

# L'innovazione tecnologica e i limiti del regolatore di Watt

di **MARIO CAPUZZIMATI**

## INTRODUZIONE

Un'indagine condotta da Altroconsumo su 53 000 automobilisti di 10 paesi europei, pubblicata online il 16 gennaio 2026, rivela l'alta affidabilità delle auto del gruppo Toyota, con la Lexus al primo posto e la Toyota al secondo. In generale, tutte le giapponesi si collocano nella fascia alta dell'affidabilità.

L'assenza di difetti era la stella polare dell'ingegnere giapponese **Taiichi Ohno** (1912 – 1990), unanimemente considerato il padre del **Toyota Production System**. Nel 1978 Ohno riassunse la sua lunga esperienza lavorativa nel libro *Toyota Production System*, tradotto in italiano da Einaudi col titolo *Lo spirito Toyota*.

Siamo negli anni '50; Ohno ricorda come l'automazione dei processi produttivi portava, in presenza di anomalie, alla produzione di grandi quantità di pezzi difettosi; in occidente si tendeva a intervenire a posteriori correggendo i pezzi difettosi, mentre lui riteneva si dovesse subito bloccare la produzione, affidando alle macchine stesse il compito di rilevare l'anomalia e arrestarsi.

Ohno racconta che l'idea gli venne osservando la macchina per tessere inventata dal fondatore della Toyota Motor Company, Sakichi Toyoda (1867 – 1930):

"Nel telaio era inserito un dispositivo che sapeva individuare le eventuali disfunzioni produttive, che sapeva riconoscere se la trama o l'ordito erano difettosi, bloccando automaticamente la lavorazione. In tal modo veniva impedita una produzione non conforme ai progetti". (Lo spirito Toyota, Piccola Biblioteca Einaudi, 1993)

## L'INSODDISFAZIONE PER IL REGOLATORE DI WATT

Gli sforzi per migliorare la precisione delle macchine accompagnarono la rivoluzione industriale, nel continuo intrecciarsi di nuove sfide tecnico-scientifiche e nuove macchine per vincerle. La crescente importanza delle rilevazioni cronografiche, del controllo degli alberi di trasmissione e delle macchine utensili, richiedeva un controllo più puntuale della velocità di rotazione.

Con le rilevazioni cronografiche si cercava di studiare diverse classi di fenomeni, dai tempi di reazione o di passaggio, ai segnali elettrici, alle osservazioni astronomiche; lo scorrere del tempo era rilevato con registrazioni su un rullo di carta e la costanza della velocità di rotazione del rullo garantiva la registrazione uniforme del tempo.

Sulla frontiera dell'innovazione tecnologica, negli anni '40 dell'800 William Siemens scriveva al fratello Werner per sottolineare l'intrinseca **inadeguatezza del regolatore di Watt** a mantenere costante la velocità a fronte di variazioni permanenti del carico.

Migliore era senz'altro il nuovo tipo di regolatore ("Regolatore differenziale") che i Siemens avevano costruito e che cercavano di proporre al mercato inglese; un regolatore che migliorava di molto sia la velocità di risposta sia la precisione a regime, senza tuttavia annullare l'errore. Entrambi i regolatori operavano infatti esercitando la sola **azione proporzionale**.

## L'ANALISI MATEMATICA DEL REGOLATORE DI WATT

Vediamo perché esaminando il regolatore di Watt (FIG. 1).

