



WWW.FUTURESOFTWARE.IT

PROGETTO DEL LEVITATORE MAGNETICO



Inizio progetto	12-12-2006
Fine progetto	08-03-2007
Versione software	2.0
Versione relazione	2.0
Dati aggiuntivi	Filmati esperimenti

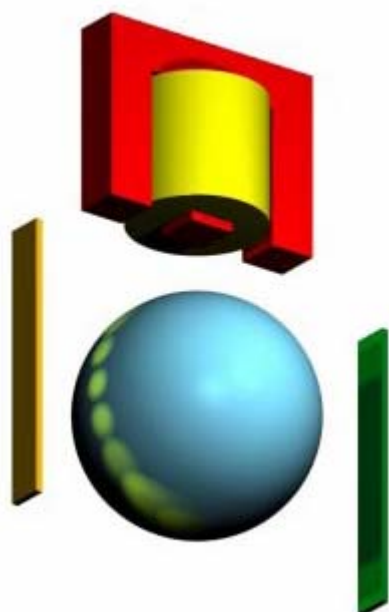
1. Documentazione

Il seguente documento descrive le varie fasi eseguite per lo sviluppo in ambiente matlab del progetto del levitatore magnetico e riporta alcuni commenti e considerazioni sui risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate sempre in ambiente matlab. Per testare le basi teoriche utilizzate per l'analisi e lo sviluppo del levigatore si è implementato un modello pratico che mostra gli effetti della levitazione magnetica (senza controlli e retroazioni).

2. Il progetto da sviluppare

L'obiettivo del progetto è quello di sviluppare un modello del levitatore magnetico in ambiente matlab utilizzando 'simulink' toolbox e alcune funzioni del 'control system' toolbox, modificare i parametri della simulazione per valutare il comportamento del modello ed evidenziare i risultati più significativi. E' stato costruito praticamente un dispositivo in grado di simulare l'effetto della levitazione magnetica basata sull'effetto Meissner e dei superconduttori.

3. Il levitatore magnetico



La possibilità di sfidare la gravità sospendendo senza contatto o facendo levitare oggetti ha da sempre affascinato la fantasia dell'uomo. Nel secolo scorso la scoperta dei fenomeni elettromagnetici ha aperto nuove strade molti inventori e scienziati si sono cimentati con questa nuova sfida: la *levitazione magnetica*. Sin da allora era chiaro che se era possibile usare forze magnetiche per ottenere la levitazione senza contatto, allo stesso tempo era molto difficile garantire la stabilità dell'equilibrio. Fu solamente con i progressi nel campo della scienza dei controlli automatici e dell'elettronica che fu possibile realizzare sospensioni magnetiche controllate, dotate cioè di un sistema di sensori che rilevano la posizione dell'oggetto sospeso e di un sistema di controllo in grado di pilotare gli amplificatori di potenza che alimentano gli elettromagneti di sospensione in modo da stabilizzarlo nella posizione voluta. Tali sistemi sono necessariamente attivi in quanto richiedono una fornitura di potenza dall'esterno. La levitazione magnetica è oggi una realtà,

anche se ancora confinata ad alcune applicazioni di nicchia; grazie alla sempre maggior potenza di calcolo ed alle continue riduzioni di costo dei sistemi digitali, essa diverrà sempre più competitiva con i sistemi convenzionali, sia per i mezzi di trasporto (treni a levitazione magnetica) che per le macchine rotanti (cuscinetti magnetici). La possibilità di ridurre la resistenza al moto e di aumentare la velocità di rotazione permette la realizzazione di macchine più compatte, leggere e soprattutto di ridurre i consumi energetici.

L'uso di forze magnetiche di attrazione (sospensione magnetica) o di repulsione (levitazione magnetica vera e propria) permette di realizzare un supporto senza contatto. Le applicazioni sono molte, dalla sospensione dei modelli in galleria del vento all'isolamento dalle vibrazioni. Le applicazioni più importanti sono quelle in cui l'oggetto sospeso è in moto: cuscinetti magnetici per le macchine rotanti e veicoli a levitazione magnetica.

Vantaggi:

Non vi è contatto fisico tra parti in movimento, e quindi non vi è né attrito né usura.

Si possono raggiungere velocità molto elevate e la potenza richiesta per il moto è assai minore di



quella che si ha nelle soluzioni convenzionali. L'assenza di usura permette di aumentare la durata, riducendo i costi di manutenzione.

Non è necessario usare lubrificanti: in molti casi (macchine per l'industria alimentare e tessile, impianti a vuoto) i lubrificanti sono fonte di contaminazione.

I vantaggi principali sono quindi

il risparmio energetico e la riduzione dell'inquinamento. Le sospensioni magnetiche attive danno al progettista una grande libertà e rendono possibili soluzioni impensabili con le tecnologie convenzionali.

Funzionamento:

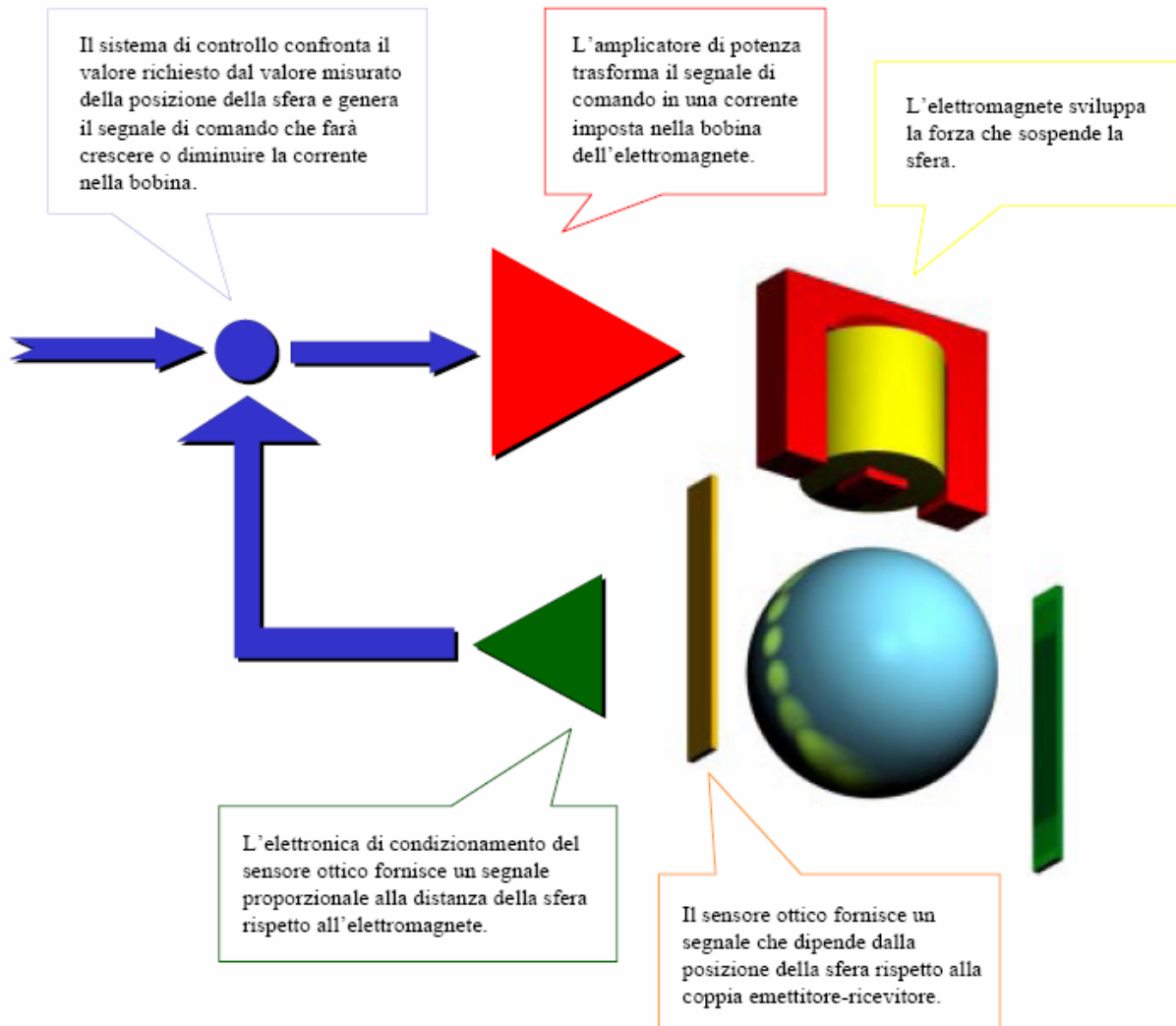
Il levitatore magnetico realizza il principio della sospensione magnetica totalmente attiva: tutta la forza necessaria a sospendere la sfera è sviluppata da un elettromagnete.

Quest'ultimo sviluppa una forza che cresce all'aumentare della corrente che scorre nella bobina e diminuisce all'aumentare della distanza rispetto all'oggetto da sospendere.

Se la corrente è costante, l'elettromagnete si comporta come una normale calamita: fino ad una certa distanza la sfera metallica viene attratta e tende ad unirsi alla calamita, mentre per distanze superiori l'attrazione non è sufficiente e la sfera cade. E' quello che viene chiamato un sistema instabile. Per mantenere stabilmente la sfera ad una distanza prefissata è necessario variare opportunamente la corrente dell'elettromagnete: se la sfera si allontana occorre rapidamente aumentarla, se si avvicina occorre diminuirla. Tale "aggiustamento" della corrente deve però essere ripetuto almeno un centinaio di volte ogni secondo. Da ciò la necessità che tale controllo sia automatizzato con l'impiego dell'elettronica, punto fondamentale su cui si basa il progetto.

Levitatore Magnetico

In figura riportiamo il principio fisico di funzionamento del levitatore magnetico:

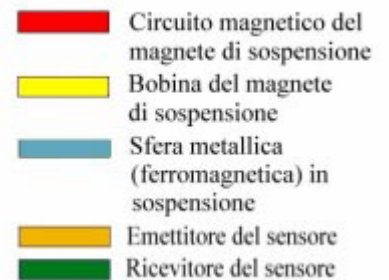


Equazioni che lo regolano:

$$\dot{X}_1 = X_2$$

$$\dot{X}_2 = -\frac{K}{m} X_2 + g - \frac{\lambda \cdot \mu \cdot X_3^2}{2 \cdot m \cdot (1 + \mu X_1)}$$

$$\dot{X}_3 = -\frac{R}{\lambda} \cdot (1 + \mu X_1) \cdot X_3 + \frac{\mu}{1 + \mu X_1} \cdot X_2 \cdot X_3 + \frac{1 + \mu X_1}{\lambda} \cdot \mu$$



Dove le variabili di stato hanno il seguente significato:

X_1 =Posizione della sfera

X_2 =Velocità della sfera

X_3 =Corrente

μ = 1/metri

λ =Induttanza

K =Attrito

R =Resistenza

g =Gravità

m =Massa della sfera

4. Sperimentazione pratica della levitazione con superconduttori

Per capire tutti gli aspetti che regolano l'effetto della levitazione magnetica e per condurre in modo appropriato il progetto, è stata svolta una ricerca per approfondire le leggi fisiche e chimiche che la regolamentano.

Raffreddati con l'azoto liquido, i nuovi superconduttori permettono alla corrente elettrica di scorrere senza attrito e impediscono al campo magnetico di entrare nel loro volume, aprendo la strada a nuove tecnologie e contribuendo al risparmio energetico.

Un materiale superconduttore, opportunamente raffreddato al di sotto di una data temperatura, detta temperatura critica, è caratterizzato da due fondamentali e stupefacenti proprietà, la superconduzione e l'effetto Meissner.

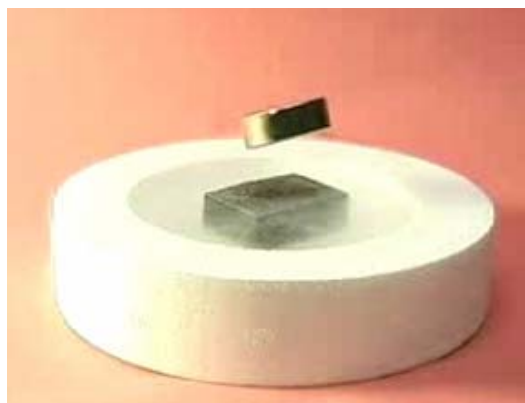
L'effetto Meissner si realizza quando un superconduttore viene immerso in un campo magnetico di intensità non eccessiva. Il superconduttore manifesta un diamagnetismo perfetto espellendo il campo magnetico dal suo interno; ciò avviene tramite la generazione di correnti superficiali che inducono, all'interno del superconduttore, un campo magnetico uguale e contrario a quello applicato. L'effetto prende il nome da Walter Meissner.

L'esperimento pratico ha portato alla visualizzazione del fenomeno della levitazione magnetica: un piccolo magnete levita (galleggia letteralmente in aria) se posto nelle vicinanze del superconduttore, opportunamente raffreddato con azoto liquido.

