

Capitolo 4

Risultati delle simulazioni

4.1 Scenari simulati

In questo lavoro di tesi è stato simulato il funzionamento del sistema di controllo della velocità angolare ω di un motore elettrico a corrente continua proposto nel capitolo 3.

Lo scenario simulato presenta una topologia molto semplice (figura 4.1) costituita da due nodi che svolgendo rispettivamente la funzione di plant e controllore sono collegati da una linea full-duplex a 5 Mbit con ritardo di 1 ms.

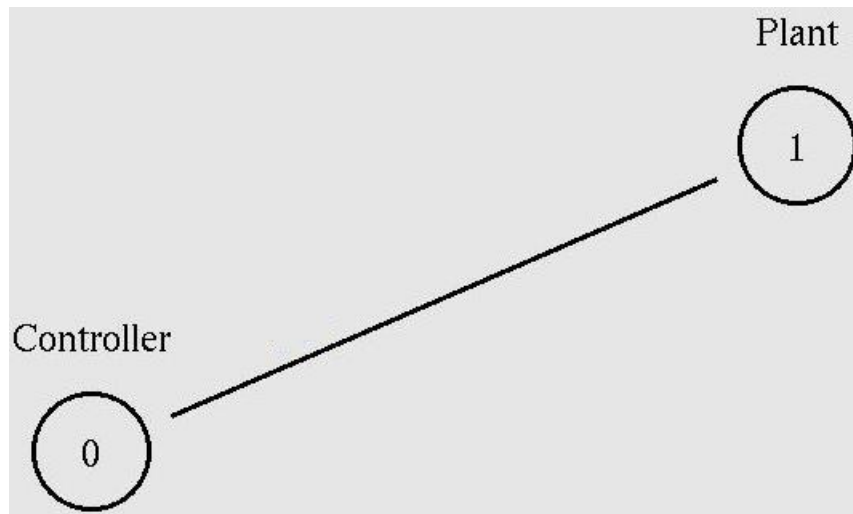


Fig. 4.1 – Topologia dello scenario simulato

Inizialmente, le simulazioni di tale scenario sono state rivolte a verificare la corretta implementazione del sistema di controllo e a modificare gli script OTcl in caso di errori. Infatti, il funzionamento del sistema è stato simulato con gli script OTcl in NS (vedi appendice B) e con un modello in MATLAB[®] riportato in figura 4.2, in cui i parametri a_1 , a_2 e a_3 sono stati calcolati nel capitolo 2.

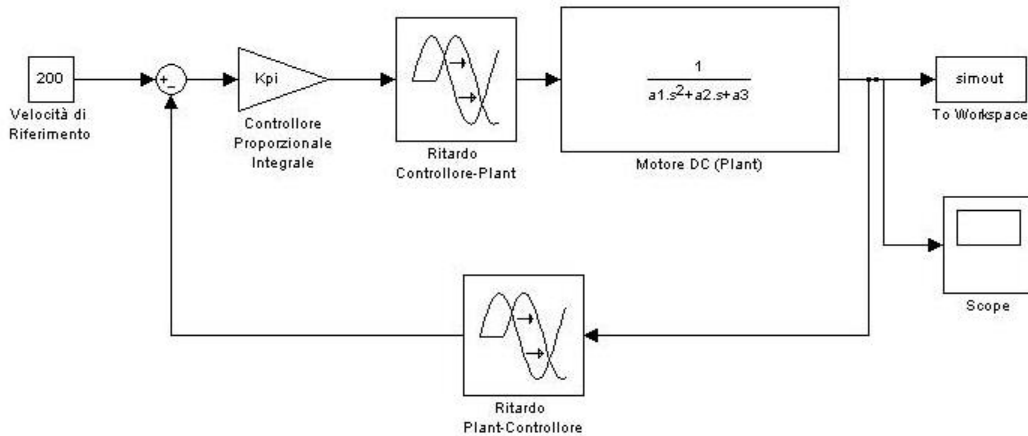


Fig. 4.2 – Modello della simulazione in MATLAB®

Il valore del ritardo τ inserito nelle simulazioni in MATLAB®, sia sul ramo diretto che su quello di retroazione, è stato calcolato considerando una linea di capacità di 5 Mbit con un ritardo di 1 ms e la dimensione del pacchetto NCS di 84 Byte:

$$\tau = \frac{84 \cdot 8}{5 \cdot 10^6} + 0.001 = 0.0011344 \cdot 10^6 = 1.1344ms$$

Al contrario, per le simulazioni con NS non è necessario calcolare i ritardi poiché è sufficiente inserire i parametri della linea nello script da simulare e il calcolo viene effettuato automaticamente dal simulatore di rete.

Inoltre le prime simulazioni sono servite anche per determinare i valori ottimali di K_p e K_I e per valutare l'intervallo opportuno di schedulazione della funzione `sample`.

Successivamente, utilizzando la medesima topologia della rete, si sono analizzate le prestazioni del sistema di controllo basato su rete in presenza di errori sul link e dei variazioni di ritardi di propagazione della linea.

4.2 Verifica della corretta implementazione in NS

In questa prima fase setteremo i parametri cruciali del sistema al fine di verificare la precisione dei risultati ottenuti in NS attraverso il confronto dei segnali di uscita ricavati dalle simulazioni in MATLAB[®]. In seguito, attraverso il metodo di taratura empirica modificheremo i parametri del controllore, sia in NS che in MATLAB[®], al fine di raggiungere, a regime, la velocità angolare di riferimento del motore DC (nel nostro caso 200 rad/sec).

In figura 4.3 è riportato il grafico dell'uscita del sistema ottenuto con MATLAB[®] utilizzando $K_p = 1$ e $K_I = 0$.

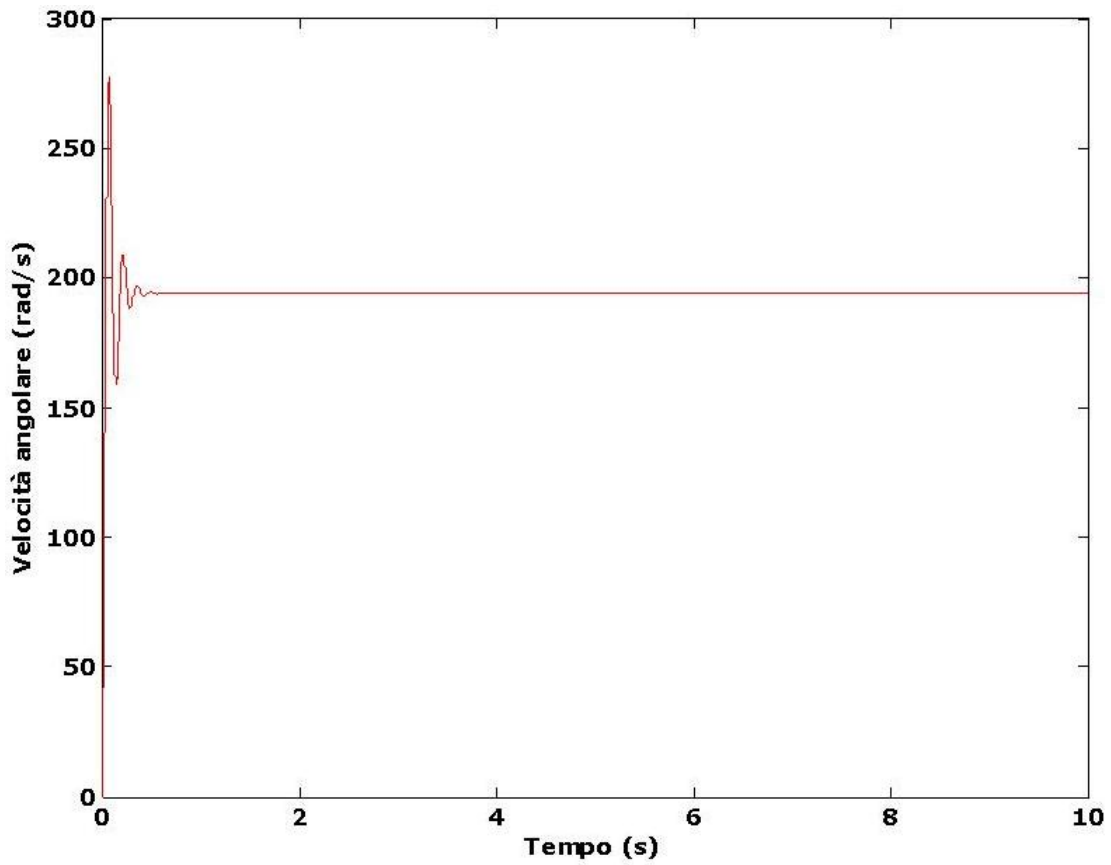


Fig. 4.3 – Andamento dell'uscita ottenuto in MATLAB® con $K_p = 1$ e

$$K_i = 0$$

Lo scenario considerato, con le stesse caratteristiche, è stato simulato con il Network Simulator ottenendo come risultato l'andamento dell'uscita riportato in figura 4.4.

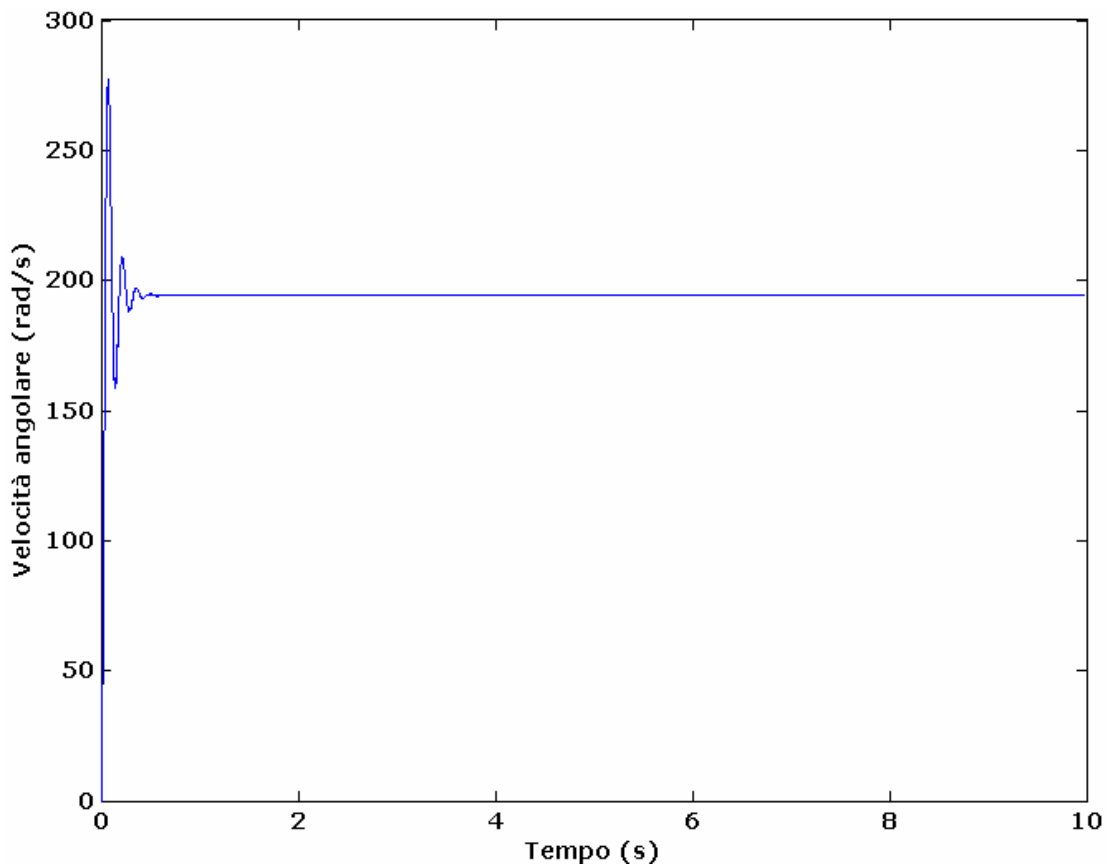


Fig. 4.4 – Andamento dell'uscita ottenuto in NS con $K_p = 1$ e

$$K_i = 0$$

Come si evince dai grafici, l'implementazione effettuata nello script OTcl è corretta poiché fornisce gli stessi risultati che si ottengono anche attraverso le simulazioni in MATLAB®. Continueremo, però, ad effettuare le simulazioni con entrambi i software al fine di verificare che l'esattezza dello script in NS non venga messa in discussione al variare dei parametri della

simulazione. Si nota dai grafici che la risposta del sistema si assesta intorno ai 190 rad/sec.

Si è, a questo punto, eseguita una taratura empirica del controllore, cercando il valore critico del coefficiente di proporzionalità K_p , il valore, cioè, per cui l'uscita del sistema è al limite della stabilità. Il valore di K_p è, quindi, il valore per cui il nostro sistema diventa un oscillatore puro. Si è man mano iniziato ad aumentare il valore del coefficiente di proporzionalità in cerca della condizione critica cominciando con $K_p = 3$ e $K_i = 0$. L'uscita in MATLAB® è stata riportata in figura 4.5.

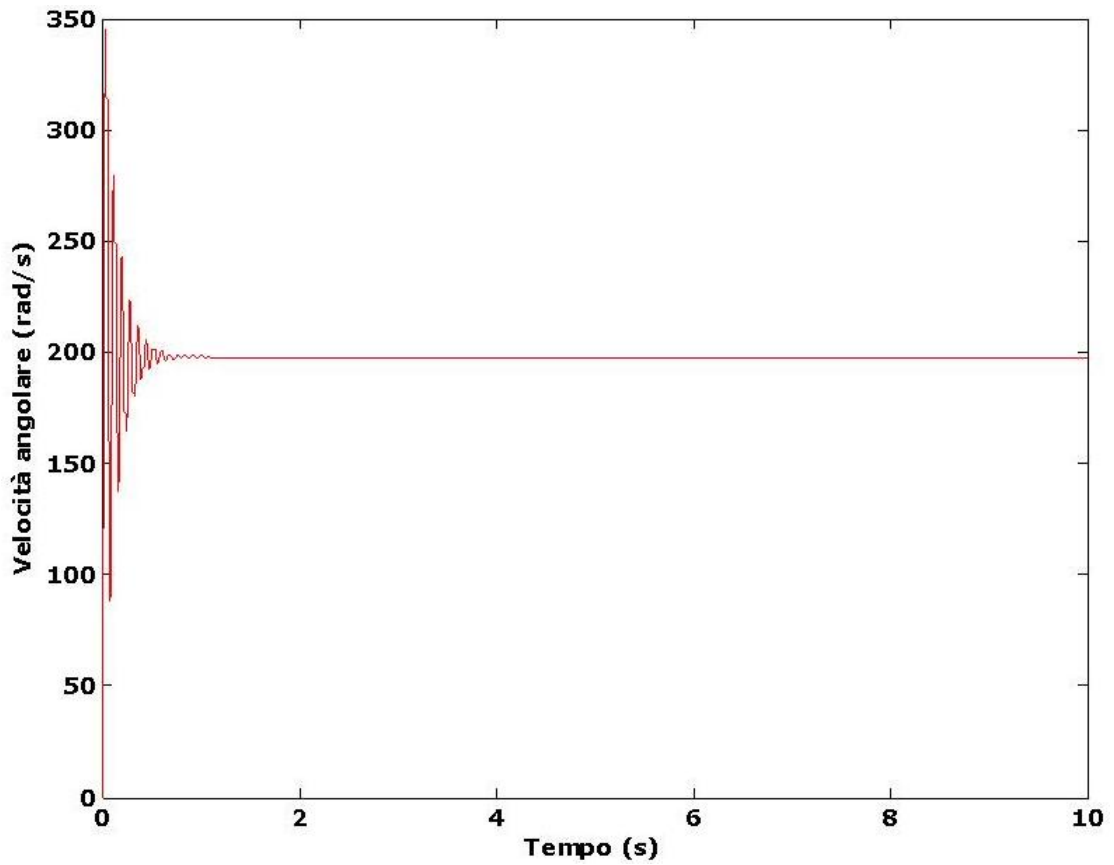


Fig. 4.5 – Andamento dell'uscita ottenuto in MATLAB® con $K_p = 3$ e $K_i = 0$

In figura 4.6 è presente la simulazione effettuata in NS con gli stessi parametri.

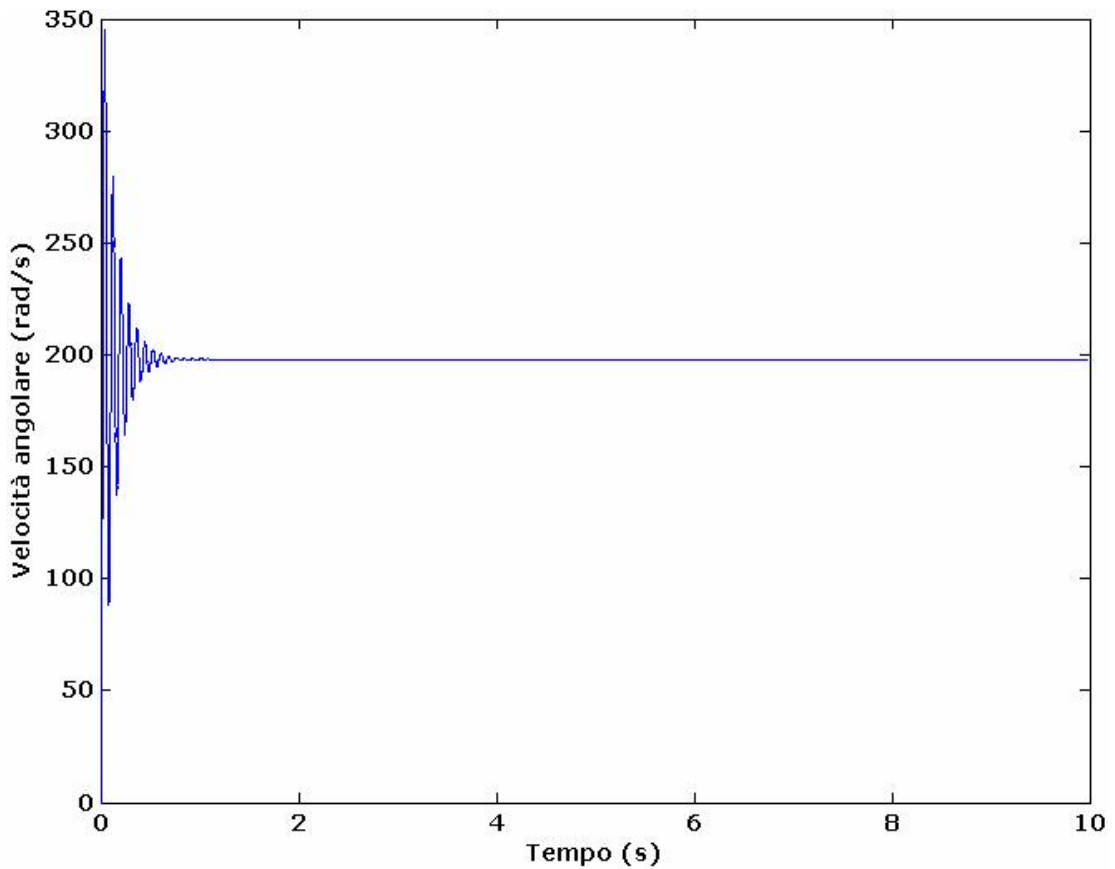


Fig. 4.6 – Andamento dell'uscita ottenuto in NS con $K_p = 3$ e

$$K_i = 0$$

Anche analizzando questi risultati si può affermare che l'implementazione del sistema fatta in NS risulta corretta.

La cosa evidente ed importante che viene fuori dai grafici è l'andamento, durante il transitorio, dell'uscita che comincia ad essere più lungo ed a presentare delle sovraelongazioni maggiori.

Il sistema non è ancora in condizione critica, ne in condizione

di instabilità, dobbiamo quindi aumentare ancora la costante di proporzionalità. Tentiamo con $K_p = 5$ e $K_i = 0$. In figura 4.7 è rappresentata l'uscita calcolata da MATLAB[®] con $K_p = 5$ e $K_i = 0$ ed la figura 4.8 propone l'andamento della velocità angolare ottenuto con la simulazione in NS.

