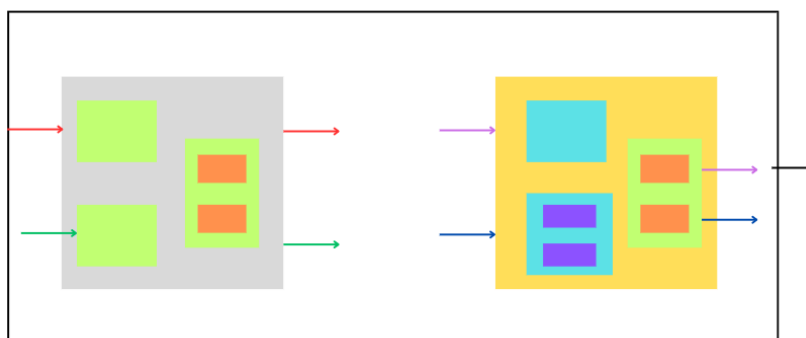


- A prodotto fisso: è quello usato per assemblare un aereo, una nave o una diga. È un luogo fisico, un'area di lavoro, in cui sono portate attrezzature di lavorazione e materie prime per costruire il prodotto. Questi prodotti richiedono tutte le tecniche della **gestione dei progetti** (corso del primo semestre del secondo anno).

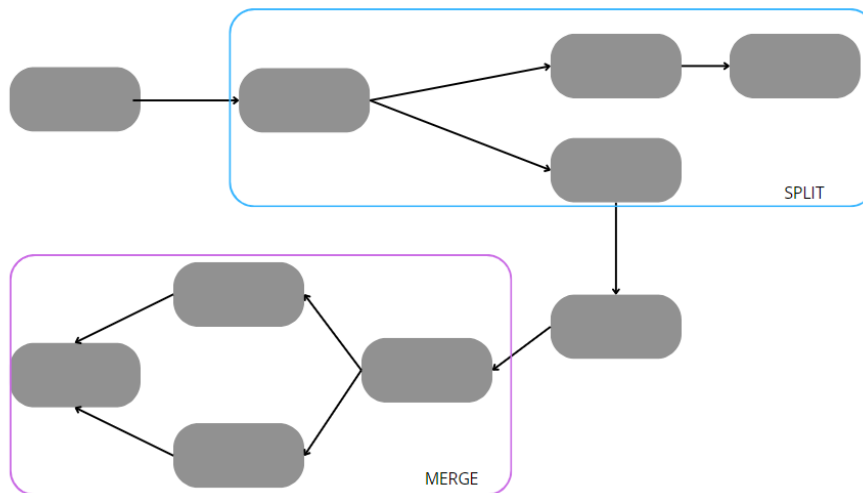


- A celle: dentro ogni cella ho flussi di prodotti diversi, solitamente ho layout a prodotto. Il nostro sistema è l'insieme di tutte le celle. Si può usare quando i **prodotti** si possono separare *in famiglie* e le **risorse in celle**. In questo caso, devo valutare quante celle fare o se mantenere il processo originale oppure duplicare le risorse. Quello disegnato si chiama **Group technology** o **Cellular manufacturing**.

**Più ho celle separate le une dalle altre, più devo duplicare le risorse ma mi semplifico il flusso. Più tengo celle miste, più ho risparmio in termini di risorse ma ho flussi più complicati.** Ma come sposto i flussi? Quali sono le attrezzature di movimentazione dei flussi? Devo valutare l'alternativa della Group technology.



In realtà, nel mondo fisico, questi layout sono usati insieme: non useremo solo linee o solo a processo, infatti un esempio è (processo dalla topologia più svariata):



Gli SPLIT e i MERGE sono diversi da disassemblaggio e assemblaggio.

Noi vedremo questi processi come delle **code**, strutture in cui abbiamo formalmente un servente (o più serventi) ed eventi in attesa di essere serviti, infatti useremo dei buffer. Quindi vedremo le **reti di produzione**, dove i processi sono le stazioni perché sono caratterizzate dal loro tempo. Quando parliamo di produzione, noi abbiamo due tipi di sistemi:

- Discreti come la produzione di vestiti e macchine e qui possiamo parallelizzare
- Continui come la produzione di benzina ed olio (settore alimentare), i quali seguono un processo che è difficile frazionare. Avrete volumi che passano da uno stadio all'altro e che danno un valore aggiunto (per esempio con la cottura). Quindi non possiamo usare le code.

Noi ci focalizzeremo sui Discreti e faremo simulazione su questo. La simulazione imita il comportamento del sistema, ma noi metteremo in una formula i dati in entrata per avere l'output (per esempio, i tempi medi, le deviazioni standard, i coefficienti di variazione per avere il WIP, il Throughput, il tempo di attraversamento del sistema). Le approssimazioni tengono fino a che sono vicine al sistema a cui le applichiamo e dopo un po' non funzionano bene per i sistemi che sono molto lontani da esse (sono diversi da quello di riferimento per l'approssimazione). Partiamo con sistemi semplici, **processi Markoviani**, che in realtà non esistono. Quindi useremo approcci statistici.

### Sistemi ad approccio a struttura operativa

Scopriremo da dove nasce il layout concettuale, quindi come con matrici e grafi arriviamo a quegli schemi (quello che abbiamo rappresentato prima). Chi si occupa di queste cose, sa che tutta l'azienda deve avere un modello generale che è composta da tre parti: