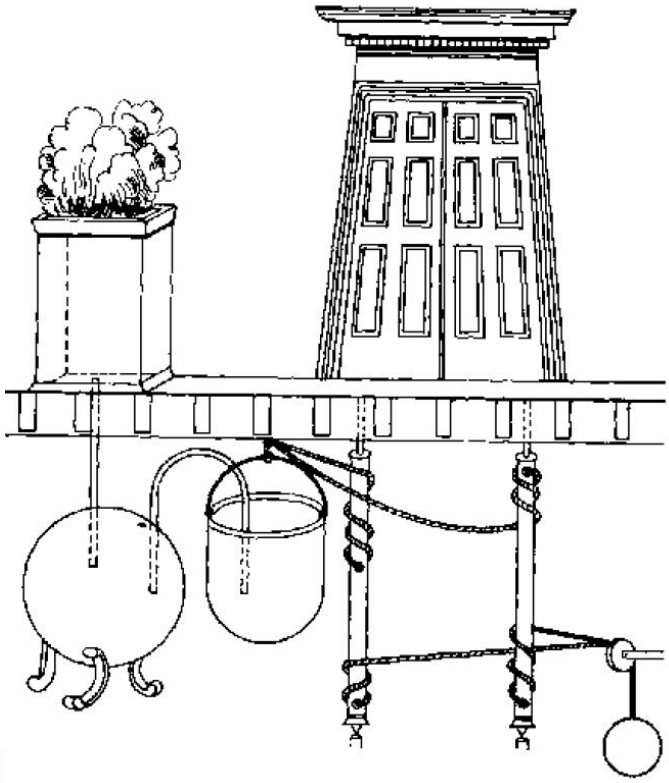
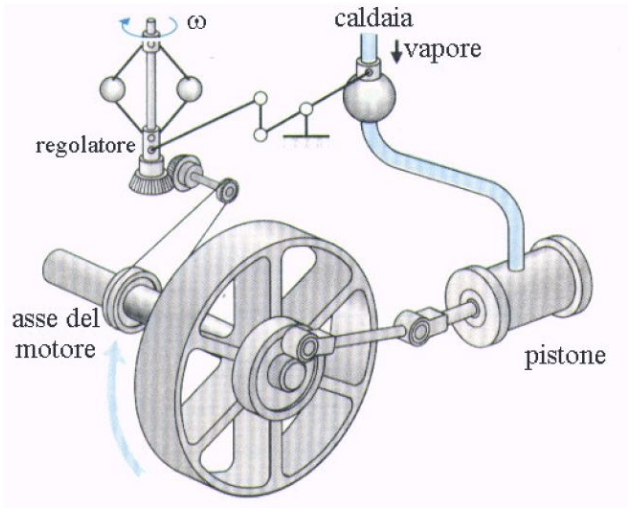
Capitolo 1
Introduzione ai controlli e all'automazione

1.1 Sistemi di controllo: cenni storici

Descriviamo un antico azionamento per aprire le porte di un tempio ideato da **Erone di Alessandria**, vissuto nell'antica Gracia tra il I e II secolo a. C. (figura a destra). Accendendo il fuoco sull'altare, si dilatava l'aria contenuta in un recipiente sottostante. La pressione dell'aria riscaldata dal fuoco era trasmessa, tramite un tubo, ad un serbatoio contenente acqua, che, spinta dalla pressione attraverso un sifone, riempiva un secchio, il cui peso faceva ruotare i cardini, mossi da un sistema di funi avvolte su tamburi. Durante l'apertura delle porte era anche sollevato un contrappeso. Spegnendo il fuoco, si riduceva la pressione e l'acqua ritornava dal secchio al contenitore mediante il sifone. Il contrappeso discendeva e chiudeva le porte del tempio. La massa, così, pensava ad un prodigio degli Dei dell'Olimpo.





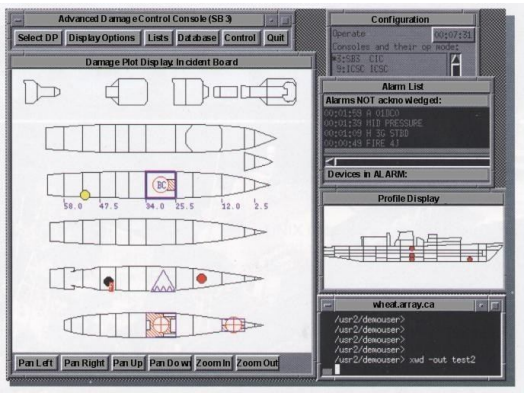
Il primo sistema di controllo vero e proprio è stato il regolatore centrifugo di velocità (*flyball governor*) sviluppato da **James Watt** nel 1788. La forza centrifuga fa distanziare le due sfere e, maggiore è la velocità, minore è il flusso di vapore. Se aumenta la coppia resistente, la velocità diminuisce, le palle si avvicinano e di conseguenza il flusso di vapore aumenta; ***la velocità*** torna ad aumentare, anche se ***sarà inferiore a quella stabilita***; se, infatti, fosse la stessa, al quantità di vapore sarebbe la stessa, in quanto è proporzionale alla velocità. Pertanto non sarebbe sufficiente a contrastare la nuova coppia resistente e contemporaneamente far girare la ruota alla stessa velocità. Si tratta di un *regolatore proporzionale,* che sarà studiato in seguito.

Nel 1868 **James Clerk Maxwell** mise a punto uno studio analitico sulla sua stabilità. Le sue prime applicazioni furono la regolazione di giri delle macchine a vapore. Maxwell osservò per la prima volta esplicitamente il ruolo stabilizzante della *retroazione,* e gli effetti nocivi dei *ritardi* sulla stabilità. La relazione tra il modello matematico di un sistema e le sue proprietà di stabilità fu descritta per sistemi lineari generali da **Edward John Routh** (1831-1907) negli anni immediatamente successivi. I sistemi di controllo automatico ebbero un ruolo importante negli avanzamenti tecnologici susseguenti, quali ad esempio la realizzazione dei primi aerei dei fratelli Wright agli inizi del ventesimo secolo.

Nicholas Minorsky (1885-1970) realizzò nel 1922 uno dei primi **piloti automatici retroazionati**, con *regolatore PID*, ovvero *proporzionale, integrale, derivativo*.
Il 1934 è una data significativa nella storia dei sistemi retroazionati, quando fu pubblicato il lavoro di **Harold Hazen** "*Theory of Servomechanism*". Fu citata per la prima volta la parola ***servomeccanismo***, derivata da *servant* (servitore) e *mechanism*, quindi, un meccanismo servitore o asservito. Nello stesso anno fu pubblicato il lavoro di **Harold Stephen Black** "*Stabilized Feedback Amplifiers*", sull'uso della retroazione negli amplificatori elettronici.
I controlli automatici hanno costituito una vera e propria disciplina ingegneristica a partire dagli anni '40. Il sviluppo di tale disciplina è dato soprattutto dalla seconda guerra mondiale (autopiloti per aerei, sistemi di puntamento per cannoni, per radar). Lo sviluppo dei calcolatori elettronici (primi anni '50) ha reso applicabili molte teorie già sviluppate sul piano formale. La conquista dello spazio (anni '60 e '70) fu possibile per la disponibilità di sofisticati sistemi di controllo. Importanti poi furono lo sviluppo dei microprocessori (seconda metà degli anni '70) e dei DSP (*digital signal processor*, seconda metà degli anni '80).

1.2 L'automazione della nave

Si iniziò ad automatizzare la nave nei primi anni sessanta. Fino ai primi anni ottanta l'automazione consisteva principalmente nel comandare a distanza (*telecomandi*) gli elementi degli impianti, in particolare quelli di propulsione e gli ausiliari, e nel sorvegliarne il corretto funzionamento (*telemisure, teleallarmi*).
Si automatizza per:
• ridurre il numero di persone dell'equipaggio;
• aumentare il numero delle nuove costruzioni ad alto livello di specializzazione: porta container, navi per trasporto di prodotti petrolchimici, traghetti e navi da crociera, etc;
• la sempre maggiore complessità degli apparati ed impianti installati a bordo;
• amministrare in maniera ottimale apparecchiature o impianti;
• monitorare macchinari o impianti per ottenere interventi contro i guasti più tempestivi;
• avere una diagnostica facilitata dalla raccolta storica dei dati acquisiti e manutenzioni preventive;
• l'esigenza di una maggiore sicurezza operativa.
Si ottiene un miglioramento delle condizioni di lavoro dell'equipaggio, non più costretto a pesanti turni di lavoro notturni, a essere per lunghi periodi nei locali macchine con condizioni ambientali stressanti e nocive (rumore, vapori d'olio, ventilazione e temperature eccessive). L'apparato motore può essere sorvegliato centralizzando comandi, allarmi e informazioni in una o più posizioni (sala macchine, ponte di comando), dalle quali anche solo una persona può comodamente controllare il buon funzionamento dell'apparato di propulsione e degli impianti ausiliari e di sicurezza della nave.
Sono sempre più i comandi accentrati nei ponti di comando. Si è passati da *telegrafo di macchina* e poche apparecchiature per la navigazione ai moderni ***sistemi di navigazione integrata*** che, utilizzando le informazioni scambiate tra le varie apparecchiature, permettono di ottimizzare la conduzione della nave nella sua globalità.



Un moderno impianto d'automazione navale permette di comandare e di controllare la quasi totalità degli impianti di bordo da più punti (vedi figura al lato): sala macchina, ponte di comando, cabina comandante e direttore di macchina, etc… L'abbassamento dei costi dei micro calcolatori hanno permesso di realizzare compatte unità da campo connesse agli elementi dell'impianto mediante sensori ed attuatori, in grado di operare autono-mamente e di scambiarsi informazioni in tempi molto piccoli e con grande affidabilità. Si è passati dagli ingombranti quadri sinottici, pieni di

lampadine e con un intrico di fili di connessione difficilmente modificabili, ai moderni schermi video grafici a colori, dove è possibile espandere i dettagli della parte dell'impianto che interessa, con software in grado di interagire con l'operatore con interfacce grafiche. Se un tempo la logica era totalmente cablata, comportando un gran numero di cavi e dispositivi elettrici e conseguenti difficoltà per aggiornarlo e migliorarlo, un moderno impianto d'automazione è facilmente espandibile, grazie a un aggiornamento di software e all'ag-giunta o sostituzione di dispositivi che fanno capo a un calcolatore.
Un sistema integrato d'automazione trova applicazione in diverse aree della nave: la propulsione ed i servizi associati, la gestione ottimale delle risorse energetiche, la navigazione, la gestione del carico, la logistica e l'amministrazione, le comunicazioni.
Le informazioni che giungono al ponte di comando ed i comandi che sono da lì inviati, si possono dividere in tre grosse categorie:
• impianti di navigazione e di gestione;
• impianti di propulsione, ausiliari;
• impianti di sicurezza e di allarme.
Storicamente, i primi erano di competenza degli *ufficiali di coperta*, i secondi di quelli di *macchina*, e tutto faceva capo al comandante. I terzi sono più recenti e non meno importanti.
Nei moderni sistemi di navigazione integrata queste tre categorie interagiscono tra loro: le condizioni esterne alla nave, le problematiche della rotta e dei tempi di viaggio, i consumi, l'assetto della nave, lo stato del carico, la sicurezza, ecc, vanno gestite nella loro globalità ed interazione. Spesso occorre ripartire la potenza generata a seconda delle condizioni di navigazione, per esempio nelle navi con propulsione diesel elettrica, la potenza richiesta durante le manovre non deve ridurre il comfort dei passeggeri, quindi vi è una precisa dipendenza di questi impianti.

1.3 Impianti di navigazione

Impianti classici sono la macchina del timone, il pilota automatico, la girobussola, il radar e lo scandaglio sonoro. Oggi esistono numerosi altri strumenti, come il radar anticollisione e il sistema di rilevamento satellitare; permettono di conoscere con precisione sempre migliore la posizione, la rotta, la velocità, anche di altre navi transitanti in zona.
I vari apparati per la radionavigazione sono connessi mediante interfacce seriali standard ed il protocollo è pure standard (NMEA 0183). In questi ultimi anni è stato anche rivoluzionato il sistema di telecomunicazioni di bordo. Scompare la figura dell'ufficiale marconista e viene completamente automatizzato il sistema di chiamata radio.
Si aggiungono numerosi dispositivi, in base al sistema GMDSS (*Global Maritime Distress and Safety System*), con lo scopo di rendere più sicure le comunicazioni di emergenza e di facilitare le operazioni di ricerca e di soccorso in mare.
Gli impianti satellitari hanno trovato un ruolo determinante anche per la salvaguardia della vita umana in mare (SOLAS, *Safety of Life at Sea*) per la localizzazione delle boe di segnalazione e per la gestione dei messaggi di richiesta di aiuto e gli avvisi alla navigazione.

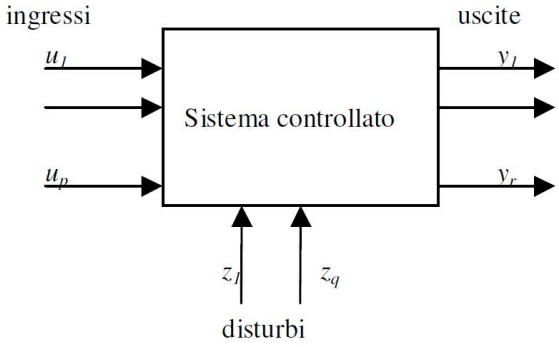
1.4 Automatismi, apparati di controllo, di telemisura e di allarme

Alcuni esempi:
• impianti principali di propulsione, circuiti ausiliari necessari al moto del motore e della linea d'assi;
• controllo automatico dei gruppi elettrogeni principali e di riserva e loro gestione;
• controllo automatico di vari ausiliari: calderine, compressori, pompe, depuratori nafta, separatori, etc.;

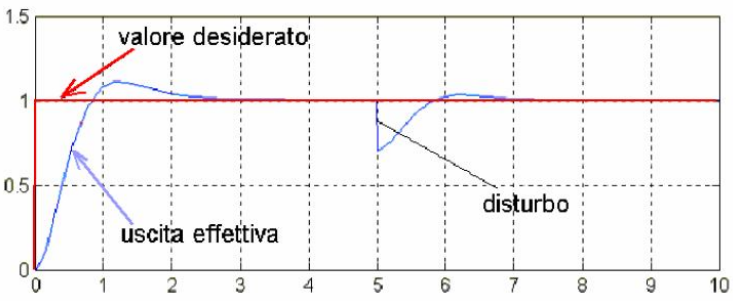
• impianti di allarme e di monitoraggio delle grandezze fisiche di maggior interesse: temperature, pressioni, numero di giri asse, potenza elettrica, livelli, portate, etc., visualizzazione in tempo reale delle tendenze (trend), raccolta storica per diagnosi ed analisi delle avarie;
• sistemi di segnalazione e di protezione da incendi ed allagamenti;
• sistemi di ormeggio e disormeggio, con possibilità di mantenere costante la tensione sui cavi, anche al variare delle condizioni ambientali e di assetto della nave;
• sistemi di stabilizzazione al rollio mediante pinne attive o travaso di casse di zavorra.
Tutti questi sistemi sono soggetti a ben precise normative da parte dei registri di classifica.
Un moderno impianto di automazione utilizza regolatori, trasduttori, attuatori, calcolatori di processo e linee di trasmissione.

1.5 Terminologia

Per ***controllo*** si intende l'insieme dei procedimenti mediante i quali si impone a talune variabili, che caratterizzano il funzionamento di un impianto o di una macchina, di seguire istruzioni o programmi prestabiliti, realizzando così determinate prestazioni. In un ***controllo automatico*** le azioni di controllo sono svolte da dispositivi capaci di sostituire l'intervento umano.
L'impianto o macchinario soggetto a controllo è indicato genericamente come ***sistema controllato*** o semplicemente ***sistema;*** il suo funzionamento, rappresentato da certe leggi e parametri, si indica come *processo.*
Il ***sistema*** è un insieme di entità connesse tra di loro tramite reciproche relazioni, interagenti tra loro, formando un tutt'uno in cui, ogni parte, dà un contributo per una finalità comune.
Le grandezze del sistema che variano nel tempo sono dette ***variabili,*** altrimenti si parla di ***costanti***.
Le funzioni che rappresentano l'andamento delle variabili nel tempo sono dette ***segnali***.
Si chiamano *ingressi* del processo o del sistema le variabili che ne influenzano il funzionamento, essi possono essere:



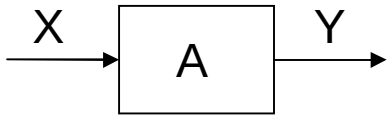
• ***ingressi di controllo*** (variabili manipolabili: il loro andamento può essere arbitrariamente imposto in modo da consentire di intervenire sul sistema)
• ***ingressi di disturbo o disturbi*** (variabili non manipolabili: il loro andamento non può essere influenzato dal sistema di controllo e non può essere esattamente prevedibile).
Le ***uscite*** del sistema sono variabili che caratterizzano l'andamento del processo nel tempo, la cui osservazione permette di valutare le prestazioni effettivamente ottenute; i loro valori rappresentano il risultato effettivo del controllo automatico.
Le *variabili di ingresso* sono *indipendenti* o *cause*, quelle di *uscita* sono *dipendenti* o *effetti*.
Un controllo automatico dovrà agire in modo che la variabile d'uscita segua il più fedelmente possibile l'andamento imposto alla variabile di ingresso (riferimento), nonostante intervengano disturbi e/o variazioni parametriche (derive, scostamenti dai valori nominali, etc…). La ***fedeltà di risposta*** è quindi la capacità di un sistema controllato di produrre uscite il più possibile vicine a quelle desiderate.