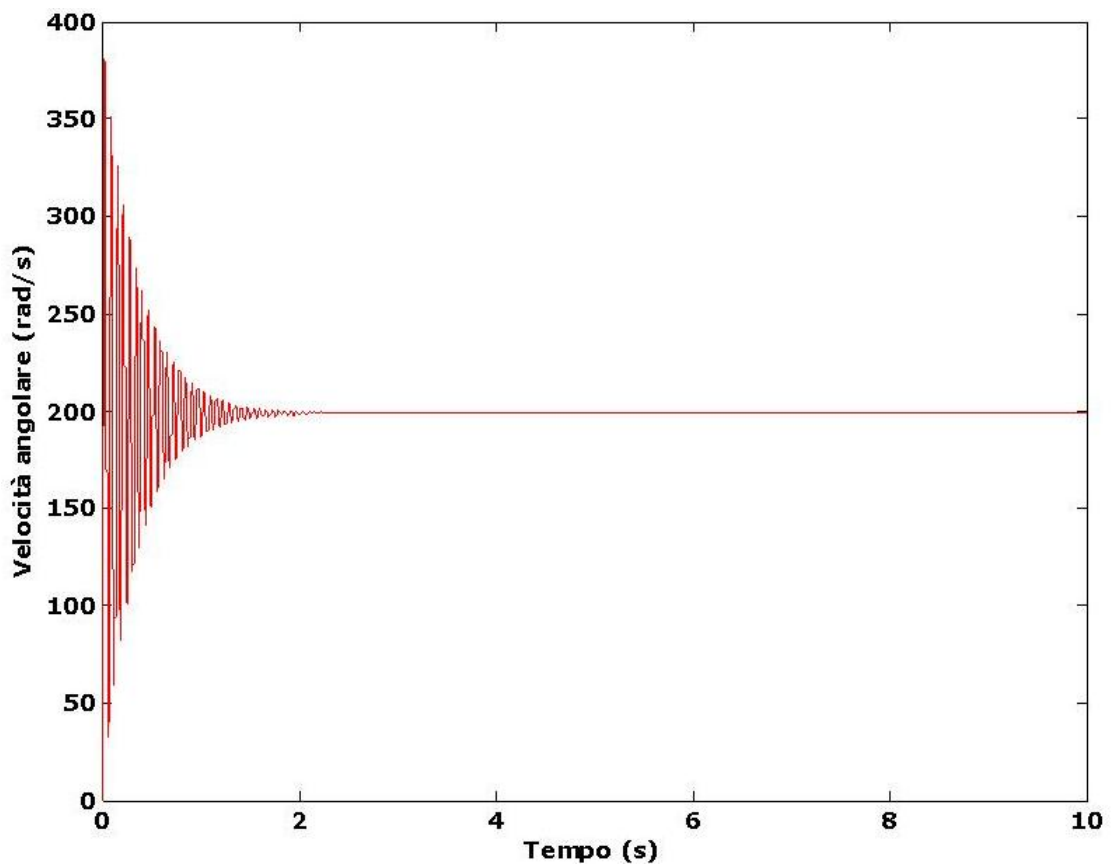


Fig. 4.7 – Andamento dell'uscita ottenuto in MATLAB[®] con $K_p = 5$ e $K_i = 0$

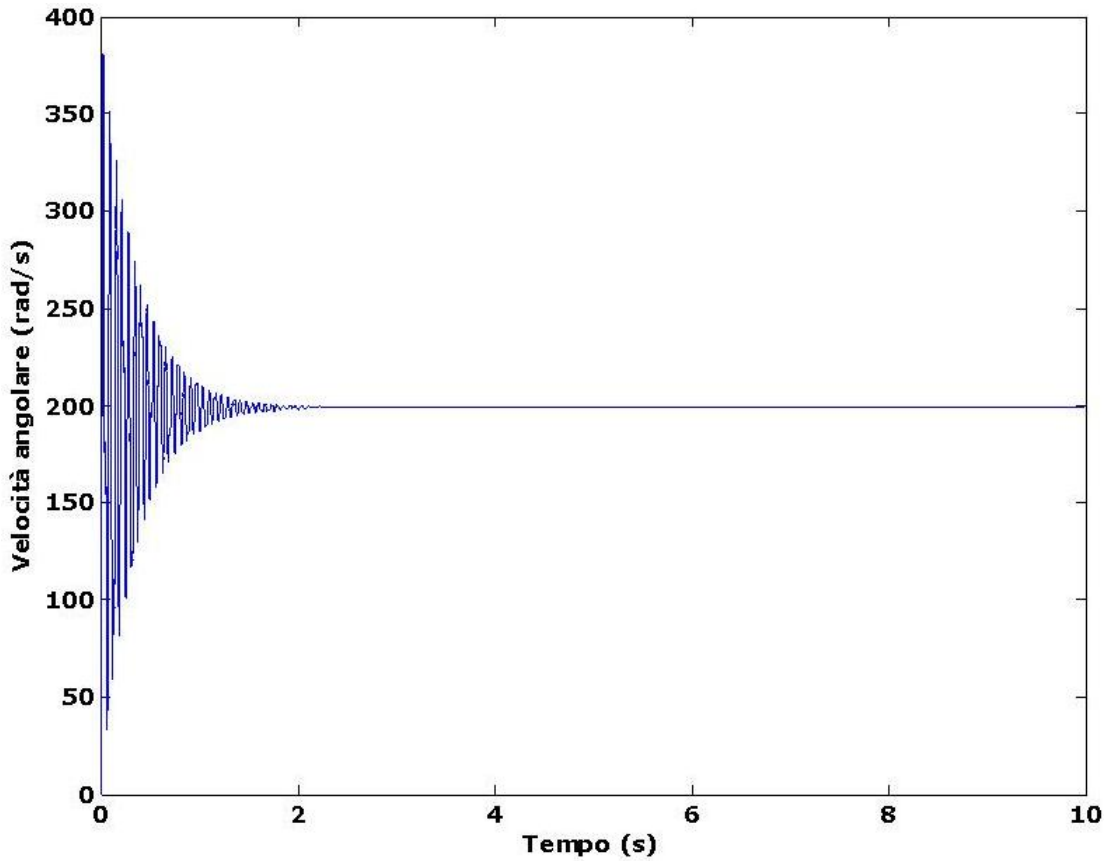


Fig. 4.8 – Andamento dell'uscita ottenuto in NS con $K_p = 5$ e

$$K_i = 0$$

Le figure, praticamente identiche a dimostrare la correttezza delle implementazione dello scenario, mostrano un andamento del transitorio sempre peggiore il che sta ad indicare un avvicinamento alla condizione critica anche se il sistema si presenta ancora in condizione di stabilità.

Aumentando ancora il valore di K_p si è riusciti a mandare il sistema in condizione di instabilità. Il grafico relativi a questa condizione ricavati con MATLAB[®] è riportato in figura 4.9.

La costante di proporzionalità usata è $K_p = 7$.

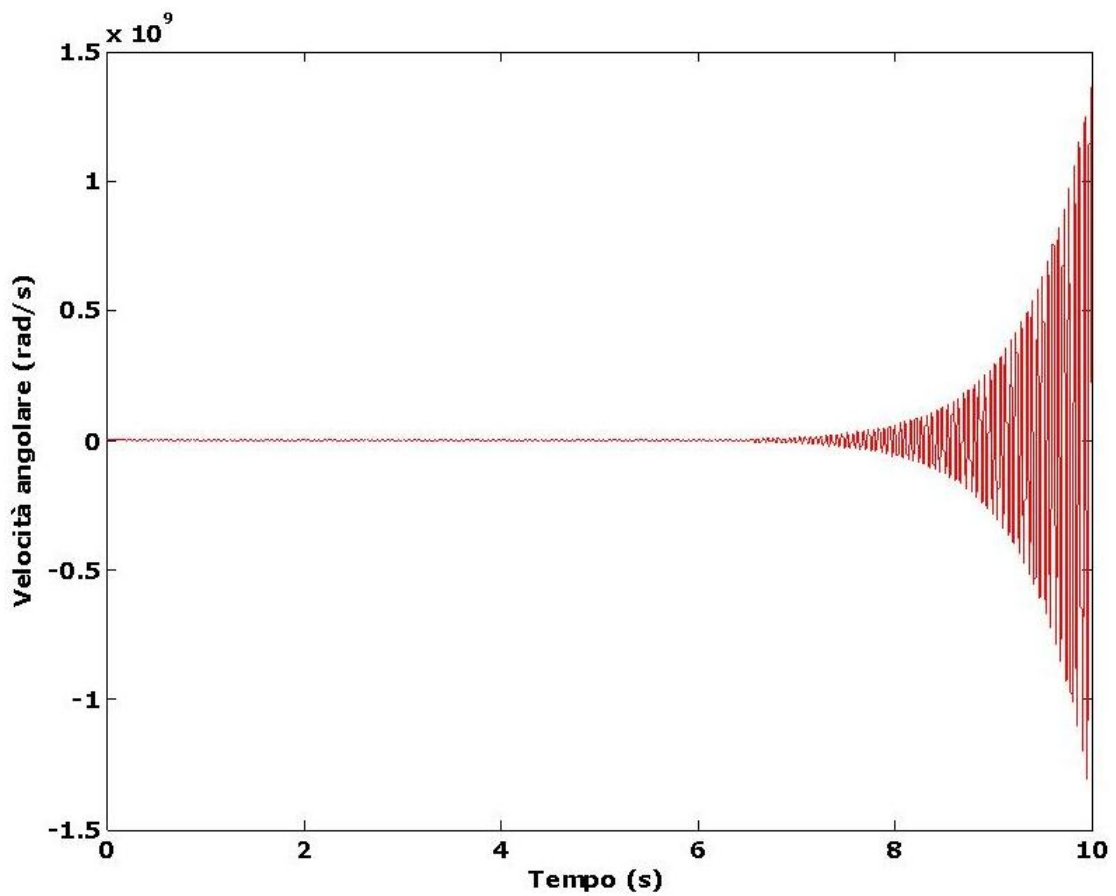


Fig. 4.9 – Andamento dell'uscita ottenuto in MATLAB[®] con $K_p = 7$ e $K_i = 0$

In figura 4.10 è mostrato l'andamento dell'uscita calcolata con i valori ottenuti dalla simulazione in NS sempre per un $K_p = 7$ e $K_I = 0$. Anche in questo caso si è ottenuto lo stesso risultato simulando il sistema sia con il Network Simulator che con MATLAB®.

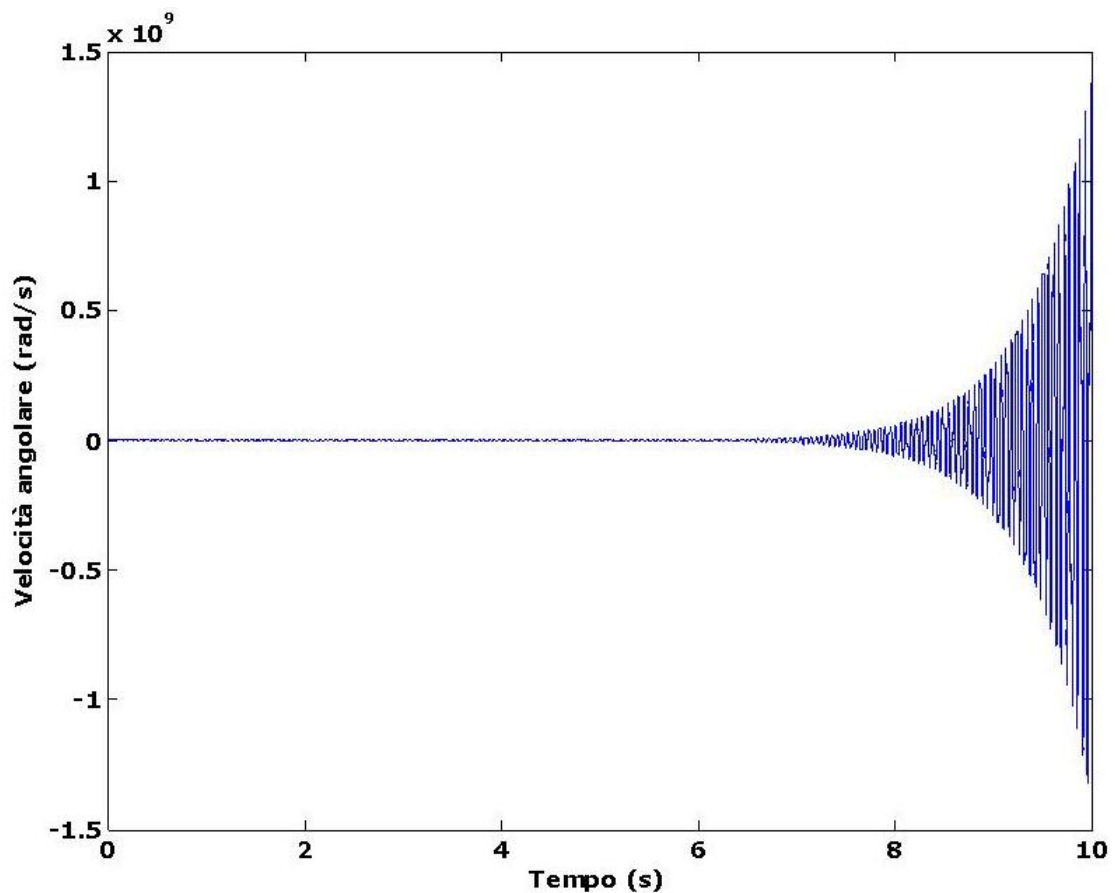


Fig. 4.10 – Andamento dell'uscita ottenuto in NS con $K_p = 7$ e

$K_I = 0$

Il valore critico di K_p sarà, come si deduce dall'andamento

dell'uscita, sicuramente minore di 7. In figura 4.11 è visibile l'andamento dell'uscita relativa alla simulazione effettuata in MATLAB[®] per un valore del coefficiente di proporzionalità $K_p = 6$.

Il sistema risulta stabile, il che ci porta a concludere che il valore critico di K_p sarà:

$$6 < K_p < 7$$

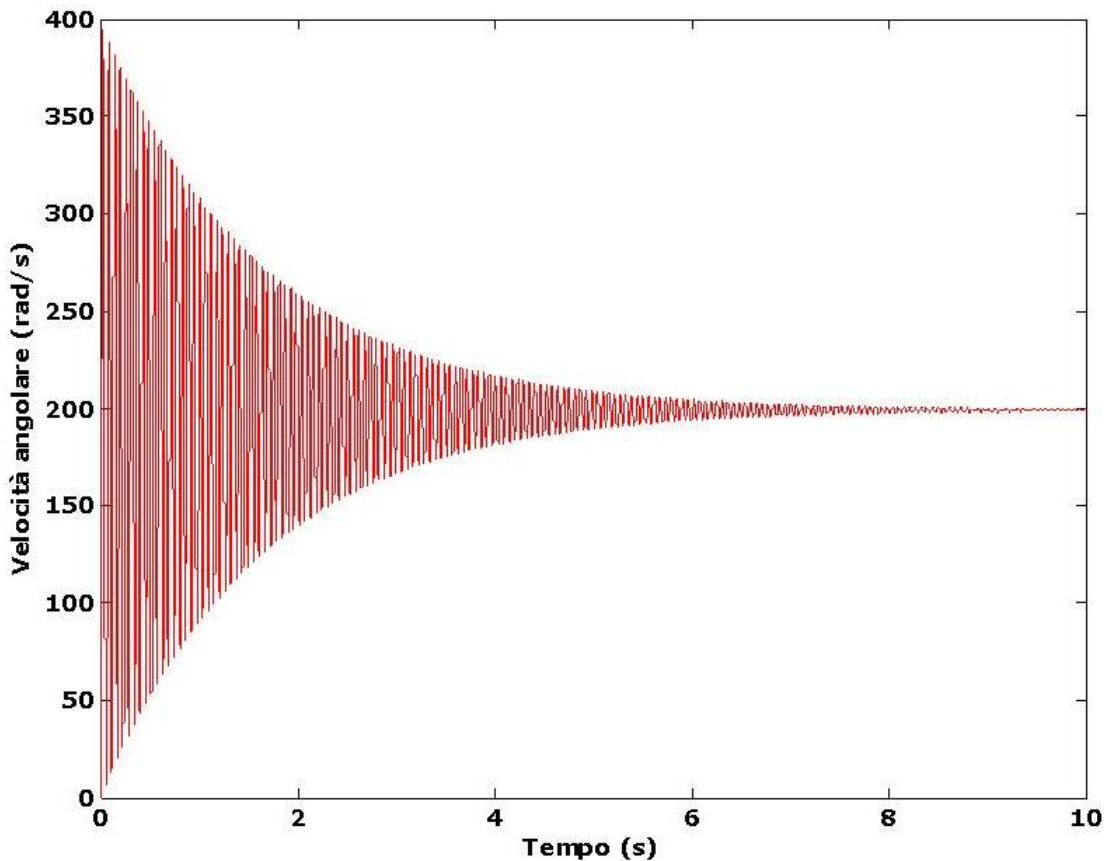


Fig. 4.11 – Andamento dell'uscita ottenuto in MATLAB[®] con $K_p = 6$ e $K_I = 0$

Come in precedenza è stata effettuata la stessa simulazione anche con il Network Simulator.

