



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Processi industriali

Automazione

Alessandro De Luca

Sistema di produzione automatizzato

Un **sistema di produzione automatizzato** è composto da

- **un processo produttivo (di natura industriale)**
 - ➔ combinazione di operazioni (movimentazioni, lavorazioni meccaniche) e trasformazioni fisico/chimiche (flussi di massa o energia, reazioni chimiche) che permettono di ottenere un prodotto finito da materie prime
- **un sistema di controllo**
 - ➔ un dispositivo (o un insieme di dispositivi interconnessi) che scambia informazioni e azioni con il processo per modificarne il comportamento (in modo desiderato) —senza o con ridotto intervento umano

Un **impianto** industriale è composto da

- **macchinari, strutture, edifici e componenti di varia natura finalizzati alla realizzazione di un processo produttivo**

N.B. nella pratica c'è spesso qualche confusione di terminologia

- processo ~ impianto, calcolatore o elettronica ~ sistema di controllo, software ~ funzioni di controllo, sensore ~ trasduttore, ...

Esempi di processi produttivi

- processo di produzione di energia
 - ➔ materie prime: combustibile fossile, ossigeno
 - ➔ prodotto finito: energia elettrica
- processo di produzione di vernici
 - ➔ materie prime: resine, coloranti, acqua, additivi (in mix opportuni)
 - ➔ prodotto finito: vernice
- processo di lavorazione di parti di motori
 - ➔ materie prime: pezzo metallico grezzo
 - ➔ prodotto finito: testata del motore
- processo di assemblaggio
 - ➔ materie prime: componenti elementari (da 1 a n)
 - ➔ prodotto finito: prodotto assemblato

Esempi di impianti industriali

- impianto di produzione di energia
 - ➔ tubature, caldaia, turbine, bruciatori, pompe, valvole, camini, edifici di sostegno e di contenimento, sensori, ...
- impianto di produzione di vernici
 - ➔ reattori (dove avvengono le reazioni principali), miscelatori, riscaldatori, tubature, pompe, valvole, edificio di sostegno e di contenimento, sensori, ...
- impianto di lavorazione di parti di motori
 - ➔ macchina con mandrini per la meccanica (fresatura, foratura, ...), sistema di controllo numerico (posizionamento corretto dell'utensile del mandrino), dispositivo di cambio utensile automatico, protezioni, sistemi di scarico trucioli,...
- impianti di assemblaggio
 - ➔ centri di lavoro, celle di assemblaggio, magazzini dei componenti e dei prodotti finiti, sistemi di confezionamento e imballaggio, nastri trasportatori, manipolatori robotici, ...

Il **sistema di controllo** interagisce con il processo attraverso

- **dispositivi per acquisire misure dello stato del processo**
 - ➔ **sensori** di variabili fisiche (meccaniche, elettriche, termiche, ...)
 - ➔ **trasduttori** che convertono l'informazione in un segnale di natura differente (tipicamente elettrica), seguiti da un condizionamento opportuno (amplificare il livello, filtrare il rumore, ...)
- **dispositivi che trasmettono comandi al processo**
 - ➔ **attuatori** che modificano il valore di variabili di controllo del processo per influenzarne lo stato
 - ➔ preceduti da conversione delle informazioni di controllo in variabili fisiche e relativa **amplificazione** fino alla necessaria potenza
- **dispositivi di elaborazione** delle informazioni (secondo algoritmi opportuni) e di **interfaccia** con operatori umani (o livelli superiori)

la **strumentazione** può essere spesso inglobata nel processo fisico e costituirne quindi l'interfaccia con il sistema di controllo

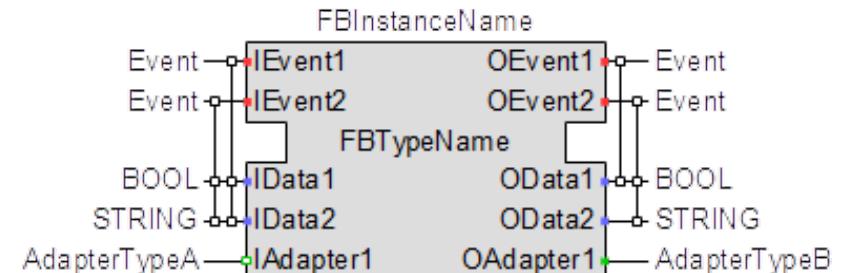
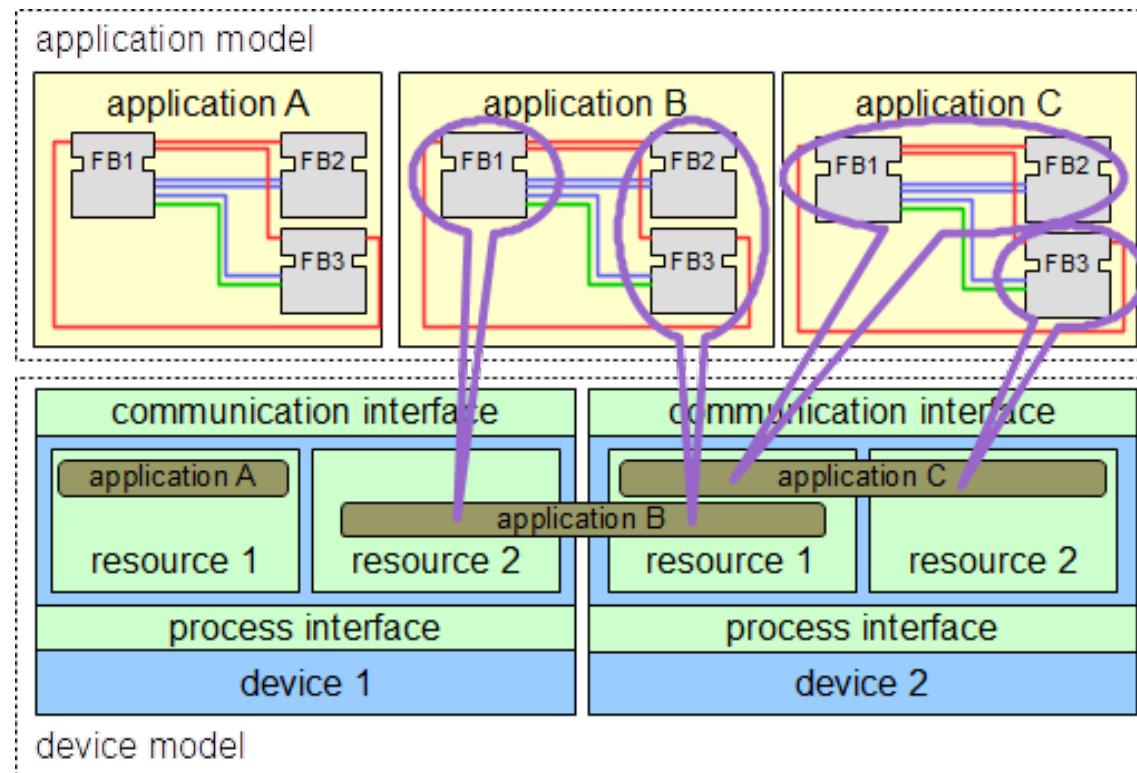
Sistema di controllo di processo

Un moderno sistema di controllo e misura di un processo industriale (normato dallo standard **IEC 61131**, completato da **IEC 61499** sui sistemi di controllo distribuiti)

- è un sistema informatico (per il trattamento delle informazioni) che elabora e applica **algoritmi di controllo**
- è costituito da **dispositivi** interconnessi tramite **reti** di comunicazione
- i dispositivi fisici realizzano tramite HW/SW una o più funzionalità, dette anche **applicazioni**
- le applicazioni possono risiedere su uno o più dispositivi (distribuite)
- i dispositivi hanno a disposizione **risorse** e **interfacce** (verso il processo o verso la rete di comunicazione)
- le risorse sono entità SW che eseguono dei programmi applicativi, accettando, elaborando e restituendo **dati e/o eventi** da/verso il processo e la rete
- in una risorsa sono presenti
 - ➔ una o più applicazioni locali (o parti di applicazioni distribuite) che processano dati e eventi interni
 - ➔ funzioni che collegano dati e/o eventi con l'esterno
 - ➔ una funzione di **pianificazione delle attività** (ad esempio, ciclica)

Sistema di controllo di processo

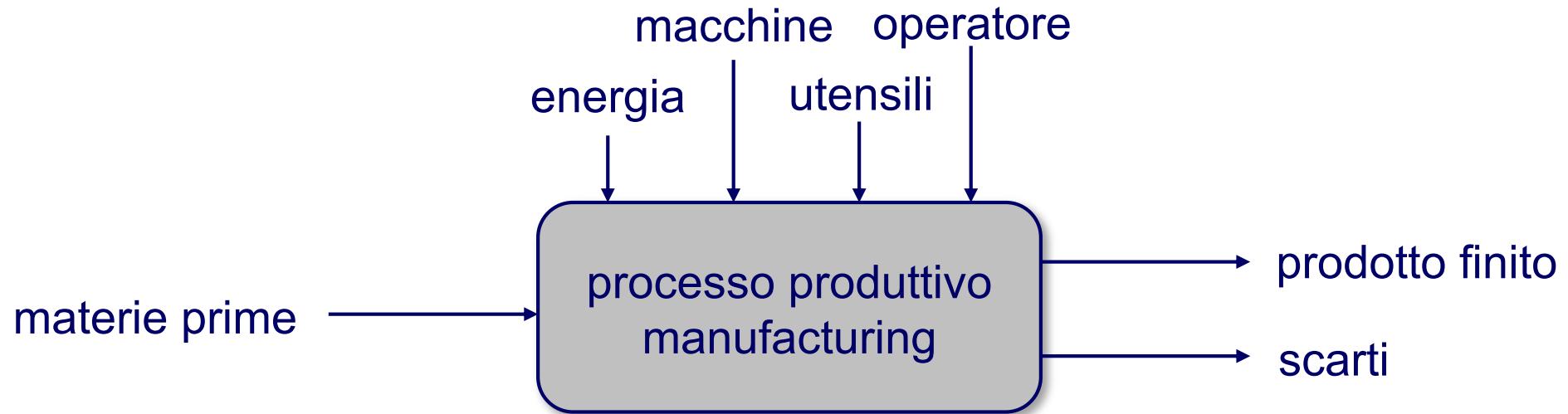
- esemplificazione grafica dei modelli negli standard IEC 61131- 61499
 - I **dispositivi** (devices), con SO real-time e multi-tasking, hanno a disposizione risorse (di calcolo, di memoria, basi di dati), interfacce di comunicazione (verso la rete) e interfacce verso il processo/macchina che controllano direttamente
 - con le **risorse**, i dispositivi realizzano diverse applicazioni, che sono locali o distribuite tra dispositivi, attraverso una serie di funzionalità (= function blocks)
 - le **applicazioni** scambiano/elaborano **dati**, sequenziate da **eventi** in input e output



