



POLITECNICO DI MILANO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Sviluppo di un ambiente di simulazione
per macchine per il taglio al volo**

Relatore

Prof. Hermes GIBERTI

Correlatore

Ing. Simone CINQUEMANI

Tesi di laurea di

Sebastien Dominique TADDEI

Matricola 817132

Anno Accademico 2014/2015

Alla mia famiglia.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto i miei genitori, mia zia, mia nonna e tutto il resto della mia famiglia per avermi dato i mezzi che hanno reso possibile il raggiungimento di questo importante traguardo e soprattutto per il loro supporto quotidiano.

Ringrazio i miei amici, corsi, marsigliesi, milanesi e altri per il loro sostegno e soprattutto per tutte le distrazioni che mi hanno offerto. Un pensiero particolare ai miei amici di studio milanesi che hanno saputo sopportare i miei errori di lingua durante due anni e mezzo: grazie ragazzi.

Infine, ringrazio il mio relatore prof. Hermes Giberti ed il mio correlatore ing. Simone Cinquemani per la loro disponibilità e per l'attenzione con cui hanno seguito il mio lavoro.

Indice

Introduzione	1
1 La macchina di taglio al volo	3
1.1 Principio di funzionamento	3
1.2 Lo strumento di simulazione	6
1.2.1 Il buffer	6
1.2.2 Il master	8
1.2.3 Lo sbobinatore	11
1.2.4 L'utensile di taglio	12
1.2.5 Il ballerino orizzontale	15
2 Funzionamento ideale e problematiche	17
2.1 Simulazione applicata ad un caso particolare	17
2.1.1 Introduzione	17
2.1.2 Legge di moto dell'utensile di taglio	22
2.1.3 Legge di moto dei ballerini orizzontali	24
2.1.4 Diagramma delle fasi	27
2.1.5 Funzionamento dei buffers	30
2.2 Varie problematiche incontrate da queste macchine	33
2.2.1 Errori del primo tipo	33
2.2.2 Errori del secondo tipo	36
2.2.3 Superposizione dei due errori introdotti	38

3	Controllo della macchina	40
3.1	Controllo di una macchina producendo dei pezzi con la stessa lunghezza	41
3.1.1	Introduzione	41
3.1.2	Comportamento della macchina considerando l'errore	41
3.1.3	Strategia di controllo	46
3.1.4	Implementazione del controllo sul modello Simulink	48
3.1.5	Analisi dei risultati ottenuti	50
3.2	Controllo di una macchina effettuando operazioni in posizioni particolari	57
3.2.1	Introduzione	57
3.2.2	Strategia di controllo	57
3.2.3	Implementazione del controllo sul modello Simulink	59
3.2.4	Analisi dei risultati ottenuti	62
	Conclusioni	69
	Bibliografia	70

Elenco delle figure

1.1	Macchine di taglio al volo	4
1.2	Esempio di macchina di taglio al volo	5
1.3	Schema isometrico del sottosistema buffer	7
1.4	Modello Simulink del sottosistema buffer	8
1.5	Schema isometrico del sottosistema master	9
1.6	Modello Simulink del sottosistema master	9
1.7	Zoom sulla retroazione dello stato buffer	10
1.8	Schema isometrico del sottosistema sbobinatore	11
1.9	Modello Simulink del sottosistema sbobinatore	11
1.10	Schema isometrico dell'utensile di taglio e vista laterale dei rulli con taglienti	12
1.11	Sistema biella-manovella usato per l'utensile di taglio	13
1.12	Andamento dello spostamento dell'utensile durante un ciclo	14
1.13	Modello Simulink dell'utensile di taglio a rulli con taglienti	14
1.14	Modello Simulink dell'utensile di taglio di tipo sega	15
1.15	Schema di un ballerino orizzontale	15
1.16	Modello Simulink del sottosistema slider	15
2.1	Macchina di taglio al volo	18
2.2	Vista in 3D della macchina di taglio al volo	19
2.3	Modello Simulink della macchina di taglio al volo	20
2.4	Zoom sulla retroazione dello stato del buffer	21
2.5	Spostamento dell'utensile in funzione dell'angolo master	23
2.6	Andamento della velocità di uno slider durante un ciclo	24
2.7	Andamento dello spostamento di uno slider durante un ciclo	25
2.8	Andamento dell'accelerazione di uno slider durante un ciclo	26
2.9	Confronto tra accelerazioni di leggi diverse	27
2.10	Diagramma delle fasi	28
2.11	Lunghezza del pezzo prodotto in funzione del numero di cicli	29

2.12	Velocità del nastro nella zona di taglio	30
2.13	Evoluzione dello stato del buffer e della velocità dello sbobinatore	31
2.14	Diagramma delle fasi con variazione del buffer in uscita macchina	32
2.15	Illustrazione dell'errore di slittamento	33
2.16	Modello Simulink dell'errore	34
2.17	Andamento degli spostamenti teorici e reali del nastro	35
2.18	Andamento dell'errore di slittamento del nastro	35
2.19	Errore di posizionamento dei taglienti sull'utensile	37
2.20	Andamento dell'errore in funzione del numero di cicli	38
2.21	Andamento della superposizione dei due tipi di errori	39
3.1	Macchina di taglio al volo	41
3.2	Errore di posizione del nastro in funzione del tempo	42
3.3	Definizione dell'angolo master nel modello Simulink	42
3.4	Velocità teorica e reale del nastro nel sottosistema master	43
3.5	Velocità del nastro nella zona di lavorazione su un ciclo	44
3.6	Zoom sulla fase in cui il materiale si dovrebbe fermare	45
3.7	Posizionamento del sensore	46
3.8	Funzionamento della fotocellula	46
3.9	Funzionamento del sensore	47
3.10	Sottosistema Simulink in carica di elaborare l'azione di controllo	49
3.11	Introduzione della correzione nel sottosistema master	50
3.12	Diagramma delle fasi della macchina controllata	51
3.13	Zoom sulla velocità del nastro nella zona di lavorazione	52
3.14	Evoluzione della correzione e della lunghezza dei pezzi nel tempo	53
3.15	Velocità di controllo: confronto tra uno step ed una curva di ordine 2	54
3.16	Accelerazione del nastro nel sottosistema master	55
3.17	Cambio dell'errore durante la simulazione	56
3.18	Posizione del sensore a monte della zona di lavorazione	58
3.19	Posizioni dei due sensori a monte e a valle della zona di lavorazione	58
3.20	Sottosistema master del caso studiato	60
3.21	Sottosistema di normalizzazione dell'angolo master	61
3.22	Dettaglio del sottosistema di normalizzazione dell'angolo master	61
3.23	Vettore delle lunghezze dei pezzi desiderati	62
3.24	Velocità di trascinamento del nastro controllata	63
3.25	Diagramma delle fasi	64
3.26	Lunghezze effettive dei pezzi	65
3.27	Zoom sulle lunghezze effettive dei pezzi	66

3.28	Zoom sulla velocità del nastro in zona di lavorazione	67
3.29	Spostamento dei ballerini orizzontali	68

Sommario

Molto spesso, nel settore manifatturiero, i prodotti vengono lavorati in catene di produzione ad alta velocità. Durante il loro percorso su dei nastri trasportatori, si cerca di non fermare i prodotti per non avere tempi morti e per incrementare la produttività. Di conseguenza, si sviluppano delle macchine capaci di lavorare del materiale in continuo movimento. Queste macchine richiedono una grande precisione per garantire una buona produzione: le operazioni che compiono devono essere sincronizzate con il movimento del prodotto stesso. Questi sistemi vengono tipicamente denominati “macchine di taglio al volo”. Possono effettuare, in teoria, qualsiasi tipo di operazione perciò trovano delle applicazioni in diversi settori. In ambito industriale però, ci sono diverse problematiche che devono affrontare coloro che usano queste macchine, sia in fase di progettazione che in fase di set up e di utilizzo. Questi problemi portano spesso a commettere degli errori di produzione.

La presente tesi propone lo sviluppo di un ambiente di simulazione per le macchine di taglio al volo. Tale programma si può dimostrare uno strumento utile per simulare il loro funzionamento e per proporre un controllo efficace nell’ottica di migliorare le loro prestazioni.

Parole chiave: macchina di taglio al volo, catena di produzione, strumento di simulazione, progettazione di macchina, strategie di controllo, sistema di controllo.

Introduzione

Nel mondo manifatturiero, le aziende che producono su vasta scala cercano di avere un'elevata produttività per essere competitive. I prodotti che devono subire diverse lavorazioni all'interno della catena di produzione sono spesso in continua movimentazione; questo permette di non interrompere il flusso produttivo e di conseguenza di aumentare la produttività. Si cerca spesso di non fermare il prodotto nei diversi sottosistemi che costituiscono la macchina per non avere periodi morti all'interno del ciclo di lavorazione. Conseguentemente, si sviluppano delle macchine capaci di effettuare un'operazione particolare su un prodotto in continuo movimento; questo tipo di macchina è denominata "macchina di taglio al volo". Un processo di questo genere necessita un'elevata precisione nel controllo della macchina ai fini di sincronizzare gli utensili di lavoro con il flusso di prodotti. In effetti, la velocità relativa tra l'utensile di lavoro e il prodotto stesso deve essere nulla nella zona di lavorazione per garantire un risultato netto e preciso.

Si usa questo tipo di macchina in diversi settori. Un esempio è quello della produzione alimentare dove spesso si cerca di impacchettare del cibo senza fermare il flusso di prodotti. Le macchine di taglio al volo vengono anche utilizzate per effettuare delle operazioni di stampa o di taglio. In quest'ultimo caso, il flusso di materiale in ingresso della macchina è continuo e il taglio da effettuare deve avere luogo in un istante preciso ed in una posizione precisa sul materiale.

In ambito industriale, ci sono diverse problematiche legate al funzionamento della macchina che devono essere affrontate sia dal progettista in fase di sintesi che dagli utilizzatori in fase di set up della macchina. Questo lavoro di tesi propone lo sviluppo di uno strumento di simulazione del funzionamento delle macchine di taglio al volo che può essere un supporto utile sia in fase di sintesi che in fase di analisi a coloro che usano queste macchine. Di seguito vengono descritti i passi fondamentali attorno ai quali è stato sviluppato questo lavoro. Questi argomenti sono approfonditi nei tre capitoli che costituiscono il corpo centrale di questo documento.

In un primo capitolo, dopo avere fornito una panoramica generale del funzionamento delle macchine di taglio al volo, si evidenziano due tipi di macchine frequentemente utilizzate sul mercato. Si fornisce poi una descrizione dettagliata dei sottosistemi che costituiscono tali tipi di macchine. Si propone in più una modellazione di ognuno di questi sottogruppi su Simulink, un'estensione grafica del software di simulazione Matlab.

Nel secondo capitolo, tramite lo strumento di simulazione sviluppato su Simulink, si propone lo studio di un esempio di macchina di taglio al volo ipotizzando un funzionamento ideale, privo di eventuali errori impreveduti durante l'utilizzo della macchina. Vengono poi presentate e descritte diverse problematiche usualmente incontrate dalle aziende produttive impiegando macchine di taglio al volo. Tali problemi generano tipicamente degli errori di produzioni indesiderati.

L'ultimo argomento sviluppato nel terzo capitolo riguarda l'implementazione degli errori comuni nel modello di simulazione e lo sviluppo di strategie di controllo ai fini di correggere gli errori di produzione. Si propongono due casi di applicazione simulati cui sono analizzati i diversi risultati ottenuti.

CAPITOLO 1

LA MACCHINA DI TAGLIO AL VOLO

1.1 – Principio di funzionamento

Nel mondo manifatturiero viene richiesta un'alta produttività. I prodotti vengono lavorati da linee di produzione ad alta velocità viaggiando spesso fra diverse macchine [1,2]. Sono disposti su dei supporti di movimentazione che sono in continuo movimento per non avere tempi morti e quindi non abbassare il ritmo produttivo. Spesso le macchine devono essere capaci di adeguarsi alla velocità del prodotto per potere effettuare una lavorazione senza interrompere il ritmo. Si sono allora sviluppate delle tecniche di misura e di controllo per garantire la sincronizzazione delle operazioni [3-9].

La macchina di taglio al volo ha come obiettivo di effettuare un'operazione su un flusso di prodotti senza fermare la produzione [10-13]. Si può usare questo tipo di macchina per effettuare un'operazione di taglio ma si possono eseguire anche altri tipi di lavorazioni come ad esempio uno stampaggio o l'impacchettamento di un prodotto.

Lo sviluppo di questa tesi si concentra su un'operazione in particolare: l'operazione di taglio.

Per potere lavorare il materiale e garantire una buona precisione, la velocità relativa fra l'utensile e il prodotto deve essere nulla nella zona di lavorazione. Si sono allora sviluppati principalmente due tipi di macchine [14]. Un primo tipo di macchina consiste nel muovere l'utensile di taglio alla stessa velocità del flusso (Fig. 1.1.a). L'altro tipo vede il flusso fermato nella zona di taglio però senza fermare il flusso complessivo di materiale (Fig. 1.1.b). Questi due tipi di macchine non sono gli unici disponibili sul mercato però ne rappresentano una buona parte.

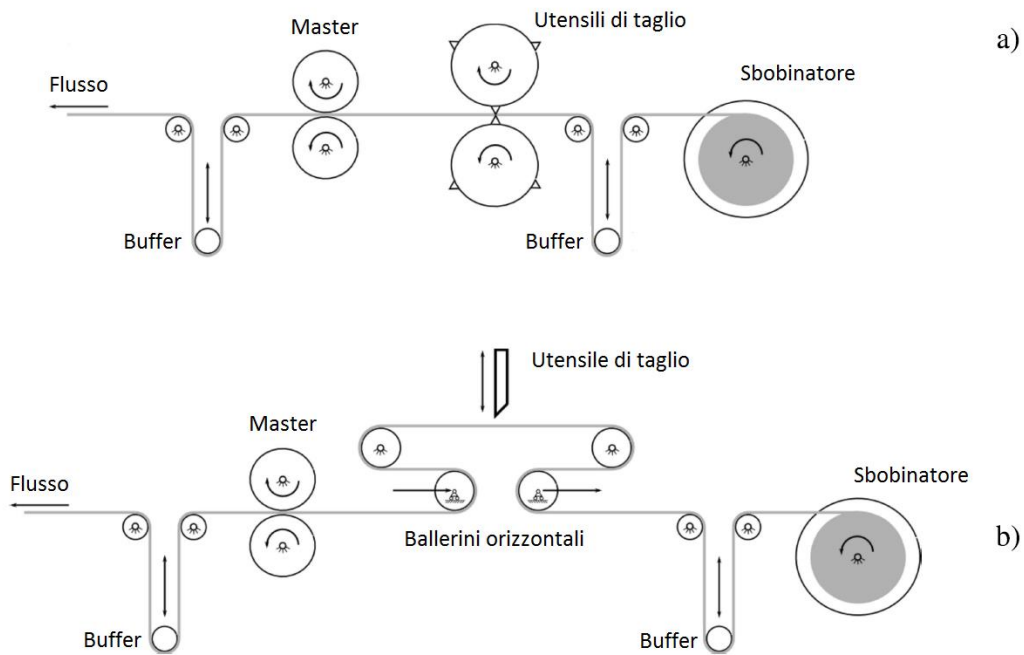


Fig. 1.1: Macchine di taglio al volo

I due tipi di macchine hanno comunque dei sottosistemi simili [14-16]. Un master che trascina il flusso con una certa velocità, uno sbobinatore che contiene una scorta di materiale e i buffers che permettono principalmente di accumulare materiale e di mantenere la tensione del flusso costante.

Il sottosistema dell'utensile di taglio è diverso a seconda del tipo di macchina.

Nelle macchine del primo tipo (Fig. 1.1.a), la velocità del flusso di materiale rimane costante in tutta la macchina. Siccome la velocità relativa tra l'utensile e il flusso deve essere nulla nella zona di taglio, si deve imporre una velocità tangenziale dell'utensile pari alla velocità del flusso nella zona dove l'operazione viene effettuata [17]. Durante le fasi di non-lavorazione del prodotto, la velocità dell'utensile di taglio viene regolata in modo tale da scegliere la lunghezza di ogni prodotto. In effetti, la velocità del flusso produttivo è spesso costante e la lunghezza di ogni prodotto dipende quindi dalla frequenza a cui il flusso incontra un tagliente dell'utensile di taglio. Se la velocità di rotazione dei rulli con taglienti durante la fase di lavorazione viene mantenuta costante anche durante le fasi di non-lavorazione allora si avrà una certa lunghezza di prodotto. Se questa lunghezza è troppo piccola rispetto a quella desiderata, si deve lasciare passare più materiale durante la fase di non-lavorazione e quindi si deve rallentare l'utensile in quella fase per diminuire la frequenza di taglio. Se invece la lunghezza del prodotto è troppo grande allora si deve accelerare l'utensile nella fase di non-lavorazione.

Un esempio di questo tipo di macchina è rappresentato in Fig. 1.2.