L'andamento dell'uscita ottenuto dai risultati del NS risulta ancora coincidere con quello ricavato dai risultati generati con il MATLAB[®]. Il grafico relativo ai risultati delle simulazioni in NS è riportato in figura 4.12.

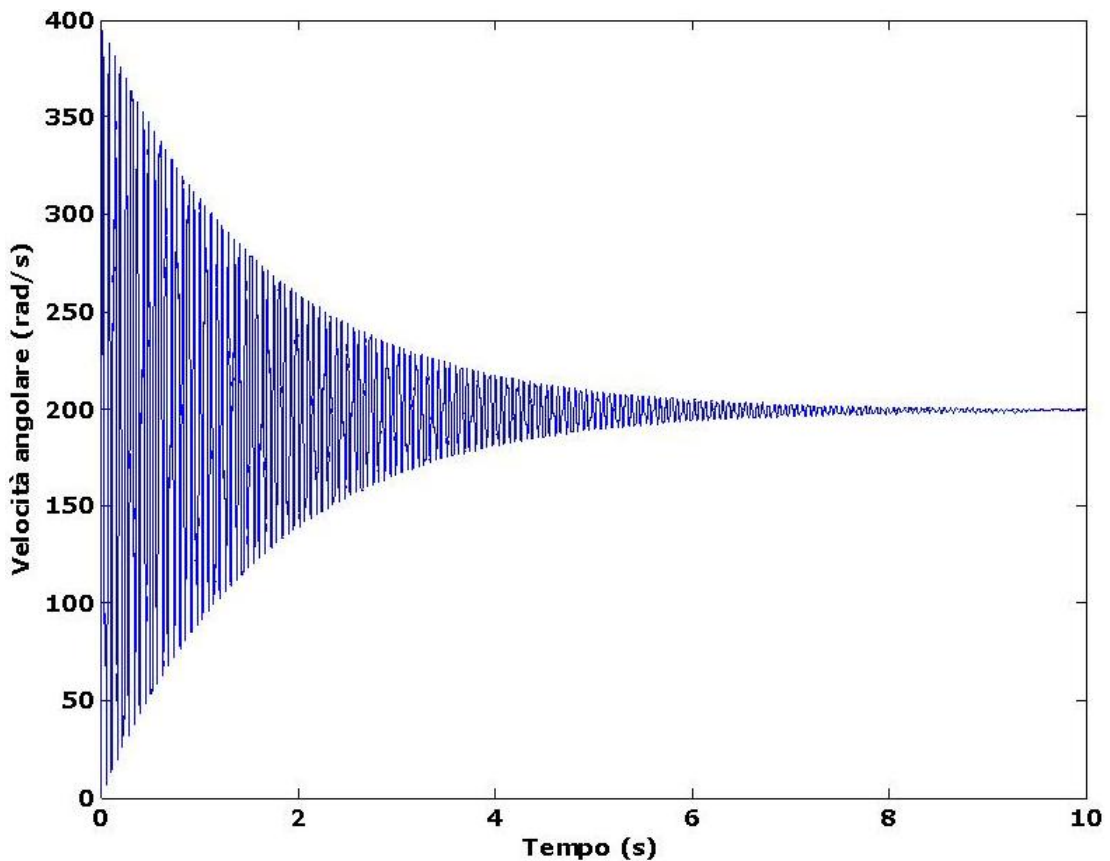


Fig. 4.12 – Andamento dell'uscita ottenuto in NS con $K_p = 6$ e

$$K_i = 0$$

Il valore preciso di K_p che fa assumere al nostro sistema le caratteristiche di un oscillatore puro è $K_p = 6.273$ ed i grafici relativi a questa condizione, effettuati rispettivamente in MATLAB[®] e in NS, sono riportati nelle figure 4.13 e 4.14.

Nelle figure è riportato l'andamento dell'uscita solamente nei primi due secondi di simulazione solo perché fosse più chiara ed evidente la condizione di oscillazione puro, condizione che continua anche per il resto della durata della simulazione.

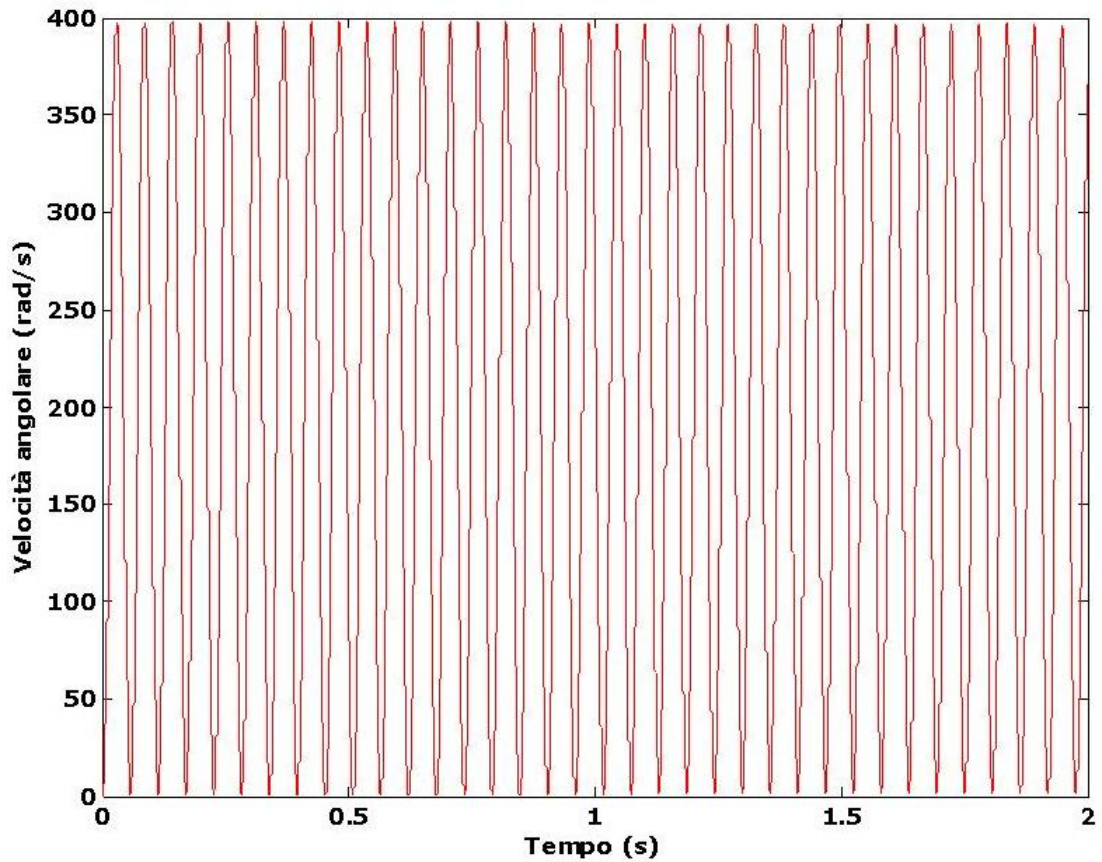


Fig. 4.13 – Andamento dell'uscita ottenuto in MATLAB® con $K_p = 6.273$ e $K_i = 0$

Anche in questo caso i risultati, ottenuti simulando il sistema con due software differenti, coincidono. È da notare l'uscita che si presenta come oscillazione costante intorno al valore di set point fissato, cioè intorno a 200 rad/sec.

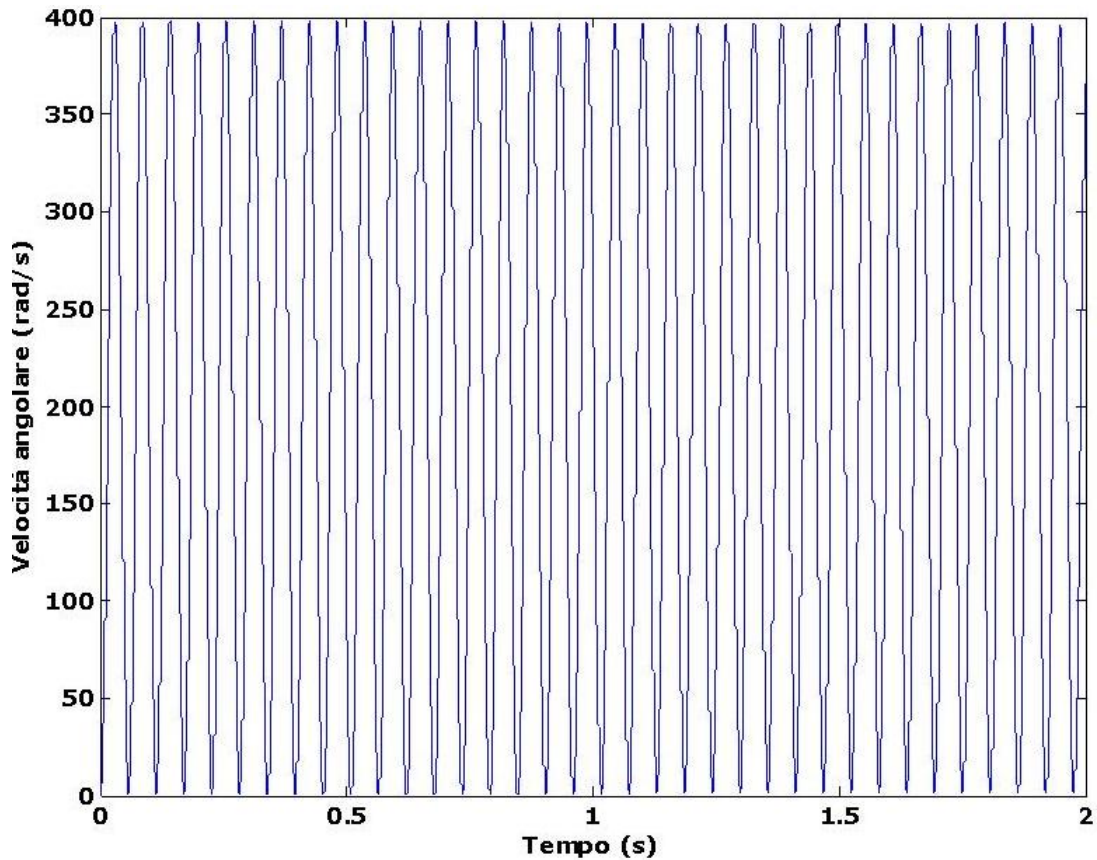


Fig. 4.14 – Andamento dell'uscita ottenuto in NS con $K_p = 6.273$ e

$$K_i = 0$$

Una volta trovato il valore critico di K_p è semplicissimo effettuare la taratura del controllore di tipo P seguendo il criterio di Ziegler-Nichols.