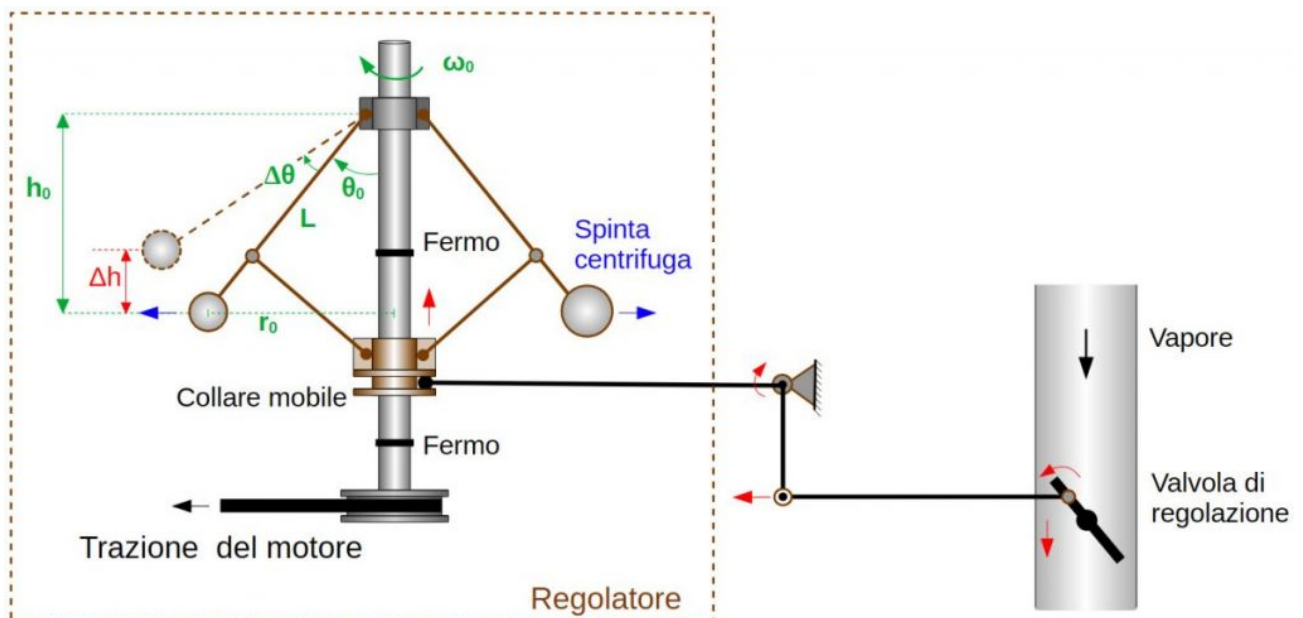


FIG. 1

Il regolatore si muove come un pendolo conico su cui agiscono (FIG. 2) la tensione del braccio, la forza peso e la forza

centrifuga. A regime, il punto di lavoro  $(\Omega_0, \Omega_0, h_0)$  corrisponde alle sfere che ruotano in un piano orizzontale.

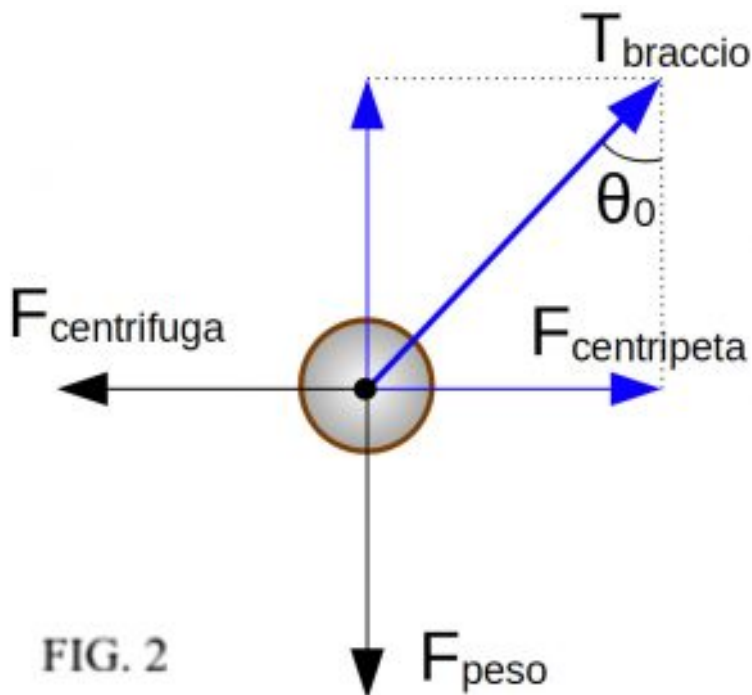


FIG. 2

Il movimento verticale è nullo per il bilanciamento della forza peso con la componente verticale della tensione del braccio:

$$T_{braccio} \cdot \cos(\theta_0) = m \cdot g$$

da cui:

$$T_{braccio} = \frac{m \cdot g}{\cos(\theta_0)}$$

Sul piano orizzontale la forza centripeta bilancia quella centrifuga:

$$T_{braccio} \cdot \sin(\theta_0) = m \cdot r_0 \cdot \omega_0^2$$

se in questa espressione sostituiamo quella ricavata dall'equilibrio verticale, otteniamo:

$$\tan(\theta_0) = \frac{r_0 \cdot \omega_0^2}{g}$$

Il raggio  $r_0$  dipende dall'apertura dell'angolo  $\theta_0$ :

$$r_0 = L \cdot \sin(\theta_0)$$

Sostituendo quest'ultima espressione nella precedente, semplificando il seno e risolvendo rispetto al coseno, otteniamo:

$$\cos(\theta_0) = \frac{g}{L \cdot \omega_0^2}$$

All'equilibrio le sfere si trovano all'altezza  $h_0$ , che dipende dall'angolo  $\varphi_0$ :

$$h_0 = L \cdot \cos(\theta_0)$$

Confrontando le ultime due espressioni, ricaviamo:

$$h_0 = \frac{g}{\omega^2}$$

Quando la velocità subisce una variazione, passando da  $\varphi_0$  a  $\varphi_0 + \Delta\varphi$ , a causa di una variazione nel carico, l'altezza passa da  $h_0$  a  $h_0 + \Delta h$ . Per piccoli valori di  $\Delta\varphi$  possiamo pensare proporzionali le variazioni  $\Delta\varphi$  e  $\Delta h$ . Linearizzando l'espressione precedente nell'intorno del punto di lavoro  $(\varphi_0, h_0)$  otteniamo:

$$\Delta h \approx - \frac{2g}{\omega_0^3} \cdot \Delta\omega$$

Questa relazione esprime la dipendenza proporzionale, con

$$k_p = \frac{\Delta h}{\Delta \Omega}$$

, del movimento verticale  $\Delta h$  delle sfere dalle variazioni della velocità di rotazione  $\Delta \Omega$ ; esprime cioè l'attitudine del regolatore di esercitare la sola **azione di controllo proporzionale**.

L'ampiezza del movimento del collare dipende dalla geometria che lo collega alle sfere.

Il regolatore di Watt presentava quindi un duplice problema; da un lato non era in grado di riportare la velocità al livello impostato quando nel carico interveniva una variazione permanente; dall'altro, il guadagno  $k_p$ , cioè la sua sensibilità, variava con il variare del punto di lavoro; il suo comportamento mancava quindi di uniformità e ciò contribuiva ai fenomeni di pendolamento della velocità di rotazione.

## CONCLUSIONE

Le oscillazioni della velocità di rotazione inficiavano sia gli studi scientifici sia la qualità delle produzioni. Il problema era avvertito dai centri leader nell'innovazione. Ne sapeva qualcosa anche J. C. Maxwell, che proprio alle prese con uno di questi regolatori fu indotto a studiare la stabilità dei sistemi retroazionati.

L'esigenza di migliorare la precisione delle lavorazioni porterà Werner Siemens a introdurre "consapevolmente" l'azione di controllo integrale nel 1882.

Oggi, la nuova riforma degli istituti tecnici indica tra le competenze specifiche per l'articolazione di Automazione quella di "Contribuire all'innovazione aziendale e miglioramento dei processi produttivi". In generale, allora come oggi, occorre trovarsi sulla frontiera dell'innovazione per avvertire certi problemi ed essere protagonisti della loro soluzione.