



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI ROMA TRE

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale e dell'Automazione

Controllo Fuzzy

**Sistema di Controllo Automatico per la regolazione
del meccanismo di frenata nei sistemi ferroviari**

<p>Prof. Giovanni Ulivi Università Roma Tre</p>	<p>Componenti Ludovico Pinzari Stefano Rosi Gabriele Patrizi</p>
--	---

Anno Accademico 2007/2008

***“ AS COMPLEXITY RISES, PRECISE STATEMENTS LOSE
MEANING AND MEANINGFUL STATEMENTS LOSE PRECISION
”***

Lotfi Zadeh..

“ PRECISION IS NOT TRUE ”

Henry Matisse.

***“ SO FAR AS THE LAWS OF MATHEMATICS REFER TO
REALITY, THEY ARE NOT CERTAIN. AND SO FAR AS THEY ARE
CERTAIN, THEY DO NOT REFER TO REALITY.”***

Albert Einstein.

SOMMARIO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI ROMA TRE	1
<i>Facoltà di Ingegneria</i>	1
<i>Controllo Fuzzy</i>	1
PREMESSA	5
1. INTRODUZIONE	6
2. PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI CONTROLLO FUZZY	9
2.1 L'APPLICAZIONE.....	17
2.2 SIMULAZIONE	19

PREMESSA

In questo lavoro viene proposta una possibile soluzione per la realizzazione di un controllore, implementato con una logica fuzzy, che consenta di regolare il meccanismo di accelerazione e frenata di un treno. Nella fase di progettazione del controllore è stato utilizzato il fuzzy logic toolbox di Matlab.

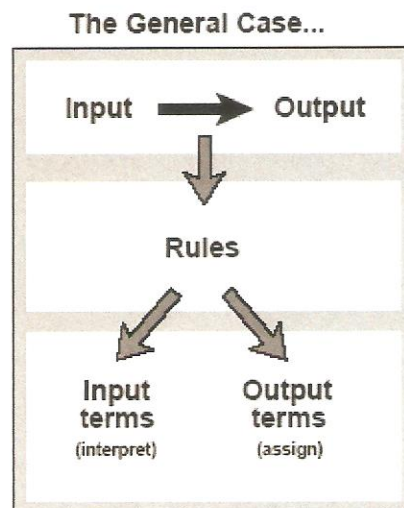
In questo contesto il compito principale del controllore fuzzy è di seguire un certo profilo di velocità. Un'applicazione effettiva della logica fuzzy relativa ai sistemi metropolitani è stata realizzata per il controllo della frenata del treno della metro di Sendai, in Giappone, nell'87 dall'Hatachi.

Il treno era in grado di frenare in maniera precisa e molto morbida, indipendentemente dal carico dei passeggeri. Ne scaturì un maggior comfort per i passeggeri ed un risparmio notevole di energia rispetto alla frenata realizzata dagli operatori umani.

1. INTRODUZIONE

L'obiettivo principale della Logica Fuzzy è quello di stabilire un Mapping tra INPUT SPACE ed OUTPUT SPACE; il meccanismo che consente di stabilire questa relazione viene realizzato definendo una lista di IF-THEN STATEMENTS comunemente chiamate REGOLE. Le regole vengono valutate in parallelo e l'ordine risulta non influente in quanto il metodo di aggregazione è commutativo. Questo insieme di regole è estremamente utile poiché fanno riferimento a delle variabili ed agli aggettivi che le descrivono; in tale modo risulta semplice caratterizzare il Sistema utilizzando il linguaggio comune.

Il processo di Inferenza Fuzzy può essere schematizzato nel seguente diagramma.

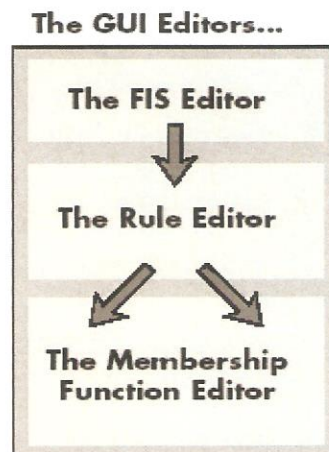


Per riassumere lo schema presentato possiamo dire che la FI (Fuzzy Inference) è un metodo che interpreta i valori del vettore che modella gli ingressi e, sulla base di un'insieme di regole, assegna dei valori al vettore che modella le uscite del sistema.

Il processo che consente di progettare un FIS (Fuzzy Inference System) comprende sostanzialmente i seguenti componenti:

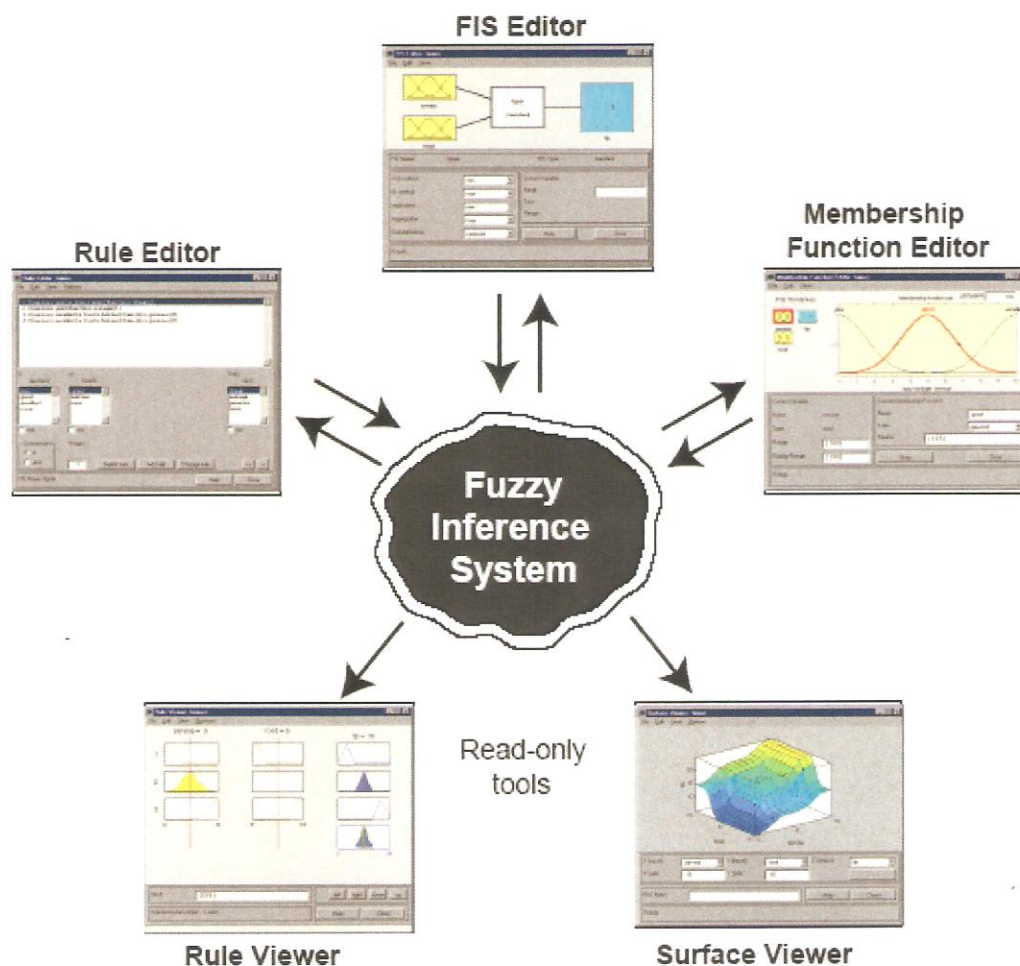
- **FUZZY INPUT SET**
- **FUZZY OUTPUT SET**
- **MEMBERSHIP FUNCTIONS**
- **RULES**
- **FUZZY LOGIC OPERATORS**

Nello specifico per l'analisi del nostro sistema ricorreremo al **GUI editor** di Fuzzy Logic Toolbox di Matlab. Gli STEP di Progettazione possono essere riassunti nel seguente schema:

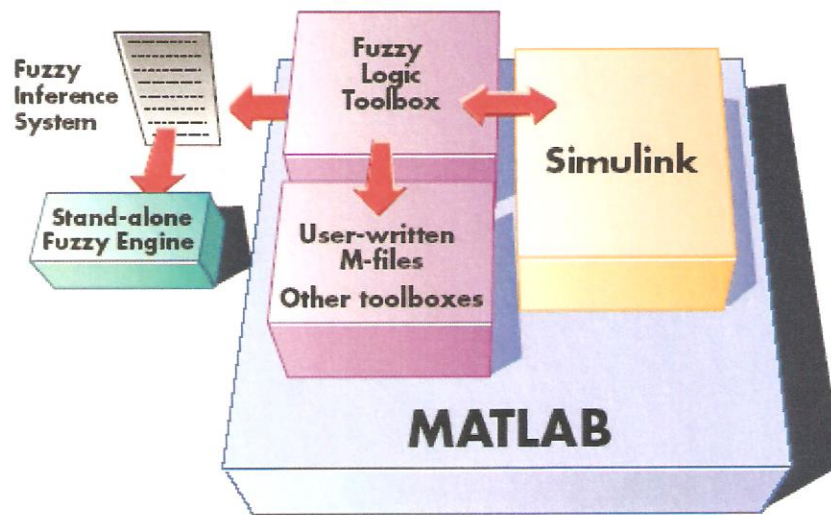


Una volta completata la fase di definizione del nostro FIS è possibile analizzare il suo comportamento attraverso 2 VIEWER EDITOR.

Il diagramma di collaborazione tra i 5 MODULI che compongono il GUI editor viene riportato di seguito:



Sulla base del FIS progettato è stata realizzata una simulazione utilizzando **SIMULINK**, che mostra l'andamento della velocità del mezzo.

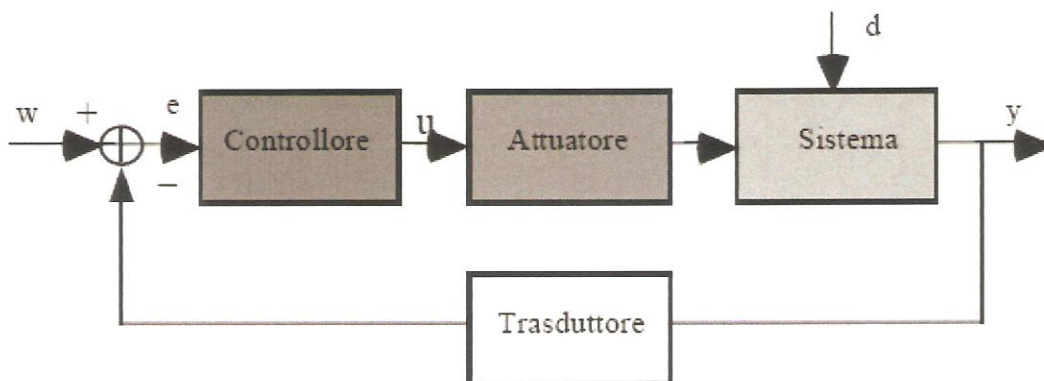


2. PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI CONTROLLO FUZZY

Lo scopo di un buon sistema di controllo è quello di portare a zero l'errore a regime e di ottenere ciò nel minor tempo possibile, limitando al massimo l'entità delle sovraelongazioni (overshoot) della variabile controllata intorno al setpoint e cercando di contenere anche le oscillazioni della variabile di controllo, che si ripercuotono sugli attuatori.

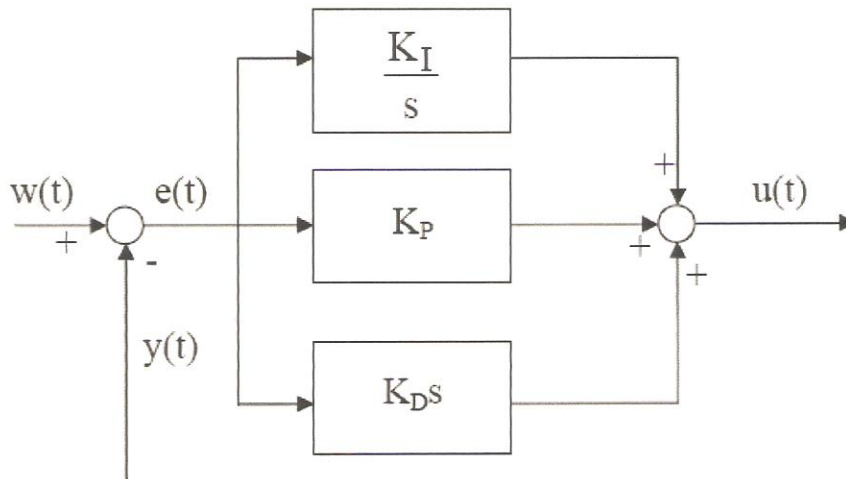
La teoria della regolazione ha proposto numerosi approcci al problema ad esempio basati sull'analisi in frequenza del comportamento del sistema ad anello chiuso. I controllori tradizionali di maggior impiego nel mondo industriale sono quelli di tipo Proporzionale-Integrale-Derivativo PID che, pur non garantendo in generale prestazioni ottime, in virtù della loro relativa semplicità, hanno il pregio di fornire un rapporto costi-benefici difficilmente superabile da altri tipi di controllori più avanzati e sofisticati.

Considerando il classico schema a blocchi:



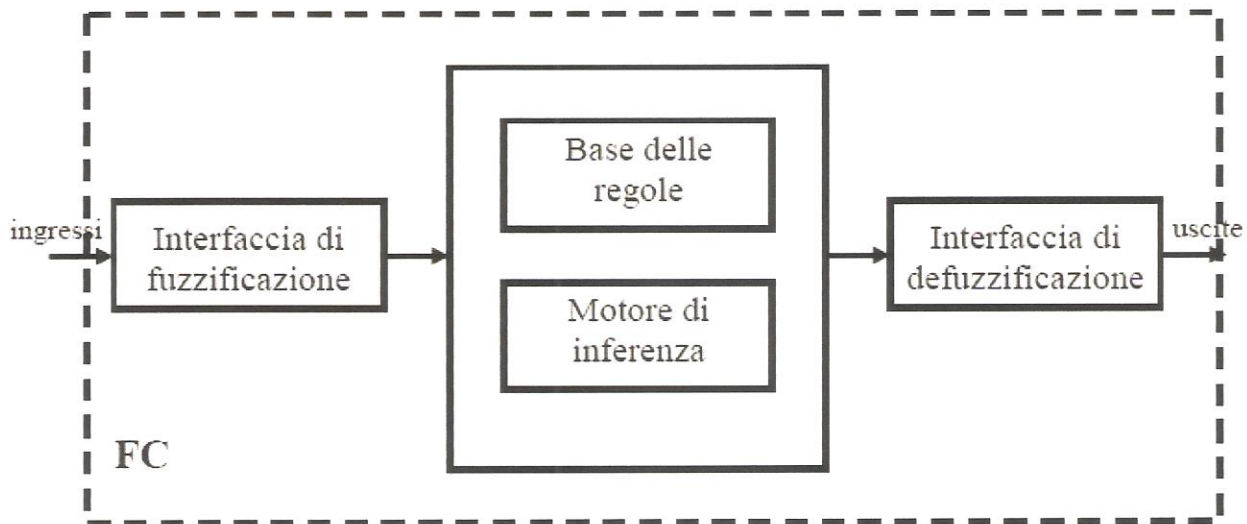
Avremo che la parte analitica relativa al controllore sarà caratterizzata dalla seguente forma:

$$u = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt}$$



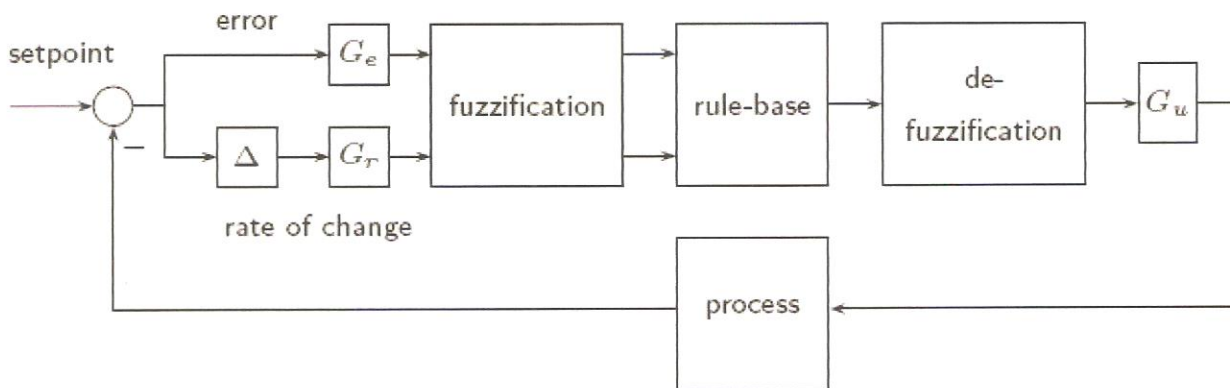
Si noti che l'azione proporzionale è tanto maggiore quanto l'errore è maggiore, l'azione integrale (proporzionale all'andamento avuto dall'errore) è utilizzata in generale per annullare l'errore a regime a seguito di ingressi a gradino, mentre quella derivativa (proporzionale alla tendenza dell'errore) ha lo scopo di anticipare il comportamento futuro dell'errore in transitorio.