Il materiale necessario per l'esperimento è stato:

1. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (cuprato di ittrio e bario)
2. Magnete metallico
3. Recipiente in ceramica
4. Azoto liquido

 [Visualizza il video](#) 



5. Sperimentazione pratica della levitazione con materiale diamagnetico

Altro esperimento svolto e riproducibile in qualsiasi ambiente è stata la levitazione, basata sull'effetto Meissner (con materiali diamagnetici), secondo cui un corpo diamagnetico respinge le linee di un flusso magnetico.

Il materiale necessario per l'esperimento è stato:

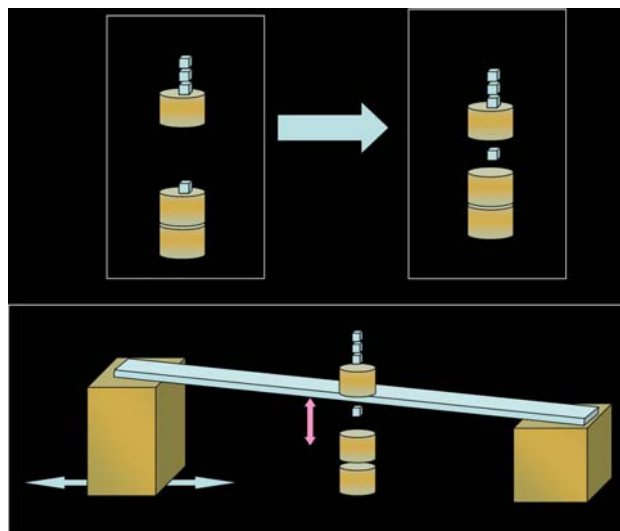
1. Due cilindri di Bismuto
2. Diversi magneti di 2,3 mm in lega Fe-Nd-B
3. Magnete metallico

Esperienza pratica:

Mettendo sopra al pezzo di bismuto superiore altri tre magneti ed avvicinando questo al pezzo inferiore (sul quale giace il magnete singolo), esso si troverà immerso nel flusso magnetico degli altri tre superiori, e si disporrà nella maniera più conveniente, senonchè i pezzi di bismuto lo respingono, poichè esso stesso genera un flusso magnetico.

Trovando la posizione d'equilibrio, il magnete singolo comincerà a fluttuare per un tempo indefinito. Il magnete, in queste condizioni, si solleva di circa un millimetro.

Schema di funzionamento:



[Visualizza il video](#)

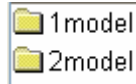


6. Progettazione del levitatore controllato in tensione in ambiente MatLab

Per realizzare il progetto si è proceduto alla ricerca di materiale specifico riguardante il funzionamento fisico del levitatore magnetico, provato sperimentalmente, come precedentemente, descritto il sistema fisico.

In un secondo momento si è passato all'analisi del modello e alla progettazione con l'uso di MatLab.

Nella cartella sorgenti vi è il materiale elaborato suddiviso nel seguente modo:



1model contiene i modelli per la simulazione della levitazione della sfera dall'alto al basso.

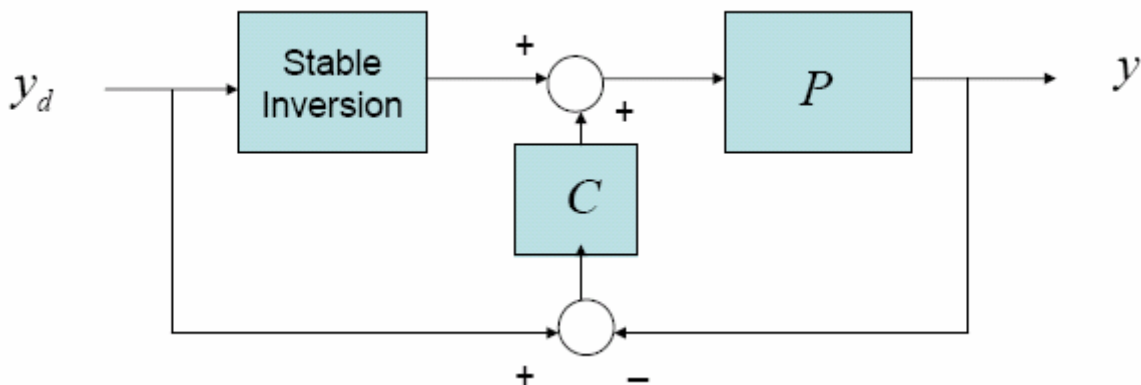
2model contiene i modelli per la simulazione della levitazione della sfera dal basso all'alto.

6.1 Tecniche di inversione e controllo feed-forward/feed-back

Il progetto consiste nello sviluppo del modello di un sistema di levitazione in ambiente MatLab/Simulink secondo lo schema di feed-forward/feed-back: feed-forward determinato secondo **le tecniche di inversione**.

La realizzazione del modello si basa sui seguenti punti:

1. Il modello da sviluppare si basa sulla sintetizzazione di funzioni ottimali di input e output per la regolazione di SET-POINT vincolata.
2. Il sistema è modellato secondo **lo schema di Devasia-Chen-Paden**



Il primo passo è quello di determinare, con un'espressione in forma chiusa, una famiglia di coppie causa/effetto che permettano una transizione arbitraria in τ secondi tra due set-point di una uscita assegnata (la sfera deve levitare da una posizione ad un'altra).

La soluzione a tale problema passa attraverso il concetto di "transition" polynomials che modella l'uscita del sistema.

Nello specifico, in un insieme di coppie causa/effetto, il tempo di transizione (τ) dell'uscita è minimizzato e soggetto ai limiti delle derivate della funzione di uscita e ai limiti delle funzioni di input e delle sue derivate.

6.2 “Transition” polynomial $y(t; \tau)$

Il polinomio di transizione consente di impostare il grado di continuità k desiderato per la transizione in τ secondi tra due set-point di un' uscita assegnata (come detto in precedenza).

$$y(t; \tau) \in C^k$$

$$y(t; \tau) = \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 0 \\ \frac{(2k+1)!}{k! \tau^{2k+1}} \sum_{i=0}^k \frac{(-1)^{k-i}}{i!(k-i)!(2k-i+1)} \tau^i t^{2k-i+1} & \text{if } 0 \leq t \leq \tau \\ 1 & \text{if } t \geq \tau \end{cases} \quad (1)$$

ponendo $k=3$ la (1) diventa:

$$y(t; \tau) = \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 0 \\ \frac{7!}{3! \tau^7} \left(\frac{(-1)^{3-0}}{0!(3-0)!(7-0)} \tau^0 t^{7-0} + \frac{(-1)^{3-1}}{1!(3-1)!(7-1)} \tau^1 t^{7-1} + \frac{(-1)^{3-2}}{2!(3-2)!(7-2)} \tau^2 t^{7-2} + \frac{(-1)^{3-3}}{3!(3-3)!(7-3)} \tau^3 t^{7-3} \right) & \text{if } 0 \leq t \leq \tau \\ 1 & \text{if } t \geq \tau \end{cases}$$

$$y(t; \tau) = \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 0 \\ \frac{7!}{3! \tau^7} \left(\frac{-1}{3!*7} t^7 + \frac{1}{2!*6} \tau t^6 + \frac{-1}{10} \tau^2 t^5 + \frac{1}{3!*4} \tau^3 t^4 \right) & \text{if } 0 \leq t \leq \tau \\ 1 & \text{if } t \geq \tau \end{cases}$$

$$y(t; \tau) = \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 0 \\ \frac{7!}{3! \tau^7} \left(\frac{-1}{3!*7} t^7 + \frac{1}{2!*6} \tau t^6 + \frac{-1}{10} \tau^2 t^5 + \frac{1}{3!*4} \tau^3 t^4 \right) & \text{if } 0 \leq t \leq \tau \\ 1 & \text{if } t \geq \tau \end{cases}$$

Levitatore Magnetico

$$y(t; \tau) = \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 0 \\ \left(-20 \frac{t^7}{\tau^7} + 70 \frac{t^6}{\tau^6} + -84 \frac{t^5}{\tau^5} + 35 \frac{t^4}{\tau^4} \right) & \text{if } 0 \leq t \leq \tau \\ 1 & \text{if } t \geq \tau \end{cases}$$

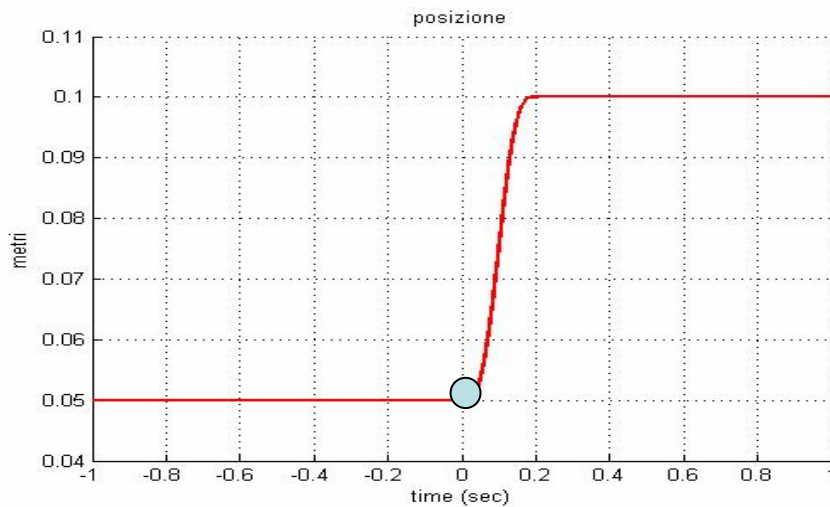
Come verifica della correttezza del calcolo delle espressioni viste sopra è stata implementata una funzione Matlab che può essere utilizzata immettendo nella command window (di Matlab) le seguenti istruzioni:

```
syms t tau
a = transitionpoly(3, t, tau)
```

in *a* sarà stampato il polinomio di transizione con $k=3$ e i parametri *t* (parametro del tempo) *tau* (il tempo della transizione τ)

- **Levitazione della sfera da un punto iniziale x_{1i} ad un punto finale x_{1f} ($x_{1i} < x_{1f}$)**

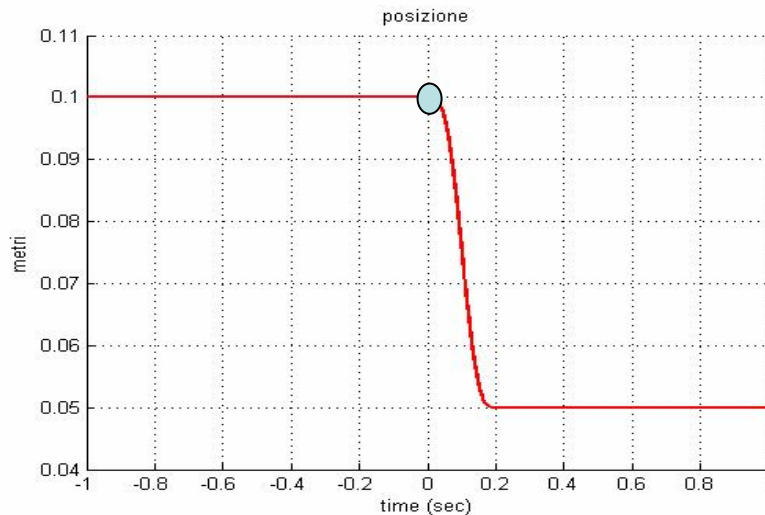
$$y_d(t; \tau) = \begin{cases} x_{1i} & \text{if } t \leq 0 \\ x_{1i} + (x_{1f} - x_{1i}) \left(-20 \frac{t^7}{\tau^7} + 70 \frac{t^6}{\tau^6} + -84 \frac{t^5}{\tau^5} + 35 \frac{t^4}{\tau^4} \right) & \text{if } 0 \leq t \leq \tau \\ x_{1f} & \text{if } t \geq \tau \end{cases}$$



Levitatore Magnetico

- Levitazione della sfera da un punto iniziale x_{1i} ad un punto finale x_{1f} ($x_{1i} > x_{1f}$)

$$y_d(t; \tau) = \begin{cases} x_{1i} & \text{if } t \leq 0 \\ x_{1i} + (x_{1f} - x_{1i}) \left(-20 \frac{t^7}{\tau^7} + 70 \frac{t^6}{\tau^6} - 84 \frac{t^5}{\tau^5} + 35 \frac{t^4}{\tau^4} \right) & \text{if } 0 \leq t \leq \tau \\ x_{1f} & \text{if } t \geq \tau \end{cases}$$














La formula del polinomio di transizione e i concetti relativi alle tecniche di sintetizzazione di funzioni ottimali di input o output per la regolazione di set-point vincolata sono stati estrapolati dal documento "Optimal noncasual set-point regulation of scalar systems" dei professori Aurelio Piazzi e Antonio Visioli e dal documento visionabile al link:

http://www.ce.unipr.it/automatica/mat_did/altri/st_inv.pdf

6.3 Cartella 1Model (Modello in cui la sfera parte da 0.05 m per arrivare a 0.1 m)

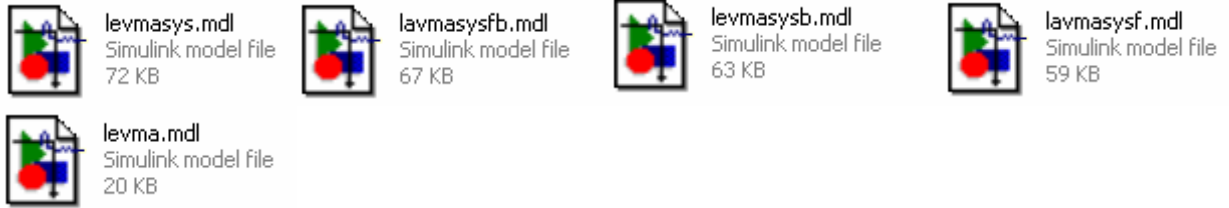
ATTENZIONE: come nella simulazione i valori di partenza (0.05 m) e di arrivo (0.1 m) si riferiscono alla posizione della sfera dalla spira del circuito magnetico (levitazione dall'alto al basso).