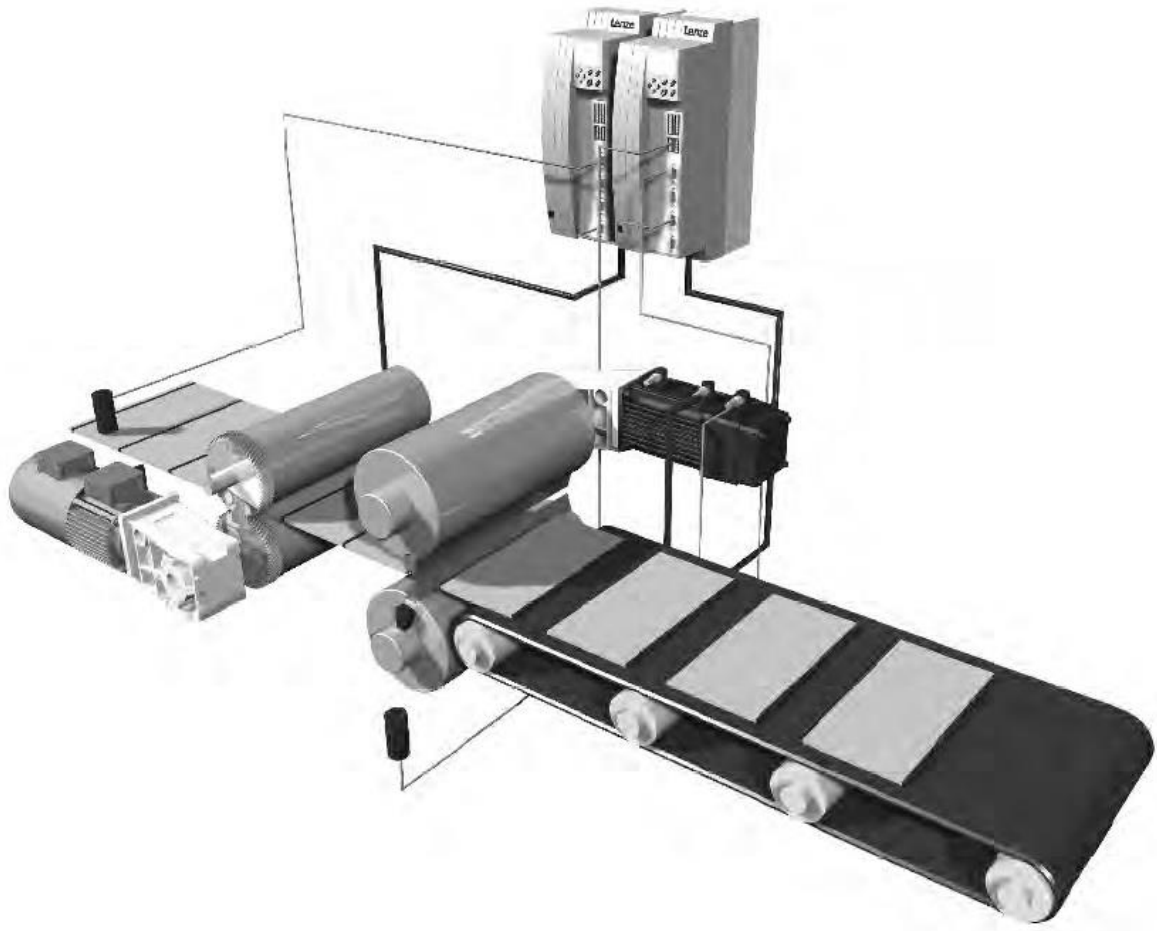


Fig. 1.2: Esempio di macchina di taglio al volo

Nell'altro tipo di macchina (Fig. 1.1.b), la velocità del flusso di materiale è dettata costante dal sottosistema master in carica del trascinamento del flusso produttivo però diventa nulla nella zona di taglio. Questo è reso possibile con l'utilizzo di due ballerini orizzontali, detti anche sliders, il cui funzionamento verrà dettagliato più avanti. Sostanzialmente vengono posizionati a monte e a valle della zona di taglio e hanno una legge di moto che permette di avere una velocità nulla del flusso in corrispondenza della zona di taglio. Quindi con un utensile in posizione fissa effettuando un movimento in direzione verticale, si può tranquillamente lavorare il prodotto. Una volta l'operazione finita, la loro legge di moto permette ai due ballerini di tornare in posizione iniziale e soprattutto di riaccelerare il prodotto per riprendere la velocità corrispondente alla cadenza produttiva.

1.2 – Lo strumento di simulazione

I due tipi di macchine descritti in precedenza non rappresentano tutte le soluzioni esistenti sul mercato. Però si nota che queste macchine sono composte di sottosistemi piuttosto indipendenti tra loro. L'idea è quella di dividere la macchina di taglio al volo in sottogruppi costituiti di ingressi e uscite avendo un legame cinematico [14] e di farne un modello utilizzabile in un ambiente di simulazione. Questi sottosistemi potranno poi essere riutilizzati per creare qualsiasi altro tipo di macchina a seconda della necessità. In effetti, mettendo in serie i vari sottosistemi è possibile simulare il comportamento della macchina disegnata. Si propone un modello matematico per ogni sottosistema e si sviluppa il modello corrispondente su Simulink, estensione grafica di simulazione del software Matlab.

Questo strumento di simulazione permette di elaborare un modello utile sia nella fase di progettazione che nella fase di set up della macchina di taglio al volo. In effetti, oltre a permettere di disegnare una macchina capace di rispondere a delle esigenze particolari, permette anche di dare un supporto nella fase di inizializzazione della macchina. Tipicamente, la fase di set up di una macchina del genere vede diverse problematiche che introducono degli errori di produzione che verranno descritti più avanti e questo strumento permette di capire, gestire e controllare tali errori in modo da garantire una produzione giusta.

Queste macchine effettuano una lavorazione che viene ripetuta nel tempo ad ogni ciclo lavorativo. Si definisce quindi il tempo di ciclo T_{ciclo} . Nel mondo manifatturiere si usa come variabile indipendente l'angolo master, esso compie 2π radianti nel giro di un ciclo. L'angolo master θ si definisce come:

$$\theta = 2\pi \cdot \frac{t}{T_{ciclo}}$$

1.2.1 – Il buffer

Il sottosistema buffer ha la funzione di accumulare il materiale in caso di necessità. Permette di gestire funzionamenti imprevisti sulle macchine. Ad esempio se per qualche motivo c'è un rallentamento in un sottosistema della macchina, il buffer può accumulare del materiale e permettere a questo sottosistema di sbloccarsi e ritrovare un ritmo normale senza cambiare la cadenza del sottosistema a monte. Il sottosistema buffer permette anche di mantenere una certa tensione, costante, all'interno del flusso di materiale.

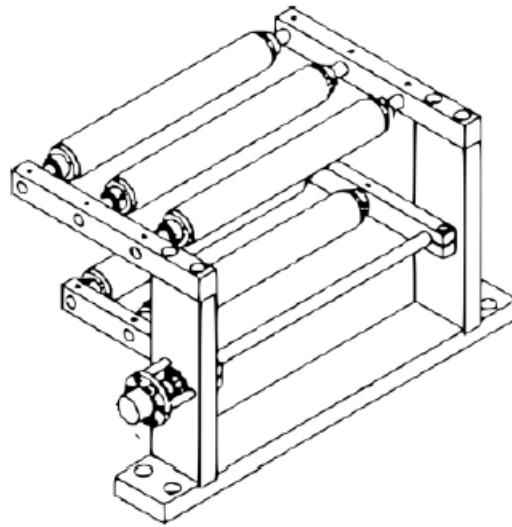


Fig. 1.3: Schema isometrico del sottosistema buffer

In Fig. 1.3 viene rappresentato un classico tipo di buffer. Il flusso di materiale viene disposto a serpentino a traverso i vari rulli. La variazione della posizione angolare del piano inferiore di rulli permette di cambiare la distanza tra un piano e l'altro e quindi permette di cambiare la quantità di materiale all'interno del buffer. Solitamente, lo stato del buffer viene quantificato tramite un sensore di spostamento, ad esempio un encoder o un potenziometro.

Esistono altri tipi di buffer; ad esempio per modificare la distanza tra i due piani e quindi conseguentemente cambiare lo stato del buffer, il piano inferiore si può muovere verticalmente al posto di ruotare. In effetti se si mantengono i due piani paralleli, facendo muovere il piano inferiore si riesce notevolmente a modificare la quantità di materiale presente all'interno del sottosistema. Però questa soluzione, oltre ad essere leggermente più difficile dal punto di vista realizzativo, presenta nella pratica dei problemi di tensione all'interno del flusso di materiale.

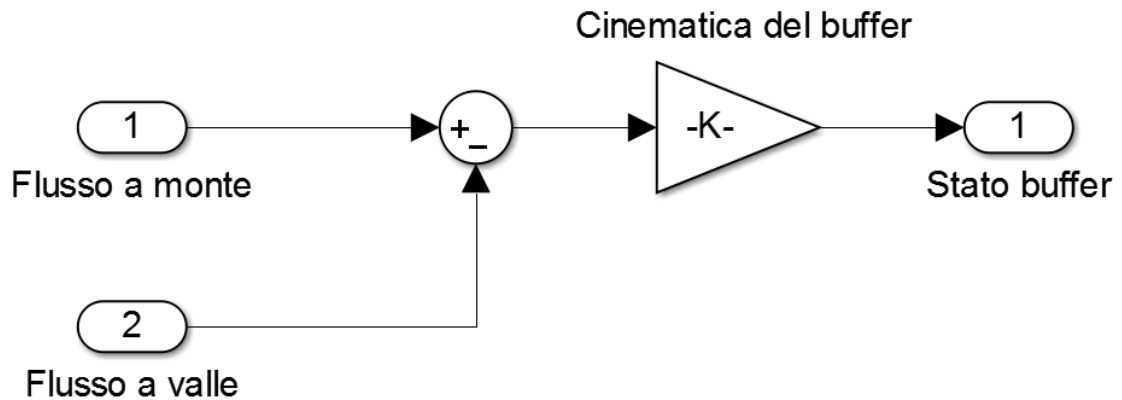


Fig. 1.4: Modello Simulink del sottosistema buffer

Il modello Simulink (Fig. 1.4) ha due ingressi, il flusso a monte del buffer e quello a valle. La cinematica del buffer ci permette di avere in uscita lo stato del buffer.

Questo stato può essere espresso in diversi modi, quello usato nella simulazione è di rappresentare lo stato del buffer con la posizione angolare del piano inferiore dei rulli rispetto all'orizzontale. Il buffer è detto pieno quando la sua posizione è di 45° , è vuoto in posizione di -45° ed è in stato medio o neutro quando la posizione vale 0° .

1.2.2 – Il master

Il sottosistema chiamato master è responsabile della movimentazione del flusso di prodotti [12]. Il master deve tipicamente muovere il flusso con una velocità costante. Questo valore però può essere cambiato durante la lavorazione in caso di necessità. Ci possono essere più sottosistemi di movimentazione del prodotto lungo la macchina se essa è di taglia significativa, a questo punto un solo sottosistema viene considerato come master mentre gli altri svolgono la funzione di slave.

È importante avere sincronismo tra i sottosistemi chiamati a muovere il prodotto per evitare eventuali tensioni all'interno del materiale.

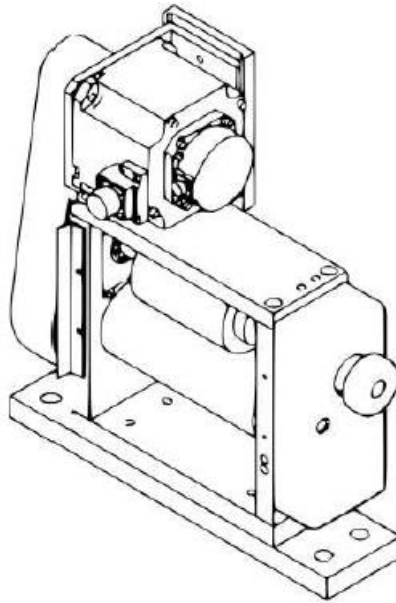


Fig. 1.5: Schema isometrico del sottosistema master

Il sottosistema master è costituito da un motoriduttore collegato a due rulli (Fig. 1.5) che permettono di trascinare il prodotto [15, 18-21]. La velocità del flusso di materiale $v_{materiale}$ dipende quindi dalla velocità di rotazione dei rulli ω_{rulli} e del loro raggio R_{rulli} che sono legati secondo la formula:

$$v_{materiale} = \omega_{rulli} \cdot R_{rulli}$$

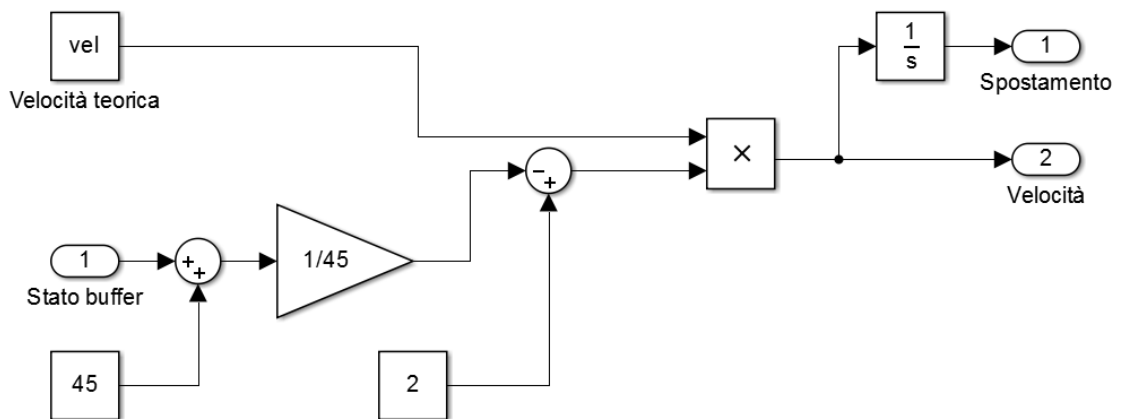


Fig. 1.6: Modello Simulink del sottosistema master

Nello studio si è presupposto di avere una velocità teorica del flusso di materiale costante corrispondente ad un caso di funzionamento a regime, quindi il modello Simulink (Fig. 1.6) prevede di erogare una velocità teorica costante vel . Il valore di questa velocità dipende della produttività P che si vuole ottenere e della lunghezza del pezzo L_{pezzo} che si vuole produrre. Tipicamente la velocità viene definita come:

$$vel = P \cdot L_{pezzo}$$

Tale velocità può essere modulata in funzione dello stato del buffer posizionato a valle del master. In effetti lo stato del buffer è un ingresso del sottosistema e viene retroazionato per controllare proporzionalmente la velocità erogata.

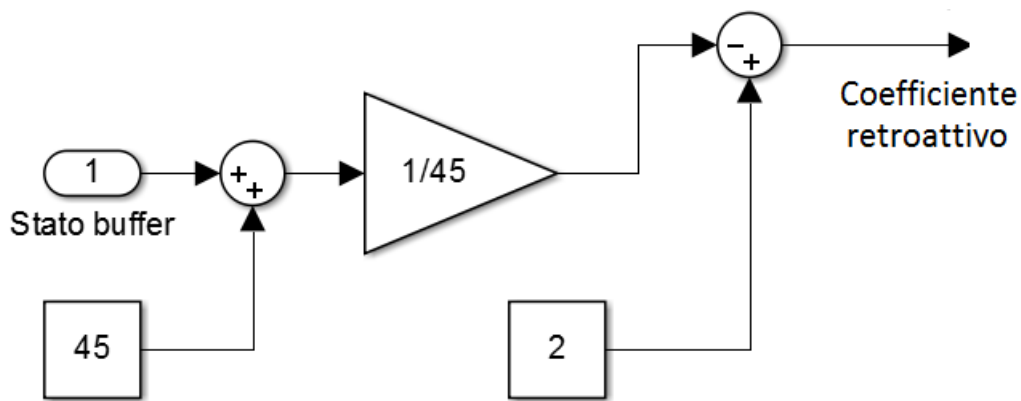


Fig. 1.7: Zoom sulla retroazione dello stato buffer

Il coefficiente retroattivo viene espresso con:

$$coeff_{retro} = 2 - \frac{45^\circ + stato_{buffer}}{45^\circ}$$

In effetti quando lo stato del buffer è neutro (0°), il coefficiente è unitario e dunque la velocità teorica non viene modificata dalla retroazione. Se il buffer si riempie (stato $> 0^\circ$), il coefficiente retroattivo diminuisce e quindi la velocità in uscita del master è inferiore alla velocità teorica di produzione. Se, ad esempio, il buffer è in stato di saturazione (45°), il coefficiente si annulla e la produzione si ferma perché il buffer non può assorbire nessun'altro prodotto. Al contrario, nel caso di stato negativo, il coefficiente aumenta per chiedere una produzione più elevata al sottosistema master.

Le uscite del sottosistema master sono la velocità e lo spostamento effettivi del flusso di prodotti trascinato.

1.2.3 – Lo sbobinatore

Questo sottosistema permette di immagazzinare e distribuire il materiale che deve essere lavorato dalla macchina di taglio al volo. Il tipo di sbobinatore presentato è un caso specifico che però è frequentemente presente nel mondo manifatturiero e rappresenta l'idea generale di quel sottosistema.

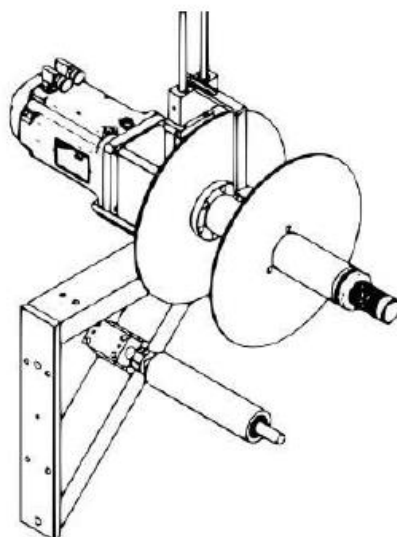


Fig. 1.8: Schema isometrico del sottosistema sbobinatore

Lo sbobinatore è costituito da un motoriduttore collegato ad una bobina (Fig. 1.8) e permette di fornire il flusso di materiale a tutta la macchina [15]. Viene messo un sensore di prossimità per misurare il livello del magazzino ed informare l'operatore (o un altro sottosistema automatizzato di riempimento del magazzino) quando si deve cambiare il contenitore di materiale.

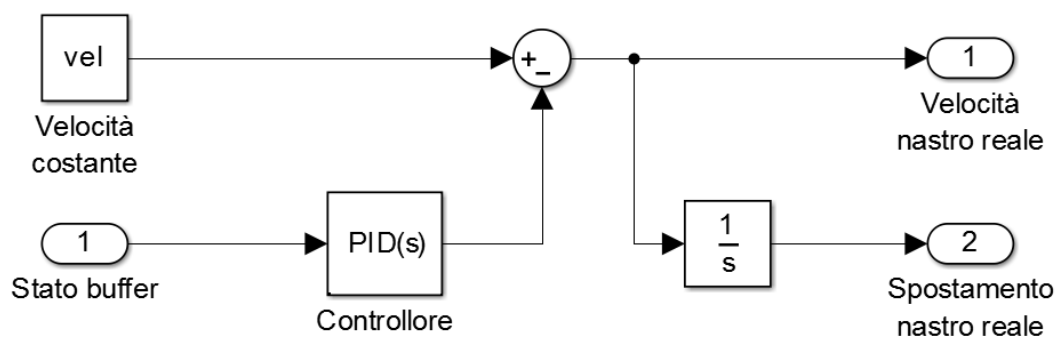


Fig. 1.9: Modello Simulink del sottosistema sbobinatore

Il modello Simulink (Fig. 1.9) evidenzia che, nel caso ideale, la velocità del flusso di materiale è imposta costante pari a quella del blocco master *vel*. Però, come per il sottosistema master, questa velocità può essere regolata in funzione dello stato del buffer che viene posizionato a valle dello sbobinatore. Quindi si nota come lo stato del buffer sia un ingresso del sottosistema che ha come uscite la velocità e lo spostamento del flusso di materiale erogato verso il resto della macchina.