Infatti, secondo il criterio di Ziegler-Nichols, il valore di K_p da utilizzare per un controllore PI (proporzionale-integrale) deve essere

metà del valore critico:

$$K_p = \frac{K_c}{2} = \frac{6.273}{2} = 3.1365.$$

Utilizzando questo valore nelle nostre simulazioni otterremo un'uscita molto prossima al valore di set point fissato, che comunque presenterà un, seppur impercettibile, errore di posizione. Un controllore di tipo P infatti, genera un errore di posizione finito in presenza di un sistema di tipo zero con uno scalino in ingresso.

Per azzerare l'errore di posizione abbiamo implementato un controllore proporzionale-integrale, il cui valore di K_I , ottimale sarà ricavato successivamente con una procedura di taratura empirica. In figura 4.15 è presente l'andamento dell'uscita ottenuto con MATLAB[®] utilizzando il valore della costante di proporzionalità calcolato con il metodo di Ziegler-Nichols.

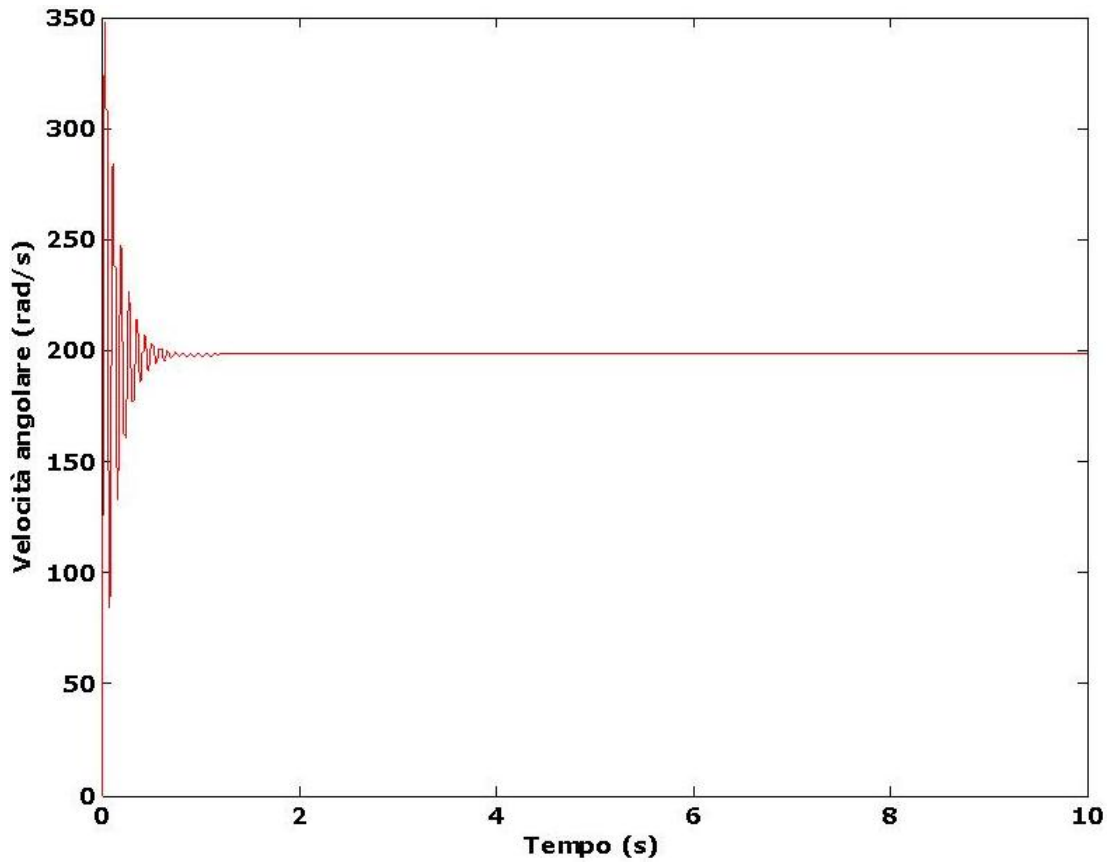


Fig. 4.15 – Andamento dell'uscita ottenuto in MATLAB® con $K_p = 3.1365$ e $K_I = 0$

Gli stessi risultati si ottengono effettuando la simulazione con il Network Simulator. Il grafico ottenuto con questo software è mostrato in figura 4.16.

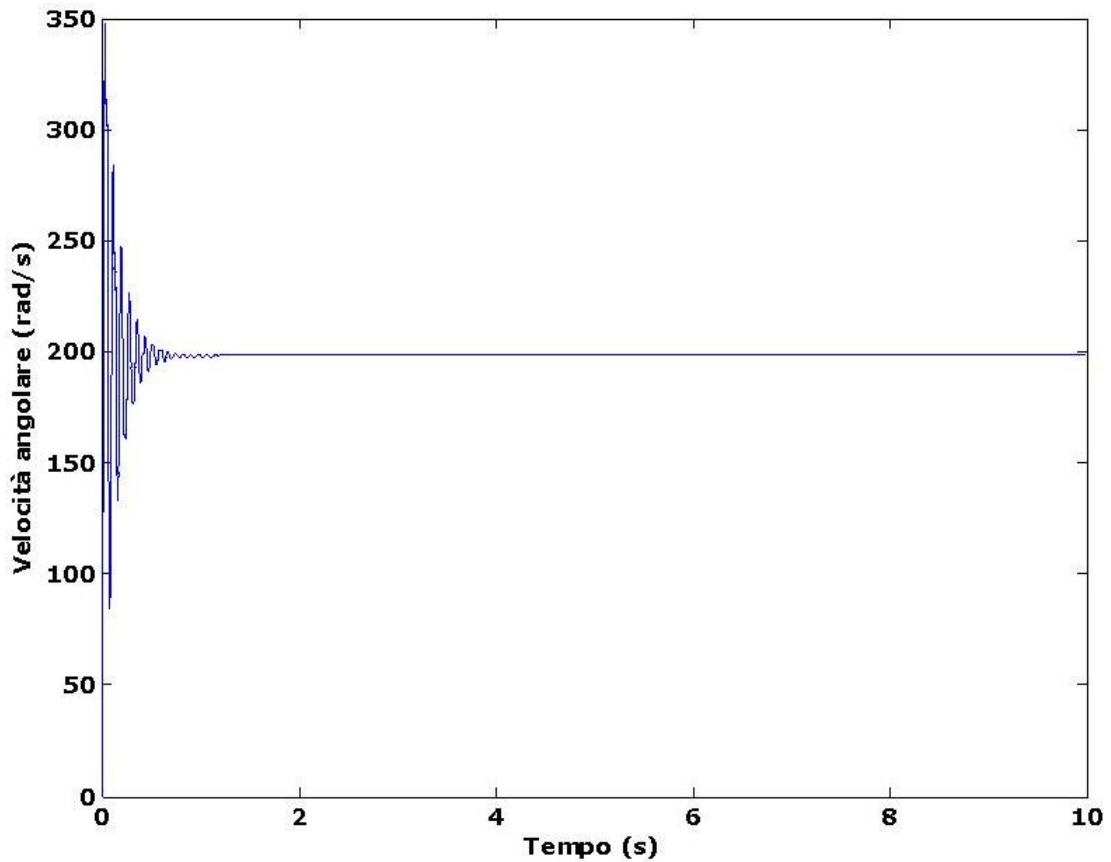


Fig. 4.16 – Andamento dell'uscita ottenuto in NS con $K_p = 3.1365$ e $K_I = 0$

Una volta ricavato il valore ottimale di K_p , analizziamo l'impatto del parametro K_I sulle prestazioni del sistema utilizzando la stessa procedura usata per ricavare K_p .

Simuliamo inizialmente lo scenario considerato utilizzando un controllore PI con $K_p = 3.1365$ e $K_I = 1$. I risultati ottenuti in

MATLAB® e NS sono riportati rispettivamente in figura 4.17 e 4.18.