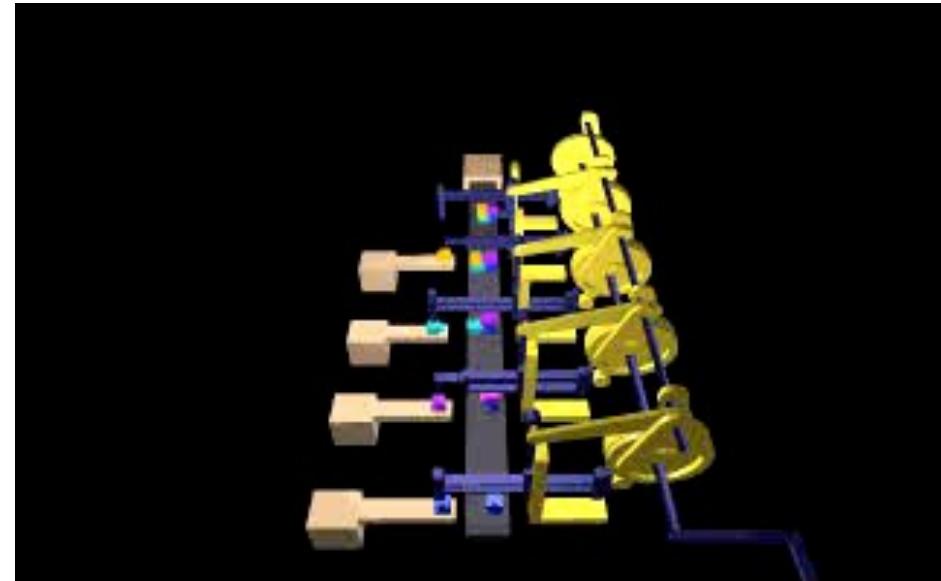
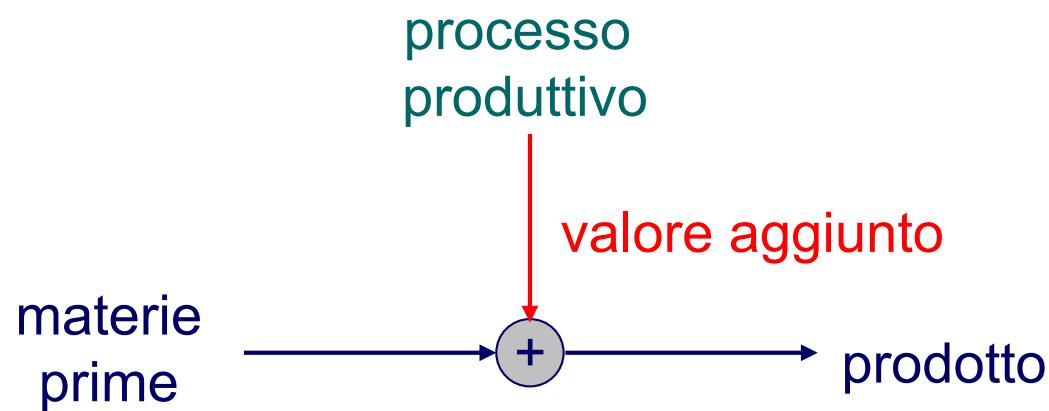
Function Block (FB) interface

Manufacturing: insieme dei processi produttivi da applicare ai materiali grezzi/semi-lavorati per ottenere un prodotto finale. La trasformazione richiede l'uso di

- energia
- macchine e utensili
- possibile intervento umano
- informazione



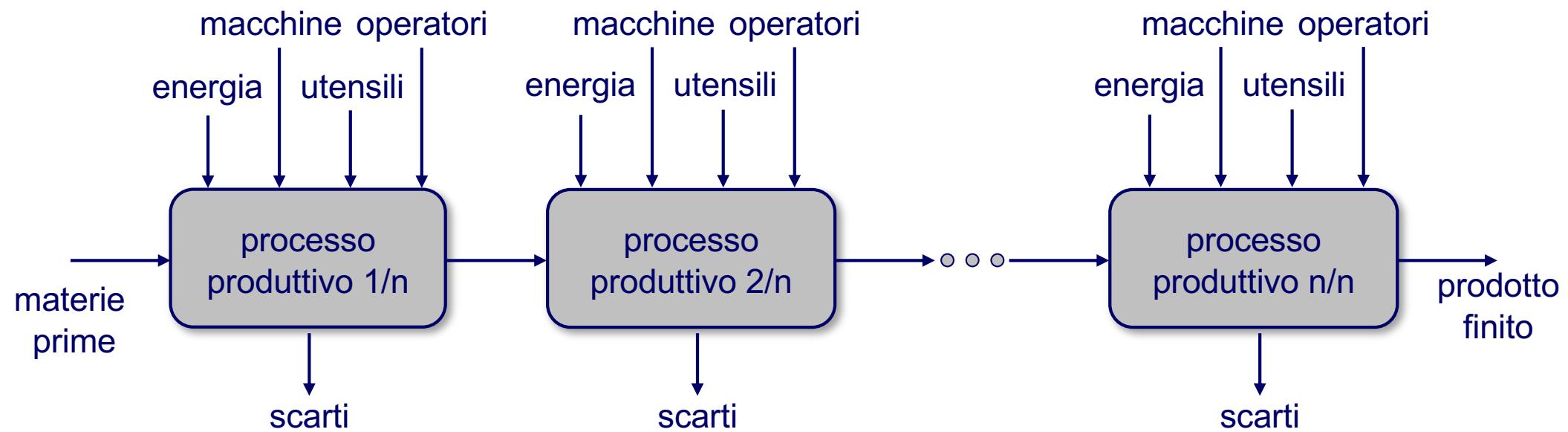
Manufacturing: da un punto di vista economico il processo produttivo è l'insieme delle operazioni necessarie per fornire **valore aggiunto** ai materiali grezzi



(courtesy of Ken Goldberg)

Manufacturing: è in genere un processo di tipo sequenziale

- scomponibile in un insieme di passi produttivi successivi che avvicinano i materiali al loro stato finale desiderato

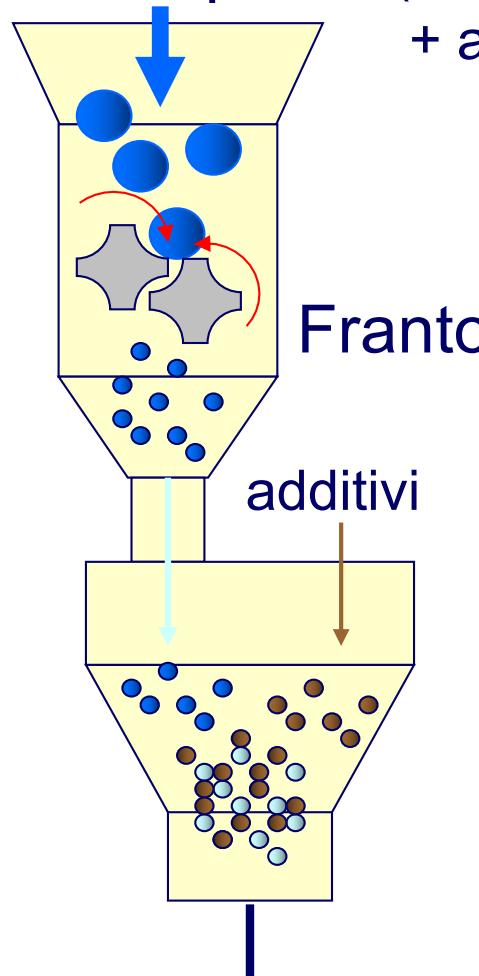


- un primo esempio: cementificio

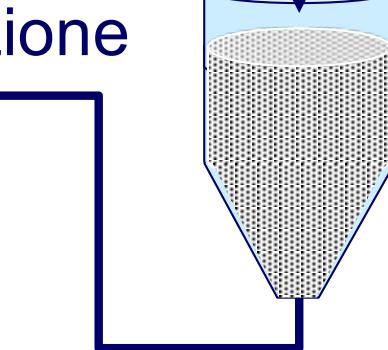
Esempio di processo produttivo

Cementificio

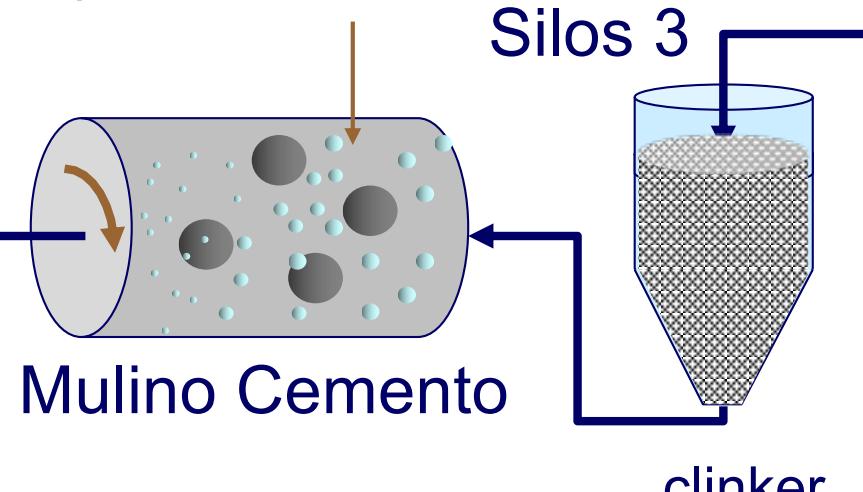
Materia prima (calcari puri + argilla)