Vedremo di seguito come sia possibile realizzare un controllore Fuzzy per un problema di regolazione e come questo possa sostituire i classici regolatori PID.



Sulla base di quanto esposto nel capitolo precedente, nel controllo fuzzy un certo set di regole viene utilizzato per imporre un certo comportamento ad un sistema (processo). Gli errori di sistema, ovvero la differenza tra i valori del setpoint e quelli delle variabili misurabili y , costituiscono gli ingressi dell'algoritmo fuzzy mentre i comandi u per gli attuatori ne costituiscono le uscite. Sia gli uni che le altre, pertanto, devono essere classificati in certi set di insiemi fuzzy.

Un diffuso schema di regolazione è quello che utilizza come ingressi la variabile da controllare e la sua derivata. PD LIKE FUZZY CONTROLLER.



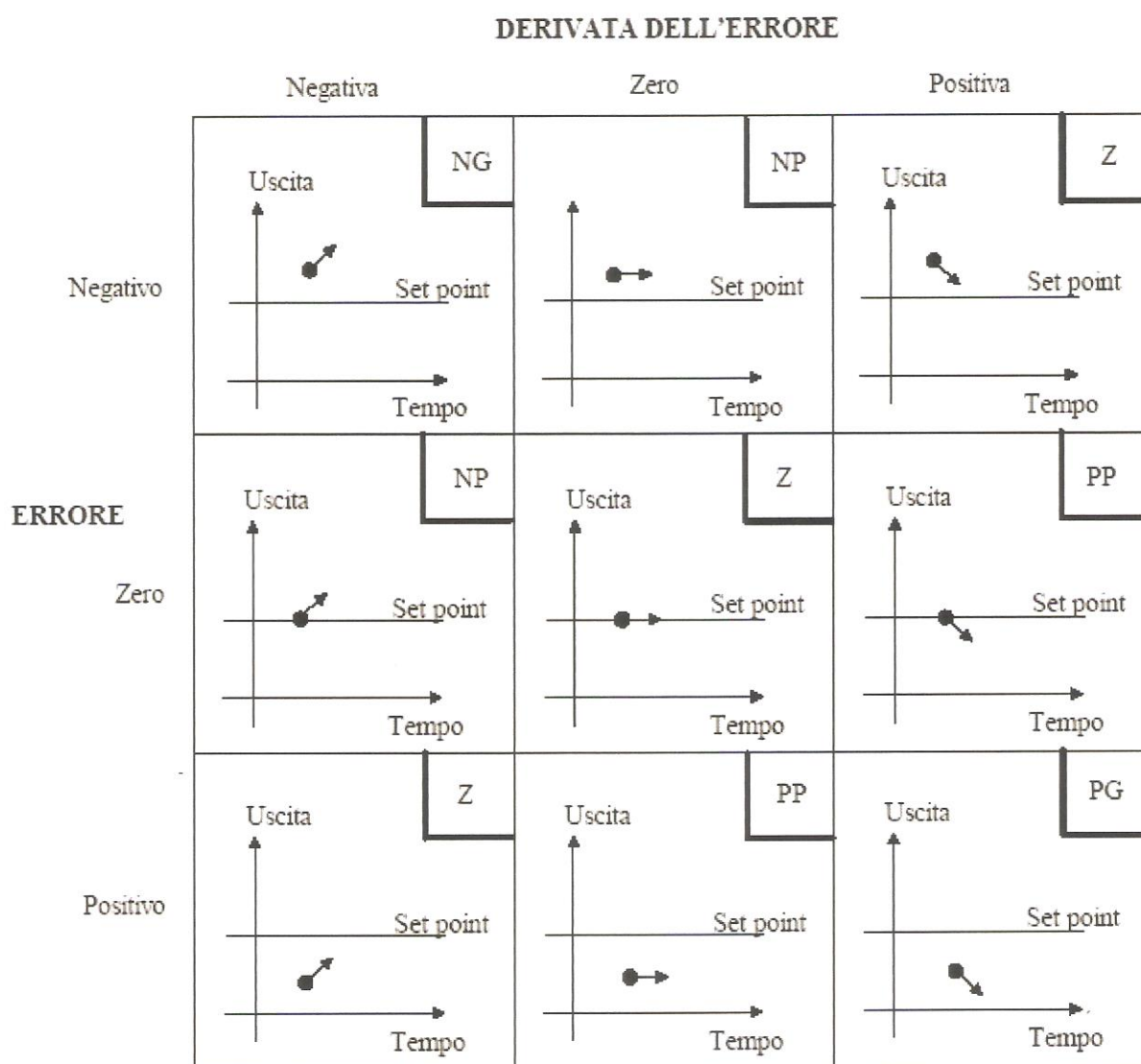
In questo modo possono essere implementate delle regole che rispecchiano in modo estremamente intuitivo il corretto modo di operare del controllore per avere ottime prestazioni nell'inseguimento del set-point (e quindi ottenere in generale bassi valori del tempo di salita, del tempo di assestamento e della sovraelongazione).

Ad esempio, le nove regole risultanti nel caso si abbiano tre funzioni di appartenenza per ognuno dei due ingressi e cinque per l'uscita possono essere espresse nel modo seguente:

1. **Se** l'errore è **NEGATIVO** **e** la derivata dell'errore è **NEGATIVA**
Allora l'uscita del controllore sarà **NEGATIVA GRANDE (NG)**
2. **Se** l'errore è **NEGATIVO** e la derivata dell'errore è **CIRCA ZERO**
Allora l'uscita del controllore sarà **NEGATIVA PICCOLA (NP)**
3. **Se** l'errore è **NEGATIVO** **e** la derivata dell'errore è **POSITIVA**
Allora l'uscita del controllore sarà **ZERO (Z)**
4. **Se** l'errore è **CIRCA NEGATIVO** **e** la derivata dell'errore è **NEGATIVA**
Allora l'uscita del controllore sarà **NEGATIVA GRANDE (NG)**
5. **Se** l'errore è **CIRCA ZERO** **e** la derivata dell'errore è **CIRCA ZERO**
Allora l'uscita del controllore sarà **ZERO (Z)**
6. **Se** l'errore è **CIRCA ZERO** **e** la derivata dell'errore è **POSITIVA**
Allora l'uscita del controllore sarà **POSITIVA PICCOLA (PP)**

7. Se l'errore è POSITIVO e la derivata dell'errore è NEGATIVA
Allora l'uscita del controllore sarà ZERO (Z)
8. Se l'errore è POSITIVO e la derivata dell'errore è CIRCA ZERO
Allora l'uscita del controllore sarà POSITIVA PICCOLA (PP)
9. Se l'errore è POSITIVO e la derivata dell'errore è POSITIVA
Allora l'uscita del controllore sarà POSITIVA GRANDE (PG)

La figura sottostante chiarifica l'utilizzo delle regole esposte. In ognuno dei nove spazi della figura è infatti indicata la situazione relativa all'uscita del sistema sotto controllo quando l'errore e la sua derivata hanno i valori indicati ai lati della schematizzazione, con la corrispondente azione intrapresa dal modulo fuzzy (nell'angolo in alto a destra).



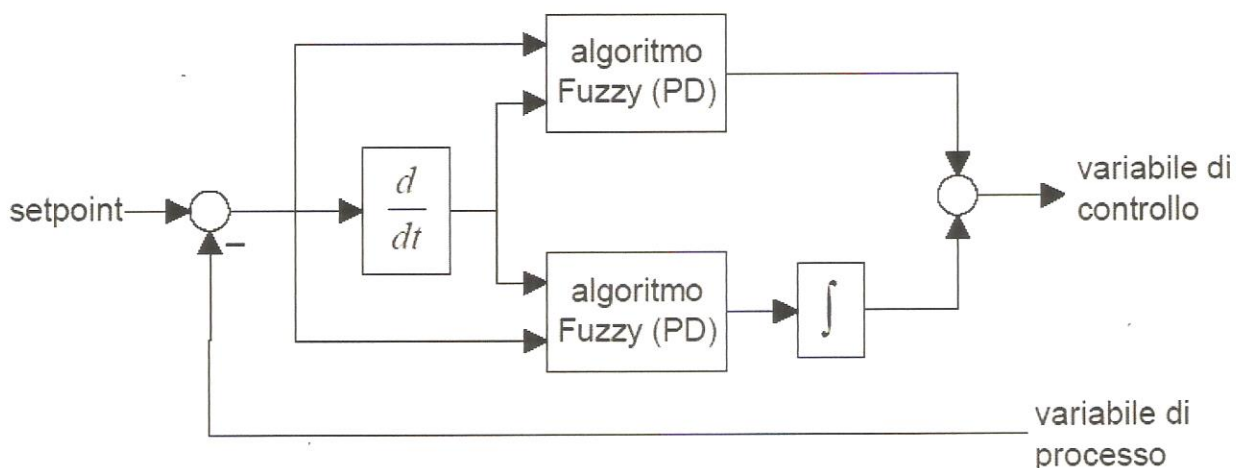
Il caso appena esposto si può facilmente generalizzare allorché si utilizzino più o meno funzioni d'appartenenza per gli ingressi o per l'uscita. La **matrice delle regole** risultante è quella di **Mac Vicar-Whelan**, riportata di seguito, per il caso in cui cinque funzioni d'appartenenza sono definite per gli ingressi e nove per le uscite.

		Δe				
		NB	NS	Z	PS	PB
e	NB	NVB	NB	NM	NS	Z
	NS	NB	NM	NS	Z	PS
	Z	NM	NS	Z	PS	PM
	PS	NS	Z	PS	PM	PB
	PB	Z	PS	PM	PB	PVB

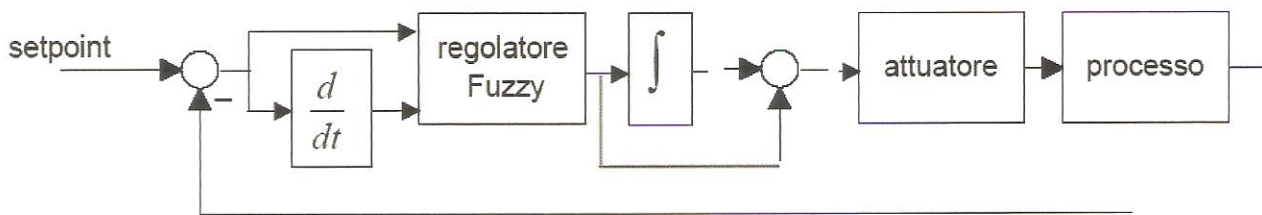
Il significato delle variabili linguistiche è riportato nella figura seguente

NVB	NEGATIVE VERY BIG
NB	NEGATIVE BIG
NM	NEGATIVE MEDIUM
NS	NEGATIVE SMALL
Z	ZERO
PS	POSITIVE SMALL
PM	POSITIVE MEDIUM
PB	POSITIVE BIG
PVB	POSITIVE VERY BIG

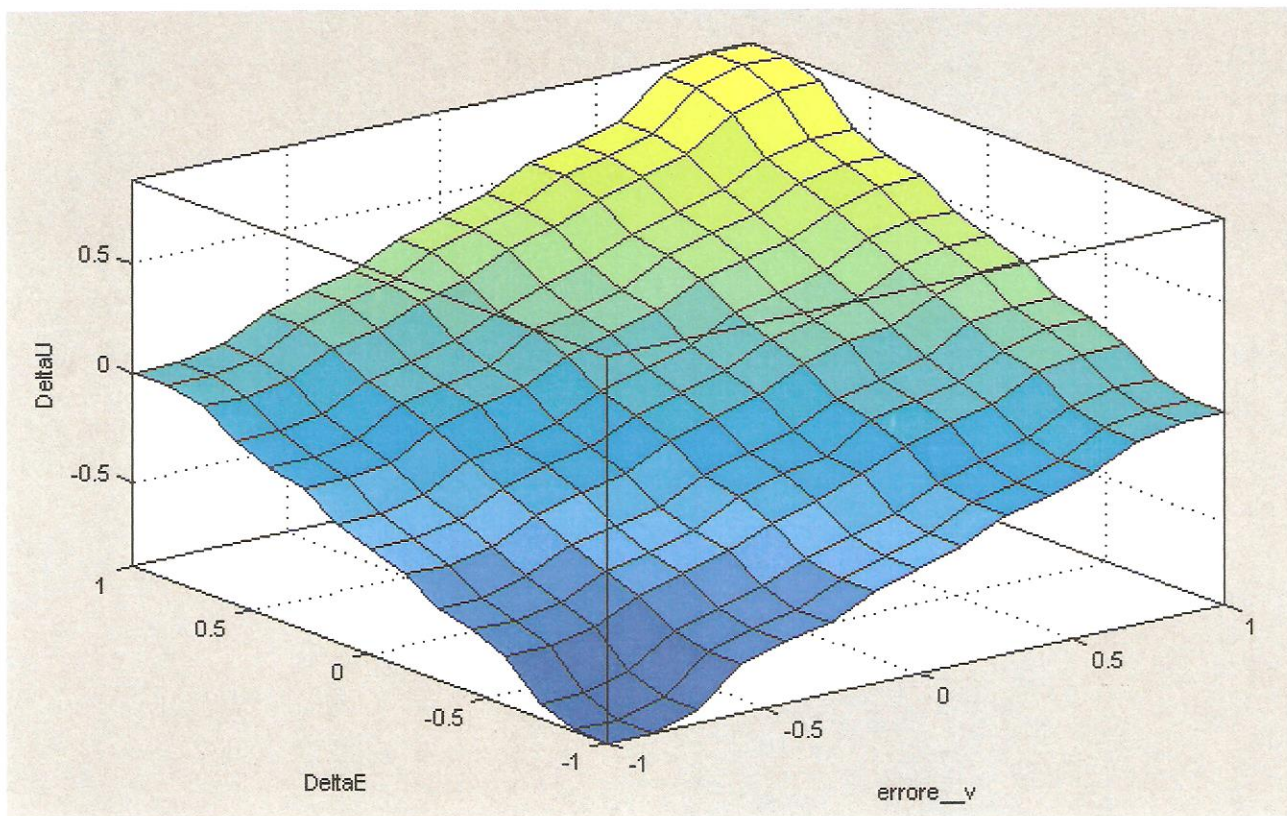
Nel caso si volesse realizzare in logica Fuzzy la struttura di un regolatore PID sarebbe particolarmente complesso definire la base delle regole, in quanto si dovrebbero considerare tre ingressi e quindi una matrice delle regole tridimensionale. Più agevole risulta sommare le due azioni di controllo calcolate separatamente da un algoritmo PD-fuzzy e da algoritmo PI-fuzzy.