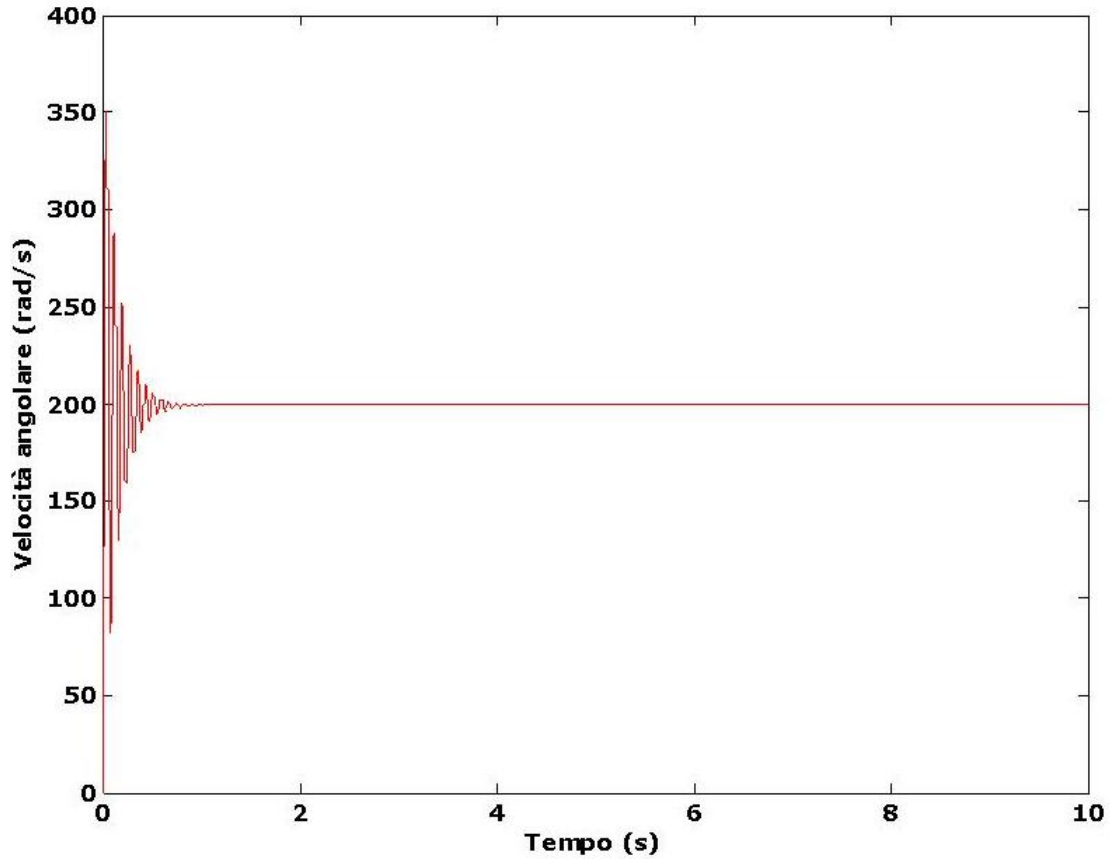


Fig. 4.17 – Andamento dell'uscita ottenuto in MATLAB® con

$$K_p = 3.1365 \text{ e } K_I = 1$$

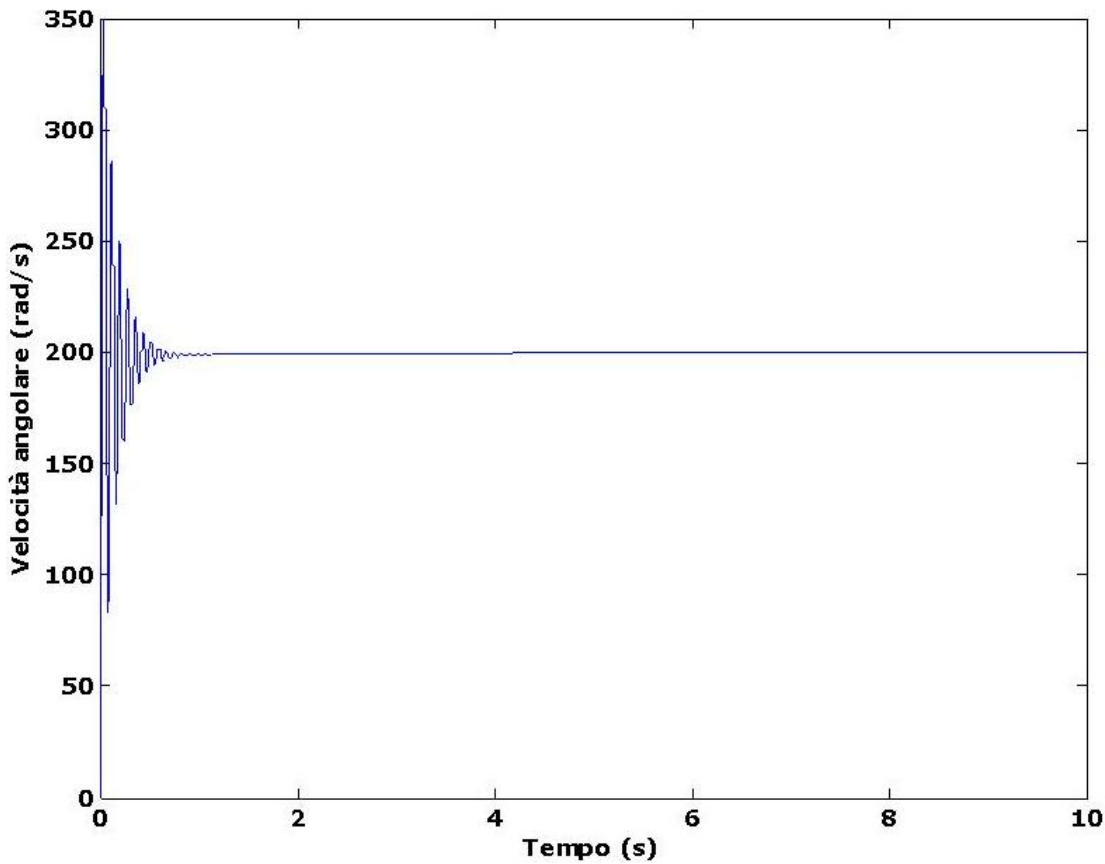


Fig. 4.18 – Andamento dell'uscita ottenuto in NS con $K_p = 3.1365$

e $K_i = 1$

Come si evince dai grafici, l'implementazione effettuata in NS è corretta in quanto i risultati forniti dalle simulazioni in MATLAB® sono identici a quelli ricavati nelle simulazioni in NS. Inoltre, si può notare che da entrambe le simulazioni si ottiene un valore di regime pari a $\omega = 199.93 \text{ rad/sec}$, che è, seppure in maniera impercettibile, minore al valore di 200 rad/sec.

Quindi, incominciamo ad aumentare il valore del coefficiente integrale in cerca del valore ottimale che permette al motore di raggiungere la velocità $\omega = 200 \text{ rad/sec}$. Dalle prossime simulazioni verrà omissa il valore di K_p nella trattazione in quanto supporremo che assuma sempre il valore ottimale $K_p = 3.1365$.

Proseguiamo usando un controllore PI con $K_I = 3$. I risultati ottenuti in MATLAB[®] e in NS sono riportati, rispettivamente, in figura 4.19 e 4.20.

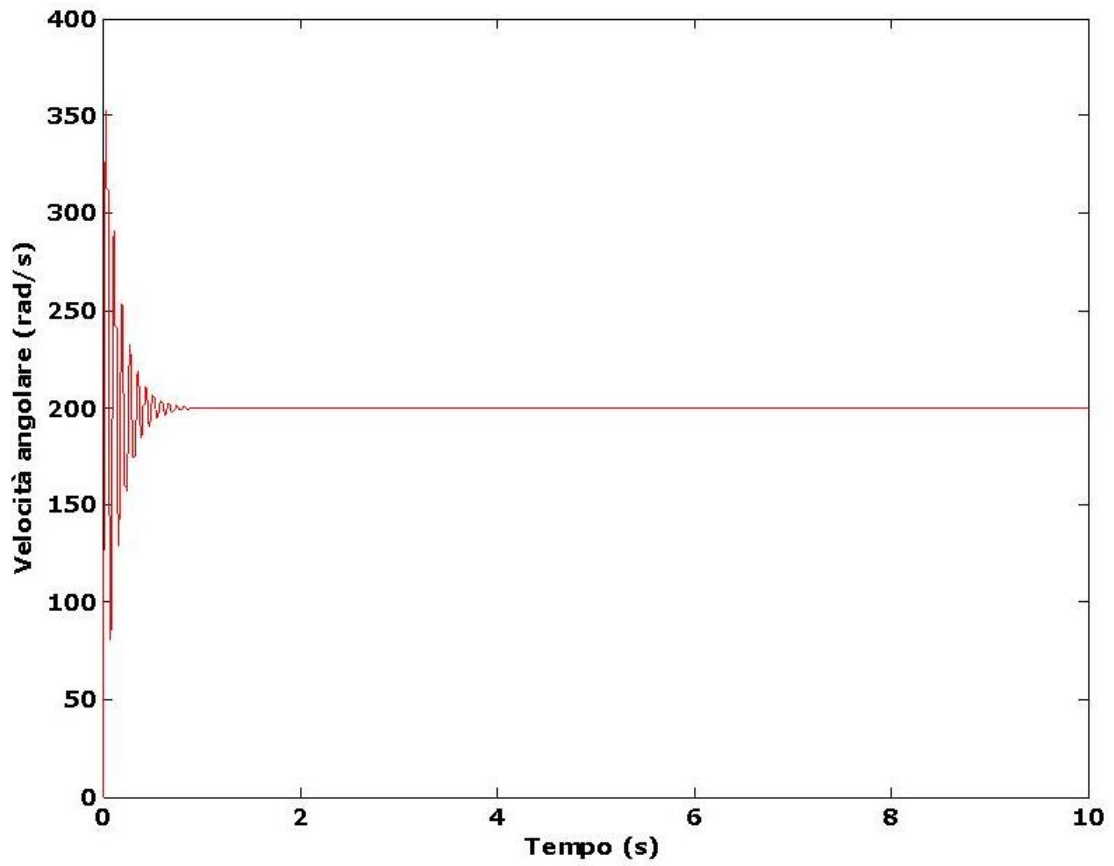


Fig. 4.19 – Andamento dell'uscita ottenuto in MATLAB® con $K_p = 3.1365$ e $K_I = 3$

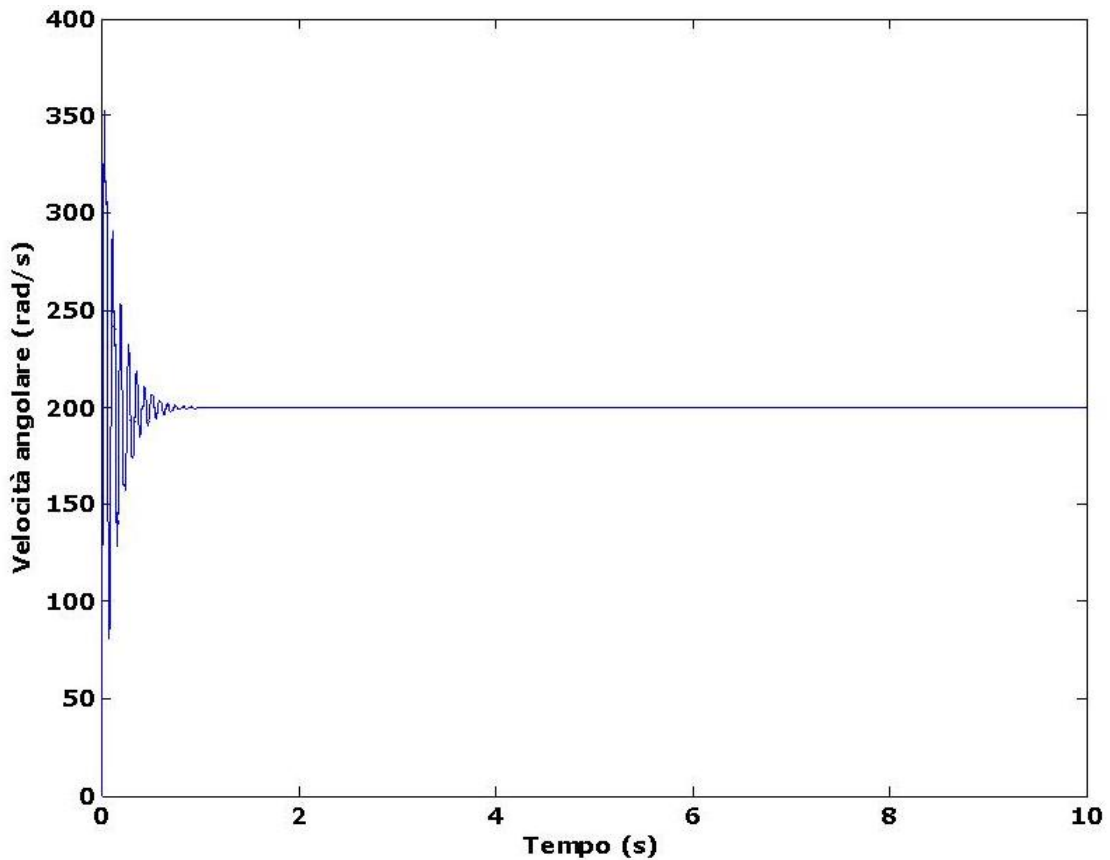


Fig. 4.20 – Andamento dell'uscita ottenuto in NS con $K_p = 3.1365$

e $K_I = 3$

Possiamo vedere come al variare di K_I , i risultati ottenuti da entrambi i software sono identici attestando, in questo modo, la corretta implementazione del modello costruito in NS. Si nota, inoltre, come la velocità angolare a regime $\omega = 199.99 \text{ rad/sec}$ sia molto vicina al valore di 200 rad/sec.

Svolgendo ulteriori indagini si è ricavato il valore ottimale di

K_I . Infatti, per $K_I = 3.57$ si ottiene con entrambi i software una velocità a regime di 200 rad/sec. I risultati ottenuti in MATLAB® e NS sono riportati, rispettivamente, in figura 4.21 e figura 4.22.