All'interno della cartella si trovano i seguenti file:

 dx3dfunc.m MATLAB M-file 2 KB	Funzion che calcola derivata della terza variabile di feed-forward.
 dx2dfunc.m MATLAB M-file 1 KB	Funzione che calcola la derivata della seconda variabile di feed-forward
 init.m MATLAB M-file 2 KB	Qui vengono settati i vari parametri Induttanza (H)=1 Resistenza (Ohm)=10 Attrito=0 mas = 0.1massa (Kg)=0.1 mu = 2 (1/metri)=2 metri=0.05 accelerazione di gravità (metri/sec*sec)= 9.80665 Inizializzazione variabili del modello. Calcolato polinomio interpolante e la formula di ackerman.
 insommatoria.m MATLAB M-file 1 KB	Funzione utilizzata dalla funzione 'sommatoria'.
 myplot.m MATLAB M-file 1 KB	Visualizza l'andamento delle variabili critiche per il modello.
 sommatoria.m MATLAB M-file 1 KB	Funzione utilizzata dalla funzione 'transitionpoly'
 transitionpoly.m MATLAB M-file 1 KB	Calcola il polinomio di transizione
 udfunc.m MATLAB M-file 1 KB	Variabile di controllo di feed-forward
 x1dfunc.m MATLAB M-file 1 KB	Prima variabile di feed-forward
 x2dfunc.m MATLAB M-file 1 KB	Seconda variabile di feed-forward
 x3dfunc.m MATLAB M-file 1 KB	Calcolo della terza variabile di feed-forward.

Levitatore Magnetico

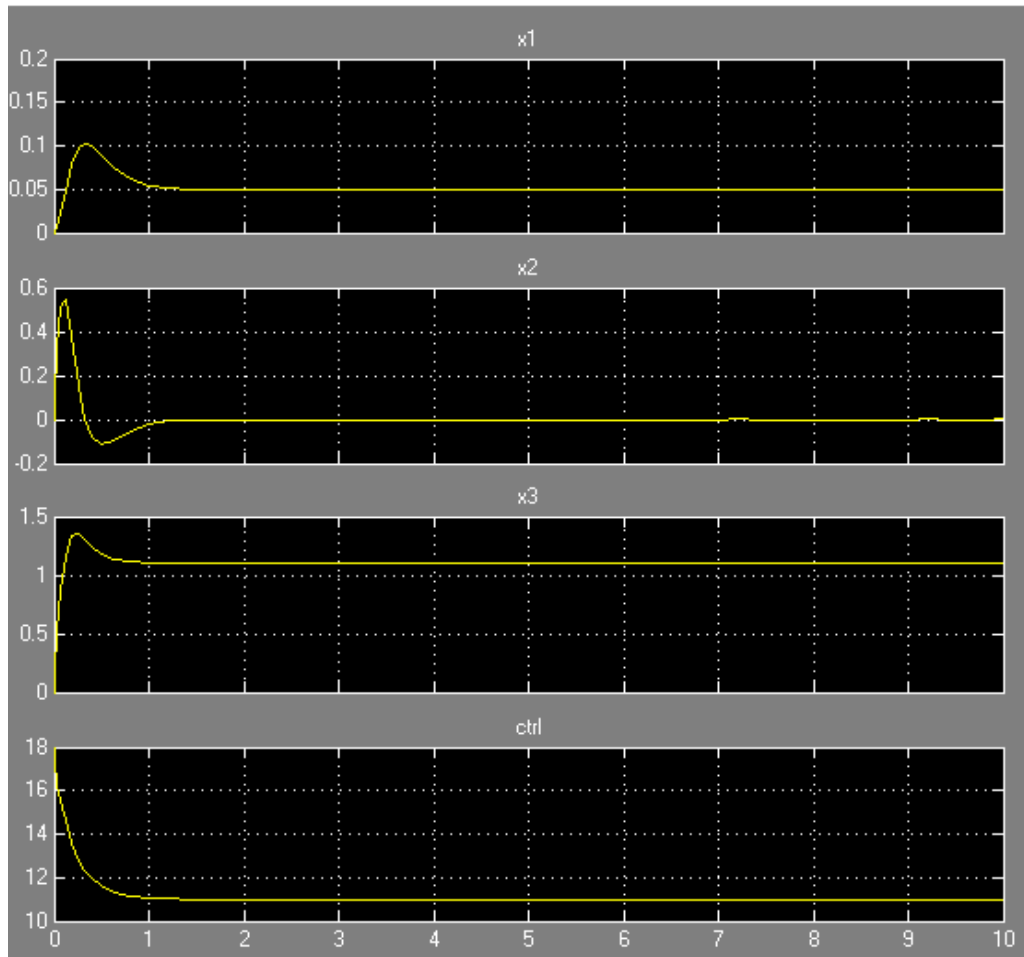
Infine troviamo i file mdl che rappresentano i modelli utilizzati per le simulazioni in simulink che verranno analizzate in seguito



6.3.1 Modello semplice del levitatore magnetico (levma.mdl levmasys.mdl)



Il file **levmasys.mdl** è una miglioria del modello con controllo in retroazione **levma.mdl** sviluppato in laboratorio durante le ore di lezione (**levma.mdl**) in cui **la sfera levita da 0 a 0.1**. L'andamento delle variabili di stato e del controllo è mostrato nella figura sotto.

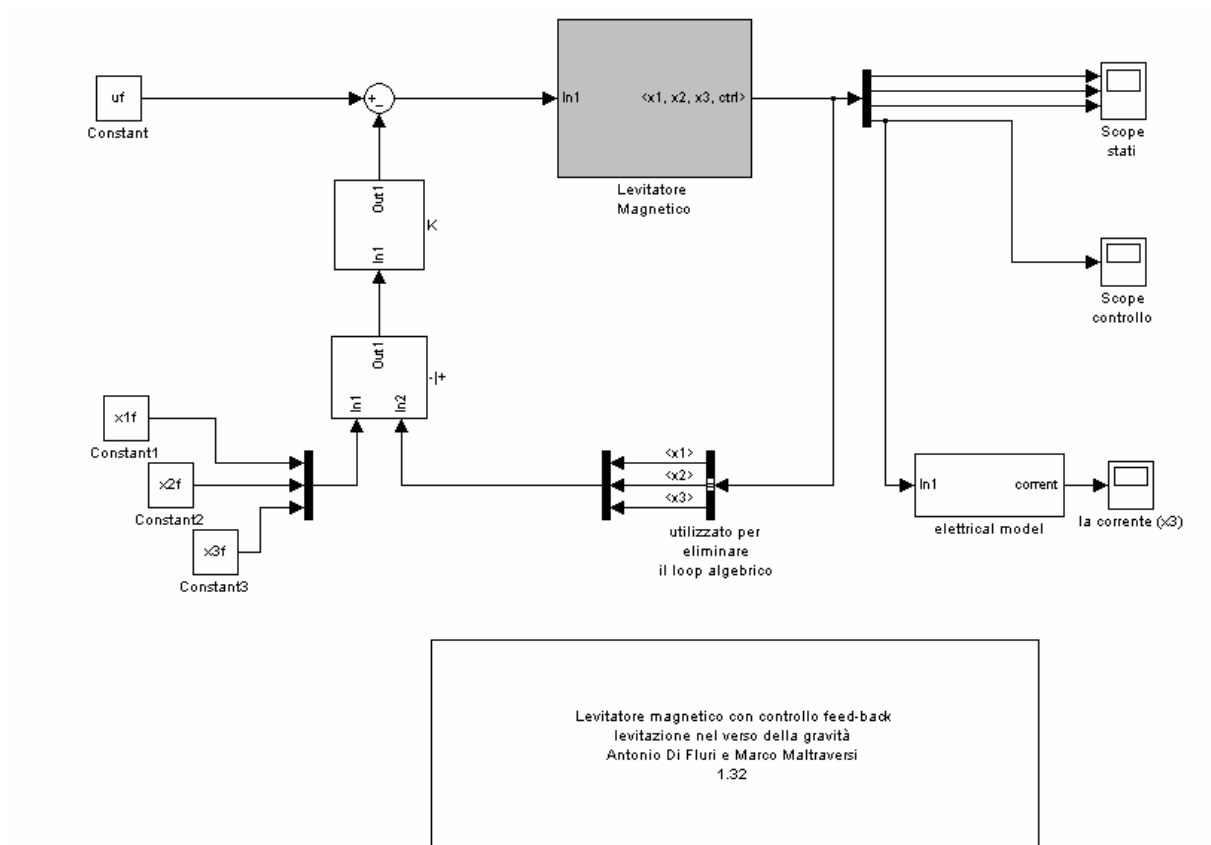


Dal grafico si nota una sovra elongazione nella variabile di stato x_1 : la sfera prima di posizionarsi sul valore di 0.05 m raggiunge i 0.1 m ed infine ritorna allo stato finale desiderato.

6.3.2 Controllo con il solo Feed-Back (Ad anello chiuso)

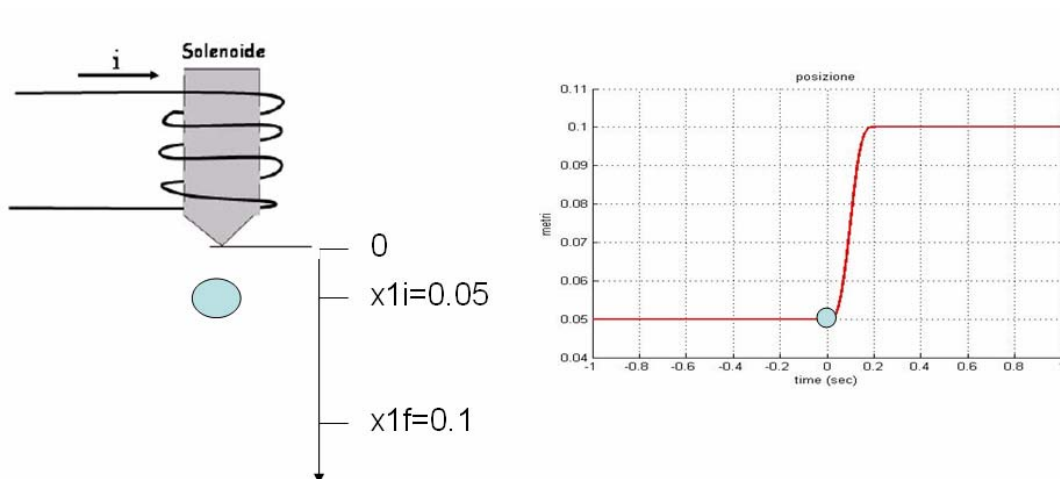


MODELLO (Sfera che lievita dall'alto al basso)



Questo modello è la versione più scalare del file levmasys.mdl e permette di effettuare la simulazione del sistema del levitatore magnetico utilizzando il controllo in tensione con feed-back. La modularità sta nel fatto che è possibile inserire facilmente l'azione di feed-forward (vedi figura del sistema con feed-forward e feed-back).