In effetti, se la macchina viene rallentata, il buffer a valle dello sbobinatore si riempie di materiale e di conseguenza quest'ultimo riduce la sua velocità di sbobinamento.

1.2.4 – L'utensile di taglio

La Fig. 1.1 mette in evidenza due tipi di utensile di taglio. Quello in Fig. 1.1.a non necessita di fermare il flusso nella zona del taglio perché la velocità periferica dell'utensile è pari a quella del flusso.

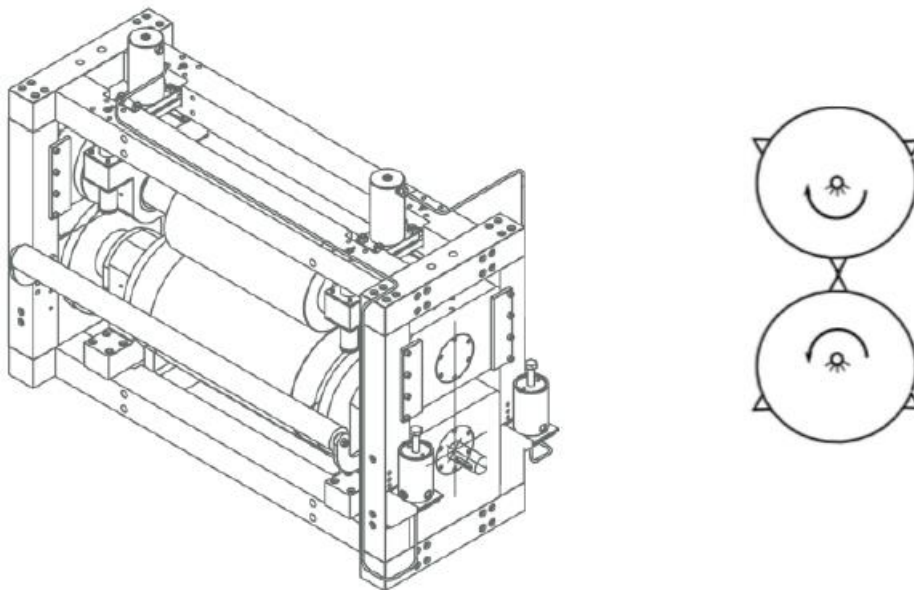


Fig. 1.10: Schema isometrico dell'utensile di taglio e vista laterale dei rulli con taglienti

Questo tipo di utensile (Fig. 1.10) indirizza il prodotto tra due rulli dotati di taglienti disposti in maniera simmetrica nella spazio su ogni rullo [15, 17]. Ci sono due fasi: quando il tagliente è a contatto con il prodotto la velocità periferica del rullo deve essere pari a quella del flusso di prodotto; poi quando il tagliente non è più a contatto si può accelerare o decelerare la rotazione dei rulli per controllare la lunghezza di prodotto tra un taglio e quello successivo.

Il tipo di utensile proposto dalla Fig. 1.1.b necessita un flusso di prodotto fermo nella zona di taglio. Questo tipo di utensile è generalmente costituito da una sega che compie un movimento verticale per andare a contatto col prodotto e tagliarlo. Questo movimento verticale dell'utensile viene spesso generato da un classico manovellismo, anche se il modello prevede la possibilità di usare qualsiasi tipo di legge di moto. In effetti, la maggior parte delle macchine di taglio al volo del tipo rappresentato in Fig. 1.1.b prevedono un sistema biella-manovella per la movimentazione dell'utensile di taglio (Fig. 1.11).

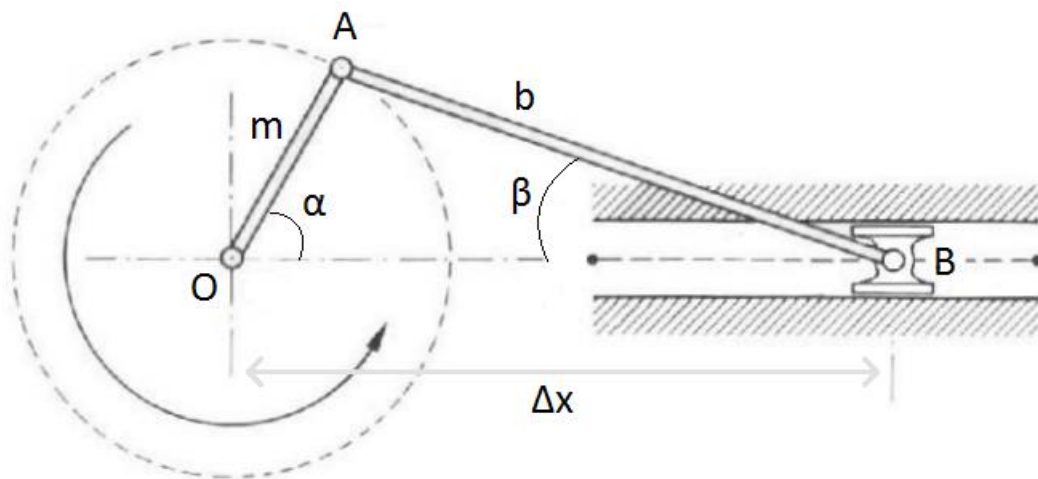


Fig. 1.11: Sistema biella-manovella usato per l'utensile di taglio

Con una chiusura vettoriale si scrive:

$$\vec{OA} + \vec{AB} + \vec{BO} = \vec{0}$$

Proiettando nel piano si ottiene il sistema seguente:

$$\begin{cases} m \cdot \cos \alpha + b \cdot \cos \beta - \Delta x = 0 \\ m \cdot \sin \alpha - b \cdot \sin \beta = 0 \end{cases}$$

Quindi $\sin \beta = \frac{m}{b} \sin \alpha$.

Poi ponendo $\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta}$ si esprime la posizione Δx in funzione dell'angolo α :

$$\Delta x = m \cdot \cos \alpha + b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{m}{b}\right)^2 \sin^2 \alpha}$$

Si definisce $\Delta x = x - x_0$ dove $x_0 = -(m + b)$ per avere un massimo dello spostamento nullo:

$$x = m \cdot \cos \alpha + b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{m}{b}\right)^2 \sin^2 \alpha} - (m + b)$$

Si ottiene quindi un andamento dello spostamento della punta dell'utensile in Fig. 1.12 con delle lunghezze di manovella e di biella pari rispettivamente a $m = 40$ mm e $b = 120$ mm.

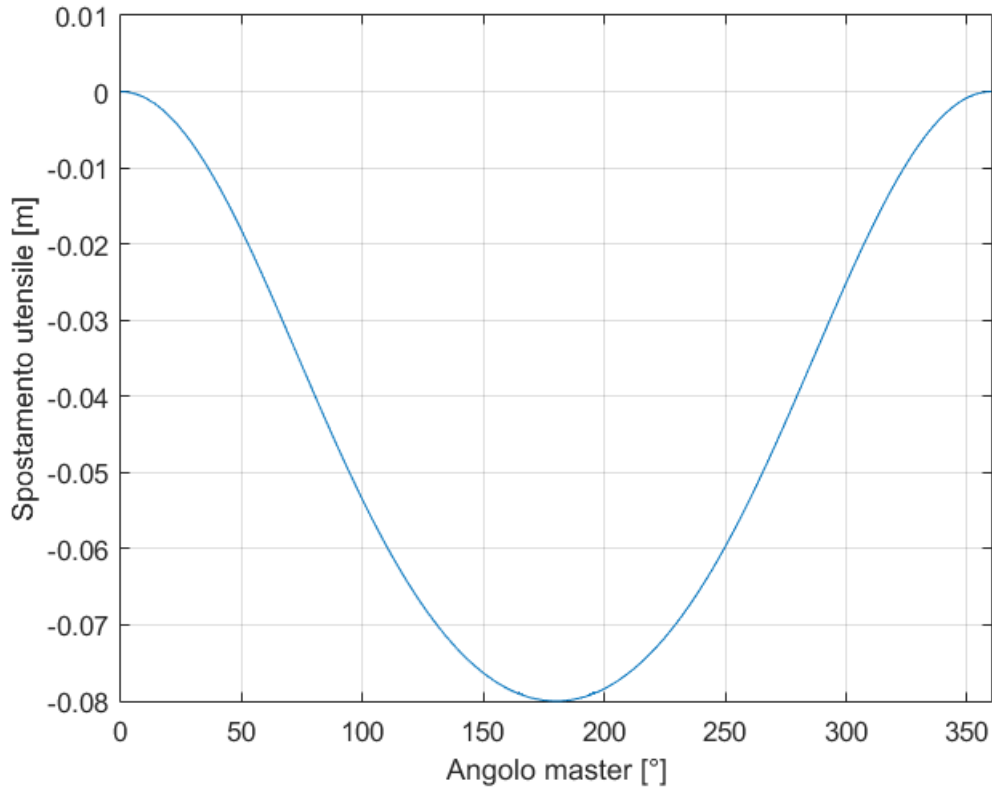


Fig. 1.12: Andamento dello spostamento dell'utensile durante un ciclo

Il modello Simulink del sottosistema utensile è simile per entrambi i tipi di soluzione. Nel caso in cui non si debba fermare il flusso nella zona di taglio (Fig. 1.13), si ha come ingresso lo spostamento del flusso produttivo che permette di elaborare la velocità del motore che muove i rulli coi taglienti. È necessario avere lo spostamento del flusso in ingresso per avere sincronismo tra l'utensile e il flusso, e quindi avere una velocità relativa nulla durante il taglio. La cinematica del meccanismo viene descritta da una funzione esterna sviluppata in Matlab.

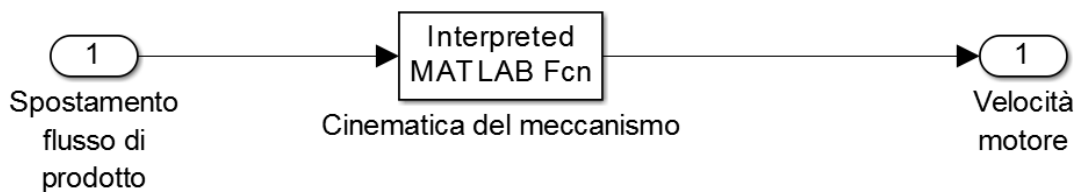


Fig. 1.13: Modello Simulink dell'utensile di taglio a rulli con taglienti

Nel caso in cui il flusso venisse fermato nella zona di taglio (Fig. 1.14), si può fornire come ingresso l'angolo master. In effetti in questo caso non è necessario avere direttamente lo spostamento del prodotto in ingresso, però è sempre necessario verificare che il taglio avvenga esclusivamente quando il flusso è fermo. L'uscita del modello è lo spostamento che compie l'utensile. Sono ovviamente disponibili le velocità ed accelerazione in caso di necessità. Anche in questo caso, la cinematica del meccanismo viene descritta da una funzione esterna sviluppata in Matlab.

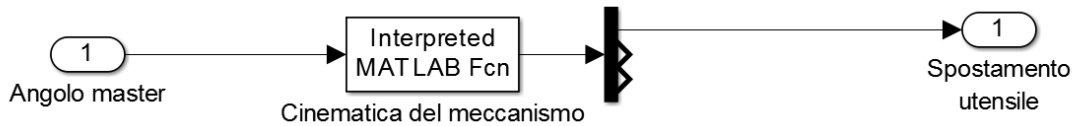


Fig. 1.14: Modello Simulink dell'utensile di taglio di tipo sega

1.2.5 – Il ballerino orizzontale

Il sottosistema del ballerino orizzontale, denominato anche slider, è utilizzato per trasformare un flusso continuo in un flusso intermittente. Generalmente gli sliders sono utilizzati a coppia: uno a monte della zona di taglio per fermare il flusso e uno valle per riaccelerare il prodotto verso la sua velocità nominale [14].

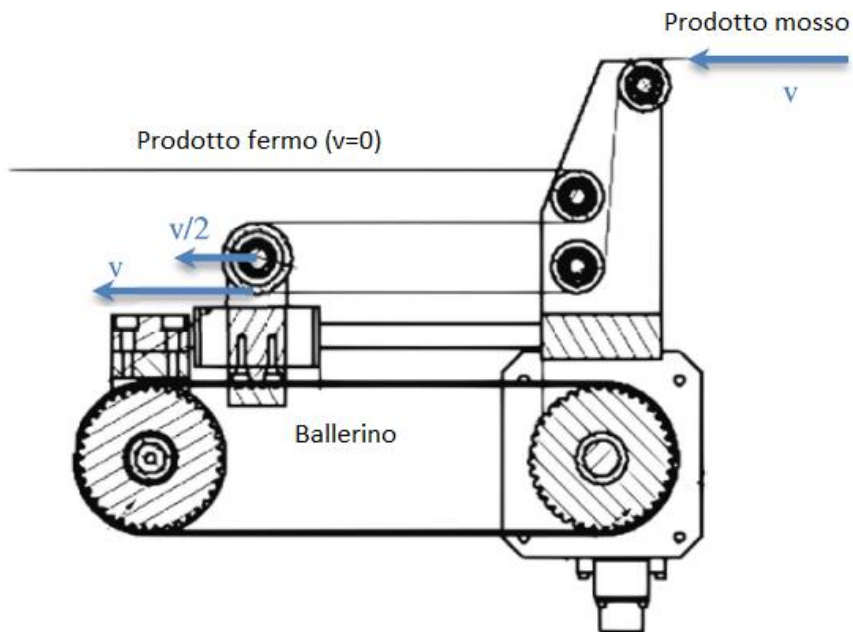


Fig. 1.15: Schema di un ballerino orizzontale

Se il flusso entra con velocità v nel sottosistema (Fig. 1.15), lo spostamento del ballerino orizzontale con una velocità $\frac{v}{2}$ permette di avere un flusso fermo in uscita. Tuttavia, la corsa dello slider è limitata per ragioni tecnologiche e quindi quest'operazione si può fare solo per tempi brevi.

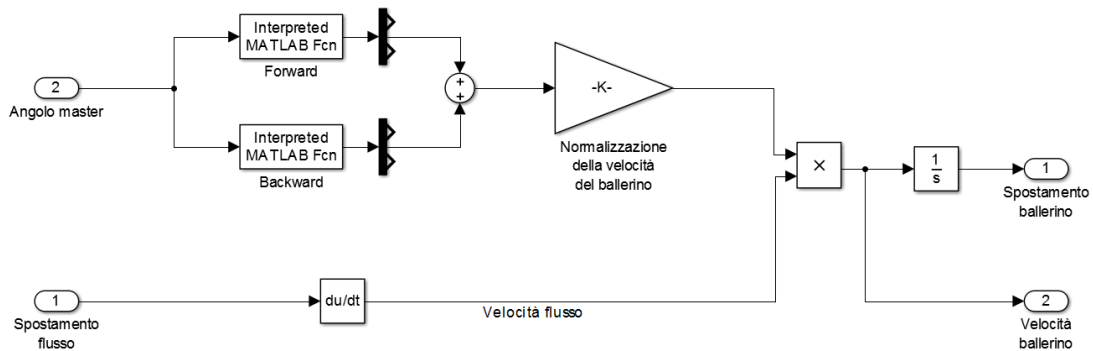


Fig. 1.16: Modello Simulink del sottosistema slider

Il modello Simulink (Fig. 1.16) prevede come ingresso l'angolo master e lo spostamento del flusso a monte dello slider. L'angolo master è l'informazione che permette di elaborare la legge di moto del ballerino tramite funzioni esterne. La legge di moto viene divisa in due parti. La prima, chiamata "Forward", manda il ballerino alla velocità $\frac{v}{2}$ che permette di fermare il nastro nella zona di lavorazione. La seconda parte, denominata "Backward", permette al ballerino orizzontale di tornare in posizione iniziale e di riaccelerare il nastro verso la sua velocità nominale. Queste due parti di legge vengono sommate e normalizzate per ottenere un coefficiente da moltiplicare con la velocità del nastro in ingresso. Ad esempio, quando il nastro deve essere fermato, la velocità dello slider deve essere pari a $\frac{v}{2}$ e quindi il coefficiente normalizzato è pari a 0,5. Quando i ballerini orizzontali sono fermi nella loro posizione iniziale, il coefficiente è nullo. Nella fase di ritorno in posizione iniziale, il moto dei ballerini si inverte e questo coefficiente diventa quindi negativo.

Il risultato del prodotto tra la velocità del flusso in ingresso e il coefficiente normalizzato dà direttamente la velocità da imporre allo slider da cui si ricava anche lo spostamento di quest'ultimo.

CAPITOLO 2

FUNZIONAMENTO IDEALE E PROBLEMATICHE

Le macchine di taglio al volo vengono tipicamente utilizzate per produrre ad alta velocità un prodotto con una certa lunghezza predefinita. In ingresso della macchina si ha un flusso di materiale continuo che si deve tagliare con una certa frequenza per ottenere il prodotto desiderato. L'obiettivo di tale macchina è di produrre tutti i pezzi con la stessa lunghezza predefinita avendo un'elevata precisione e mantenendo un elevato ritmo produttivo. Questo tipo di macchina verrà simulata nella parte 2.1.

Un'altra situazione in cui vengono spesso utilizzate le macchine di taglio al volo è quando si deve compiere un'operazione in una posizione ben definita sul materiale: ad esempio, se si deve realizzare una stampa in una certa posizione su una carta già prestampata. Un sensore posizionato a monte dell'utensile deve leggere delle informazioni per controllare la macchina e realizzare l'operazione nel momento opportuno. In questo caso, l'operazione da effettuare non è necessariamente nella stessa posizione ad ogni ciclo.

2.1 – Simulazione applicata ad un caso particolare

2.1.1 - Introduzione

Lo strumento di simulazione descritto nella parte precedente può essere utile per la sintesi di una macchina di taglio al volo. In effetti, mettendo in serie i diversi sottosistemi all'interno di un

modello Simulink, si può definire ed analizzare il comportamento di un'intera macchina.

In questo lavoro si è scelto di simulare il comportamento della macchina di taglio al volo presentata in Fig. 2.1 e Fig. 2.2.

