

Università degli studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria
Meccanica e Meccatronica

REGOLATORI PID AUTOTUNING PER IL CONTROLLO DELLA TEMPERATURA

RELATORE: Ch.mo Prof. Richiedei Dario

LAUREANDO: Cecchin Francesco

ANNO ACCADEMICO: 2013 – 2014

SOMMARIO

Introduzione	1
- CAPITOLO 1 -	
Controllori pid	2
1.0.0.Cenni storici	2
1.1.0.Struttura e funzionamento del controllore	4
1.2.0.Indici di prestazione	8
1.3.0.Funzione di auto-tuning	10
- CAPITOLO 2 -	
Processo termico	12
2.0.0.Modello matematico del processo termico	12
- CAPITOLO 3 -	
Metodi di identificazione dei parametri	17
3.0.0.Metodo di approssimazione della risposta al gradino con ritardo pari al 5% del valore di regime	18
3.1.0.Metodo di approssimazione della risposta al gradino con ritardo pari all'1% del valore di regime	20
3.2.0.Metodo di approssimazione della tangente	21
3.3.0.Metodo di approssimazione della risposta al gradino con ritardo reale	23
3.4.0.Simulazione e analisi numerica	25
- CAPITOLO 4 -	
Tecniche di sintesi del controllore	27
4.0.0.Metodo di Ziegler e Nichols	29
4.1.0.Metodo di Cohen e Coon	30
4.2.0.Metodi di Chien Hrones Reswick	31

4.3.0. Metodi ISE, ISTSE, IST ² SE	33
4.4.0. Metodo di Skogestad	35
4.5.0. Simulazione e analisi numerica	37
4.5.1. Schemi di simulazione	37
4.5.2. Osservazioni risultati e simulazioni con parametri ideali	41
4.5.3. Osservazioni risultati e simulazioni con parametri errati	46

- CAPITOLO 5 -

Metodi di identificazione dei parametri e tecniche di sintesi del controllore 52

5.0.0. Simulazione e analisi numerica	52
---------------------------------------	----

Osservazioni e conclusioni	54
-----------------------------------	-----------

Bibliografia	57
---------------------	-----------

- Appendice A -

Risultati numerici simulazioni 58

A.1. Risultati numerici tecniche di sintesi del controllore sovrastima dei parametri +25%	58
A.2. Risultati numerici tecniche di sintesi del controllore sottostima dei parametri -25%	68
A.3. Risultati numerici tecniche di sintesi del controllore sovrastima dei parametri +100%	78
A.4. Risultati numerici tecniche di sintesi del controllore sottostima del ritardo -95%	88
A.5. Risultati numerici tecniche di sintesi del controllore e metodi di identificazione dei parametri	91

- Appendice B -

Listati matlab 99

B.1. Programmi metodi identificazione dei parametri	99
B.2. Programmi tecniche di sintesi	103

INTRODUZIONE

I regolatori di tipo PID sono ancora oggi largamente utilizzati in ambito industriale grazie a un rapporto costi benefici difficilmente ottenibile con altre tecniche.

Tuttavia, molto spesso, gli operatori addetti ricavano manualmente i valori dei parametri PID, sulla base della loro esperienza e conoscenza del processo da controllare. È evidente che una taratura manuale può essere onerosa in termini di tempo richiedendo in generale molte prove, inoltre, essendo lasciata esclusivamente all'abilità dell'operatore, può essere lontana dal soddisfare un certo criterio di ottimalità. Per questo motivo è di aiuto avere a disposizione formule e metodi che consentano di determinare i parametri del regolatore sulla base della funzione di trasferimento stimata del processo da controllare.

Le tabelle di taratura forniscono risultati precisi ma il prezzo da pagare è quello della conoscenza analitica del processo da controllare. Per questo motivo il loro impiego non è sempre sfruttato e gli operatori adibiti al controllo si riducono a tarare l'algoritmo sulla base ancora della loro esperienza e di considerazioni qualitative.

Allo scopo di rendere automatica la taratura dei controllori Pid, i regolatori in commercio oggi offrono una funzionalità detta di auto-tuning. Attivando questa funzione il regolatore fa variare in qualche modo la variabile di controllo al fine di ricavare alcuni parametri del processo utili per poi tarare l'algoritmo Pid. Attraverso questa tecnica non si ricava il vero e proprio modello del sistema da controllare ma in compenso si ottengono, dalla risposta del processo alcuni semplici parametri dai quali si può risalire a un modello approssimato del sistema sufficiente per la taratura del controllore.

Fissata la struttura dell'algoritmo (Pid) e la tipologia di sistema da controllare le varie tecniche di auto-tuning si differenziano principalmente per le formule di taratura impiegate e per il metodo attraverso il quale si ricavano i parametri del processo.

Il lavoro presentato nelle pagine a seguire è completamente rivolto proprio a questa nuova funzionalità. La prima parte, dedicata alla determinazione dei parametri del modello, prende il nome di identificazione dei parametri mentre la seconda invece, dedicata ai metodi di taratura, prende il nome di sintesi del controllore. In questa tesi ci concentreremo solamente su un'unica classe di processi: quelli termici, descritti dal modello termico, e analizzeremo tutti i principali metodi di identificazione e taratura al fine di scoprire quali offrono risultati e caratteristiche migliori per raggiungere, nel modo più veloce e stabile, una temperatura finale il più simile possibile a quella di riferimento impostata.

Per ottenere inoltre una visione completa del problema testeremo il sistema in più situazioni di interesse pratico: partiremo dal caso più classico per poi proseguire al caso di saturazione del controllore e delle tecniche per raggiungere questo problema.

L'intera fase di calcolo dei parametri, del modello e del regolatore, verrà eseguita con l'editor di Matlab mentre i risultati pratici finali verranno simulati attraverso Simulink: un editor grafico sempre di Matlab adibito alla simulazione dei sistemi dinamici.

CAPITOLO 1

Controllori pid

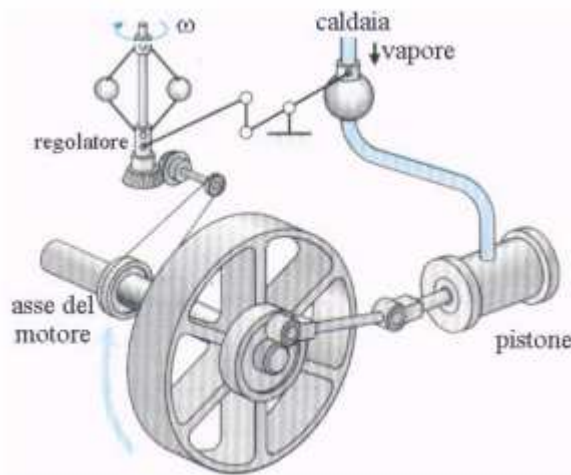
1.0.0.Cenni storici

Il primo esempio di sistema di controllo vero e proprio fu il regolatore centrifugo di velocità (flyball governor) sviluppato da James Watt nel 1788.

Il funzionamento di tale sistema risultò essere semplice ma molto efficace.

Due sfere sono collegate, per mezzo di due aste rigide, a un albero in rotazione e a un elemento mobile collegato a sua volta ad una valvola di controllo del vapore.

Quando l'albero ruota la forza centrifuga fa distanziare le due palle chiudendo la valvola del vapore. Maggiore è la velocità e minore è ovviamente 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 quindi ad aumentare.



Questo rappresenta uno dei primi sistemi, che verranno analizzati meglio negli anni successivi, di regolazione proporzionale: la velocità è proporzionale alla quantità di vapore.

Watt fu il primo ad intuire l'importanza di un controllo in feedback.

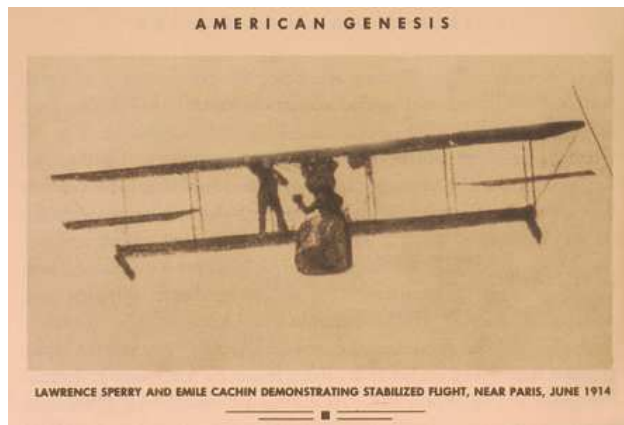
Nel 1868 James Clerk Maxwell riprese lo stesso sistema e mise a punto uno studio analitico sulla sua stabilità. Le sue prime applicazioni furono la regolazione di giri delle macchine a vapore. Maxwell osservò per la prima volta esplicitamente il ruolo stabilizzante della retroazione intuendo la necessità di un effetto integrativo nel feedback in modo da annullare l'errore a regime.

In seguito Edward John Routh (1831-1907) (allievo di Maxwell) generalizzò la conclusione di Maxwell per la classe dei sistemi lineari descrivendo la relazione tra il modello matematico di un sistema e le sue proprietà di stabilità.

Il primo PID, ovvero il primo regolatore proporzionale, integrativo e derivativo venne realizzato da Elmer A. Sperry (1911) nel corso dei suoi studi sulla stabilizzazione autonoma della rotta delle navi mercantili e militari. (prima installazione: corazzata USS Delaware, BB-28)

Lo stesso Sperry sviluppò in seguito anche altri strumenti di navigazione quali la bussola giroscopica e il giroscopio.

Solo nel 1914 il figlio di E.A. Sperry, Lawrence, dimostrò, con successo, l'uso di tale giroscopio realizzando uno stabilizzatore automatico per l'assetto di un aereo.



Negli anni successivi i sistemi di controllo automatico ebbero un ruolo importante negli sviluppi tecnologici quali ad esempio la realizzazione dei primi aerei dei fratelli Wright agli inizi del ventesimo secolo.

Il primo articolo scientifico sull'analisi dei controlli PID venne pubblicato nel 1922 dall'ingegnere meccanico Nicolas Minorsky che realizzò uno dei primi piloti automatici per la navigazione.

Nel 1934 venne poi pubblicato da Albert Callander il primo rapporto tecnico che descriveva i metodi di taratura dei controllori PID per una determinata classe di sistemi da controllare.

Nel 1942 venne invece pubblicato lo storico articolo di J.G. Ziegler e N.B. Nichols, sempre sui metodi di taratura dei PID, che rappresenta ancora oggi uno dei testi più citati nei libri di tutto il mondo e uno dei più usati nella pratica.

In seguito, alla fine della guerra, gli studi nel campo dei controlli automatici espansero il suo campo di applicazione anche ai sistemi militari ed industriali. Anche l'avvento dei reattori nucleari svolse un ruolo significativo grazie all'esigenza di sistemi che richiedevano il minimo intervento umano per il controllo della potenza del reattore.

L'avvento poi delle macchine a vapore, e la successiva rivoluzione industriale fornì agli uomini potenze controllabili sempre più elevate. L'esigenza di controllare grandi potenze in uscita con elevata precisione utilizzando ingressi a bassa potenza, portò a un costante sviluppo dei sistemi retroazionati.

Questi principi, applicati alle varie tecniche di produzione industriale, ebbero come conseguenza notevoli miglioramenti in termini di qualità e quantità dei prodotti.

Infine l'introduzione dei calcolatori digitali, ed in particolare dei microprocessori, come elementi di controllo ebbe un enorme impatto sulla progettazione dei regolatori per via delle notevoli potenzialità di questi sistemi.

Ancora oggi i regolatori PID, per i numerosi vantaggi che questi offrono, vengono largamente utilizzati.

1.1.0. Struttura e funzionamento del controllore

Con il termine controllo definiamo l'azione svolta per portare e mantenere ad un valore prefissato un parametro fisico di un impianto o di un processo (ad esempio, la temperatura di un forno, la posizione del braccio di un robot, la velocità di rotazione di un motore, ecc.).

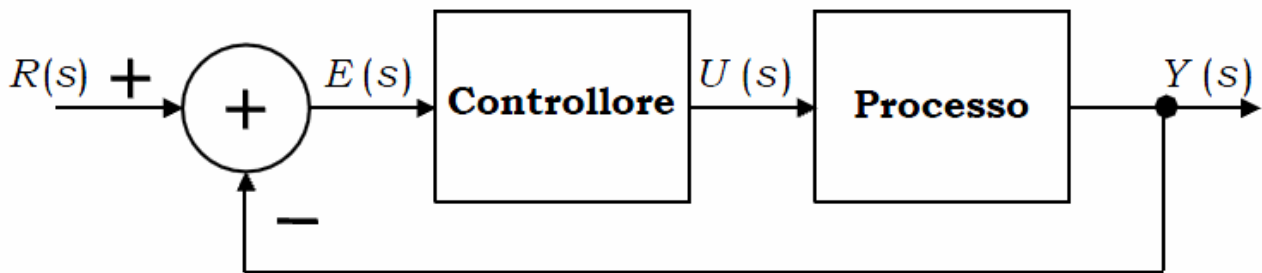
Se indicando con $r(t)$ il valore che si vuole far assumere alla variabile controllata e con $y(t)$ il valore effettivamente assunto da tale grandezza, possiamo definire la funzione errore come la differenza delle due grandezze:

$$e(t) = r(t) - y(t).$$

Lo scopo dell'azione di controllo è quello di applicare il miglior segnale $u(t)$ (detta variabile di controllo) che rende il sistema asintoticamente stabile e che soddisfi determinati obiettivi progettuali.

Nella realtà, a differenza di quanto rappresentato poi, il segnale di controllo non viene applicato direttamente al processo ma ad un attuatore, che interpreta l'istruzione fornitagli dal regolatore, per variare alcune condizioni. (nel caso di un forno, per esempio, l'attuatore avrà il compito di imporre la temperatura).

Utilizzando la trasformata di Laplace possiamo rappresentare il nostro problema con il seguente schema a blocchi:

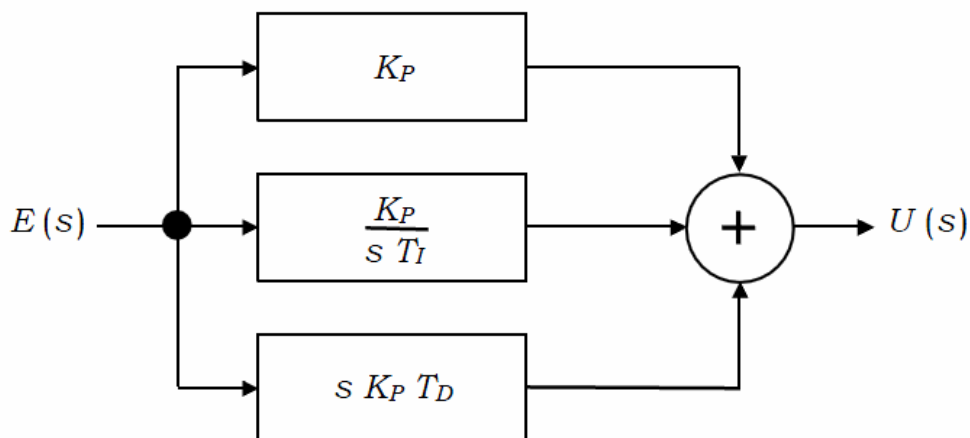


Nel sistema, il controllore svolge un ruolo molto importante e ha lo scopo di trasformare il segnale di errore in un segnale da applicare al processo sottoposto a controllo.

Tra i controllori più diffusi, che tratteremo, fanno parte i PID.

I PID per controllare l'intero sistema si servono combinatamente di tre funzioni di controllo: proporzionale, integrativa e derivativa (da qui l'acronimo PID).

Lo schema generale di un controllore PID è il seguente:



Il legame uscita – ingresso è rappresentato, nel dominio di Laplace, dalla seguente equazione:

$$U(s) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D \right) \cdot E(s)$$

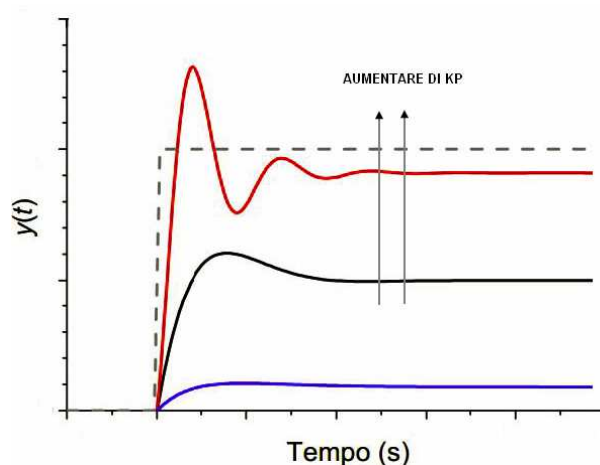
mentre nel dominio del tempo dall'equazione:

$$u(t) = K_P \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right)$$

dove i parametri: K_P , T_D e T_I sono tre costanti positive modificabili a scelta dall'operatore esterno.

Ogni funzione del controllore svolge un ruolo ben preciso durante il processo di controllo. Analizziamo separatamente di seguito il significato di questi tre termini.

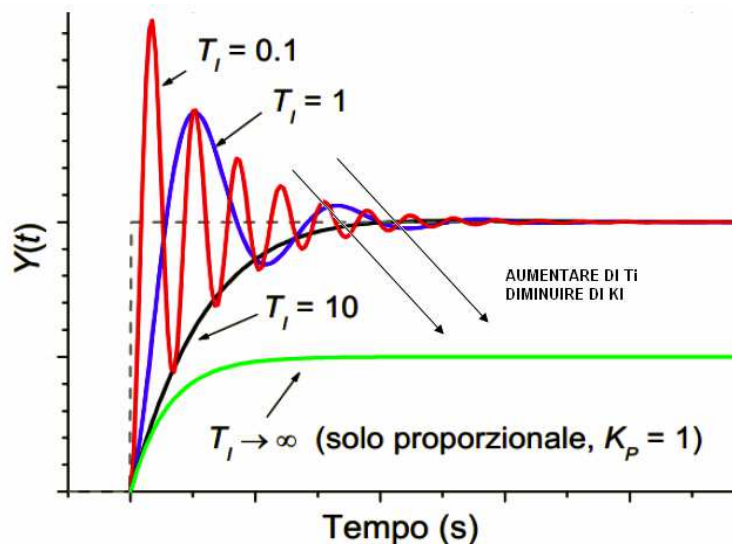
- Il primo termine K_P è detto coefficiente proporzionale. Il valore della variabile di controllo risulta essere proporzionale all'errore cioè alla differenza tra segnale di riferimento e misurato. Maggiore è il valore di K_P e più elevata è la reazione del controllore anche per valori modesti dell'errore. In termini statici, usare comunque un K_P elevato riduce l'errore a regime, diminuisce eventuali effetti di disturbo del rumore sulla variabile controllata. Dal punto di vista dinamico invece, l'introduzione di un termine proporzionale (P) nell'anello di controllo generalmente produce un aumento della velocità di risposta del sistema, e quindi una maggiore prontezza nell'inseguimento del riferimento, ma, allo stesso tempo, una diminuzione dei margini di stabilità del sistema.



- Il secondo termine ST_I è detto contributo integrale. La variabile di controllo risulta essere proporzionale all'integrale dell'errore. Dal punto di vista statico, la funzione principale del termine integrale consiste nell'annullare l'errore a regime per un ingresso a gradino. Infatti tale termine integra l'errore nel tempo e quindi un errore costante provoca un incremento dell'azione di controllo fino a che l'errore non si è completamente annullato.

In termini dinamici invece, l'introduzione del termine integrale porta ad un aumento del ritardo di fase della catena di controllo pari a $\pi/2$, e quindi determina un peggioramento dei margini di fase ed ampiezza del sistema retroazionato.

Il contributo integrale risulta essere la componente più adatta per tenere in considerazione l'evoluzione avuta dell'errore in passato. Il parametro con il quale l'operatore può variare il suo contributo è il termine T_i .



- Il terzo termine STd è detto contributo derivativo

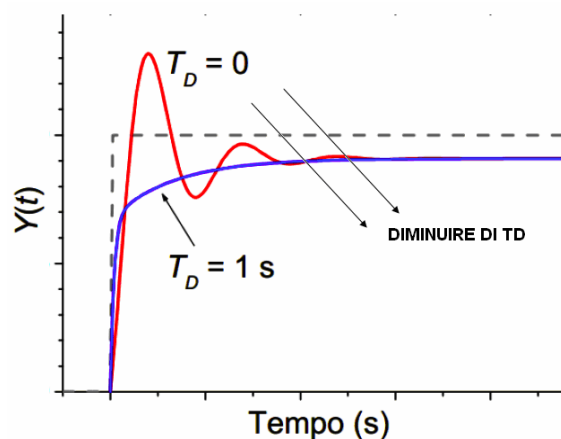
La variabile di controllo risulta essere proporzionale alla derivata del segnale di ingresso.

L'azione derivativa ha lo scopo di tentare di anticipare l'andamento dell'errore negli istanti futuri. Un valore infatti positivo della derivata dell'errore sottolinea come quest'ultimo stia incrementando e quindi maggiore deve essere il peso della variabile di controllo.

Il contributo di tale azione può essere variato dall'operatore agendo sul parametro T_d . Più elevato è il suo valore e più si dà importanza a quello che si presume essere l'andamento futuro dell'errore, conferendo maggiore prontezza all'algoritmo, mentre valori più bassi trasferiscono sulla variabile di controllo variazioni più contenute.

Altra funzione del termine derivativo inoltre consiste nel migliorare i margini di stabilità del sistema fornendo un anticipo di fase all'anello di controllo in retroazione.

Per contro il termine derivativo purtroppo ha la caratteristica di amplificare i segnali con contenuto armonico a frequenze elevate quindi in caso di segnale di ingresso effetto da errore questa funzione può portare a un peggioramento del controllo.



L'insieme di queste tre funzioni permettono al controllore PID di svolgere efficacemente la sua azione di controllo.

Benché utilizzino una tecnologia realizzativa "antiquata" per gli standard tecnologici attuali, ancora ad oggi, i PID sono tra i controllori più diffusi al mondo.

Il motivo di questo grande successo è da ricercare nei grandi vantaggi che questi offrono.

Tra le diverse caratteristiche positive, che tali sistemi garantiscono, possiamo ricordare:

- Robustezza
- Affidabilità
- Semplicità di utilizzo (l'operatore può intervenire modificando solo tre parametri) e di taratura dovuta a una non difficile interpretazione della relazione di causa-effetto che lega la variazione di un parametro all'azione di controllo che ne segue.
- Per sfruttare pienamente algoritmi, di controllo più complessi, è necessaria una conoscenza approfondita del processo da controllare. Nel caso dei PID questo non è necessario.
- Notevole efficacia nella regolazione di un'ampia gamma di processi industriali. Se ben sintonizzati infatti i PID permettono di ottenere prestazioni soddisfacenti. Un grande impianto industriale può avere centinaia di regolatori, ma questo richiede di modellare centinaia di sottoprocessi, ciascuno con un controllore progettato ad hoc. Risulta perciò assai più conveniente usare un'unica struttura, che offre risultati accettabili, con dei parametri da sintonizzare caso per caso.
- Le prestazioni scadenti di molti sistemi di controllo sono dovute a problemi nei sensori e negli attuatori. In presenza di problemi di tale natura, l'utilizzo di controllori più complessi, dove la legge di controllo svolge un ruolo modesto, diventa inutile, per cui viene meno la motivazione di cercare leggi di controllo più sofisticate di quelle PID.
- Se usati come elementi di schemi di controllo più complessi e articolati, possono portare notevolissimi miglioramenti delle prestazioni, a fronte di costi e sforzi realizzativi relativamente modesti.
- Possibile realizzazione con diverse tecnologie (meccanica , idraulica, elettrica)
- L'algoritmo digitale PID può includere delle funzioni che non sono facilmente realizzabili con tecniche analogiche. In particolare può essere implementata la funzione di auto-sintonizzazione (auto-tuning) che permette la messa a punto automatica dei parametri del regolatore. Attraverso l'auto-sintonizzazione è possibile ottenere prestazioni migliori di quelle ottenibili con controllori a termini fissi.
- Rapporto efficacia / costo ottima, ancora oggi difficilmente superabile.

1.2.0.Indici di prestazione

I parametri utilizzati nell'analisi dei controllori, per evidenziare le loro prestazioni, prendono il nome di indici di prestazione.

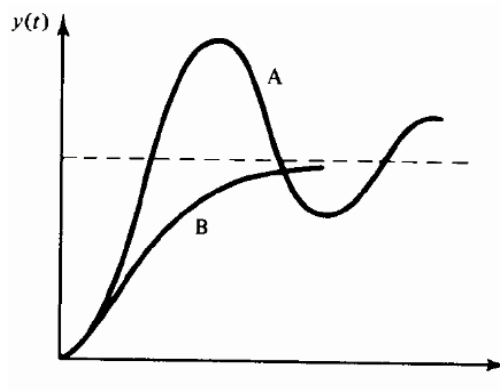
Per mezzo di questi è possibile individuare tarature sconvenienti del regolatore e quindi classificare quali metodi e controllori offrono i risultati migliori.

Anche noi ci affideremo a questi parametri per trarre le conclusioni finali.

Per comprendere a pieno tutti i dati riportati in questa tesi soffermiamoci quindi sull'analisi di questi indici indicando quali sono, cosa rappresentano e perché costituiscono degli importanti parametri per la scelta di un controllore.

Molto frequentemente le prestazioni di un sistema vengono caratterizzate facendo riferimento a parametri associati alla risposta al gradino.

Supponiamo quindi di considerare le seguenti diverse risposte al gradino di un sistema controllato:



A priori non è possibile affermare che la soluzione A sia migliore della B e viceversa.

Per trarre una conclusione di questo tipo è infatti necessario contestualizzare la scelta in funzione dell'indice di prestazione adottato.

Se l'obiettivo è quello di ritornare il più presto possibile alla condizione di setpoint allora la soluzione A è quella vincente.

Se al contrario l'obiettivo è quello di mantenere la massima deviazione il più contenuta possibile o mantenersi vicini al setpoint nel tempo più breve, allora la soluzione da preferirsi è la (B).

Da questo piccolo esempio capiamo subito come tali parametri svolgono un ruolo fondamentale per la scelta del controllore.

Gli indici di prestazione possono essere distinti innanzitutto in due categorie:

- Indici di prestazione stazionari
- Indici di prestazione dinamici

I primi si basano su un'unica condizione: l'errore raggiunto dal sistema controllato, a transitorio esaurito, deve essere nullo (errore nullo in condizioni stazionarie).

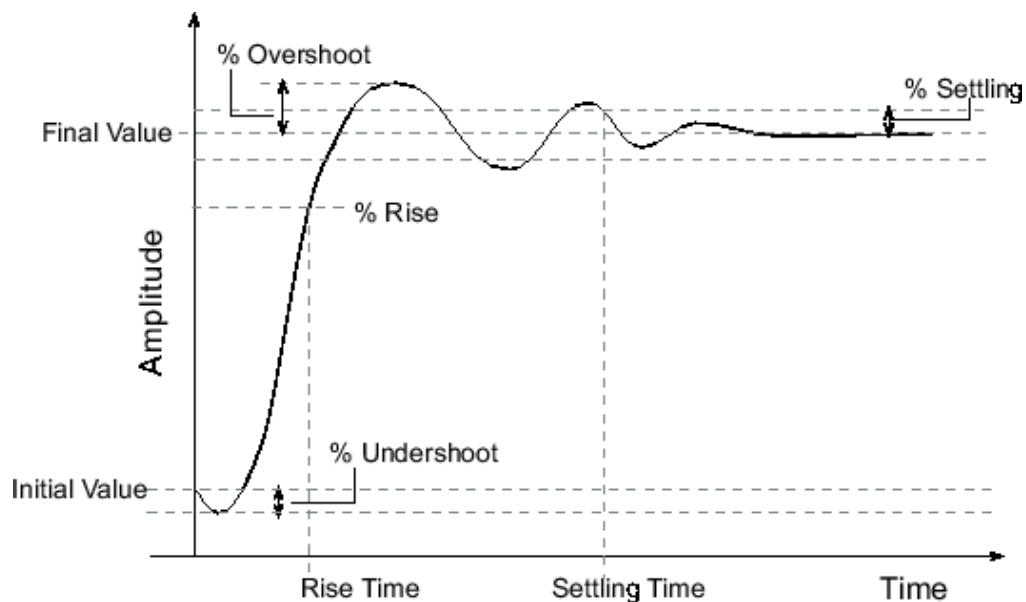
Per quando riguarda invece i secondi possiamo operare la seguente ulteriore classificazione:

- Indici di prestazione dinamici che utilizzano criteri che si basano solamente su alcuni punti della risposta (sono detti anche criteri puntuali)
- Indici di prestazione dinamici che utilizzano criteri che si basano sulla risposta completa del sistema nel corso del transitorio (sono detti anche criteri integrali)

Gli indici di prestazione dinamica con criteri puntuali basano la valutazione della qualità del controllore su alcune caratteristiche della risposta del sistema retroazionato.

Tra gli indici più comuni che fanno parte di questa categoria possiamo ricordare:

- Rise Time (tempo di salita): tempo necessario al sistema per variare dal 10% al 90% del suo valore di regime
- Settling Time (tempo di assestamento): tempo necessario perché la risposta entri in una certa fascia vicina al valore di regime (indicata con %settling) senza più uscirne. Nel nostro caso la %settling sarà pari al 2%
- Overshoot (sovraelongazione massima): differenza tra il valore del picco superiore ed il valore finale della risposta al gradino espressa come percentuale del valore finale
- Undershoot (sovraelongazione minima): differenza tra il valore del picco inferiore ed il valore iniziale della risposta al gradino espressa come percentuale del valore finale



I risultati riportati in seguito nelle tabelle saranno tutti espressi utilizzando proprio questi parametri. Ovviamente a seconda della natura del sistema controllato alcuni indici di prestazione non saranno applicabili. Per esempio non è detto che un processo presenti sempre sovraelongazione.

In alternativa agli indici di prestazione dinamica con criteri puntuali, la risposta del sistema può essere analizzata lungo tutto l'arco temporale interessato dal transitorio del processo. In questo caso si parla di indici di prestazione integrali che qualificano in varia misura lo scostamento del sistema dal setpoint nel corso del transitorio.

Tra questi possiamo ricordare:

- L'ISE (integral of square error): si basa sul calcolo dell'integrale dell'errore quadratico
- IAE (integral of the absolute value of error): si basa sul calcolo dell'integrale del valore assoluto dell'errore.
- ITAE (Integral of the Time-weighted Absolute Error): si basa sul calcolo dell'integrale del valore assoluto dell'errore per la variabile tempo.

dove come errore intendiamo la misura della distanza del sistema dal setpoint assegnato.

In questa tesi non utilizzeremo indici di prestazioni di questo tipo per valutare le prestazioni del controllore. Useremo però alcuni metodi di taratura che offrono delle possibili scelte per i parametri K_p , T_i e T_d al fine di minimizzare delle funzioni obiettivo che si basano proprio su tali indici.

1.3.0. Funzione di auto-tuning

Una volta compreso come funziona un controllore PID concentriamo ora la nostra attenzione sulla funzione di auto-tuning.

Anche se in questa tesi analizzeremo tale funzione solamente da un punto di vista teorico, osservando quali metodi forniscono risultati finali migliori, è bene, per avere un quadro completo, accennare anche qualche aspetto di interesse pratico legato a tale tecnica.

L'auto-tuning è definito come la procedura per la determinazione dei valori dei parametri di un regolatore senza l'intervento dell'operatore.

Uno dei principali motivi per il quale si utilizza questa tecnica è la notevole diminuzione della quantità di tempo da dedicare al controllore. Il tuning manuale di un regolatore infatti non va effettuato solo al momento della sua installazione ma deve essere ripetuto ogni qual volta viene modificato il punto di lavoro, si verificano variazioni operative del sistema da controllare a causa di disturbi esterni, invecchiamento...

A questa tecnica si ricorre inoltre anche quando non si conosce il modello o il valore dei suoi parametri o in seguito a variazioni delle condizioni operative tali da richiedere un aggiustamento dei valori preimpostati.

Tale funzionalità può essere resa operativa a seguito di un comando di attivazione da parte di un operatore esterno oppure automaticamente quando le procedure di diagnostica individuano una variazione del comportamento del sistema controllato. In quest'ultimo caso il processo, che si occupa del tuning, è sempre in funzione e si parla di self-tuning.

Il programma che si occupa della determinazione dei valori dei parametri prende il nome di autotuner. L'autotuner riproduce le modalità di intervento dell'operatore.

Per capire come quest'ultima funzione è quindi necessario prima di tutto conoscere la predisposizione manuale del valore dei parametri effettuata dall'addetto che si occupa del controllore.