Nel caso in cui si considerino le stesse regole sia per la parte PI che per quella PD, la struttura di un algoritmo PID-fuzzy può banalmente semplificarsi in quella mostrata nella figura seguente:

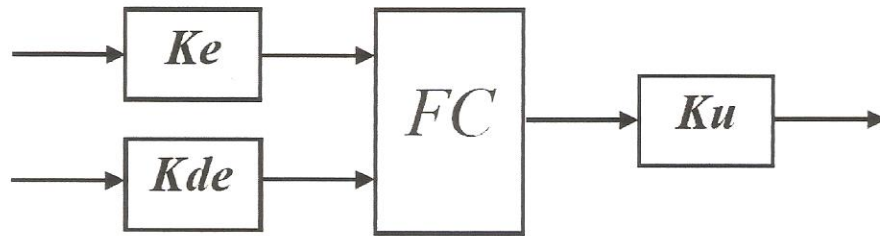


Il risultato è un regolatore fuzzy la cui caratteristica ingresso-uscita ne evidenzia il comportamento **non lineare**.

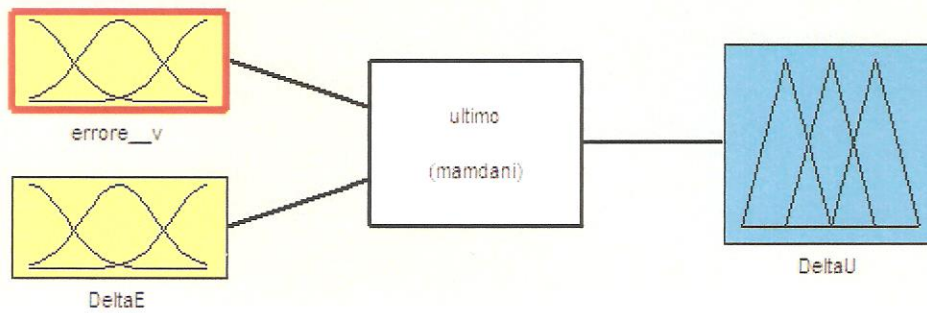


La superficie dipende dalla forma delle **membersip functions** degli ingressi e delle uscite e dalle **regole**.

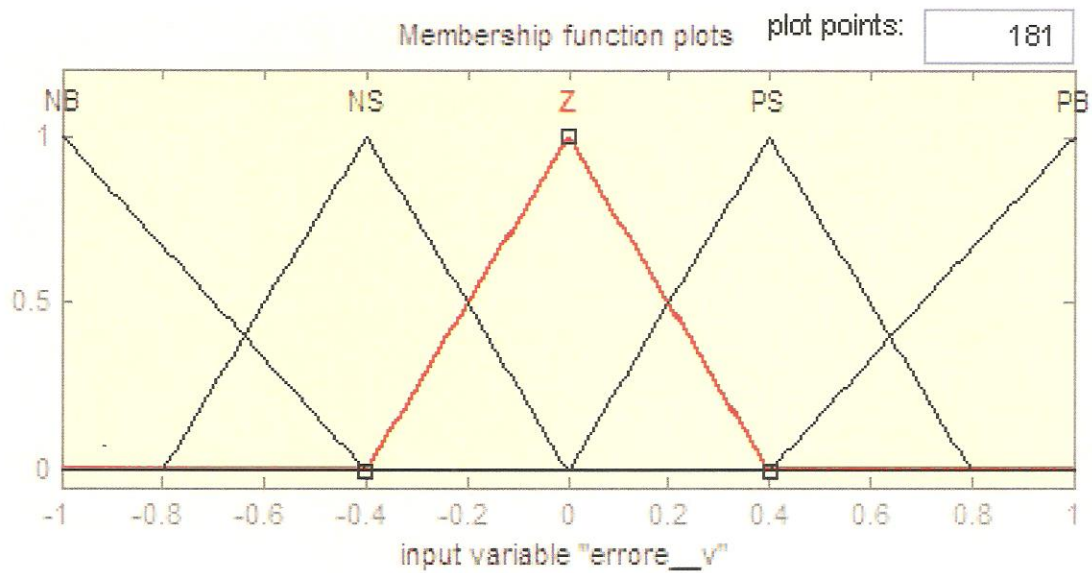
Le regole sono state riassunte nella matrice precedente, per quanto riguarda le funzioni d'appartenenza esse vengono generalmente **normalizzate**, ovvero sono comprese tra -1 e 1. E' necessario quindi scalare gli ingressi e l'uscita.



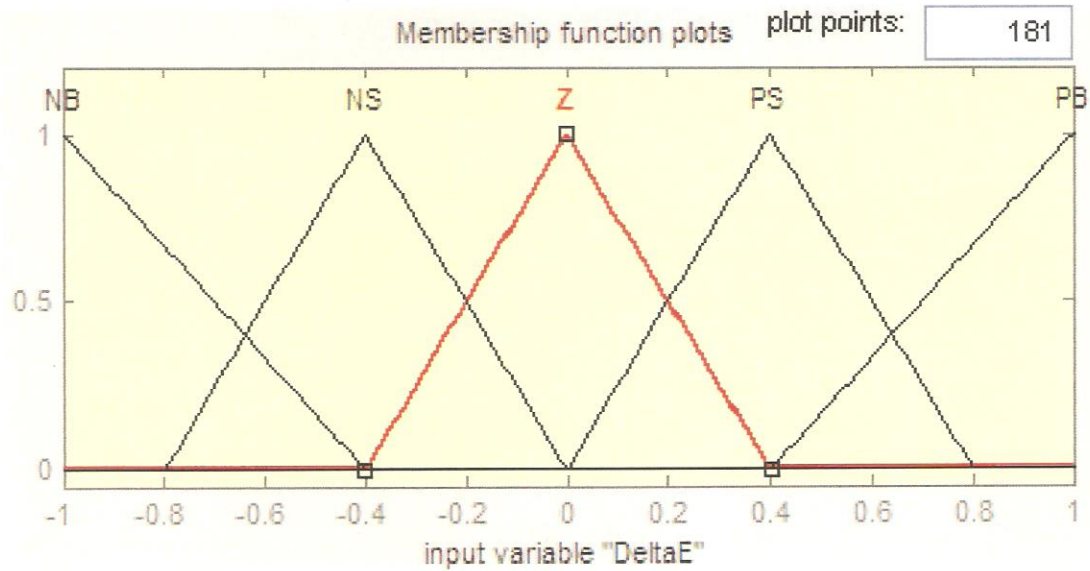
Le **MF** che sono state impiegate per gli INPUTS e l'OUTPUT sono riportate di seguito:



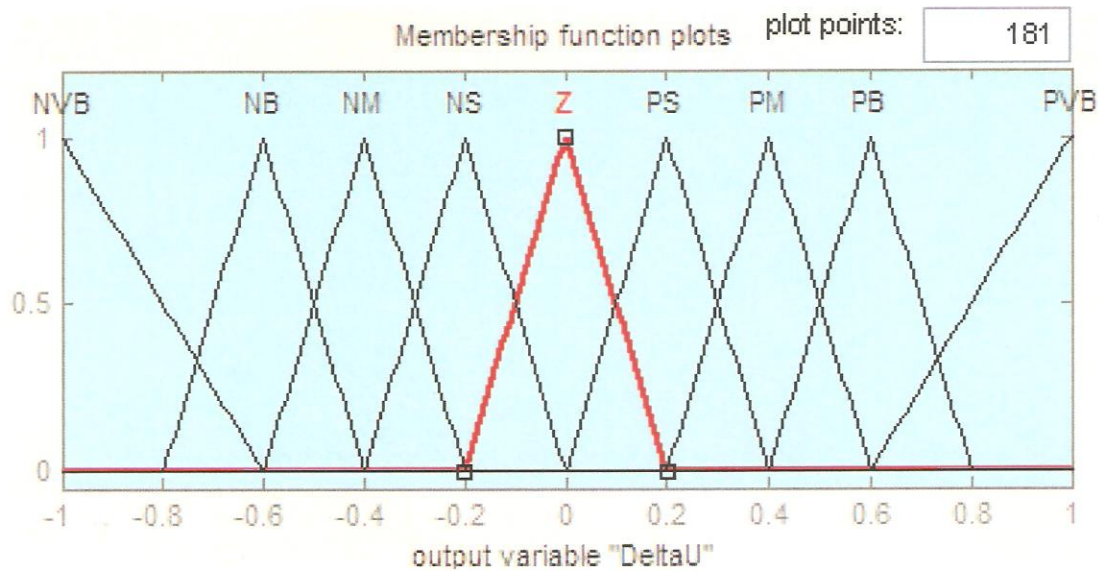
ERRORE



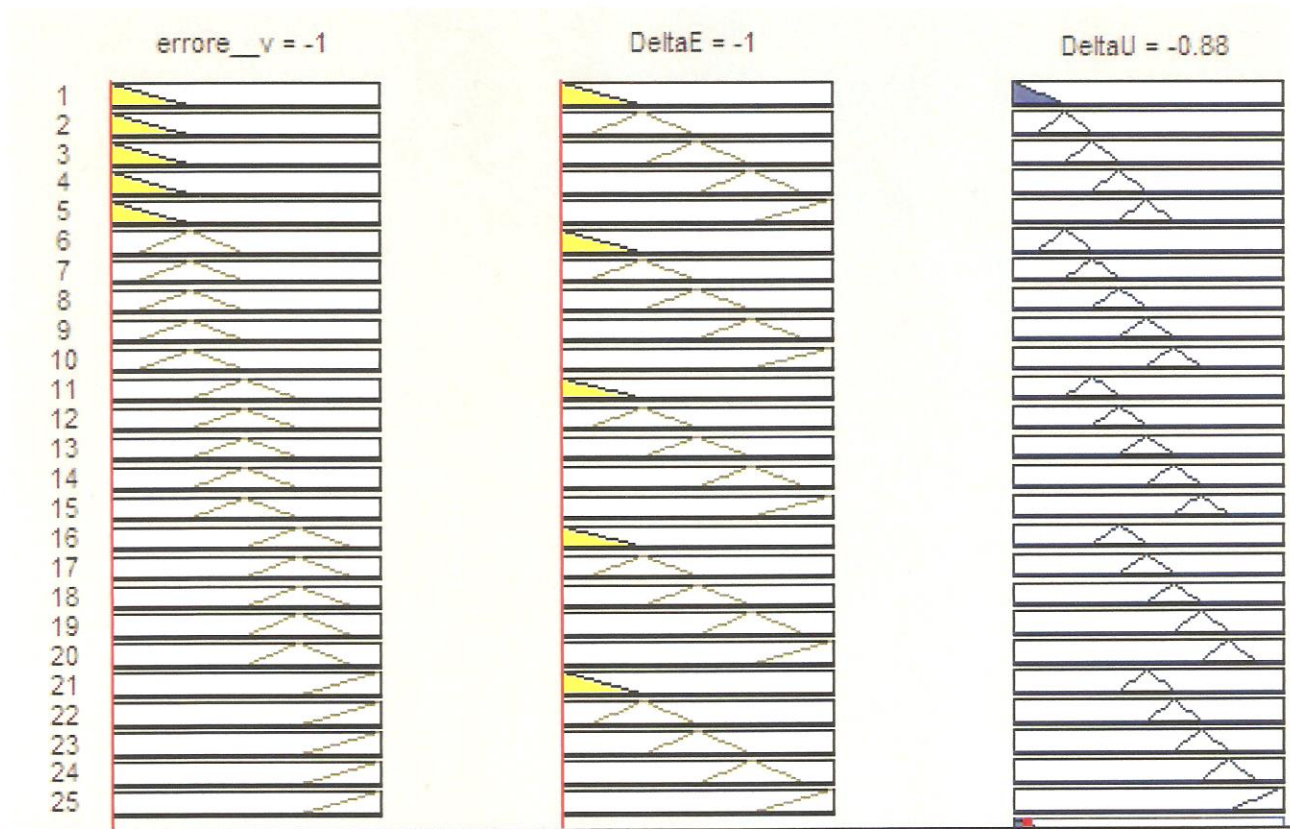
DERIVATA ERRORE



AZIONE DI CONTROLLO

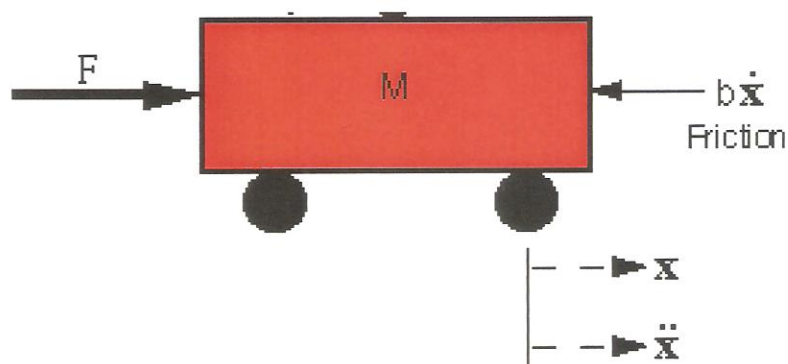


Il comportamento globale del sistema è sintetizzato attraverso la superficie descritta dal **SURFACE VIEWER**. Se desideriamo avere un'analisi puntuale del FLC possiamo utilizzare il **RULES VIEWER** che mette in evidenza le operazioni effettuate dal FLC.



2.1 L'APPLICAZIONE

Il modello preso in considerazione può essere rappresentato attraverso il seguente diagramma a corpo libero:



Applicando la seconda legge della dinamica al sistema considerato, lungo la direzione orizzontale otteniamo la seguente equazione del moto:

$$M\ddot{x} + D\dot{x} = F$$

Dove i diversi simboli rappresentano rispettivamente la **massa**, l'**attrito** e la **forza applicata**.

Per semplicità considereremo il caso in cui il tragitto percorso dal mezzo **non presenti alcuna pendenza**, pertanto la forza normale è compensata da quella di gravità.