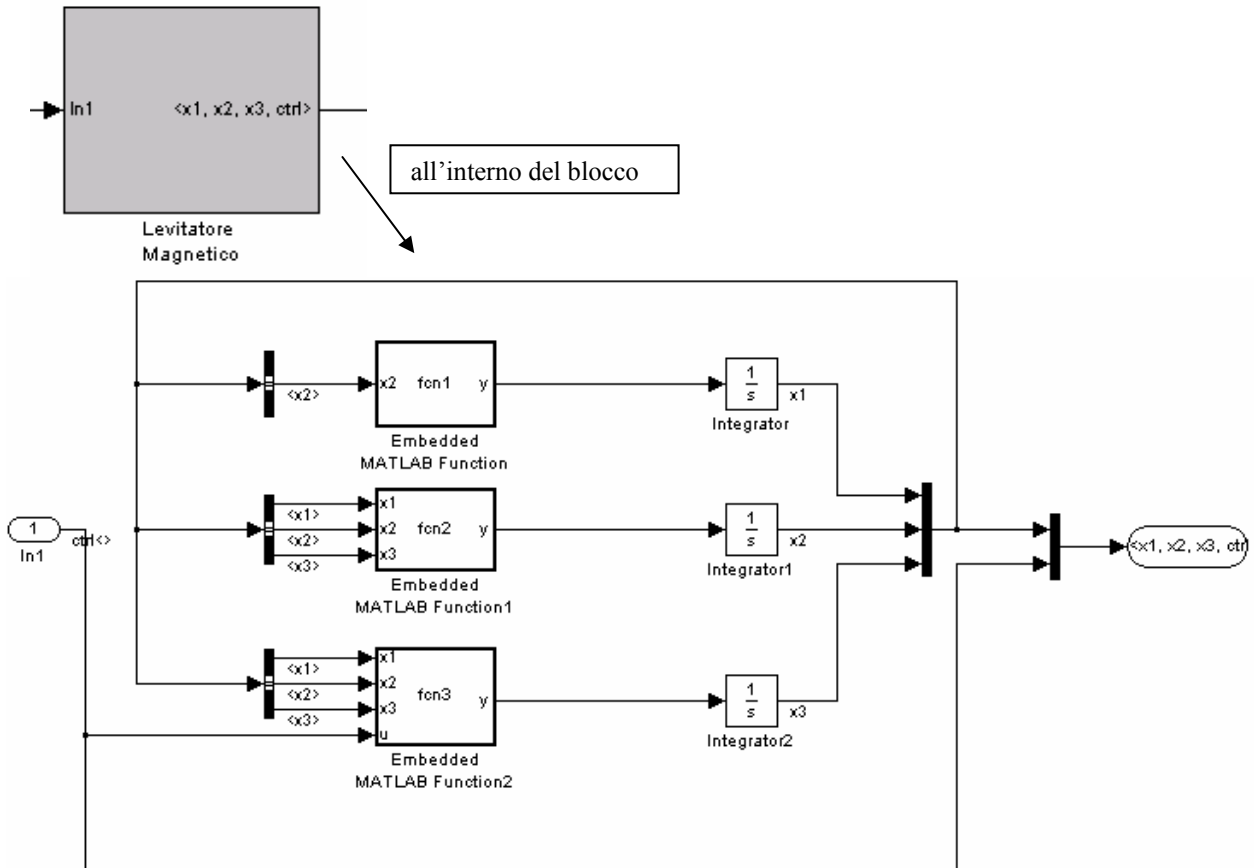
La sfera parte da 0.05 (x1i) metri per arrivare ad un valore di 0.1 (x1f) metri. (In figura) I valori x1i e x1f indicano la posizione della sfera rispetto al solenoide. Tutti i modelli presenti nella cartella 1model utilizzano questa trattazione.



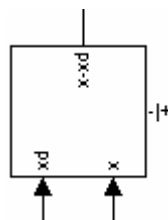
Levitatore Magnetico

Analizziamo nello specifico i singoli blocchi utilizzati:

- ✓ $x1f, x2f, x3f, uf$ sono i valori finali delle variabili di stato e del controllo utilizzate per la retroazione.
- ✓ In questo blocco viene simulato il sistema fisico del levitatore magnetico

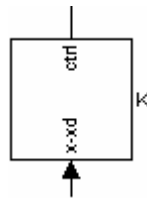


- ✓ Nei Blocchi “Embedded MATLAB Function” sono specificate le espressioni delle equazioni di stato $x1, x2, x3$.



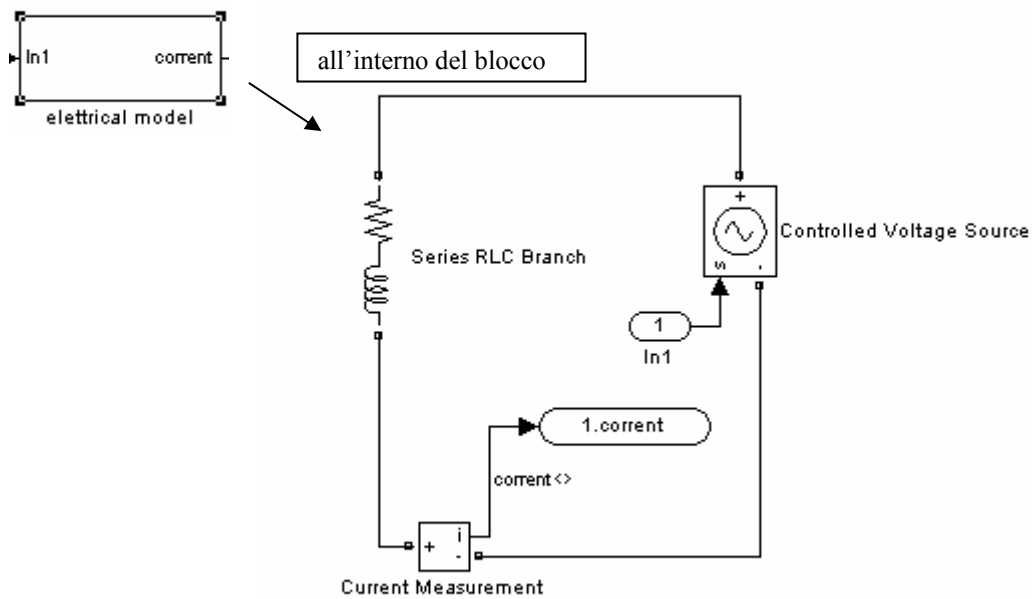
Il blocco prende in ingresso due vettori rispettivamente i valori delle variabili di stato dell'azione di feed-forward ($x1d, x2d, x3d$) e i valori delle variabili di stato dell'azione di feed-back ($x1, x2, x3$) e ne fa la differenza. (uscita del blocco).

Levitatore Magnetico



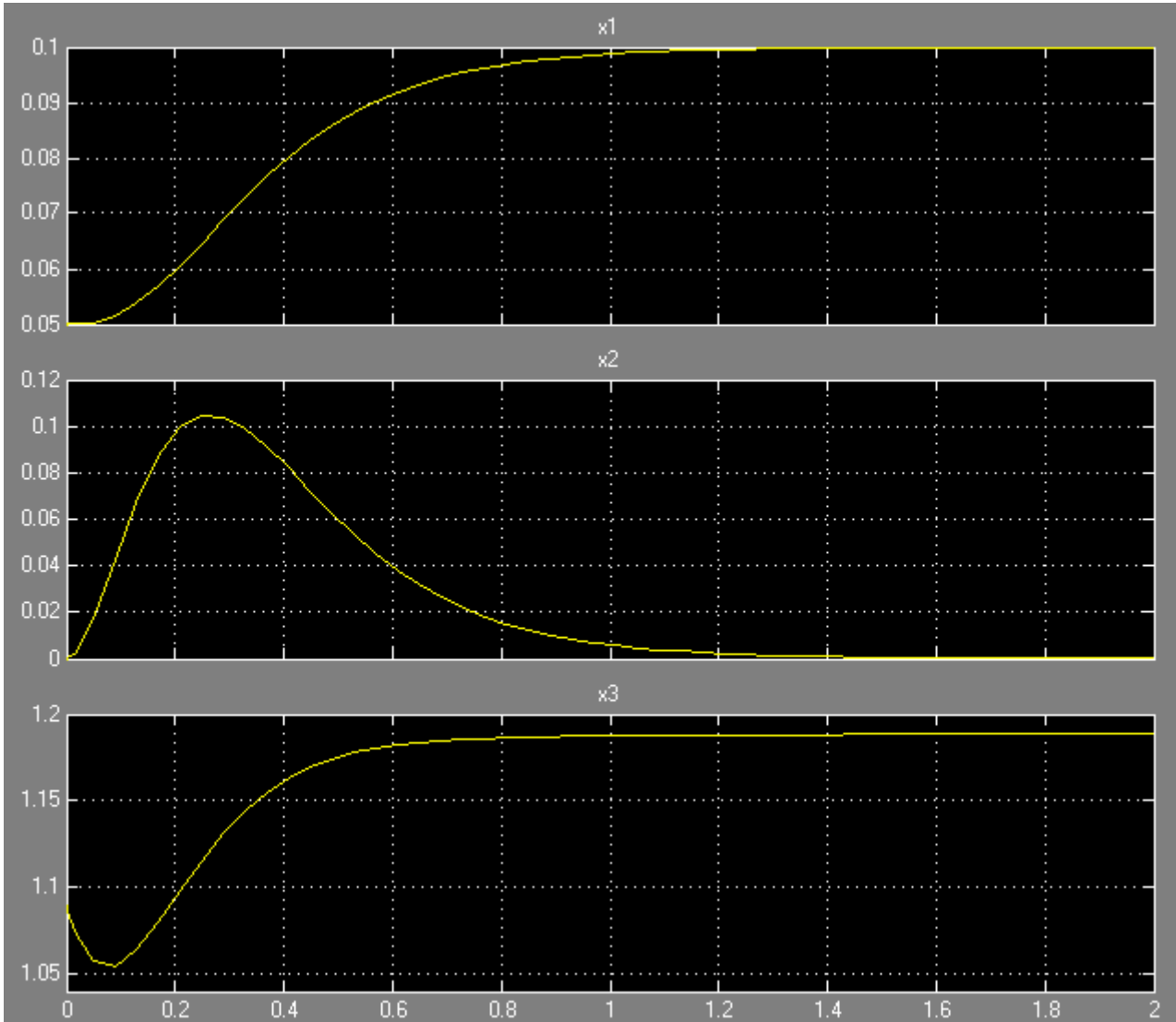
Il blocco prende in ingresso il vettore che produce il blocco sopra descritto e utilizza i parametri della retroazione per produrre in uscita il controllo.

- ✓ Il modello elettrico viene utilizzato per verificare il corretto andamento della corrente x_3



Risultati ottenuti

Dopo le numerose prove effettuate sono stati ottenuti i seguenti risultati: X_1 =Posizione della sfera X_2 =Velocità della sfera X_3 =Corrente del circuito che permette alla sfera di levitare.



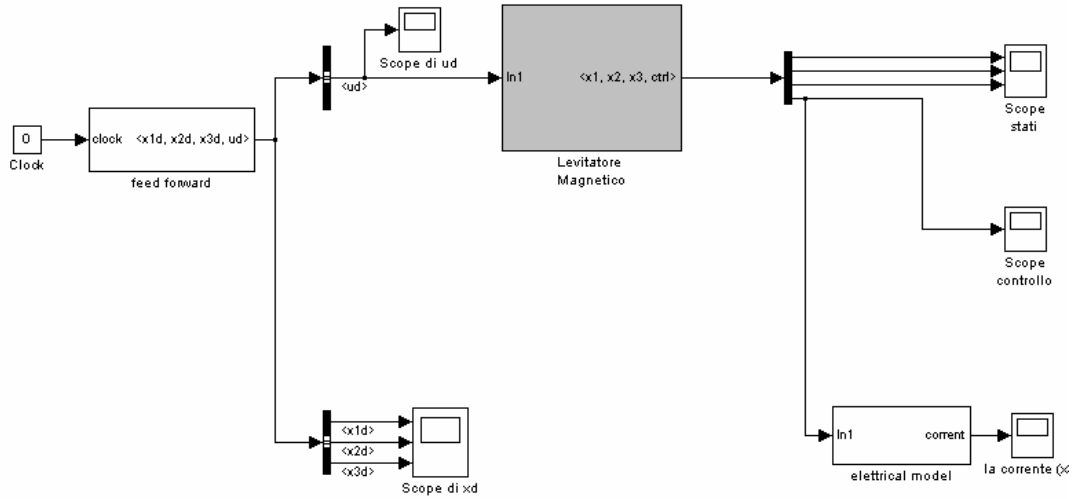
Dal grafico possiamo notare il corretto andamento delle diverse variabili di stato.

Da notare come X_1 X_2 X_3 per valori $t \geq 1.4s$ risultano stabili e costanti, ossia la sfera ha raggiunto il suo valore finale. L'obiettivo è quello di aggiungere anche l'azione di feed-forward per migliorare il transitorio della sfera che levita da 0.05 a 0.1, ossia si vuole raggiungere la posizione finale della sfera in minor tempo. Di seguito sarà analizzato il controllo con la sola azione di feed-forward.