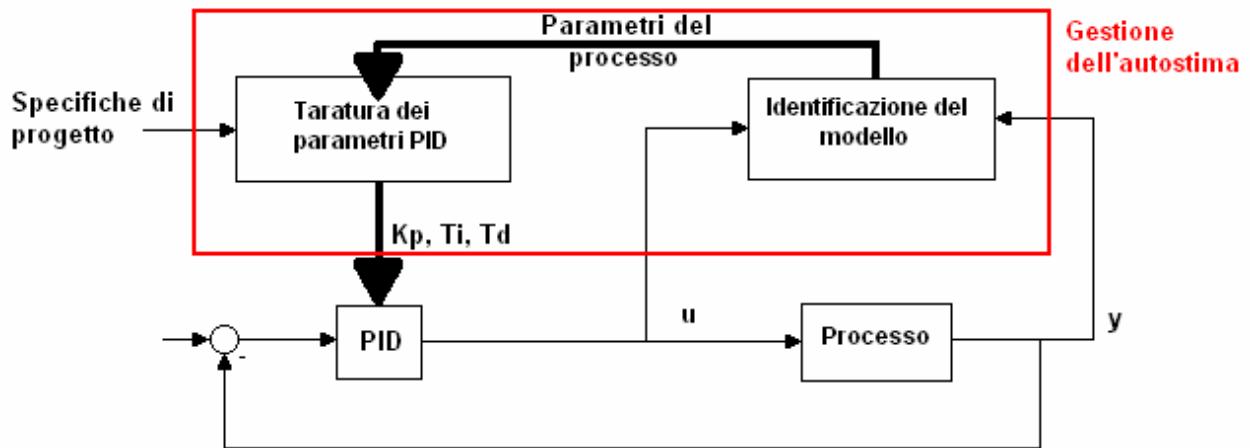
Le procedure manuali di taratura dei pid sono composte da pochi e semplici passi che elencheremo qui di seguito:

1. L'operatore osserva il comportamento del sistema da controllare, anche stimolandolo con segnali noti, in modo da dedurre le informazioni necessarie.
2. Una volta osservato il sistema da controllare vengono fissati i requisiti necessari affinché il sistema abbia il comportamento desiderato.
3. Calcolo dei valori dei parametri che il regolatore deve avere per ottenere il comportamento desiderato.

A partire dalla formalizzazione di questi punti viene realizzata la procedura di auto-tuning.

Le fasi compiute dall'autotuner sono quindi:

1. Stimolazione del processo da controllare con segnali noti (gradino, treno di impulsi, sinusoidale...). Dalla risposta del sistema a fronte di queste perturbazioni si traggono valutazioni e si ricavano parametri caratteristici del modello del processo.
2. Valutazione e verificabilità delle specifiche di controllo, che possono essere tra loro incompatibili, in modo da raggiungere il compromesso ottimale.
I requisiti richiesti possono essere di diverso tipo: requisiti sul comportamento della variabile controllata: massima sovraelongazione, tempo di risposta... , requisiti sul limite della variabile di controllo in termini di tasso di saturazione...
3. Calcolo dei parametri (K_p , T_i , T_d), che il regolatore deve avere, sfruttando le regole di tuning.

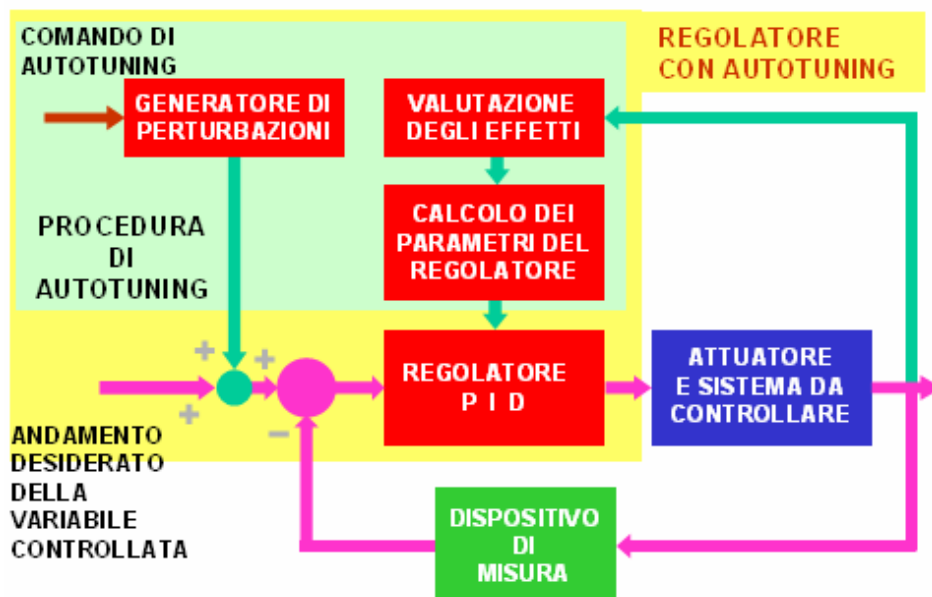


Le prime fasi vengono eseguite mediante i metodi di identificazione dei parametri, accennati già in introduzione, mentre quelle finali sfruttano i metodi raggruppati nelle tecniche di sintesi dei controllori.

Nelle pagine a seguire, anche noi cercheremo di ricreare un programma di auto-tuning, basandoci su questi punti, ma, in particolar modo, ci concentreremo nell'analisi dei singoli metodi sfruttati dall'autotuner.

A differenza di quanto si può pensare l'autotuner non è una parte del regolatore. Infatti quando l'operazione di tuning è terminata, l'elaborazione della modalità di controllo non dipende dalla presenza dell'autotuner.

A conclusione di tutto questo un semplice schema più generale che evidenzia quanto detto fino adesso è il seguente:



CAPITOLO 2

Processo termico

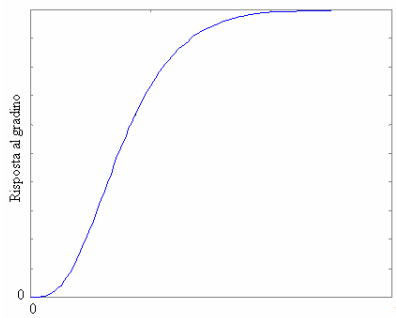
2.0.0. Modello matematico del processo termico

Dato un sistema fisico la descrizione di quest'ultimo dal punto di vista matematico può essere effettuata mediante l'utilizzo dei modelli matematici.

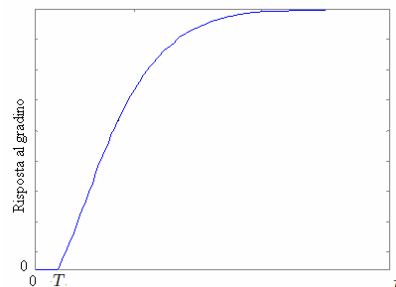
Nel nostro caso specifico per rappresentare l'evoluzione fisica della temperatura nel tempo faremo quindi uso di un modello termico.

Prima di descrivere un sistema fisico dal punto di vista matematico è necessario individuare quali sono le grandezze alla cui analisi siamo interessati. Solamente una volta specificate tali grandezze è possibile ricorrere ad un modello matematico che rappresenta un insieme di relazioni che legano tra di loro le grandezze di interesse del sistema fisico, prima scelte.

Ogni processo termico ha, solitamente, una risposta al gradino monotona, nei quali il fenomeno del trasferimento del calore dà sempre luogo a un ritardo iniziale e poi ad una salita progressiva, generalmente priva di oscillazioni.



La stessa risposta può essere rappresentata in modo più schematico con una risposta che presenta un intervallo di latenza iniziale di durata T seguito da un intervallo in cui il segnale tende esponenzialmente al valore di regime secondo una costante di tempo τ .



Per descrivere correttamente l'evoluzione fisica della temperatura sono quindi necessari tre parametri: guadagno, costante di tempo e ritardo.

L'equazione rappresentativa del modello termico, nel dominio di Laplace, risulta quindi:

$$G(s) = K_p \cdot \frac{1}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} e^{-Ts}$$

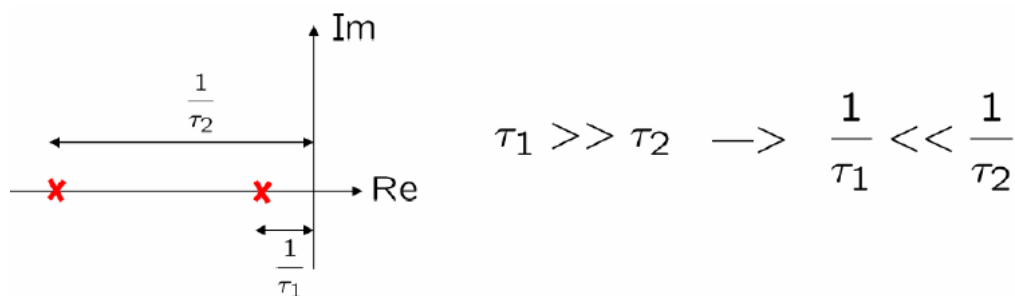
Ogni sistema termico può sempre essere rappresentato come un sistema del secondo ordine, con due costanti di tempo τ_1 e τ_2 a denominatore (due poli), un guadagno K_p e un ritardo T .

K_p costituisce il guadagno statico e spesso viene rappresentato con l'unità di misura °C su % dell'azione di controllo (°C/%). τ_1 identifica la costante di tempo termica del sistema, stimabile come $\tau_1 = R_{h1} \cdot C_{h1}$, dove R_h è la resistenza termica (resistenza nel dissipare il calore) e C_h è la capacità termica (capacità di assorbire calore). τ_2 può rappresentare invece la costante di tempo del sensore di temperatura, o della resistenza usata per generare calore mentre infine il parametro T può costituire il ritardo della propagazione dell'onda termica nel corpo.

Ovviamente il passaggio dal sistema fisico al suo sistema matematico richiede sempre un processo di astrazione e approssimazione. Il primo corrisponde al fatto che il modello stesso non è il sistema fisico ed anzi ne trascura gli aspetti che non sono di interesse specifico mentre il secondo è legato al fatto che le relazioni matematiche del modello sono inevitabilmente solo approssimazioni delle relazioni vere.

Quindi in definitiva l'equazione riportata sopra ci permetterà di effettuare uno studio teorico da cui trarre delle conclusioni finali da riportare poi nei casi pratici ma dovremo sempre ricordare che il tutto costituisce una approssimazione della realtà.

In molti casi le due costanti di tempo hanno valori molto diversi (per esempio $\tau_1 \gg \tau_2$):

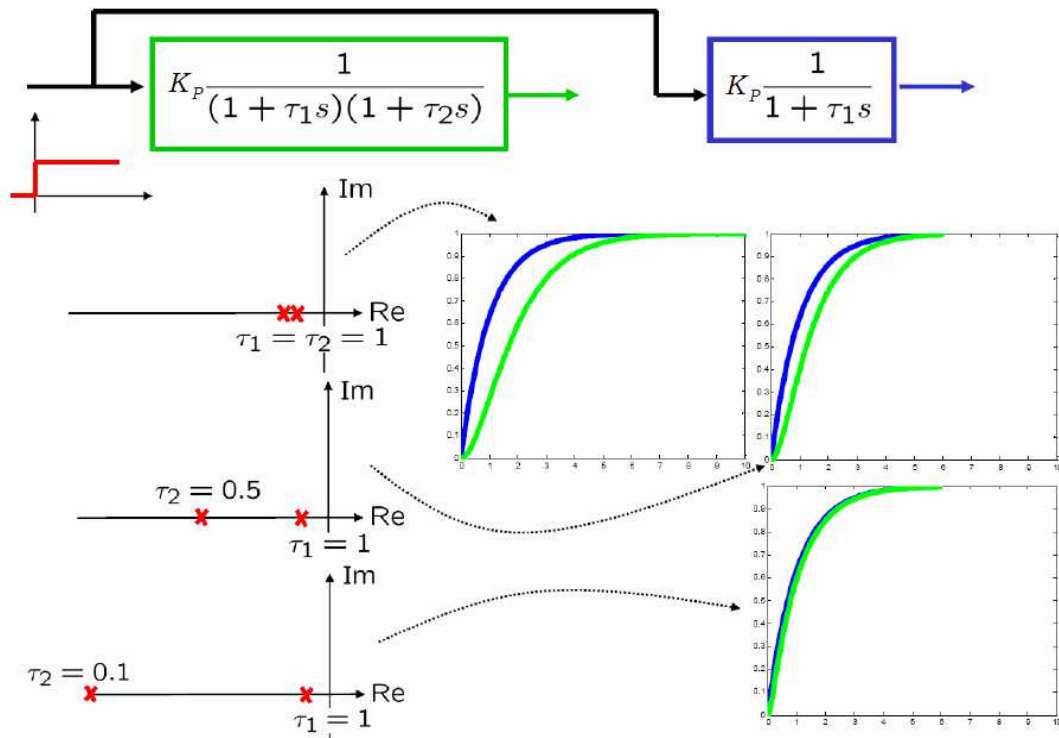


In altre parole il termine associato al polo con costante di tempo maggiore è caratterizzato da un residuo molto più grande da estinguersi rispetto al polo con costante di tempo minore.

Trascurando quest'ultimo, l'equazione di partenza può essere ricondotta a quella di un sistema del primo ordine, in ritardo, governata dal polo dominante.

$$G(s) = K_p \cdot \frac{1}{(1 + \tau_1 s)} e^{-Ts}$$

Maggiore è la differenza delle due costanti di tempo e minore è l'errore di approssimazione che commettiamo, come evidenziato dal grafico seguente (supponiamo di non considerare il ritardo):



Concentriamo ora la nostra attenzione sul ritardo.

Nello studio di sistemi dinamici di questo tipo, caratterizzati dalla presenza di ritardi di tempo, può essere conveniente sostituire, al ritardo, una sua approssimazione costruita come una funzione razionale della variabile complessa s .

La trasformata di Laplace di un segnale ritardato nel tempo è la trasformata del segnale per un esponenziale elevato al ritardo.

$$u(t) \rightarrow \boxed{\begin{matrix} T \\ \text{RITARDO} \end{matrix}} \rightarrow u(t - T)$$

$$\mathcal{L}[u(t - T)] = \underbrace{U(s)} e^{-Ts}$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{K_P \cdot \frac{1}{(1 + \tau_1 s)} e^{-\tau s}}$$

Siccome questa è una funzione non razionale è utile cercare di approssimarla ulteriormente per renderla più maneggevole. A tale scopo ci serviremo dell'approssimazione di Padè.

Data una funzione $F(s)$ la sua approssimazione di Padè $P_{[p,q]}$ di ordine $[p,q]$ è la funzione razionale:

$$P_{[p,q]}(s) = \frac{h(s)}{k(s)} = \frac{\text{polinomio di grado } \leq p}{\text{polinomio di grado } \leq q}$$

tale che lo sviluppo in serie di Taylor di $F(s)$ in $s = 0$ coincide con quello di $h(s)/k(s)$ fino all'ordine $p+q$.

Per garantire sempre l'esistenza della approssimazione di Padè la definizione va rilassata. L'approssimazione ridotta di Padè $P_{[p,q]}$ è quella che approssima "al meglio" lo sviluppo di Taylor di $F(s)$ in $s = 0$.

Applicando la definizione al nostro caso specifico otteniamo:

$$e^{-st} \approx \frac{1}{1 + Ts} \quad \text{Approssimazione di Padè(0,1)}$$

Ovviamente esistono approssimazioni di Padè di ordine anche superiore: Padè(1,1), Padè(2,2) ... ma per i nostri utilizzi quella considerata risulta essere sufficientemente adeguata.

A conclusione di tutte queste semplificazioni l'equazione del modello termico nel dominio di Laplace, che considereremo, risulta quindi:

$$G(s) = K_P \cdot \frac{1}{(1 + \tau_1 s)} \cdot \frac{1}{1 + Ts}$$

Come valori numerici una buona scelta, ottenuta da casi reali di ganasce per la saldatura, che anche noi adotteremo in questa tesi, è la seguente:

Ritardo:	$T = 5$ secondi
Costante di tempo:	$\tau_1 = 200$ secondi
Guadagno:	$K_P = 1000$ °C/%

Sostituendo si ottiene:

$$G(s) = 1000 \cdot \frac{1}{(1 + 200s)} \cdot \frac{1}{(1 + 5s)}$$

Svolgendo poi i calcoli si ha:

$$G(s) = \frac{1000}{1000s^2 + 205s + 1}$$

L'equazione alla quale finalmente siamo giunti rappresenta l'espressione del nostro modello termico, nel dominio di Laplace, che descrive il comportamento matematico di un processo termico.

Da ora in poi faremo sempre riferimento nei calcoli a questa equazione.

CAPITOLO 3

Metodi di identificazione dei parametri

Nella gran maggioranza dei processi industriali la funzione di trasferimento non è nota e il controllore va progettato in base alla rilevazione sperimentale della risposta del processo a un segnale di riferimento in ingresso.

La funzione di auto-tuning, implementata nei regolatori, opera nello stesso modo.

Il sistema sottoposto a controllo viene sollecitato con un ingresso a gradino e i dati rilevati vengono sfruttati da alcuni metodi per ricavare i parametri caratteristici: K_p , T e τ del modello approssimato che descrive il processo termico.

Tutti i metodi che svolgono questo lavoro prendono il nome di metodi di identificazione dei parametri.

Nelle pagine a seguire verranno illustrate le seguenti quattro metodologie:

- Metodo di approssimazione della risposta al gradino con ritardo pari al 5% del valore di regime
- Metodo di approssimazione della risposta al gradino con ritardo pari all'1% del valore di regime
- Metodo di approssimazione della tangente
- Metodo di approssimazione della risposta al gradino con ritardo reale.

In seguito ognuno di essi verrà testata con il modello termico, noto, per evidenziare il grado di accuratezza offerto da ciascuno.

Quest'ultimo concetto rappresenta un aspetto molto importante. Tutte le formule presentate infatti poi, nelle regole di taratura, dipendono dai parametri ricavati ora. Migliore è quindi la loro approssimazione, cioè tanto più questi si avvicinano ai valori reali del modello, e migliore è la taratura del regolatore.

3.0.0. Metodo di approssimazione della risposta al gradino con ritardo pari al 5% del valore di regime

Il primo metodo di identificazione dei parametri, che illustriamo, si basa su una rappresentazione schematica della risposta al gradino.

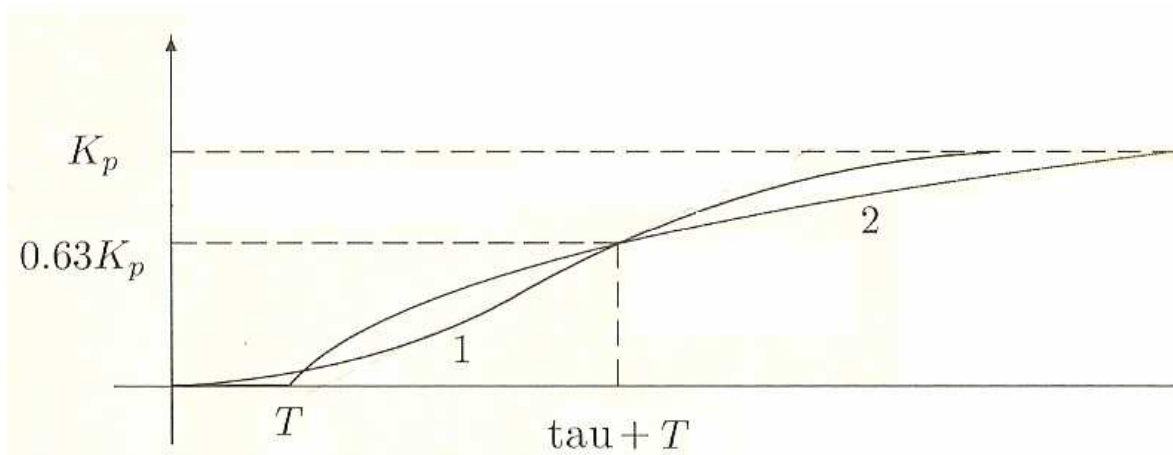
Una volta che il sistema è stato sollecitato in ingresso da un segnale a gradino la determinazione dei tre parametri K_p , T e τ può essere effettuata direttamente a partire dai risultati ottenuti. In genere non pone problemi la ricerca del valore asintotico K_p , mentre più delicata e complessa è la situazione per la costante di tempo τ e il ritardo T .

A tale problema possiamo trovare una soluzione ricorrendo all'utilizzo di alcuni stratagemmi come la rappresentazione schematica della risposta al gradino.

Il ritardo T viene fatto coincidere con l'intervallo di tempo trascorso fra l'istante in cui viene applicato il segnale e l'istante nel quale la risposta raggiunge una percentuale prefissata del 5% del valore di regime.

La costante di tempo τ invece viene determinata attribuendo il valore $T + \tau$ all'ascissa del punto nel quale la risposta effettiva raggiunge il valore pari a 63% del valore di regime.

Operando in questo modo l'approssimazione della risposta al gradino risulta essere la seguente:



Nei primissimi istanti il grafico della risposta effettiva (1) si trova al di sopra del grafico della risposta approssimata (2), intersecando quest'ultimo poco dopo l'istante T . Da tale punto in poi la situazione si inverte fino all'istante $\tau + T$ per poi invertirsi nuovamente da tale punto in poi.

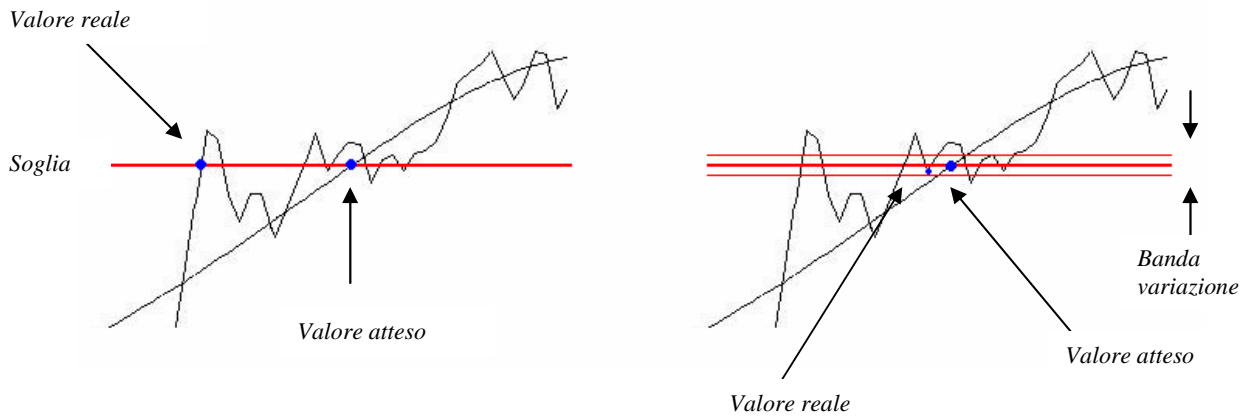
Il valore numerico dei parametri può essere calcolato mediante le seguenti formule:

Guadagno K_p :	valore asintotico
Costante di tempo τ :	Ascissa di $(0.63 * K_p)$ – Ascissa di $(K_p * 0.05)$
Ritardo T :	Ascissa di $K_p * 0.05$

Un primo inconveniente di queste tecniche è che spesso il valore di regime viene raggiunto dopo un tempo molto lungo.

Nel caso inoltre di rumori sovrapposti, al segnale di interesse, la determinazione di tali parametri può essere soggetta ad errori. In particolare si possono rilevare valori di misura inferiore dovuti al fatto che il segnale raggiunge la soglia prefissata (5% e 63% del valore di regime) prima del previsto.

Per limitare tali problemi una possibile alternativa può essere definire delle bande di variazione nell'intorno delle soglie prefissate. Solamente il primo campione che ricade all'interno di questi intervalli viene considerato.



Altra soluzione invece si basa sul controllo della permanenza dei campioni che superano l'intervallo di variazione.

Operando in questo modo, salvo casi particolari, è possibile prevenire errori dovuti a valori troppo errati che raggiungono la soglia prefissata prima del tempo previsto.

3.1.0. Metodo di approssimazione della risposta al gradino con ritardo pari all'1% del valore di regime

Nel primo metodo proposto la procedura per il calcolo del ritardo ha il svantaggio di essere particolarmente sensibile alla costante di tempo del sistema da controllare. Minore è il suo valore e più velocemente si raggiunge la soglia del 5% del valore di regime con conseguente riduzione del ritardo misurato.

Per limitare questo problema si è deciso di implementarne un metodo analogo simile alla tecnica precedente con l'unica differenza che il ritardo T viene fatto coincidere con l'intervallo di tempo trascorso fra l'istante in cui viene applicato il segnale e l'istante nel quale la risposta raggiunge una percentuale prefissata del 1% del valore di regime.

Anche se tale variante non è menzionata nei libri di testo, dove consigliano un valore di soglia del 5% del valore di regime, si è deciso comunque di procedere per questa via sperando di ottenere risultati finali effetti da un minor grado di approssimazione.

Il valore numerico dei parametri può ora essere calcolato con le seguenti formule:

Guadagno K_p :	valore asintotico
Costante di tempo τ :	Ascissa di $(0.63 \cdot K_p)$ – Ascissa di $(K_p \cdot 0.01)$
Ritardo T :	Ascissa di $K_p \cdot 0.01$

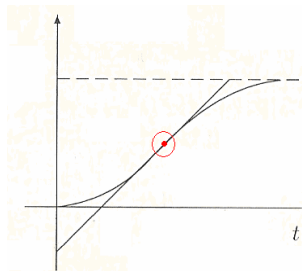
3.2.0. Metodo di approssimazione della tangente

Questo metodo, di rapida applicazione, si basa sul calcolo della tangente nel punto di flesso della risposta al gradino.

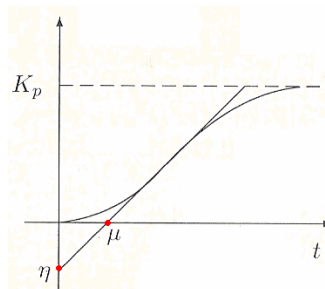
Dall'intersezione in seguito di quest'ultima con gli assi dei tempi e della ampiezza vengono ricavati poi due valori: η e μ che, mediante opportune formule, ci permettono di risalire alla costante di tempo e al ritardo.

Sostanzialmente il metodo si articola nei seguenti passi:

1. Si sollecita il sistema controllato con in ingresso a gradino.
2. Si calcola la tangente alla risposta nel punto di flesso.



3. Si individuano le intercette η e μ sugli assi dei tempi e delle ampiezze.



4. Si calcolano i valori del ritardo e della costante di tempo mediante le seguenti formule:

$$T = \mu \quad \text{tau} = \frac{K_p \cdot \mu}{\eta}$$

Anche questo metodo, come i precedenti, entra in difficoltà se al segnale di interesse è sovrapposto un rumore.

In particolare in tali casi risulta molto difficile la rilevazione del punto di massima pendenza da cui dipende poi il calcolo della tangente.

Un valore errato dovuto a perturbazioni esterne può quindi compromettere interamente il risultato offerto da questo metodo.

Per ovviare questo problema è necessario filtrare il segnale. Operare con questa tecnica (filtrare e analizzare il segnale filtrato) risulta essere il modo più pratico: il filtro infatti comporta l'introduzione di un ritardo che può essere eliminato semplicemente tenendolo in considerazione e compensandolo poi. Una soluzione inoltre, da non dimenticare, per avere una sicura certezza che i valori ottenuti siano privi di errori, è effettuare più prove. Il sistema va quindi sollecitato e analizzato più volte ricalcolando spesso i parametri.

Se si opera mediante la funzione di autotuner è utile che anche questa operi nello stesso modo. L'implementazione digitale, offrendo tempi di analisi e calcolo molto veloci, si presta bene a queste situazioni.

Oltre ai limiti appena citati tale tecnica non è inoltre assolutamente applicabile se la risposta allo scalino non presenta flesso o se la risposta presenta oscillazioni.

Riepilogando, il valore numerico dei parametri può essere calcolato con le seguenti formule:

Guadagno K_p :	valore asintotico
Costante di tempo τ :	$K_p * \mu / \eta$
Ritardo T :	μ
μ	intersezione tangente con asse tempi
η	intersezione tangente con asse ampiezze

3.3.0. Metodo di approssimazione della risposta al gradino con ritardo reale

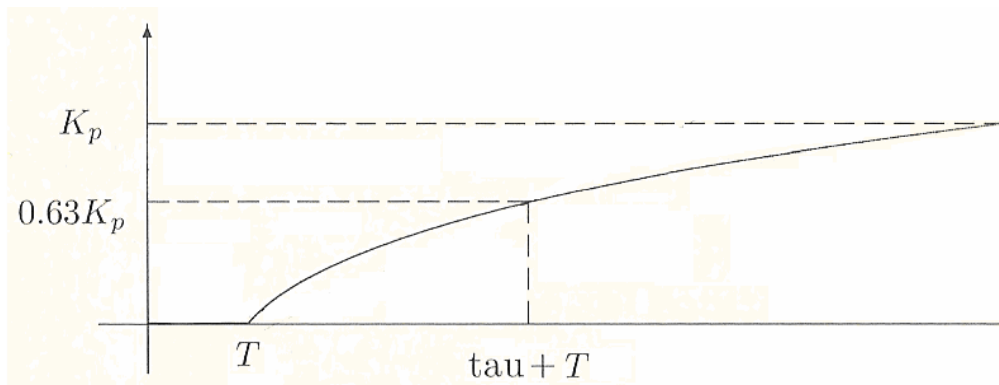
L'ultimo metodo che illustriamo rappresenta una variante delle prime due tecniche, precedentemente viste.

Ancora una volta la procedura di identificazione dei parametri si basa su una rappresentazione schematica della risposta al gradino.

Una volta sollecitato il sistema, in ingresso, con un segnale a gradino la determinazione dei tre parametri: K_p , T , τ viene eseguita nel seguente modo:

- Il parametro K_p corrisponde sempre al valore asintotico del segnale del grafico
- La costante di tempo τ viene determinata attribuendo il valore $T + \tau$ all'ascissa del punto nel quale la risposta effettiva raggiunge un valore pari a $0.63 \cdot K_p$
- Il ritardo T corrisponde all'ascissa del primo punto che ha risposta effettiva diversa da zero.

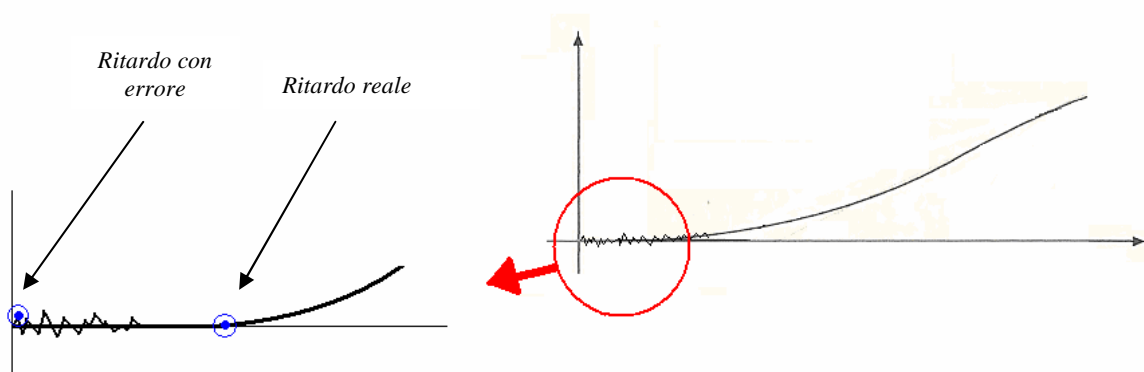
Graficamente si ottiene:



Anche questa tecnica, come tutte le precedenti, è sensibile ai disturbi esterni che si sommano al segnale da analizzare.

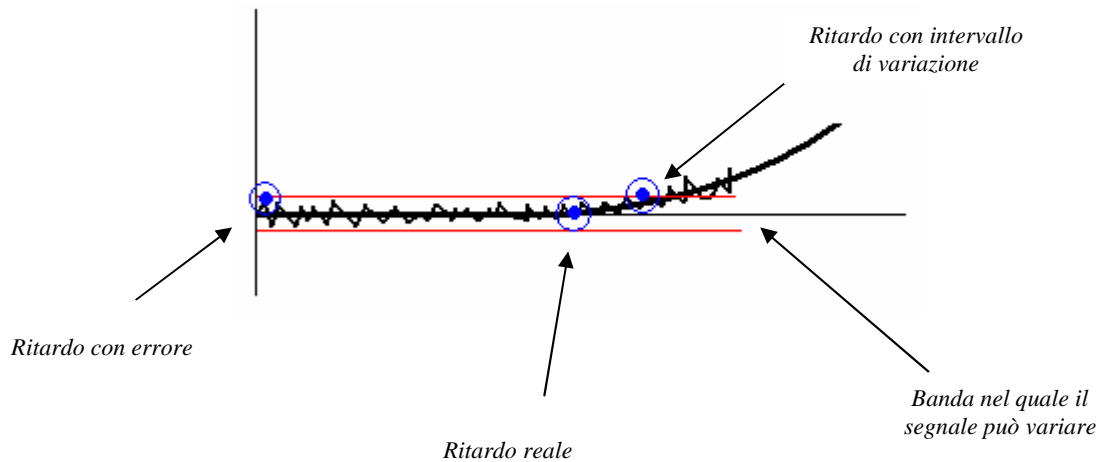
In particolare oltre ai problemi già menzionati, per il calcolo del punto di ordinata pari $0.63 \cdot K_p$, anche la determinazione del primo punto, della risposta effettiva, con ascissa diversa da zero costituisce un dilemma da non sottovalutare.