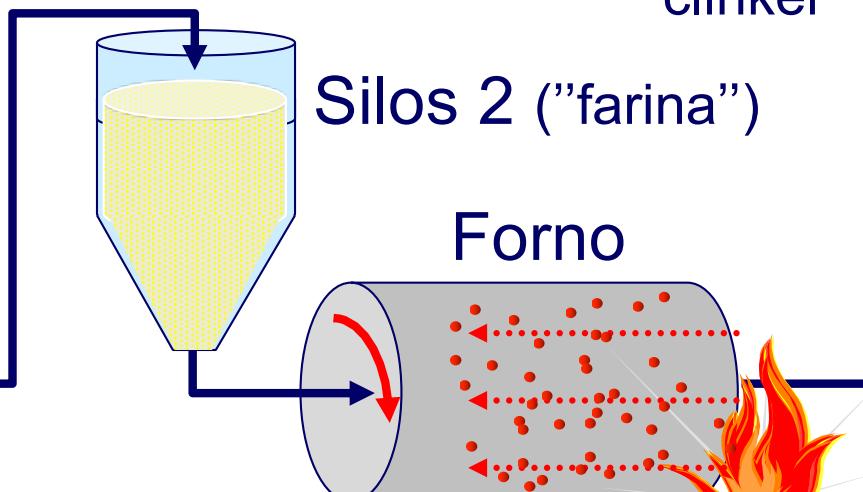
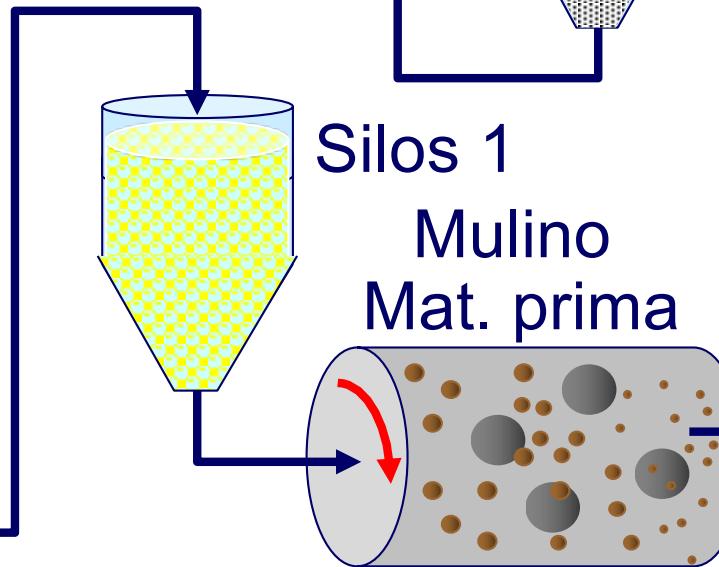
Silos Cemento



gesso, ceneri, pozzolana...