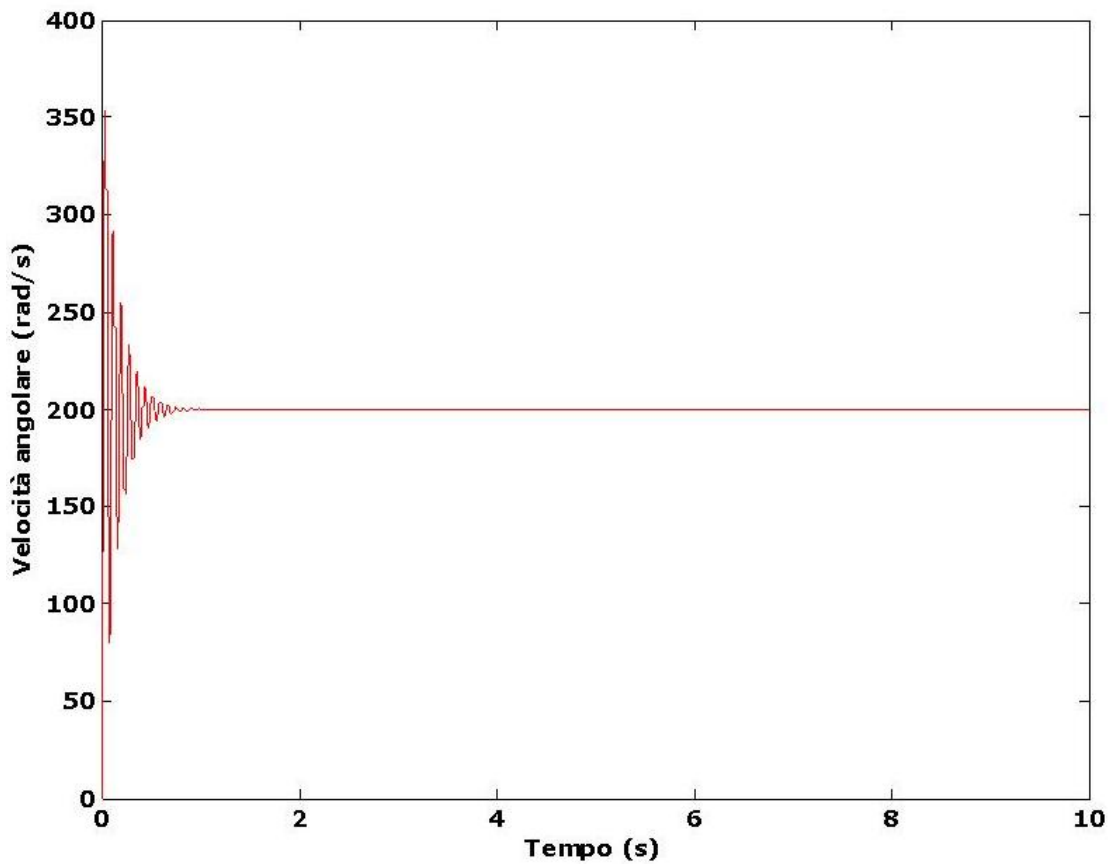
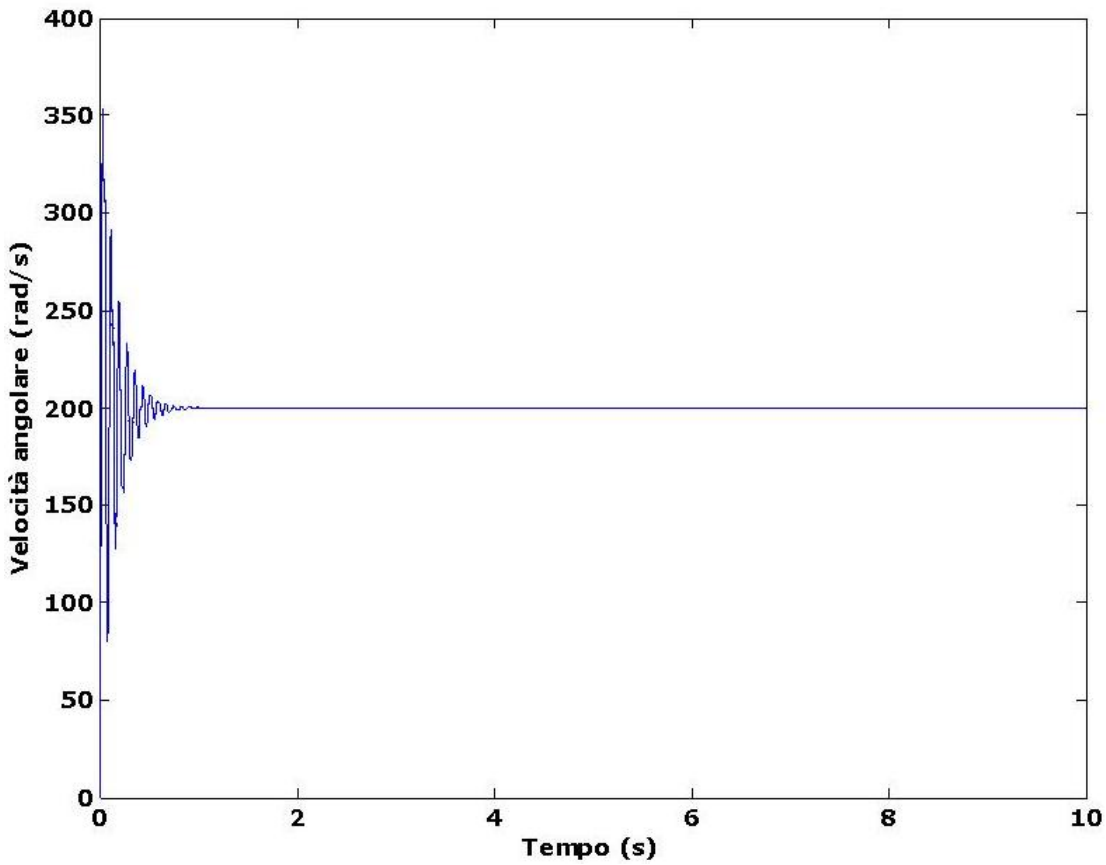


Fig. 4.21 – Andamento dell'uscita ottenuto in MATLAB® con $K_p = 3.1365$ e $K_I = 3.57$



*Fig. 4.22 – Andamento dell'uscita ottenuto in NS con $K_p = 3.1365$
e $K_i = 3.57$*

Come si può notare dalle figure 4.21 e 4.22, l'andamento dell'uscita presenta, durante il transitorio una sovralongazione percentuale pari a 76.62% e un tempo di assestamento al 2% pari a 0.5689 secondi.

4.3 Scenario in presenza di errori sui link

I risultati ottenuti dalle precedenti simulazioni sono stati ricavati ipotizzando che sul link che collega il plant e il controllore non sia presente alcun rumore che possa corrompere i frame trasmessi. Nelle prossime simulazioni, invece, al fine di rendere lo scenario simulato più vicino alla realtà assumeremo che sul canale di trasmissione siano presenti degli errori sui frame trasmessi e studieremo le caratteristiche del sistema al variare del Frame Error Rate. Inoltre, per una più completa analisi del sistema di controllo basato su rete effettueremo le simulazioni variando i ritardi di propagazione della linea di trasmissione al fine di esaminare la robustezza del sistema fisico.

In questa fase, lo scenario verrà simulato esclusivamente con il Network Simulator in quanto, precedentemente, abbiamo verificato la corretta implementazione del modello costruito in NS.

I rumori presenti nelle prossime simulazioni saranno di 2 tipologie: *Uniform* e *Bursty*. Il rumore Uniform è caratterizzato da un Frame Error Rate costante nel tempo. Il rumore Bursty, invece, è caratterizzato da un Frame Error Rate variabile nel tempo. In particolare, il modello di rumore Bursty implementato è il modello di Gilbert, così come è stato già presentato nel capitolo 3.

4.3.1 Scenario in presenza di rumore Uniform

Supponiamo che sul link sia presente un rumore di tipo Uniform. Il nostro studio procederà come segue: analizzeremo la sovraelongazione percentuale e il tempo di assestamento al 2% al variare del Frame Error Rate ipotizzando che la linea presenti un ritardo di propagazione di 1 ms. I valori di FER che sono stati utilizzati per ricavare l'andamento in questione sono 0.0, 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 0.2 e 0.3.

Inoltre, l'analisi è stata svolta utilizzando link con ritardi di propagazione crescenti pari a 2 ms, 3 ms e 3.5 ms, lasciando invariata la topologia della rete.

In figura 4.23 sono presenti gli andamenti della sovraelongazione percentuale al variare del FER per linee con i ritardi rispettivamente di 1 ms, 2 ms, 3 ms e 3.5 ms. Per rendere più chiari ed evidenti gli andamenti della sovraelongazione percentuale, l'asse dei FER è proposto in scala logaritmica e l'asse delle sovraelongazioni percentuali è definito nell'intervallo 60%-90%.

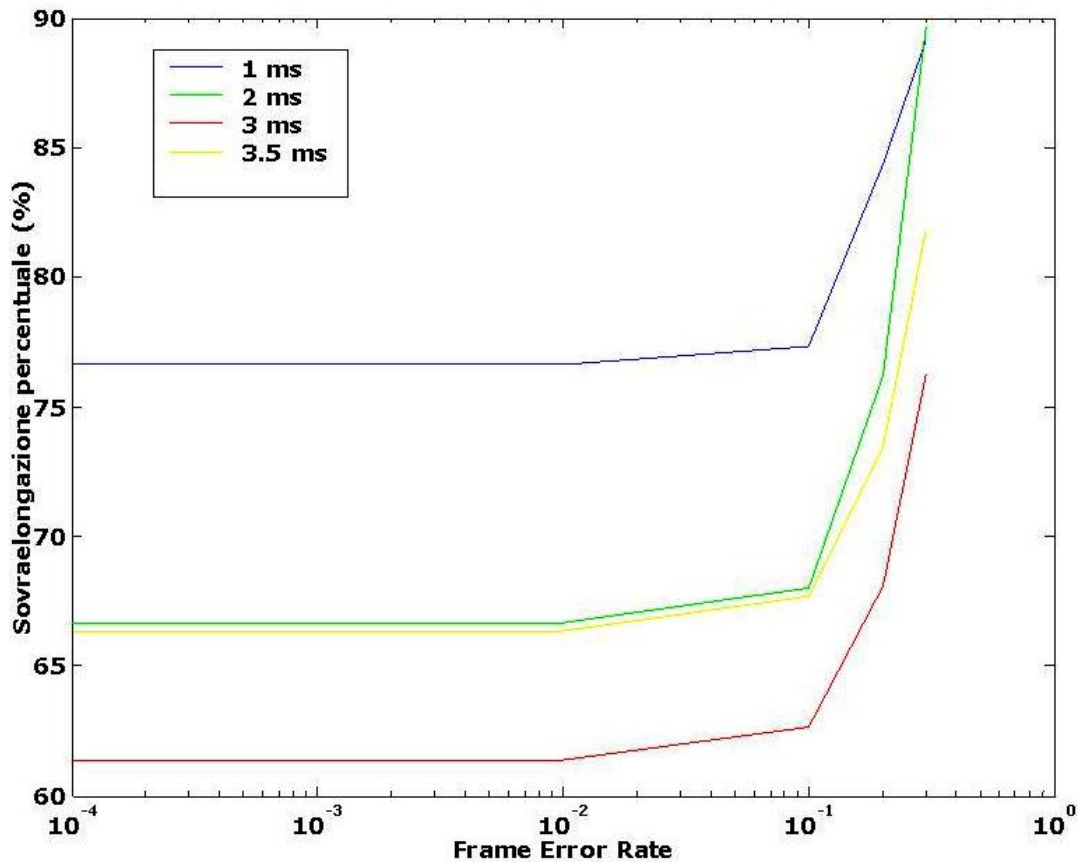


Fig. 4.23 – Andamenti delle sovralongazioni percentuali al variare del FER per linee con ritardi di propagazione di 1 ms, 2 ms, 3 ms e 3.5 ms

Come si evince dalla figura 4.23, gli andamenti delle sovralongazioni percentuali al variare del FER presentano, per tutti ritardi di propagazione esaminati, la stessa caratteristica: la sovralongazione percentuale rimane pressoché invariata fino a valori di FER pari a 0.1 e subisce incrementi considerevoli per valori di FER superiori a un decimo. Tale incremento è dovuto al

sottocampionamento indotto dal processo di perdita dei pacchetti. Infatti la presenza di FER maggiori di 0.1 indica che vengono corrotti, in modo deterministico, un numero di pacchetti superiore al 10% di quelli inviati.

La figura 4.24 riporta gli andamenti del tempo di assestamento al 2% al variare del FER per i ritardi di propagazione di tutte le linee esaminate finora (1 ms, 2 ms, 3 ms e 3.5 ms). Anche in questo caso sono stati fatti dei cambiamenti al fine di rendere più comprensibile la figura. In particolare, l'asse dei FER è proposto in scala logaritmica e l'asse dei tempi di assestamento al 2% è ridotto al solo intervallo [300ms,1200ms].