Nel caso il segnale di interesse sia effetto da errore, il disturbo che si somma alla risposta effettiva, fornisce valori diversi da zero molto prima del punto corrispondente al ritardo reale.



Questo compromette a sua volta il calcolo della costante di tempo che assume valori tanto più elevati quanto più basso è il valore del ritardo.
 Il sistema di partenza, con determinate caratteristiche, può quindi venir visto come un semplice sistema senza ritardo e molto più lento.

In questi casi una possibile soluzione può essere fissare una banda di variazione all'interno del quale il segnale di partenza, effetto da errore, può oscillare.
 Il valore del ritardo non corrisponderà più all'ascissa del primo punto con ampiezza diversa da zero ma al valore dell'asse dei tempi del primo punto che supererà tale intervallo di variazione fissato.



Come evidenziato dal grafico appena sopra, il valore del ritardo ottenuto ha un'accuratezza molto migliore rispetto al caso precedente ma si discosta sempre dal valore reale.
 Usando questa soluzione quindi si accetta sempre un determinato livello di approssimazione finale la cui entità è però minore paragonata al caso precedente senza intervallo di variazione.

Riepilogando, il valore numerico dei parametri può essere calcolato con le seguenti formule:

Guadagno K_p :	valore asintotico
Costante di tempo τ :	Ascissa di $(0.63 * K_p) - T$
Ritardo T :	primo valore di ascissa $\neq 0$ (o fuori banda)

Per completezza è bene sottolineare che questo metodo non è molto utilizzato e pochi sono i testi nei quali è menzionato. Gli unici casi, dove è spesso utilizzato, è in abbinata alla tecnica di taratura di Skogestad.

3.4.0. Simulazione e analisi numerica

Una volta analizzati i metodo di identificazione dei parametri dal punto di vista teorico proviamo ora ad osservare il loro comportamento sotto l'aspetto pratico.

Riprendiamo quindi l'equazione che identifica il modello termico e applichiamo per ogni tecnica le regole illustrate fino ad ora.

La conoscenza a priori, da parte nostra, di ogni grandezza del processo termico ci permetterà di analizzare il risultato finale, offerto da ogni metodo, e identificare quale di questi, proposti, garantisce il miglior grado di precisione.

Nella tabella a seguire sono riportati tutti i valori.

Tutti i listati matlab realizzati e utilizzati per eseguire queste operazioni, in modo automatico, a partire dal solo modello termico, sono raggruppati a fine tesi. Ciascuno di questi opera in modo analogo all'autotuner con l'unica differenza che i dati di input non vengono presi direttamente dal sistema reale ma dal sistema simulato approssimato.

1 METODO APPROX RISP AL GRADINO CON RITARDO PARI AL 5% DEL VALORE DI REGIME					
COSTANTE DI TEMPO: tau	188,858	ERRORE: 200 - tau	11,142	ERRORE %	5,57%
RITARDO: T	15,056	ERRORE: 5 - T	10,056	ERRORE %	201,12%

2 METODO APPROX RISP AL GRADINO CON RITARDO PARI ALL'1% DEL VALORE DI REGIME					
COSTANTE DI TEMPO: tau	198,635	ERRORE: 200 - tau	1,365	ERRORE %	0,6825%
RITARDO: T	5,279	ERRORE: 5 - T	0,279	ERRORE %	5,58%

3 METODO APPROX DELLA TANGENTE					
COSTANTE DI TEMPO: tau	219,840882	ERRORE: 200 - tau	19,840882	ERRORE %	9,92%
RITARDO: T	4,076449	ERRORE: 5 - T	0,923551	ERRORE %	18%

4 METODO APPROX RISP AL GRADINO CON RITARDO REALE					
COSTANTE DI TEMPO: tau	203,9	ERRORE: 200 - tau	3,9	ERRORE %	1,95%
RITARDO: T	0,014	ERRORE: 5 - T	4,986	ERRORE %	99,72%

Da un analisi attenta di tutti i valori ottenuti possiamo concludere che il metodo migliore è il secondo: "Metodo approssimazione della risposta al gradino con ritardo pari all'1% del valore di regime".

A differenze del primo metodo notiamo che aver impostato un valore di soglia, per il ritardo, più basso ha permesso di ottenere valori molto più prossimi al caso reale. Questo ha portato effetti benefici anche al calcolo della costante di tempo che dipende direttamente dal ritardo.

Trascurando il valore sbagliato del ritardo del primo metodo dovuto a una soglia del 5% del valore di regime, che, a questo punto, possiamo definire poco adeguata, il successivo metodo che ha fornito

risultati errati, per il parametro ritardo, è stato il quarto: "Metodo approssimazione della risposta al gradino con ritardo reale".

In questo caso, visto che il metodo non applica nessun criterio in particolare, per il calcolo del ritardo, ma sfrutta direttamente la sua definizione teorica, la causa del valore inesatto, è da attribuire alle approssimazioni adottate nel modello termico di partenza.

Tutti i restanti dati numerici possono essere considerati accettabili.

Osservando ora i valori delle costanti di tempo possiamo trarre ulteriori considerazioni. Se riosserviamo tutti i metodi, precedentemente illustrati, notiamo come la costante di tempo venga calcolata in modo uguale nel primo, secondo e quarto metodo mediante la formula:

$$\tau = \text{Ascissa del punto di ampiezza } (0.63 \cdot K_p) - T$$

Escludendo a priori il valore T si ottiene un risultato $\tau + T$ pari a 203.914.

A quest'ultimo per ottenere la costante di tempo τ deve essere poi sottratto il ritardo T . Più il valore di T si discosta dal caso reale e più la costante di tempo assume valori errati.

Supponendo di lavoro nel caso migliore, quindi $T = 5s$, si ottiene un τ uguale a 198.914 che si discosta poco dal caso ideale.

Le cause che compromettono il valori di T sono quindi quasi sempre da ricercare nei valori di τ errati.

Paragonando infine questo criterio a quello del terzo metodo si evidenzia subito come l'accuratezza offerta da quest'ultimo, in termini di calcolo di τ , sia peggiore.

La strategia appena sopra analizzata è quindi sempre da preferire ogni volta che si calcolano costanti di tempo. I dati riportati in tabella evidenziano e confermano quanto appena detto.

Per completezza è bene in conclusione ricordare che tutte le considerazioni appena fatte valgono per segnali privi di qualsiasi rumore esterno. La presenza dei disturbi complica e spesso peggiora il calcolo dei parametri finali del modello. Operando però con criterio e adottando qualcuna delle strategie prima proposte è possibile sempre ottenere risultati finali accettabili.

CAPITOLO 4

Tecniche di sintesi del controllore

In molte applicazioni industriali la costruzione di un buon modello dell'impianto può essere piuttosto onerosa, soprattutto a fronte di esigenze di controllo non particolarmente spinte. Occorre quindi trovare delle tecniche di taratura dei parametri del PID che siano indipendenti dal sistema da controllare. Le tecniche di sintesi del controllore si occupano proprio di questo.

Proviamo a spiegare in modo più approfondito questi concetti.

Un controllore PID, come abbiamo già definito nelle pagine precedenti, è un meccanismo di controllo retroattivo largamente diffuso nei sistemi di controllo industriale. Questo controllore riceve in ingresso un errore dato dalla differenza tra un riferimento desiderato e la misura effettiva della variabile di processo, e lavora nell'ottica di ridurre al minimo tale errore aggiustando la variabile di controllo del processo.

Il progetto di un controllore PID coinvolge tre distinti parametri costanti K_p , T_i e T_d , i quali rappresentano:

- K_p termine proporzionale;
- T_i costante di tempo termine integrale. $K_I = K_p/T_i$ termine integrativo
- T_d costante di tempo termine derivativo. $K_D = K_p \cdot T_d$ termine derivativo

La somma pesata di queste tre azioni fornisce la variabile di controllo usata per aggiustare il processo secondo l'equazione:

$$U(s) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_I} + sT_D \right) \cdot E(s)$$

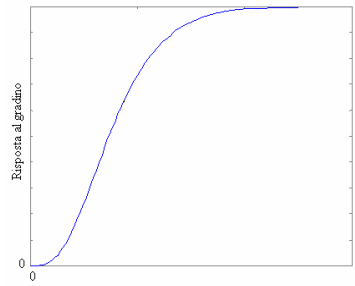
Ovviamente i valori dei vari parametri non possono essere dati a caso.

Per assegnare a ciascuno di questi un determinato valore esistono opportune tecniche che prendono il nome di "tecniche di sintesi del controllore".

Con il termine "sintesi del controllore" si intende quindi l'insieme di tutte quelle regole per la taratura dei parametri del regolatore: K_p , T_i , T_d .

Il grande vantaggio di queste tecniche è che non richiedono la conoscenza del modello del processo sottoposto a controllo e sono attuabili quasi in tutti i sistemi industriali.

Tutti i metodi che vedremo infatti sono stati per lo più derivati in modo empirico e sono applicabili direttamente a tutti i sistemi che presentano una risposta al gradino simile a quella vista fino ad ora cioè costituita da un intervallo iniziale nel quale si mantiene a valori piuttosto bassi e un successivo intervallo nel quale cresce monotonamente fino al valore di regime.



A differenza di quanti potrebbero pensare, queste limitazioni, che sembrano a prima vista assai severe, in realtà sono verificate in moltissime situazioni concrete come anche per il nostro processo termico.

Tutte le formule, presentate nelle tecniche di sintesi del controllore, si avvalgono di parametri legati a questa risposta al gradino del processo.

Ognuno di questi può essere ricavato sfruttando i metodi di identificazione dei parametri, prima visti.

Nelle pagine a seguire presenteremo alcuni dei più importanti metodi di taratura.

Prima di tutto faremo un'analisi teorica illustrando le tecniche stesse e le loro formule di taratura mentre in seguito ci concentreremo sull'aspetto pratico applicando le regole, offerte da ogni criterio, con i dati del nostro processo termico e simulando il tutto.

Durante la parte pratica tutti i metodi di sintesi del controllore verranno testati in tre modi:

- Utilizzando parametri ideali: $K_p = 1000$ $T = 5s$ $\tau = 200s$
- Utilizzando parametri affetti da un grande errore: parametri ideali $\pm 25\%$
- Utilizzando parametri completamente errati ($+100\%$ e ritardo -95%).

Mentre la prima prova ci fornirà informazioni circa la bontà del controllore nei confronti del nostro processo termico, le ultime due ci permetteranno di stabilire quali regolatori hanno un comportamento più robusto cioè, a fronte di una taratura errata, quali garantiscono risultati in uscita ancora accettabili senza portare all'instabilità il sistema.

Anche se può sembrare strano quest'ultimo caso rappresenta un aspetto reale di grande importanza.

Già dai risultati osservati prima, nei metodi di identificazione, si nota come, anche operando in condizioni di idealità, i parametri ricavati da tali tecniche sono affetti da errore.

Altri problemi si possono poi ulteriormente aggiungere a causa di disturbi esterni. La taratura errata infatti può essere causata anche da altri motivi come una incorretta valutazione, da parte dei metodi di identificazione, dei parametri del nostro sistema dovuto a una variazione della risposta al gradino per cause legate alle temperature d'esercizio.

Come abbiamo già visto infatti l'auto-tuning non viene effettuato solo al momento dell'installazione del regolatore ma anche e soprattutto durante il lavoro cioè in situazioni in cui il nostro sistema non si trova più ad uguali condizioni iniziali (temperatura iniziale d'esercizio...).

Tutte le prove che effettueremo ci permetteranno dunque di avere una visione abbastanza completa del controllo dei processi termici.

4.0.0. Metodo di Ziegler e Nichols

La prima tecnica che illustriamo rappresenta uno dei primo metodi di sintesi inventati. Venne presentato per la prima volta nel 1942 in un articolo, scritto dagli stessi ideatori del metodo: Ziegler e Nichols.

Tutte le formule che presenteremo sono state desunte in modo empirico in base al criterio di ottenere un rapporto di smorzamento pari a $\frac{1}{4}$ nella risposta al gradino di ingresso e sono tuttora ampiamente usate per ottenere una prima ragionevole stima dei parametri del controllore da aggiustare successivamente "sul campo", anche se spesso portano a una variazione del gradino di riferimento poco smorzata .

Riportiamo qui si seguito le formule.

Per completezza è bene ricordare che noi ci riferiremo sempre al caso di un controllore di tipo PID cioè considereremo le tre azioni: proporzionale, integrativa e derivativa sempre insieme.

Nel caso il regolatore non fosse di questo tipo (PI , PD) esistono altre le regole di predisposizione dei parametri che noi presenteremo in questa tesi.

	KP	Ti	Td
PID	$\frac{1.2 * tau}{Kp * T}$	$2 * T$	$0,5 * T$
T: ritardo tau: costante di tempo			

Dalla tabelle è possibile notare chiaramente come all'aumentare del ritardo aumentano le costanti di tempo integrative e derivate e quindi aumenta il contributo del termine derivativo a discapito di quello integrativo cioè aumenta la prontezza del controllore ma si riduce l'accuratezza. In altre parole il regolatore tende a lavorare sempre più di "anticipo".

Il termine proporzionale invece aumenta, cioè il controllore diventa più sensibile, all'aumentare della costante di tempo e diminuisce al ridursi del ritardo e del guadagno.

Riassumendo:

	AUMENTARE		
	RITARDO	COSTANTE DI TEMPO	GUADAGNO
TERMINE PROPORZIONALE KP	↓	↑	↓
TERMINE INTEGRATIVO KI	↓		
TERMINE DERIVATIVO KD	↑		
EFFETTI	Maggior prontezza e minore sensibilità e accuratezza	Maggiore sensibilità	Minore sensibilità

4.1.0.METODO DI COHEN COON

Un altro gruppo di formule di taratura abbastanza diffuso è stato proposto nel 1953 da Cohen e Coon. Queste formule si basano anch'esse sull'obiettivo di ottenere una risposta, ad un disturbo a gradino in ingresso, nella quale il rapporto fra due picchi successivi valga $\frac{1}{4}$.

Le regole di Cohen e Coon esprimono i parametri dei controllori in funzione di due grandezze legate a K_p , T e τ che sono:

- Il parametro η che può essere ricavato in relazione a τ e T con la formula: $\eta = \frac{K_p * T}{\tau}$
- L'ulteriore parametro ϕ uguale a: $\phi = \frac{\tau}{T + \tau}$

Le formule di taratura proposte sono presentate nella seguente tabella:

	KP	Ti	Td
PID	$\frac{1.35}{\eta} * \left(1 + \frac{0.18 * \phi}{1 - \phi}\right)$	$\frac{2.5 - 2 * \phi}{1 - 0.39 * \phi} * T$	$\frac{0.37 - 0.37 * \phi}{1 - 0.81 * \phi} * T$

Sostituendo i parametri prima riportati ed esprimendo tutto in funzione di K_p , T e τ è possibile dedurre le seguenti considerazioni:

	AUMENTARE		
	RITARDO	COSTANTE DI TEMPO	GUADAGNO
TERMINE PROPORZIONALE KP	↓	↑	↓
TERMINE INTEGRATIVO KI	↓	↑	
TERMINE DERIVATIVO KD	↑	↓	
EFFETTI	Maggior prontezza ma minore sensibilità e accuratezza	Maggior prontezza e accuratezza ma minore sensibilità	Minore sensibilità

4.2.0.METODO DI CHIEN HRONES RESWICK

Nel 1952 Chien, Hrones e Reeswock proposero altre formule di taratura per i controllori PID.

Ricordiamo anche queste formule perché, oltre al loro interesse intrinseco, rappresentano un primo esempio di progettazione più elastica cioè, rispetto a tutti i metodi prima presentati, forniscono al progettista una certa libertà.

Anche questa tecnica si avvale dell'uso di due parametri:

- Il parametro η pari a:
$$\eta = \frac{K_p * T}{\tau}$$
- Il parametro μ che coincide con il ritardo T

Più specificatamente il metodo presenta quattro tabelle di predisposizione, che illustreremo subito dopo, ciascuna delle quali corrisponde a una delle seguenti esigenze da rispettare:

1. ottenere una risposta al gradino con minimo tempo di assestamento e senza sovraelongazione
2. ottenere una risposta al gradino con minimo tempo di assestamento e con una sovraelongazione massima del 20%
3. ottenere una risposta ad un disturbo a gradino agente a monte del processo con minimo tempo di assestamento e senza sovraelongazione
4. ottenere una risposta ad un disturbo a gradino agente a monte del processo con minimo tempo di assestamento e con una sovraelongazione massima del 20%

Sarà a discrezione del progettista la scelta della tabella che dovrà utilizzare.

I primi due metodi sono da preferire nel caso il segnale di riferimento è variabile e può subire brusche variazioni mentre i restanti due sono prevalentemente utili se il nostro sistema si tratta di un sistema di regolazione nel quale il riferimento rimane costante e scopo del controllore è quello di opporsi agli effetti del disturbo.

Nel nostro caso, visto che ci occupiamo di processo termici, cioè il nostro obiettivo è di mantenere la temperatura del sistema il più vicino possibile ad una temperatura desiderata faremo uso delle ultime due tecniche.

Le tabelle relative agli ultimi due casi, a cui siamo interessati, sono:

- Formule di predisposizione che portano ad una risposta al disturbo a gradino senza sovraelongazione

	KP	Ti	Td
PID	$\frac{0.95}{\eta}$	$2.4 * T$	$0.42 * T$

- Formule di predisposizione che portano ad una risposta al disturbo a gradino con sovraelongazione massima del 20%

	KP	Ti	Td
PID	$\frac{1.2}{\eta}$	$2 * T$	$0.42 * T$

Sostituendo in ciascuna formula i parametri prima elencati e ricalcolando, in modo da esprimere tutto in funzione di K_p , T e τ possiamo dedurre le seguenti considerazioni:

	AUMENTARE		
	RITARDO	COSTANTE DI TEMPO	GUADAGNO
TERMINE PROPORZIONALE K_p	↓	↑	↓
TERMINE INTEGRATIVO K_i	↓		
TERMINE DERIVATIVO K_d	↑		
EFFETTI	Maggior prontezza ma minore sensibilità e accuratezza	Maggiore sensibilità	Minore sensibilità

Visto che in ogni tabella precedente l'influenza dei parametri K_p , T e τ non varia ma cambia solamente il loro peso, dovuto alle costanti numeriche presenti, le conclusioni appena sopra riportate valgono per tutti e due i casi.

4.3.0.METODI ISE, ISTSE, IST²SE

Altre tabelle per la taratura dei parametri sono state messe a disposizione con l'obiettivo che nel corrispondente sistema di controllo vengano approssimativamente minimizzati i seguenti indici dipendenti dallo scostamento dell'errore e(t) fra il valore desiderato e quello effettivo dell'uscita corrispondente ad un segnale a gradino di ingresso:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t)dt$$

$$ISTSE = \int_0^{\infty} t^2 * e^2(t)dt$$

$$IST^2SE = \int_0^{\infty} t^4 * e^2(t)dt$$

Tutti le formule sono espresse in funzione dei seguenti dati:

- Parametro Kp: guadagno
- Parametro Θ : rapporto tra il ritardo e la costante di tempo $\Theta = \frac{T}{tau}$
- Coefficienti: a_i e b_i che variano in funzione del parametro Θ . Il loro valore e riportato nelle tabelle seguenti:

	ISE	ISTSE	IST ² SE
a ₁	1.473	1.468	1.531
b ₁	-0.970	-0.970	-0.960
a ₂	1.115	0.942	0.971
b ₂	-0.753	-0.725	-0.746
a ₃	0.550	0.443	0.413
b ₃	0.948	0.939	0.933
$\Theta \in [0,1.1]$			

	ISE	ISTSE	IST ² SE
a ₁	1,072	0,786	0,628
b ₁	-0,56	-0,559	-0,583
a ₂	0,648	0,883	1,007
b ₂	-0,144	-0,158	-0,167
a ₃	0,552	0,444	0,414
b ₃	0,851	0,847	0,850
$\Theta \in [1.1,2]$			

Le formule di taratura sono presentate nella seguente tabella:

	KP	Ti	Td
PID	$\frac{a_1 * \Theta^{b1}}{Kp}$	$\frac{tau}{a_2 + b_2 * \Theta}$	$a_3 * tau * \Theta^{b3}$

Rispetto agli altri metodi, la deduzione del comportamento, al variare dei diversi parametri, risulta ora molto più complicata. In linea di massima possiamo concludere:

	AUMENTARE		
	RITARDO	COSTANTE DI TEMPO	GUADAGNO
TERMINE PROPORZIONALE KP			↓
TERMINE INTEGRATIVO KI	Per $T < 1.1 \cdot \tau$ ↓ Per $T > 1.1 \cdot \tau$ e $T < 1.76 \cdot \tau$ per ISE ↓ $T < 1.60 \cdot \tau$ per ISTSE ↓ $T < 1.60 \cdot \tau$ per IST^2SE ↓ Per $T > 1.1 \cdot \tau$ e viceversa per tutti i casi precedente ↑	↓	
TERMINE DERIVATIVO KD	↑	↑	
EFFETTI	Maggior prontezza e accuratezza variabile a seconda dei casi	Maggiore prontezza ma minore sensibilità	Minore sensibilità

4.4.0.METODO DI SKOGESTAD

L'ultimo metodo che prediamo in considerazione prende il nome di "metodi di Skogestad" in onore del suo inventore.

Rispetto a molte delle tecniche, prima illustrate, questo metodo riscuote ancora oggi un notevole interesse per le caratteristiche di controllo che è in grado di offrire.

A seconda del modello matematico che deve essere sottoposto a controllo il metodo offre diverse regole di taratura del regolatore.

Per il nostro specifico caso le formule proposte dalla tecnica di Skogestad sono:

	KP	Ti	Td
PID	$\frac{\tau}{K_p * (T_c + T)}$	$\min[\tau, c * (T_c + T)]$	0

dove T_c e c sono due fattori che illustreremo poi.

Rispetto a tutte gli altri metodi un particolare interessante, che può subito essere notato, è come questa tecnica pone a zero la costante di tempo derivativa cioè non considera, nel controllo, il blocco derivativo.

A prima apparenza sembra quindi che Skogestad non sfrutti a pieno la potenzialità delle tre azioni messe a disposizione dai controllori PID.

Per capire le caratteristiche offerte da questa tecnica, quando il blocco derivativo non viene trascurato, oltre alle formule, sopra riportate, consideriamo anche un altro gruppo di regole, che in realtà sono state proposte per un sistema costituito da: costante di tempo, ritardo e integratore.

	KP	Ti	Td
PID	$\frac{1}{K_p * (T_c + T)}$	$c * (T_c + T)$	τ

Durante la simulazione pratica testeremo, per completezza, ognuna delle due tabelle proposte.

Per tutte le formule appena proposte Skogestad suggerisce i seguenti valori:

- La costante di tempo T_c viene posta uguale a T
- Al valore c viene assegnato il valore 4 che può essere ridotto a 2 nel caso la compensazione del disturbo risulti troppo lenta; ciò causa però una riduzione della stabilità e della robustezza rispetto a variazioni dei parametri del processo e un piccolo aumento della sovraelongazione della risposta al gradino.

Tenendo conto di quanto detto, come per tutti gli altri metodi, ancora una volta possiamo dedurre le seguenti considerazioni al variare dei parametri di progetto:

Per la prima tabella (blocco derivativo nullo):

	AUMENTARE		
	RITARDO	COSTANTE DI TEMPO	GUADAGNO
TERMINE PROPORZIONALE KP	↓	↑	↓
TERMINE INTEGRATIVO KI	↓↑ Variabile a seconda dei valori di T e tau	↓↑ Variabile a seconda dei valori di T e tau	
TERMINE DERIVATIVO KD	/	/	/
EFFETTI	Minor prontezza e accuratezza variabile	Maggiore prontezza e accuratezza variabile	Minore prontezza

Per la seconda tabella:

	AUMENTARE		
	RITARDO	COSTANTE DI TEMPO	GUADAGNO
TERMINE PROPORZIONALE KP	↓		↓
TERMINE INTEGRATIVO KI	↓		
TERMINE DERIVATIVO KD		↑	
EFFETTI	Minore sensibilità e accuratezza	Maggiore prontezza	Minore sensibilità

4.5.0. Simulazione e analisi numerica

Una volta illustrati tutti i metodi sotto l'aspetto teorico procediamo ora ad analizzare il tutto da un punto di vista più pratico.

La prima parte, adibita al calcolo dei parametri, che nella realtà è eseguita dal programma di autotuner con tutte le altre operazioni matematiche, verrà effettuata utilizzando l'editor di matlab.

La seconda invece dedicata alla simulazione sarà eseguita per mezzo di Simulink.

Con il termine simulazione si intende l'analisi virtuale del sistema sottoposto a controllo.

Per ottenere risultati utili in questa fase dovremo quindi riprodurre nel modo più veritiero possibile il comportamento reale del processo.

L'intero sistema verrà rappresentato come uno schema in retroazione costituito da un ingresso di riferimento cioè la temperatura desiderata, un'uscita che rappresenta il valore effettivo della temperatura e la retroazione che costituisce lo schema interno di misura, per mezzo di opportuni sensori, della temperatura esterna. L'evoluzione del processo termico sarà descritta mediante il modello termico, visto fino ad ora, mentre il controllore verrà rappresentato semplicemente come l'insieme di tre blocchi, ciascuno dei quali costituisce una delle tre azioni del PID: proporzionale, integrativa e derivativa.

In totale analizzeremo quattro schemi:

- Il primo ci permetterà di rappresentare una situazione di funzionamento classico.
- Il secondo è simile al caso precedente ma verrà apportata una variazione nell'azione derivativa del PID.
- Il terzo ci permetterà di simulare una situazione di saturazione dell'attuatore, cioè il dispositivo che si occupa di variare la temperatura del processo sotto previa indicazione delle istruzioni del controllore.
- Il quarto e ultimo schema presenterà una possibile soluzione al problema del terzo punto.

In ogni caso, è bene ricordare, non considereremo la presenza di disturbi esterni ma riprodurremo situazioni simili imponendo parametri di taratura errati.

4.5.1. SCHEMI DI SIMULAZIONE

Prima di procedere all'analisi pratica illustriamo rapidamente i quattro schemi di simulazione:

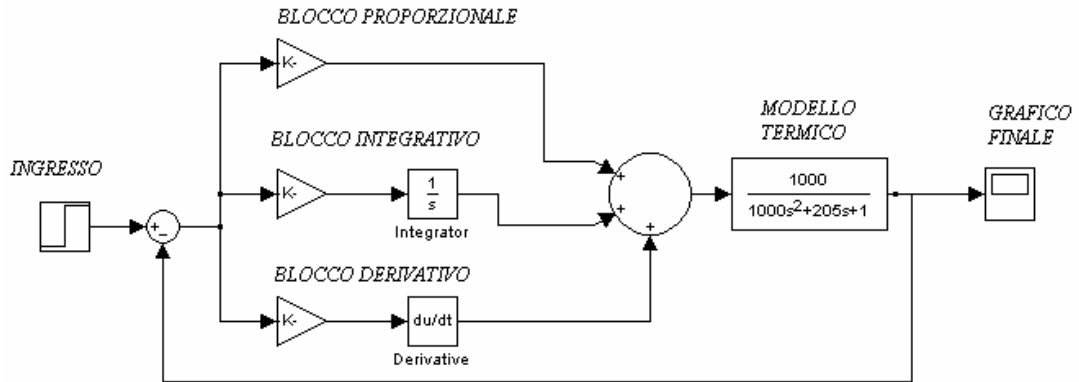
1. **PID**

Il primo schema riproduce un tipico funzionamento classico di tutto il nostro sistema.

Il regolatore è costituito dall'insieme di tre blocchi posti in parallelo, ciascuno dei quali svolge un'azione specifica.

In ingresso il pid riceve un segnale di errore dato dalla differenza tra il segnale di riferimento, costituito da un ingresso a gradino, e quello effettivamente misurato.

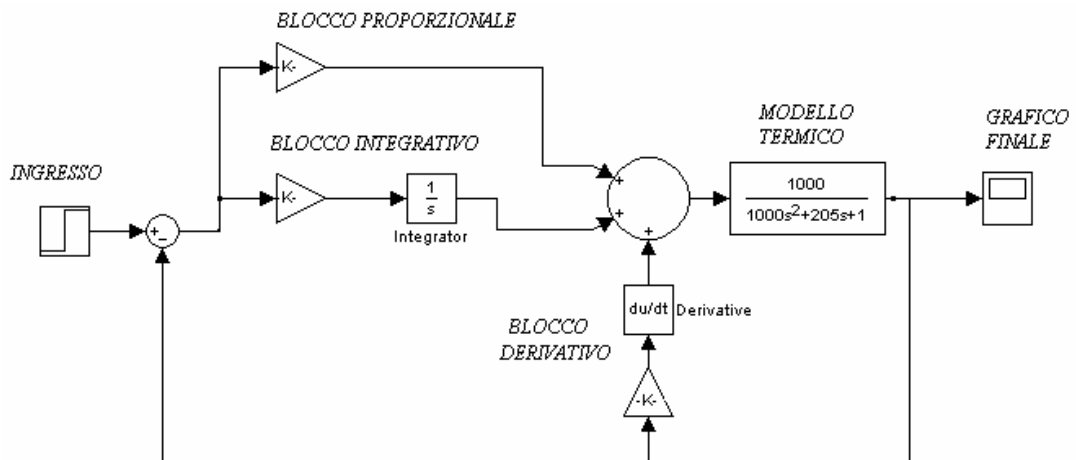
I parametri di taratura del PID: K_i , K_P e K_d in questi casi saranno sempre imposti da noi manualmente.



2. PI + D RETROAZIONE

Un inconveniente della realizzazione classica, prima vista, è quello che la derivazione è effettuata direttamente sull'errore "e". In questo caso, in presenza di uno scalino del segnale di riferimento, l'uscita del derivatore, e di conseguenza la variabile di controllo, hanno un andamento di tipo impulsivo. Questa brusca variazione può provocare la saturazione dell'attuatore e l'allontanamento del sistema dalla zona di linearità, con riferimento alla quale normalmente si progetta il regolatore. Per queste ragioni frequentemente l'azione derivativa è esercitata sulla sola variabile di uscita. Poiché questa è l'uscita di un sistema che usualmente ha le caratteristiche di un filtro passa basso, le sue variazioni istantanee (e quindi la sua derivata) sono in genere contenute e la presenza dell'azione derivativa non provoca l'andamento impulsivo della variabile di controllo.

Una variante quindi dello schema prima proposto, che analizzeremo, è la seguente:

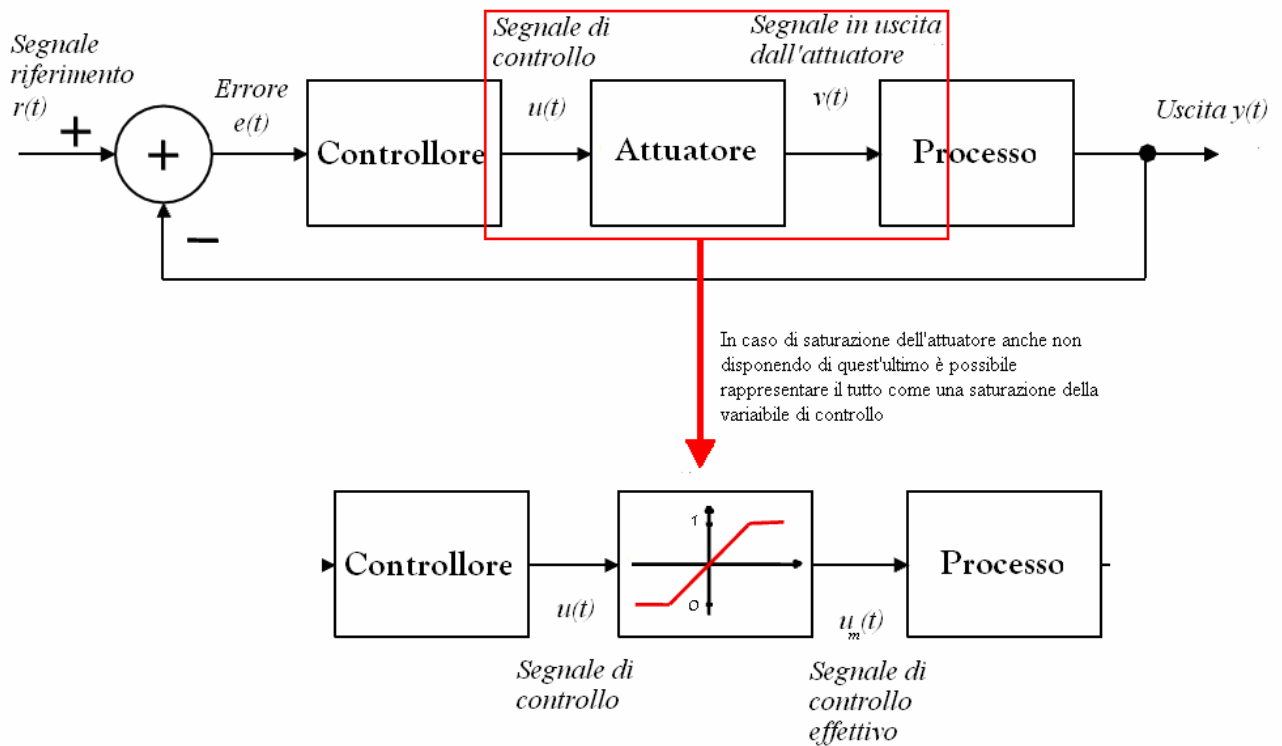


3. PID SATURAZIONE

Gran parte dello studio dei sistemi dinamici viene condotto utilizzando l'approssimazione di linearità del sistema in esame, sia pure nell'intorno di un punto di lavoro. Una delle principali cause di non linearità consiste nella limitazione fisica degli attuatori. Nel caso per esempio di un sistema termico la temperatura fornita da una resistenza, o qualsiasi altro mezzo atto al riscaldamento, è limitata.