Per quanto riguarda la **funzione di trasferimento** che descrive la relazione ingresso-uscita del processo, è ottenuta trasformando secondo Laplace:

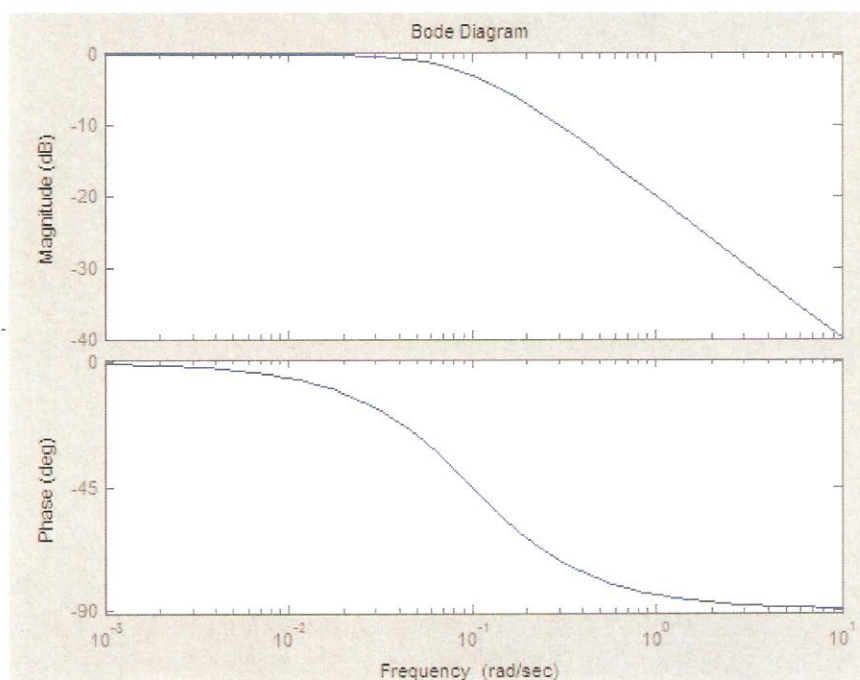
$$MX(s)s^2 + DX(s)s = F(s)$$

$$X(s)s(Ms + D) = F(s)$$

$$\frac{X(s)s}{F(s)} = \frac{1}{Ms + D}$$

Abbiamo quindi in ingresso la forza che agisce sul processo ed in uscita la velocità. Abbiamo un sistema del primo ordine caratterizzato da un polo a parte reale negativa posizionato in $p = -D/M$, pertanto il sistema risulta asintoticamente stabile.

Considerando $M = 10$ e $D = 1$. Abbiamo i seguenti diagrammi del modulo e della fase.



Per quanto riguarda il **coefficiente d'attrito** che è una grandezza dimensionale, abbiamo che acciaio su acciaio è:

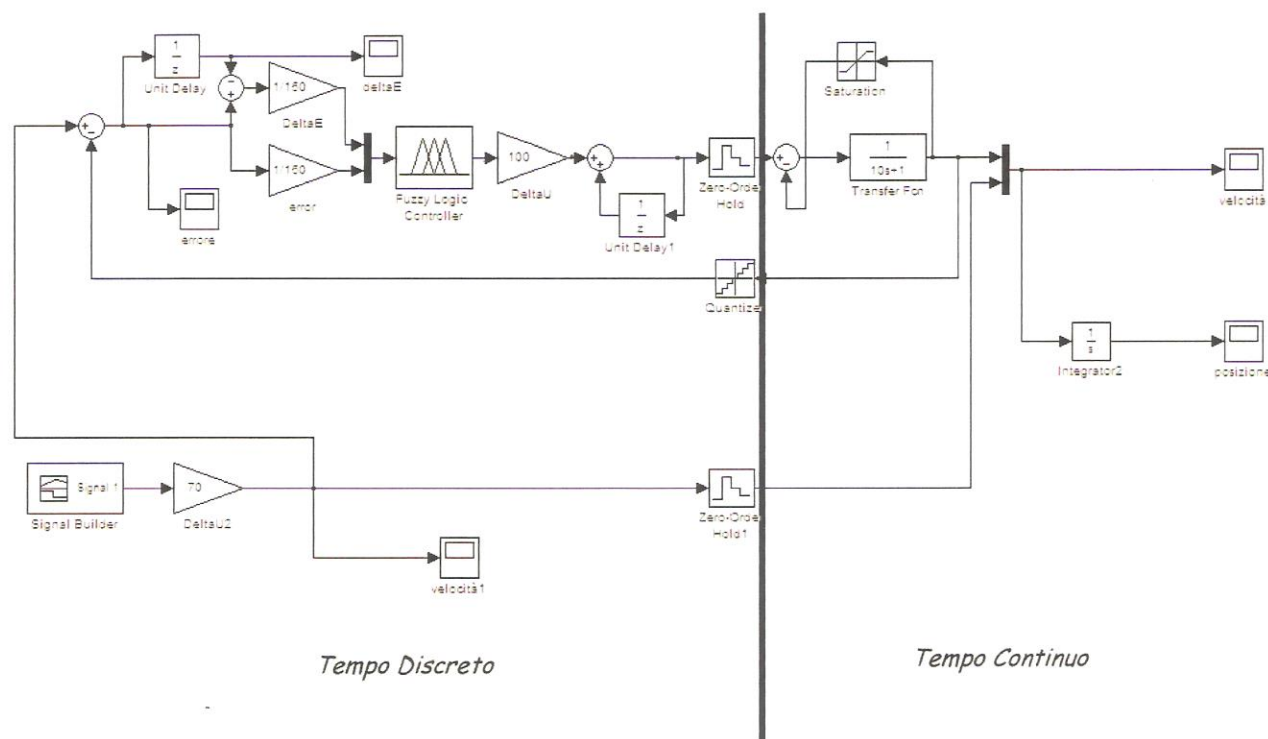
Acciaio-Acciaio .. Attrito statico : 0.78 Attrito dinamico : 0.4

Nella costruzione della **Matrice Sperimentale** faremo variare il suo valore tra [0.6 1].

Mentre per quanto riguarda la **Massa** la faremo variare tra: [10 20]

2.2 SIMULAZIONE

Per la parte relativa alla simulazione si è utilizzato Simulink. Lo schema a blocchi viene riportato di seguito:

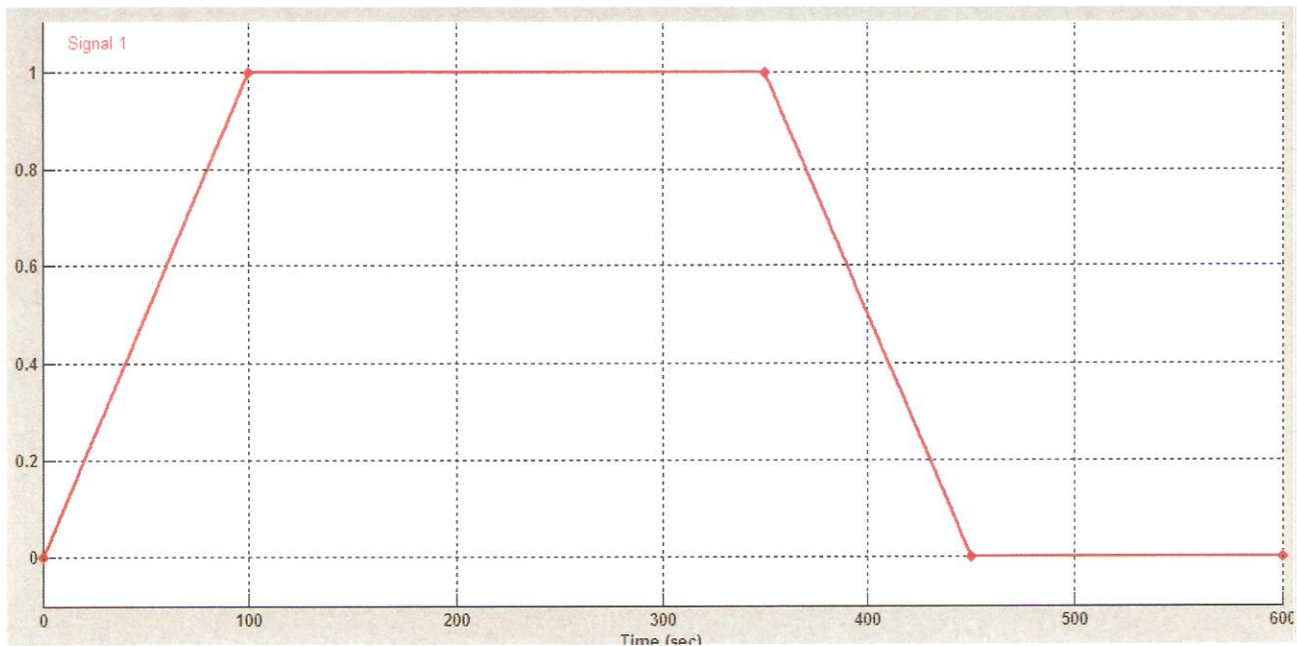


Come tempo di campionamento per la simulazione è stato impostato considerando la banda passante del processo da controllare, che ricordo dipende dal polo della funzione di trasferimento che risulta funzione della Massa e del coefficiente d'attrito.

Per le nostre simulazioni è stato impostato come tempo di campionamento **Tc = 0.1 secondi**

Per quanto riguarda il profilo della velocità, ha un andamento trapezoidale.

PROFILO DI VELOCITA'



Il riferimento è stato costruito utilizzando il blockset Signal Builder di Simulink ed impostando come simulation sampling time 0.1 secondi.

Dal diagramma si osserva che nei primi 100 secondi della simulazione si ha una fase di accelerazione che porta il sistema ad una velocità di crociera che viene mantenuta per 250 secondi, in fine si osserva una fase di decelerazione di durata 100 secondi.

ACCELERAZIONE: 0 – 100 secondi

VELOCITA' COSTANTE: 100 – 350 secondi

DECELERAZIONE : 350 – 450 secondi

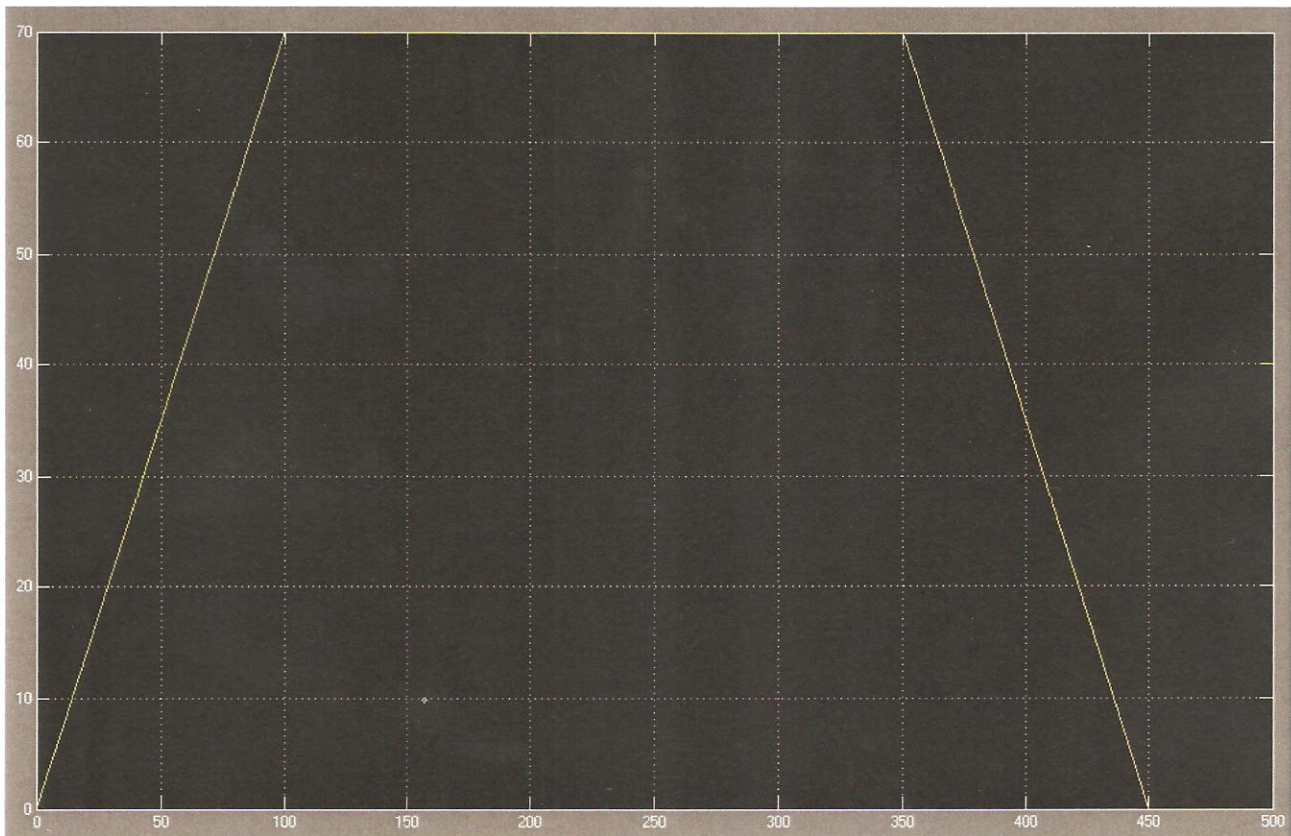
Pertanto il nostro controllore deve essere in grado di inseguire il riferimento nel miglior modo possibile, senza avere sovraelongazioni e possibilmente arrestare il mezzo secondo la legge oraria specificata.

Nella simulazione è stato scelto come valore di velocità di regime

VELOCITA' DI CROCIERA: 70 km/h

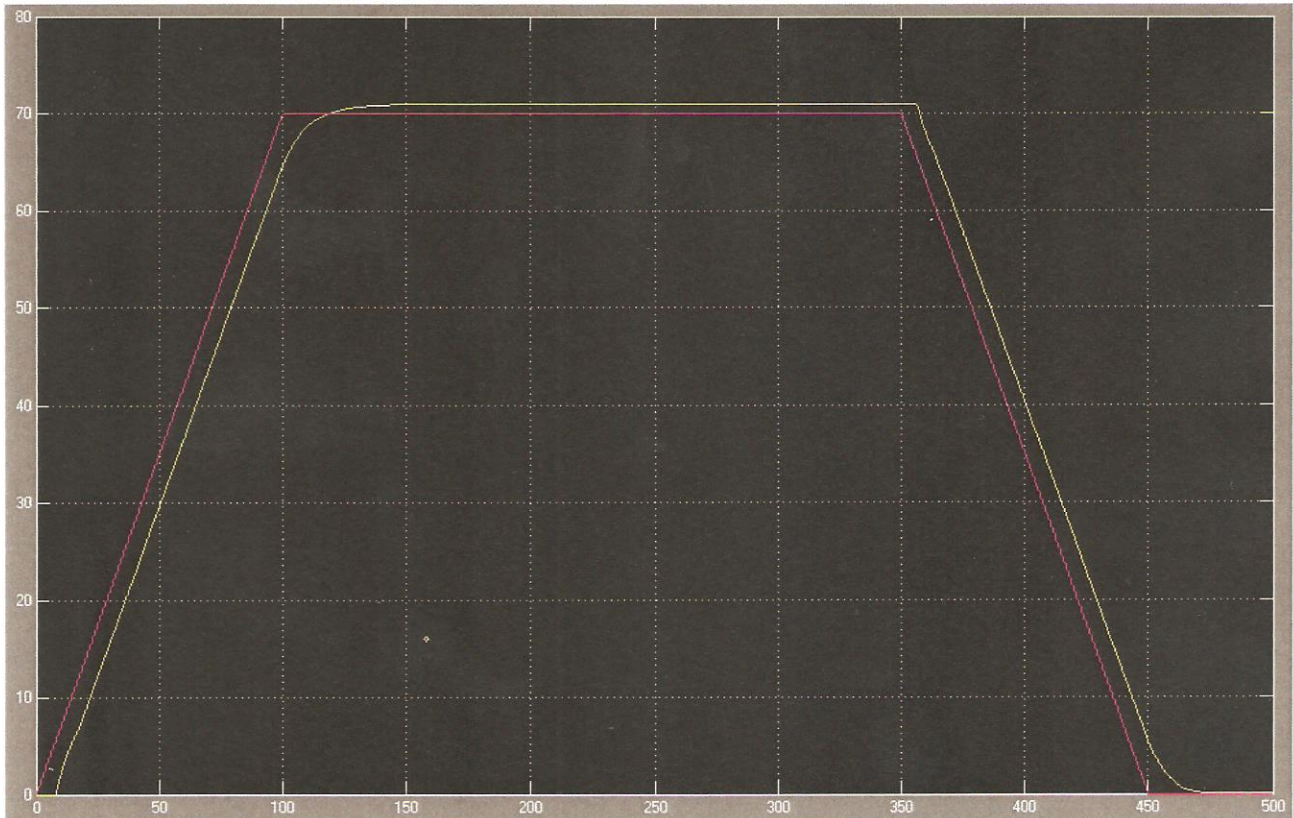
Di seguito viene riportato il profilo specificato.