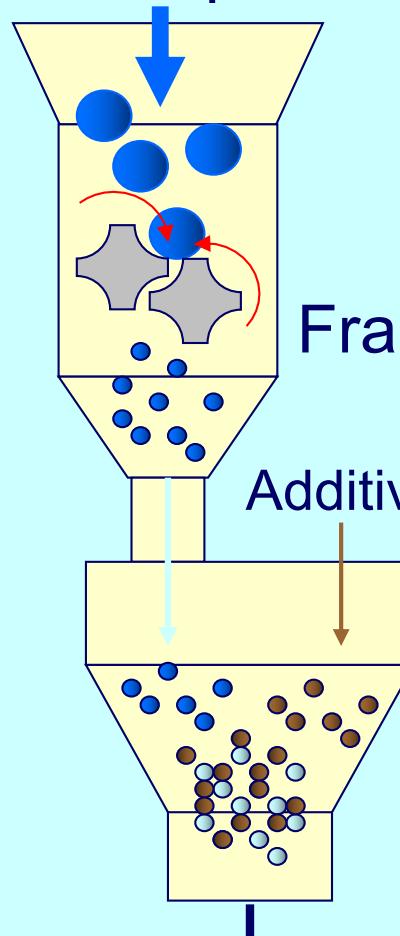
Silos 1
Mulino
Mat. prima



Esempio di processo produttivo

Cementificio

Materia prima



Stabilimento

Silos Cemento

Macchina

Silos 3

Spedizione

Silos 1

Mulino
Mat. prima

Silos 2

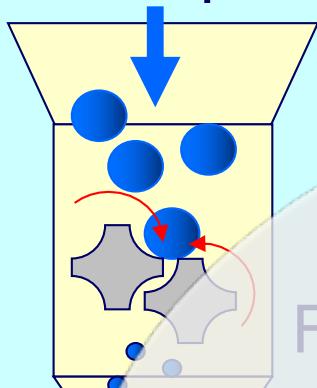
Forno

Cella produttiva

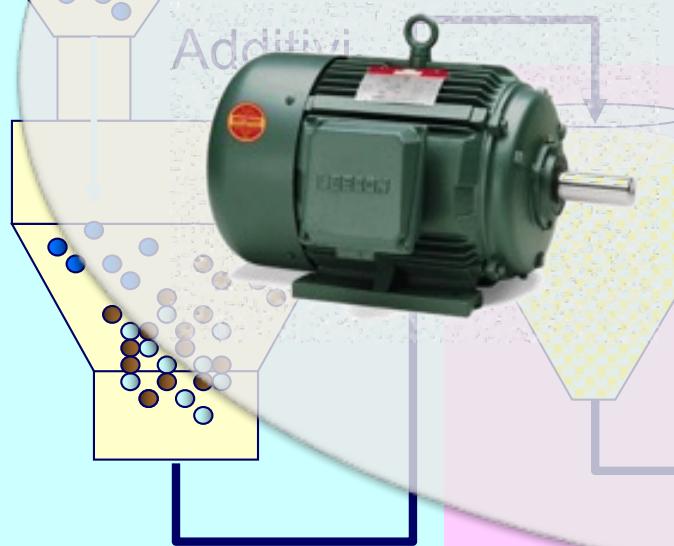
Esempio di processo produttivo

Cementificio

Materia prima



Frantoio



Miscelatore

Stabilimento

Silos cemento

Macchina

Silos 3

Dispositivi di campo

Mulino Cemento

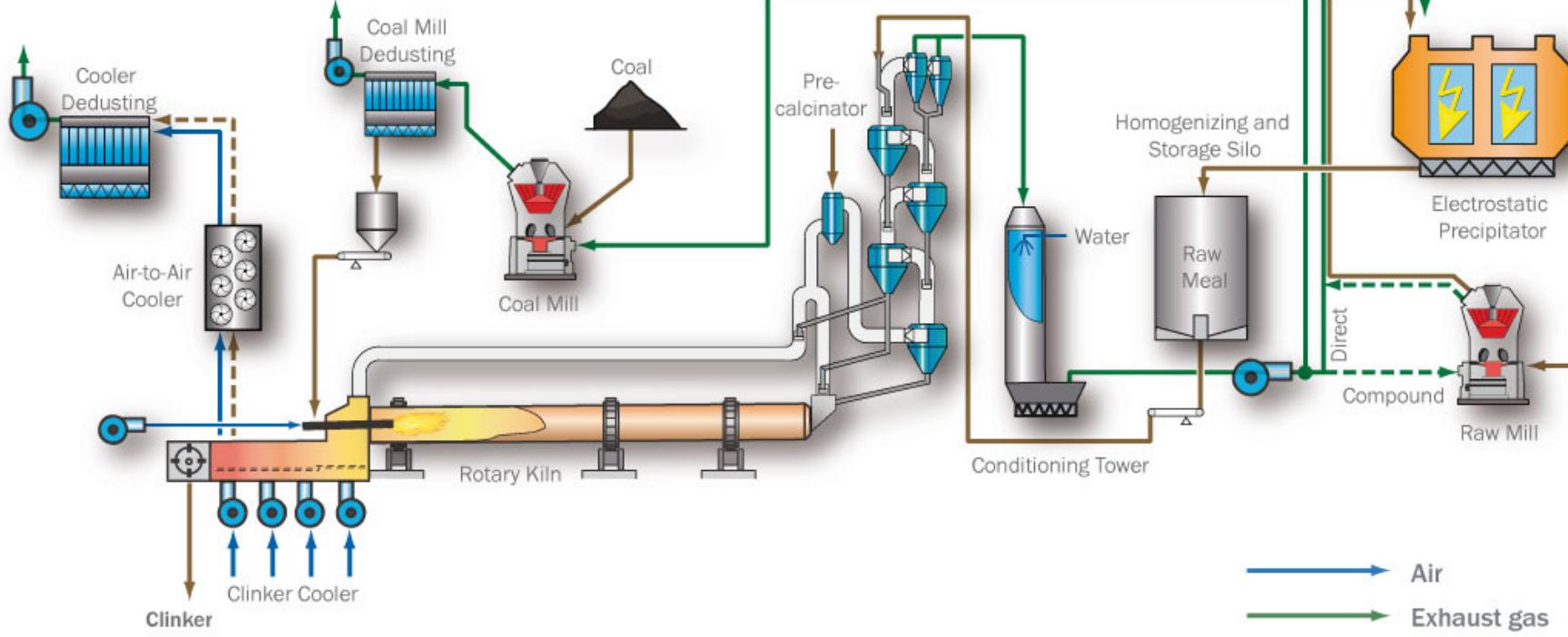
Forno

Cella produttiva

Un vero cementificio

<https://www.sick.com/it/it/c/g287763>

Process Control

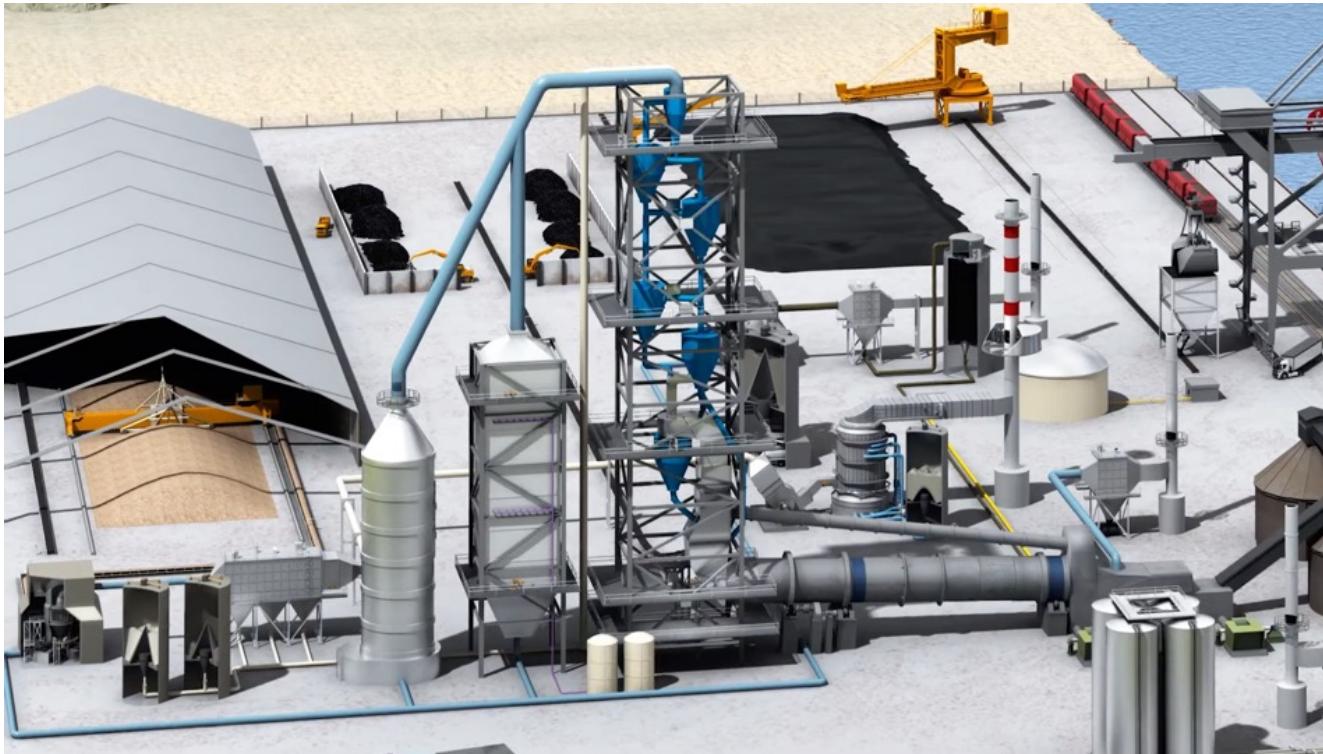


Emission Monitoring



Sensoristica di processo

video clip estratto da <https://youtu.be/CniL84OtnEI>



soluzioni sensoristiche
della **SICK AG** per impianti
di produzione del cemento

- sensori per la fase di estrazione e raccolta delle materie prime
- sensori per il processamento dei combustibili
- sensori per il controllo del processo di cottura
- sensori per il monitoraggio della produzione ed emissione di gas

Sensoristica di processo

4 video clip estratti da <https://youtu.be/CniL84OtnEI>



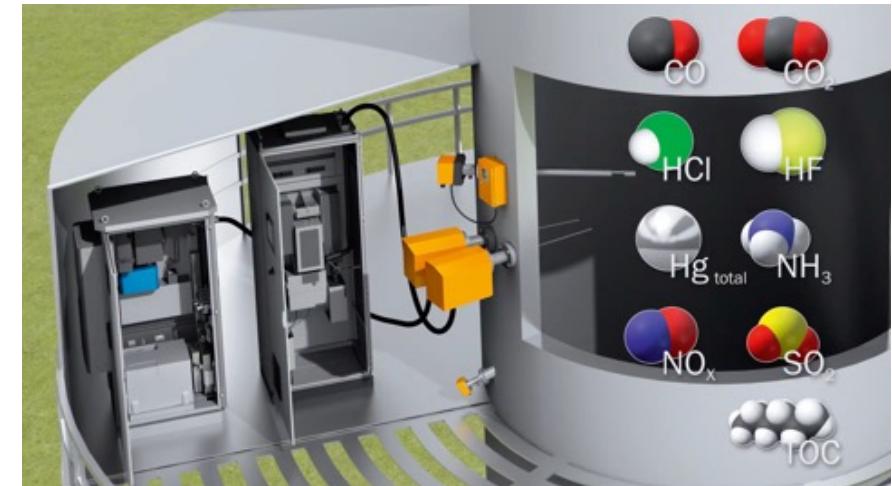
laser scanner, encoder



gas, temperatura, vetrificazione, polveri



rivelatori di incendio, 2D lidar



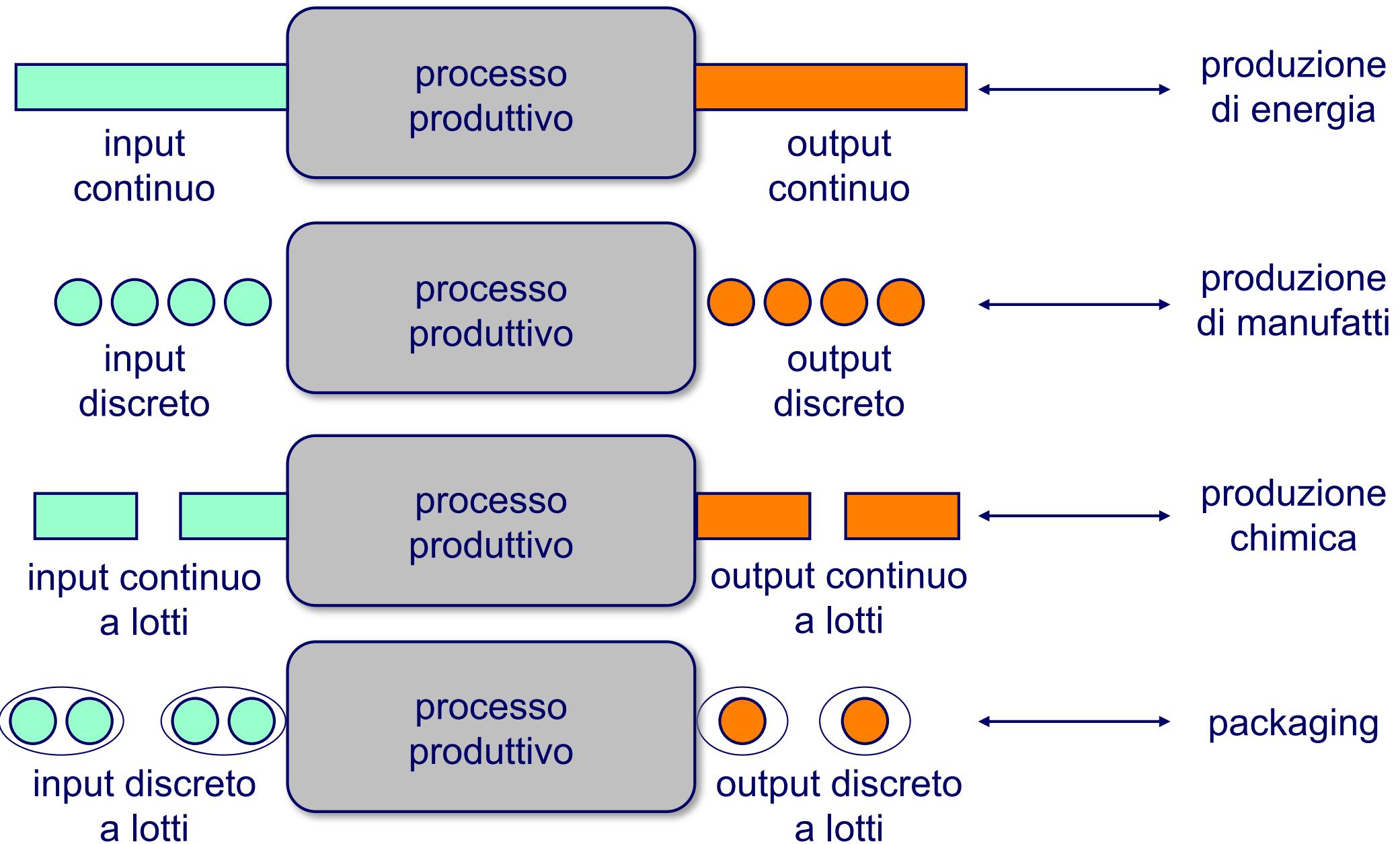
report, SCADA

Operazioni elementari nei processi produttivi

Un processo produttivo è composto da una sequenza di **operazioni elementari**

- di lavorazione: utilizzo dell'energia per alterare le proprietà dei materiali (trasformazioni)
- di assemblaggio: operazioni di unione di più parti per formare un'unica entità
- di trasporto e stoccaggio: movimentazione e stoccaggio di parti e prodotti
- di test: verifica del prodotto (finale) e delle sue funzionalità
- di coordinamento e controllo: coordinamento e regolazione delle operazioni anche a livello di gestione della produzione

Classificazione dei processi produttivi



- processi continui: coinvolgono trasformazioni continue di massa, energia e quantità di moto su flussi continui di materiale
 - ➔ nel funzionamento a regime, l'obiettivo è ottenere un prodotto dalla qualità uniforme nel tempo, a prescindere dalla durata del periodo in cui il processo è rimasto attivo
 - ➔ possono durare giorni o settimane e vengono spenti solo per operazioni di verifica, pulizia, manutenzione (programmata o necessaria a causa di guasto)
 - ➔ scambi su variabili fisiche: temperatura ⇒ scambio di calore, livello di un fluido ⇒ scambio di massa, pressione ⇒ scambio di quantità di moto
- tipologie comuni degli impianti (*industria e controllo di processo*)
 - ➔ impianti per la produzione di energia
 - ➔ impianti per la distribuzione di energia, acqua, gas, ...
 - ➔ impianti di estrazione di petrolio, gas, ...
 - ➔ impianti di laminazione
 - ➔ impianti idraulici di raccolta e distribuzione di liquidi o gas
 - ➔ forni, essiccatori
 - ➔ impianti per la produzione di vetro, **cemento**, carta, argilla espansa, ...