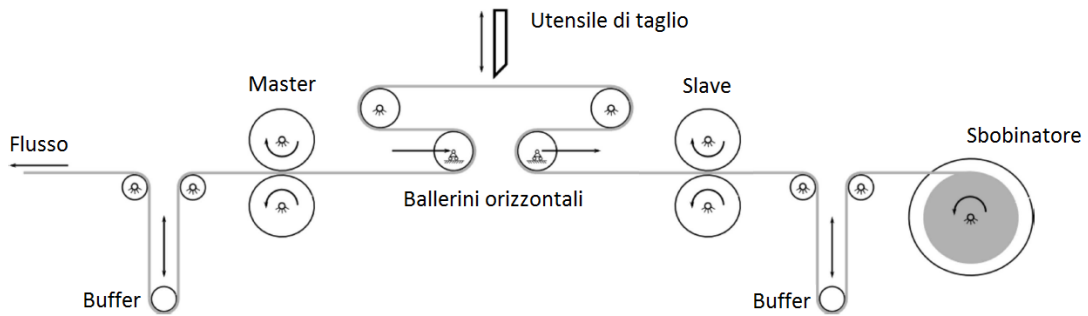


Fig. 2.1: Macchina di taglio al volo

Il prodotto si muove da destra verso sinistra. Lo sbobinatore fornisce il materiale alla macchina di taglio al volo. I due sottosistemi master e slave trascinano il prodotto imponendo una velocità costante; questo permette di evitare tensioni indesiderate all'interno del prodotto. L'utensile di taglio scelto è una sega che compie un movimento verticale per tagliare il materiale. Questo tipo di utensile necessita di avere il prodotto fermo durante la lavorazione. Quindi ci sono due ballerini orizzontali, il cui funzionamento è stato descritto in precedenza, che permettono di trasformare il movimento continuo in un movimento intermittente nella zona di taglio. Infine, i due buffers posizionati all'inizio e alla fine del processo possono raccogliere ed immagazzinare del materiale e quindi regolare il flusso e la tensione all'interno di questo.

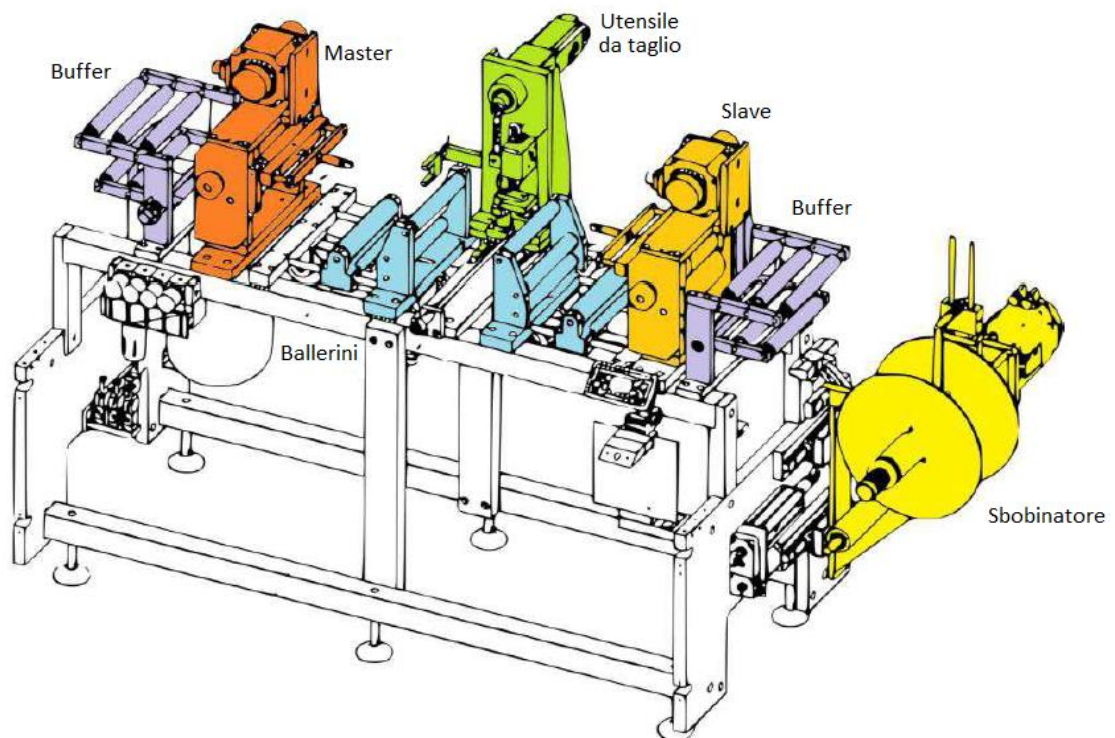


Fig. 2.2: Vista in 3D della macchina di taglio al volo

Questo tipo di macchina viene spesso utilizzato all'interno di catene di produzione. Le operazioni più comuni effettuate con questa macchina sono le operazioni di taglio e quelle di stampa. Tuttavia, nei fatti si possono realizzare qualsiasi tipo di operazione nella zona di lavorazione. In effetti, i due ballerini orizzontali permettono di trasformare un moto continuo in un moto intermittente che ferma il flusso di prodotti nella zona di lavorazione per un tempo definito. Il prodotto essendo fermo, si può realizzare un'operazione anche più complessa rispetto al taglio senza particolari problemi di precisione.

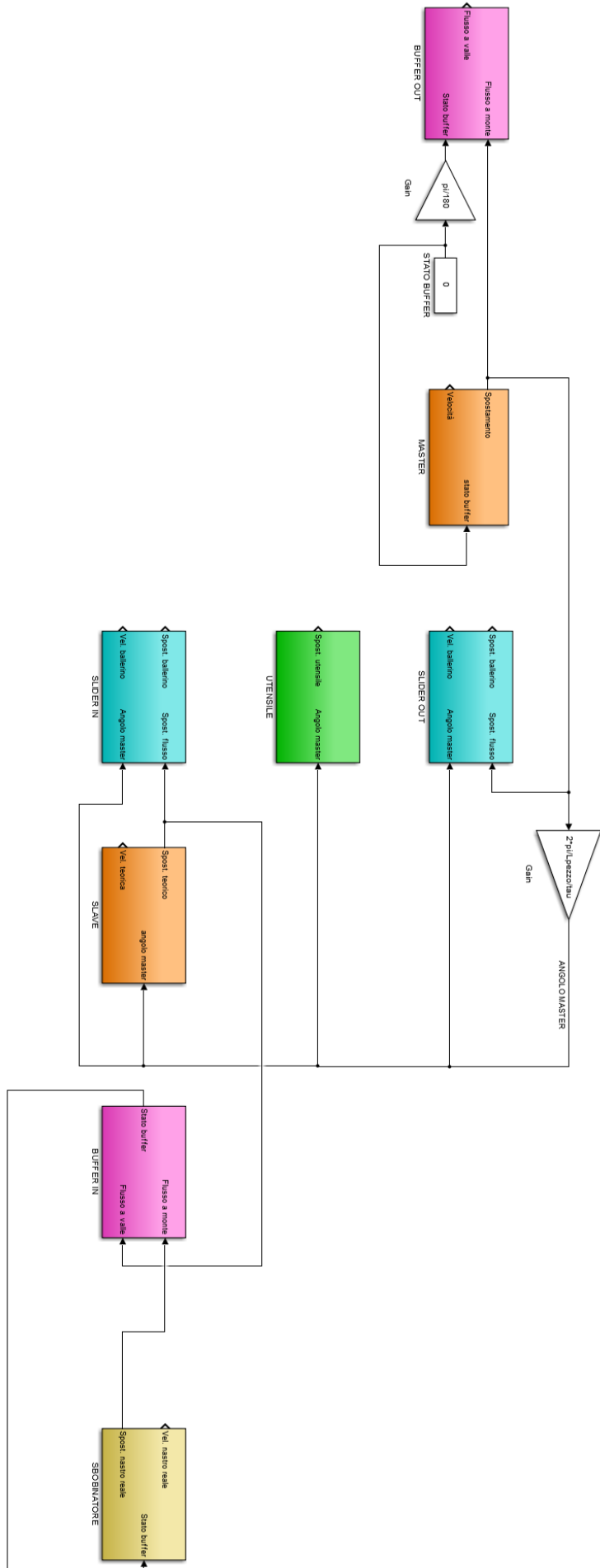


Fig. 2.3: Modello Simulink della macchina di taglio al volo

Il modello Simulink corrispondente (Fig. 2.3) riprende i sottosistemi descritti in precedenza per metterli in serie e quindi simulare il funzionamento di questo tipo di macchina di taglio al volo. I vari sottosistemi sono stati colorati in corrispondenza della Fig. 2.2 per evidenziare la disposizione dei sottosistemi e quindi il percorso effettuato dal materiale. Si nota come i vari sottogruppi siano in relazione tra di loro. In effetti, nella prima parte di questo lavoro, sono stati descritti i principali sottosistemi costituenti di una macchina di taglio al volo ed è stato evidenziato il fatto che certi abbiano come ingresso delle informazioni emesse da altri. Sullo schema Simulink presente in Fig. 2.3, si ritrovano questi legami tra i vari blocchetti rappresentativi di ogni sottosistema.

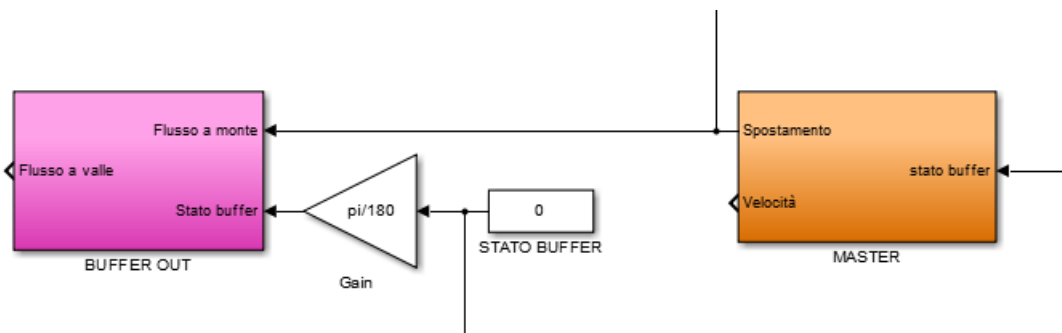


Fig. 2.4: Zoom sulla retroazione dello stato del buffer

Ad esempio, la Fig. 2.4 indica la retroazione dello stato del buffer in uscita della macchina (Buffer Out) sul sottosistema master: come descritto in precedenza, il sottogruppo master adatta la sua velocità in funzione dello stato del buffer posizionato a valle.

L'angolo master viene definito grazie allo spostamento generato dal sottosistema master. Si ha:

$$\theta = \frac{2\pi}{L_{pezzo} \cdot \tau} \cdot s$$

- Dove:
- θ : angolo master
 - s : spostamento in uscita del sottosistema master
 - L_{pezzo} : lunghezza del pezzo ideale
 - τ : rapporto di trasmissione del master

Si nota la presenza del rapporto di trasmissione del master nella definizione dell'angolo master. In effetti, un giro completo dell'albero master non corrisponde necessariamente alla produzione di un unico pezzo.

L'angolo master rappresenta la variabile principale del modello che è in ingresso del blocchetto slave, del blocchetto utensile di taglio e dei due blocchetti sliders. Permette di sincronizzare le diverse parti della macchina per garantire il taglio nel momento in cui il flusso di prodotto è fermo nella zona di lavorazione. Come descritto in precedenza, questo sincronismo risulta essere essenziale in questo tipo di macchina per garantire il buon funzionamento del sistema.

L'obiettivo di questa parte è di simulare una macchina di taglio al volo capace di produrre a ritmo elevato dei pezzi di materiale avendo tutti la stessa lunghezza L_{pezzo} partendo da un flusso di materiale continuo. Ad esempio, un'applicazione di questo processo potrebbe essere il taglio della carta destinata a formare un imballaggio, oppure potrebbe essere il taglio di saponi con taglia definita a partire da un blocco di sapone.

In questa simulazione, si sono scelti i dati principali riportati in seguito:

L_{pezzo}	T_{ciclo}	V_{master}	τ
0.2 [m]	0.5 [s]	0.4 [m/s]	1

2.1.2 – Legge di moto dell'utensile di taglio

Come descritto nella sezione 1.2.4, il tipo di utensile di taglio utilizzato è spesso costituito da una sega attutata da un meccanismo di manovellismo. Questo sistema è molto utilizzato nel mondo industriale. Infatti, oltre a dare una buona continuità al movimento che deve compiere l'utensile, la sua implementazione all'interno di un sistema risulta essere nota da tempi e quindi viene spesso usato per la sua grande comodità in fasi di progettazione e di costruzione di una macchina.

Si ricorda l'equazione di moto ottenuta nella sezione 1.2.4:

$$x = m \cdot \cos \alpha + b \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{m}{b}\right)^2 \sin^2 \alpha} - (m + b)$$

Dove:

- x : spostamento della punta dell'utensile
- α : angolo master
- m : lunghezza della manovella
- b : lunghezza della biella

Nel caso di applicazione scelto, la lunghezza della manovella m è stata scelta pari a 40 mm mentre quella della biella b pari a 120 mm. Questo provvedimento dà un rapporto tra manovella e biella λ pari a:

$$\lambda = \frac{m}{b} = 3$$

Questi valori sono ragionevoli dal punto di vista realizzativo. Inoltre, con la scelta di questo manovellismo, la corsa dell'utensile di taglio è pari al doppio della lunghezza di manovella e risulta quindi essere pari a 80 mm (Fig. 2.5).

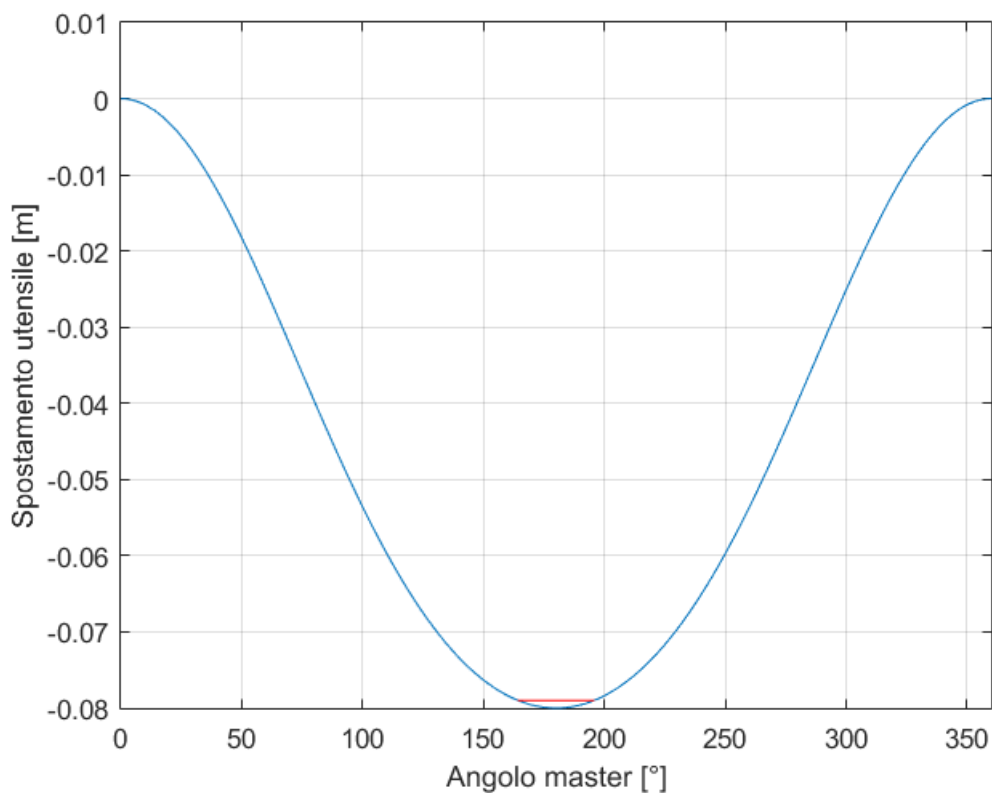


Fig. 2.5: Spostamento dell'utensile in funzione dell'angolo master

Come evidenziato in figura, si suppone di partire da posizione nulla per raggiungere la quota di -80 mm sull'asse verticale a fine corsa. Tuttavia, l'operazione di taglio sul materiale non avviene durante la totalità di questa corsa ma si verifica solo su un tratto supposto di 1 mm. In effetti, si suppone l'utensile a contatto col materiale lavorato solo quando l'utensile è raggiunto la quota di -79 mm. È stato evidenziato in Fig. 2.5 con un tratto rosso la zona in cui avviene effettivamente il taglio.

2.1.3 – Legge di moto dei ballerini orizzontali

I due ballerini devono avere una legge di moto che permette al flusso di materiale di fermarsi durante l'operazione di taglio. Devono poi tornare nella loro posizione iniziale riaccelerando il flusso di prodotti verso la sua velocità nominale.

Si è usata una legge composta da due parti di tipo Sette Tratti la cui velocità viene rappresentata in Fig. 2.6.

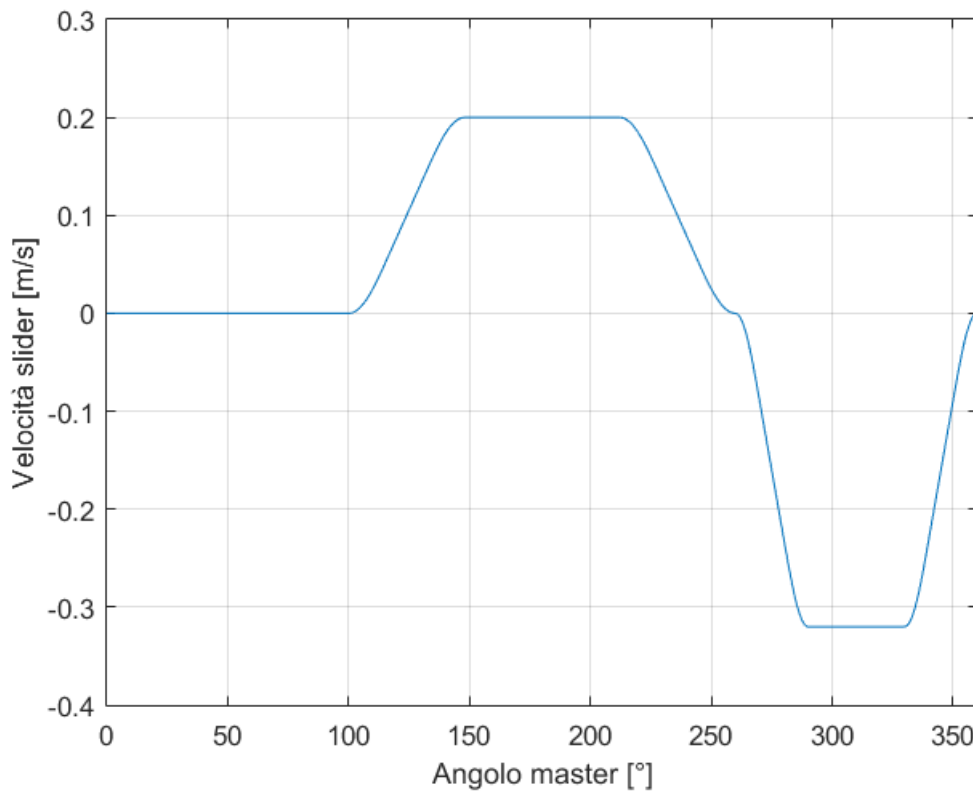


Fig. 2.6: Andamento della velocità di uno slider durante un ciclo

In un primo tratto, il ballerino è in posizione iniziale, fermo.