PROFILO DI VELOCITA'

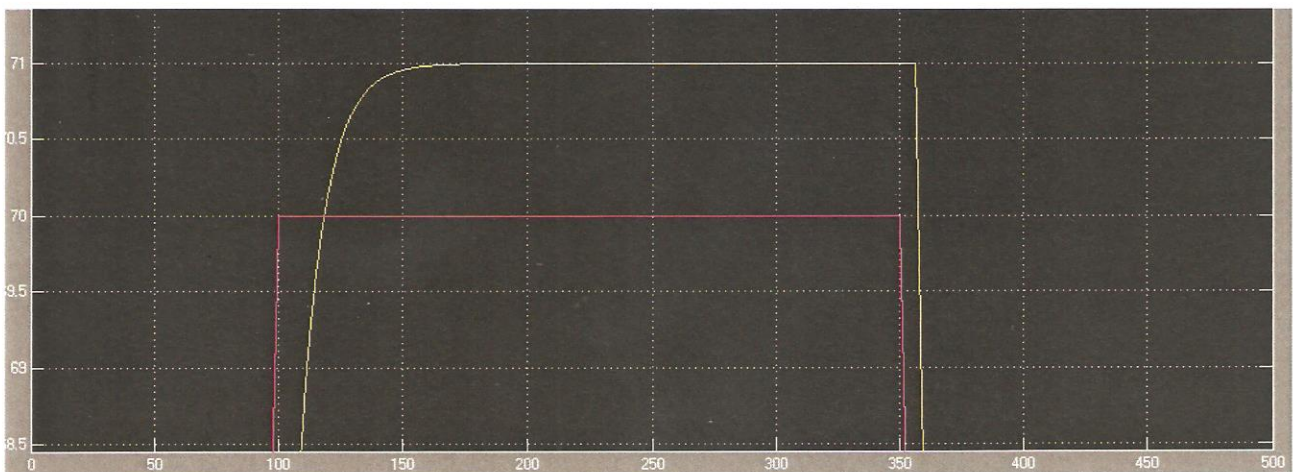


Analizziamo l'andamento della velocità e della posizione per i seguenti valori della Matrice sperimentale relativi ai due parametri che caratterizzano il sistema in oggetto.

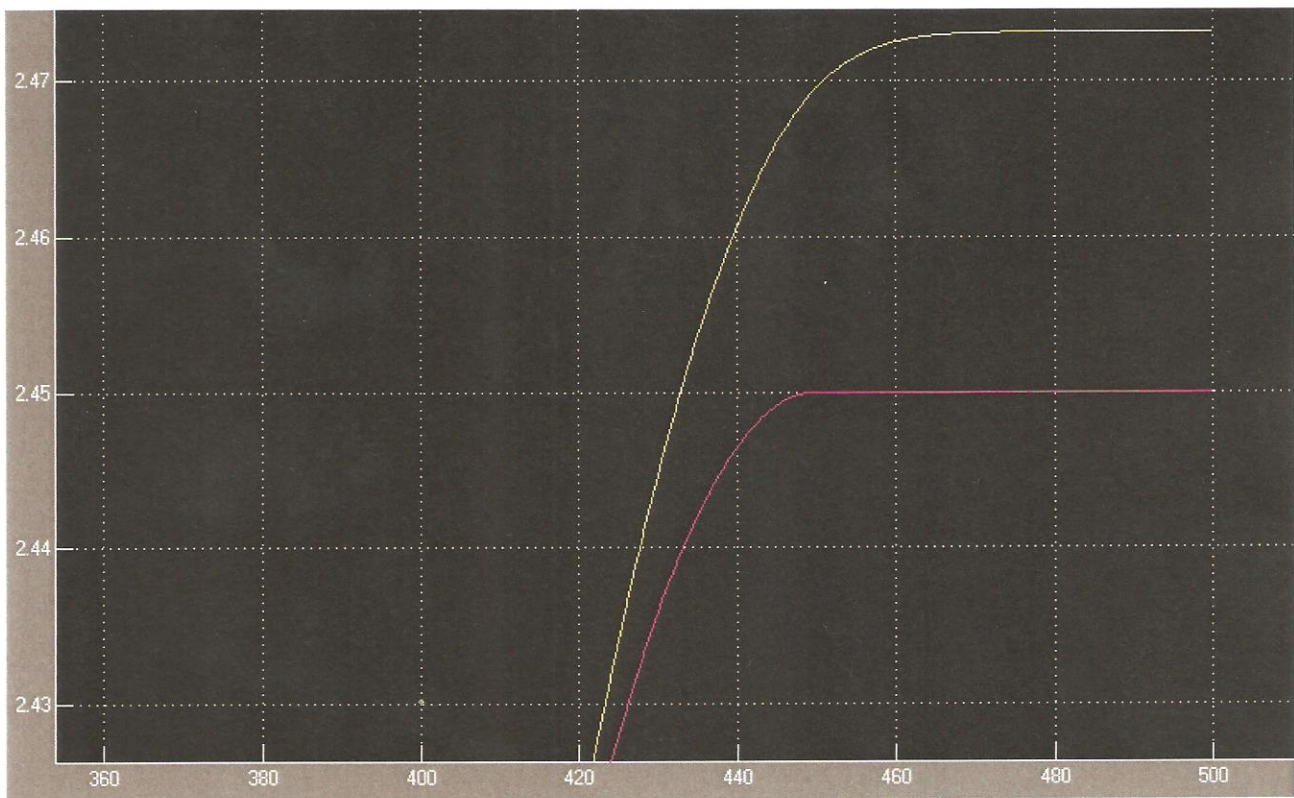
$$P(s) = \frac{1}{10s + 1}$$



Abbiamo un comportamento abbastanza soddisfacente, tuttavia osserviamo che abbiamo un errore di velocità di crociera comunque non eccessivo.



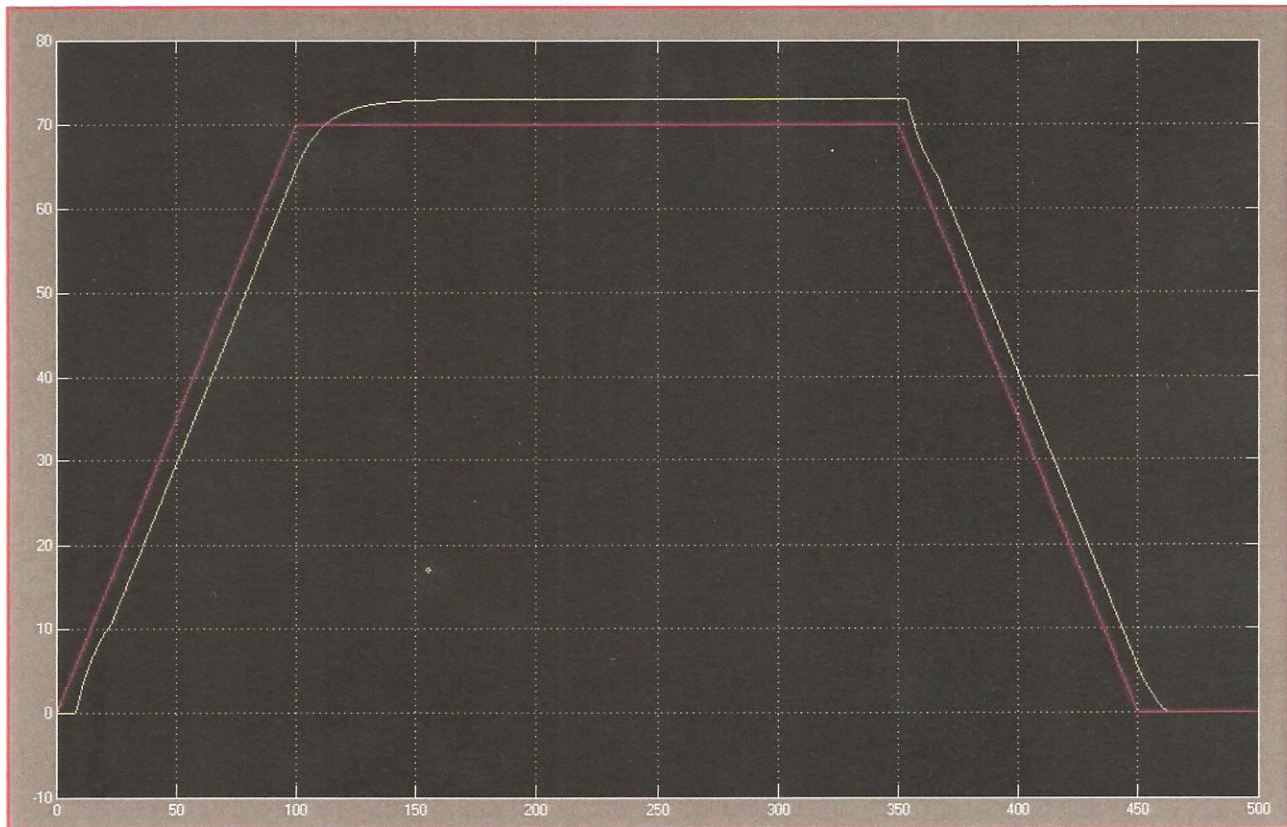
Per quanto riguarda la posizione



Vediamo che il treno si arresta dopo e non esattamente la posizione indicata, comunque l'errore è marginale.

$$P(s) = \frac{1}{12s + 1}$$

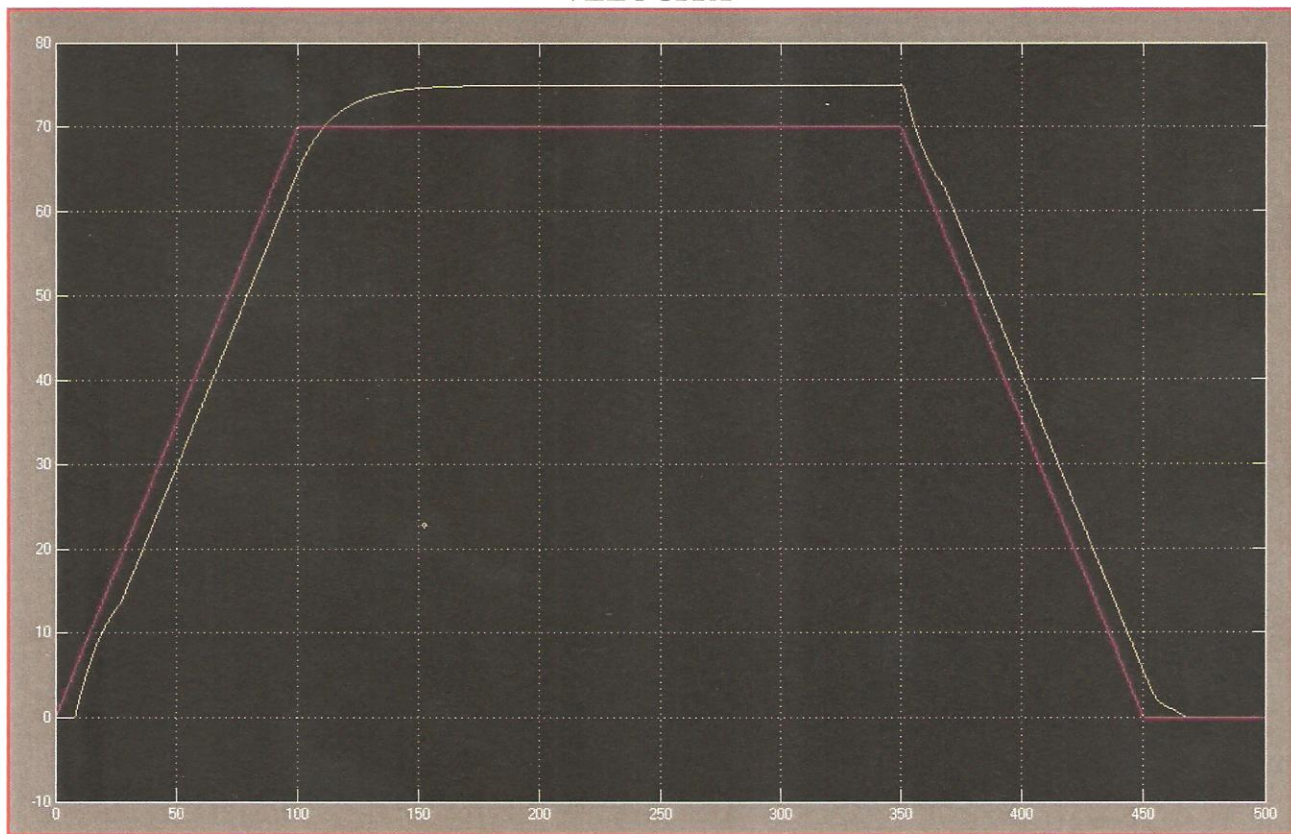
VELOCITA'