□ componenti principali dell'impianto

- ➔ pompe, compressori e ventilatori ⇒ trasporto materiale
- ➔ valvole, tubazioni, serbatoi e corpi cilindrici
- ➔ scambiatori di calore, bruciatori, turbine
- ➔ trasformatori, alternatori, motori elettrici
- ➔ forni, essiccati
- ➔ pistoni, circuiti idraulici e pneumatici

□ tipiche problematiche di “controllo” e di “automazione”

- ➔ controllo livello in corpo cilindrico e condensatore
- ➔ controllo pressione in corpo cilindrico
- ➔ controllo portata e temperatura del vapore
- ➔ sequenze di avviamento/spegnimento coordinato dei dispositivi dell'impianto (non si può avviare o spegnere singoli componenti)
- ➔ analisi della convenienza di spegnimento in caso di guasto

} continue
} discrete

- **processi “batch”**: quantità finite di prodotto finale ottenute da quantità finite di materiali grezzi, processati secondo un insieme ordinato di attività e in un periodo di tempo finito
 - ➔ prodotti lavorati in quantità di dimensioni non fissate a priori (**lotti**), ma **scalabili**
 - ➔ non è fissata la quantità di prodotto finale, ma solo la sequenza di lavorazione (**ricetta**)
 - ➔ il processo è **interrotto** dopo la lavorazione di un lotto e ripreso con quello successivo; non esistono parti che si possono facilmente separare e identificare
 - ➔ apparecchiature riutilizzabili per prodotti differenti, ma con fase di pulizia intermedia
- **tipologie comuni**
 - ➔ prodotti realizzati secondo diverse formule, ma in piccole/medie quantità (prodotti farmaceutici, detersivi, plastiche, ...)
 - ➔ prodotti costosi con mercato ristretto o ciclo di vita ridotto (profumi, ...)
 - ➔ prodotti che richiedono tempi di maturazione, fermentazione o miscelazione in condizioni regolate (vino, birra, bevande alcoliche, **olio**, ...)
 - ➔ settori industriali di interesse: chimica generale, farmaceutica, alimentare

□ componenti principali dell'impianto

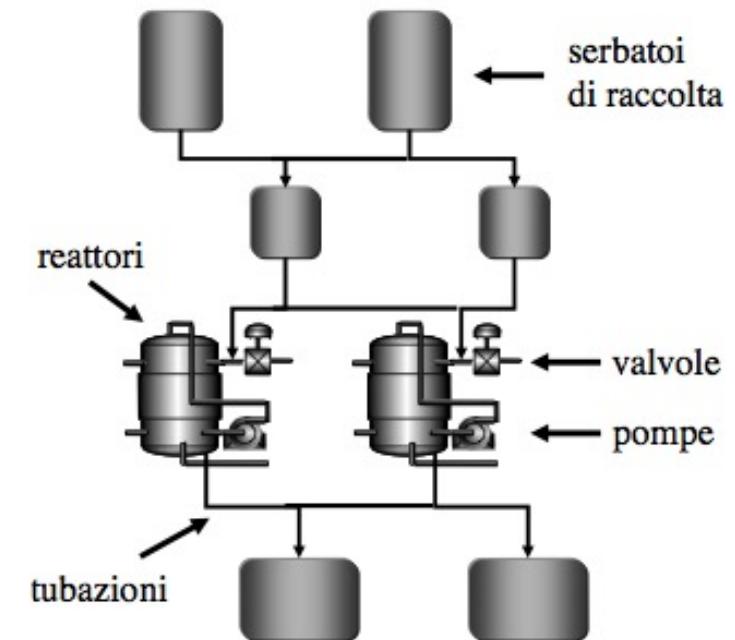
- ➔ sistemi di **trasporto**: pompe, valvole, tubazioni, collettori, ..
- ➔ sistemi di **lavorazione**: reattori, serbatoi, agitatori, ...
- ➔ timer, switch, allarmi, indicatori di flusso, livello, temperatura e pressione

□ classi tipiche di impianti batch

- ➔ prodotto singolo/multi-prodotto, a linea singola/multi-linea
- ➔ tempi di carico/scarico, di raggiungimento delle temperature/pressioni di lavoro e di pulizia sono critici per l'efficienza

	linea singola	linea multipla
prodotto singolo	un solo tipo di prodotto con un unico flusso di lavorazione	mono-prodotto, ma ogni lotto può seguire diversi percorsi "paralleli"
prodotto multiplo	varie ricette, ma ancora unico flusso di lavorazione	vari tipi di prodotti, seguendo percorsi alternativi, secondo disponibilità dei componenti

massima flessibilità,
ma più difficile controllo



□ problemi e obiettivi di automazione

- ➔ definizione di **ricette di lavorazione** (passi logici che descrivono il processo produttivo, come pure le attività accessorie) e relative operazioni sul sistema
- ➔ garantire un uso corretto delle risorse (componenti e dispositivi) dell'impianto
- ➔ gestione dei lotti: più lotti di un'unica ricetta o di più ricette possono essere contemporaneamente presenti nell'impianto
- ➔ realizzare la ripetitività delle operazioni
- ➔ aumentare la flessibilità di conduzione dell'impianto, quando si introducono algoritmi e modelli sofisticati

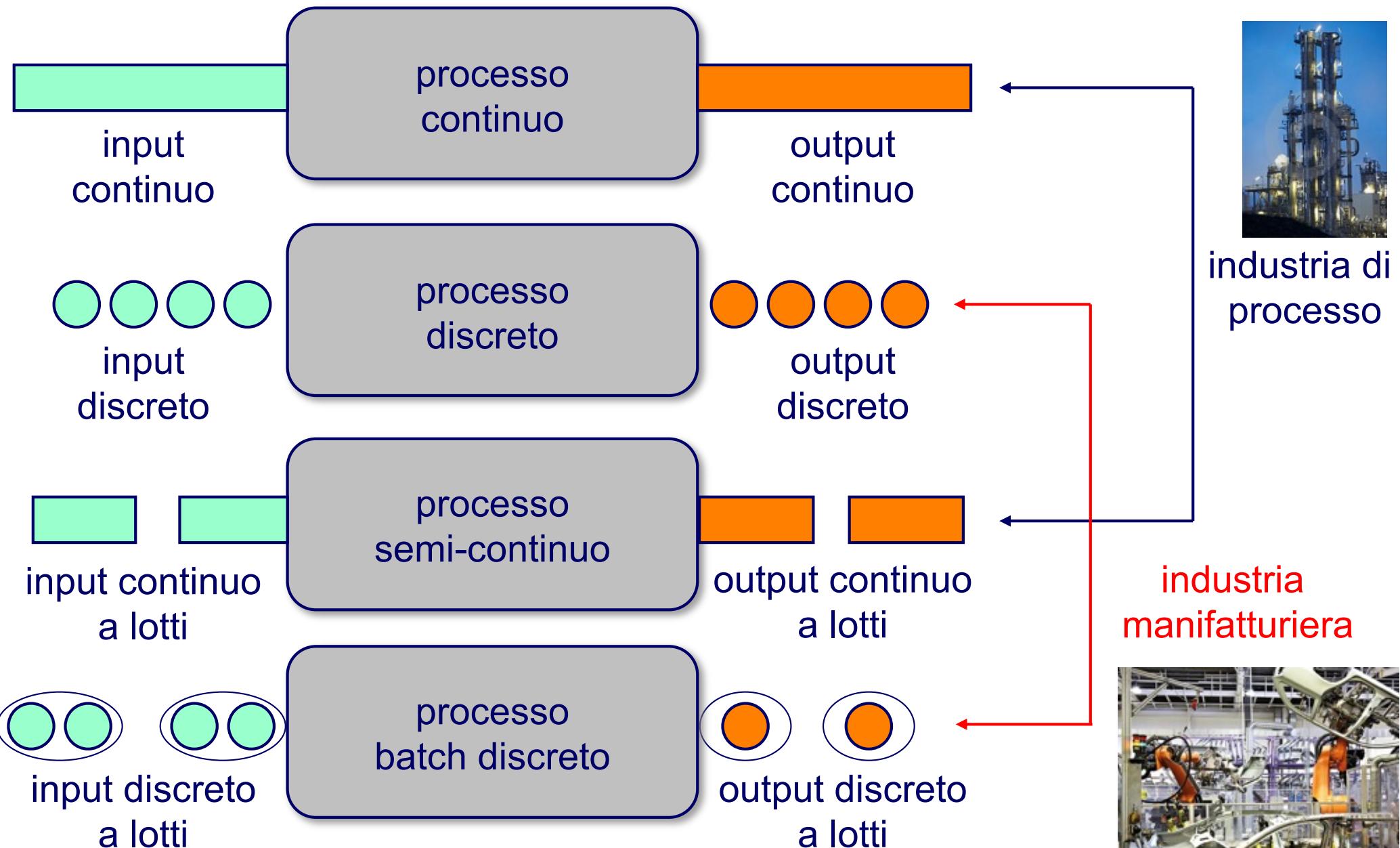
□ problemi e obiettivi di controllo (diretto)

- ➔ di fatto simili in tutte le tipologie di processi produttivi (continui, semi-continui, a lotti, discreti...) in quanto riguardano dispositivi di campo o singole macchine che possono essere presenti in tutti gli impianti produttivi
- ➔ per attività che sono comuni a diversi processi produttivi (regolazione della velocità di un nastro di trasporto, della temperatura di un forno...)