In un secondo momento inizia la prima legge a “Sette Tratti” che porta il ballerino alla sua velocità massima positiva pari alla metà della velocità nominale del flusso di materiale. Lo slider rimane a questa velocità costante durante l'operazione di taglio e poi torna a velocità nulla.

Infine, inizia la seconda legge a “Sette Tratti” con delle velocità negative che permette di riportare il ballerino orizzontale nella sua posizione iniziale. Si nota che la velocità minima è, in valore assoluto, maggiore rispetto a quella massima.

In effetti, il tempo a disposizione dalla seconda legge “Sette Tratti” essendo minore rispetto a

quello a disposizione dalla prima, si devono raggiungere valori di velocità più elevati in termini assoluti per potere riportare lo slider nella sua posizione iniziale.

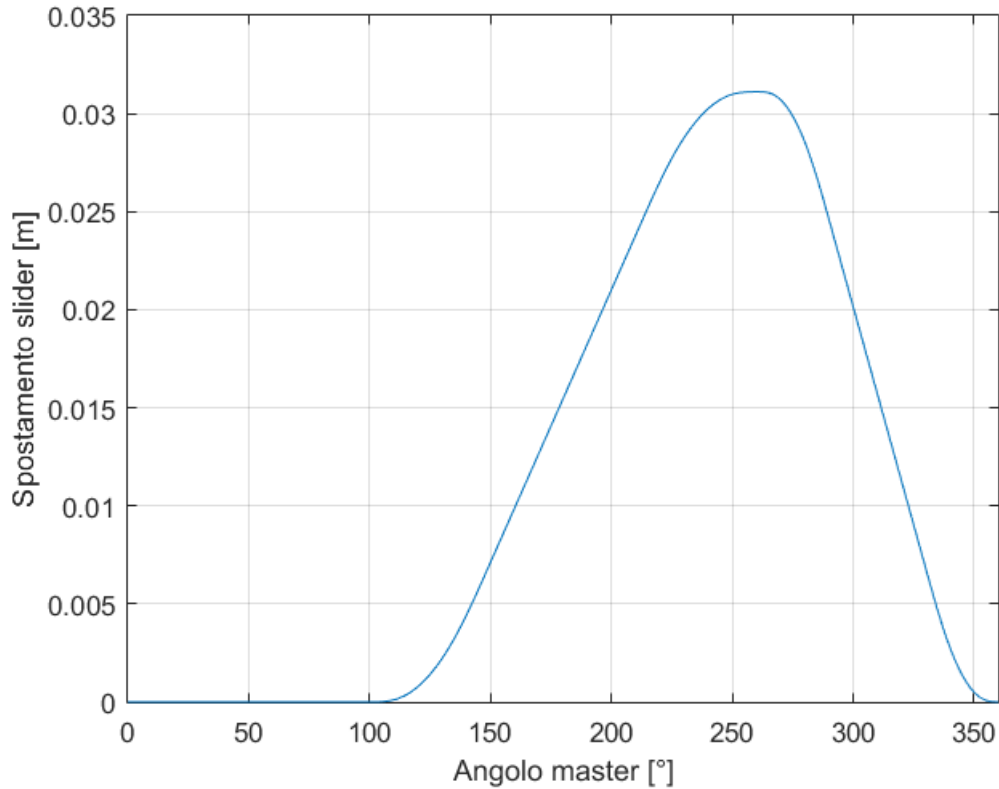


Fig. 2.7: Andamento dello spostamento di uno slider durante un ciclo

In Fig. 2.7 è stato riportato lo spostamento di un ballerino orizzontale. Si nota che a fine ciclo torna in posizione iniziale preparandosi ad effettuare il ciclo successivo.

Usare questo tipo di legge di moto è anche interessante dal punto di vista delle accelerazioni poiché permette di avere grande continuità nelle accelerazioni come si evidenzia in Fig. 2.8.

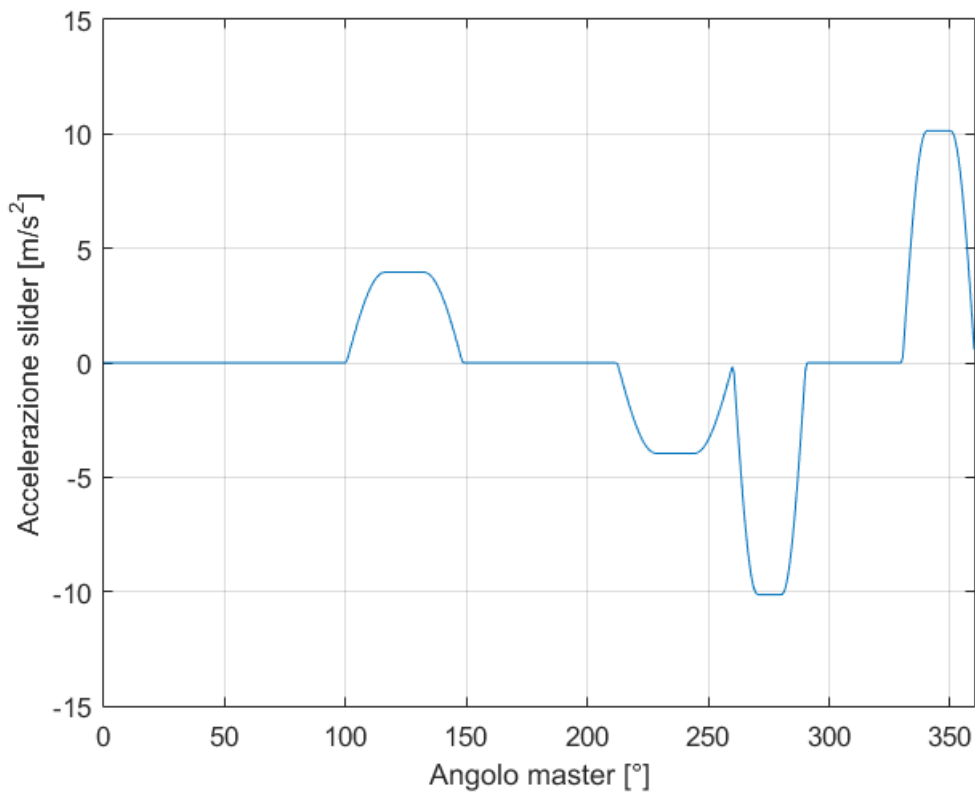


Fig. 2.8: Andamento dell'accelerazione di uno slider durante un ciclo

Questo tipo di legge ha però dei valori massimi di accelerazione maggiori rispetto alla legge ad accelerazioni costanti (Fig. 2.9) che è la legge che permette di avere i valori massimi più bassi possibili. Comunque si supera di poco questa legge che dà i valori minimi raggiungibili di accelerazioni e si giudica opportuno scegliere una legge che dà maggiori garanzie sulla continuità e quindi che può più facilmente essere riprodotta dagli attuatori effettivamente presenti all'interno di tale sistema.

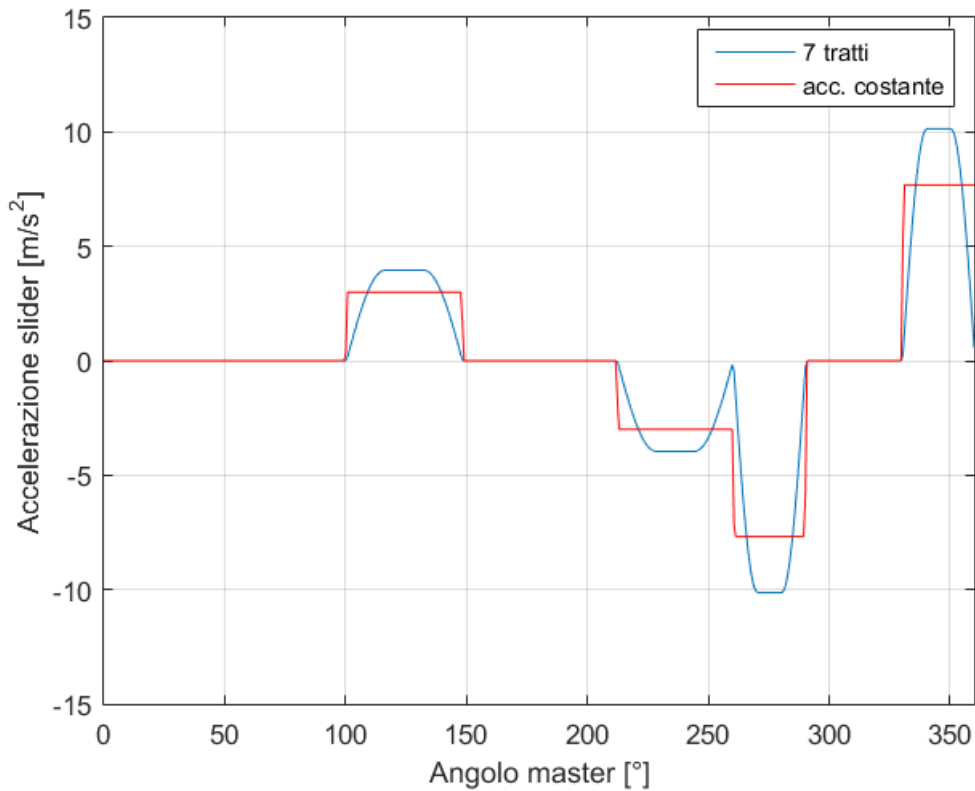


Fig. 2.9: Confronto tra accelerazioni di leggi diverse

2.1.4 – Diagramma delle fasi

Per potere verificare che l'operazione di taglio avvenga quando il nastro nella zona di lavorazione è fermo, si usa il diagramma delle fasi. Questo strumento permette di verificare il sincronismo tra le varie parti della macchina e quindi verificare il corretto funzionamento di quest'ultima.

Si suppone prima di prendere i buffers in ingresso ed in uscita macchina in stato neutro di 0° coincidente con il caso ideale di funzionamento.

Durante un ciclo di durata T_{ciclo} , l'angolo master compie 360° e si produce un pezzo. Poi il ciclo si ripete ed un altro pezzo viene prodotto. La simulazione seguente (Fig. 2.10) vede quattro cicli effettuarsi. Per semplicità, si è plottato tutto nello spazio dei tempi; in effetti una simulazione Simulink gira nel tempo ed è immediatamente più comodo riferirsi a quello nel diagramma delle fasi, soprattutto quando ci sono più cicli da visualizzare.

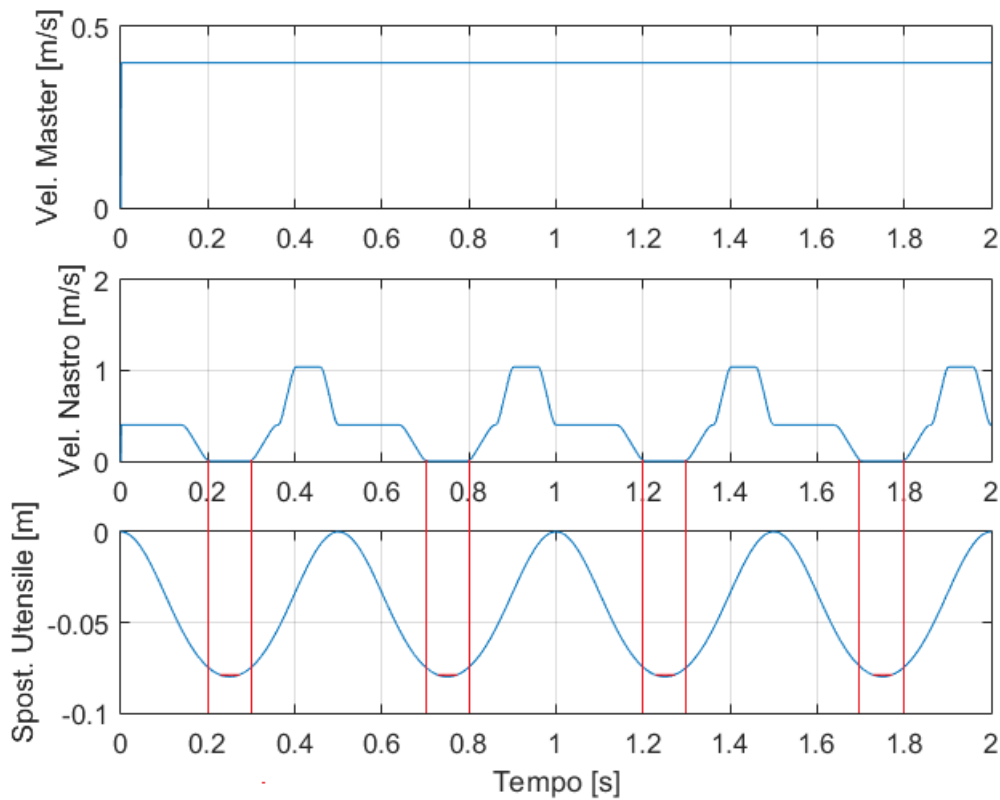


Fig. 2.10: Diagramma delle fasi

In questa figura sono rappresentate e confrontate tre grandezze:

- **La velocità del sottosistema master:** è imposta ad un valore costante V_{master} pari a 0.4 m/s. In effetti, si suppone un andamento ideale della macchina di taglio al volo e quindi il nastro trascinato dal master viaggia ad una velocità nominale costante.
- **La velocità del nastro in zona di taglio:** si ottiene sottraendo due volte la velocità di uno slider a quella del sottosistema master:

$$V_{nastro} = V_{master} - 2V_{slider}$$

La valutazione di questa velocità è fondamentale in questo studio. Come descritto in precedenza, la velocità del nastro deve essere nulla quando avviene l'operazione di taglio.

- **Lo spostamento dell'utensile di taglio:** rappresenta la lavorazione sul prodotto. È stato descritto nella parte 2.1.2.

Si è evidenziato in rosso sul diagramma delle fasi (Fig. 2.10) come l'operazione di taglio avviene effettivamente in un momento in cui il flusso è fermo in questa zona. In effetti, considerando ad esempio il primo ciclo, all'istante $T=0.2s$ la velocità del nastro nella zona di taglio si annulla fino all'istante $T=0.3s$. Si nota sull'andamento dello spostamento dell'utensile che il taglio, evidenziato con un tratto rosso orizzontale, avviene correttamente tra questi due momenti. In questo modo viene garantita la precisione dell'operazione di taglio.

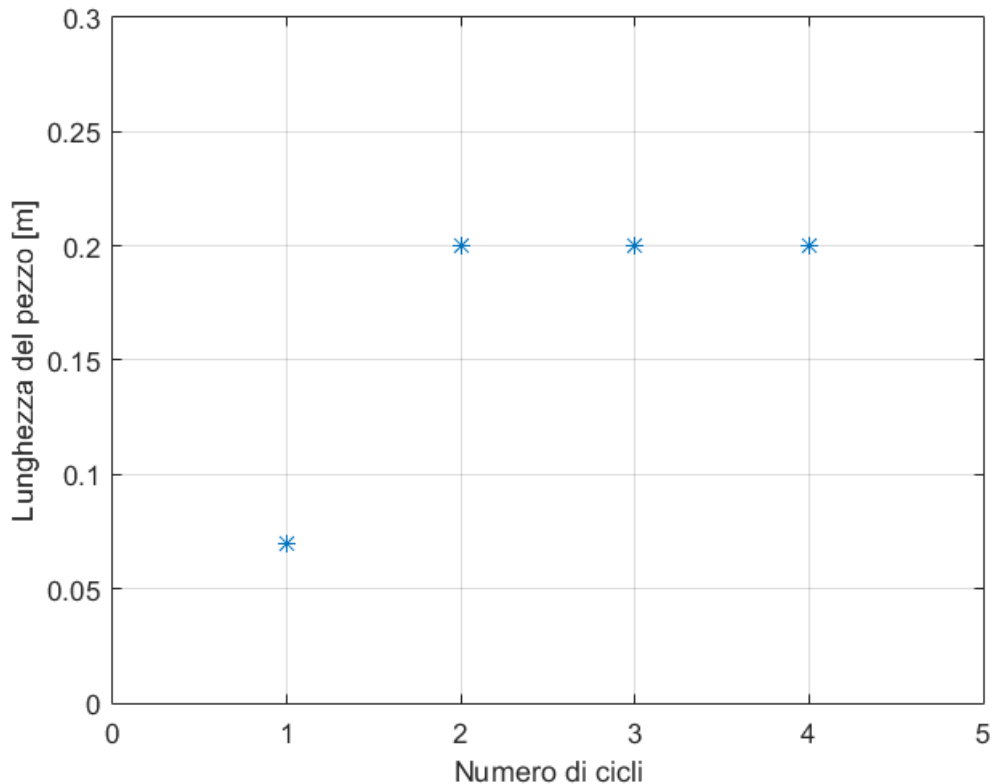


Fig. 2.11: Lunghezza del pezzo prodotto in funzione del numero di cicli

A partire dal secondo ciclo, la lunghezza di ogni prodotto ottenuto è di 0.2 m ed è pari al valore desiderato. Non è il caso del primo prodotto lavorato in avvio di macchina. In effetti, siccome il taglio avviene a metà del ciclo di lavorazione, esiste una fase alla fine del ciclo in cui il nastro nella zona di taglio riaccelera. Questa fase, evidenziata in rosso nella Fig.2.12, è utile per fare scorrere del materiale in vista di raggiungere la lunghezza di prodotto desiderata nel ciclo successivo. In avvio di macchina, non si può effettuare questa fase e ne risulta un prodotto più corto del previsto. Questo prodotto sarà da scartare visto la sua non conformità.