Aumentando di poco la massa non si osservano sostanziali differenze nell'inseguimento della velocità specificata. (velocità raggiunta 72)

$$P(s) = \frac{1}{15s + 1}$$

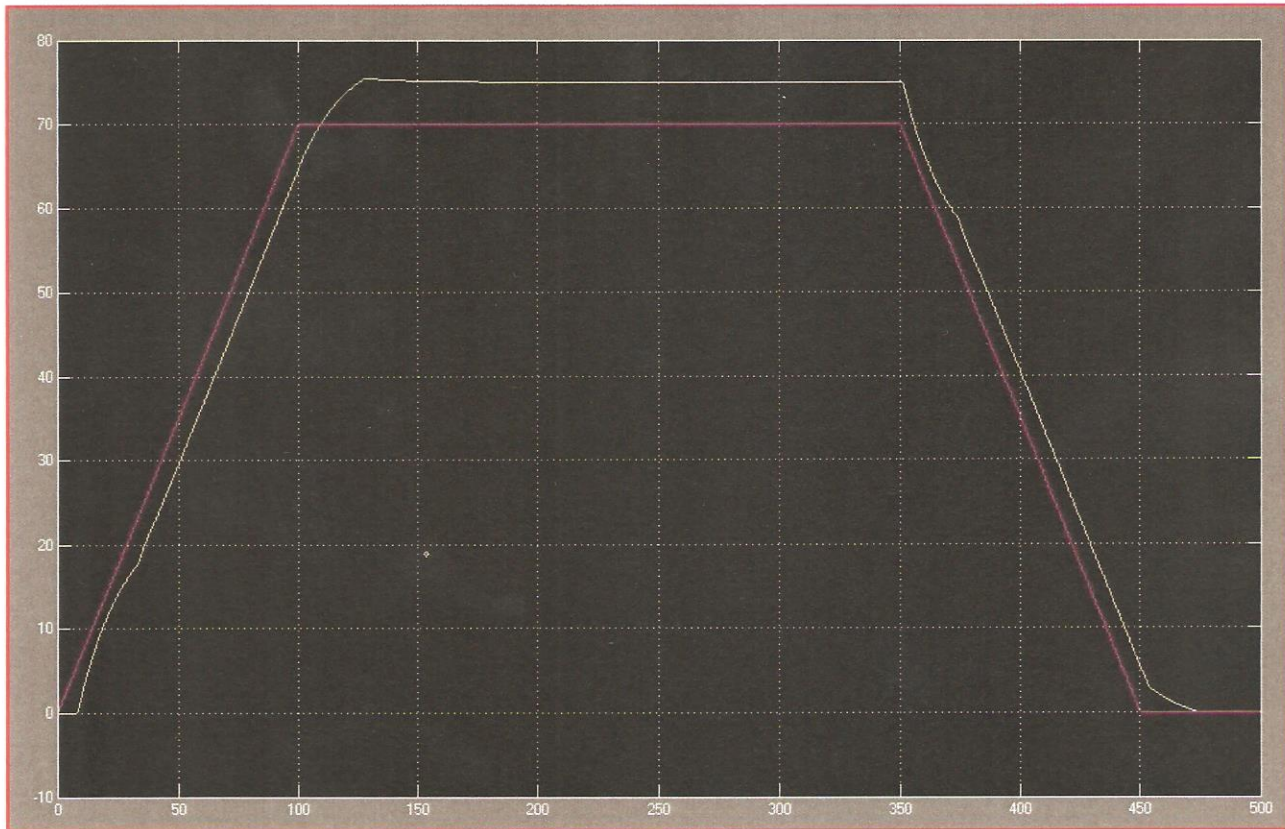
VELOCITA'



In questo caso osserviamo un errore di velocità maggiore (velocità raggiunta 75), inoltre la variazione della massa a parità di attrito comporta un maggiore ritardo nel raggiungimento della velocità di crociera. Per quanto riguarda la fase di decelerazione si avverte una frenata più brusca nella fase iniziale dovuta ad una velocità maggiore.

$$P(s) = \frac{1}{20s + 1}$$

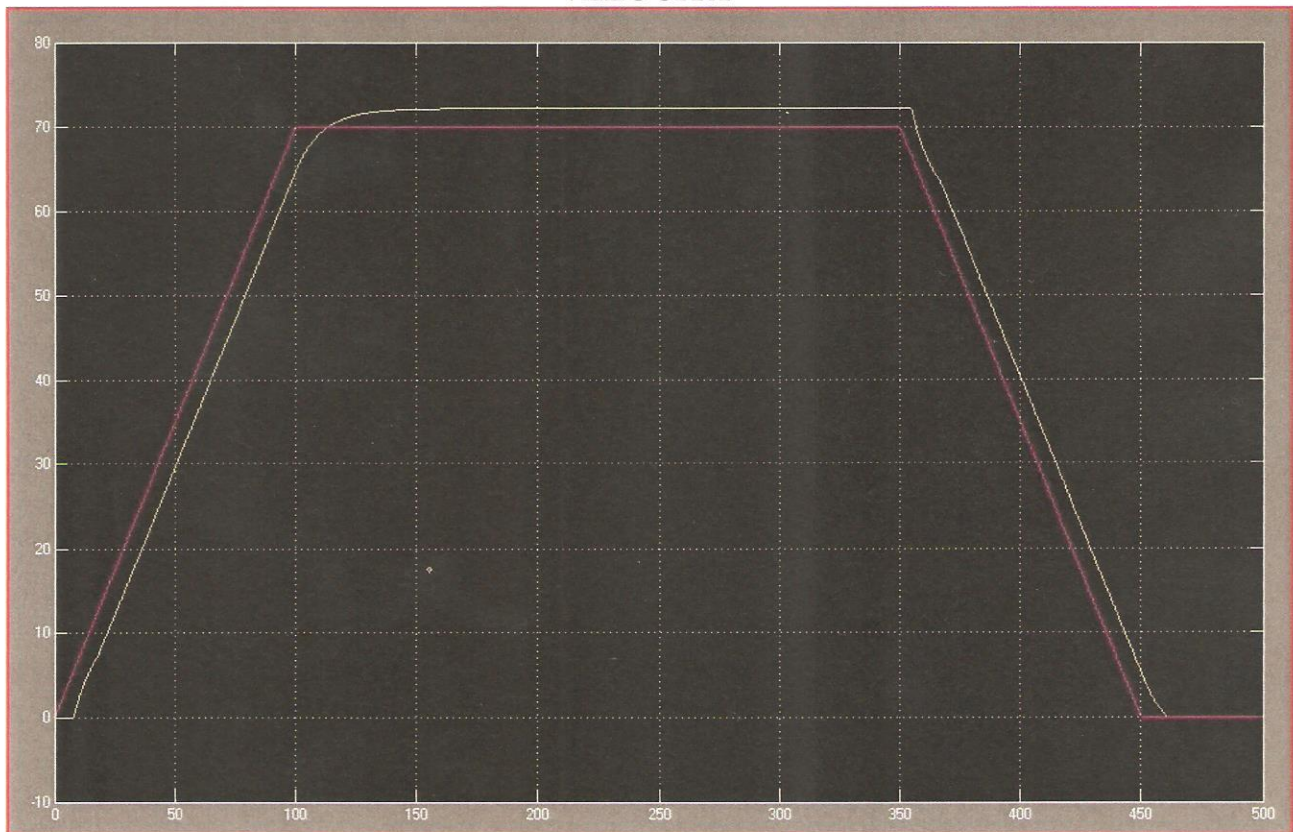
VELOCITA'



Come nel caso precedente si nota come il sistema impieghi maggior tempo nell'inseguire il profilo di velocità specificato, nella fase di accelerazione, velocità di crociera e decelerazione. Inoltre l'aumento eccessivo della massa a parità di attrito comporta oltre che ad un maggiore errore di velocità (velocità massima raggiunta 75) anche una sovraelongazione.

$$P(s) = \frac{1}{10s + 0.9}$$

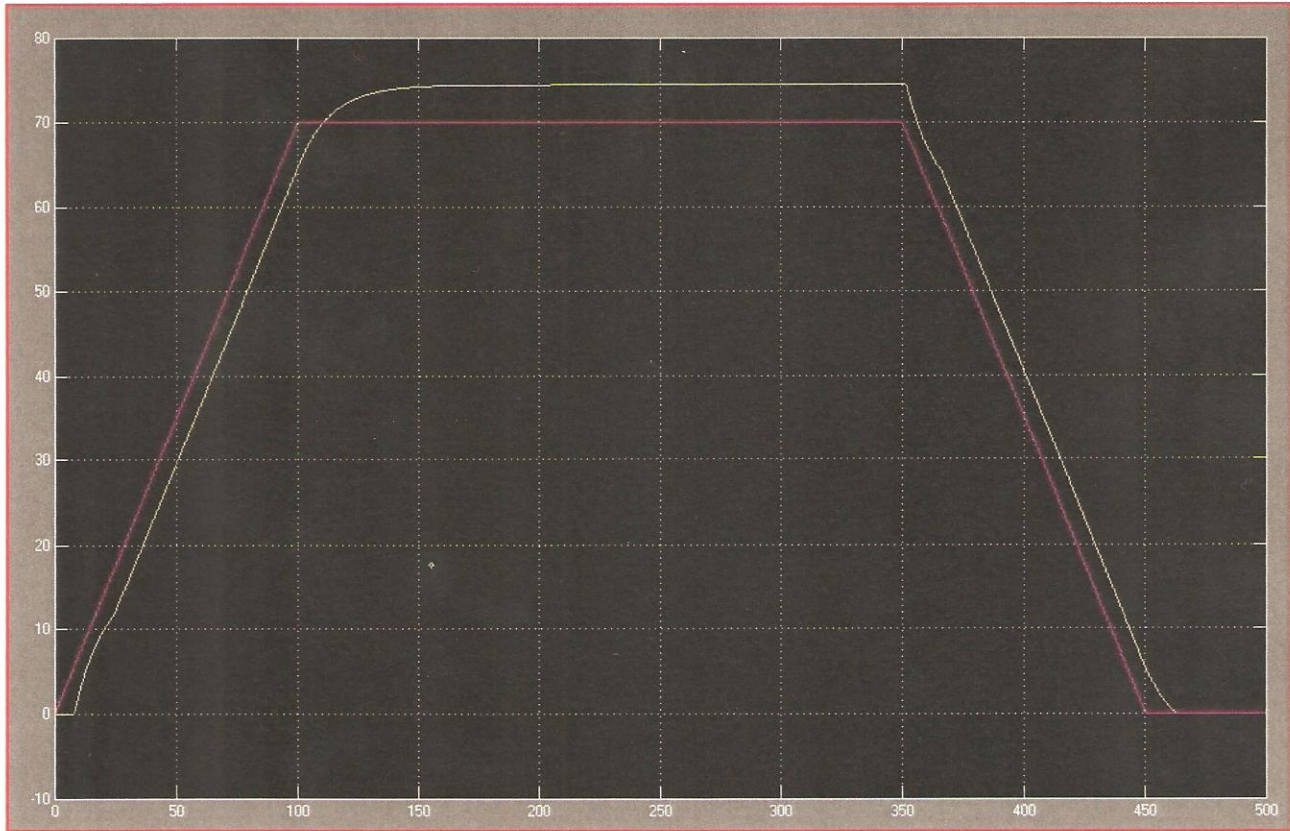
VELOCITA'



Andiamo ora ad osservare come influisce l'attrito sul comportamento dinamico del sistema. La presenza di un minore attrito a parità di massa consente di raggiungere la velocità di crociera in minor tempo, inoltre osserveremo che nella fase iniziale si avverte una maggiore accelerazione.

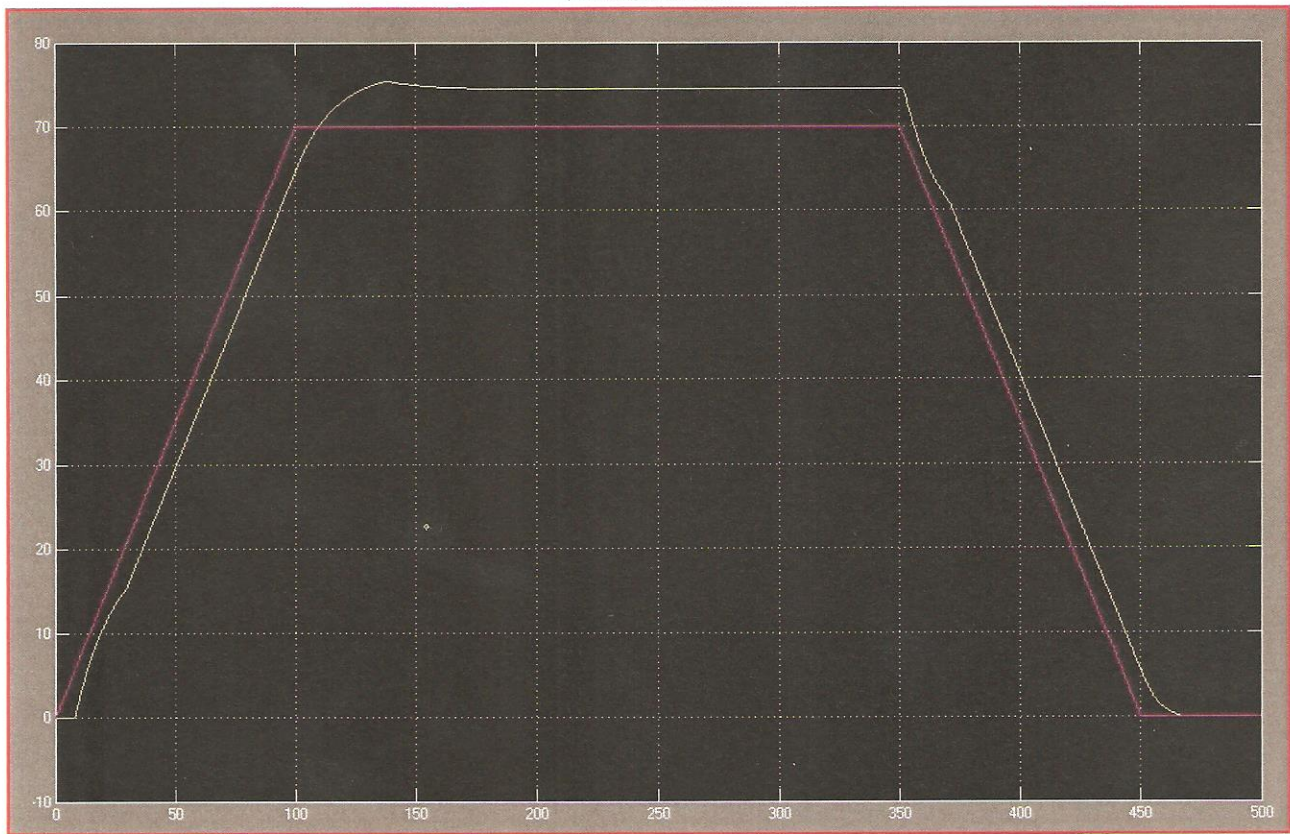
$$P(s) = \frac{1}{12s + 0.9}$$

VELOCITA'



$$P(s) = \frac{1}{15s + 0.9}$$

VELOCITA'