Questo tipo di non linearità può incidere profondamente sul comportamento del controllore PID. A causa della saturazione dell'attuatore, il valore in uscita dal regolatore PID può essere differente da quello della variabile di controllo.

Anche non disponendo dell'attuatore e possibile riprodurre virtualmente il tutto supponendo che vi sia una saturazione, sul valore dell'ampiezza della variabile di controllo.



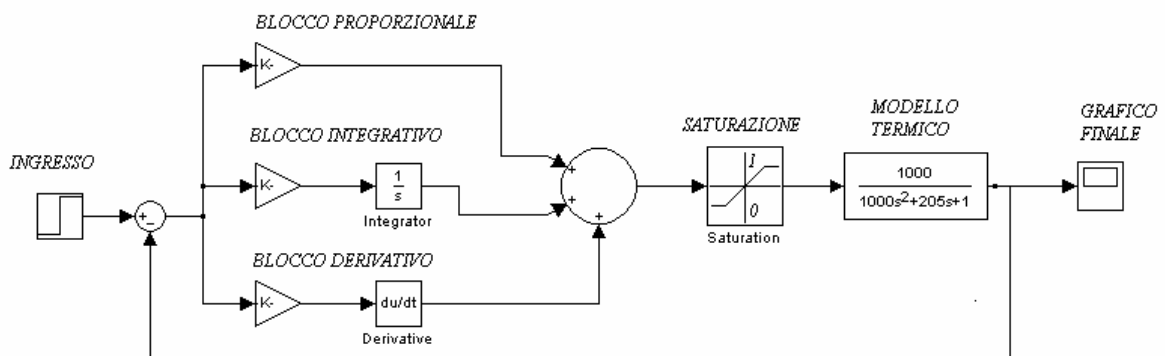
Per capire come, la saturazione dell'attuatore, influisce sull'azione di controllo del sistema, consideriamo il seguente caso: supponiamo che il sistema si trovi in uno stato di equilibrio (errore nullo). Ad un certo istante viene applicato un gradino, al segnale di riferimento $r(t)$, che sollecita il controllore a fornire un gradino al segnale di controllo $u(t)$. A causa della saturazione il segnale di controllo effettivo $u_m(t)$ è più basso di $u(t)$ e quindi la variazione del segnale controllato, e quindi dell'errore, sarà inferiore rispetto al caso non limitato.

A causa della ridotta velocità di decrescita del segnale di errore, il termine integrale continua a crescere ma tale incremento non produce alcun effetto sulla variabile di controllo effettiva.

Il regolatore non funziona quindi correttamente e addirittura resta inattivo anche quando l'errore diminuisce o si inverte di segno; infatti, prima di ottenere un segnale utile per la regolazione, si deve "scaricare" il termine integrale. Questo causa una elevata sovraelongazione e un tempo di assestamento del sistema molto più elevato.

In termini tecnici questo fenomeno prende il nome di windup del PID.

Lo schema che utilizzeremo per tastare una situazione di questo tipo è il seguente.



4. PID DESATURAZIONE

Per evitare il problema della saturazione esistono diversi metodi chiamati anche più comunemente metodi anti-windup o metodi di desaturazione.

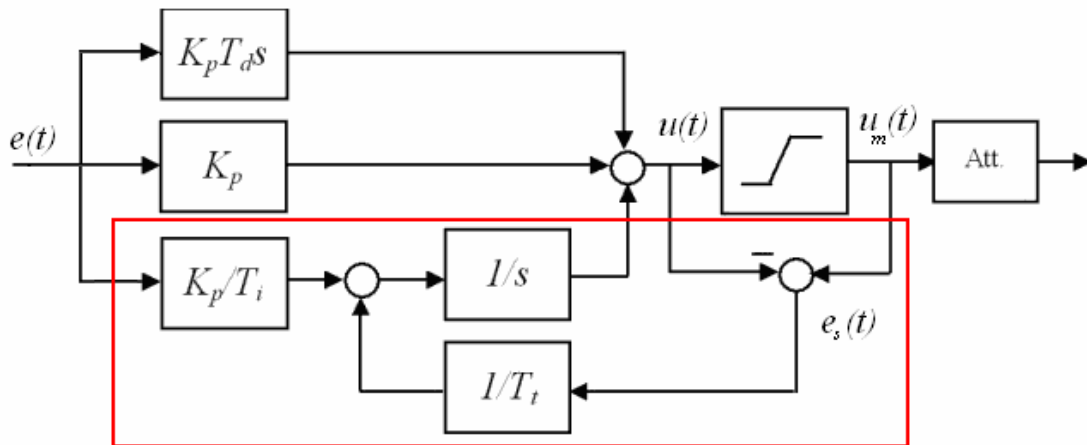
Uno dei più diffusi, che anche noi considereremo, prende il nome di “back calculation” e si basa sul ricalcolo del termine integrale.

Più precisamente questa tecnica introduce un termine di compensazione $e_s(t) = u_m(t) - u(t)$ all'ingresso del termine integrale, con segno opposto a quello del segno di errore $e(t)$.

Quando il controllore satura il parametro del blocco integrale viene ricalcolato, diminuendo la sua azione di una quantità proporzionale alla profondità di saturazione.

Il segnale di compensazione viene filtrato da una funzione di trasferimento $F(s)$ tramite cui è possibile modulare l'azione di desaturazione. Siccome però il termine di compensazione entra poi in un integratore, solitamente la funzione di trasferimento del filtro $F(s)$ è semplicemente una costante $1/T_t$.

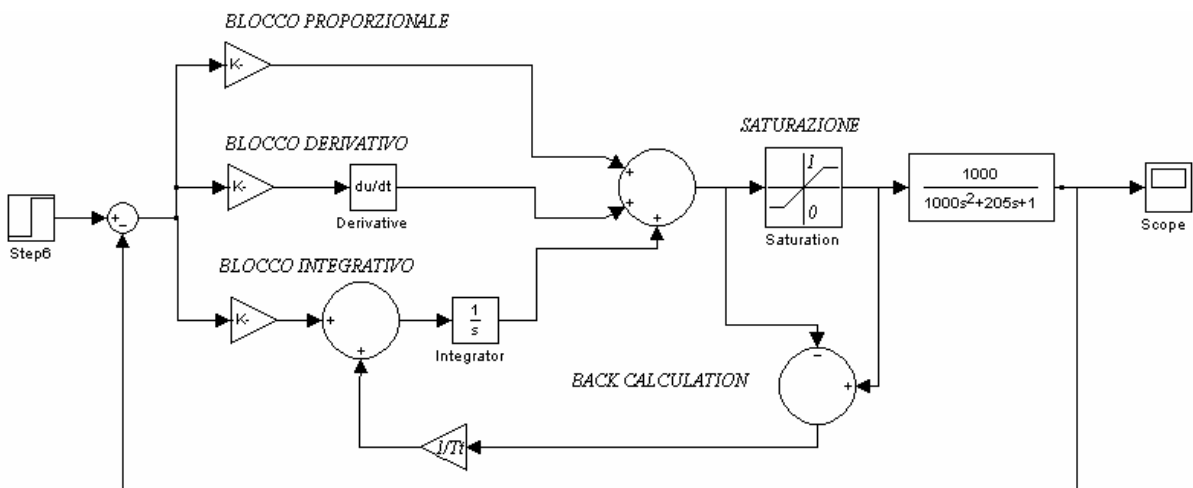
Per scegliere correttamente T_t occorre considerare che per T_t molto piccoli l'azione di desaturazione è molto veloce ma però anche facilmente soggetta all'azione di disturbi; se invece T_t è grande l'azione di desaturazione è lenta.



Nuovo blocco integrale

Di solito una scelta suggerita da molti libri, che anche noi adotteremo, è imporre a T_t un valore pari a $T_t = \sqrt{T_i * T_D}$.

Applicando i seguenti concetti al nostro caso specifico otteniamo il seguente schema di desaturazione da analizzare:



4.5.2.Osservazioni risultati e simulazioni con parametri ideali

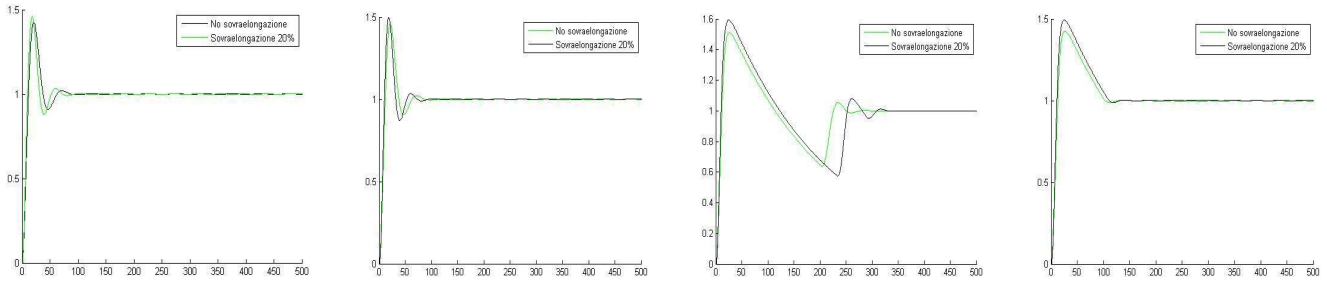
Riportiamo di seguito i risultati delle simulazioni ottenuti adottando parametri ideali.

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE
Ziegler Nichols	RiseTime	6,852	6,617	6,631	7,380
	SettlingTime	68,511	69,822	291,201	102,484
	SettlingMinx	0,894	0,884	0,595	0,900
	SettlingMax	1,435	1,481	1,562	1,459
	Overshoot	43,496	48,111	56,178	45,850
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	1,435	1,481	1,562	1,459
	PeakTime	18,820	19,270	25,390	25,895
Chien Hrones Reswick risposta al disturbo al gradino senza sovraelongazione	RiseTime	7,728	7,512	7,529	8,243
	SettlingTime	59,341	74,998	245,963	99,107
	SettlingMinx	0,900	0,900	0,638	0,900
	SettlingMax	1,425	1,459	1,509	1,425
	Overshoot	42,539	45,901	50,941	42,498
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	1,425	1,459	1,509	1,425
	PeakTime	21,190	21,575	26,600	27,090
Chien Hrones Reswick risposta al disturbo al gradino con sovraelongazione del 20%	RiseTime	6,618	6,419	6,432	7,078
	SettlingTime	66,866	67,785	304,207	106,939
	SettlingMinx	0,880	0,871	0,575	0,900
	SettlingMax	1,459	1,499	1,593	1,493
	Overshoot	45,854	49,917	59,294	49,298
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	1,459	1,499	1,593	1,493
	PeakTime	18,350	18,750	25,255	25,670
Cohen coon	RiseTime	15,759	17,283	17,284	22,248
	SettlingTime	95,585	155,432	155,397	53,759
	SettlingMinx	0,902	0,903	0,903	0,899
	SettlingMax	1,026	1,039	1,039	0,999
	Overshoot	2,396	3,569	3,568	0,000
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	1,026	1,039	1,039	0,999
	PeakTime	58,425	58,355	58,355	500,000
ISE	RiseTime	13,695	13,802	13,805	14,718
	SettlingTime	21,309	22,139	22,102	65,275
	SettlingMinx	0,900	0,900	0,900	0,895
	SettlingMax	1,010	1,013	1,013	0,994
	Overshoot	1,083	1,314	1,301	0,000
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	1,010	1,013	1,013	0,994
	PeakTime	29,560	30,640	30,595	500,000

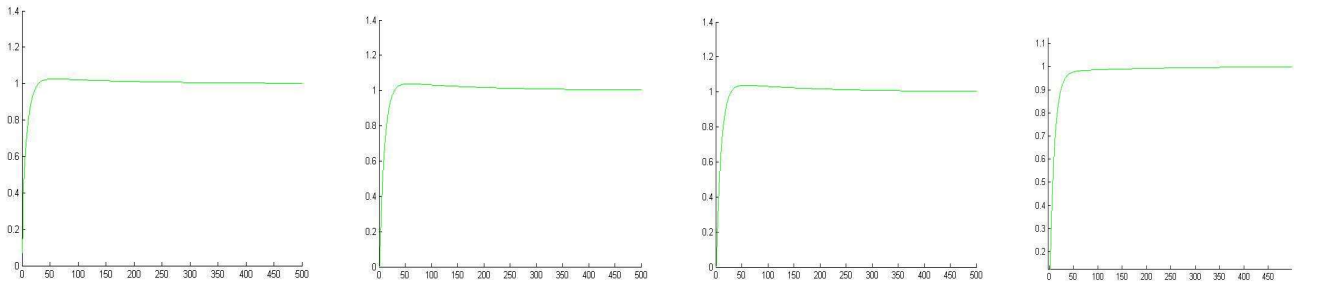
TSE	RiseTime	13,187	13,257	13,261	14,035
	SettlingTime	20,217	30,332	30,089	57,283
	SettlingMinx	0,900	0,900	0,900	0,896
	SettlingMax	1,018	1,021	1,021	0,995
	Overshoot	1,850	2,061	2,047	0,000
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	1,018	1,021	1,021	0,995
	PeakTime	27,945	28,855	28,805	500,000
IST ² SE	RiseTime	13,892	13,931	13,936	14,728
	SettlingTime	21,318	31,878	31,594	24,234
	SettlingMinx	0,900	0,900	0,900	0,896
	SettlingMax	1,018	1,021	1,021	0,996
	Overshoot	1,857	2,067	2,050	0,000
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	1,018	1,021	1,021	0,996
	PeakTime	29,445	30,260	30,205	500,000
Skogestad PI c=2	RiseTime	334,047	334,047	334,047	334,047
	SettlingTime	1623,800	1623,800	1623,800	1623,800
	SettlingMinx	0,900	0,900	0,900	0,900
	SettlingMax	1,158	1,158	1,158	1,158
	Overshoot	15,814	15,814	15,814	15,814
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	1,158	1,158	1,158	1,158
	PeakTime	738,610	738,610	738,610	738,610
Skogestad PI c=4	RiseTime	334,047	334,047	334,047	334,047
	SettlingTime	1623,800	1623,800	1623,800	1623,800
	SettlingMinx	0,900	0,900	0,900	0,900
	SettlingMax	1,158	1,158	1,158	1,158
	Overshoot	15,814	15,814	15,814	15,814
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	1,158	1,158	1,158	1,158
	PeakTime	738,610	738,610	738,610	738,610
Skogestad PID c=2	RiseTime	3177,300	3176,200	3177,300	3177,300
	SettlingTime	3858,600	3858,600	3858,600	3858,600
	SettlingMinx	0,562	0,562	0,562	0,562
	SettlingMax	0,625	0,625	0,625	0,625
	Overshoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	0,625	0,625	0,625	0,625
	PeakTime	4000,000	4000,000	4000,000	4000,000
Skogestad PID c=4	RiseTime	3300,700	3299,200	3300,700	3300,700
	SettlingTime	3877,900	3877,900	3877,900	3877,900
	SettlingMinx	0,370	0,370	0,370	0,370
	SettlingMax	0,411	0,411	0,411	0,411
	Overshoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Undershoot	0,000	0,000	0,000	0,000
	Peak	0,411	0,411	0,411	0,411
	PeakTime	4000,000	4000,000	4000,000	4000,000

Grafici in ordine rispettivo: PID, PID + D retroazione, Saturazione, Desaturazione

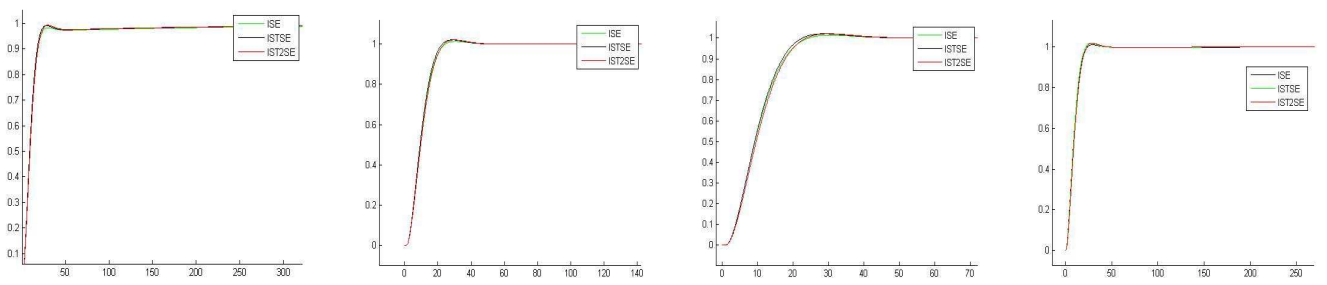
Metodi Chien Hrones Reswick



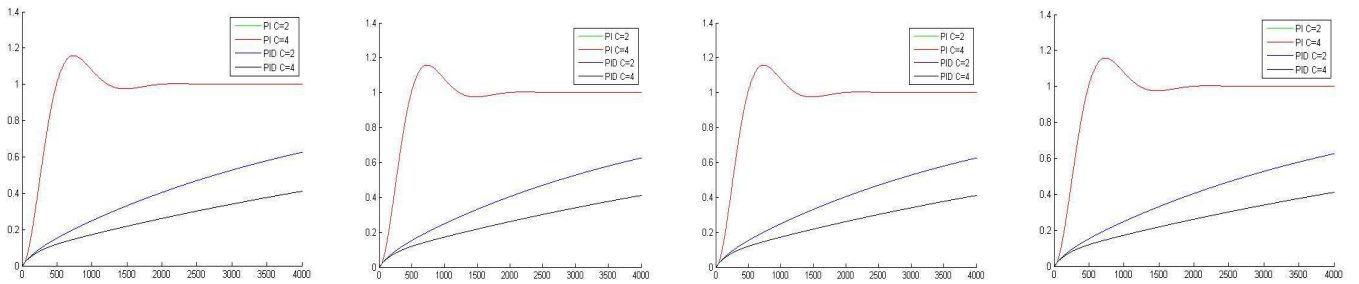
Metodi Cohen Coon



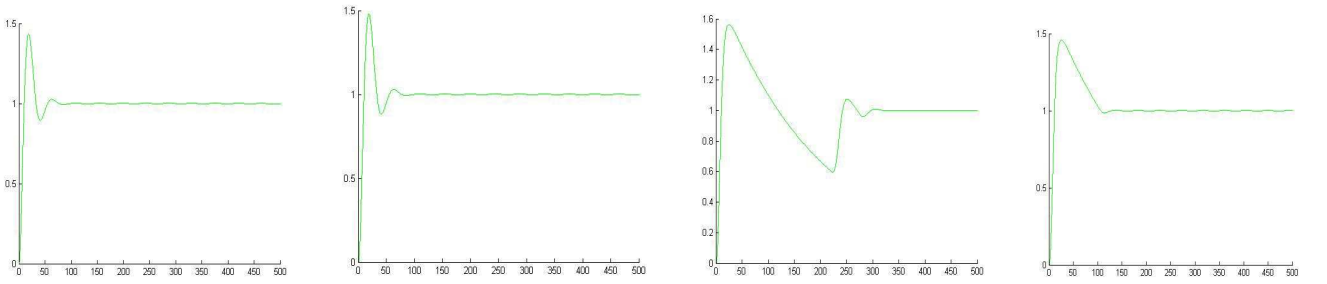
Metodi ISE ISTSE IST²SE



Metodi Skogestad

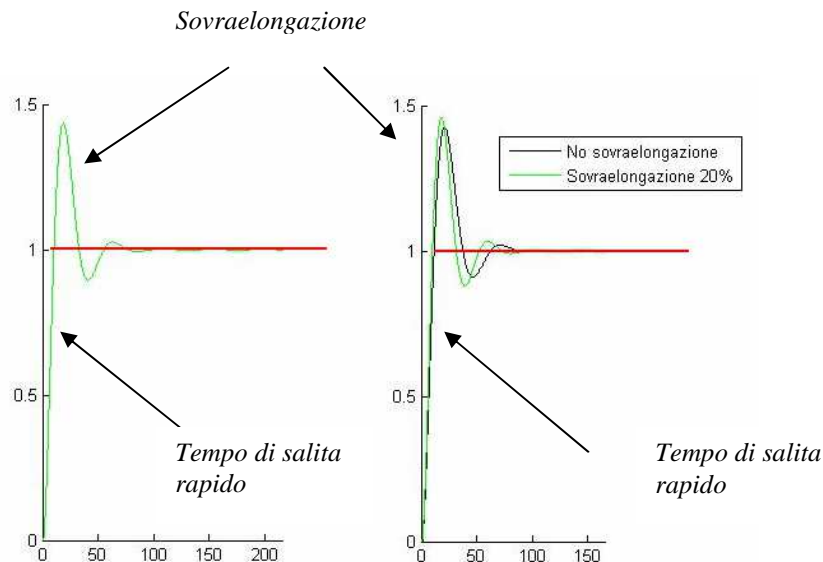


Metodo Ziegler Nichols



Da un'analisi attenta dei risultati numerici e dei grafici, che possono facilitare la comprensione, se valutati con criterio, possiamo dedurre le seguenti conclusioni.

Il rise time (tempo di salita) migliore si registra nei metodi di Ziegler Nichols e in tutti i metodi di Chien Hrones Reswick. A favore però di un tempo più breve si hanno notevoli problemi a livello di peak (picco). Le tecniche appena proposte quindi garantiscono una elevata prontezza per raggiungere nel più breve tempo possibile la temperatura desiderata ma nel fare ciò sovraelongano molto.

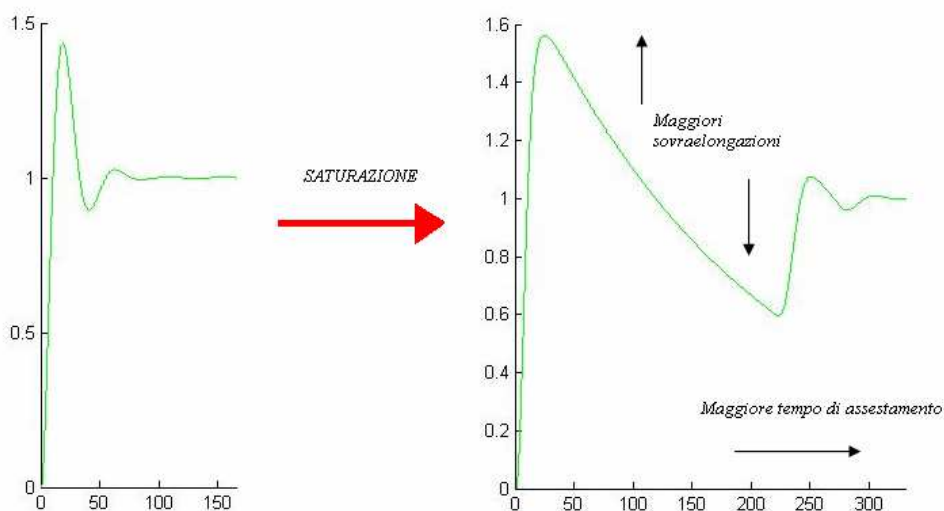


Questo comportamento ha elevati problemi a livello di saturazione.

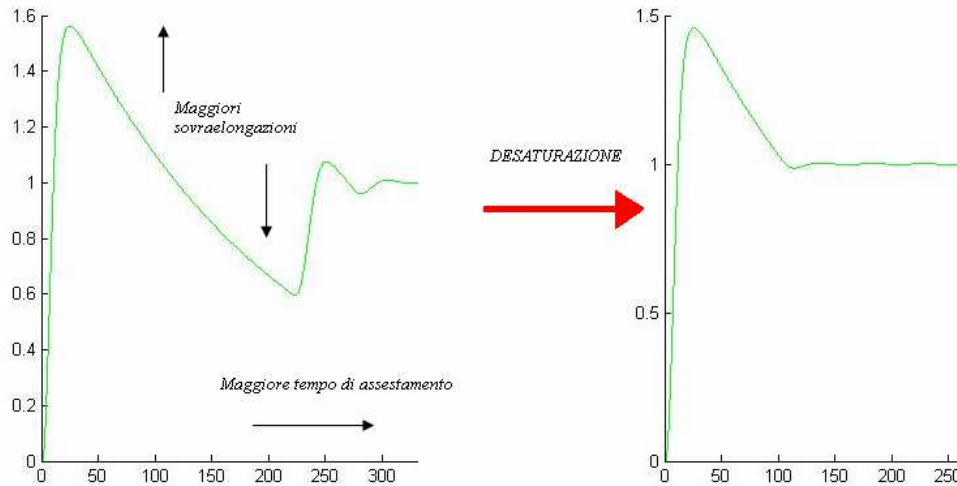
Quando il controllore satura il regolatore non riesce ad esercitare una piena azione di controllo sul processo. La resistenza termica o qualsiasi altro mezzo atto al riscaldamento riscalda l'ambiente esterno con una temperatura inferiore a quella prestabilita dal controllo.

Maggiore è la differenza tra la variabile di controllo è quella di attuazione e maggiore sono le sovraelongazioni e i tempi di assestamento del sistema.

I dati numerici e i grafici confermano quanto detto e mettono in evidenza proprio questi problemi caratteristici di queste tecniche.



Utilizzando le tecniche di desaturazione, cioè ricalcolando il termine integrale che è il principale responsabile di questi problemi si risolve pienamente il problema. L'utilizzo di questo stratagemma permette di riabbassare il livello delle sovraelongazioni e il tempo necessario affinché il sistema si assesti (settling time) a fronte però di un peggioramento, se pur minimo, rispetto al caso precedente non saturato.



Dopo i metodi di Ziegler e Nichols e Chien Hrones Reswick un altro gruppo di tecniche che forniscono risultati molto simili e interessanti sono quelli di Cohen e Coon, ISE, ISTSE e IST²SE.

A dispetto delle tecniche precedenti quest'ultimi garantiscono un tempo di salita (rise time) più elevato ma non hanno problemi di sovraelongazioni come i precedenti.

Il controllore che utilizza queste tecniche adotta quindi una strategia opposta a quella prima vista: vengono sacrificate le caratteristiche di prontezza per lasciare spazio a una maggiore stabilità.

Le resistenze termiche o qualsiasi altro mezzo atto al riscaldamento riscaldano quindi l'ambiente esterno in modo più moderato.

Tutto questo si traduce in minor problemi in caso di saturazione.

I metodi ISE, ISTSE e IST²SE si differenziano dal metodo di Cohen Coon per il settling time (tempo di assestamento) cioè il tempo necessario affinché il sistema entri all'interno di una banda, senza più uscirne, del valore di regime.

In particolare i primi tre metodi offrono rispetto a quest'ultimo risultati migliori cioè ci si avvicina alla temperatura di riferimento in un tempo molto più veloce.

Un particolare degno di nota riguarda l'azione di desaturazione.

Nei quattro metodi appena analizzati l'azione di desaturazione, svolta per risolvere i problemi di saturazione porta a un peggioramento delle prestazioni. Oltre a un aumento del rise time, già riscontrato con i metodi di Ziegler e Nichols e Chien Hrones Reswick, su ha un notevole peggioramento del settling time. Nella tabella dei dati non bisogna farsi ingannare dai valori allettanti della quarta colonna dove il settling time è calcolato per un valore inferiore a quello unitario. Al tempo di 500s (fine simulazione) infatti il sistema deve ancora raggiungere il valore di regime.

In conclusione i metodi di Cohen e Coon ISE, ISTSE e IST²SE offrono risultati interessanti, soprattutto in situazioni di saturazione.

Tra i metodi invece che hanno fornito i risultati più deludenti fanno parte quelli di Skogestad.

In particolare le due tecniche con azione derivativa non nulla, che avevamo provato, pur non essendo consigliate dall'autore del metodo, hanno evidenziato effettivamente di non essere adatte al nostro modello termico.

I restanti due metodi invece, che hanno fornito risultati uguali indipendentemente dal valore del fattore c , permettono di raggiungere la temperatura di riferimento (errore nullo) ma in tempi notevolmente più elevati rispetto a tutti i metodi precedenti.

I valori di picco hanno caratteristiche molto buone ma il tempo affinché il sistema di assesti (settling time) risulta completamente non comparabile con quello offerto dalle tecniche di prima.

Ultima considerazione degna di nota riguarda infine la configurazione PI + D retroazione.

A differenza di quanto sperato una configurazione di questo tipo non ha portata miglioramenti apprezzabili in tutte le tecniche. È bene ricordare però che tutti i circuiti sono stati analizzati in caso di idealità cioè in assenza di disturbi esterni che si sommano al segnale di riferimento. Se avessimo considerato casi di questo tipo con buona probabilità il blocco derivativo avrebbe fornito risultati molto più rilevanti, tanto magari da farlo preferire alla versione classica del regolatore PID.

A seguito di queste conclusioni possiamo ora giungere a una prima scelta delle tecniche di sintesi prima illustrate.

Indipendentemente dal processo che stiamo considerando se possibile si vorrebbe sempre ottenere, con l'azione di controllo, un sistema molto stabile e dalle risposte veloci a fronte di una variazione del riferimento di ingresso.

Nei casi reali, come abbiamo già potuto vedere con le simulazioni, questi due requisiti desiderati sono spesso però in lotta tra loro. L'obiettivo di conseguenza è quello di trovare una tecnica che garantisca un compromesso tra i due.

A differenza di molti sistemi, come quelli elettrici, nella gran parte dei processi termici, dove si ha a che fare con tempi dell'ordine dei secondi se non dei minuti, la velocità di risposta del sistema può essere maggiormente trascurata a favore di una migliore stabilità.

La temperatura esterna può essere raggiunta in modo meno sovraelungante e più smorzante .

Questo oltre a garantire una minore variazione della temperatura garantisce anche, a fronte di uno minore stress, una maggiore durata delle resistenze o di qualsiasi altro mezzo atto al riscaldamento.

Tra le tecniche di sintesi precedenti, quelle che soddisfano maggiormente le nostre richieste, sono quindi quelle del secondo gruppo analizzato, di cui fanno parte il metodo di Cohen e Coon ISE, ISTSE e IST^2SE .

Tra questi quello che garantisce il miglior compromesso sia in caso di funzionamento normale che saturato è il metodo ISE. La tecnica ISTSE fornisce prestazioni ancora miglior ma non assicura risultati uguali in regime di saturazione.

Per confermare, a questo punto, la scelta è però ora d'obbligo analizzare la robustezza delle tecniche di sintesi proposte cioè osservare come si comportano i metodi precedenti a fronte di una taratura errata dei parametri.

L'analisi numerica delle tecniche di sintesi, nel caso di parametri errati, ci permetterà di mettere in evidenza questo aspetto.

4.5.2.Osservazioni risultati e simulazioni con parametri errati

L'analisi numerica seguente, come, già accennato in precedenza, ci consentirà di valutare il comportamento del controllore a seguito di una variazione dei parametri interni dovuta a una qualsiasi causa.