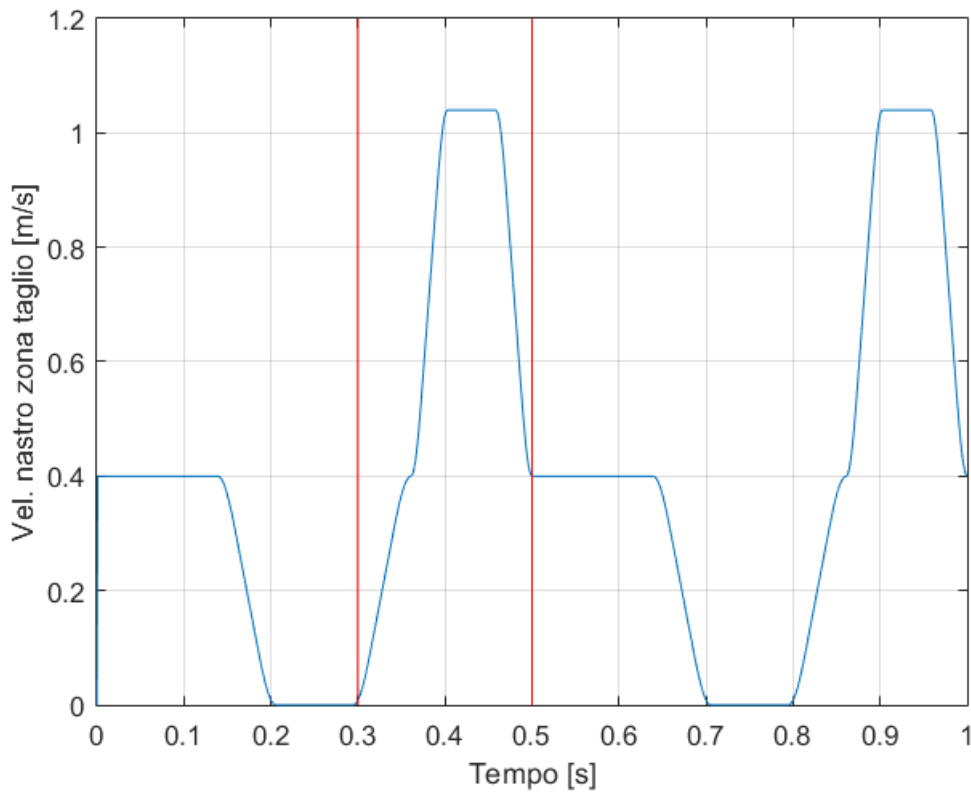


Fig. 2.12: Velocità del nastro nella zona di taglio

2.1.5 - Funzionamento dei buffers

In questa parte si ipotizzano dei valori diversi per i buffers. Si affrontano due casi diversi: il primo caso si riferisce al buffer in ingresso mentre il secondo riguarda il buffer in uscita della macchina di taglio al volo.

Si suppone in un primo tempo di avere una velocità in uscita dello sbobinatore troppo elevata, ad esempio con un valore più alto del 10%. Il buffer posizionato immediatamente dopo lo sbobinatore deve prima assorbire il flusso troppo elevato e poi deve inviare informazioni al sottosistema dello sbobinatore per regolare il flusso. I risultati ottenuti in simulazione sono rappresentati in Fig. 2.13:

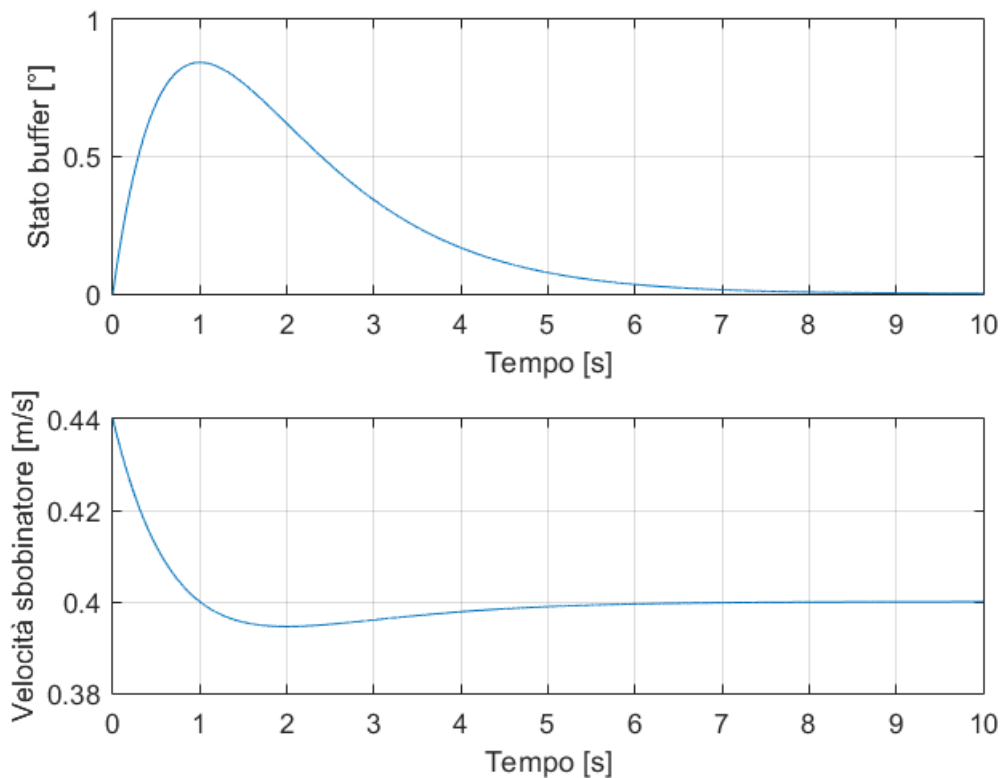


Fig. 2.13: Evoluzione dello stato del buffer e della velocità dello sbobinatore

Si nota che all'inizio, la velocità dello sbobinatore è di 0.44 m/s ed è maggiore rispetto al valore nominale di 0.4 m/s. Quindi il buffer si riempie fino al momento $T=1s$ in cui la velocità dello sbobinatore diventa pari a 0.4 m/s. Successivamente, il buffer riesce a svuotarsi mentre la velocità cala sotto il suo valore nominale. Quando il buffer riesce a svuotarsi completamente tornando verso il suo stato neutro di 0° si nota che la velocità del sottosistema sbobinatore converge verso il valore nominale. Giocando sulla dinamica del regolatore, scelto di tipo PID (Fig. 1.9), si possono raggiungere prestazioni migliori come ad esempio un tempo di raggiungimento minore, oscillazioni ridotte, ecc.

In un secondo tempo, si ipotizza di avere un riempimento fino a saturazione (45°) del buffer in uscita della macchina. Si ottiene il diagramma delle fasi seguente, in Fig. 2.14.

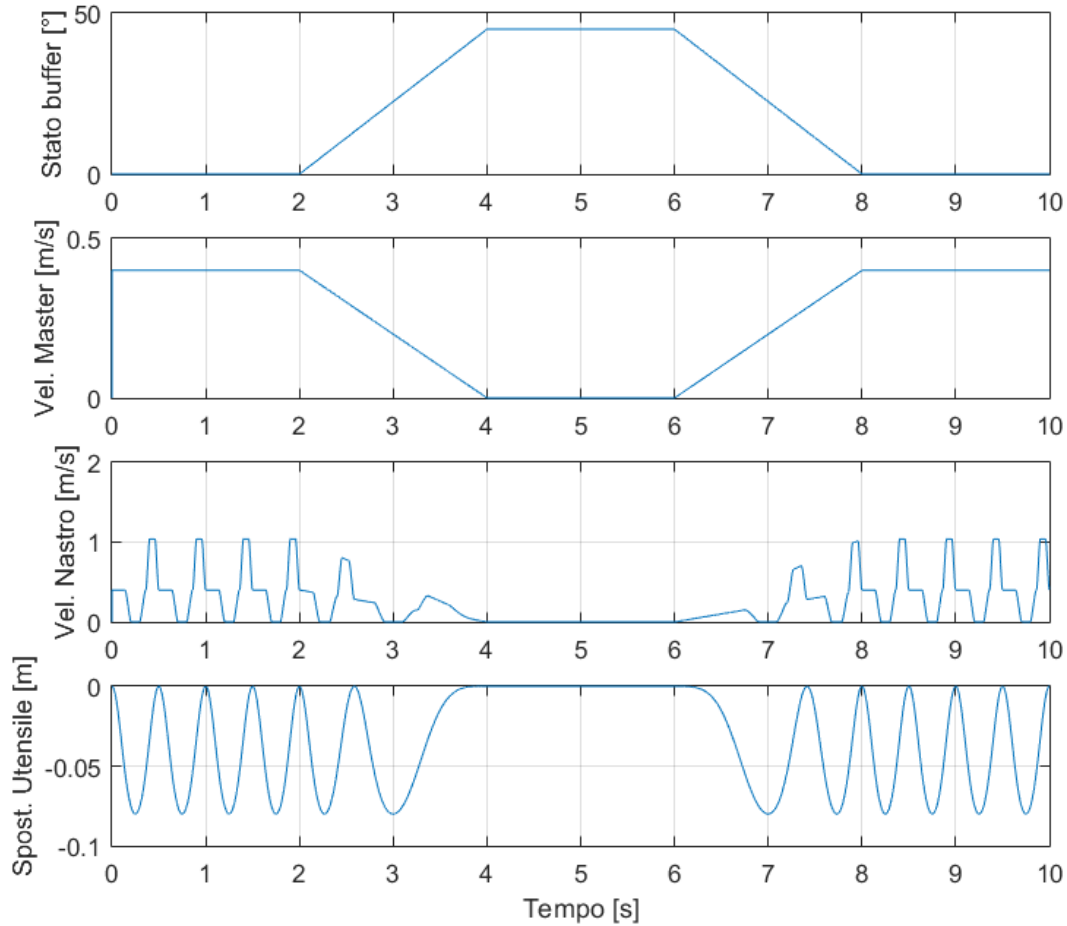


Fig. 2.14: Diagramma delle fasi con variazione del buffer in uscita macchina

All'inizio il buffer è in posizione media di 0° e il sottosistema master va alla velocità nominale di 0.4 m/s . Questo funzionamento corrisponde al caso ideale descritto nelle parti precedenti.

Al tempo $T=2\text{s}$, il buffer si riempie con una funzione di tipo rampa fino alla saturazione che corrisponde alla posizione di 45° descritta in parte 1.2.1. Il sottosistema master riduce quindi la sua velocità per arrivare a velocità nulla al tempo $T=4\text{s}$. In effetti il buffer è pieno, non si possono più accumulare i pezzi all'interno di esso, quindi si ferma la produzione.

Questo stato si verifica fino al tempo $T=6\text{s}$ dove il buffer inizia a svuotarsi. La produzione riprende e la velocità del master aumenta fino alla velocità nominale di 0.4 m/s raggiunta nel momento $T=8\text{s}$. Infine la produzione segue il suo ritmo nominale.

Si nota come il sincronismo tra gli sliders e l'utensile di taglio sia mantenuto durante tutta la durata della simulazione. In effetti, il taglio avviene sempre quando la velocità del nastro nella zona di lavorazione è nulla. Inoltre, come si può evidenziare sull'ultimo grafico legato alla posizione dell'utensile, quando la velocità del master varia, il tempo di ciclo T_c si adatta permettendo alla lunghezza del pezzo prodotto L_{pezzo} di rimanere costante e pari al valore desiderato.

2.2 – Varie problematiche incontrate da queste macchine

Nel funzionamento effettivo di questo genere di macchina, a livello industriale si notano delle singolarità nel processo di produzione. In effetti, la produzione non è priva di errori che vengono spesso amplificati col tempo. Si evidenziano principalmente due tipi di errori durante la produzione da affrontare per un'azienda volendo effettuare prodotti di altissima precisione. Questi due errori non sono gli unici presenti all'interno di queste macchine però rappresentano quelli più frequentemente incontrati.

2.2.1 – Errori del primo tipo

Il primo tipo di errore incontrato corrisponde al caso in cui il flusso produttivo non è nella posizione teorica ma invece risulta essere in anticipo o in ritardo. La lavorazione da effettuare tiene in considerazione l'informazione teorica e quindi, per esempio, si taglia il prodotto in un momento sbagliato.

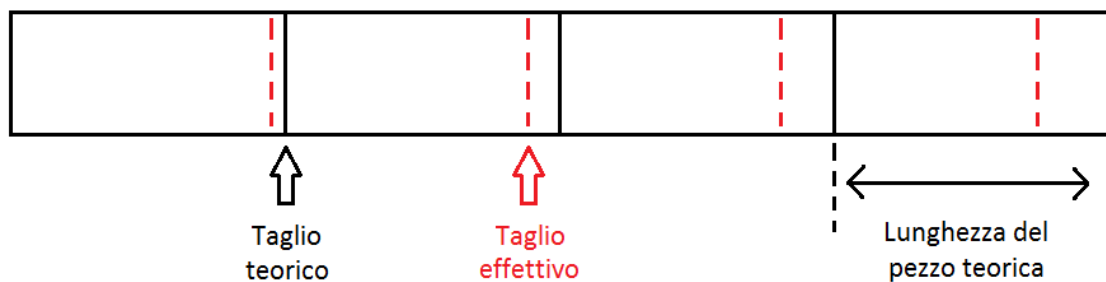


Fig 2.15: Illustrazione dell'errore di slittamento

Questo tipo di errore è generalmente dovuto ad uno slittamento a livello del sottosistema master. In effetti durante il trascinarsi del prodotto, il contatto tra i rulli e il materiale non è perfetto e si genera un leggero slittamento. Il prodotto risulta essere in ritardo rispetto alla sua posizione teorica che può essere direttamente esplicitata dalla movimentazione dei rulli

trascinatori del sottosistema master. L'andamento di questo tipo di errore può essere considerato come lineare. In effetti, ad ogni ciclo, si assume che il nastro di materiale slitti allo stesso modo e quindi si può considerare l'errore come costante tra un ciclo e quello successivo.

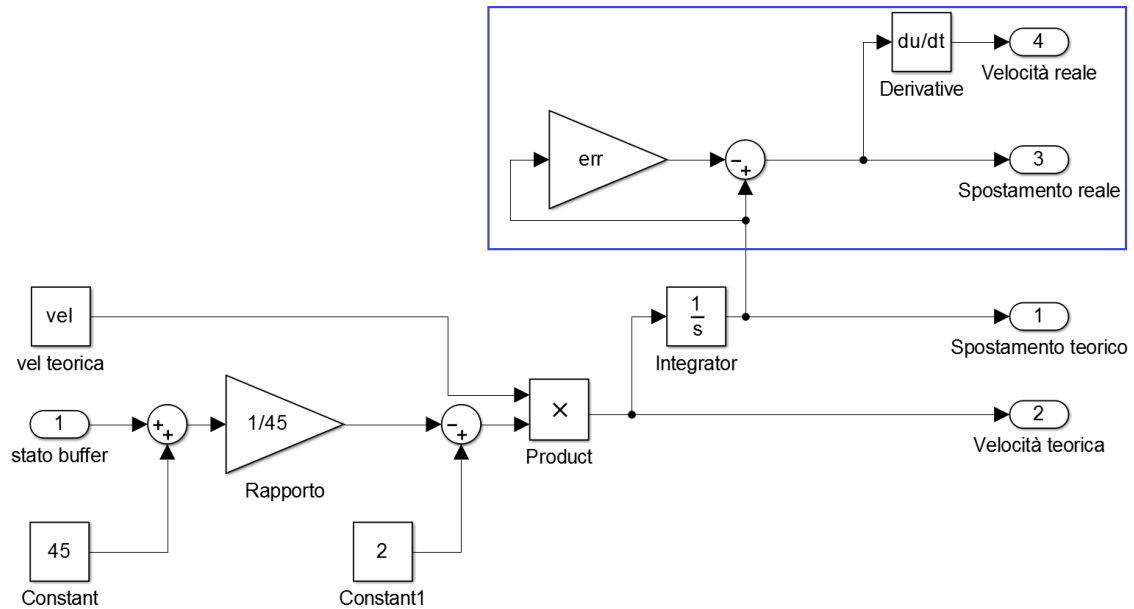


Fig. 2.16: Modello Simulink dell'errore

L'implementazione di questo tipo di errore all'interno del programma Simulink avviene tramite il sottosistema master (Fig. 2.16). Si riprende il modello privo di errore proposto nel paragrafo 1.2.2 al quale si aggiunge la parte evidenziata in blu. In questa parte viene considerato lo spostamento teorico al quale si toglie una certa percentuale di errore *err*. Ne risulta uno spostamento reale che tiene conto dell'errore di slittamento. Da questo spostamento si ottiene la velocità reale derivando.

Inoltre, si nota che il modello Simulink, per costruzione, può anche simulare degli errori di anticipo, e non di ritardo. In effetti, se l'errore *err* viene scelto negativo, si può prevedere un nastro in anticipo rispetto alla sua posizione teorica. Tuttavia, nello sviluppo di questo studio si sceglierà un errore *err* positivo corrispondente al caso di slittamento del nastro che ritarda il suo avanzamento come evidenziato dalle figure seguenti.