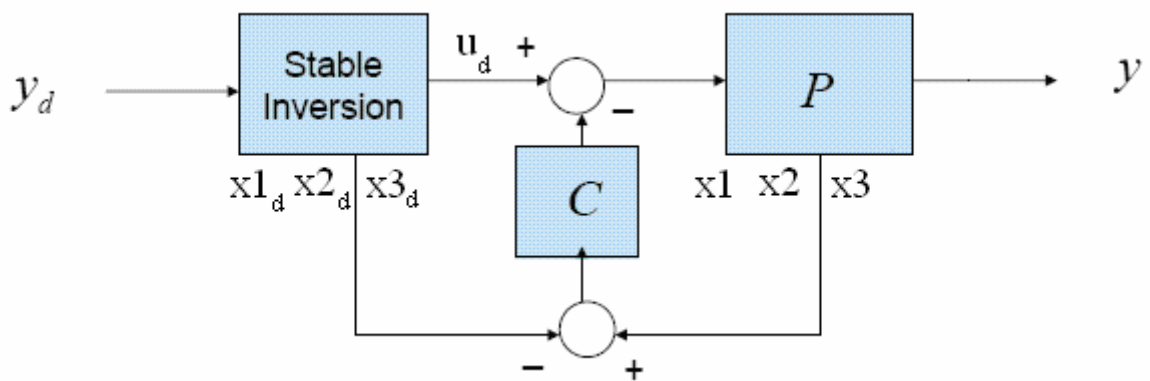
6.3.3 Controllo con la sola azione di Feed-Forward



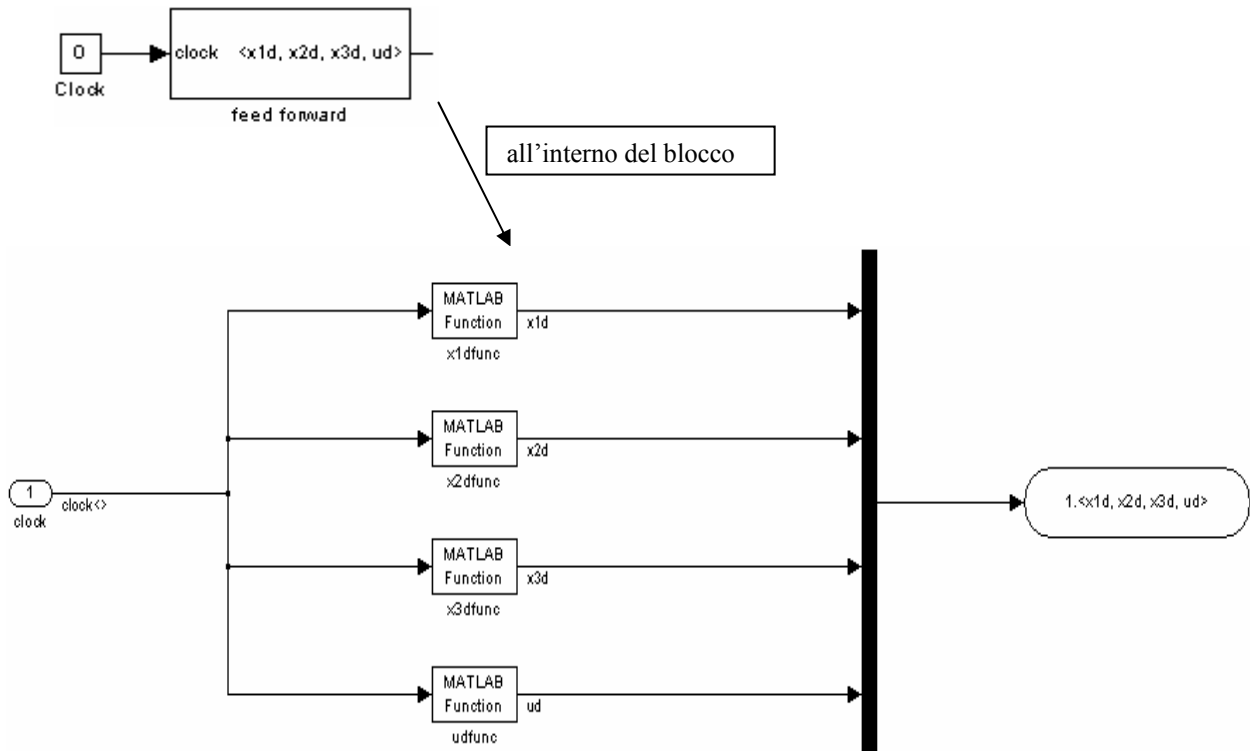
MODELLO (Sfera che lievita dall'alto al basso)



Levitatore magnetico con controllo feed-forward
levitazione nel verso della gravità
Antonio Di Fluri e Marco Maltraversi
1.121



Analizziamo i singoli componenti



Nella figura sopra in ogni blocco “MATLAB Function” sono richiamate le funzioni che calcolano i valori desiderati delle variabili di stato nell’azione di feed-forward.

Le funzioni sono definite nei file:

- **x1dfunc(t,tau)** := ritorna il valore desiderato della posizione dell’oggetto che levita (sfera) nell’azione di feed-forward; in MATLAB è definita nel file **x1dfunc.m**
- **x2dfunc(t,tau)** := ritorna il valore desiderato della velocità dell’oggetto che levita (sfera) nell’azione di feed-forward; in MATLAB è definita nel file **x2dfunc.m**
- **x3dfunc(t,tau)** := ritorna il valore desiderato della corrente del circuito di levitazione nell’azione di feed-forward; in MATLAB è definita nel file **x3dfunc.m**
- **udfunc(t,tau)** := ritorna il valore desiderato della tensione di controllo del circuito di levitazione nell’azione di feed-forward; in MATLAB è definita nel file **udfunc.m**
- i parametri delle funzioni:
 - **t** := rappresenta il tempo nell’espressione della funzione, assume il valore del clock della simulazione in MATLAB/SIMULINK
 - **tau** := rappresenta il parametro usato nel polinomio di transizione (vedi ...) nell’espressione della funzione, assume il valore importato dalla command window di MATLAB

• **Equazioni di stato del modello**

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{k}{m}x_2 + g - \frac{\lambda \cdot \mu \cdot x_3^2}{2 \cdot m \cdot (1 + \mu \cdot x_1)}$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{R}{\lambda}(1 + \mu \cdot x_1) \cdot x_3 + \frac{\mu}{1 + \mu \cdot x_1}x_2 \cdot x_3 + \frac{1 + \mu \cdot x_1}{\lambda} \cdot u$$

x_1 è la posizione (metri) della sfera che assume l'andamento della y_d

• **Calcolo delle var. di feed-forward ($x1_d=y_d$)**

$$x2_d = \dot{x1}_d = \begin{cases} 0 & \text{if } t \leq 0 \\ (x1_f - x1_i) \left(-140 \frac{t^6}{\tau^7} + 420 \frac{t^5}{\tau^6} - 420 \frac{t^4}{\tau^5} + 150 \frac{t^3}{\tau^4} \right) & \text{if } 0 \leq t \leq \tau \\ 0 & \text{if } t \geq \tau \end{cases}$$

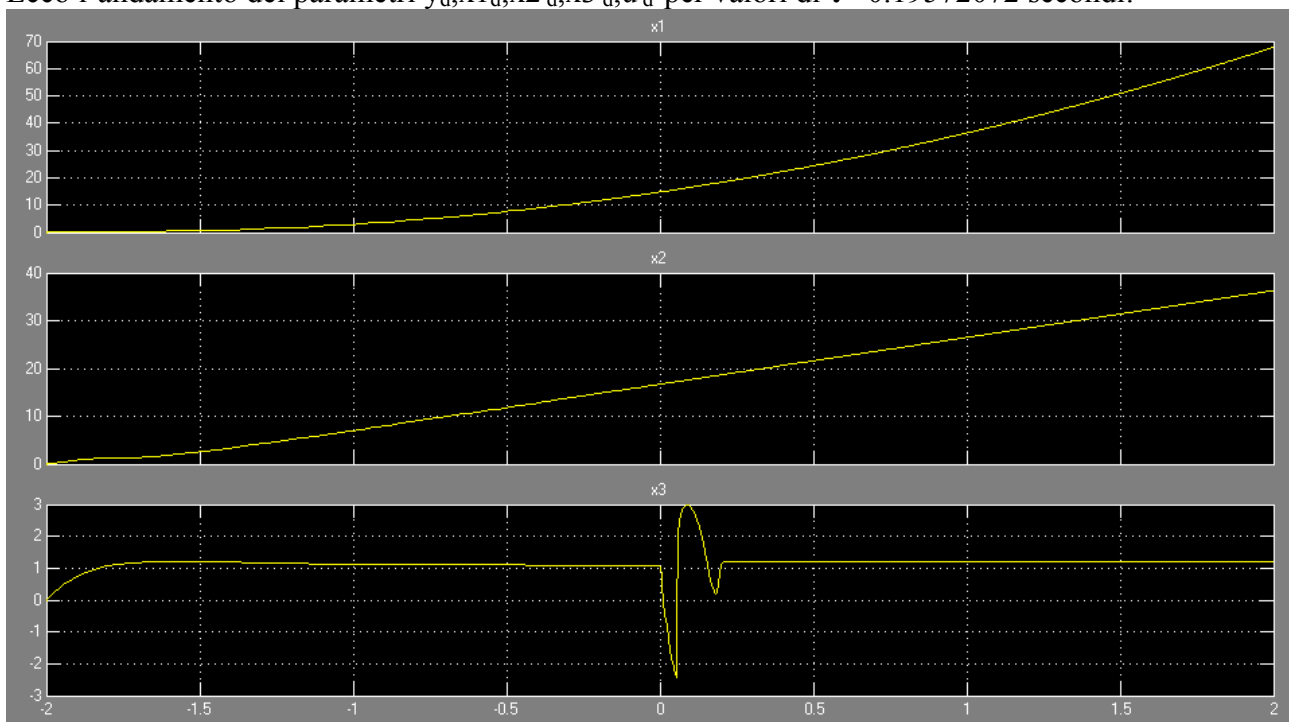
$$x3_d = \sqrt{2} \cdot (x1_d \cdot m + 1) \cdot \sqrt{-\frac{\dot{x2}_d \cdot m - g \cdot m + k \cdot x2_d}{\lambda \cdot \mu}} \quad u_d = \frac{\dot{x3}_d \cdot \lambda \cdot (x1_d \cdot \mu + 1) + (R \cdot (x1_d \cdot \mu + 1)^2 - x2_d \cdot \lambda \cdot \mu)}{(x1_d \cdot \mu + 1)^2}$$

I valori $y_d, x1_d, x2_d, x3_d, u_d$ andranno a costituire i parametri per il blocco di feed-forward:

Risultati ottenuti

Dopo le numerose prove effettuate sono stati ottenuti i seguenti risultati: X_1 =Posizione della sfera X_2 =Velocità della sfera X_3 =Corrente del circuito che permette alla sfera di levitare.

Ecco l'andamento dei parametri $y_d, x1_d, x2_d, x3_d, u_d$ per valori di $\tau = 0.19572072$ secondi:

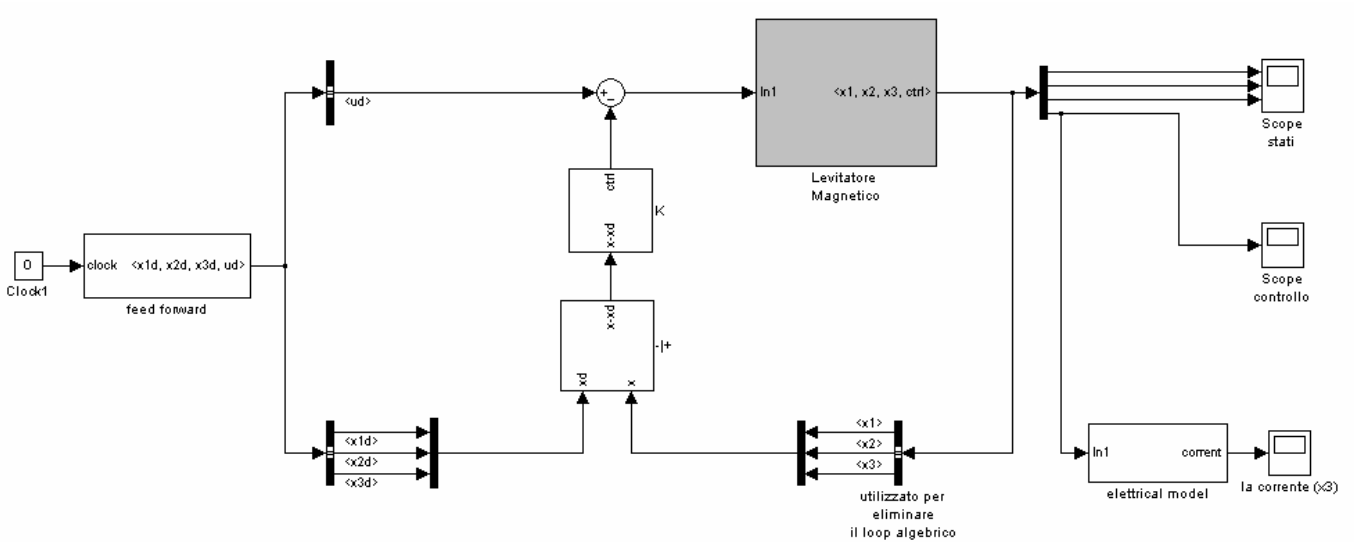


Notiamo come X_1 e X_2 divergono anche per valori negativi, mentre X_3 per $t > 0.5$ si mantenga costante. Ma il sistema con la sola azione di feed-forward non dà risultati corretti (le variabili di stato divergono) ad esempio nella figura dopo due secondi la sfera scende di 70 metri!