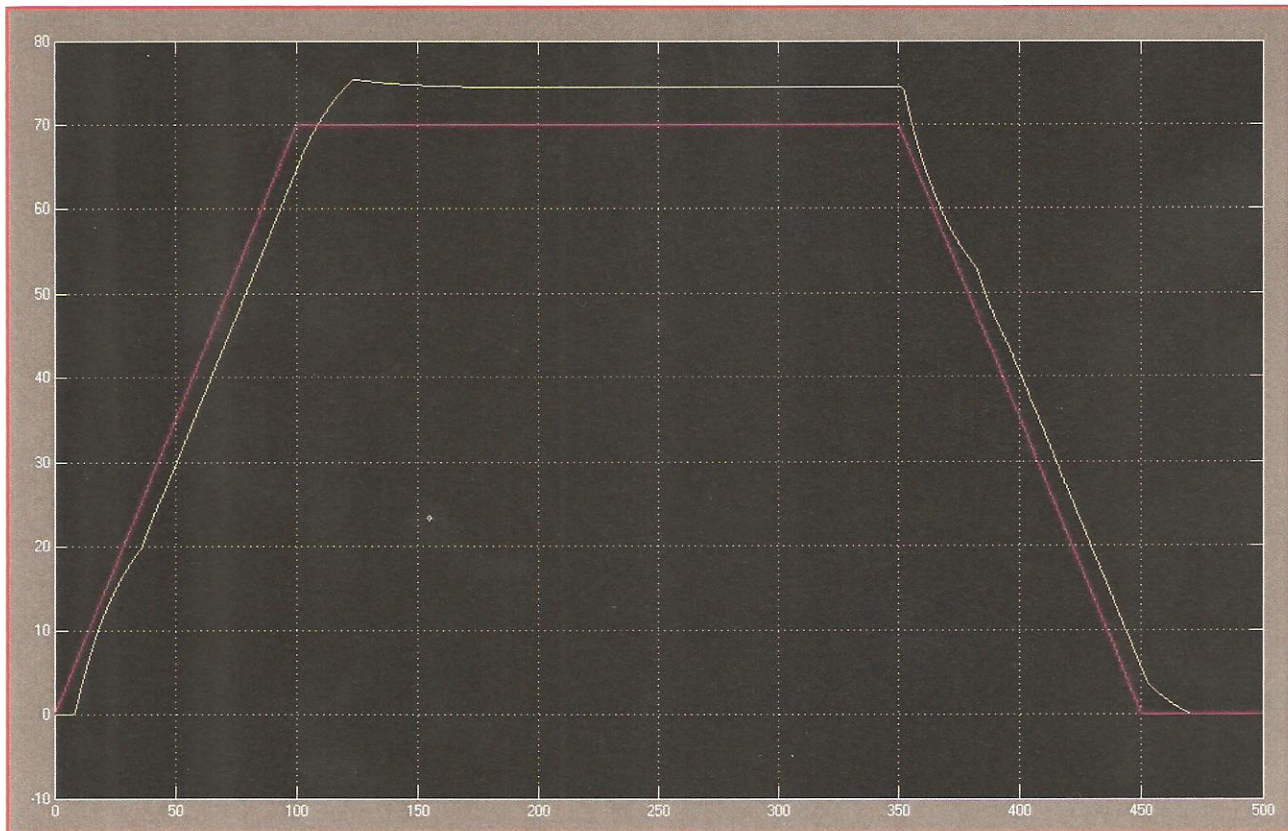


E' interessante osservare come in questo caso si avverta una sovraelongazione che non era presente nel caso del coefficiente d'attrito pari a 1.

$$P(s) = \frac{1}{20s + 0.9}$$

$$M=20 \quad D=0,9$$

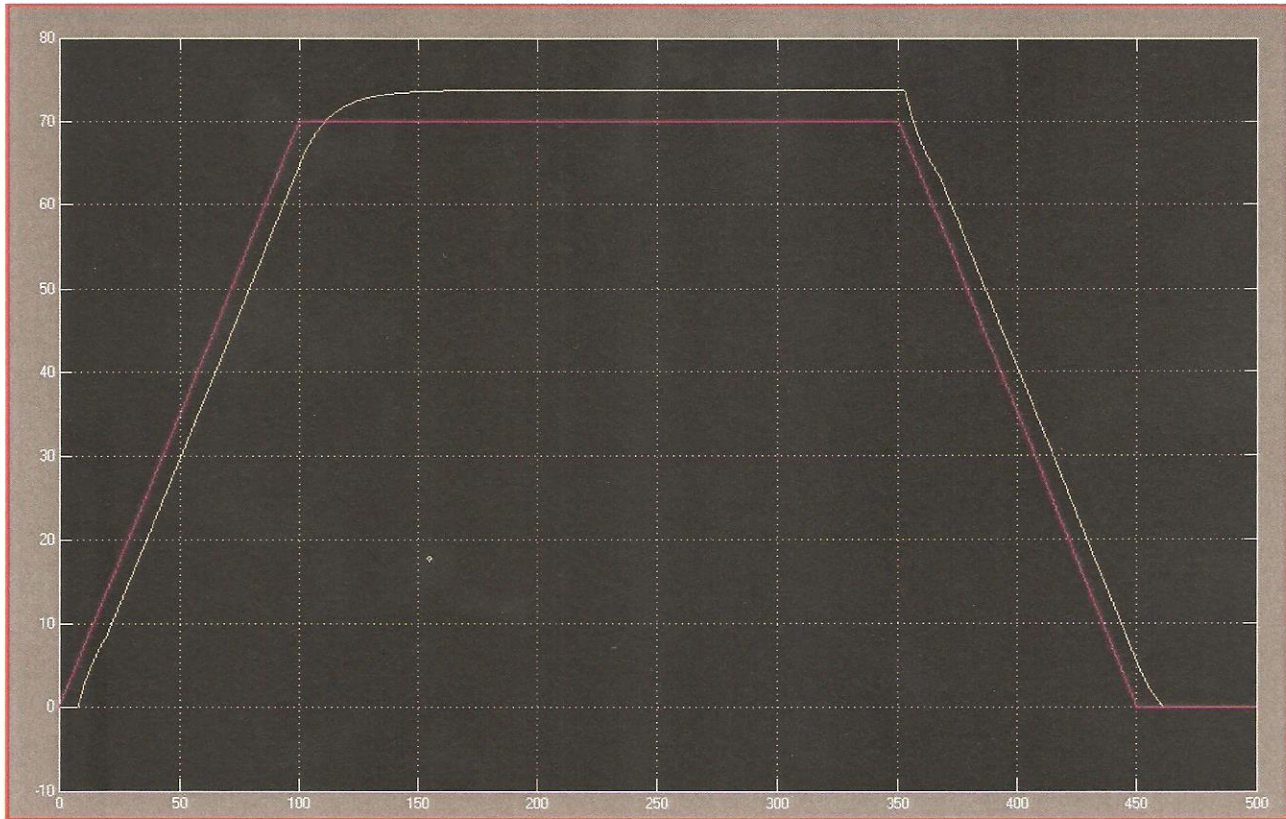
VELOCITA'



In questo caso estremo osserviamo a differenza della simulazione con coefficiente d'attrito unitario delle maggiori accelerazioni e decelerazioni.

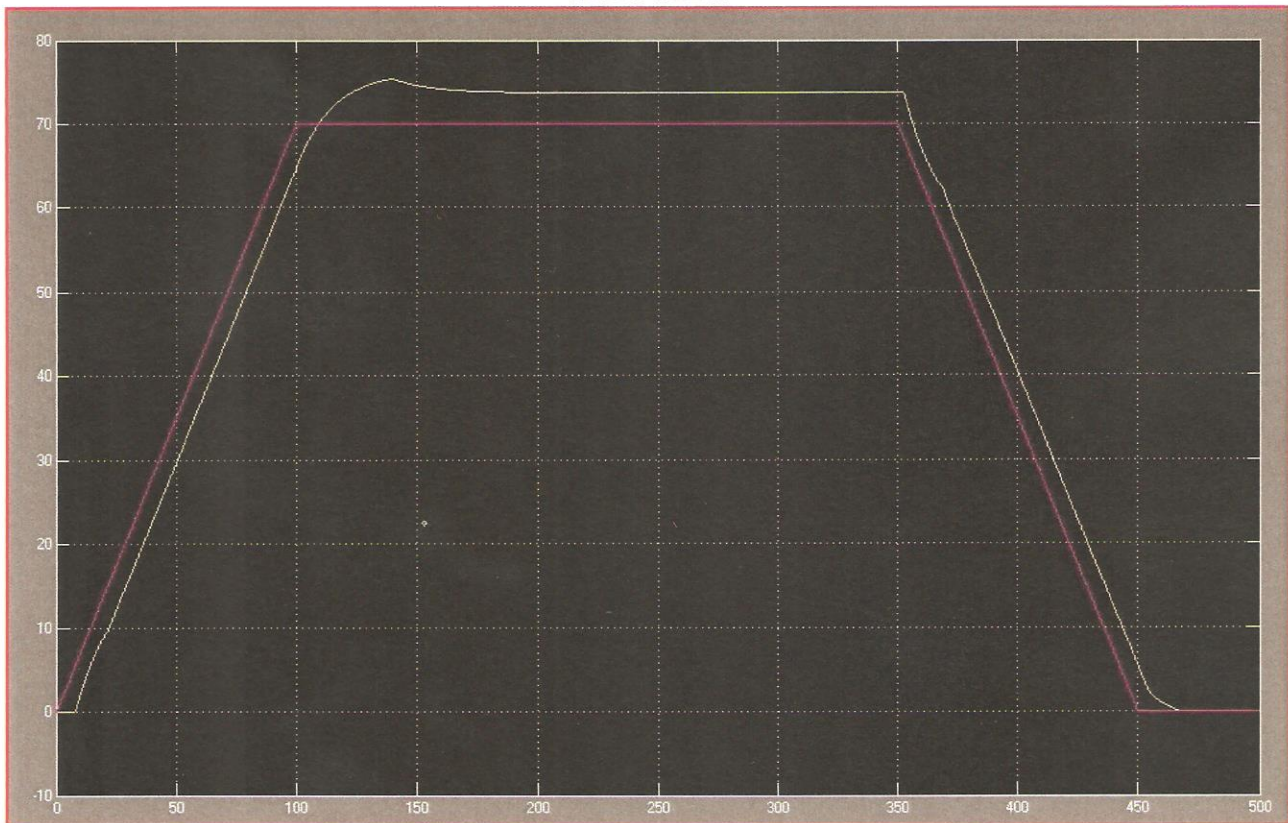
$$P(s) = \frac{1}{10s + 0.8}$$

VELOCITA'



$$P(s) = \frac{1}{12s + 0.8}$$

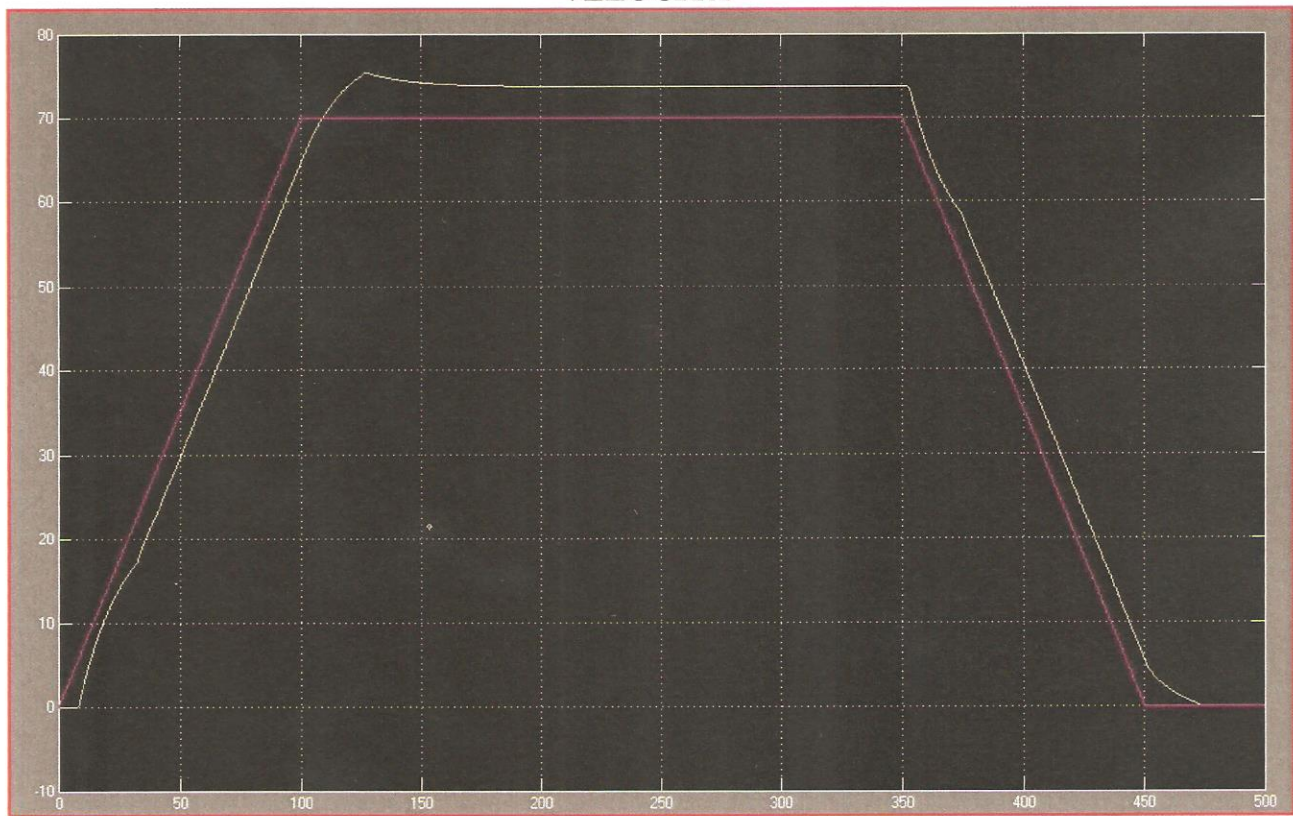
VELOCITA'



Come era da aspettarsi abbiamo che il sistema presenta una sovralongazione con valori più bassi della massa semplicemente diminuendo l'attrito .

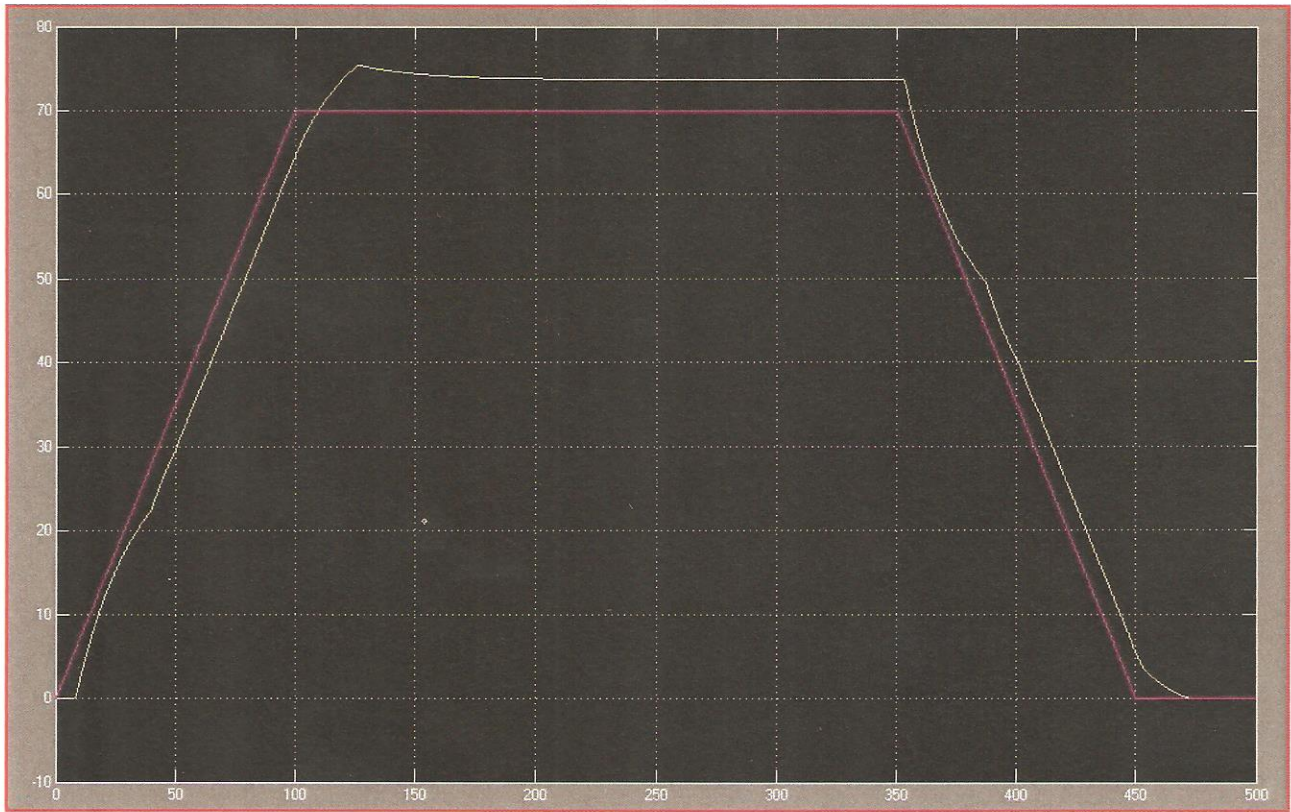
$$P(s) = \frac{1}{15s + 0.8}$$

VELOCITA'