In altre parole ci permetterà di evidenziare le caratteristiche di robustezza del regolatore stesso è quindi completare le scelte prima effettuate nel caso ideale

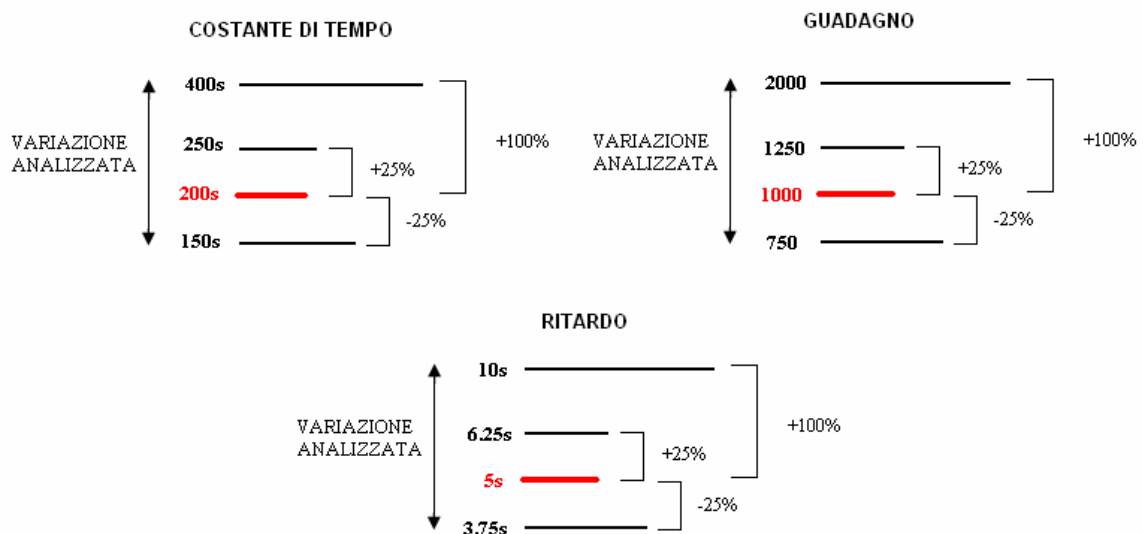
Per evidenziare il comportamento del controllore in queste condizioni di lavoro ogni parametro verrà fatto variare in modo opportuno.

In totale verranno eseguite le seguenti modifiche:

- Variazione dei parametri del +25%
- Variazione dei parametri del -25%
- Variazione dei parametri del +100%
- Variazione dei parametri del -95%

Nei primi tre casi verranno fatti variare, prima singolarmente e poi insieme, tutti e tre i parametri caratteristici del controllore: tau, T e guadagno.

Se a una variazione del +/-25 e addirittura del +100% corrisponde una variazione della costante di tempo e del guadagno abbastanza ampia, lo stesso però non possiamo concludere per il ritardo, come evidenziato di seguito:



È abbastanza facile nelle realtà, sottostimando un ritardo di 5s, commettere errori maggiori di quelli analizzati. Addirittura con alcune delle tecniche di identificazione dei parametri, precedentemente osservate, si possono ottenere valori al di poco superiori a quello nullo.

Per evitare tutti questi problemi, ai precedenti casi, se né aggiunto un quarto che considera solamente una variazione del -95% del ritardo.

L'insieme di queste quattro strategie ci permetteranno di riprodurre virtualmente, una volta analizzate, tipici casi di sovra e sotto stima, che si commettano nella realtà, ad opera dell'operatore o dallo stesso metodo di identificazione dei parametri.

Osservando ora i dati numerici ottenuti (riportati a fine tesi) possiamo concludere le seguenti considerazioni.

Una delle prime informazioni che possiamo subito dedurre è che non esiste tecnica di sintesi del controllore, che a fronte di una variazione dei parametri più o meno elevata, non provochi un cambiamento delle prestazioni del regolatore.

L'aspetto veramente interessante è che, a fronte di queste variazioni, il sistema può avere un comportamento peggiore, uguale o addirittura migliore a quello ideale. Una stima dei parametri non corretta, a differenza di quanto si pensa, a volte è quindi ben accetta e non è sinonimo di un controllo peggiore.

Osservando le tabelle e concentrandoci sulla variazione delle prestazioni è possibile intuire che ogni tecnica di sintesi ha una proprio robustezza cioè a fronte di una variazione dei parametri di ingresso garantisce prestazioni di controllo differenti.

In linea di massima è possibile comunque trarre le seguenti considerazioni dai primi tre casi (+/-25% e 100%).

I metodi del primo gruppo, analizzati nel caso ideale: Ziegler Nichols e Chien Hrones Reswick garantiscono prestazioni quasi tutti peggiori in caso di sottostima dei parametri (-25%)
Per valori invece superiori a quelli ideali garantiscono, ad eccezione della sovrastima della costante di tempo tau, un leggero peggioramento del controllo del sistema.

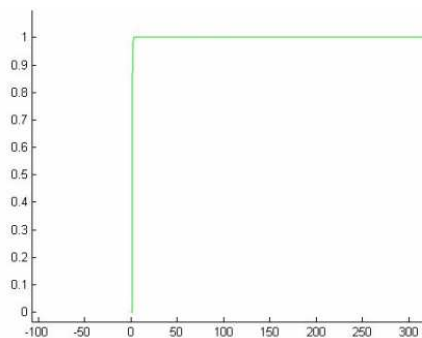
Il metodo di Cohen e Coon in caso di elevata sovrastima hanno una buona robustezza nei confronti di tutti i parametri ad eccezione del ritardo T. Per valori invece inferiore a quelli ideali si ha un leggero miglioramento delle prestazioni ad esclusione del caso della costante di tempo tau.

Altri risultati interessanti si ottengono invece con la classe dei metodi: ISE, ISTSE, IST²SE.
A differenza di tutti le tecniche precedentemente viste questi metodi garantiscono un'ottima robustezza accompagnata da un miglioramento delle prestazioni in caso di sottostima dei parametri.
Risultati invece deludenti, ad eccezione della costante di tempo tau, si ottengono per una sovrastima dei valori.

Analogo comportamento si registra con Skogestad dove però i tempi richiesti affinché il sistemi si stabilizzi sono ancora notevolmente elevati e non comparabili con tutte le tecniche precedenti.

Risultati molto più interessanti si sono invece ottenuti dall'analisi del quarto caso (T -95%).

In situazioni di elevata sottostima del ritardo il risultato migliore si è ottenuto con il metodo di Cohen e Coon che ha fornito caratteristiche di stabilità e rapidità eccezionali.



Anche la tecnica di Skogestad ha registrato un netto miglioramento e soprattutto una grande robustezza sia nel caso di funzionamento normale che saturato

Prestazioni più deludenti si sono invece ottenute con i metodi ISE, ISTSE e IST²SE che hanno però continuato a garantire la stabilità del sistema.

Per finire, i metodi invece che hanno mal supportato una situazione di questo tipo sono stati quelli di Ziegler Nichols e Chien Hrones Reswick che hanno compromesso la stabilità del sistema.

Da queste considerazioni è emerso come sia impossibile trarre una conclusione generale per la sovra o sotto stima dei parametri che soddisfi ogni tecnica di sintesi: ad eccezione della sovrastima della costante di tempo tau, dove si registra quasi sempre un miglioramento delle prestazioni, in tutti gli altri casi si hanno situazioni molto diverse.

Una delle principali prerogative affinché un controllore possa essere definito robusto è sicuramente la sua capacità di non portare il sistema all'instabilità a fronte di una errata stima dei parametri del sistema.

Ragionando sotto questa ottica è possibile trarre delle conclusioni più oggettive.

Dall'analisi numerica svolta le tecniche di sintesi possono essere così classificate:

TECNICHE DI SINTESI	
ROBUSTE	NON ROBUSTE
ISE ISTSE IST2SE COHEN COON SKOGESTAD	ZIEGLER NICHOLS CHIEN HRONES RESWICK

I metodi di Ziegler Nichols e Chien Hrones Reswick portano il sistema all'instabilità solamente in caso di sottostima dei parametri.

In conclusione per garantire, indipendentemente dalla tecnica di sintesi utilizzata, che il controllore non porti a "rovina" l'intero sistema è sempre meglio sovrastimare prestando attenzione in particolare soprattutto per il ritardo T.

Il sistema termico di partenza dovrà quindi essere considerato più lento ma soprattutto più "ritardato".

Ovviamente operando in questo modo, utilizzando alcune tecniche di sintesi, non si otterranno prestazioni uguali al caso ideale ma sicuramente non si incorrerà all'instabilità che rappresenta uno dei primi obiettivi del controllo dei sistemi.

Per completezza riassumiamo, in modo schematico, nella tabella a seguire tutte le considerazioni effettuate.

	SOVRASTIMA		SOTTOSTIMA		AZIONE CONSIGLIATA	AZIONE DA EVITARE
	25%	100%	-25%	T -95%		
ZIEGLER NICHOLS	Ottime prestazioni	Buoni risultati per la costante di tempo. Altri casi leggero peggioramento delle prestazioni	Peggioramento prestazioni	INSTABILITA'	Sovrastimare per non avere instabilità	Sottostimare
CHIEN HRONES RESWICK NO SOVRAELONGAZ.	Buoni risultati per la costante di tempo. Altri casi leggero peggioramento delle prestazioni	Buoni risultati per la costante di tempo. Altri casi peggioramento delle prestazioni	Leggero peggioramento delle prestazioni. Risultati migliori per il guadagno	INSTABILITA'	Sovrastimare per non avere instabilità	Sottostimare
CHIEN HRONES RESWICK 20% SOVRAELONGAZ.	Prestazioni abbastanza buone	Buoni risultati per la costante di tempo. Altri casi peggioramento delle prestazioni	Prestazioni abbastanza buone. Aumento del settling time in alcuni casi	INSTABILITA'	Sovrastimare per non avere instabilità	Sottostimare
ISE	Prestazioni ottime per costante di tempo. Per il guadagno leggero peggioramento. Altri casi leggero peggioramento.	Prestazioni ottime per costante di tempo. Per gli altri casi leggero peggioramento.	Ottime prestazioni	Ottime prestazioni ad eccezione nei casi di saturazione e desaturazione	Sottostimare per avere migliori prestazioni	
ISTSE	Per costante di tempo, ritardo e guadagno ottime prestazioni. Se variano tutte peggiori prestazioni	Buoni risultati per la costante di tempo. Altri casi peggioramento delle prestazioni	Ottime prestazioni	Ottime prestazioni ad eccezione nei casi di saturazione e desaturazione	Sottostimare per avere migliori prestazioni	
IST2SE	Per costante di tempo, ritardo e guadagno ottime prestazioni. Se variano tutte peggiori prestazioni	Buoni risultati per la costante di tempo. Altri casi peggioramento delle prestazioni	Ottime prestazioni	Ottime prestazioni ad eccezione nei casi di saturazione e desaturazione	Sottostimare per avere migliori prestazioni	
COHEN COON	Ottimi risultati per la costante di tempo. Altri casi leggero peggioramento delle prestazioni	Per la costante di tempo riduzione del settling time e aumento del rise time. Ritardo = caso peggiore. Per gli altri leggero miglioramento prestazioni	Per la costante di tempo aumento del settling time. Altri casi leggero miglioramento delle prestazioni	Ottime prestazioni	Sottostimare per avere migliori prestazioni	
SKOGESTAD	Peggioramento prestazioni	Per la costante di tempo e guadagno riduzione rise time. Per ritardo buone prestazioni. Se variano tutte peggiori prestazioni	Prestazioni leggermente migliori ma ancora molto lento	Prestazioni ottime ma ancora molto lento	Sottostimare per avere migliori prestazioni	

Riprendono i risultati ricavati nel caso ideale e abbinando le considerazioni appena ottenute possiamo concludere che le classe di tecniche di sintesi ISE, ISTSE e IST^2SE costituiscono una buona scelta per il controllo di un processo termico. Quest'ultime garantiscono infatti ottime prestazioni in caso di funzionamento ideale e sottostima dei parametri ed elevata robustezza.

Nel caso non si conoscano le tecniche di sintesi e si voglia abbandonare la filosofia di sovrastima dei parametri, a favore di una maggiore prestazione del controllore, le tabelle, le simulazioni virtuali e i risultati appena riportati devono rappresentare per gli operatori, addetti al controllo, una fonte fondamentale a cui far sempre riferimento per la stima o la verifica delle scelta dei parametri affinché il sistema possa funzionare sempre in condizioni di stabilità.

CAPITOLO 5

Metodi di identificazione dei parametri e tecniche di sintesi del controllore

Completiamo lo studio delle analisi numeriche osservando ora le prestazioni che si ottengono quando metodi di identificazioni dei parametri e tecniche di sintesi vengono fatte lavorare assieme.

Le valutazioni che otterremo da questa simulazione rappresentano un'importante risultato di interesse pratico.

Attivando la funzione di auto-tuning infatti tecniche di sintesi del controllore e identificazione dei parametri cooperano assieme: le prime tarano il regolatore sulla base dei parametri ricavati dalla seconde.

Dall'analisi, di quest'ultima prova, sarà quindi possibile verificare, consolidare oppure correggere le considerazioni maturate fino ad ora e sicuramente, in ogni caso, sarà una opportunità per trarre nuove informazioni.

5.0.0.Simulazione e analisi numerica

Osservando e sfruttando quanto visto fino a questo punto, possiamo già dedurre parte dei risultati che otterremo, o meglio: spereremo di ottenere, con questa ultima simulazione.

Dalle conclusioni fatte per le tecniche di sintesi abbiamo notato come questi metodi siano sensibili alla modifica dei parametri interni.

La sovrastima e la sottostima dei dati ricavati con i metodi di identificazione dei parametri rappresentano quindi uno dei principali aspetti da cui partire e da tenere in considerazione per intuire il comportamento del controllore e quindi del sistema.

Riportiamo di seguito una tabella riassuntiva dei vecchi dati ottenuti:

METODI IDENTIFICAZIONE PARAMETRI	VALORI RILEVATI		EFFETTI RILEVAZIONI RISPETTO AL CASO IDEALE	
	COSTANTE DI TEMPO	RITARDO	COSTANTE DI TEMPO (ideale = 200s)	RITARDO (ideale = 5s)
METODO APPROX RISP AL GRADINO CON RITARDO PARI 5% VALORE REG	188,858	15,056	Sottostima	Sovrastima
METODO APPROX RISP AL GRADINO CON RITARDO PARI 1% VALORE REG	198,635	5,279	Sottostima	Sovrastima
METODO APPROX DELLA TANGENTE	219,840882	4,076449	Sovrastima	Sottostima
METODO APPROX RISP AL GRADINO CON RITARDO REALE	203,9	0,014	Sovrastima	Sottostima

Osservando i risultati appena riportati e ricordando quanto detto precedentemente possiamo intuire, senza dilungarci troppo, che non tutte le tecniche di sintesi sono compatibili con i metodi di identificazione dei parametri. Sicuramente le tecniche di Ziegler Nichols e Chien Hrones Reswick non garantiranno la stabilità del sistema quando verranno utilizzate assieme al metodo di approssimazione della risposta al gradino con ritardo reale a cause dall'elevata sottostima del ritardo.

Confrontiamo a questo punto le nostre deduzioni con i risultati pratici della simulazioni. Tutti i dati numerici ancora una volta sono riportati a fine tesi nell'appendice A.

Dalle informazioni ricavate quella che sicuramente stupisce più di tutte è l'instabilità della tecnica di Cohen Coon, a causa di una forte riduzione del ritardo al di sotto del caso ideale. Il metodo, che precedentemente, aveva quindi fornito risultati eccezionali ha smascherato la sua scarsa robustezza nei confronti della sottostima dei parametri.

Queste considerazioni confermano e consolidano quindi la conclusione prima fatta: per non cadere in instabilità è sempre meglio, quando non si conosce il controllore, sovrastimare i parametri e sacrificare le prestazioni per lasciare spazio a una più sicura e certa stabilità.

I restanti risultati sono invece conformi a quanto già dedotto e non aggiungono ulteriori interessanti informazioni rispetto a quanto già conosciamo.

OSSERVAZIONI E CONCLUSIONI

Descrizione dei risultati ottenuti

Dallo studio fatto attraverso calcoli e simulazioni si è potuti giungere ad una serie di conclusioni importanti.

Nel controllo di un processo termico, effettuato per mezzo di controllori auto-tuning, la conoscenza profonda del regolatore costituisce un aspetto di notevole importanza da non sottovalutare.

La funzione di auto-tuning inoltre, anche se non sempre fornisce risultati ottimali, non deve essere vista dall'operatore solo come un mezzo per semplificare l'attività di controllo ma anche e soprattutto uno strumento, che abbinato all'esperienza personale, rappresenta un buon punto di partenza dal quale ottenere una taratura che fornisca prestazioni soddisfacenti.

Un buon regolatore si avvale di ottime tecniche di sintesi e identificazione dei parametri.

La scelta di quale criterio di sintesi adottare costituisce un importante dilemma che deve essere risolto tenendo soprattutto in considerazione le caratteristiche del nostro sistema e gli obiettivi prefissati.

Lo studio dei processi termici ha evidenziato che le scelte migliori non sono sempre quelle che garantiscono una maggiore prestazioni. A volte le performance del sistema devono essere sacrificate per far spazio a una maggiore stabilità.

L'instabilità del sistema abbiamo visto può essere evitata sovrastimando i parametri, con un occhio di riguardo soprattutto per il ritardo (in altre parole il sistema di partenza deve essere considerato più lento e in particolare più "ritardato") oppure adottando tecniche di sintesi robuste.

Dall'analisi numeriche svolte i metodi che forniscono maggiore robustezza si sono dimostrati i seguenti:

TECNICHE DI SINTESI	
ROBUSTE	NON ROBUSTE
ISE ISTSE IST2SE SKOGESTAD	ZIEGLER NICHOLS CHIEN HRONES RESWICK COHEN COON

L'elevata robustezza garantisce a sua volta una libertà maggiore nella scelta dei metodi di identificazione.

Questa opportunità non deve però essere sfruttata per semplificare la progettazione del controllore.

In un regolatore auto-tuning tecniche di sintesi e identificazione dei parametri cooperano insieme quindi le decisioni dei metodi da utilizzare deve essere svolta valutando pregi e difetti di ciascun criterio in modo da ottenere nell'insieme un ottimo controllo auto-tuning che garantisca prestazioni elevate e non porti soprattutto il sistema all'instabilità.

Per effettuare questa operazione le analisi condotte durante la tesi costituiscono fonti di informazioni preziose da non dimenticare.

In particolare le simulazioni, con il quale abbiamo potuto riprodurre virtualmente il sistema fisico, hanno evidenziato come tra tecniche di sintesi e identificazione dei parametri vi sia un certo legame.

La tabella a seguire riassume i risultati ottenuti evidenziando i gradi di compatibilità tra le diverse tecniche.

	METODO APPROX RISP AL GRADINO CON RITARDO PARI AL 5% DEL VALORE DI REGIME	METODO APPROX RISP AL GRADINO CON RITARDO PARI ALL'1% DEL VALORE DI REGIME	METODO APPROX DELLA TANGENTE	METODO APPROX RISP AL GRADINO CON RITARDO REALE
Ziegler Nichols	✓	✓	✓	✗
Chien Hrones Reswick	✓	✓	✓	✗
Cohen coon	✓	✓	✓	✗
ISE	✓	✓	✓	✓
ISTSE	✓	✓	✓	✓
IST ² SE	✓	✓	✓	✓
Skogestad PI c=4	✓	✓	✓	✓

Anche se il mondo dei controllori costituisce uno scenario molto ampio e in continuo sviluppo, nel piccolo dei casi da noi considerati e sulla base delle informazioni raccolte possiamo concludere, a termine del nostro lavoro, che la classe dei metodi ISE, ISTSE e IST²SE si dimostra una delle scelte migliori per la taratura dei regolatore adibiti al controllo dei processi termici. Queste tecniche sono in grado infatti di fornire risultati ottimi in condizioni ideali e anche in caso di sottostima, sono compatibili con tutte le metodi di identificazione dei parametri e soprattutto garantiscono sempre una elevata robustezza durante il controllo dei sistemi a fronte di una variazione dei parametri interni.

Ultima soluzione interessante, che non possiamo non ricordare, è inoltre rappresentata dal metodo di Skogestad, che fornisce caratteristiche di robustezza in assoluto migliori rispetto a tutta la "concorrenza", ma richiede tempi di assestamento molto più elevati. Nel caso si abbia a che fare con processi termici, dove i tempi per raggiungere la temperatura prestabilita non rappresentano l'obbiettivo primario, questa tecnica può costituire un'ottima alternativa alle prime tre citate.

Conclusioni

L'attività di tesi viene svolta per approfondire o conoscere un nuovo argomento sfruttando le basi apprese in questi tre anni di università.

Questi lavori rappresentano quindi una buona opportunità per confrontare e mettere in pratica le conoscenze maturate fino ad ora e per arricchirle ulteriormente.

Il lavoro di tesi svolto, possiamo affermare, si è dimostrato molto produttivo.

A partire dalla sole informazioni fondamentali di controllore PID viste a lezione abbiamo scoperto e approfondito la funzionalità di auto-tuning, implementata oggi in grande parte dei regolatori avanzati, e siamo riusciti, alla fine, dalle simulazioni e dai risultati raccolti dalle analisi ad esprimere un giudizio finale oggettivo per la classe dei processi termici.

Da non dimenticare è inoltre l'opportunità, che si ha avuto, per approfondire le conoscenze del programma matlab che abbiamo cominciato a vedere come uno strumento di calcolo potente da apprezzare senza il quale avremmo fatto ben poco.

BIBLIOGRAFIA

Bertsch Michiel, Roberta Dal Passo, Lorenzo Giacomelli – *Analisi matematica*, Milano: editore The McGraw-Hill Companies, 2007

Bolzern Paolo, Scattolini Riccardo, Schiavoni Nicola - *Fondamenti di Controlli Automatici*, Milano: editore The McGraw-Hill Companies, 2004

Ferrante Augusto, Antonio Lepschy, Umberto Viario - *Introduzione ai controlli automatici*, Torino: editore CittàStudi, 2008

Veronesi Massimiliano - *Regolazione PID*, Milano: editore FrancoAngeli, 2011

Veronesi Massimiliano – “Studio delle tecniche di ottimizzazione per la taratura di regolatori Pid”, *Automazione e Strumentazione*, Aprile, 2005, 106 - 110.

Zomorodi Shahrokhi PID Tuning Comparison (www.people.bu.edu), settembre 2013

Automatic Tuning of PID-regulators (www.bsiswoyo.lecture.ub.ac.id), agosto 2013

Tuning of PID controllers (www.home.hit.no), agosto 2013

Zomorodi Shahrokhi PID Tuning Comparison (www.people.bu.edu), settembre 2013

APPENDICE A

Risultati numerici simulazioni

A causa del fatto, che tutti i risultati riportati fanno fede ai programmi matlab di fine tesi si denota con T la costante di tempo e tau il ritardo.

A.1. Risultati numerici tecniche di sintesi del controllore sovrastima dei parametri +25%

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Ziegler Nichols	ERRORE T +25%	RiseTime	6,2039	6,0052	6,0156	6,7504
		SettlingTime	47,4957	48,3409	280,7226	99,8816
		SettlingMinx	0,9006	0,9006	0,5899	0,9005
		SettlingMax	1,4065	1,4553	1,564	1,4478
		Overshoot	40,6461	45,5349	56,3952	44,7751
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,4065	1,4553	1,564	1,4478
		PeakTime	16,965	17,46	24,36	24,77
	ERRORE tau +25%	RiseTime	8,424	8,112	8,1305	9,1482
		SettlingTime	65,6825	66,7591	225,4188	89,5978
		SettlingMinx	0,9	0,9003	0,6899	0,9002
		SettlingMax	1,3705	1,4145	1,4443	1,3535
		Overshoot	37,046	41,4531	44,4327	35,3526
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,3705	1,4145	1,4443	1,3535
		PeakTime	22,66	23,165	27,125	27,91
	ERRORE guadagno +25%	RiseTime	7,5927	7,3235	7,3415	8,1054
		SettlingTime	78,4005	79,3302	301,7541	105,5815
		SettlingMinx	0,8669	0,855	0,598	0,9001
		SettlingMax	1,4615	1,5045	1,562	1,4711
		Overshoot	46,151	50,4494	56,1962	47,1148
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,4615	1,5045	1,562	1,4711
		PeakTime	20,95	21,355	26,665	27,265
	ERRORE T tau guadagno +25%	RiseTime	8,424	8,112	8,1305	9,1482
		SettlingTime	65,6825	66,7591	225,4188	89,5978
		SettlingMinx	0,9	0,9003	0,6899	0,9002
		SettlingMax	1,3705	1,4145	1,4443	1,3535
Overshoot		37,046	41,4531	44,4327	35,3526	
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,3705	1,4145	1,4443	1,3535	
PeakTime		22,66	23,165	27,125	27,91	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Chien Hrones Reswick no sovraelong	ERRORE T +25%	RiseTime	6,9213	6,7358	6,7485	7,4367
		SettlingTime	52,2945	53,0494	242,9089	97,0522
		SettlingMinx	0,9	0,9001	0,629	0,9005
		SettlingMax	1,405	1,4411	1,5167	1,4203
		Overshoot	40,4985	44,11	51,6699	42,0285
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,405	1,4411	1,5167	1,4203
		PeakTime	18,89	19,32	25,285	25,67
	ERRORE tau +25%	RiseTime	9,5036	9,2124	9,2356	10,2073
		SettlingTime	73,5963	74,637	212,7354	88,2843
		SettlingMinx	0,9004	0,9002	0,735	0,9001
		SettlingMax	1,3603	1,3923	1,4069	1,3319
		Overshoot	36,0288	39,232	40,6888	33,1888
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,3603	1,3923	1,4069	1,3319
		PeakTime	25,53	25,955	28,815	29,605
	ERRORE guadagno +25%	RiseTime	8,6553	8,408	8,4308	9,1688
		SettlingTime	87,7673	88,783	269,4742	102,0484
		SettlingMinx	0,8891	0,8817	0,6453	0,9001
		SettlingMax	1,4444	1,4752	1,5065	1,4335
		Overshoot	44,4395	47,5245	50,6542	43,3501
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,4444	1,4752	1,5065	1,4335
		PeakTime	23,835	24,17	28,25	28,855
	ERRORE T tau guadagno +25%	RiseTime	9,5036	9,2124	9,2356	10,2073
SettlingTime		73,5963	74,637	212,7354	88,2843	
SettlingMinx		0,9004	0,9002	0,735	0,9001	
SettlingMax		1,3603	1,3923	1,4069	1,3319	
Overshoot		36,0288	39,232	40,6888	33,1888	
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,3603	1,3923	1,4069	1,3319	
PeakTime		25,53	25,955	28,815	29,605	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Chien Hrones Reswick sovraelong 20%	ERRORE T +25%	RiseTime	5,9665	5,7968	5,8066	6,4346
		SettlingTime	57,2919	58,6744	297,6405	105,5235
		SettlingMinx	0,9001	0,8979	0,5657	0,9001
		SettlingMax	1,4331	1,4763	1,6037	1,4904
		Overshoot	43,3072	47,6295	60,3692	49,0443
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,4331	1,4763	1,6037	1,4904
		PeakTime	16,47	16,91	24,26	24,59
	ERRORE tau +25%	RiseTime	8,0962	7,8329	7,8506	8,7244
		SettlingTime	62,6038	63,5015	231,4027	92,6223
		SettlingMinx	0,9001	0,9002	0,6721	0,9002
		SettlingMax	1,3889	1,4278	1,4659	1,3772
		Overshoot	38,8854	42,7792	46,5945	37,7203
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,3889	1,4278	1,4659	1,3772
		PeakTime	21,92	22,375	26,81	27,435
	ERRORE guadagno +25%	RiseTime	7,3622	7,1348	7,1521	7,8156
		SettlingTime	76,2307	76,9586	311,8064	109,0246
		SettlingMinx	0,8538	0,843	0,5826	0,9
		SettlingMax	1,482	1,5197	1,5859	1,4987
		Overshoot	48,1982	51,966	58,5907	49,8676
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,482	1,5197	1,5859	1,4987
		PeakTime	20,5	20,855	26,49	26,995
	ERRORE T tau guadagno +25%	RiseTime	8,0962	7,8329	7,8506	8,7244
SettlingTime		62,6038	63,5015	231,4027	92,6223	
SettlingMinx		0,9001	0,9002	0,6721	0,9002	
SettlingMax		1,3889	1,4278	1,4659	1,3772	
Overshoot		38,8854	42,7792	46,5945	37,7203	
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,3889	1,4278	1,4659	1,3772	
PeakTime		21,92	22,375	26,81	27,435	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Cohen Coon	ERRORE T +25%	RiseTime	16,1979	17,9644	17,9646	22,5703
		SettlingTime	26,9965	134,3484	134,3328	59,5181
		SettlingMinx	0,9026	0,9038	0,9038	0,8978
		SettlingMax	1,0219	1,0328	1,0328	0,9975
		Overshoot	1,9052	2,8464	2,8462	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0219	1,0328	1,0328	0,9975
		PeakTime	62,195	62,115	62,115	500
	ERRORE tau +25%	RiseTime	19,2071	20,8901	20,8913	27,1896
		SettlingTime	128,7708	187,1117	187,0576	59,1096
		SettlingMinx	0,9023	0,9034	0,9034	0,8991
		SettlingMax	1,0301	1,0448	1,0448	0,9989
		Overshoot	2,7484	4,0937	4,0921	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0301	1,0448	1,0448	0,9989
		PeakTime	68,355	68,205	68,205	500
	ERRORE guadagno +25%	RiseTime	15,9141	17,3897	17,3905	22,3757
		SettlingTime	96,1118	155,8588	155,808	53,886
		SettlingMinx	0,9018	0,9027	0,9027	0,8989
		SettlingMax	1,026	1,0388	1,0388	0,9988
		Overshoot	2,3974	3,5699	3,5687	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,026	1,0388	1,0388	0,9988
		PeakTime	58,795	58,705	58,705	500
	ERRORE T tau guadagno +25%	RiseTime	19,9583	21,925	21,9258	27,8864
		SettlingTime	99,9705	170,8546	170,808	65,6852
		SettlingMinx	0,9032	0,9048	0,9048	0,8979
		SettlingMax	1,0255	1,0382	1,0382	0,9977
		Overshoot	2,1864	3,2736	3,2727	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,0255	1,0382	1,0382	0,9977	
PeakTime		73,285	73,105	73,105	500	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
ISE	ERRORE T +25%	RiseTime	12,0532	12,2268	12,2287	12,8806
		SettlingTime	18,6625	19,6307	19,5971	56,2523
		SettlingMinx	0,8988	0,8995	0,8994	0,8928
		SettlingMax	1,0112	1,0135	1,0134	0,992
		Overshoot	1,2608	1,416	1,4083	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0112	1,0135	1,0134	0,992
		PeakTime	25,635	26,775	26,735	500
	ERRORE tau +25%	RiseTime	17,282	17,3754	17,3827	18,9063
		SettlingTime	28,4932	29,18	29,1502	87,0435
		SettlingMinx	0,8996	0,9002	0,9002	0,8945
		SettlingMax	0,9995	1,0027	1,0025	0,9938
		Overshoot	0	0,2501	0,2353	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9995	1,0027	1,0025	0,9938
		PeakTime	500	44,215	44,17	500
	ERRORE guadagno +25%	RiseTime	16,3381	16,3943	16,4007	17,5617
		SettlingTime	26,155	26,8354	26,7973	78,5205
		SettlingMinx	0,8993	0,8999	0,8998	0,8947
		SettlingMax	1,0021	1,0051	1,0049	0,9941
		Overshoot	0,2941	0,5303	0,5147	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0021	1,0051	1,0049	0,9941
		PeakTime	36,58	37,615	37,56	500
	ERRORE T tau guadagno +25%	RiseTime	17,9666	18,0969	18,1028	19,459
		SettlingTime	30,6496	31,3588	31,3282	102,6489
		SettlingMinx	0,8977	0,8985	0,8984	0,8911
		SettlingMax	0,9974	0,9983	0,9982	0,9901
		Overshoot	0	0	0	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		0,9974	0,9983	0,9982	0,9901	
PeakTime		500	500	500	500	