6.3.4 Controllo con Feed-Forward e Feed-Back



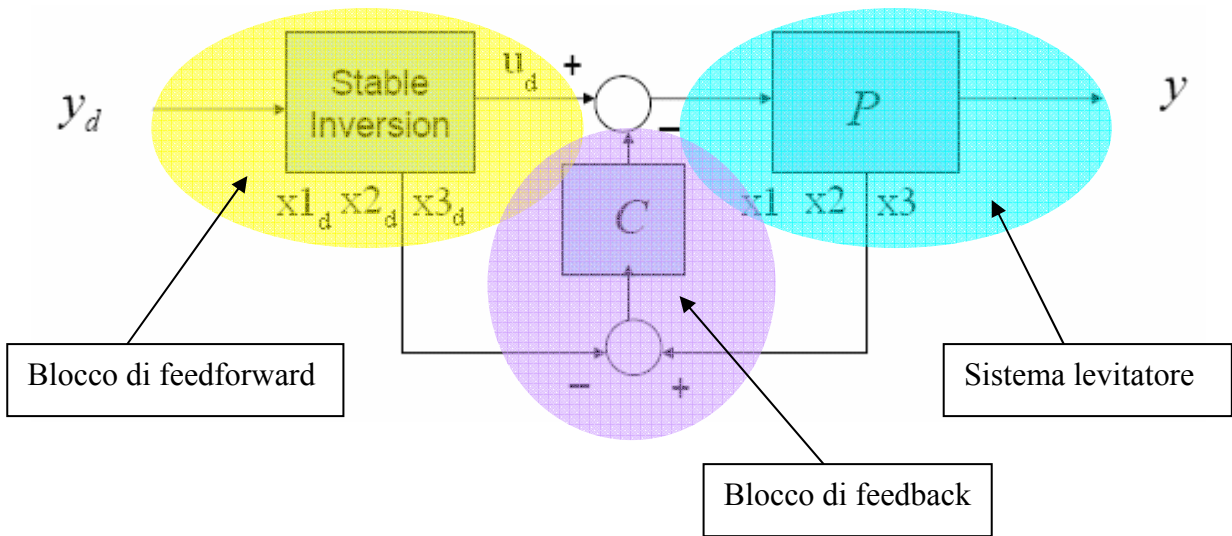
MODELLO(Sfera che lievita dall'alto al basso)



Levitatore magnetico con controllo feed-back e feed-forward
 levitazione nel verso della gravità
 Antonio Di Fluri e Marco Maltraversi
 1.193

Combinazione delle due azioni. I blocchi sono già stati illustrati nella trattazione precedente.

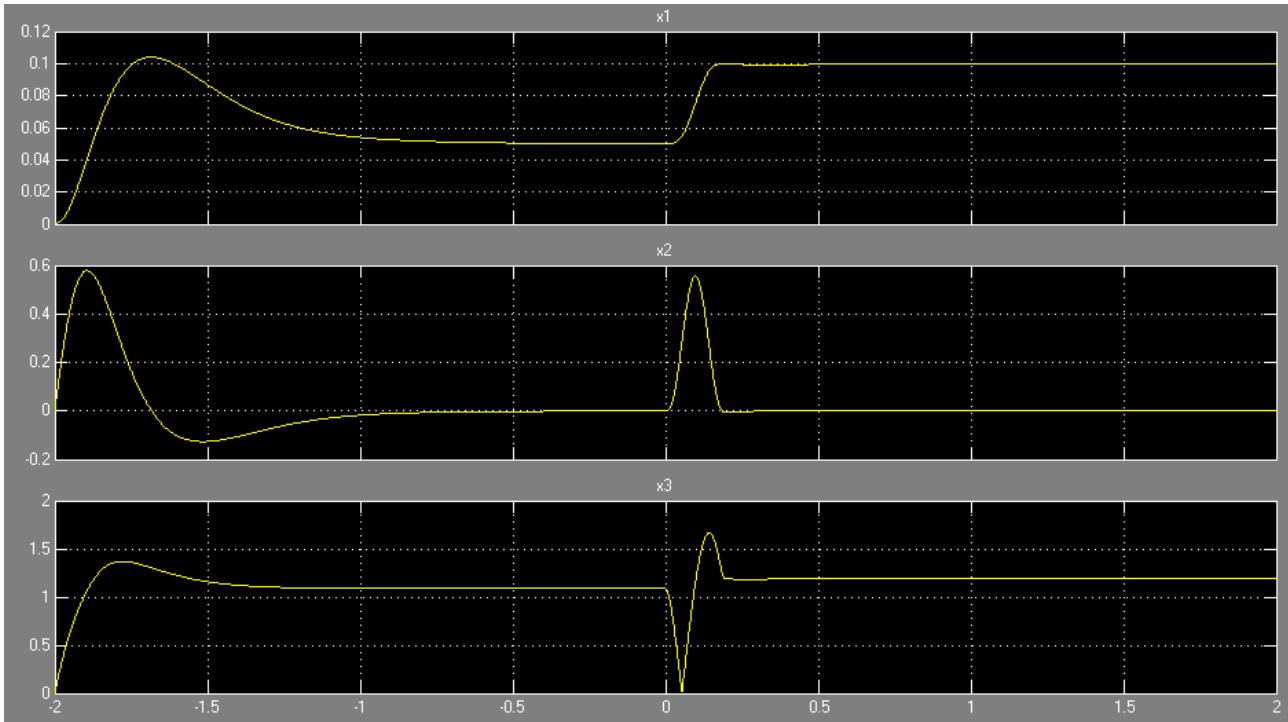
I valori $y_d, x1_d, x2_d, x3_d, u_d$ andranno a costituire i parametri per il blocco di feed-forward:



Risultati ottenuti

Dopo le numerose prove effettuate sono stati ottenuti i seguenti risultati: X_1 =Posizione della sfera X_2 =Velocità della sfera X_3 =Corrente.

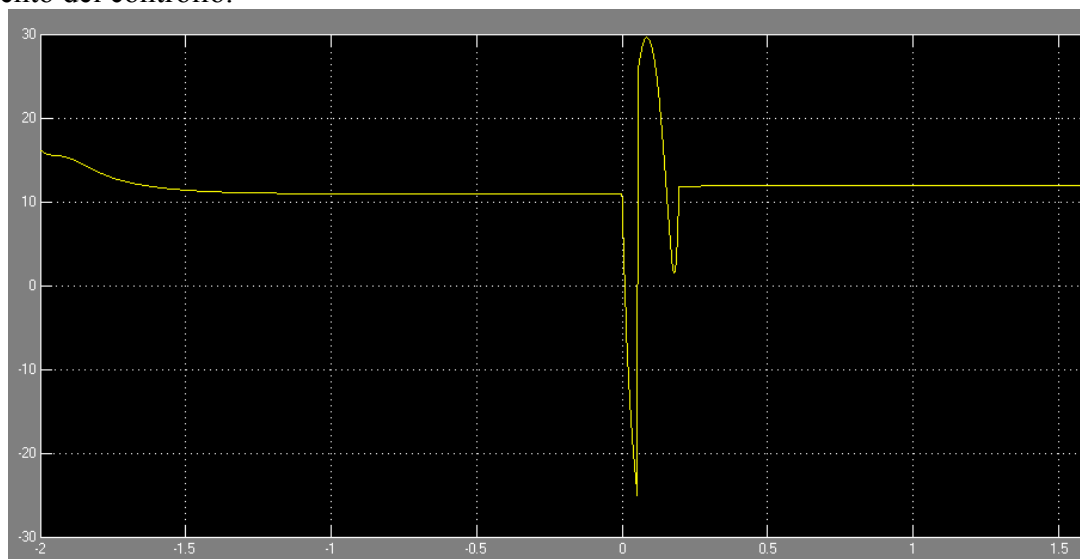
Ecco l'andamento dei parametri $y_d, x1, x2, x3, u_d$ per valori di $\tau = 0.19572072$ secondi:



Notiamo come la combinazione delle due tecniche porti a risultati migliori.

X_1 X_2 e X_3 per valori $t > \tau = 0.19572072$ s sono stabili e costanti. In precedenza, con la sola azione di feed-back la sfera aveva raggiunto il suo valore finale dopo $t > 1.4$ s.

Andamento del controllo.



Il grafico evidenzia un minimo in -25 volt e un massimo in 30 volt per una transizione di circa 0.2 secondi. Tale andamento rispetta il giusto equilibrio del doppio controllo.

6.3.5 Vincoli sul tempo di transizione e calcolo di τ

Il valore di τ assegnato, è un limite infatti porta la corrente ad un valore 0: se si diminuisce il valore di τ la transizione da 0.1 (dal basso) a 0.05 (all'alto) diventerà sempre più veloce, ma per fermare la sfera 0.05 m dalle spire del circuito si potrà sfruttare solo la forza di gravità. Per questo non si può diminuire il valore di τ senza rendere i valori delle variabili di stato non reali.

Per questo motivo, per fissare un valore di τ coerente, è stata creata una funzione in matlab **x3dplot.m**

Tale procedura permette ,cambiando il valore del parametro, di determinare il grafico della corrente fino a sfiorare il valore 0.

Vincoli sul tempo di transizione

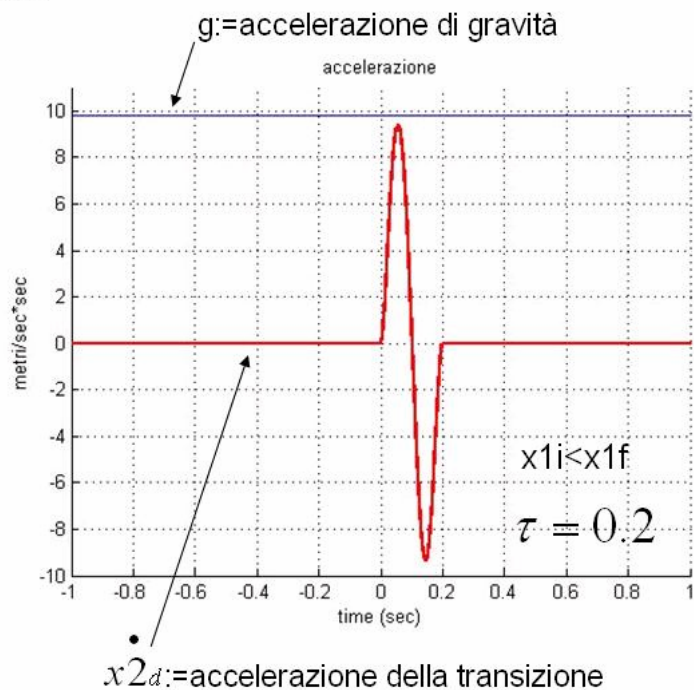
- L'accelerazione della transizione (τ)

$$x3_d = \sqrt{2} \cdot (x1_d \cdot m + 1) \sqrt{\frac{\dot{x2}_d \cdot m - g \cdot m + k \cdot x2_d}{\lambda \cdot \mu}}$$

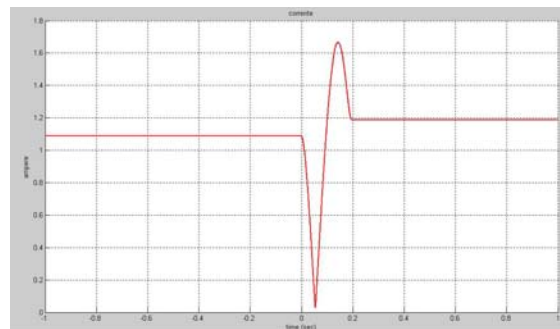
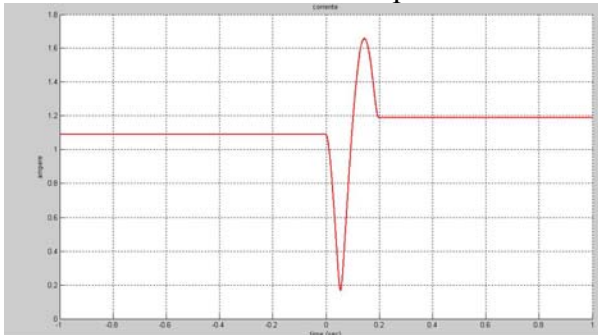
Posto $k=0$ ho valori di $x3_d$ reali se :

$$|\dot{x2}_d| \leq g$$

Al diminuire di τ l'accelerazione della transizione aumenta e non può essere superiore dell'accelerazione di gravità



Aumentando il valore del parametro troviamo per $\tau = 0.19572072$ secondi il valore limite dopo il quale la corrente assume valori non reali. Dai grafici in figura si nota l'andamento per valori di τ differenti: il primo con valore di τ maggiori rispetto al secondo.