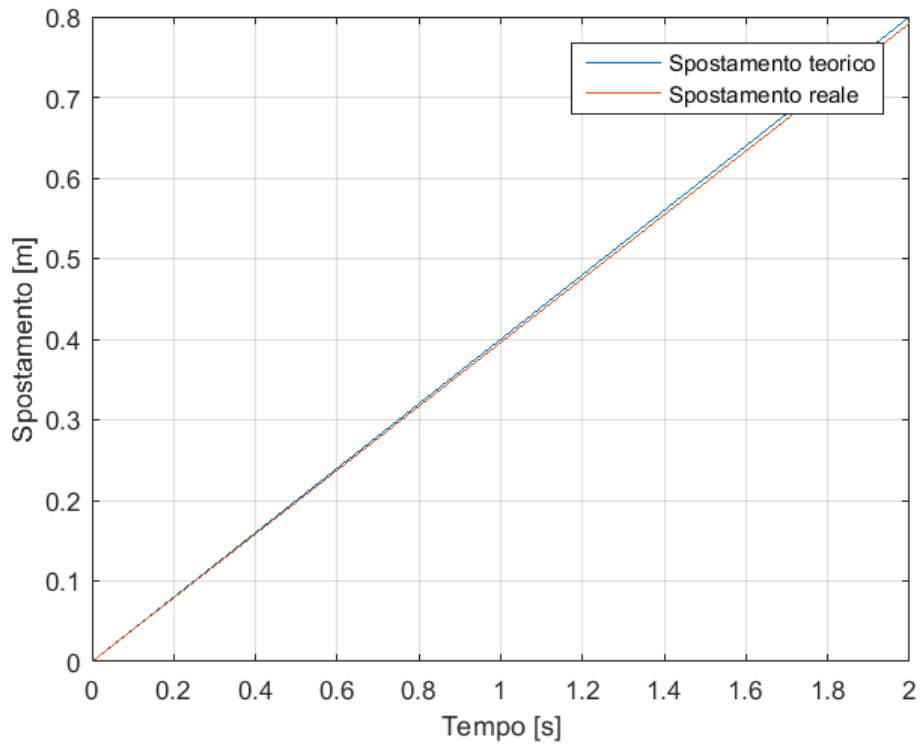


Fig. 2.17: Andamento degli spostamenti teorici e reali del nastro

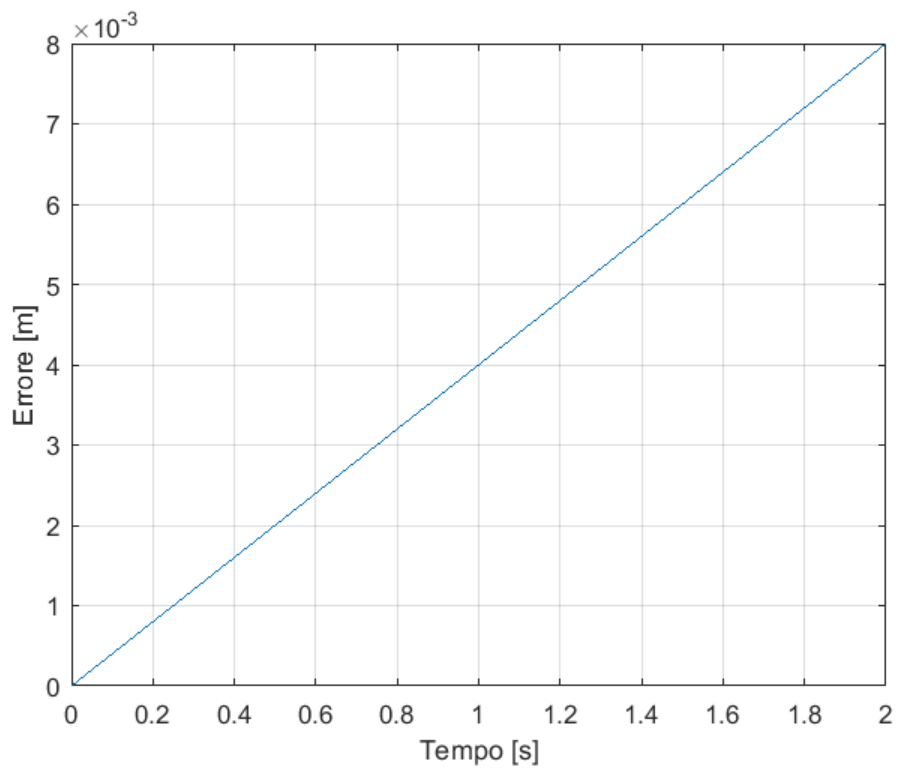


Fig. 2.18: Andamento dell'errore di slittamento del nastro

Questi grafici sono stati ottenuti con i dati seguenti:

$L_{pezzo\ teorica}$	T_{ciclo}	$V_{master\ teorica}$	<i>Errore</i>
0.2 [m]	0.5 [s]	0.4 [m/s]	1 %

Per comodità grafica, si è scelto un errore dell'ordine del 1 %. Questo dà già un errore di posizione sul nastro di 8 mm dopo solo quattro cicli.

Nella realtà, quando una macchina di taglio al volo è stata calibrata in un modo opportuno, si notano degli errori dell'ordine del 10^{-5} , cioè dello 0.001 %. Ad esempio, quando il nastro si muove di un metro, si commette un errore di slittamento dell'ordine di dieci micron. Errori di questo tipo sono evidentemente insignificanti considerando un unico ciclo. Però questo tipo di macchina è progettata per avere una cadenza produttiva elevatissima e quindi si fanno migliaia di cicli nel giro di un turno produttivo. Non è raro di potere accumulare gli errori ed ottenere una seria differenza tra la posizione teorica e quella effettiva del nastro.

2.2.2 – Errori del secondo tipo

Il secondo tipo di errore che può essere frequentemente incontrato è di tipo periodico e concerne l'utensile di taglio. Quest'errore provoca anch'esso un taglio nel momento sbagliato ed è principalmente dovuto alla geometria dell'utensile a rulli con taglienti presentato nel paragrafo 1.2.4, più particolarmente in Fig. 1.10. Di solito ci sono diversi taglienti disposti sul rullo ai fini di potere effettuare più operazioni di taglio in un unico giro del rullo. Questi taglienti sono generalmente equispaziati attorno al cilindro principale. Questo introduce una simmetria che rende comodo il controllo dell'utensile. Tuttavia, durante la fabbricazione di questi rulli con taglienti, ci possono essere degli errori sulla posizione angolare del tagliente (Fig. 2.19).

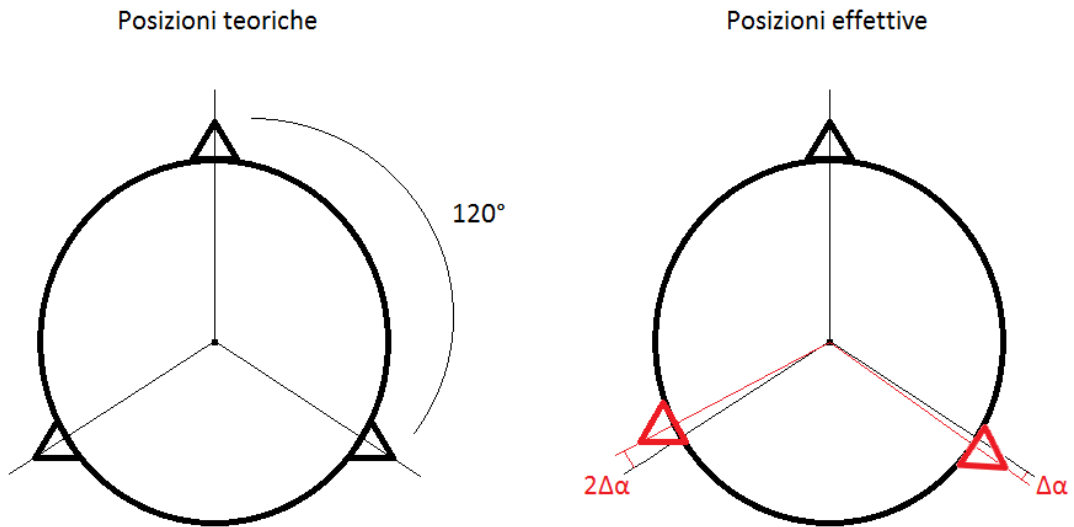


Fig. 2.19: Errore di posizionamento dei taglienti sull'utensile

Se il rullo ha per esempio tre taglienti attorno, idealmente questi ultimi sarebbero posizionati a 120° l'uno rispetto all'altro. Durante la fabbricazione però, si possono avere delle fluttuazioni su questo valore che diventa di $120^\circ + \Delta\alpha$ dove $\Delta\alpha$ rappresenta l'errore angolare di posizionamento del tagliente. Il secondo tagliente sarà quindi posizionato a $120^\circ + \Delta\alpha$ rispetto al primo tagliente di riferimento, mentre il terzo tagliente sarà situato a $240^\circ + 2\Delta\alpha$ rispetto al riferimento. Ne risulta allora un errore sulla posizione effettiva del taglio che ha l'andamento seguente:

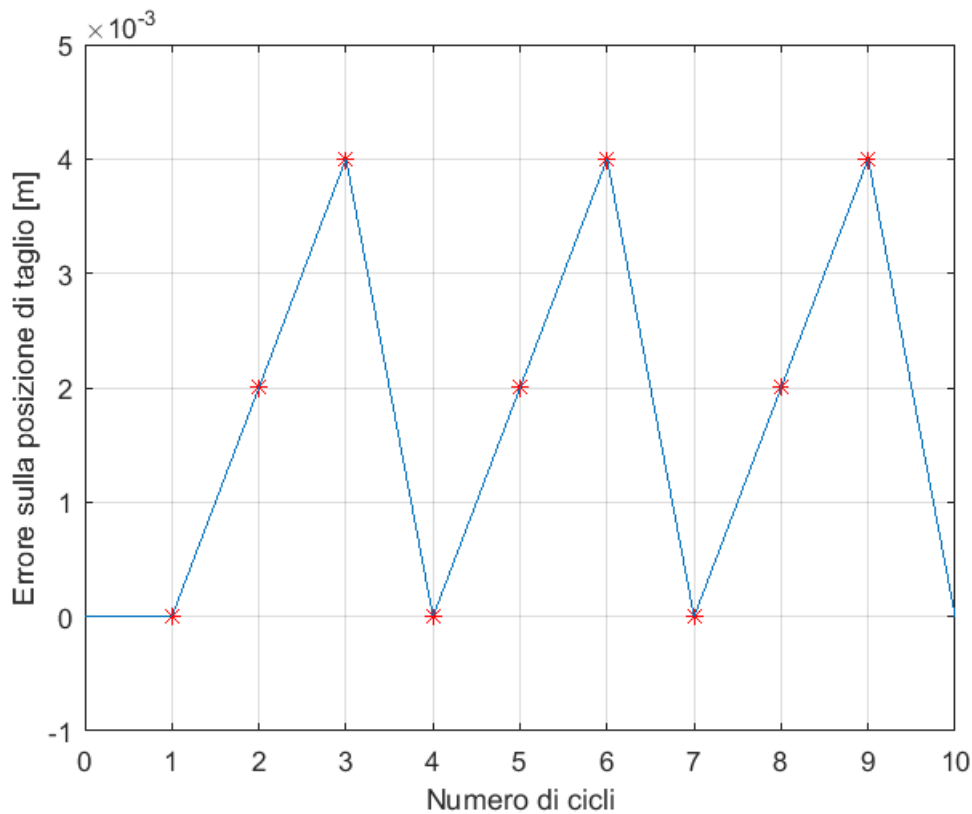


Fig. 2.20: Andamento dell'errore in funzione del numero di cicli

Si nota che al primo ciclo il taglio è realizzato giustamente dal primo tagliente di riferimento quindi l'errore è nullo. Nel secondo ciclo si commette un errore sulla posizione del taglio dovuto alla posizione sbagliata del secondo tagliente dell'utensile. Nel terzo ciclo quest'errore si ripete e si somma con quello precedente. Poi al quarto ciclo torna al primo tagliente il compito di realizzare l'operazione e l'errore ridiventa nullo. Il ciclo dell'errore si ripete all'aumentare del numero di cicli lavorativi eseguiti.

2.2.3 – Superposizione dei due errori introdotti

I due errori sulla posizione del taglio introdotti in precedenza rappresentano la maggiore parte degli errori presenti all'interno di una macchina di taglio al volo. Il primo errore introdotto si verifica sempre poiché è legato al sottosistema master che risulta essere una parte fondamentale della macchina. Il secondo tipo di errore non è necessariamente presente perché dipende dal tipo di utensile scelto. Nel caso in cui si manifestino entrambi questi errori, il loro contributo si somma e si ottiene quindi l'andamento in seguito:

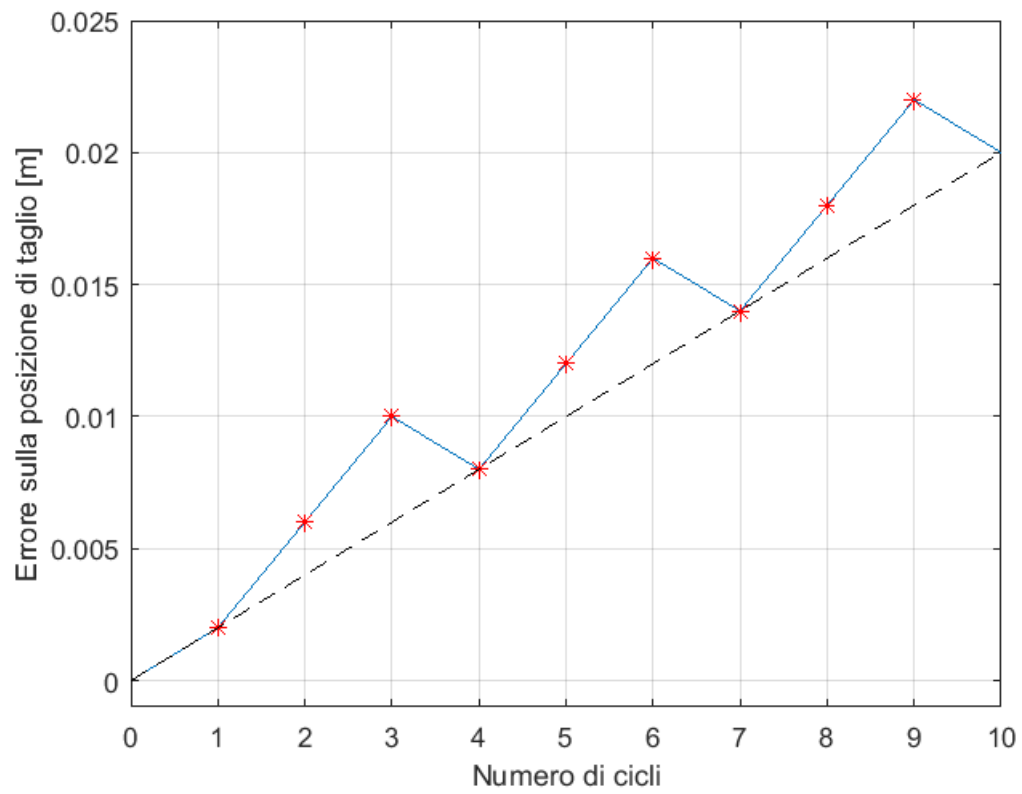


Fig. 2.21: Andamento della superposizione dei due tipi di errori

CAPITOLO 3

CONTROLLO DELLA MACCHINA

Le problematiche presentate nel capitolo precedente introducono una necessità di controllo delle macchine di taglio al volo. In effetti, non è sufficiente programmare un semplice ciclo di produzione poiché si deve considerare anche la dinamica di errori eventuali all'interno del processo. Il controllo di queste macchine si effettua in tempo reale: si devono misurare e trattare informazioni utili per elaborare una strategia di controllo che permetta di garantire una produzione precisa e ad elevato ritmo. Ci sono tanti utilizzi delle macchine di taglio al volo nel mondo manifatturiero ed è impossibile elencare tutti gli errori e tutte le strategie di controllo corrispondenti; quindi si è scelto in questo capitolo di affrontare due casistiche tramite l'utilizzo dell'utensile di simulazione sviluppato in precedenza sul software Simulink.

La prima concerne una produzione già introdotta nel capitolo precedente, ossia produrre pezzi avendo tutti la stessa lunghezza però tenendo conto degli eventuali errori di slittamento accennati nel sottoparagrafo 2.2.1.

Il secondo caso riguarda un'operazione che deve essere effettuata in una posizione precisa sul prodotto. Tipicamente si può trattare di un'operazione di stampa su un prodotto già prestampato.

3.1 – Controllo di una macchina producendo dei pezzi con la stessa lunghezza

3.1.1 – Introduzione

Le macchine di taglio al volo vengono spesso utilizzate per produrre, a ritmo elevato, dei pezzi aventi tutti una lunghezza uguale e predefinita. Tale macchina è stata introdotta nel paragrafo 2.1 in cui si presuppone un funzionamento ideale, cioè esente da eventuali errori all'interno del processo di produzione. Tuttavia, nel paragrafo 2.2, si sono evidenziate le possibilità di incontrare tali tipi di errori e quindi di doverli gestire con l'obiettivo di garantire comunque un buon funzionamento della macchina ed una produzione precisa, priva di errori.

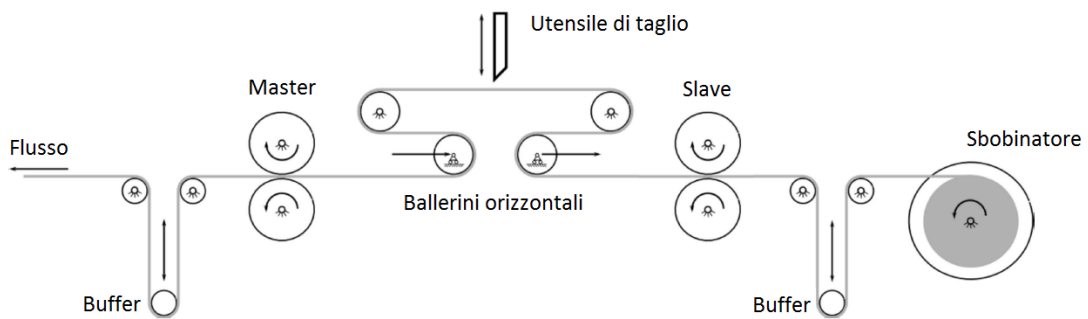


Fig. 3.1: Macchina di taglio al volo

In questa parte, si propone di introdurre un errore di slittamento a livello del trascinamento del nastro all'interno del sottosistema master della macchina studiata idealmente nel paragrafo 2.1 e rappresentata in Fig. 3.1. Tale errore è stato presentato nel sottoparagrafo 2.2.1.

Si ricordano i dati principali utilizzati durante la simulazione:

$L_{pezzo\ teorica}$	T_{ciclo}	$V_{master\ teorica}$	<i>Errore</i>
0.2 [m]	0.5 [s]	0.4 [m/s]	1 %

3.1.2 – Comportamento della macchina considerando l'errore

L'introduzione di un errore di slittamento del nastro crea una differenza tra lo spostamento teorico di quest'ultimo e lo spostamento effettivo. Come anticipato nel sottoparagrafo 2.2.1, l'andamento di quest'errore di posizione del nastro è lineare nel tempo Fig. 3.2.