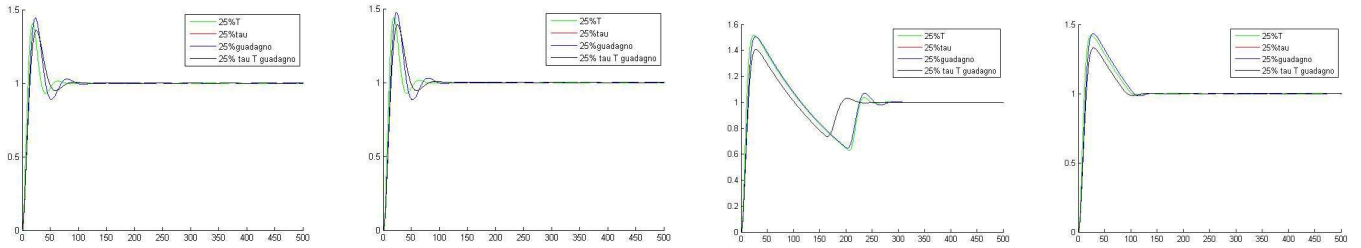
			PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
ISTSE	ERRORE T +25%	RiseTime	11,4316	11,5542	11,555	12,1025	
		SettlingTime	26,8511	28,485	30,2158	19,6411	
		SettlingMinx	0,8989	0,8994	0,8995	0,8939	
		SettlingMax	1,0221	1,024	1,0271	1,0002	
		Overshoot	2,335	2,4714	2,7896	0,7046	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,0221	1,024	1,0271	1,0002	
		PeakTime	23,97	24,92	25,505	25,52	
	ERRORE tau +25%	RiseTime	16,6875	16,7419	16,7491	18,0573	
		SettlingTime	26,8409	27,5068	27,4715	76,6727	
		SettlingMinx	0,8996	0,9002	0,9002	0,8952	
		SettlingMax	1,0022	1,0055	1,0053	0,9947	
		Overshoot	0,2672	0,5333	0,5167	0	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,0022	1,0055	1,0053	0,9947	
		PeakTime	38,355	39,42	39,365	500	
	ERRORE guadagno +25%	RiseTime	15,8161	15,8458	15,8522	16,8521	
		SettlingTime	24,8602	25,4811	25,4388	66,9751	
		SettlingMinx	0,8994	0,8999	0,8998	0,8954	
		SettlingMax	1,007	1,0097	1,0095	0,9949	
		Overshoot	0,7725	0,9902	0,9729	0	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,007	1,0097	1,0095	0,9949	
		PeakTime	34,3	35,18	35,12	500	
	ERRORE T tau guadagno +25%	RiseTime	17,1732	17,2593	17,265	18,417	
		SettlingTime	28,3341	29,0426	29,0054	95,2979	
		SettlingMinx	0,8979	0,8985	0,8985	0,8921	
		SettlingMax	0,9976	0,9984	0,9983	0,9912	
		Overshoot	0	0	0	0	
Undershoot		0	0	0	0		
Peak		0,9976	0,9984	0,9983	0,9912		
PeakTime		500	500	500	500		

			PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
IST ² SE	ERRORE T +25%	RiseTime	11,9451	12,0329	12,0346	12,5834	
		SettlingTime	28,604	30,1071	30,9045	52,573	
		SettlingMinx	0,8989	0,8995	0,8993	0,8942	
		SettlingMax	1,0235	1,0254	1,0268	1,0008	
		Overshoot	2,4822	2,6234	2,7687	0,7395	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,0235	1,0254	1,0268	1,0008	
		PeakTime	24,995	25,85	26,17	26,185	
	ERRORE tau +25%	RiseTime	17,5816	17,5936	17,6026	18,9364	
		SettlingTime	28,301	28,8505	28,8145	71,1744	
		SettlingMinx	0,8997	0,9002	0,9001	0,8957	
		SettlingMax	1,0023	1,0055	1,0052	0,9952	
		Overshoot	0,2735	0,5308	0,5114	0	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,0023	1,0055	1,0052	0,9952	
		PeakTime	40,375	41,315	41,255	500	
	ERRORE guadagno +25%	RiseTime	16,8168	16,8161	16,8242	17,8667	
		SettlingTime	26,566	27,0827	27,0396	31,4378	
		SettlingMinx	0,8995	0,8999	0,8998	0,896	
		SettlingMax	1,0061	1,0087	1,0084	0,9955	
		Overshoot	0,6706	0,883	0,8629	0	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,0061	1,0087	1,0084	0,9955	
		PeakTime	36,71	37,495	37,43	500	
	ERRORE T tau guadagno +25%	RiseTime	18,1165	18,1587	18,1658	19,355	
		SettlingTime	30,002	30,5786	30,5414	97,7246	
		SettlingMinx	0,8979	0,8984	0,8984	0,8926	
		SettlingMax	0,9976	0,9982	0,9982	0,9917	
		Overshoot	0	0	0	0	
Undershoot		0	0	0	0		
Peak		0,9976	0,9982	0,9982	0,9917		
PeakTime		500	500	500	500		

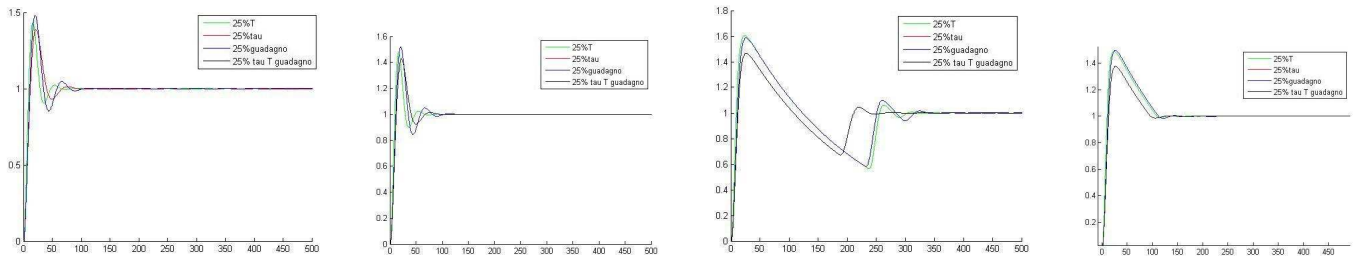
		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Skogestad PI c = 4	ERRORE T +25%	RiseTime	400,1115	400,1115	400,1115	400,1115
		SettlingTime	1325,9	1325,9	1325,9	1325,9
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,1166	1,1166	1,1166	1,1166
		Overshoot	11,6617	11,6617	11,6617	11,6617
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,1166	1,1166	1,1166	1,1166
		PeakTime	860,57	860,57	860,57	860,57
	ERRORE tau +25%	RiseTime	336,8232	336,8232	336,8232	336,8232
		SettlingTime	1615,7	1615,7	1615,7	1615,7
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,1546	1,1546	1,1546	1,1546
		Overshoot	15,4578	15,4578	15,4578	15,4578
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,1546	1,1546	1,1546	1,1546
		PeakTime	741,88	741,88	741,88	741,88
	ERRORE guadagno +25%	RiseTime	401,7885	401,7885	401,7885	401,7885
		SettlingTime	1329,9	1329,9	1329,9	1329,9
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,1157	1,1157	1,1157	1,1157
		Overshoot	11,5721	11,5721	11,5721	11,5721
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,1157	1,1157	1,1157	1,1157
		PeakTime	863,665	863,665	863,665	863,665
	ERRORE T tau guadagno +25%	RiseTime	491,6569	491,6569	491,6569	491,6569
		SettlingTime	1517,4	1517,4	1517,4	1517,4
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,0755	1,0755	1,0755	1,0755
		Overshoot	7,5497	7,5497	7,5497	7,5497
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,0755	1,0755	1,0755	1,0755	
PeakTime		1029,3	1029,3	1029,3	1029,3	

Grafici in ordine rispettivo: PID, PID + D retroazione, Saturazione, Desaturazione

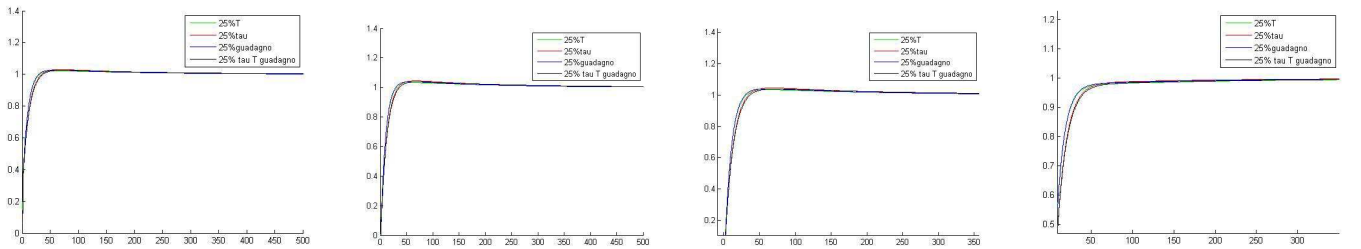
Metodo di Chien Hrones Reswick no sovraelongazione



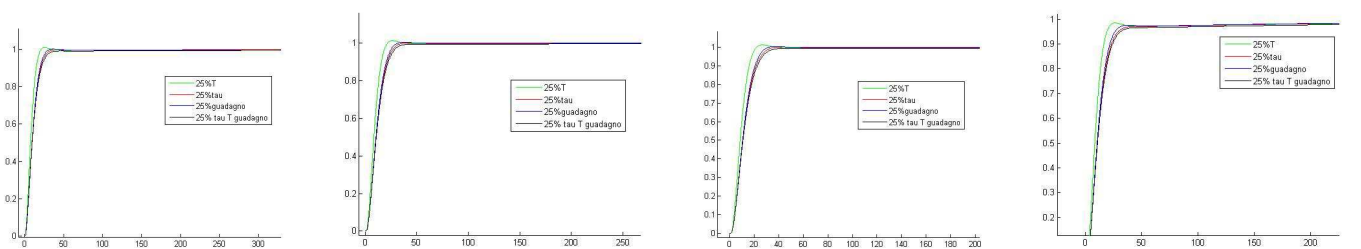
Metodo di Chien Hrones Reswick sovraelongazione 20%



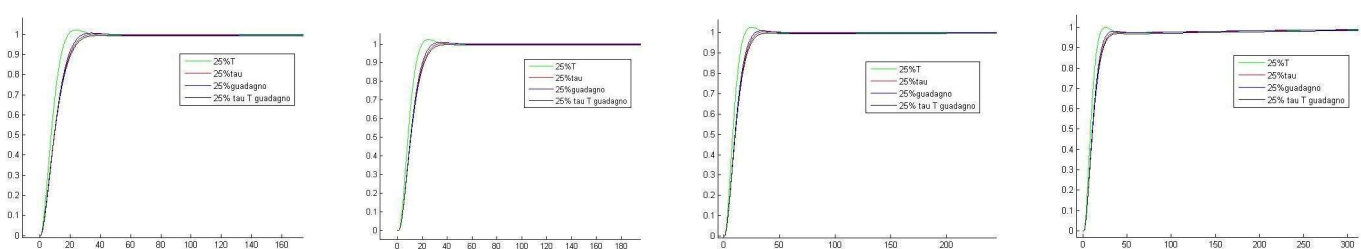
Metodo Cohen Con



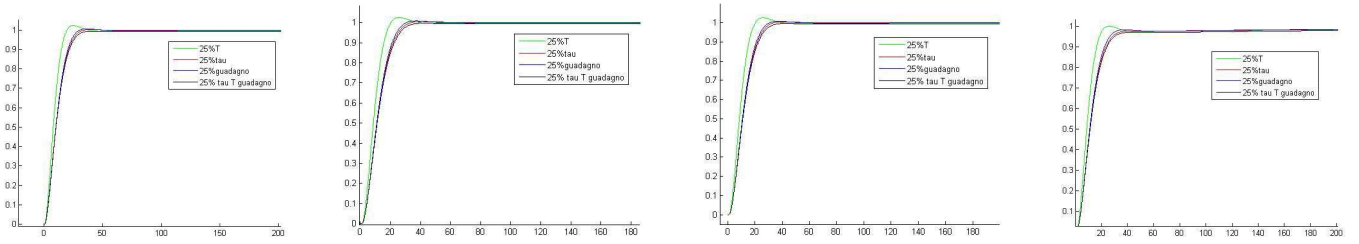
Metodo ISE



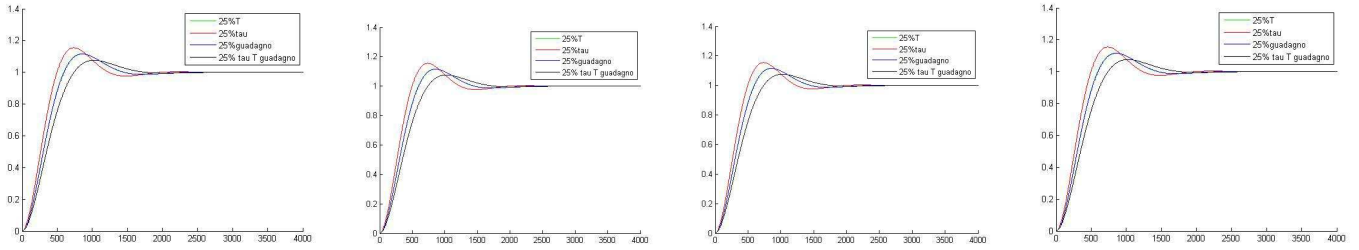
Metodo ISTSE



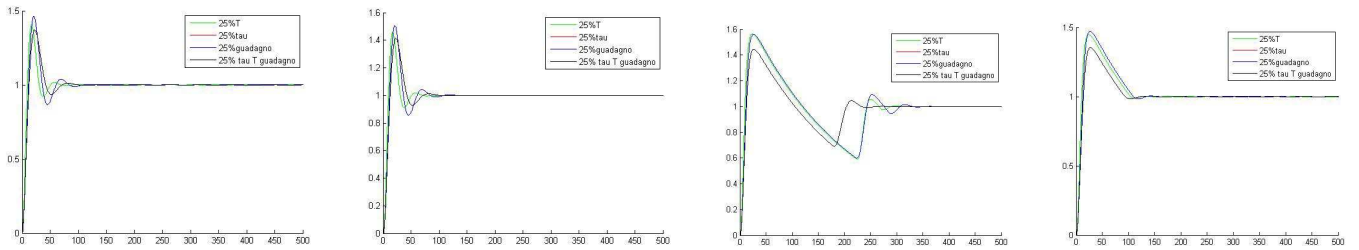
Metodo IST²SE



Metodo Skogestad PI c=4



Metodo Ziegler Nichols



A.2. Risultati numerici tecniche di sintesi del controllore sottostima dei parametri -25%

			PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Ziegler Nichols	ERRORE T -25%	RiseTime	7,8261	7,5471	7,5665	8,3348	
		SettlingTime	81,246	82,1071	304,9454	106,5702	
		SettlingMinx	0,8588	0,8466	0,5988	0,9002	
		SettlingMax	1,4688	1,5108	1,5624	1,4751	
		Overshoot	46,8821	51,082	56,2449	47,5125	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,4688	1,5108	1,5624	1,4751	
		PeakTime	21,62	22,01	27,08	27,715	
	ERRORE tau -25%	RiseTime	5,3311	5,1637	5,1713	5,6858	
		SettlingTime	68,781	69,5644	434,0769	126,1413	
		SettlingMinx	0,7962	0,7796	0,4708	0,9003	
		SettlingMax	1,5353	1,5836	1,7743	1,6543	
		Overshoot	53,5253	58,3578	77,4948	65,4328	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,5353	1,5836	1,7743	1,6543	
		PeakTime	15,195	15,565	24,04	24,36	
	ERRORE guadagno -25%	RiseTime	6,0326	5,8441	5,8537	6,585	
		SettlingTime	46,0729	46,9614	277,1703	99,2201	
		SettlingMinx	0,9001	0,9003	0,5884	0,9	
		SettlingMax	1,3979	1,4475	1,565	1,445	
		Overshoot	39,7872	44,746	56,5025	44,5024	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,3979	1,4475	1,565	1,445	
		PeakTime	16,475	16,985	24,1	24,485	
	ERRORE T tau guadagno -25%	RiseTime	5,3311	5,1637	5,1713	5,6858	
SettlingTime		68,781	69,5644	434,0769	126,1413		
SettlingMinx		0,7962	0,7796	0,4708	0,9003		
SettlingMax		1,5353	1,5836	1,7743	1,6543		
Overshoot		53,5253	58,3578	77,4948	65,4328		
Undershoot		0	0	0	0		
Peak		1,5353	1,5836	1,7743	1,6543		
PeakTime		15,195	15,565	24,04	24,36		

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Chien Hrones Reswick no sovraelong	ERRORE T -25%	RiseTime	8,9481	8,6919	8,7167	9,4613
		SettlingTime	91,6674	92,5861	273,8177	103,061
		SettlingMinx	0,8828	0,8752	0,6469	0,9003
		SettlingMax	1,4497	1,4797	1,5065	1,4366
		Overshoot	44,9665	47,9676	50,6477	43,6598
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,4497	1,4797	1,5065	1,4366
		PeakTime	24,665	24,99	28,8	29,44
	ERRORE tau -25%	RiseTime	6,0144	5,8618	5,8734	6,3622
		SettlingTime	75,7869	76,6576	369,5234	120,1291
		SettlingMinx	0,8176	0,8069	0,5145	0,9002
		SettlingMax	1,5258	1,5611	1,6956	1,5986
		Overshoot	52,5777	56,1057	69,5624	59,8628
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,5258	1,5611	1,6956	1,5986
		PeakTime	17,1	17,41	24,88	25,19
	ERRORE guadagno -25%	RiseTime	6,7079	6,5314	6,5431	7,2241
		SettlingTime	50,3427	51,1267	242,2916	96,6239
		SettlingMinx	0,9004	0,9001	0,6259	0,9001
		SettlingMax	1,3988	1,4356	1,5197	1,4197
		Overshoot	39,8787	43,556	51,9662	41,9703
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,3988	1,4356	1,5197	1,4197
		PeakTime	18,285	18,725	24,96	25,32
	ERRORE T tau guadagno -25%	RiseTime	6,0144	5,8618	5,8734	6,3622
SettlingTime		75,7869	76,6576	369,5234	120,1291	
SettlingMinx		0,8176	0,8069	0,5145	0,9002	
SettlingMax		1,5258	1,5611	1,6956	1,5986	
Overshoot		52,5777	56,1057	69,5624	59,8628	
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,5258	1,5611	1,6956	1,5986	
PeakTime		17,1	17,41	24,88	25,19	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Chien Hrones Reswick sovraelong 20%	ERRORE T -25%	RiseTime	7,5966	7,361	7,3797	8,0482
		SettlingTime	79,0341	79,7185	314,2447	109,7529
		SettlingMinx	0,8461	0,8351	0,5845	0,9004
		SettlingMax	1,4884	1,5252	1,5845	1,5009
		Overshoot	48,8402	52,5169	58,4555	50,0873
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,4884	1,5252	1,5845	1,5009
		PeakTime	21,175	21,52	26,9	27,43
	<hr/>					
	ERRORE tau -25%	RiseTime	5,1786	5,0357	5,0538	5,4901
		SettlingTime	67,6554	68,2146	456,8788	131,5915
		SettlingMinx	0,7671	0,7518	0,452	0,9003
		SettlingMax	1,5643	1,6067	1,8157	1,7008
		Overshoot	56,4347	60,6726	81,1776	70,0798
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,5643	1,6067	1,8157	1,7008
		PeakTime	14,94	15,26	23,995	24,27
	<hr/>					
	ERRORE guadagno -25%	RiseTime	5,7939	5,6325	5,6416	6,2647
		SettlingTime	53,0285	55,6983	295,8416	105,2371
		SettlingMinx	0,9005	0,9006	0,5628	0,9001
		SettlingMax	1,4253	1,4692	1,6075	1,4903
		Overshoot	42,5319	46,9212	60,7498	49,033
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,4253	1,4692	1,6075	1,4903
		PeakTime	15,975	16,425	24,01	24,315
	<hr/>					
	ERRORE T tau guadagno -25%	RiseTime	5,1786	5,0357	5,0538	5,4901
SettlingTime		67,6554	68,2146	456,8788	131,5915	
SettlingMinx		0,7671	0,7518	0,452	0,9003	
SettlingMax		1,5643	1,6067	1,8157	1,7008	
Overshoot		56,4347	60,6726	81,1776	70,0798	
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,5643	1,6067	1,8157	1,7008	
PeakTime		14,94	15,26	23,995	24,27	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Cohen Coon	ERRORE T -25%	RiseTime	15,2257	16,39	16,3916	21,5663
		SettlingTime	118,2642	164,5561	164,4908	45,6096
		SettlingMinx	0,9009	0,9014	0,9014	0,8997
		SettlingMax	1,0324	1,0479	1,0478	0,9997
		Overshoot	3,1379	4,6265	4,624	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0324	1,0479	1,0478	0,9997
		PeakTime	53,835	53,795	53,795	500
	ERRORE tau -25%	RiseTime	12,1581	13,4589	13,4591	17,0304
		SettlingTime	20,4946	113,4177	113,4062	49,735
		SettlingMinx	0,9014	0,9021	0,9021	0,8988
		SettlingMax	1,0212	1,0316	1,0316	0,9986
		Overshoot	1,9697	2,9342	2,934	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0212	1,0316	1,0316	0,9986
		PeakTime	47,61	47,595	47,595	500
	ERRORE guadagno -25%	RiseTime	15,6077	17,1799	17,1802	22,1237
		SettlingTime	95,1073	155,0047	154,9853	53,6388
		SettlingMinx	0,9018	0,9027	0,9027	0,8989
		SettlingMax	1,026	1,0387	1,0387	0,9987
		Overshoot	2,3947	3,5676	3,5672	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,026	1,0387	1,0387	0,9987
		PeakTime	58,06	58,005	58,005	500
	ERRORE T tau guadagno -25%	RiseTime	11,6397	12,7447	12,7451	16,5551
		SettlingTime	81,5493	128,9908	128,9699	40,8814
		SettlingMinx	0,9007	0,9011	0,9011	0,8996
		SettlingMax	1,0265	1,0393	1,0393	0,9995
		Overshoot	2,576	3,8181	3,8175	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,0265	1,0393	1,0393	0,9995	
PeakTime		43,635	43,65	43,65	500	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
ISE	ERRORE T -25%	RiseTime	16,341	16,3449	16,3542	17,7309
		SettlingTime	25,5669	26,157	26,1213	31,9189
		SettlingMinx	0,9006	0,901	0,901	0,8977
		SettlingMax	1,012	1,0158	1,0155	0,9975
		Overshoot	1,1333	1,4657	1,4425	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,012	1,0158	1,0155	0,9975
		PeakTime	37,21	38,155	38,1	500
	ERRORE tau -25%	RiseTime	10,4061	10,4986	10,4952	11,0278
		SettlingTime	28,5559	29,8557	36,2059	29,8899
		SettlingMinx	0,8998	0,9002	0,9	0,8973
		SettlingMax	1,0387	1,0407	1,0544	1,0262
		Overshoot	3,8994	4,0528	5,4577	2,9357
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0387	1,0407	1,0544	1,0262
		PeakTime	21,915	22,74	24,89	24,9
	ERRORE guadagno -25%	RiseTime	11,1694	11,3324	11,3342	12,0423
		SettlingTime	24,6224	27,6123	28,7604	48,8413
		SettlingMinx	0,9001	0,9006	0,9005	0,8955
		SettlingMax	1,0203	1,023	1,0249	0,9949
		Overshoot	2,0281	2,239	2,4371	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0203	1,023	1,0249	0,9949
		PeakTime	23,795	24,905	25,085	500
	ERRORE T tau guadagno -25%	RiseTime	9,9934	10,0666	10,0635	10,66
		SettlingTime	29,9164	31,4438	39,4743	32,5052
		SettlingMinx	0,9006	0,901	0,9006	0,8993
		SettlingMax	1,0502	1,0529	1,0711	1,0388
		Overshoot	4,959	5,1944	7,048	3,9583
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,0502	1,0529	1,0711	1,0388	
PeakTime		21,31	22,095	24,715	24,725	

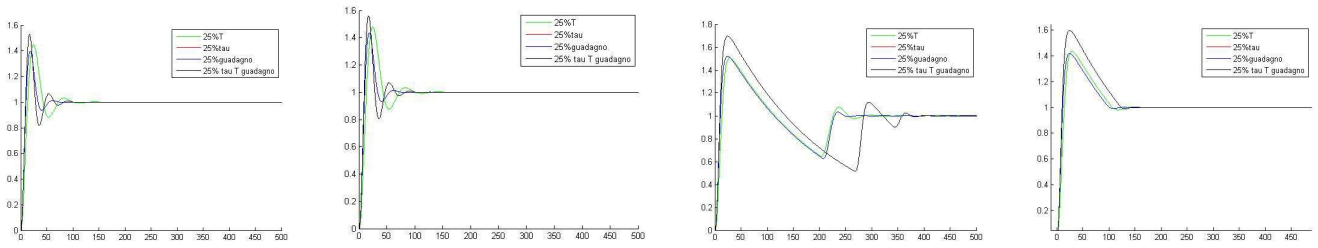
		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
ISTSE	ERRORE T -25%	RiseTime	16,0472	16,0316	16,0412	17,2504
		SettlingTime	24,8267	25,3594	25,3201	29,4429
		SettlingMinx	0,9007	0,9009	0,9009	0,8983
		SettlingMax	1,0165	1,02	1,0197	0,998
		Overshoot	1,5837	1,8915	1,8657	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0165	1,02	1,0197	0,998
		PeakTime	35,645	36,465	36,405	500
	ERRORE tau -25%	RiseTime	10,0059	10,0687	10,0616	10,5498
		SettlingTime	29,2108	30,2649	40,1348	34,6119
		SettlingMinx	0,8998	0,9001	0,8997	0,8992
		SettlingMax	1,0516	1,0535	1,0741	1,0471
		Overshoot	5,189	5,3312	7,4555	4,8075
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0516	1,0535	1,0741	1,0471
		PeakTime	21,2	21,885	24,825	24,83
	ERRORE guadagno -25%	RiseTime	10,6782	10,7922	10,7916	11,4008
		SettlingTime	28,1551	29,7875	33,7988	18,345
		SettlingMinx	0,9001	0,9006	0,9003	0,8968
		SettlingMax	1,0319	1,0343	1,0433	1,013
		Overshoot	3,1925	3,3816	4,2883	1,6706
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0319	1,0343	1,0433	1,013
		PeakTime	22,545	23,47	24,945	24,955
	ERRORE T tau guadagno -25%	RiseTime	9,7203	9,7676	9,7622	10,2958
		SettlingTime	30,4087	31,656	42,8583	36,8121
		SettlingMinx	0,9007	0,9009	0,9004	0,9005
		SettlingMax	1,0626	1,0651	1,0889	1,058
		Overshoot	6,2037	6,4237	8,8593	5,7566
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,0626	1,0651	1,0889	1,058	
PeakTime		20,855	21,525	24,735	24,745	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
IST ² SE	ERRORE T -25%	RiseTime	17,0671	17,0229	17,0349	18,2779
		SettlingTime	26,4725	26,909	26,8693	31,0674
		SettlingMinx	0,9007	0,9009	0,901	0,8987
		SettlingMax	1,0165	1,0198	1,0195	0,9984
		Overshoot	1,5804	1,8755	1,8457	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0165	1,0198	1,0195	0,9984
		PeakTime	38,335	39,05	38,985	500
	ERRORE tau -25%	RiseTime	10,5372	10,5793	10,5748	11,0573
		SettlingTime	30,7442	31,7504	39,5097	34,1326
		SettlingMinx	0,9	0,9001	0,8998	0,899
		SettlingMax	1,0517	1,0535	1,0681	1,0422
		Overshoot	5,1882	5,3374	6,8405	4,3616
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0517	1,0535	1,0681	1,0422
		PeakTime	22,32	22,945	25,37	25,38
	ERRORE guadagno -25%	RiseTime	11,1256	11,2049	11,2053	11,8073
		SettlingTime	29,9083	31,4278	34,453	18,8559
		SettlingMinx	0,9002	0,9005	0,9004	0,8971
		SettlingMax	1,0347	1,0371	1,0433	1,0141
		Overshoot	3,4687	3,6615	4,2926	1,7536
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0347	1,0371	1,0433	1,0141
		PeakTime	23,465	24,295	25,51	25,525
	ERRORE T tau guadagno -25%	RiseTime	10,2277	10,2551	10,2522	10,7809
		SettlingTime	32,2002	33,405	42,4053	36,4655
		SettlingMinx	0,9006	0,9009	0,9005	0,9003
		SettlingMax	1,0635	1,066	1,0832	1,0537
		Overshoot	6,2915	6,5144	8,2771	5,3551
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,0635	1,066	1,0832	1,0537	
PeakTime		21,97	22,575	25,275	25,285	

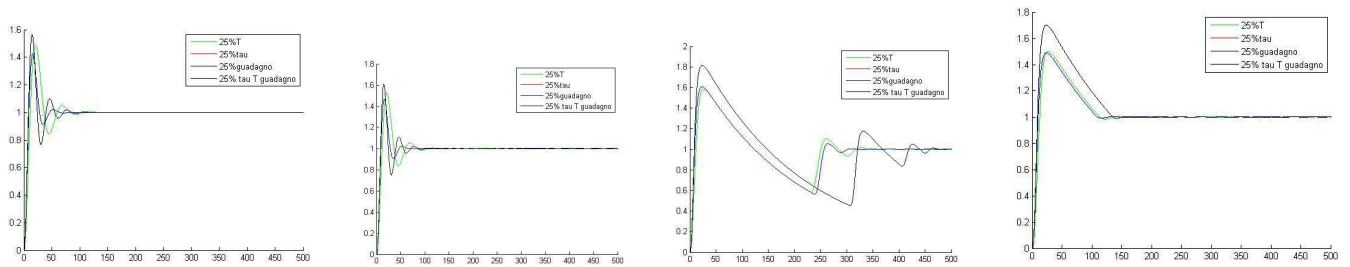
		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Skogestad PI C=4	ERRORE T -25%	RiseTime	269,2123	269,2123	269,2123	269,2123
		SettlingTime	1474,2	1474,2	1474,2	1474,2
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,2144	1,2144	1,2144	1,2144
		Overshoot	21,4398	21,4398	21,4398	21,4398
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,2144	1,2144	1,2144	1,2144
		PeakTime	617,02	617,02	617,02	617,02
	ERRORE tau -25%	RiseTime	331,2702	331,2702	331,2702	331,2702
		SettlingTime	1630,2	1630,2	1630,2	1630,2
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,1618	1,1618	1,1618	1,1618
		Overshoot	16,1765	16,1765	16,1765	16,1765
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,1618	1,1618	1,1618	1,1618
		PeakTime	735,375	735,375	735,375	735,375
	ERRORE guadagno -25%	RiseTime	267,5965	267,5965	267,5965	267,5965
		SettlingTime	1468,9	1468,9	1468,9	1468,9
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,216	1,216	1,216	1,216
		Overshoot	21,6051	21,6051	21,6051	21,6051
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,216	1,216	1,216	1,216
		PeakTime	613,94	613,94	613,94	613,94
	ERRORE T tau guadagno -25%	RiseTime	216,6667	216,6667	216,6667	216,6667
		SettlingTime	1615,5	1615,5	1615,5	1615,5
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,28	1,28	1,28	1,28
		Overshoot	28,0012	28,0012	28,0012	28,0012
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,28	1,28	1,28	1,28	
PeakTime		517,105	517,105	517,105	517,105	

Grafici in ordine rispettivo: PID, PID + D retroazione, Saturazione, Desaturazione

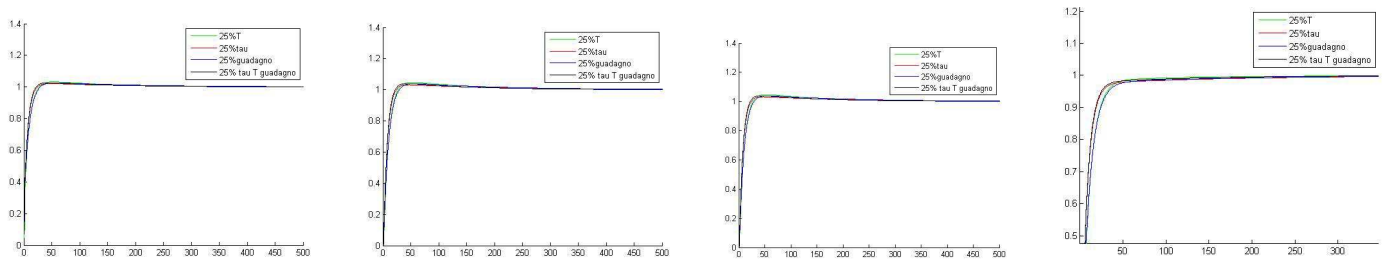
Metodo di Chien Hrones Reswick no sovraelongazione



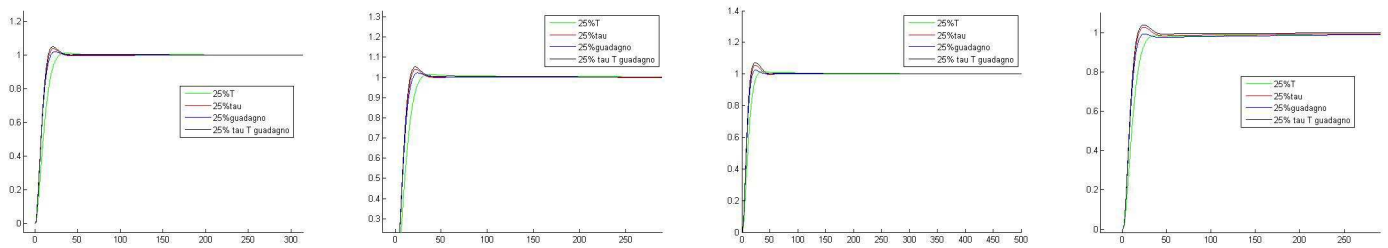
Metodo di Chien Hrones Reswick sovraelongazione massima 20%