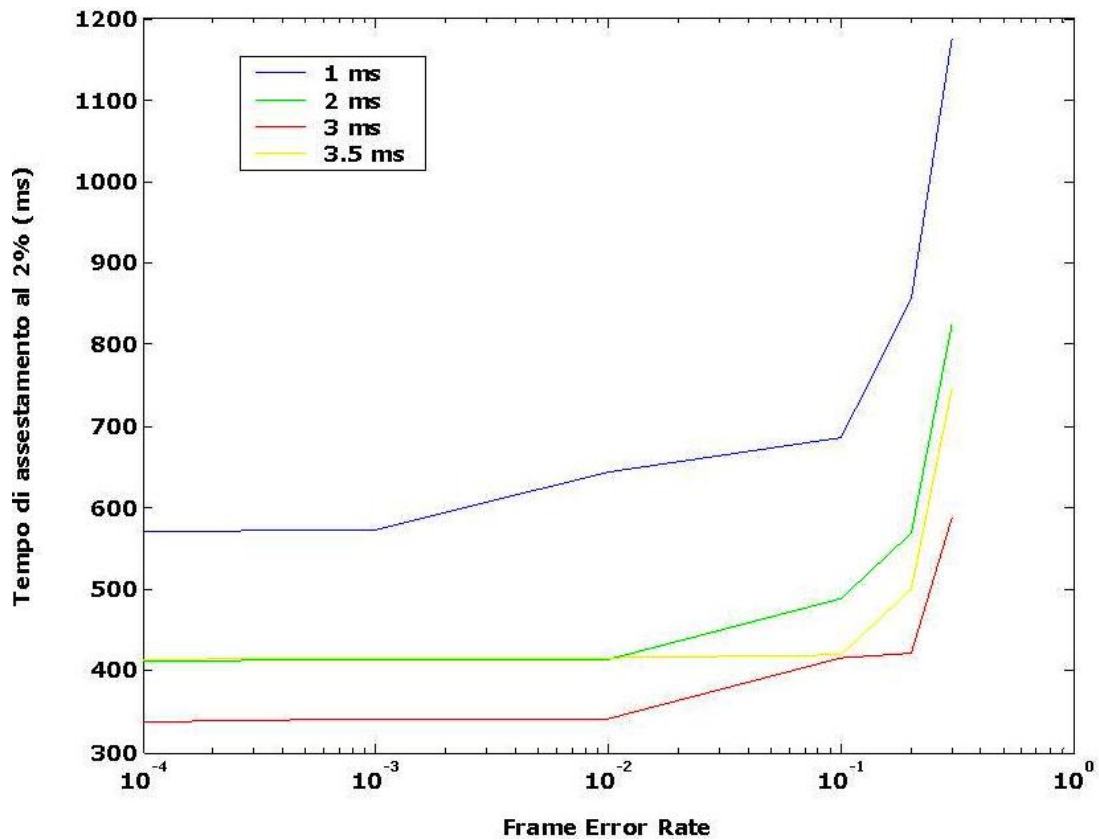


Fig. 4.24 – Andamenti dei tempi di assestamento al 2% al variare del FER per linee con ritardi di propagazione di 1 ms, 2 ms, 3 ms e 3.5 ms

Dalla figura 4.24 si evidenzia come il sistema di controllo risulta ancora robusto per valori di FER non superiori allo 0.1. Superato un FER di 0.1, il tempo di assestamento al 2% aumenta in maniera eccessiva raggiungendo in alcuni casi il 200% del valore ottenuto in assenza di errori sul link.

Complessivamente, i risultati ottenuti in presenza di rumore Uniform mettono in luce la robustezza del sistema al variare dei

ritardi di propagazione e dei tempi di assestamento al 2% qualora il canale non sia eccessivamente rumoroso (con $FER < 0.1$).

4.3.2 Scenario in presenza di rumore Bursty

Analizziamo, a questo punto, le caratteristiche del motore elettrico in presenza di un rumore Bursty. Ricordiamo che il modello di rumore Bursty proposto in questo lavoro di tesi è il modello di Gilbert, una catena di Markov a due stati: Good e Bad. Nello stato Good si suppone che la trasmissione avvenga in assenza di rumore. Nello stato Bad, invece, ipotizziamo che si presentino errori sul link con probabilità $1-h$ che rappresenta il valore di FER. Anche nel caso Bursty, il FER potrà assumere valori crescenti pari a 0.0, 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1, 0.2 e 0.3. Verranno analizzati gli andamenti delle sovraelongazioni percentuali e dei tempi di assestamento al 2% al variare del FER (nello stato Bad) per linee con ritardi di propagazione, rispettivamente, di 1 ms, 2 ms, 3 ms e 3.5 ms.

In figura 4.25 sono riportati gli andamenti della sovraelongazione percentuale al variare del FER per linee con ritardi di propagazione finora considerati. L'asse dei FER nello stato Bad è

proposto in scala logaritmica e l'asse delle sovraelongazioni percentuali è definito nell'intervallo 60%-90%.

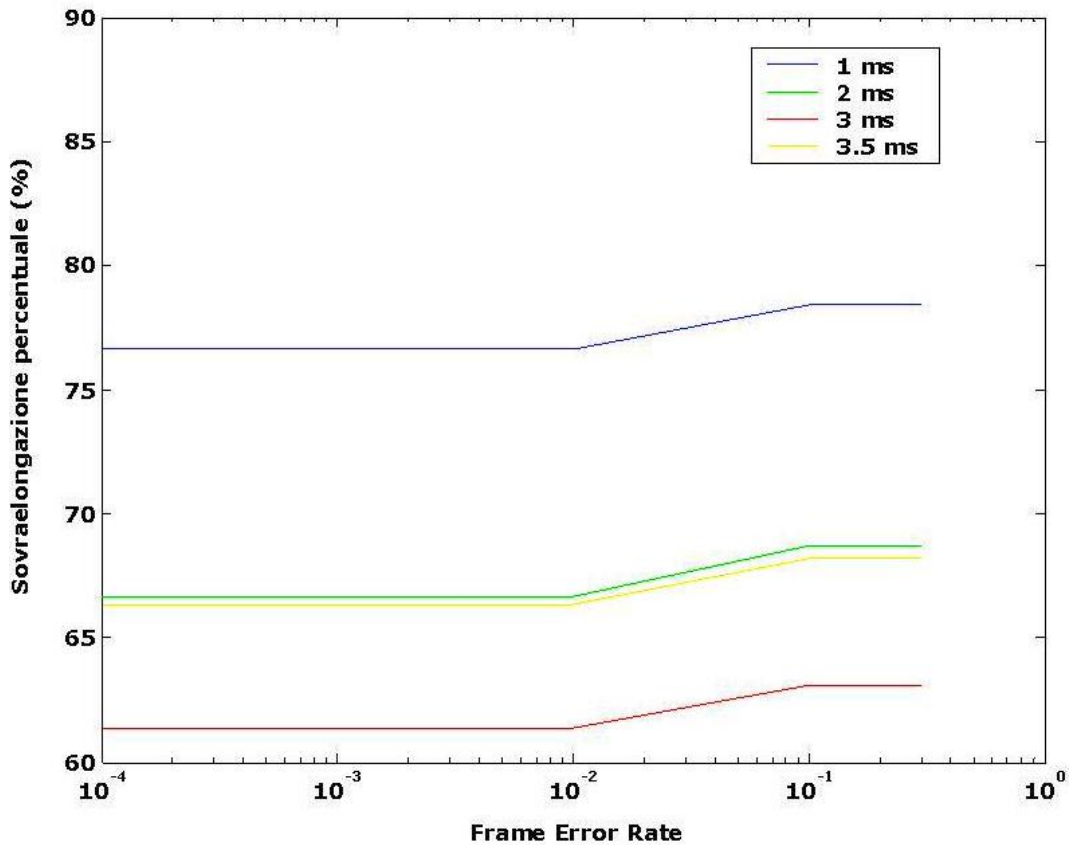


Fig. 4.25 – Andamenti delle sovraelongazioni percentuali al variare del FER nello stato Bad per linee con ritardi di propagazione di 1 ms, 2 ms, 3 ms e 3.5 ms

Riscontriamo, in tal caso, come gli andamenti delle sovraelongazioni percentuali al variare del FER abbiano la stessa proprietà evidenziata in presenza di rumore Uniform. Però, in questo

caso, la sovraelongazione risulta invariata per valori di FER non superiori a 0.01 e subisce un contenuto aumento, non superiore al 5%, per valori di FER maggiori di un centesimo. Quindi, anche in questo caso, i parametri che quantificano la stabilità del motore DC vengono peggiorati dalla perdita di pacchetti dovuta alla presenza di rumore Bursty.

La figura 4.26 presenta gli andamenti del tempo di assestamento al 2% al variare del FER (sempre nello stato Bad) per i ritardi di propagazione di tutte le linee esaminate finora (1 ms, 2 ms, 3 ms e 3.5 ms). L'asse dei FER è proposto in scala logaritmica e l'asse dei tempi di assestamento al 2% è ridotto al solo intervallo [300ms,750ms].

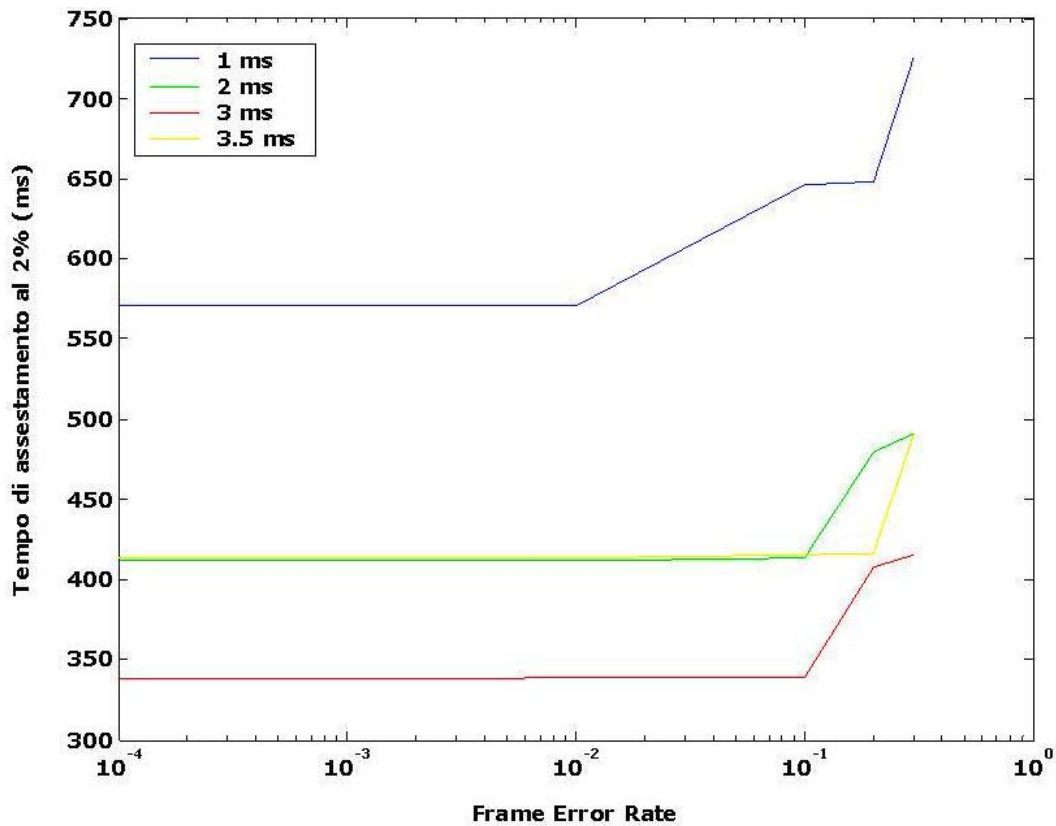


Fig. 4.26 – Andamenti dei tempi di assestamento al 2% al variare del FER nello stato Bad per linee con ritardi di propagazione di 1 ms, 2 ms, 3 ms e 3.5 ms

In questo caso, per linee con ritardi di propagazione superiori a 1 ms si evidenzia come il valore FER 0.1 sia un punto cruciale per gli andamenti del tempo di assestamento al 2% in quanto per valori di FER minori di 0.1 il tempo di assestamento al 2% risulta pressoché costante e per valori maggiori della soglia si ottengono incrementi considerevoli.

Al contrario, nel caso si usi una linea con ritardo di propagazione di 1 ms e in presenza di rumore Bursty, il valore del tempo di assestamento al 2% risulta immutato per valori di FER nello stato Bad non superiori allo 0.01. Per valori superiori al centesimo il tempo di assestamento al 2% aumenta in maniera graduale all'aumentare del FER nello stato Bad. A differenza del caso di rumore Uniform, comunque, gli incrementi per tutti i ritardi di propagazione considerati non superano il 40% del tempo di assestamento al 2% ottenuto in assenza di rumore.