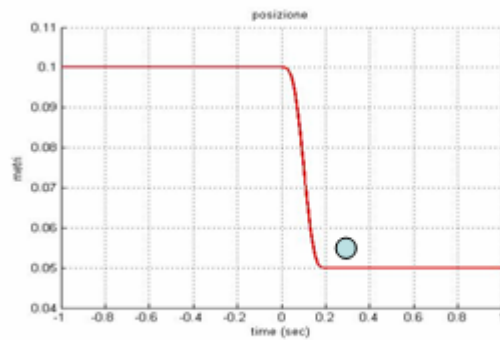
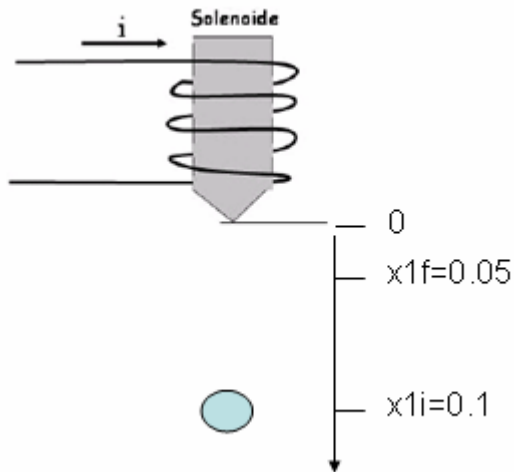
6.4 Cartella 1Model (Modello in cui la sfera parte da 0.1m per arrivare a 0.05 m)

✓ Cartella 2Model

ATTENZIONE: come nella simulazione i valori di partenza (0.1 m) e di arrivo (0.05 m) si riferiscono alla posizione della sfera dalla spira del circuito magnetico (levitazione dal basso all'alto).

All'interno si trovano gli stessi file descritti precedentemente con solo alcuni accorgimenti di progettazione per rendere coerente la modellizzazione del problema.

La sfera parte da 0.1 metri per arrivare ad un valore di 0.05 metri. (In figura) la Y indica la posizione della sfera rispetto al solenoide. Tutti i modelli presenti nella cartella *2model* utilizzano questa trattazione. (In salita). Per la teoria analizzata questo modello dovrebbe avere risultati migliori rispetto al precedente (in discesa)



6.4.1 Controllo con il solo Feed-Back (Ad anello chiuso)



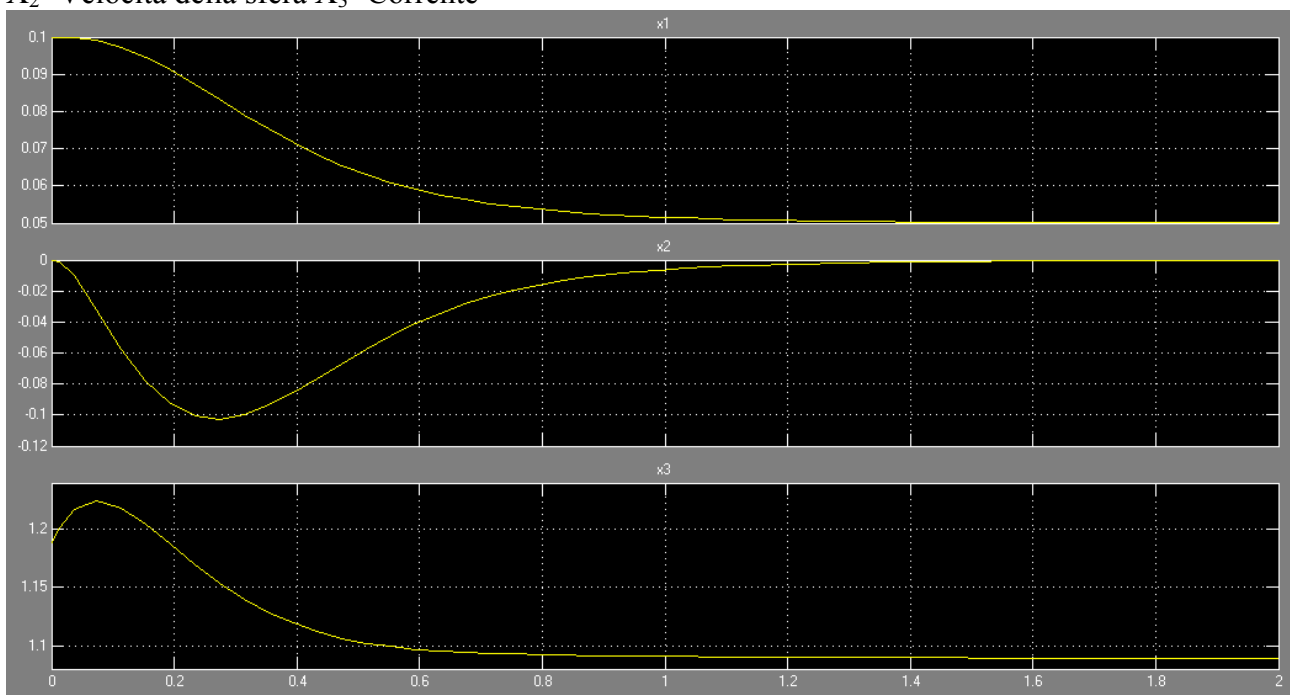
levmasysb.mdl
Simulink model file
63 KB

MODELLO(Sfera che lievita dal basso all'alto)

I modelli risultano uguali ai precedenti, tranne alcuni accorgimenti .

Risultati ottenuti

Dopo le numerose prove effettuate sono stati ottenuti i seguenti risultati: X_1 =Posizione della sfera
 X_2 =Velocità della sfera X_3 =Corrente



- ✓ X_1 X_2 e X_3 per valori di $t > 1.4$ tendono a valori costanti e si mantengono tali

Osservazione importante per il sistema con solo feed-back:

- ✓ Sia nella prima simulazione sia nella seconda simulazione la sfera raggiunge la posizione finale dopo 1.4 secondi.
- ✓ nel primo sistema la corrente raggiunge un valore massimo di poco sotto 1.2 Ampere e diventa costante a tale valore, nel secondo sistema la corrente raggiunge un valore massimo sopra 1.2 Ampere e si assesta ad un valore sotto 1.1 Ampere

6.4.2 Controllo con la sola azione Feed-Forward

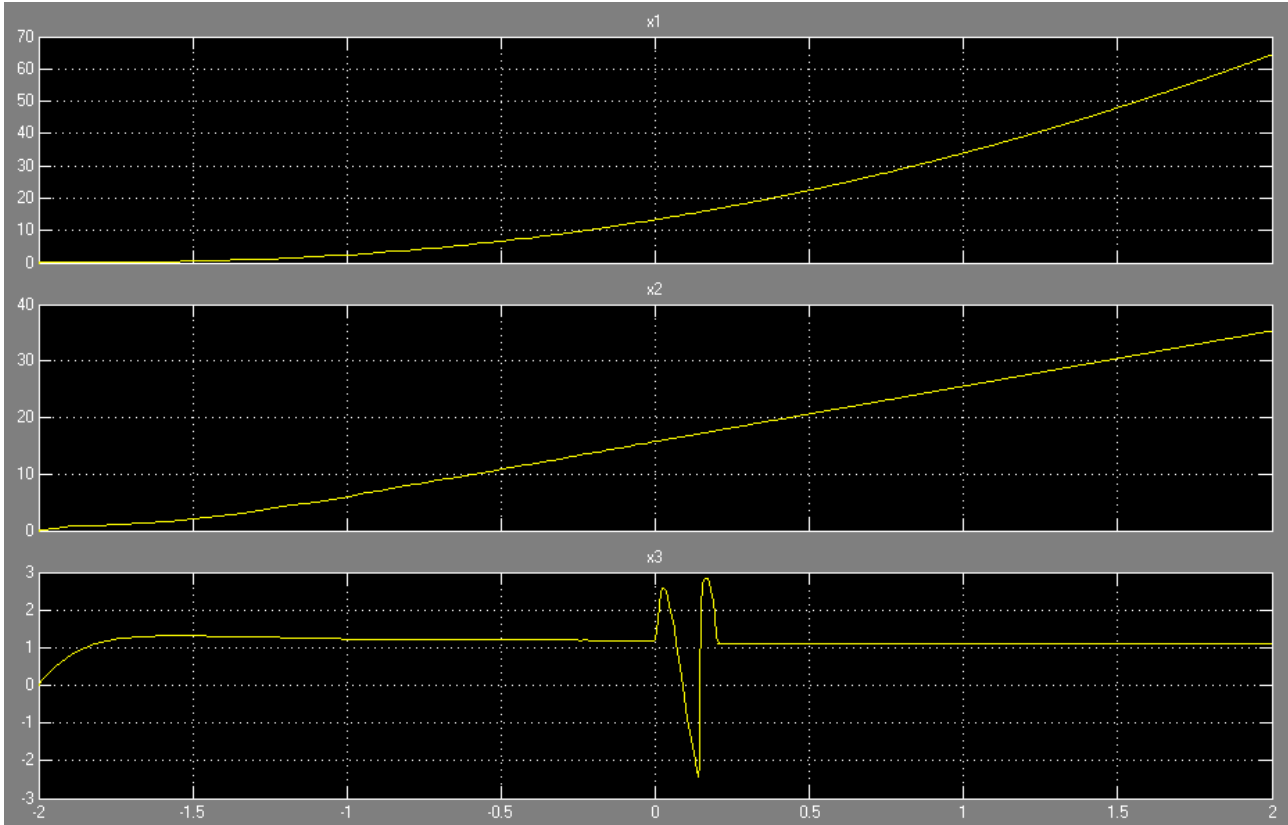


lavmasysf.mdl
Simulink model file
59 KB

MODELLO(Sfera che lievita dal basso all'alto)

Risultati ottenuti

Dopo le numerose prove effettuate sono stati ottenuti i seguenti risultati: X_1 =Posizione della sfera
 X_2 =Velocità della sfera X_3 =Corrente



Notiamo come X_1 e X_2 divergano anche per valori negativi mentre X_3 per $t > 0.5$ si mantenga costante. (Uguale alla precedente trattazione)

6.4.3 Controllo con Feed-Forward e Feed-Back

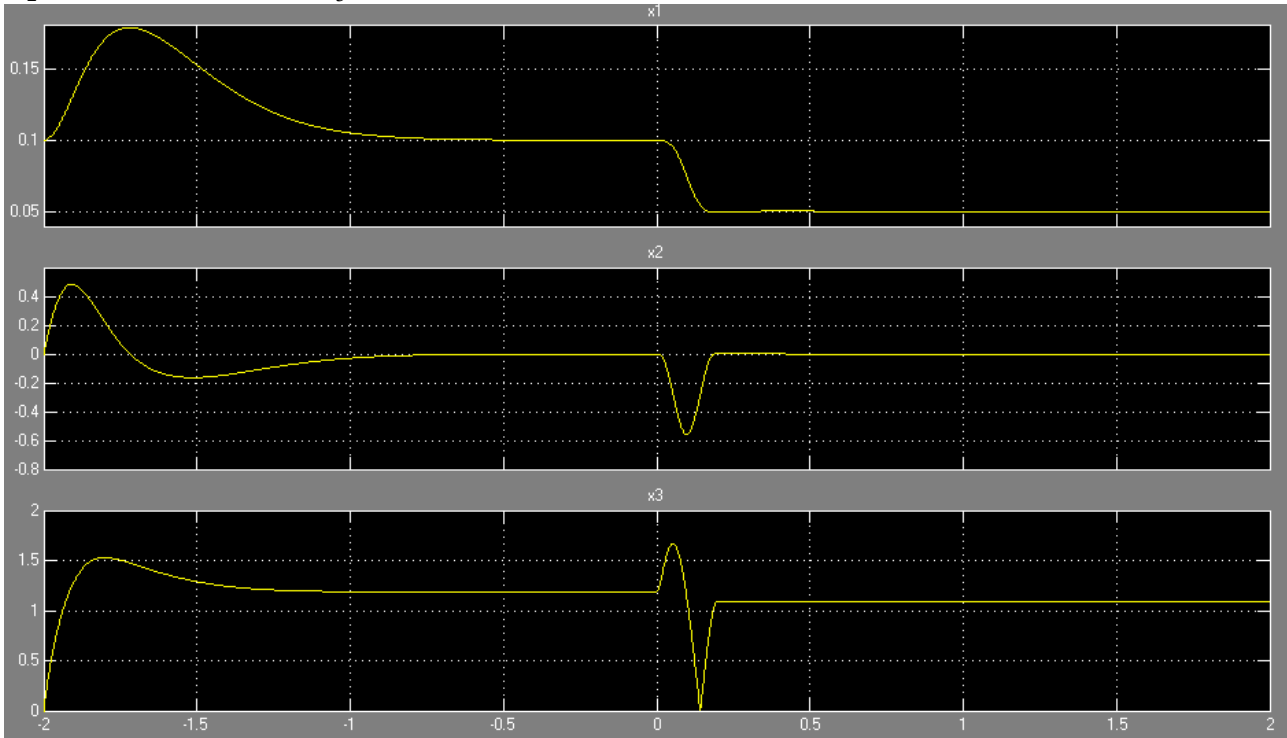


lavmasysfb.mdl
Simulink model file
67 KB

MODELLO(Sfera che lievita dal basso all'alto)

Risultati ottenuti

Dopo le numerose prove effettuate sono stati ottenuti i seguenti risultati: X_1 =Posizione della sfera
 X_2 =Velocità della sfera X_3 =Corrente



Con l'aggiunta dell'azione di feed-forward si ottengono gli stessi miglioramenti del primo sistema per quanto riguarda i tempi di transizioni.