- processi semi-continui: hanno caratteristiche in comune sia con i processi continui sia con quelli a lotti
- dedicati ad applicazioni specifiche e ripetitive
 - ➔ filtraggio/pulizia di gas o liquidi
 - ➔ deumidificazione dell'aria
 - ➔ trattamento delle acque
- processi che in genere separano componenti in un flusso continuo
 - ➔ componente separato si accumula in un'unità di processo fino a riempimento (processo di tipo continuo)
 - ➔ a riempimento completato, il processo viene interrotto per svuotare e ripulire i serbatoi, quindi il processo viene riavviato (eventi di separazione)

- processi discreti: caratterizzati da cicli di lavorazione su singole parti o singole unità di prodotto
- materiali di partenza e prodotti finali sono *numerabili*
 - ➔ sistemi manifatturieri per lavorazione (tornitura, fresatura, foratura, saldatura), assemblaggio, manipolazione e stoccaggio (con robot)
- tipologie comuni di operazioni (*industria manifatturiera*)
 - ➔ *lavorazioni*
meccaniche (asportazione di truciolo), per deformazione plastica (laminazione, stampaggio), assemblaggio, smontaggio (recupero di componenti —schede elettroniche, apparecchi elettrici), saldatura, verniciatura + controllo qualità
 - ➔ *trasporto* (di prodotti, pallet, utensili)
nastri, rulli, catene di trasporto, carrelli a guida automatica o AGV (su binari fissi o piste magnetiche), “carri-ponte” (pesi/distanze elevate)
 - ➔ *immagazzinamento*
“buffer” per accumulo prodotti (grezzi, semilavorati, finiti) o utensili, gestisce code in ingresso a una macchina operatrice e assorbe diverse velocità di lavorazione

Classificazione dei processi produttivi

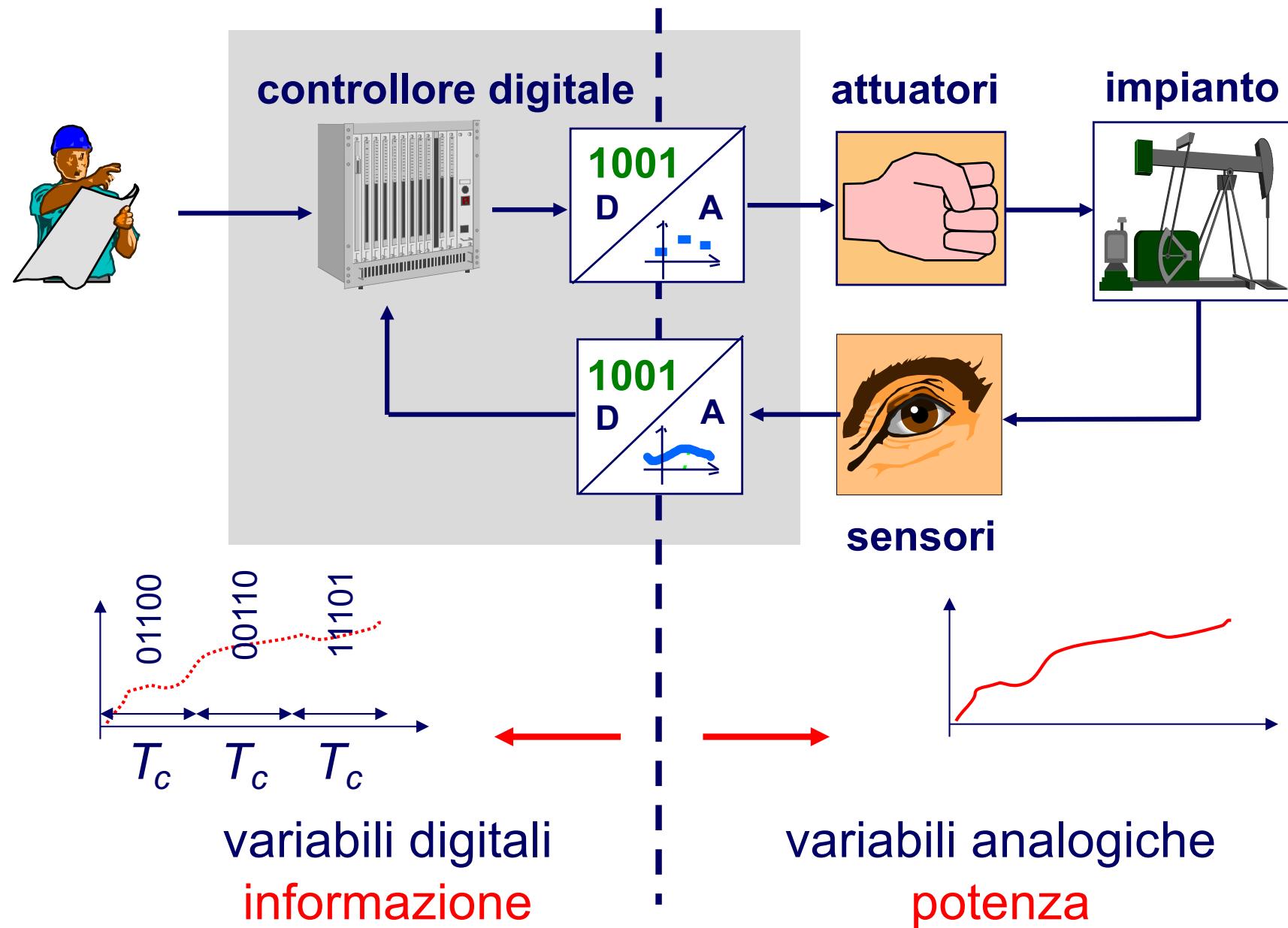


Funzioni di controllo per tipo di processo

- i controllori di processi industriali combinano in generale azioni di controllo **logico** e di controllo **diretto** (analogico o digitale)

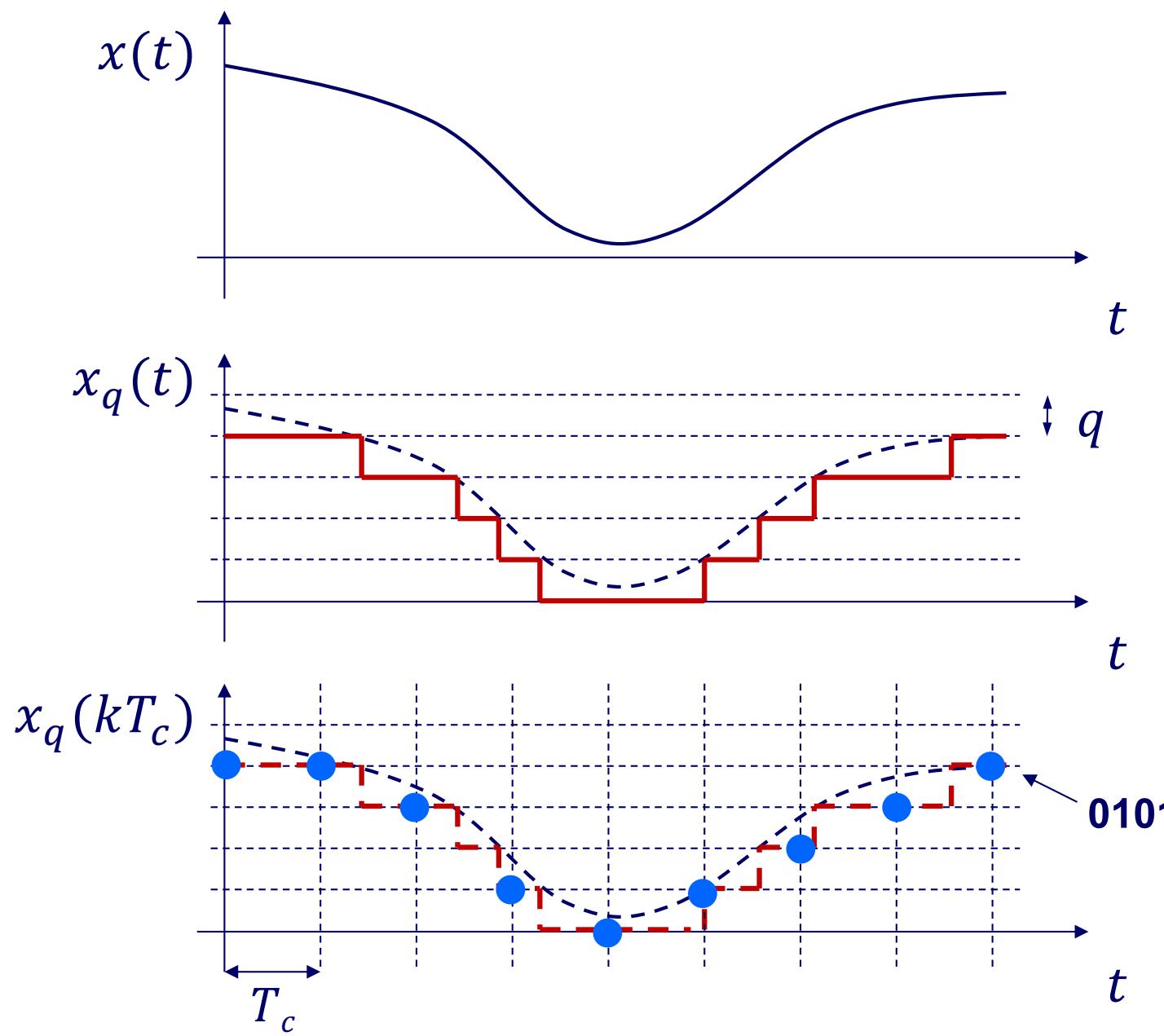
	controllo logico	controllo diretto
processi produttivi continui	coordinamento complessivo avviamento e spegnimento guasti e emergenze	controlli primari (livelli, temperature, pressioni) controlli asserviti (portata pompe, posizione valvole)
processi produttivi a lotti	controllo delle ricette supervisione impianto avviamento e spegnimento guasti e emergenze allocazione risorse impianto	controlli primari (livelli, temperature, pressioni) controlli asserviti (portata pompe, posizione valvole)
processi produttivi discreti	controllo sequenze di lavoro delle singole macchine supervisione impianto avviamento e spegnimento guasti e emergenze	controlli asserviti (posizionamento, velocità motori elettrici)

Controllo diretto di variabili



- **segnali (variabili) analogici:** variano con continuità nel tempo e nel valore (grandezze fisiche: temperatura, posizione, ...)
- **segnali quantizzati:** possono assumere solo un numero limitato di valori separati dallo zero-macchina (o livello di quantizzazione q)
 - ➔ range valori Δ e zero-macchina q individuano il numero di bit $n = \lceil \log_2(\Delta/q) \rceil$
- **segnali campionati:** segnali analogici valutati solo ad istanti di tempo precisi separati da un tempo di campionamento T_c : $x(t) \Rightarrow x(kT_c)$
- **segnali digitali:** segnali quantizzati e campionati codificati come numeri binari
 - ➔ il sistema di controllo è un sistema digitale, le informazioni sono rappresentate da numeri binari: n bit corrispondono a 2^n livelli ($2^n - 1$ valori, oltre lo 0)
 - ➔ i sistemi digitali sono sincroni: possono evolvere solo in corrispondenza di particolari istanti di tempo individuati da un clock