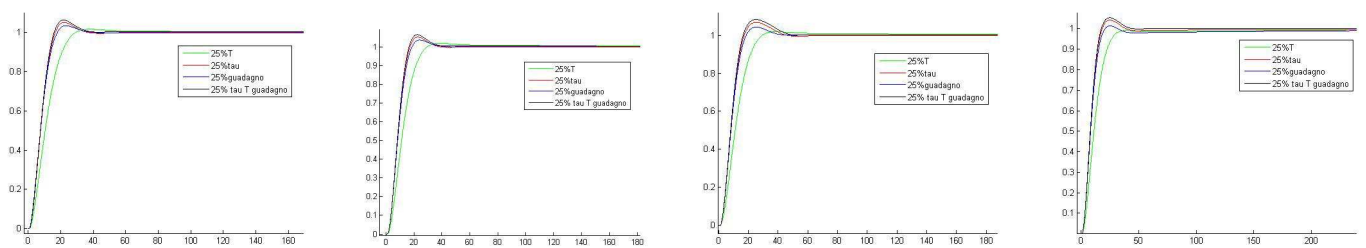
Metodo Cohen Coon



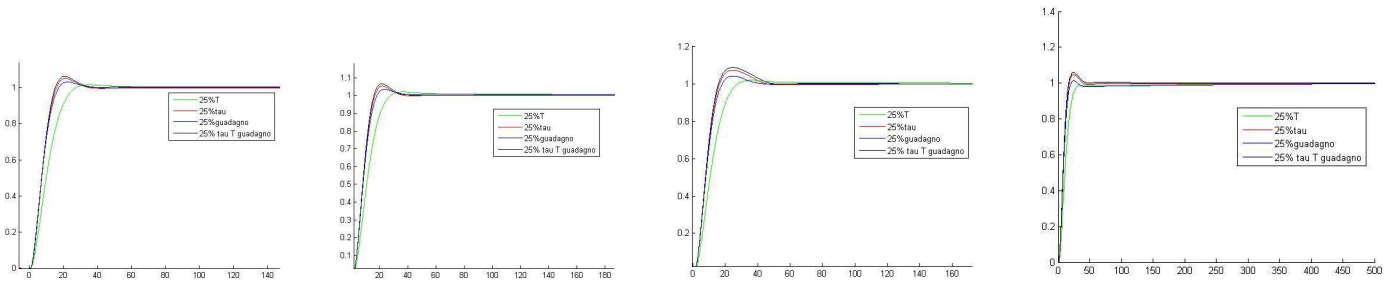
Metodo ISE



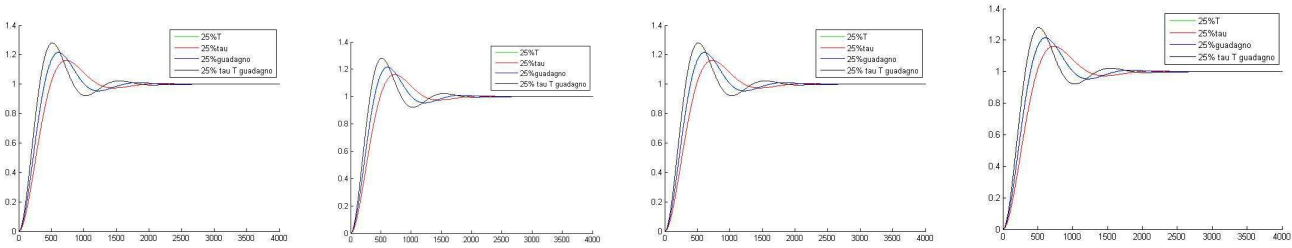
Metodo ISTSE



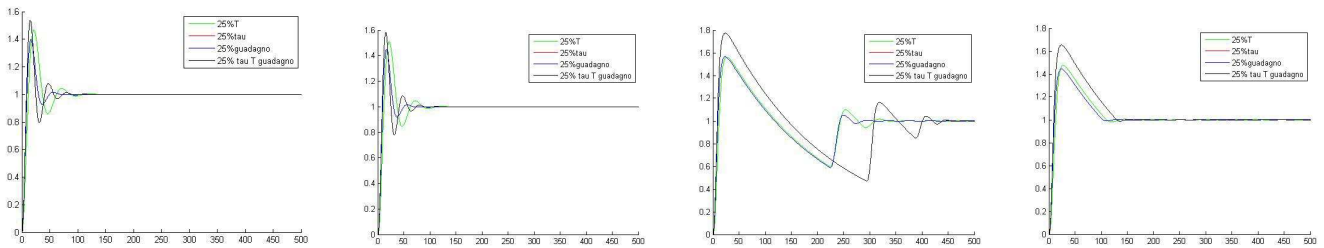
Metodo IST²SE



Metodo Skogestad PI c=4



Metodo Ziegler Nichols



A.3. Risultati numerici tecniche di sintesi del controllore sovrastima dei parametri +100%

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Ziegler Nichols	ERRORE T +100%	RiseTime	5,101	4,9776	4,9835	5,7007
		SettlingTime	37,1123	38,392	253,9274	95,964
		SettlingMinx	0,9005	0,9006	0,5771	0,9004
		SettlingMax	1,3409	1,3938	1,5761	1,432
		Overshoot	34,0854	39,3831	57,6127	43,2
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,3409	1,3938	1,5761	1,432
	PeakTime	13,84	14,41	22,785	23,035	
	ERRORE tau +100%	RiseTime	13,5327	12,9175	12,9539	14,9413
		SettlingTime	103,8406	106,8551	157,3093	83,8732
		SettlingMinx	0,9001	0,9002	0,8743	0,9001
		SettlingMax	1,2742	1,3131	1,3115	1,2416
		Overshoot	27,421	31,3051	31,1518	24,163
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,2742	1,3131	1,3115	1,2416
	PeakTime	35,595	36,065	36,14	38,85	
	ERRORE guadagno +100%	RiseTime	9,5162	9,1773	9,2079	10,0007
		SettlingTime	123,9935	125,0385	351,1543	137,005
		SettlingMinx	0,8079	0,7948	0,6021	0,9002
		SettlingMax	1,511	1,5464	1,5695	1,5027
		Overshoot	51,1016	54,6351	56,9729	50,2714
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,511	1,5464	1,5695	1,5027
	PeakTime	26,47	26,775	30,35	31,17	
	ERRORE T tau guadagno +100%	RiseTime	13,5327	12,9175	12,9539	14,9413
SettlingTime		103,8406	106,8551	157,3093	83,8732	
SettlingMinx		0,9001	0,9002	0,8743	0,9001	
SettlingMax		1,2742	1,3131	1,3115	1,2416	
Overshoot		27,421	31,3051	31,1518	24,163	
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,2742	1,3131	1,3115	1,2416	
PeakTime	35,595	36,065	36,14	38,85		

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Chien Hrones Reswick no sovraelong	ERRORE T +100%	RiseTime	5,5483	5,428	5,4349	6,0746
		SettlingTime	38,2328	39,1336	237,2725	95,5814
		SettlingMinx	0,9003	0,9006	0,6023	0,9
		SettlingMax	1,3564	1,3966	1,547	1,4244
		Overshoot	35,6417	39,6553	54,7023	42,4382
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,3564	1,3966	1,547	1,4244
		PeakTime	14,995	15,51	23,345	23,56
	ERRORE tau +100%	RiseTime	15,2958	14,7137	14,7596	16,6795
		SettlingTime	107,8227	114,3721	149,3769	88,1486
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9001	0,9001
		SettlingMax	1,2617	1,2897	1,288	1,2283
		Overshoot	26,1689	28,9713	28,7986	22,8333
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,2617	1,2897	1,288	1,2283
		PeakTime	40,25	40,63	40,61	43,325
	ERRORE guadagno +100%	RiseTime	11,0771	10,7676	10,809	11,5845
		SettlingTime	117,1952	117,7515	299,6421	138,4486
		SettlingMinx	0,842	0,834	0,6529	0,9
		SettlingMax	1,4809	1,5054	1,5127	1,4611
		Overshoot	48,0866	50,5414	51,2789	46,1098
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,4809	1,5054	1,5127	1,4611
		PeakTime	30,71	30,945	33,165	34,015
	ERRORE T tau guadagno +100%	RiseTime	15,2958	14,7137	14,7596	16,6795
SettlingTime		107,8227	114,3721	149,3769	88,1486	
SettlingMinx		0,9	0,9	0,9001	0,9001	
SettlingMax		1,2617	1,2897	1,288	1,2283	
Overshoot		26,1689	28,9713	28,7986	22,8333	
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,2617	1,2897	1,288	1,2283	
PeakTime		40,25	40,63	40,61	43,325	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Chien Hrones Reswick sovraelong 20%	ERRORE T +100%	RiseTime	4,8515	4,7434	4,7488	5,3465
		SettlingTime	35,0107	35,8696	266,0112	104,6369
		SettlingMinx	0,9006	0,9005	0,5416	0,9
		SettlingMax	1,3727	1,4199	1,6383	1,4961
		Overshoot	37,2705	41,9905	63,8265	49,6071
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,3727	1,4199	1,6383	1,4961
		PeakTime	13,27	13,78	22,74	22,94
	ERRORE tau +100%	RiseTime	12,8683	12,3547	12,3892	14,0982
		SettlingTime	97,6688	100,5013	157,1027	82,6765
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,867	0,9002
		SettlingMax	1,2813	1,3157	1,3143	1,2462
		Overshoot	28,1255	31,5727	31,4327	24,6192
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,2813	1,3157	1,3143	1,2462
		PeakTime	33,945	34,41	34,65	36,8
	ERRORE guadagno +100%	RiseTime	9,292	9,0071	9,0366	9,7321
		SettlingTime	122,034	122,8294	356,4356	137,7074
		SettlingMinx	0,7979	0,7863	0,5934	0,9001
		SettlingMax	1,5253	1,556	1,5823	1,5194
		Overshoot	52,5316	55,6004	58,2677	51,9413
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,5253	1,556	1,5823	1,5194
		PeakTime	26,055	26,325	30,11	30,815
	ERRORE T tau guadagno +100%	RiseTime	12,8683	12,3547	12,3892	14,0982
SettlingTime		97,6688	100,5013	157,1027	82,6765	
SettlingMinx		0,9	0,9	0,867	0,9002	
SettlingMax		1,2813	1,3157	1,3143	1,2462	
Overshoot		28,1255	31,5727	31,4327	24,6192	
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,2813	1,3157	1,3143	1,2462	
PeakTime		33,945	34,41	34,65	36,8	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Cohen Coon	ERRORE T +100%	RiseTime	17,0812	19,2302	19,2288	22,7163
		SettlingTime	29,715	31,7558	31,7606	59,4062
		SettlingMinx	0,9039	0,9058	0,9058	0,8942
		SettlingMax	1,0153	1,0228	1,0228	0,9936
		Overshoot	1,0897	1,6225	1,6242	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0153	1,0228	1,0228	0,9936
		PeakTime	70,535	70,465	70,465	500
	ERRORE tau +100%	RiseTime	28,8747	30,7705	30,7751	40,6661
		SettlingTime	196,0405	250,4975	250,3992	75,7394
		SettlingMinx	0,9038	0,9056	0,9056	0,8997
		SettlingMax	1,0391	1,0583	1,0583	0,9997
		Overshoot	3,4773	5,1803	5,1764	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0391	1,0583	1,0583	0,9997
		PeakTime	94,66	94,155	94,155	500
	ERRORE guadagno +100%	RiseTime	16,3916	17,7316	17,7332	22,7818
		SettlingTime	97,7988	157,1377	157,0403	54,3025
		SettlingMinx	0,9019	0,9027	0,9027	0,8989
		SettlingMax	1,0261	1,0388	1,0388	0,9988
		Overshoot	2,4038	3,5726	3,5702	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0261	1,0388	1,0388	0,9988
		PeakTime	59,93	59,785	59,785	500
	ERRORE T tau guadagno +100%	RiseTime	32,9631	36,388	36,3893	44,4883
		SettlingTime	54,2894	174,2753	174,1987	97,5982
		SettlingMinx	0,9074	0,9112	0,9112	0,8945
		SettlingMax	1,024	1,0367	1,0367	0,9939
		Overshoot	1,5701	2,3904	2,3895	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,024	1,0367	1,0367	0,9939	
PeakTime		118,32	117,62	117,62	500	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
ISE	ERRORE T +100%	RiseTime	9,5571	9,8582	9,8535	10,2414
		SettlingTime	14,8326	16,0038	29,535	16,797
		SettlingMinx	0,8975	0,8981	0,8979	0,8911
		SettlingMax	1,0111	1,0121	1,0307	1,0065
		Overshoot	1,4068	1,4324	3,322	1,6696
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0111	1,0121	1,0307	1,0065
		PeakTime	20,395	21,67	23,405	23,41
	ERRORE tau +100%	RiseTime	29,0552	28,9555	28,979	32,9975
		SettlingTime	53,2222	52,5381	52,5678	135,263
		SettlingMinx	0,8993	0,9003	0,9002	0,893
		SettlingMax	0,9992	1,0011	1,0009	0,9922
		Overshoot	0	0,0776	0,0618	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9992	1,0011	1,0009	0,9922
		PeakTime	500	124,795	127,345	500
	ERRORE guadagno +100%	RiseTime	25,0945	25,0033	25,0234	27,1179
		SettlingTime	45,6256	45,3199	45,3478	116,1743
		SettlingMinx	0,898	0,8986	0,8986	0,8936
		SettlingMax	0,9978	0,9984	0,9984	0,9928
		Overshoot	0	0	0	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9978	0,9984	0,9984	0,9928
		PeakTime	500	500	500	500
	ERRORE T tau guadagno +100%	RiseTime	32,8059	32,9851	32,9966	35,5063
		SettlingTime	73,3007	71,9578	72,0163	174,0817
		SettlingMinx	0,8872	0,8885	0,8884	0,8762
		SettlingMax	0,9858	0,9872	0,9871	0,9736
		Overshoot	0	0	0	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		0,9858	0,9872	0,9871	0,9736	
PeakTime		500	500	500	500	

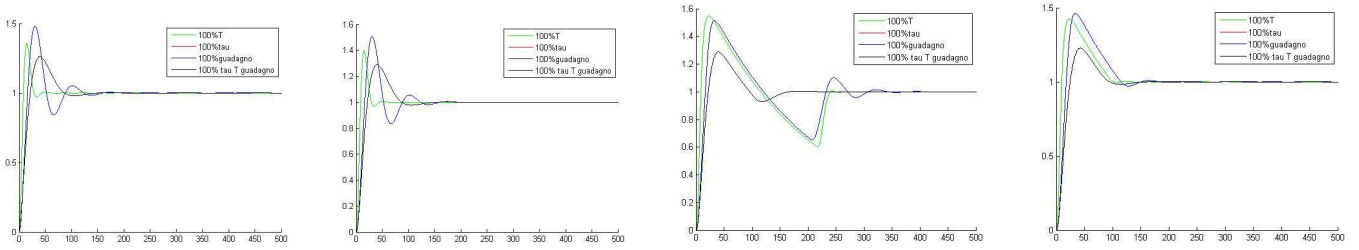
		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
ISTSE	ERRORE T +100%	RiseTime	8,7696	8,9863	8,9721	9,3858
		SettlingTime	22,5761	23,6706	37,9545	33,2265
		SettlingMinx	0,8975	0,8982	0,8975	0,8966
		SettlingMax	1,028	1,0286	1,0685	1,0449
		Overshoot	3,088	3,0817	7,1709	4,8982
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,028	1,0286	1,0685	1,0449
		PeakTime	18,46	19,495	23,275	23,28
	ERRORE tau +100%	RiseTime	28,545	28,3998	28,4252	32,1133
		SettlingTime	51,9216	51,2658	51,3006	126,1111
		SettlingMinx	0,8994	0,9002	0,9002	0,8939
		SettlingMax	0,9993	1,0009	1,0007	0,9932
		Overshoot	0	0,0661	0,0483	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9993	1,0009	1,0007	0,9932
		PeakTime	500	121,845	125,2	500
	ERRORE guadagno +100%	RiseTime	24,5855	24,4903	24,511	26,3734
		SettlingTime	43,7631	43,5783	43,5987	100,7236
		SettlingMinx	0,8984	0,8989	0,8988	0,8946
		SettlingMax	0,9982	0,9987	0,9987	0,9939
		Overshoot	0	0	0	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9982	0,9987	0,9987	0,9939
		PeakTime	500	500	500	500
	ERRORE T tau guadagno +100%	RiseTime	31,3533	31,4575	31,4694	33,749
		SettlingTime	70,999	69,395	69,4779	174,4416
		SettlingMinx	0,8876	0,8887	0,8886	0,8776
		SettlingMax	0,9862	0,9874	0,9874	0,9751
		Overshoot	0	0	0	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		0,9862	0,9874	0,9874	0,9751	
PeakTime		500	500	500	500	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
IST ² SE	ERRORE T +100%	RiseTime	9,0033	9,1745	9,1607	9,5707
		SettlingTime	24,1277	25,1439	38,8358	34,1234
		SettlingMinx	0,8975	0,898	0,8972	0,8969
		SettlingMax	1,034	1,0347	1,071	1,0479
		Overshoot	3,7168	3,7205	7,4509	5,1543
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,034	1,0347	1,071	1,0479
		PeakTime	18,915	19,84	23,61	23,61
	ERRORE tau +100%	RiseTime	30,0732	29,8571	29,8885	33,6196
		SettlingTime	54,7509	53,9141	53,9692	121,3979
		SettlingMinx	0,8994	0,9002	0,9001	0,8945
		SettlingMax	0,9993	1,0006	1,0004	0,9939
		Overshoot	0	0,0475	0,0278	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9993	1,0006	1,0004	0,9939
		PeakTime	500	130,635	136,73	500
	ERRORE guadagno +100%	RiseTime	26,6727	26,544	26,5712	28,5496
		SettlingTime	48,2159	47,8245	47,8775	93,8834
		SettlingMinx	0,8986	0,899	0,8989	0,8951
		SettlingMax	0,9984	0,9988	0,9988	0,9946
		Overshoot	0	0	0	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9984	0,9988	0,9988	0,9946
		PeakTime	500	500	500	500
	ERRORE T tau guadagno +100%	RiseTime	33,2135	33,2371	33,2524	35,6598
		SettlingTime	80,0893	77,0504	77,2391	188,2851
		SettlingMinx	0,8869	0,8879	0,8878	0,8776
		SettlingMax	0,9854	0,9865	0,9864	0,9751
		Overshoot	0	0	0	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		0,9854	0,9865	0,9864	0,9751	
PeakTime		500	500	500	500	

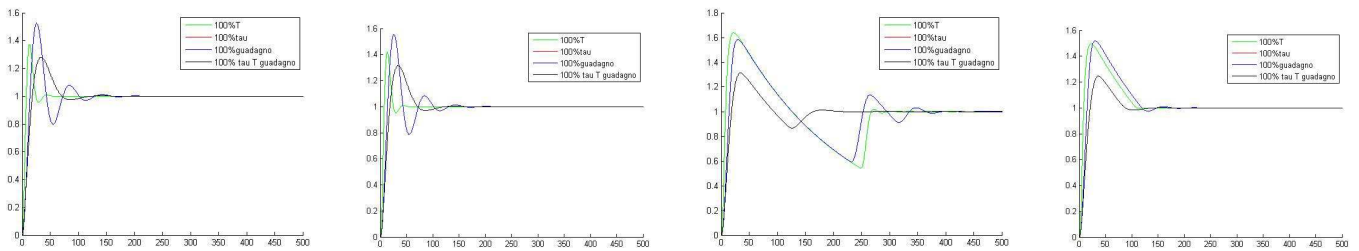
		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Skogestad PI c=4	ERRORE T +100%	RiseTime	615,3176	615,3176	615,3176	615,3176
		SettlingTime	1693,5	1693,5	1693,5	1693,5
		SettlingMinx	0,9001	0,9001	0,9001	0,9001
		SettlingMax	1,0415	1,0415	1,0415	1,0415
		Overshoot	4,1476	4,1476	4,1476	4,1476
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0415	1,0415	1,0415	1,0415
		PeakTime	1273,4	1273,4	1273,4	1273,4
	ERRORE tau +100%	RiseTime	345,1563	345,1563	345,1563	345,1563
		SettlingTime	1570,2	1570,2	1570,2	1570,2
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,1444	1,1444	1,1444	1,1444
		Overshoot	14,432	14,432	14,432	14,432
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,1444	1,1444	1,1444	1,1444
		PeakTime	751,885	751,885	751,885	751,885
	ERRORE guadagno +100%	RiseTime	623,0444	623,0444	623,0444	623,0444
		SettlingTime	1700	1700	1700	1700
		SettlingMinx	0,9001	0,9001	0,9001	0,9001
		SettlingMax	1,0399	1,0399	1,0399	1,0399
		Overshoot	3,9849	3,9849	3,9849	3,9849
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0399	1,0399	1,0399	1,0399
		PeakTime	1289,5	1289,5	1289,5	1289,5
	ERRORE T tau guadagno +100%	RiseTime	1393,1	1393,1	1393,1	1393,1
		SettlingTime	2421,9	2421,9	2421,9	2421,9
		SettlingMinx	0,8992	0,8992	0,8992	0,8992
		SettlingMax	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991
		Overshoot	0	0	0	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9991	0,9991	0,9991	0,9991
		PeakTime	4000	4000	4000	4000

Grafici in ordine rispettivo: PID, PID + D retroazione, Saturazione, Desaturazione

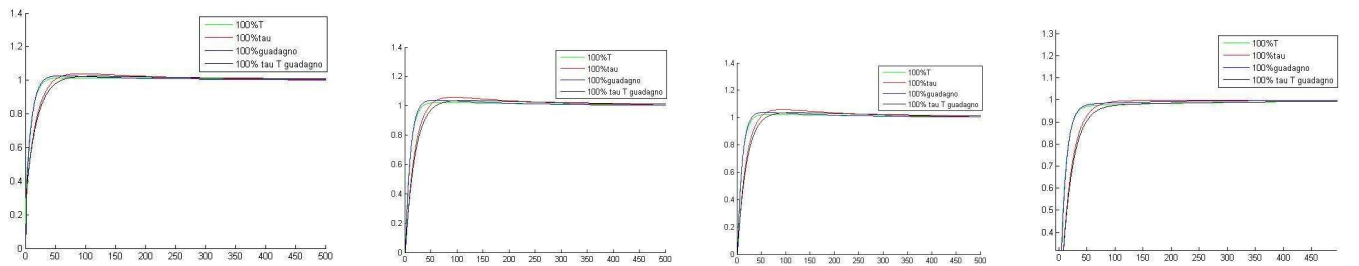
Metodo di Chien Hrones Reswick no sovralongazione



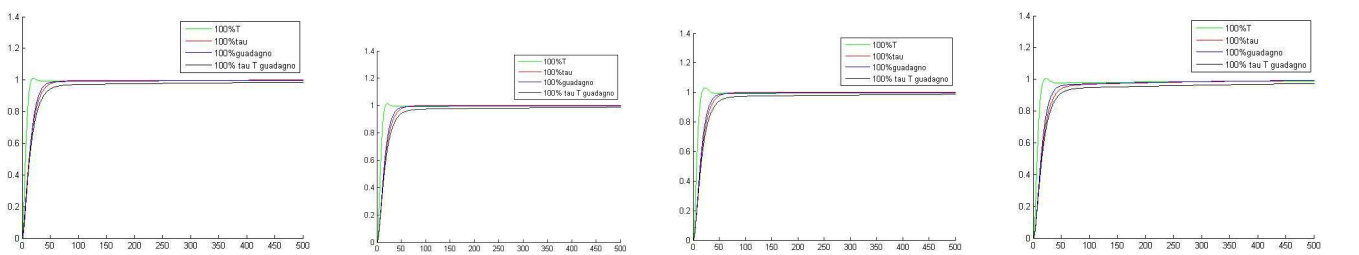
Metodo di Chien Hrones Reswick sovralongazione massima del 20%



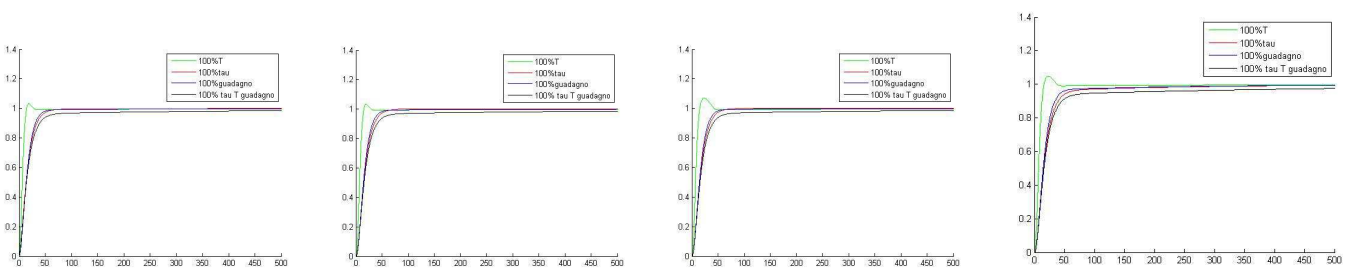
Metodo Cohen Con



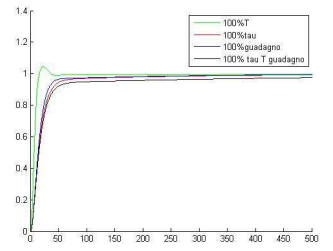
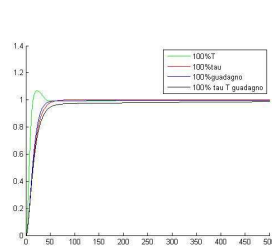
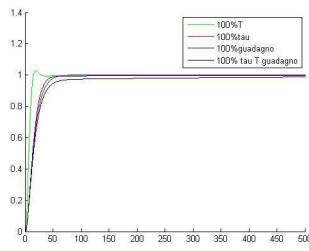
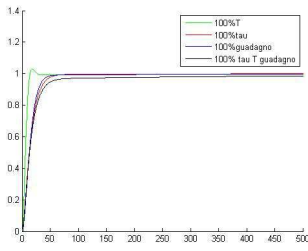
Metodo ISE



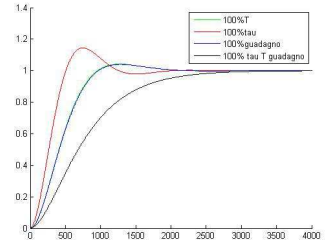
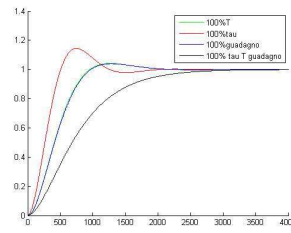
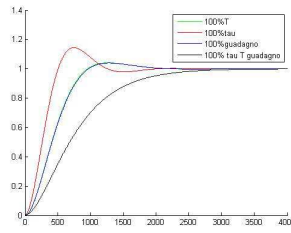
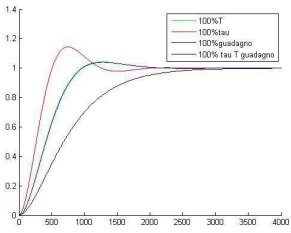
Metodo ISTSE



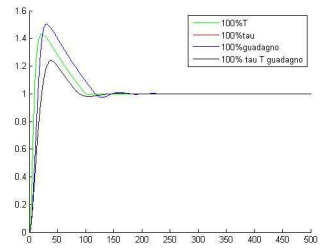
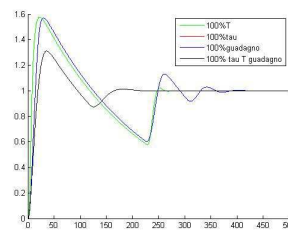
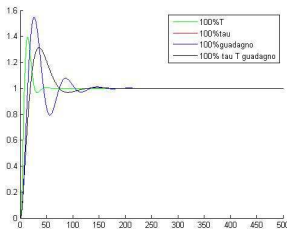
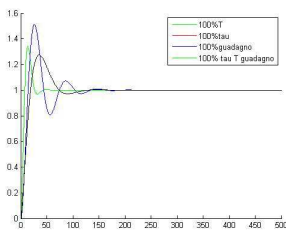
Metodo IST²SE



Metodo Skogestad PI c=4



Metodo Ziegler Nichols



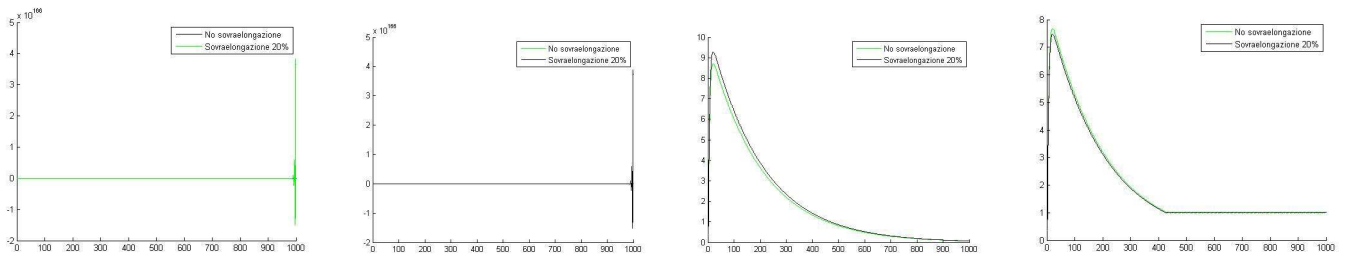
A.4. Risultati numerici tecniche di sintesi del controllore sottostima del ritardo - 95%

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE
Ziegler Nichols	RiseTime	9,0742	9,1531	0,2421	0,9515
	SettlingTime	999,9864	999,9867	744,5939	404,3812
	SettlingMinx	1,59E+163	1,48E+163	0,0651	0,8983
	SettlingMax	1,75E+163	1,63E+163	9,24E+00	7,48E+00
	Overshoot	0	0	1,29E+04	649,9854
	Undershoot	196,3814	214,1458	0	0
	Peak	3,43E+163	3,50E+163	9,239	7,4787
	PeakTime	998,755	998,775	20,97	20,785
Chien Hrones Reswick risposta al disturbo al gradino senza sovraelongazione	RiseTime	10,2602	10,3393	0,2431	0,9672
	SettlingTime	999,9836	999,9839	744,5692	405,4883
	SettlingMinx	2,70E+139	2,63E+139	0,0616	0,918
	SettlingMax	2,99E+139	2,87E+139	8,71E+00	7,67E+00
	Overshoot	0	0	1,29E+04	654,4989
	Undershoot	168,1561	177,7562	0	0
	Peak	5,03E+139	5,11E+139	8,7099	7,6664
	PeakTime	998,525	998,54	20,935	20,85
Chien Hrones Reswick risposta al disturbo al gradino con sovraelongazione del 20%	RiseTime	5,2153	5,2199	0,2427	0,9563
	SettlingTime	999,9214	999,9094	744,5976	402,6451
	SettlingMinx	3,30E+166	3,37E+166	0,0651	0,9061
	SettlingMax	3,83E+166	3,89E+166	9,2827	7,4739
	Overshoot	4,7312	4,023	1,29E+04	642,5286
	Undershoot	40,7874	40,5118	0	0
	Peak	3,83E+166	3,89E+166	9,2827	7,4739
	PeakTime	999,78	999,795	20,975	20,78
Cohen coon	RiseTime	0,9191	1,0304	0,6326	1,0497
	SettlingTime	2,6505	2,8041	975,0889	645,3261
	SettlingMinx	9,00E-01	9,01E-01	0,0591	0,9124
	SettlingMax	1,00E+00	1,00E+00	4,89E+00	4,61E+00
	Overshoot	0,2006	0,2852	9,62E+02	356,794
	Undershoot	0	0	0	0
	Peak	1,00E+00	1,00E+00	4,8856	4,6108
	PeakTime	6,56	6,565	20,465	20,43
ISE	RiseTime	1,7702	1,7732	1,6594	1,8833
	SettlingTime	25,6593	25,7403	875,1911	861,8536
	SettlingMinx	7,50E-01	7,50E-01	0,4144	0,9577
	SettlingMax	1,50E+00	1,50E+00	3,07E+00	3,04E+00
	Overshoot	50,0184	49,9971	2,32E+02	185,7655
	Undershoot	0	0	0	0
	Peak	1,50E+00	1,50E+00	3,0652	3,039
	PeakTime	5,605	5,675	20,805	20,805