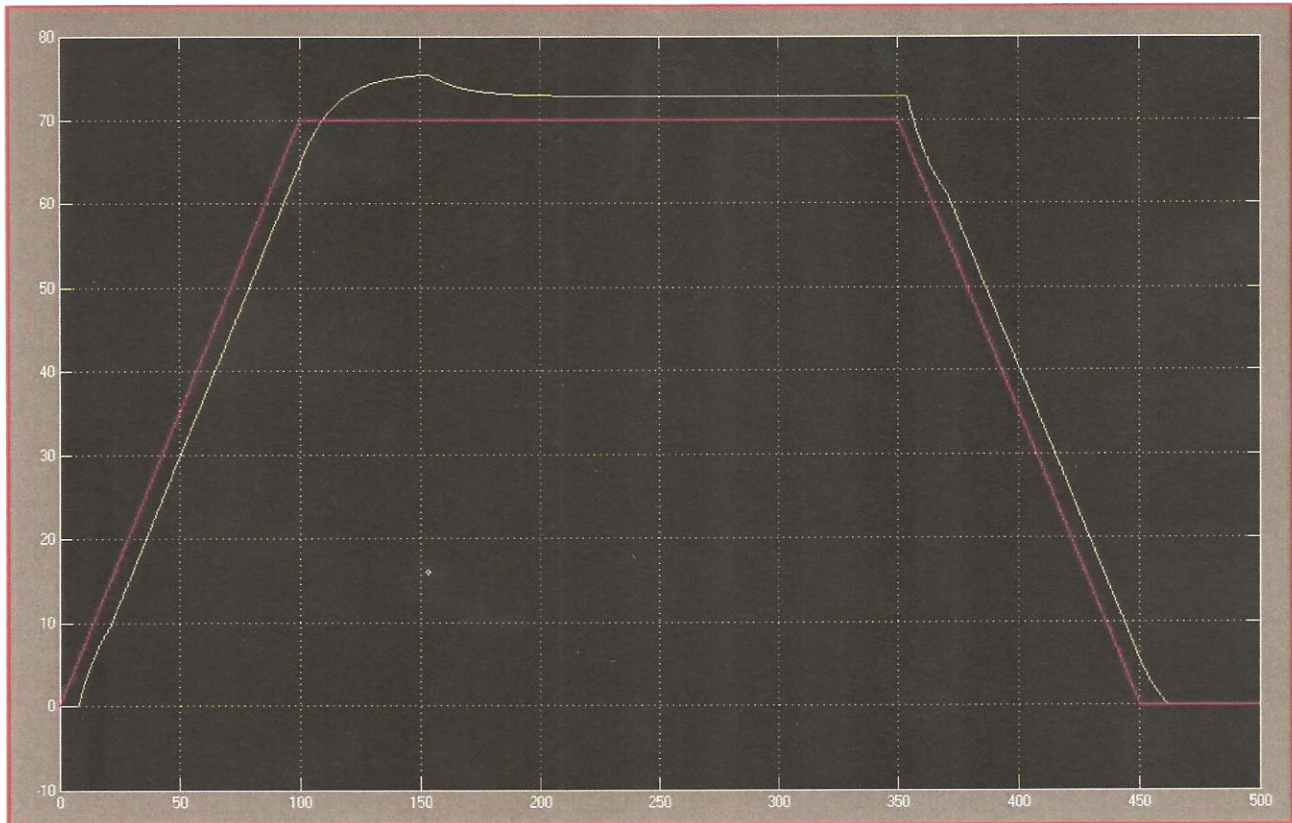
$$P(s) = \frac{1}{20s + 0.8}$$

VELOCITA'



$$P(s) = \frac{1}{10s + 0.7}$$

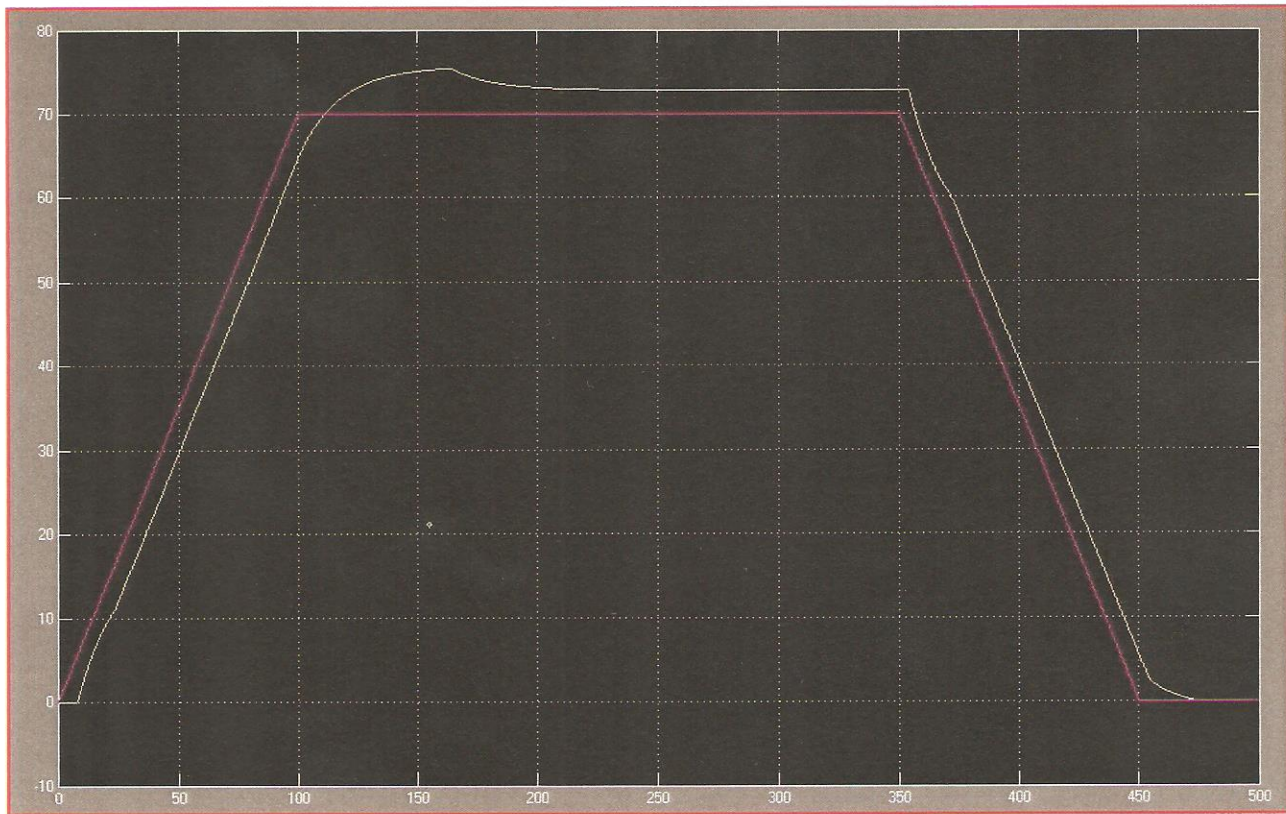
VELOCITA'



Già in questo caso osserviamo una sovraelongazione con $M = 10$.

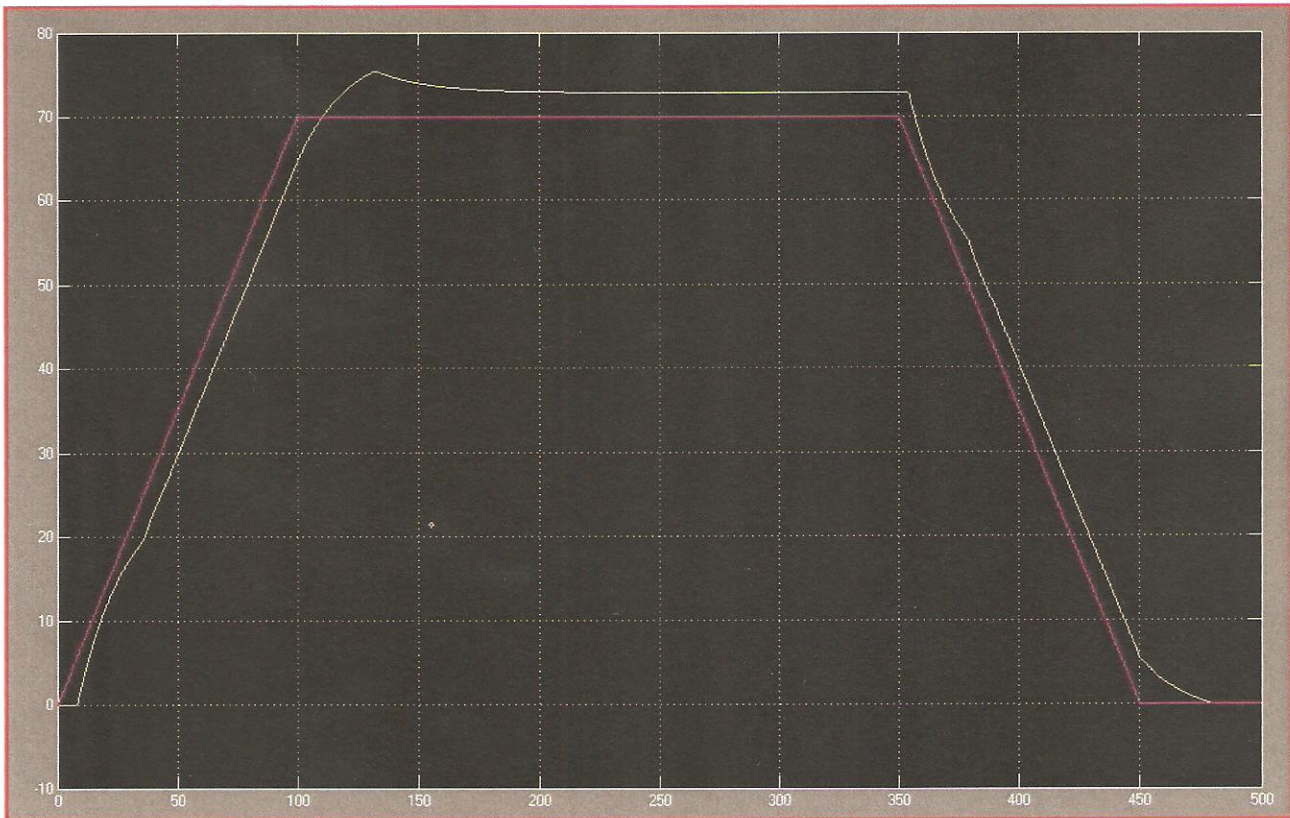
$$P(s) = \frac{1}{12s + 0.7}$$

VELOCITA'



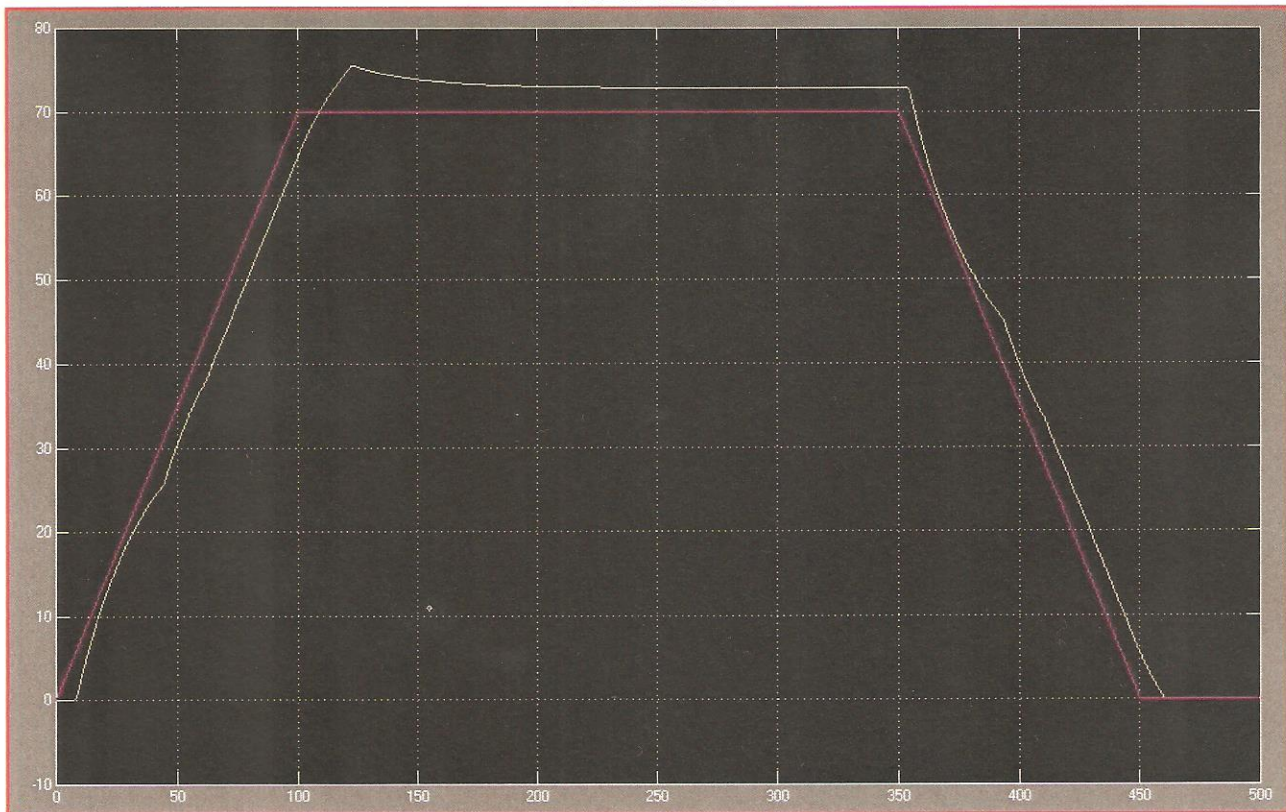
$$P(s) = \frac{1}{15s + 0.7}$$

VELOCITA'



$$P(s) = \frac{1}{20s + 0.7}$$

VELOCITA'



In conclusione possiamo dire che il sistema a parità del valore unitario del coefficiente d'attrito non risente molto delle variazioni parametriche della massa; (Ovviamente le considerazioni fatte valgono per i valori scelti per le simulazioni). Mentre facendo variare di un decimo l'attrito il comportamento del sistema ne risente parecchio.