L'***errore*** è la differenza tra il termine di riferimento o valore desiderato e l'uscita del sistema, esso dipende dalle caratteristiche globali del controllo automatico, da eventuali disturbi, dallo stato iniziale e dall'incertezza del processo.

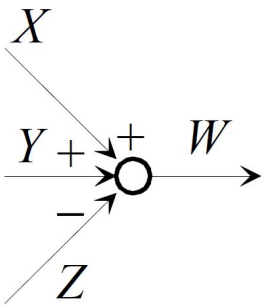
Il ***regolatore o controllore*** è l'insieme dei dispositivi ai quali è affidato il compito di realizzare controllo del processo. Per fare questo il regolatore dovrà fare sul sistema un'***azione di controllo***, intervenendo su una o più variabili in modo da produrre sul sistema controllato l'uscita desiderata.

1.6 Algebra degli schemi a blocchi



Nella rappresentazione dei sistemi di controllo sono è sono molto usati gli schemi a blocchi. Il blocco in figura ha il valore A, l'ingresso è X e l'uscita Y, riportati sulle frecce. L'uscita ha valore pari al prodotto tra ingresso e il blocco, ovvero $Y = AX$. Notiamo che il valore del blocco si può scrivere come il rapporto tra uscita e ingresso: $A = \frac{Y}{X}$.

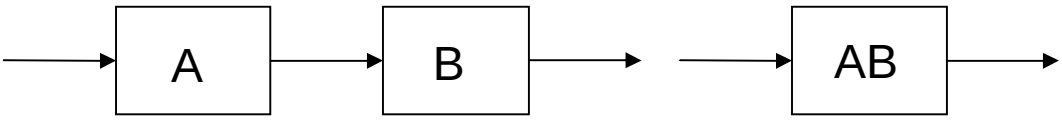
Il nodo sommatore



L'uscita del nodo è data dalla somma algebrica dei segnali che entrano nel nodo, ciascuno
preso con il proprio segno (se non è indicato il segno, si assume per convenzione il segno
positivo).
W=X+Y-Z

Blocchi in cascata

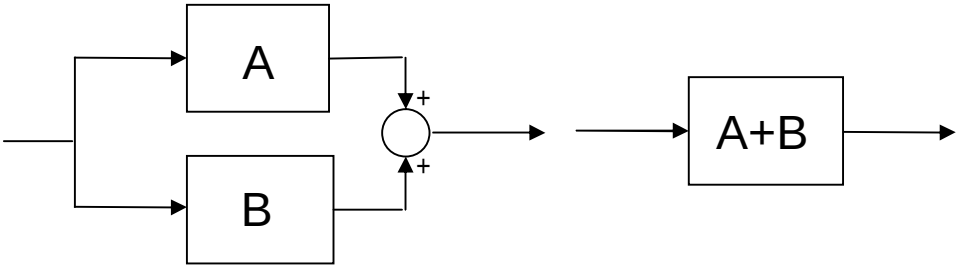
Due sistemi si dicono in cascata se l'uscita di uno è l'ingresso dell'altro. Graficamente si ha la seguente situazione:



Il blocco equivalente equivale al prodotto tra i valori di ciascun blocco.

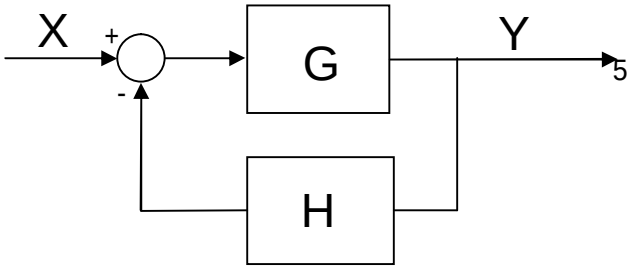
Blocchi in parallelo

I due blocchi hanno lo stesso ingresso; l'uscita è data dalla somma delle uscite dei due blocchi.