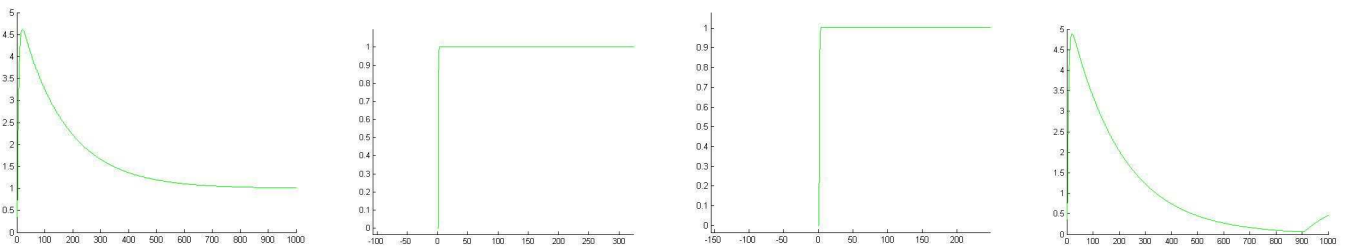
ISTSE	RiseTime	1,6511	1,6531	1,5292	1,7467
	SettlingTime	28,0915	28,1186	888,8925	850,4364
	SettlingMinx	0,7179	0,7183	0,3491	0,955
	SettlingMax	1,5311	1,531	3,2639	3,2382
	Overshoot	53,1128	53,0996	259,9989	205,6705
	Undershoot	0	0	0	0
	Peak	1,5311	1,531	3,2639	3,2382
	PeakTime	5,355	5,41	20,76	20,76
IST ² SE	RiseTime	1,7295	1,7312	1,6216	1,8123
	SettlingTime	29,3309	29,3529	883,1014	837,7959
	SettlingMinx	0,719	0,7193	0,3642	0,9436
	SettlingMax	1,5301	1,5301	3,1548	3,1303
	Overshoot	53,0126	53,007	242,3869	198,6845
	Undershoot	0	0	0	0
	Peak	1,5301	1,5301	3,1548	3,1303
	PeakTime	5,565	5,62	20,805	20,805
Skogestad PI c=4	RiseTime	323,4972	323,4972	323,4972	323,4972
	SettlingTime	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03	1,64E+03
	SettlingMinx	9,00E-01	9,00E-01	0,9	0,9
	SettlingMax	1,17E+00	1,17E+00	1,17E+00	1,17E+00
	Overshoot	17,2327	17,2327	1,72E+01	17,2327
	Undershoot	0	0	0	0
	Peak	1,17E+00	1,17E+00	1,1724	1,1724
	PeakTime	726,47	726,47	726,47	726,47

Grafici in ordine rispettivo: PID, PID + D retroazione, Saturazione, Desaturazione

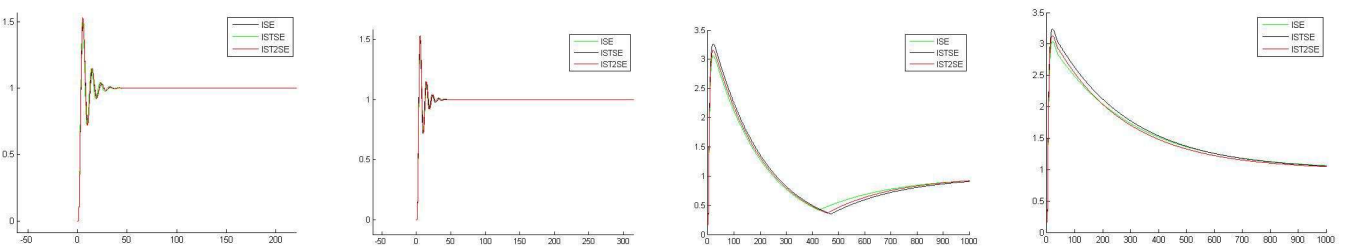
Metodo di Chien Hrones Reswick



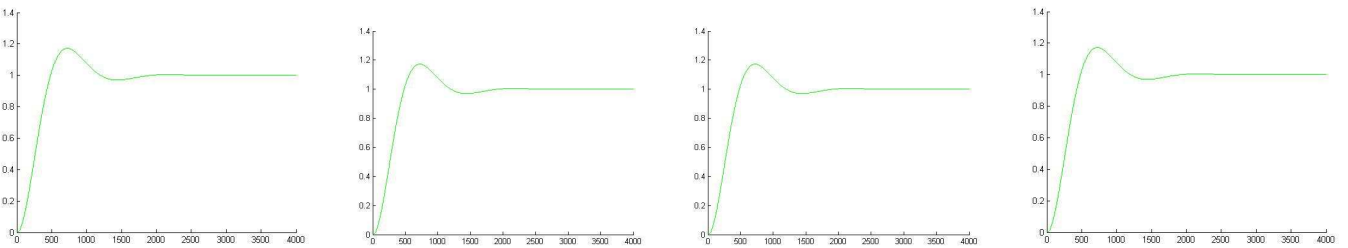
Metodo Cohen Coon



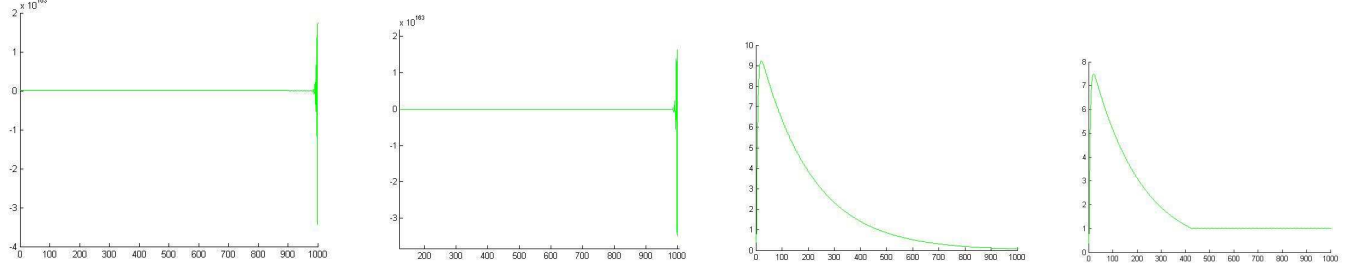
Metodo ISE, ISTSE, IST²SE



Metodo Skogestad PI c=4



Metodo Ziegler Nichols



A.5. Risultati numerici tecniche di sintesi del controllore e metodi di identificazione dei parametri

			PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Ziegler Nichols	Metodo approssimazione della tangente	RiseTime	5,4893	5,3164	5,3256	5,892	
		SettlingTime	56,4688	57,1817	374,0549	118,1413	
		SettlingMinx	0,8449	0,8311	0,5027	0,9001	
		SettlingMax	1,4915	1,5405	1,7109	1,5896	
		Overshoot	49,1492	54,0466	71,0867	58,9607	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,4915	1,5405	1,7109	1,5896	
		PeakTime	15,435	15,845	24,01	24,34	
	<hr/>						
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo reale	RiseTime					
		SettlingTime					
		SettlingMinx					
		SettlingMax					
		Overshoot					
		Undershoot					
		Peak					
		PeakTime					
	<hr/>						
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,05Kp	RiseTime	21,8231	20,6416	20,7111	24,2303	
		SettlingTime	112,2846	160,4323	160,1077	116,531	
		SettlingMinx	0,9001	0,9	0,9	0,9	
		SettlingMax	1,2279	1,2618	1,2604	1,2006	
		Overshoot	22,7944	26,1847	26,0373	20,0623	
		Undershoot	0	0	0	0	
		Peak	1,2279	1,2618	1,2604	1,2006	
		PeakTime	56,235	56,5	56,49	61,49	
	<hr/>						
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,01Kp	RiseTime	7,2198	6,9681	6,9829	7,7893	
		SettlingTime	70,2604	72,2511	274,099	98,9451	
		SettlingMinx	0,9002	0,8964	0,618	0,9004	
		SettlingMax	1,419	1,4646	1,5295	1,4297	
		Overshoot	41,8973	46,4561	52,9545	42,9722	
Undershoot		0	0	0	0		
Peak		1,419	1,4646	1,5295	1,4297		
PeakTime		19,72	20,185	25,78	26,38		

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Chien Hrones Reswick no sovraelong	Metodo approssimazione della tangente	RiseTime	6,1674	6,0085	6,02	6,5564
		SettlingTime	62,7338	63,3867	324,2487	113,1506
		SettlingMinx	0,8607	0,8519	0,5446	0,9005
		SettlingMax	1,486	1,5219	1,6428	1,5439
		Overshoot	48,5967	52,1898	64,2775	54,3898
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,486	1,5219	1,6428	1,5439
		PeakTime	17,31	17,66	24,85	25,165
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo reale	RiseTime				
		SettlingTime				
		SettlingMinx				
		SettlingMax				
		Overshoot				
		Undershoot				
		Peak				
		PeakTime				
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,05Kp	RiseTime	24,9044	23,7753	23,8649	27,3359
		SettlingTime	131,2034	132,446	132,3712	134,8079
		SettlingMinx	0,9	0,9001	0,9	0,9
		SettlingMax	1,2122	1,2363	1,2347	1,1844
		Overshoot	21,2191	23,6306	23,4724	18,4421
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,2122	1,2363	1,2347	1,1844
		PeakTime	64,28	64,425	64,42	69,425
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,01Kp	RiseTime	8,1468	7,9135	7,932	8,7012
SettlingTime		62,7537	63,4716	236,8698	96,0611	
SettlingMinx		0,9	0,9003	0,6621	0,9003	
SettlingMax		1,4091	1,4422	1,4811	1,3994	
Overshoot		40,9069	44,2246	48,114	39,9374	
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,4091	1,4422	1,4811	1,3994	
PeakTime		22,215	22,61	27,095	27,6	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Chien Hrones Reswick sovraelong 20%	Metodo approssimazione della tangente	RiseTime	5,3159	5,1681	5,1768	5,6663
		SettlingTime	66,6952	67,651	392,8589	123,8661
		SettlingMinx	0,8198	0,807	0,4818	0,9002
		SettlingMax	1,5206	1,5637	1,7534	1,6366
		Overshoot	52,06	56,367	75,3434	63,6619
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,5206	1,5637	1,7534	1,6366
		PeakTime	15,125	15,48	23,955	24,235
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo reale	RiseTime				
		SettlingTime				
		SettlingMinx				
		SettlingMax				
		Overshoot				
		Undershoot				
		Peak				
		PeakTime				
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,05Kp	RiseTime	20,689	19,6921	19,7591	22,8407
		SettlingTime	108,5716	109,7609	109,7009	112,1485
		SettlingMinx	0,9001	0,9	0,9001	0,9001
		SettlingMax	1,2286	1,2585	1,2569	1,1994
		Overshoot	22,8623	25,8484	25,6938	19,943
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,2286	1,2585	1,2569	1,1994
		PeakTime	53,69	53,97	53,96	58,375
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,01Kp	RiseTime	6,9664	6,753	6,7672	7,4619
SettlingTime		69,276	70,448	286,588	103,0764	
SettlingMinx		0,8944	0,8857	0,5988	0,9	
SettlingMax		1,4413	1,4814	1,5583	1,4615	
Overshoot		44,1265	48,1429	55,8277	46,1458	
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,4413	1,4814	1,5583	1,4615	
PeakTime		19,195	19,61	25,61	26,11	

			PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE
Cohen Coon	Metodo approssimazione della tangente	RiseTime	13,2606	14,7075	14,7076	18,5205
		SettlingTime	22,3269	116,5716	116,5612	53,1721
		SettlingMinx	0,9017	0,9026	0,9026	0,8984
		SettlingMax	1,0209	1,0312	1,0312	0,9982
		Overshoot	1,8976	2,8302	2,83	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0209	1,0312	1,0312	0,9982
		PeakTime	51,885	51,85	51,85	500
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo reale	RiseTime				
		SettlingTime				
		SettlingMinx				
		SettlingMax				
		Overshoot				
		Undershoot				
		Peak				
		PeakTime				
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,05Kp	RiseTime	40,612	42,1616	42,1753	56,0791
		SettlingTime	252,7107	300,817	300,6615	94,7905
		SettlingMinx	0,9054	0,908	0,9079	0,9011
		SettlingMax	1,0475	1,0708	1,0707	1,007
		Overshoot	4,1312	6,1462	6,1379	0,5742
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0475	1,0708	1,0707	1,007
		PeakTime	123,42	122,135	122,135	181,02
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,01Kp	RiseTime	16,5268	18,0826	18,0833	23,3595
		SettlingTime	104,4804	163,6144	163,574	54,704
		SettlingMinx	0,9019	0,9028	0,9028	0,8989
		SettlingMax	1,0271	1,0404	1,0404	0,9988
		Overshoot	2,4969	3,7189	3,7178	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,0271	1,0404	1,0404	0,9988	
PeakTime		60,59	60,505	60,505	500	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
ISE	Metodo approssimazione della tangente	RiseTime	10,6456	10,7635	10,7616	11,2993
		SettlingTime	27,5206	28,9365	33,6092	18,1299
		SettlingMinx	0,8995	0,9	0,8997	0,8957
		SettlingMax	1,0305	1,0324	1,0425	1,0145
		Overshoot	3,1151	3,257	4,284	1,9378
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0305	1,0324	1,0425	1,0145
		PeakTime	22,36	23,27	24,91	24,92
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo reale	RiseTime	0,4287	0,4288	0,726	1,6383
		SettlingTime	26,4562	26,4609	464,4936	476,6763
		SettlingMinx	0,3143	0,3144	0,5432	1,6702
		SettlingMax	1,8281	1,828	6,4116	5,4258
		Overshoot	82,8106	82,8038	971,3319	192,445
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,8281	1,828	6,4116	5,4258
		PeakTime	2,255	2,26	20,64	20,525
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,05Kp	RiseTime	46,5421	45,8795	45,9414	54,0024
		SettlingTime	85,4518	82,465	82,603	170,8229
		SettlingMinx	0,8995	0,9009	0,9008	0,8925
		SettlingMax	0,9994	1,003	1,0028	0,9917
		Overshoot	0	0,2043	0,1841	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9994	1,003	1,0028	0,9917
		PeakTime	500	175,88	177,8	500
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,01Kp	RiseTime	14,5302	14,6341	14,6388	15,6825
		SettlingTime	22,8733	23,6916	23,6553	70,1275
		SettlingMinx	0,8997	0,9003	0,9002	0,895
		SettlingMax	1,0067	1,0098	1,0096	0,9944
		Overshoot	0,7113	0,9592	0,9457	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,0067	1,0098	1,0096	0,9944	
PeakTime		31,975	33,1	33,05	500	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
ISTSE	Metodo approssimazione della tangente	RiseTime	10,1825	10,2642	10,2583	10,7491
		SettlingTime	28,5693	29,6936	37,9214	32,3451
		SettlingMinx	0,8997	0,8999	0,8997	0,8978
		SettlingMax	1,0435	1,0453	1,0629	1,036
		Overshoot	4,4127	4,5422	6,3501	3,8614
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0435	1,0453	1,0629	1,036
		PeakTime	21,455	22,215	24,815	24,82
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo reale	RiseTime	0,3794	0,3795	0,7306	1,5878
		SettlingTime	26,996	27,0003	464,4952	475,559
		SettlingMinx	0,2819	0,282	0,5481	1,5933
		SettlingMax	1,8474	1,8474	6,4896	5,3184
		Overshoot	84,7417	84,7352	971,2851	200,5493
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,8474	1,8474	6,4896	5,3184
		PeakTime	2,12	2,125	20,65	20,515
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,05Kp	RiseTime	46,9257	46,1972	46,2682	53,9784
		SettlingTime	85,9652	83,0279	83,1962	162,4528
		SettlingMinx	0,8996	0,9008	0,9007	0,8935
		SettlingMax	0,9995	1,0029	1,0026	0,9928
		Overshoot	0	0,1998	0,177	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9995	1,0029	1,0026	0,9928
		PeakTime	500	176,445	178,695	500
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,01Kp	RiseTime	14,0046	14,0716	14,0762	14,9637
		SettlingTime	21,6626	22,395	22,3553	60,8725
		SettlingMinx	0,8998	0,9003	0,9002	0,8957
		SettlingMax	1,0133	1,0161	1,0159	0,9952
		Overshoot	1,3604	1,5874	1,5724	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,0133	1,0161	1,0159	0,9952	
PeakTime		29,98	30,935	30,885	500	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
IST ² SE	Metodo approssimazione della tangente	RiseTime	10,6927	10,7499	10,7462	11,2317
		SettlingTime	30,0571	31,1233	37,585	32,0978
		SettlingMinx	0,8997	0,8999	0,8997	0,8977
		SettlingMax	1,0443	1,046	1,0585	1,0327
		Overshoot	4,4863	4,6236	5,9048	3,5509
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,0443	1,046	1,0585	1,0327
		PeakTime	22,525	23,215	25,355	25,365
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo reale	RiseTime	0,3955	0,3956	0,7296	1,5387
		SettlingTime	28,0719	28,0762	464,4948	474,4079
		SettlingMinx	0,2835	0,2836	0,5481	1,5361
		SettlingMax	1,8465	1,8464	6,4718	5,2861
		Overshoot	84,6473	84,6435	971,2957	209,906
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,8465	1,8464	6,4718	5,2861
		PeakTime	2,165	2,17	20,645	20,51
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,05Kp	RiseTime	49,5244	48,7003	48,7876	56,4886
		SettlingTime	90,5979	87,5112	87,7324	158,115
		SettlingMinx	0,8997	0,9008	0,9007	0,8943
		SettlingMax	0,9996	1,0027	1,0024	0,9936
		Overshoot	0	0,1879	0,1626	0
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	0,9996	1,0027	1,0024	0,9936
		PeakTime	500	185,11	187,945	500
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,01Kp	RiseTime	14,7578	14,791	14,7966	15,7043
		SettlingTime	22,8509	23,4868	23,4445	26,4754
		SettlingMinx	0,8997	0,9003	0,9002	0,8962
		SettlingMax	1,0134	1,0161	1,0159	0,9957
		Overshoot	1,3655	1,589	1,5715	0
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,0134	1,0161	1,0159	0,9957	
PeakTime		31,6	32,455	32,4	500	

		PID	PI + D RETROAZIONE	SATURAZIONE	DESATURAZIONE	
Skogestad PI c=4	Metodo approssimazione della tangente	RiseTime	357,943	357,943	357,943	357,943
		SettlingTime	1610,1	1610,1	1610,1	1610,1
		SettlingMinx	0,9001	0,9001	0,9001	0,9001
		SettlingMax	1,1426	1,1426	1,1426	1,1426
		Overshoot	14,2583	14,2583	14,2583	14,2583
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,1426	1,1426	1,1426	1,1426
		PeakTime	784,17	784,17	784,17	784,17
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo reale	RiseTime	328,0071	328,0071	328,0071	328,0071
		SettlingTime	1651,1	1651,1	1651,1	1651,1
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,1691	1,1691	1,1691	1,1691
		Overshoot	16,9013	16,9013	16,9013	16,9013
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,1691	1,1691	1,1691	1,1691
		PeakTime	735,19	735,19	735,19	735,19
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,05Kp	RiseTime	341,5011	341,5011	341,5011	341,5011
		SettlingTime	1156,7	1156,7	1156,7	1156,7
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,1407	1,1407	1,1407	1,1407
		Overshoot	14,0641	14,0641	14,0641	14,0641
		Undershoot	0	0	0	0
		Peak	1,1407	1,1407	1,1407	1,1407
		PeakTime	738,15	738,15	738,15	738,15
	Metodo approssimazione risposta al gradino con ritardo = 0,01Kp	RiseTime	332,8834	332,8834	332,8834	332,8834
		SettlingTime	1620,6	1620,6	1620,6	1620,6
		SettlingMinx	0,9	0,9	0,9	0,9
		SettlingMax	1,1587	1,1587	1,1587	1,1587
		Overshoot	15,8643	15,8643	15,8643	15,8643
Undershoot		0	0	0	0	
Peak		1,1587	1,1587	1,1587	1,1587	
PeakTime		736,035	736,035	736,035	736,035	

Appendice B

Listati matlab

B.1. Programmi metodi identificazione dei parametri

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   METODO APPROSSIMAZIONE DELLA RISPOSTA AL GRADINO CON
%   RITARDO TAU PARI AL 5 PERCENTO DEL GUADAGNO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all
% Funzione traferimento
s = tf('s');
p = 1000/(s^2*1000+s*205+1)
t = 0:0.001:2000;
step(p,t)
hold on
approx_zero = 0.001;

% Risposta gradino
[valori_y,time]= step(p,t);
matrix_risultati=[valori_y,time];

% Calcolo ritardo tau
guadagno = dcgain(p);
indice_k = 1;
while valori_y(indice_k) <= 0.05*guadagno
tau = time(indice_k);
indice_k = indice_k + 1;
end
fprintf('\nValore tau: %f\n\n',tau)
plot(tau,valori_y(indice_k),'o')
text(tau,valori_y(indice_k),' tau')
fprintf('ERRORE DI LETTURA tau: Valore tau rilevato a %f invece di %f
\n\n',valori_y(indice_k -1), guadagno*0.05)

% Calcolo costante di tempo T
indice_k = 1;
while valori_y(indice_k) <= 0.63*guadagno
T = time(indice_k);
indice_k = indice_k + 1;
end
plot(T,valori_y(indice_k),'o')
text(T, valori_y(indice_k),' Tc')
T = T - tau;
fprintf('\nValore T: %f\n\n',T)
fprintf('ERRORE DI LETTURA T: Valore T rilevato a %f invece di %f \n\n',
valori_y(indice_k -1), guadagno*0.63);
```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%   METODO APPROSSIMAZIONE DELLA RISPOSTA AL GRADINO CON
%   RITARDO TAU PARI AL 1 PERCENTO DEL GUADAGNO

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

% Funzione traferimento
s = tf('s');
p = 1000/(s^2*1000+s*205+1)
t = 0:0.001:2000;
step(p,t)
hold on
approx_zero = 0.001;

% Risposta gradino
[valori_y,time]= step(p,t);
matrix_risultati=[valori_y,time];

% Calcolo ritardo tau
guadagno = dcgain(p);
indice_k = 1;
while valori_y(indice_k) <= 0.01*guadagno
    tau = time(indice_k);
    indice_k = indice_k + 1;
end
fprintf('\nValore tau: %f\n\n',tau)
plot(tau,valori_y(indice_k),'o')
text(tau,valori_y(indice_k),' tau')
fprintf('ERRORE DI LETTURA tau: Valore tau rilevato a %f invece di %f
\n\n',valori_y(indice_k -1), guadagno*0.01)

% Calcolo costante di tempo T
indice_k = 1;
while valori_y(indice_k) <= 0.63*guadagno
    T = time(indice_k);
    indice_k = indice_k + 1;
end
plot(T,valori_y(indice_k),'o')
text(T, valori_y(indice_k),' Tc')
T = T - tau;
fprintf('\nValore T: %f\n\n',T)
fprintf('ERRORE DI LETTURA T: Valore T rilevato a %f invece di %f \n\n',
    valori_y(indice_k -1), guadagno*0.63);

```

```

%%%%%%%%%%

%   METODO APPROSSIMAZIONE DELLA TANGENTE

%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

% Funzione traferimento
s = tf('s');
p = 1000/(s^2*1000+s*205+1)
t = 0:0.001:2000;
step(p,t)
hold on

% Risposta gradino
[valori_y,time]= step(p,t);
matrix_risultati=[valori_y,time];

%Derivata
derivata = s*p;
step(derivata,t)
[Y,time]= step(derivata,t);
matrix_risultati_derivata = [Y,time];
[massimo,k] = max(Y);
t_massimo = time(k);
punto_max_pendenza = [t_massimo,massimo];
plot(t_massimo,massimo,'o')
text(t_massimo,massimo,' max derivata')
punto= valori_y(k);
punto_max_pendenza_p = [t_massimo,punto]
plot(t_massimo,punto,'o')
text(t_massimo,punto,' max pendenza')

% Calcolo informazioni dalla risposta al gradino
b = valori_y(k)-massimo*(t_massimo) % taylor
a = massimo
y = a*t+b;
valori_rett_tan = [y,t];
plot(t,y)

%Calcolo parametri costante di tempo T e ritardo tau
T = -b/a
guadagno = dcgain(p)
tau = (guadagno*T)/abs(b)
plot(T,0,'o')

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%   METODO APPROSSIMAZIONE DELLA RISPOSTA AL GRADINO CON
%   RITARDO REALE

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

% Funzione traferimento
s = tf('s');
p = 1000/(s^2*1000+s*205+1)
t = 0:0.001:2000;
step(p,t)
hold on
approx_zero = 0.001;

% Risposta gradino
[valori_y,time]= step(p,t);
matrix_risultati=[valori_y,time];

% Calcolo ritardo tau
indice_k = 1;
dimensione_matrix = size(time);
length = dimensione_matrix(1,1);
approx_zero = 0.0001;

while indice_k <= length
    if valori_y(indice_k) <= approx_zero
        tau = time(indice_k);
        if valori_y(indice_k+1) > approx_zero
            break;
        else
            indice_k = indice_k+1;
        end
    end
end

fprintf('\nValore tau: %f\n\n',tau)
plot(tau,valori_y(indice_k),'o')
text(tau,valori_y(indice_k),' tau')
fprintf('ERRORE DI LETTURA tau: Valore tau rilevato per valori < di %f
\n',approx_zero)

% Calcolo costante di tempo T
guadagno = dcgain(p);
indice_k = 1;
while valori_y(indice_k) <= 0.63*guadagno
    T = time(indice_k);
    indice_k = indice_k + 1;
end
plot(T,valori_y(indice_k),'o')
text(T, valori_y(indice_k),' Tc')
T = T - tau;
fprintf('\nValore T: %f\n\n',T)
fprintf('ERRORE DI LETTURA T: Valore T rilevato a %f invece di %f \n\n',
    valori_y(indice_k -1), guadagno*0.63);

```

B.2.Programmi tecniche di sintesi

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% METODO ZIEGLER NICHOLS

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

guadagno = XXXX
tau = XXXX
T = XXXX
% PARAMETRI TARATURA CONTROLLORE
% Azione proporzionale
Valore_Kp = 1.2*T/(guadagno*tau);
% Azione integrativo
Valore_Ti = 2*tau;
Valore_Ki = Valore_Kp / Valore_Ti;
% Azione derivativo
Valore_Td = 0.5*tau;
Valore_Kd = Valore_Kp * Valore_Td;
% Altri parametri
Valore_Tt = sqrt(Valore_Ti*Valore_Td);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% METODO CHIEN HRONES RESWICK RISPOSTA AL DISTURBO AL GRADINO
% SENZA SOVRAELONGAZIONE

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

guadagno = XXXX
tau = XXXX
T = XXXX
% PARAMETRI TARATURA CONTROLLORE
b = guadagno*tau/T;
% Azione proporzionale
Valore_Kp = 0.95/abs(b);
% Azione integrativo
Valore_Ti = 2.4*tau;
Valore_Ki = Valore_Kp / Valore_Ti;
% Azione derivativo
Valore_Td = 0.42*tau;
Valore_Kd = Valore_Kp * Valore_Td;
% Altri parametri
Valore_Tt = sqrt(Valore_Ti*Valore_Td);
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% METODO CHIEN HRONES RESWICK RISPOSTA AL DISTURBO AL GRADINO
% CON SOVRAELONGAZIONE DEL 20 PER CENTO

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

guadagno = XXXX
tau = XXXX
T = XXXX
% PARAMETRI TARATURA CONTROLLORE

b = guadagno*tau/T;
% Azione proporzionale
Valore_Kp = 1.2/abs(b);
% Azione integrativo
Valore_Ti = 2*tau;
Valore_Ki = Valore_Kp / Valore_Ti;
% Azione derivativo
Valore_Td = 0.42*tau;
Valore_Kd = Valore_Kp * Valore_Td;
% Altri parametri
Valore_Tt = sqrt(Valore_Ti*Valore_Td);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% METODO COHEN COON

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

guadagno = XXXX
tau = XXXX
T = XXXX
% PARAMETRI TARATURA CONTROLLORE
b = guadagno*tau/T;
phi = T/(tau+T)
% Azione proporzionale
Valore_Kp = 1.35/abs(b)*(1+0.18*phi/(1-phi))
% Azione integrativo
Valore_Ti = T*((2.5-2*phi)/(1-0.39*phi))
Valore_Ki = Valore_Kp / Valore_Ti;
% Azione derivativo
Valore_Td = T*((0.37-0.37*phi)/(1-0.81*phi))
Valore_Kd = Valore_Kp * Valore_Td;
% Altri parametri
Valore_Tt = sqrt(Valore_Ti*Valore_Td);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% METODO ISE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

guadagno = XXXX
tau = XXXX
T = XXXX

% PARAMETRI TARATURA CONTROLLORE
phi = tau/T;

if (phi >= 0 && phi <= 2)
    if (phi<=1.1)
        a1 = 1.260;
        b1 = -0.887;
        a2 = 0.701;
        b2 = -0.147;
        a3 = 0.375;
        b3 = 0.886;
    else
        a1 = 1.295;
        b1 = -0.619;
        a2 = 0.661;
        b2 = -0.110;
        a3 = 0.378;
        b3 = 0.756;
    end
else
    fprintf('ERRORE! PHI < 0 oppure PHI > 2')
end

% Azione proporzionale
Valore_Kp = a1/guadagno*phi^(b1);

% Azione integrativo
Valore_Ti = T/(a2+b2*phi);
Valore_Ki = Valore_Kp / Valore_Ti;

% Azione derivativo
Valore_Td = a3*T*phi^(b3);
Valore_Kd = Valore_Kp * Valore_Td;

% Altri parametri
Valore_Tt = sqrt(Valore_Ti*Valore_Td);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% METODO ISTSE

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

guadagno = XXXX
tau = XXXX
T = XXXX

% PARAMETRI TARATURA CONTROLLORE
phi = tau/T;

if (phi >= 0 && phi <= 2)
    if (phi<=1.1)
        a1 = 1.053;
        b1 = -0.930;
        a2 = 0.736;
        b2 = -0.126;
        a3 = 0.349;
        b3 = 0.907;
    else
        a1 = 1.120;
        b1 = -0.625;
        a2 = 0.720;
        b2 = -0.114;
        a3 = 0.350;
        b3 = 0.811;
    end
else
    fprintf('ERRORE! PHI < 0 oppure PHI > 2')
end

% Azione proporzionale
Valore_Kp = a1/guadagno*phi^(b1);

% Azione integrativo
Valore_Ti = T/(a2+b2*phi);
Valore_Ki = Valore_Kp / Valore_Ti;

% Azione derivativo
Valore_Td = a3*T*phi^(b3);
Valore_Kd = Valore_Kp * Valore_Td;

% Altri parametri
Valore_Tt = sqrt(Valore_Ti*Valore_Td);

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% METODO IST2SE

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

guadagno = XXXX
tau = XXXX
T = XXXX

% PARAMETRI TARATURA CONTROLLORE
phi = tau/T;

if (phi >= 0 && phi <= 2)
    if (phi1<=1.1)
        a1 = 0.942;
        b1 = -0.933;
        a2 = 0.770;
        b2 = -0.130;
        a3 = 0.308;
        b3 = 0.897;
    else
        a1 = 1.001;
        b1 = -0.628;
        a2 = 0.754;
        b2 = -0.116;
        a3 = 0.308;
        b3 = 0.813;
    end
end
else
    fprintf('ERRORE! PHI < 0 oppure PHI > 2')
end

% Azione proporzionale
Valore_Kp = a1/guadagno*phi^(b1);

% Azione integrativo
Valore_Ti = T/(a2+b2*phi);
Valore_Ki = Valore_Kp / Valore_Ti;

% Azione derivativo
Valore_Td = a3*T*phi^(b3);
Valore_Kd = Valore_Kp * Valore_Td;

% Altri parametri
Valore_Tt = sqrt(Valore_Ti*Valore_Td);

```



```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% METODO SKOGESTAD PI

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

guadagno = XXXX
tau = XXXX
T = XXXX
% PARAMETRI TARATURA CONTROLLORE
C=XXXX
Tc = tau;
% Azione proporzionale
Valore_Kp = Tc/(guadagno*(T+tau));
% Azione integrativo
Valore_Ti = min(Tc,c*(T+tau));
Valore_Ki = Valore_Kp / Valore_Ti;
% Azione derivativo
Valore_Td = 0
Valore_Kd = Valore_Kp * Valore_Td;
% Altri parametri
Valore_Tt = 1

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% METODO SKOGESTAD PID

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clc
clear all
close all

guadagno = XXXX
tau = XXXX
T = XXXX
% PARAMETRI TARATURA CONTROLLORE
C=XXXX
Tc = tau;
% Azione proporzionale
Valore_Kp = 1/(guadagno*(Tc+tau));
% Azione integrativo
Valore_Ti = c*(T+tau);
Valore_Ki = Valore_Kp / Valore_Ti;
% Azione derivativo
Valore_Td = Tc;
Valore_Kd = Valore_Kp * Valore_Td;
% Altri parametri
Valore_Tt = sqrt(Valore_Ti1*Valore_Td1);

```