Controllo diretto di variabili



segnale analogico

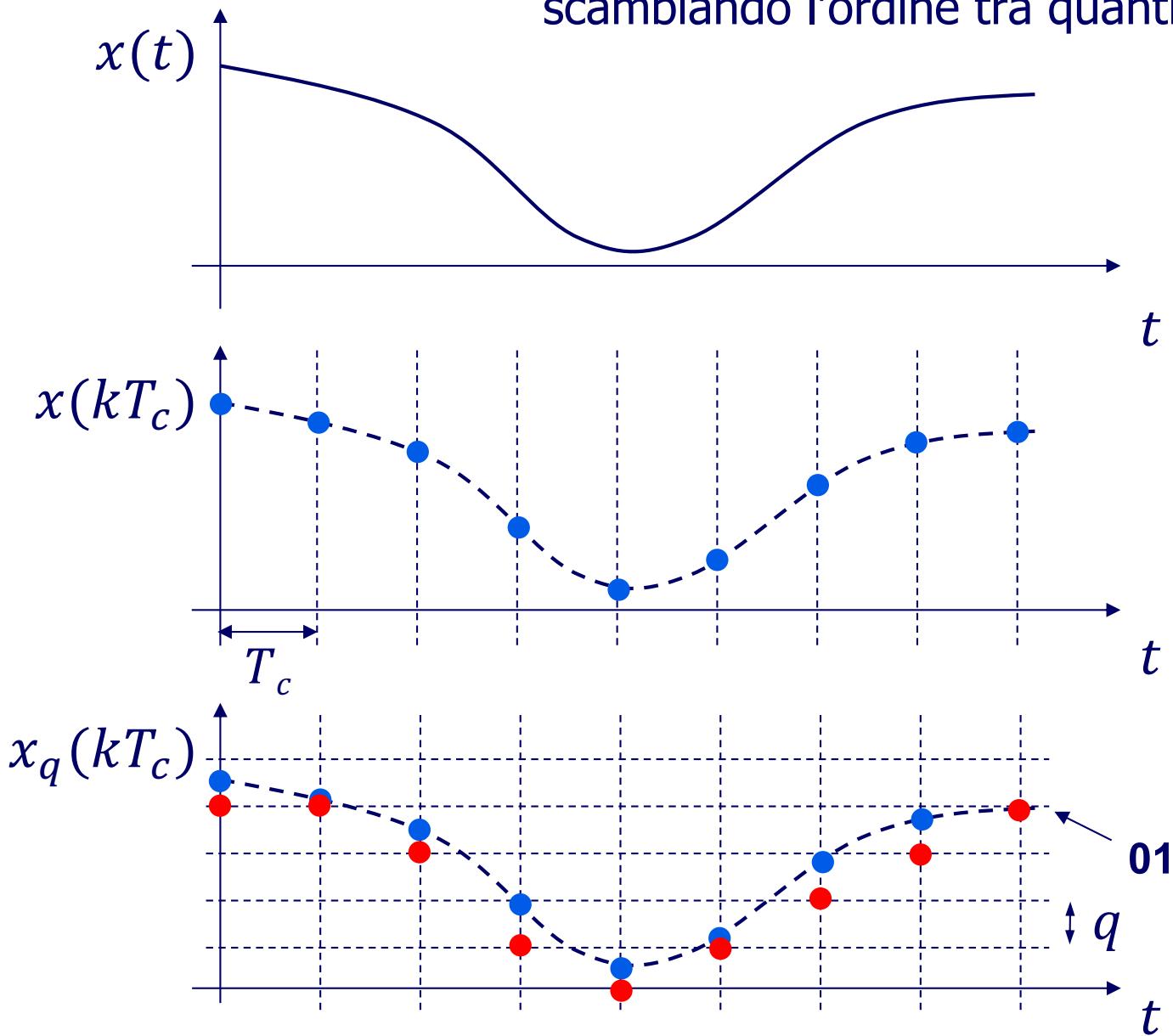
segnale quantizzato
(per arrotondamento
o troncamento)

qui
$$x_q(t) = \left\lfloor \frac{x(t)}{q} \right\rfloor q$$

segnale digitale

Controllo diretto di variabili

scambiando l'ordine tra quantizzazione e campionamento...



Variabili logiche assumono valori in un insieme numerabile, solitamente di cardinalità finita

- le variabili booleane sono variabili logiche {0,1}
- altri esempi

- interruttore {on, off}
- porta {aperta, chiusa}
- semaforo {verde, rosso, giallo}
- motore {in moto CW, in moto CCW, fermo}
- ...

- operazioni logiche

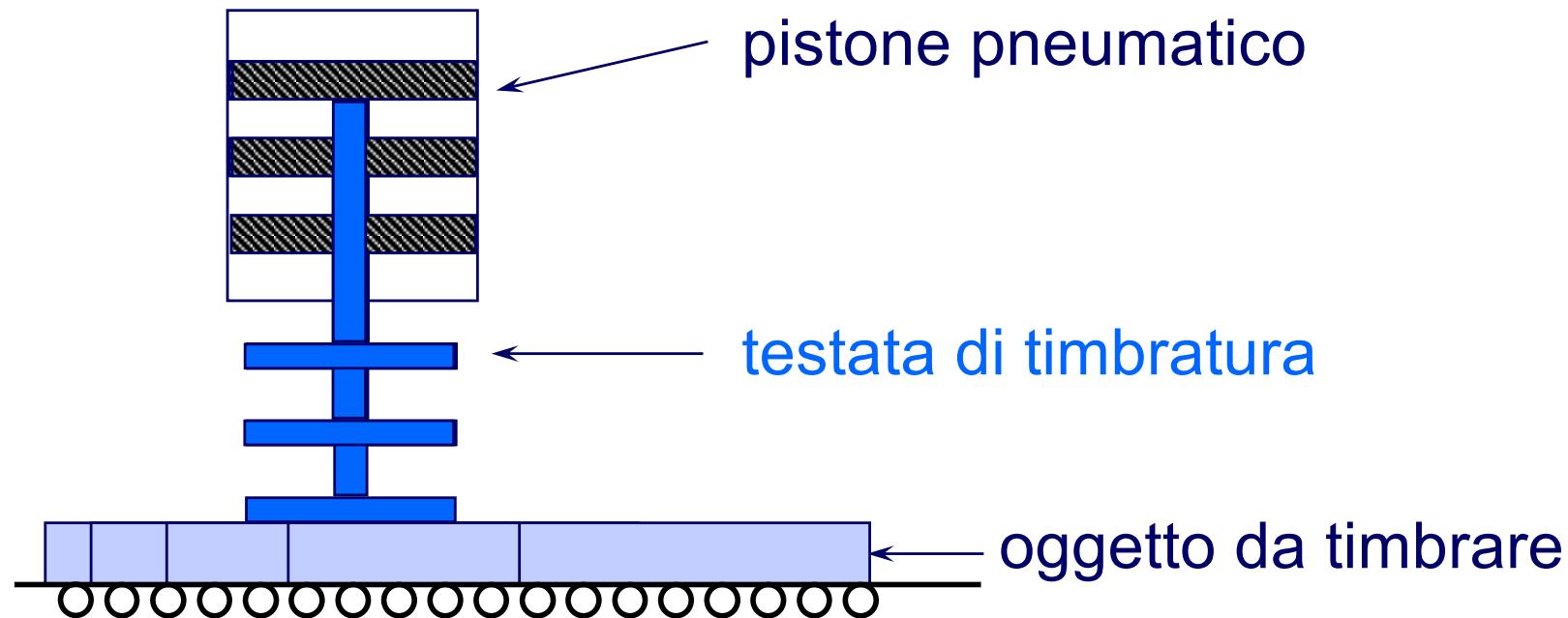
- AND
- OR
- NOT
- ...

operazione di un attuatore

- controllo del moto di un motore elettrico tramite il comando **M** usando le informazioni provenienti dal sensore di prossimità **P** (fine corsa) e dal sensore di consenso **C**
- **M** deve attivarsi quando il consenso **C** è presente e deve disattivarsi non appena il fine corsa **P** è raggiunto
- controllo logico: **M** = **C AND NOT(P)**
- realizzazione elettrica