Il blocco equivalente consiste nella somma tra i valori dei blocchi, tenendo conto dei segni presenti sul nodo sommatore.

Collegamento in retroazione



Se l'uscita è riportata all'ingresso tramite un ra-mo di retroazione e un nodo sommatore, siamo in presenza di un collegamento in retroazione. Essa può essere positiva o negativa, a seconda del segno presente nella parte inferiore del no-do. Solitamente, come si vedrà più avanti, è ne-gativa. Il ramo col blocco G è detto ramo diret-to; quello col blocco H è detto ramo di retroa-zione.

Si può dimostrare che il blocco equivalente assume valore $G_0 = \frac{G}{1+GH}$, se la retroazione è negativa; nel caso di retroazione positiva: $G_0 = \frac{G}{1-GH}$.

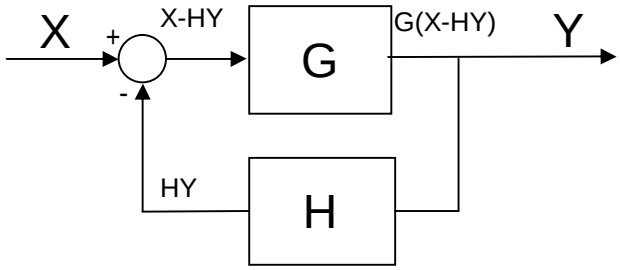
Per dimostrarlo, scriviamo i valori dei segnali portati sui vari collegamenti, iniziando da HY in uscita dal blocco H, quindi $X - HY$ in uscita dal nodo sommatore ed infine $G(X - HY)$ che sarà all'uscita.

Possiamo scrivere, quindi, che $Y = G(X - HY)$, da cui $Y = GX - GHY$. Portiamo i monomi in Y a sinistra e poniamo Y in evidenza:

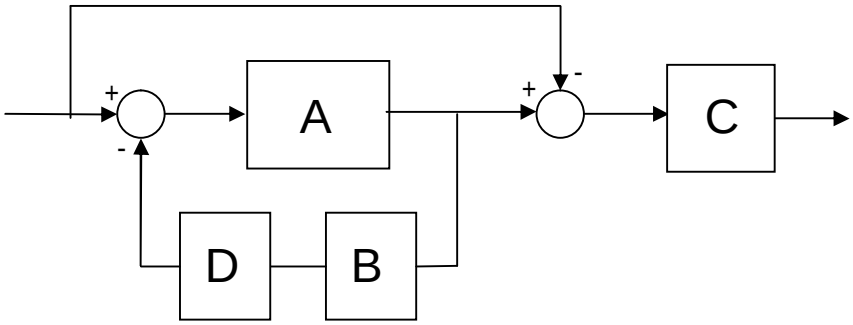
$Y + GHY = GX$

$Y(1+GH) = GX$

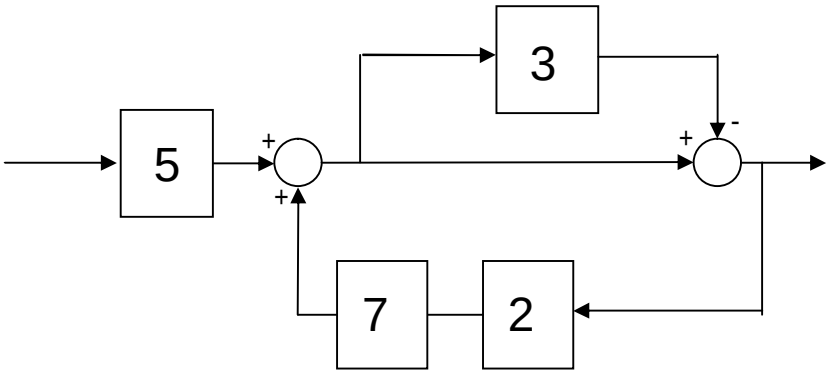
Da qui possiamo ricavare il rapporto $\frac{Y}{X} = \frac{G}{1+GH}$, che rappresenta proprio il valore del blocco equivalente.



Esercizio. Riduci i seguenti schemi ad un unico blocco equivalente.



Risultato:
$\left(\frac{A}{1+ABD} - 1\right)C$



Risultato $\frac{10}{27}$