Il controllo:



A differenza della precedente trattazione il picco massimo non raggiunge i 30 volt. mentre quello minimo risulta equivalente : la variazione di tensione del controllo nel caso della sfera che lievita dal basso verso l'alto è maggiore della variazione di tensione del controllo nel caso della sfera che lievita dall'alto verso il basso

7 Alcune funzioni particolari

Per la realizzazione del progetto oltre ai modelli simulink sono state implementate alcune funzioni specifiche.

Tra le più interessanti troviamo quelle per il calcolo della derivata della variabile di feed-forward:

```
%Progetto di Sistemi non lineari LEVITATORE MAGNETICO%
%----AUTORI:ANTONIO DI FLURI E MALTRAVERSI MARCO----%
function [ dx2d ] = dx2dfunc( t,tau )
%derivata della seconda variabile di feed-forward

if(isa(t,'sym') | isa(tau,'sym'))
    dx2d = 42/tau.^7*(-t.^5+5/2*tau*t.^4-2*tau.^2*t.^3+1/2*tau.^3*t.^2);
else
    if(t<0)
        dx2d = 0;
    elseif(t>tau)
        dx2d = 0;
    else
        dx2d = 42/tau.^7*(-t.^5+5/2*tau*t.^4-2*tau.^2*t.^3+1/2*tau.^3*t.^2);
    end
end
end
```

La funzione init che oltre a caricare i parametri utili al progetto calcola la formula di akerman e assegna i punti di equilibrio del modello.

```
%Inizializzazione variabili del modello
clear;%ripulisco il workspace
%costanti del problema
ind = 1; %induttanza (H)
res = 10; %resistenza (Ohm)
katr = 0; %attrito
mas = 0.1; %massa (Kg)
mu = 2; %(1/metri)
y = 0.05; %metri;
g = 9.80665; %accelerazione di gravità (metri/sec*sec);

%variabili del problema
syms x1 x2 x3 u real; %variabili di stato del modello
syms x1e x2e x3e ue real; %all'equilibrio
syms x1i x2i x3i real; %stato iniziale
syms x1f x2f x3f real; %stato finale
syms t tau k real; %il tempo ,il tau e il k del polinomio di transizione

%inizializzazioni importanti per la SIMULAZIONE
tau = 0.19572072; %il tau del polinomio di transizione (valore minimo di tau che porta la corrente ad un minimo di 0)
k=3; %var. di stato x1 di ordine 3 (derivata terza continua)

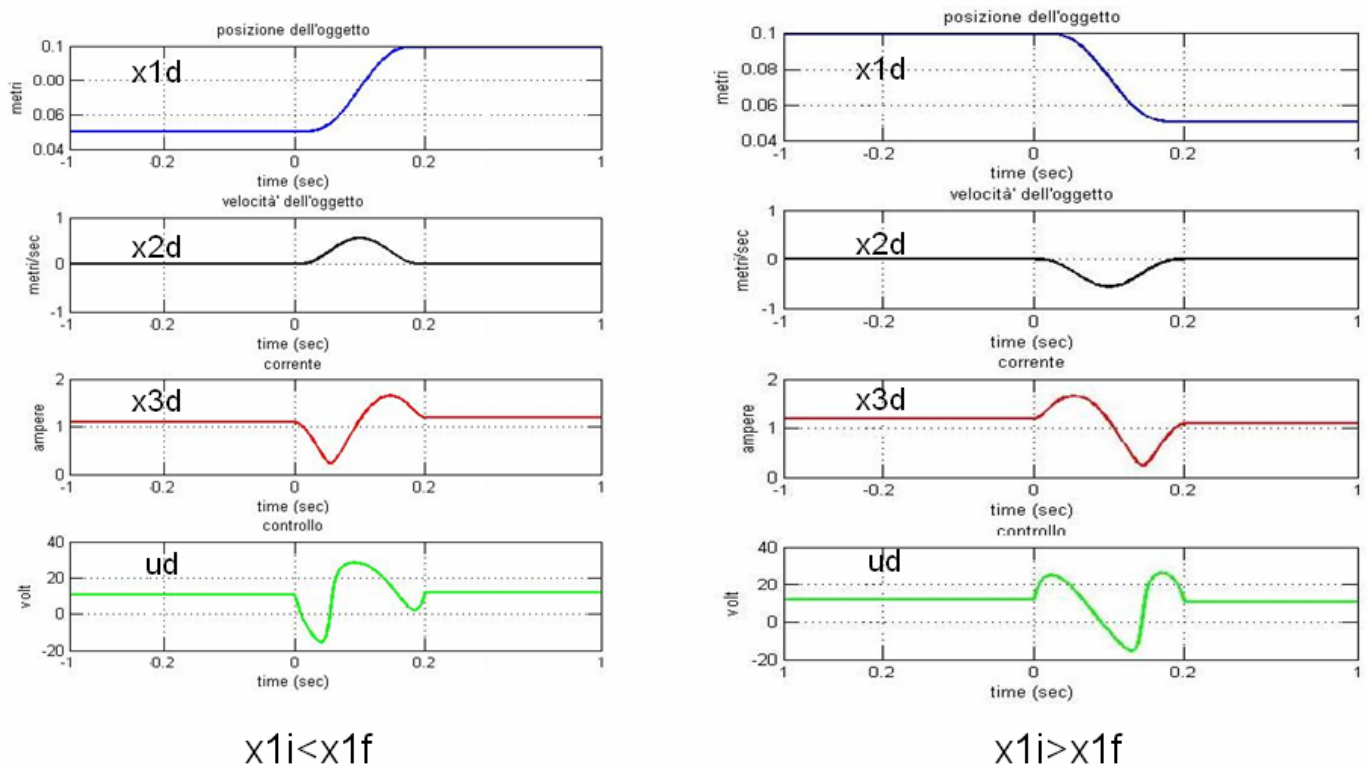
f1=x2;
f2=-(katr/mas)*x2+g-((ind*mu*(x3)^2)/(2*mas*(1+mu*x1)^2));
f3=-(res/ind)*(1+mu*x1)*x3+(mu/(1+mu*x1))*x2*x3+((1+mu*x1)/ind)*u;
f = [f1;f2;f3];
x = [x1;x2;x3];
JA = jacobian(f,x);
JB = jacobian(f,u);
```

Altre funzioni interessanti sono myplot e xplot utilizzate nell'analisi dei grafici e per trovare sperimentalmente il parametro del polinomio di transizione.

8 Conclusioni

Grafici dei risultati con doppio controllo.

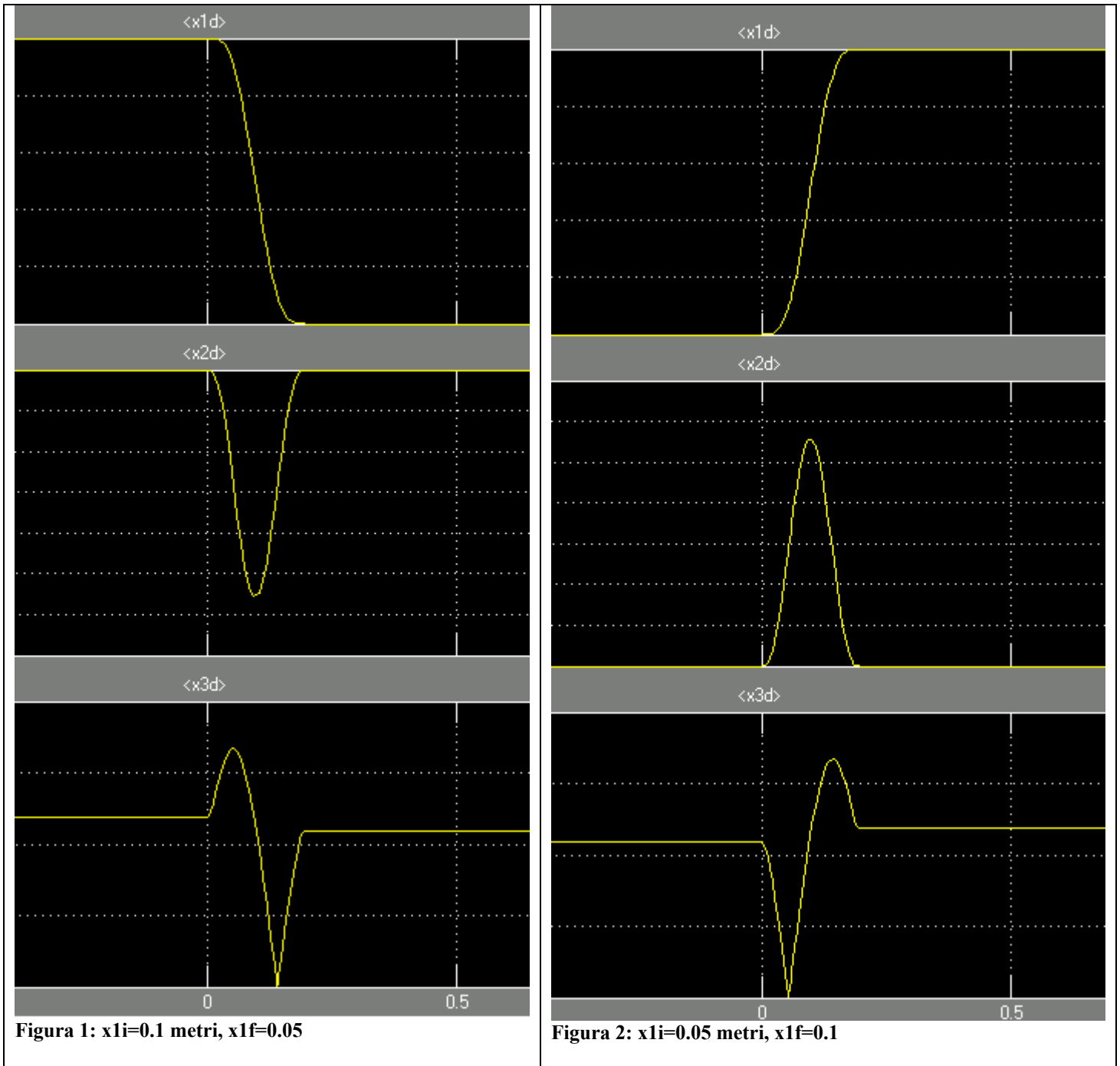
- Levitazione della sfera da un punto iniziale x_{1i} ad un punto finale x_{1f} ($x_{1i} < x_{1f}$)
- Levitazione della sfera da un punto iniziale x_{1i} ad un punto finale x_{1f} ($x_{1i} > x_{1f}$)



Dai grafici ottenuti nelle simulazioni possiamo trarre le seguenti conclusioni:

- ✓ La velocità nel caso $x_{1i} < x_{1f}$ (Sfera che levita dall'alto al basso) aumenta fino a raggiungere un massimo in $\tau/2$ secondi, dopodiché la velocità diminuisce fino ad azzerarsi in τ secondi quando la sfera raggiunge la posizione finale. Da 0 a $\tau/2$ secondi la sfera accelera : al diminuire di τ la transizione deve essere più veloce quindi l'accelerazione deve aumentare , quest'ultima però può essere al massimo uguale alla accelerazione di gravità. Ne risulta che il τ è **limitato**.
- ✓ La velocità nel caso $x_{1i} > x_{1f}$ (Sfera che levita dall'alto al basso) diminuisce (per la convenzione utilizzata nella nostra trattazione l'accelerazione diminuisce per valori negativi , quindi aumenta in modulo) fino a raggiungere un minimo in $\tau/2$ secondi dopodiché la velocità aumenta (diminuisce in modulo) fino ad azzerarsi in τ secondi quando la sfera raggiunge la posizione finale. Da $\tau/2$ a τ secondi la sfera rallenta : al diminuire di τ la transizione deve essere più veloce quindi la sfera deve rallentare .L'unico modo per ottenere questo risultato è sfruttare l' accelerazione di gravità.

In ultima analisi è da evidenziare come i risultati ottenuti concordano con le basi fisiche che regolano la levitazione magnetica , inoltre per ottenere risultati non simmetrici nelle due transizioni si dovrebbe procedere con un approccio diverso utilizzando un differente polinomio di transizione. Grafici delle variabili del modello nei due casi:



Bibliografia

Per studiare in modo approfondito il modello ci siamo documentati attraverso diverse fonti:

1. DavidL Trumper, *Linearizing Control of Magnetic Suspension System* – 2002 .
2. Marco Mazzurelli, *Studio di una sospensione magnetica* – 1995 (Tesi di Laurea).
3. Aurelio Piazzì e Antonio Visiol, *Optimal noncasual set-point regulation of scalar systems* .
4. Static Levitation , esperimenti sulla levitazione e sui superconduttori (Appunti di sperimentazione di chimica/fisica).