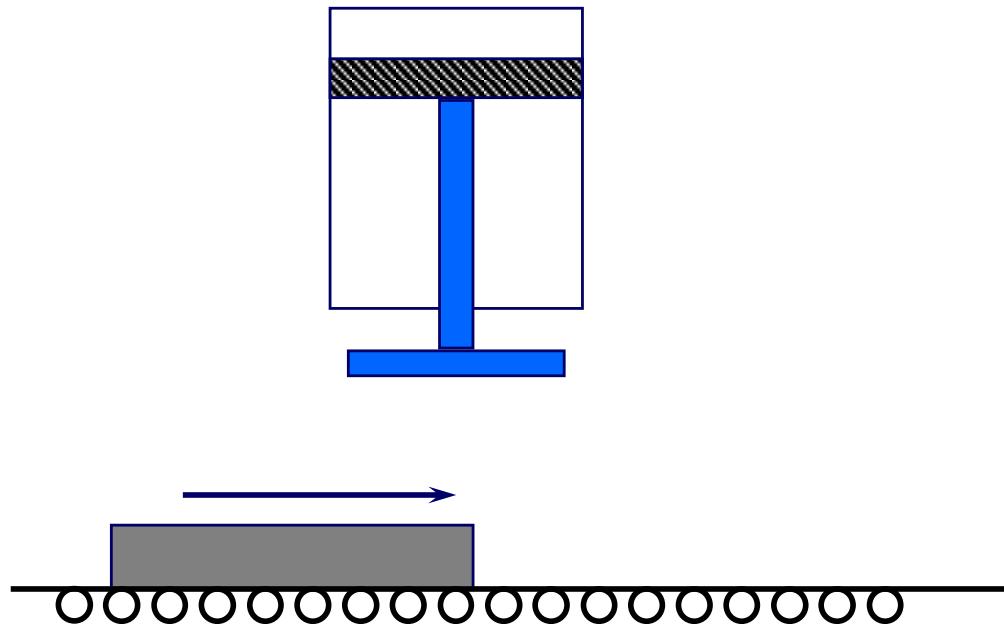


□ Timbratrice automatica



Esempio di controllo logico

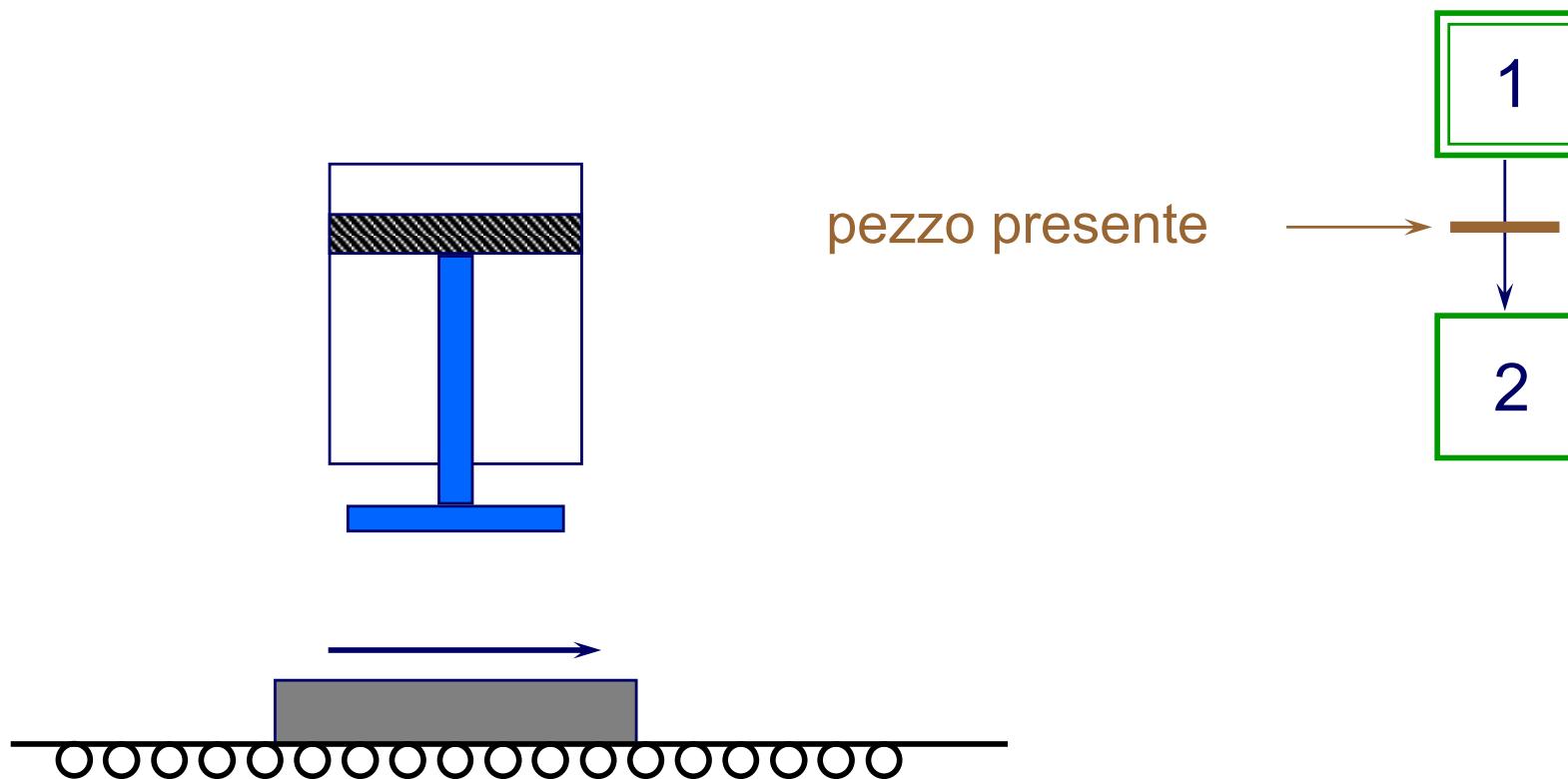
□ Timbratrice automatica



attesa pezzo

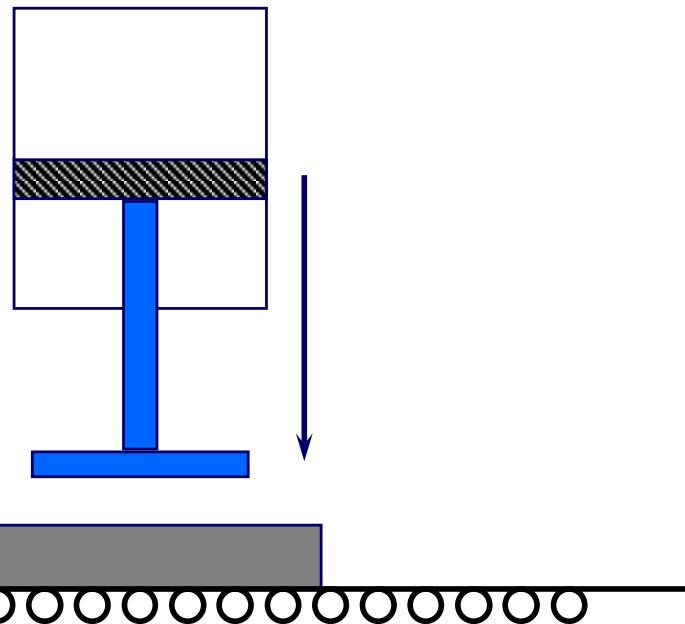


□ Timbratrice automatica

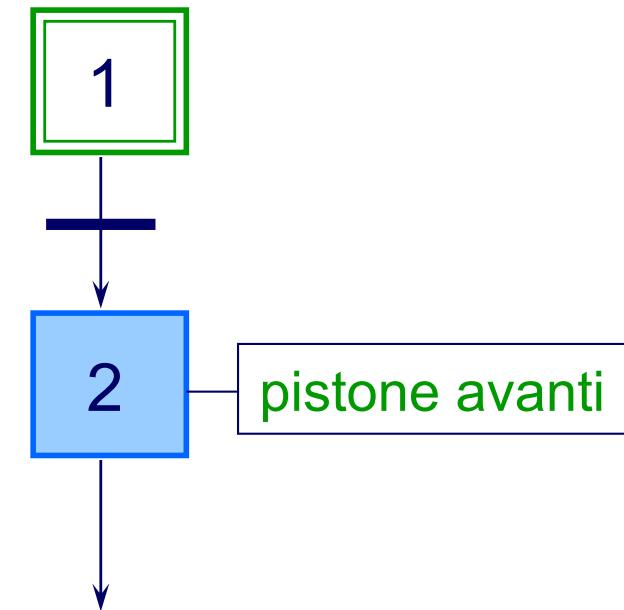


Esempio di controllo logico

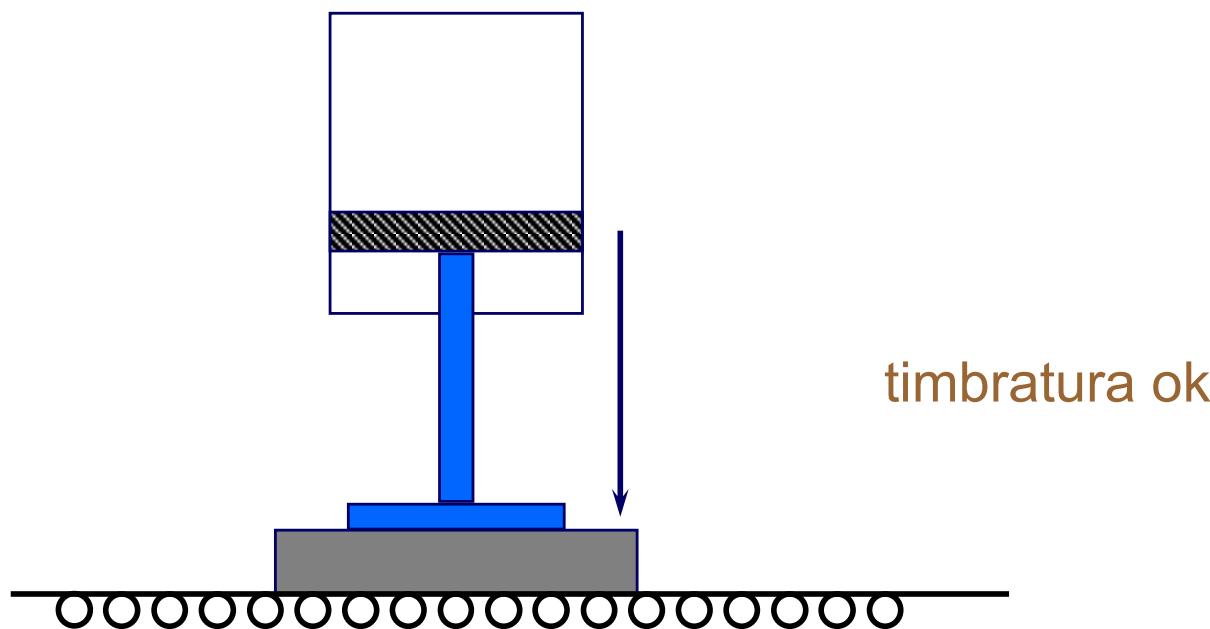
□ Timbratrice automatica



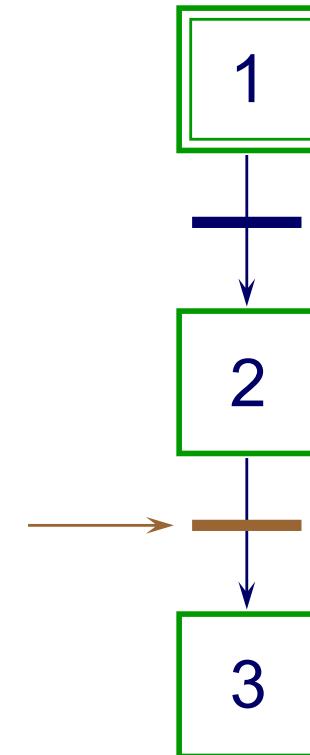
esecuzione
timbratura



□ Timbratrice automatica



timbratura ok



Esempio di controllo logico

□ Timbratrice automatica