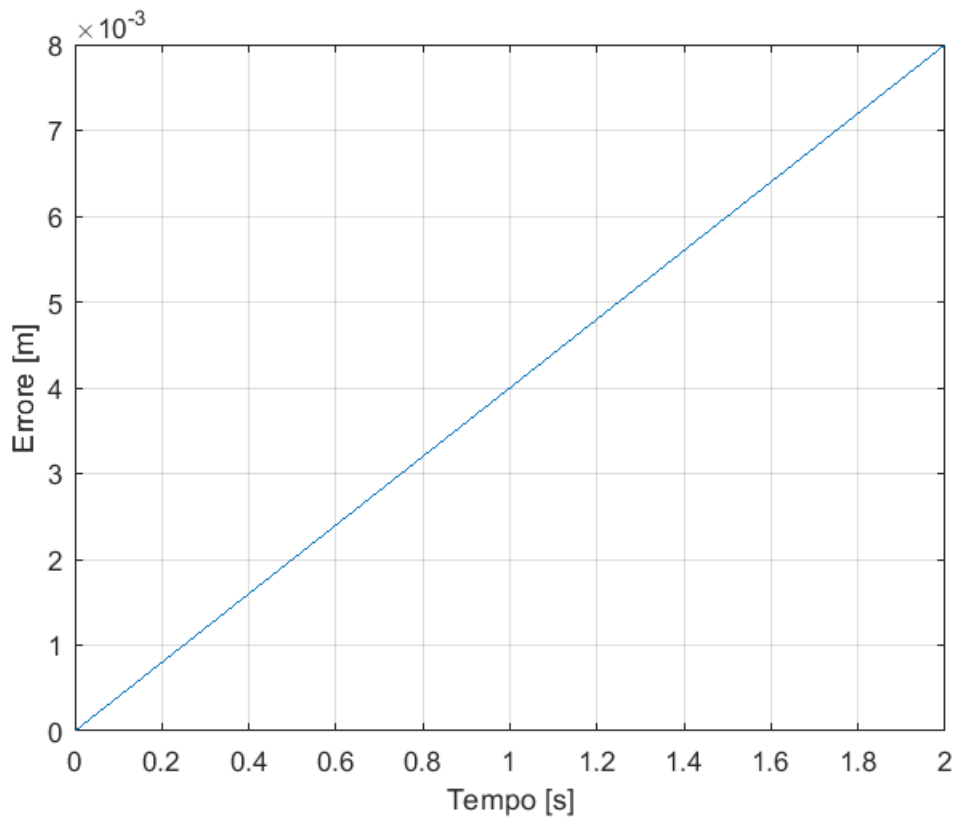


Fig. 3.2: Errore di posizione del nastro in funzione del tempo

L'introduzione di questa singolarità all'interno della macchina porta di conseguenza ad effettuare un taglio nella posizione sbagliata. In effetti, il comando del taglio viene erogato tramite l'utilizzo dell'angolo master. Quest'angolo è definito grazie allo spostamento teorico del nastro fornito dal sottosistema master (Fig.3.3).

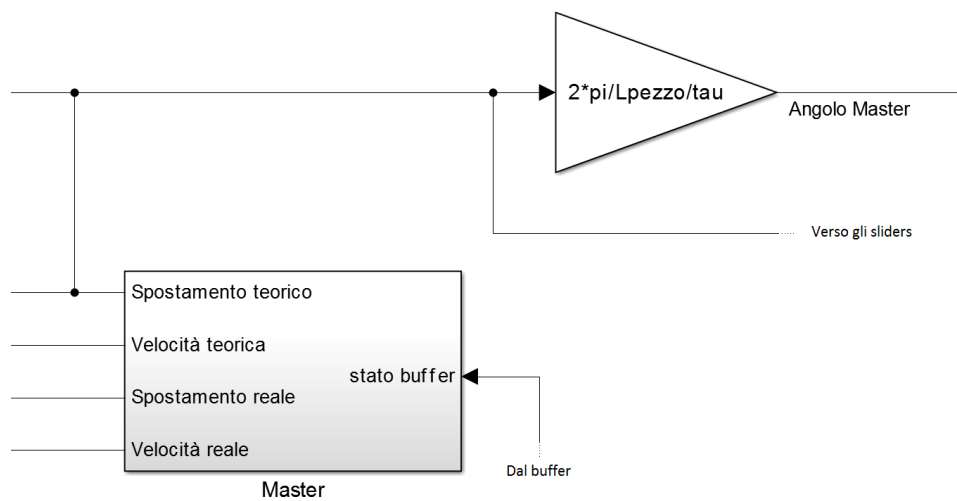


Fig. 3.3: Definizione dell'angolo master nel modello Simulink

Come introdotto in Fig.2.3, l'angolo master è l'informazione su cui si basano i ballerini orizzontali e l'utensile di taglio per compiere il loro movimento e quindi effettuare l'operazione di taglio. Nel caso simulato, la macchina è prevista per funzionare con una velocità teorica di trascinamento del nastro pari a 0.4 m/s. I ballerini orizzontali e l'utensile di taglio hanno dunque delle leggi di moto che sono parametrizzate indirettamente da questo valore di velocità tramite l'angolo master.

L'inserimento dell'errore di slittamento però introduce la nozione di velocità reale del nastro. Nei fatti, il nastro non viaggia alla sua velocità teorica ma viene, in questo esempio, rallentato dallo slittamento come si nota nella Fig. 3.4:

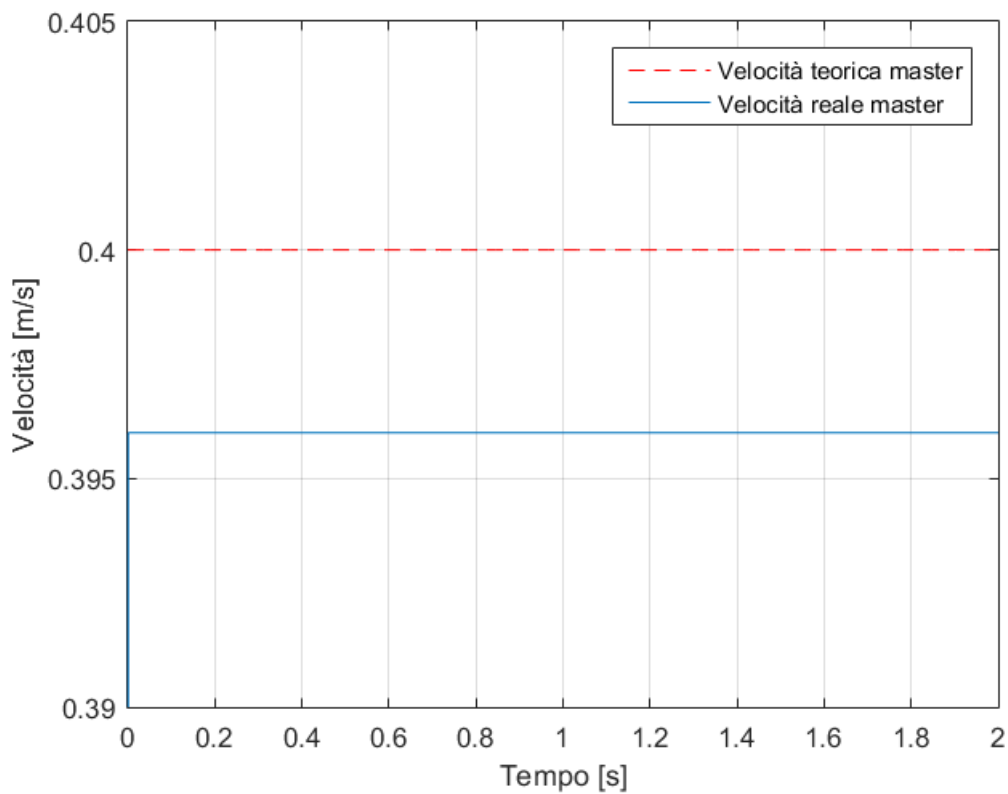


Fig. 3.4: Velocità teorica e reale del nastro nel sottosistema master

Si osserva che la velocità reale del nastro trascinato dal gruppo master ha un valore di 0.396 m/s ed è inferiore rispetto alla velocità teorica di funzionamento pari a 0.4 m/s. La differenza tra questi due valori, in termini di percentuale, è proprio uguale al valore dell'errore scelto, ossia 1% nel caso di simulazione presentato.

Avendo un tempo di ciclo T_c pari a 0.5 s, ogni pezzo effettivamente realizzato ha quindi una lunghezza pari a:

$$L_{pezzo\ reale} = V_{master\ reale} \cdot T_c = 0.198\ m$$

Il valore teorico $L_{pezzo\ teorica}$ che si vuole ottenere è pari a 0.2 m. Si nota, ovviamente, che l'errore di lunghezza sul pezzo realizzato è di 2 mm, che corrisponde ad 1 % della lunghezza teorica. La lunghezza di ogni pezzo prodotto è quindi sbagliata però si nota che l'errore di lunghezza su ogni pezzo rimane costante. Infatti, un prodotto viene definito ad ogni ciclo e la sua lunghezza corrisponde alla quantità di materiale che scorre tra un taglio e quello successivo. Durante un ciclo, scorre una quantità fissa di materiale che non dipende dalle lavorazioni effettuate in precedenza. L'introduzione di questo errore quindi porta a produrre tutti i pezzi della stessa lunghezza, differente da quella desiderata.

Esiste un altro aspetto del funzionamento della macchina che risulta essere problematico quando si verifica un errore come quello introdotto: nei fatti il nastro non si ferma nella zona di lavorazione quando viene tagliato (Fig. 3.5 e Fig. 3.6).

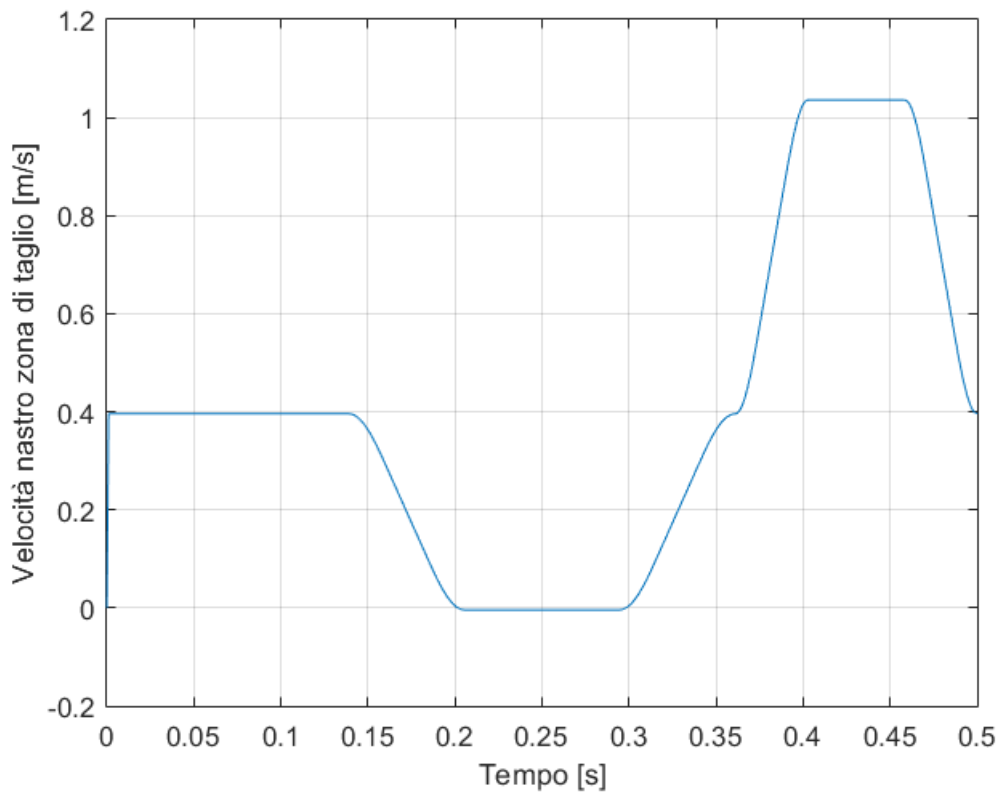


Fig. 3.5: Velocità del nastro nella zona di lavorazione su un ciclo

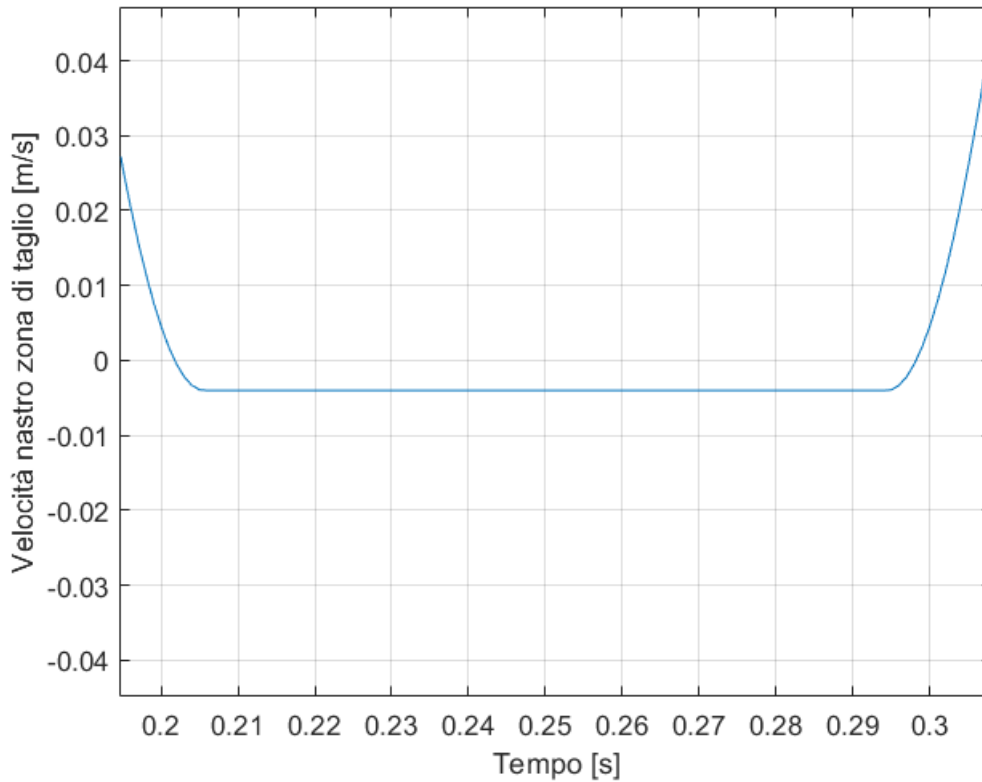


Fig 3.6: Zoom sulla fase in cui il materiale si dovrebbe fermare

In effetti, si osserva che la velocità del nastro non è esattamente nulla nella fase in cui l'utensile è a contatto con il prodotto. Si ha addirittura una velocità negativa. Questo succede perché la velocità del nastro elaborata dal gruppo master risulta in realtà diversa rispetto al valore teorico, mentre il comando degli sliders viene erogato a partire dalla velocità teorica. Quindi si ha nella zona di lavorazione:

$$V_{nastro} = V_{master\ reale} - 2 \cdot V_{slider} = 0.396 - 2 \cdot \frac{0.4}{2} = -0.004\ m/s$$

Il fatto di non avere un prodotto fermo nella zona di lavorazione quando si effettua il taglio risulta essere un problema importante. In effetti, l'utensile di taglio entra in contatto con un materiale in movimento. Di fatto, non si può a priori garantire una buona lavorazione. Anche se il nastro si muove con una bassissima velocità, non rappresenta una condizione agevole per effettuare il taglio del materiale. In più, si creano delle tensioni all'interno del materiale: l'utensile durante il taglio esercita una pressione sul materiale che tende a mantenerlo fermo, tuttavia la velocità di scorrimento di questo materiale non è nulla.

3.1.3 – Strategia di controllo

Per correggere l'errore dovuto allo slittamento del nastro e quindi per produrre dei pezzi ottenendo realmente la lunghezza desiderata, si propone lo sviluppo di un'azione di controllo di tipo Feedback. Questo tipo di controllo prevede la lettura di informazioni dalla macchina, il loro trattamento e l'elaborazione di un segnale correttivo capace di migliorare il comportamento del sistema ai fini di ottenere il funzionamento desiderato. Nel caso studiato, considerando l'introduzione dell'errore, i prodotti hanno tutti la stessa lunghezza differente da quella desiderata.

Inizialmente, non conoscendo a priori il valore dell'errore presente nel funzionamento della macchina, si deve misurare la lunghezza effettiva di ogni prodotto. Quest'operazione si può effettuare ovviamente solo dopo la lavorazione, una volta che il materiale è stato tagliato.

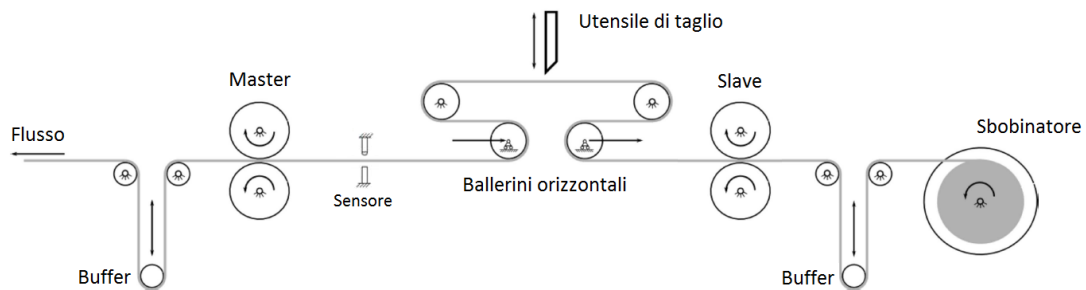


Fig. 3.7: Posizionamento del sensore

Si propone quindi di posizionare un sensore ottico in prossimità del nastro a valle dell'ultimo slider (Fig. 3.7). In questa zona il nastro viaggia alla sua velocità nominale dettata dal sottosistema master. Si può scegliere, ad esempio, una fotocellula laser che permetti di rilevare la posizione del taglio tra due prodotti il cui funzionamento è sintetizzato nel seguito:

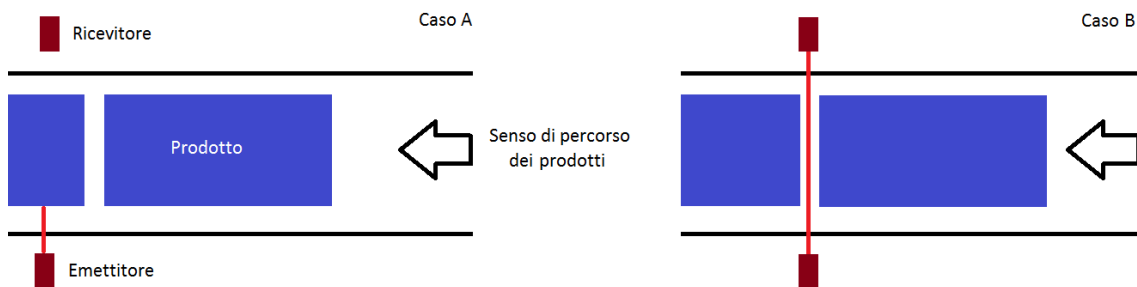


Fig. 3.8: Funzionamento della fotocellula

Questo schema (Fig. 3.8) rappresenta, visto dall'alto, la zona della catena di produzione in cui si posiziona una fotocellula. Quando c'è un prodotto di fronte alla fotocellula (caso A), il ricevitore

ottico non rileva la sorgente laser ed emette un segnale nullo. Quando una zona in cui il materiale è stato tagliato arriva davanti alla fotocellula (caso B), il fascio laser proveniente dall'emettitore viene letto dal ricevitore che è allora in grado di elaborare un segnale non nullo.

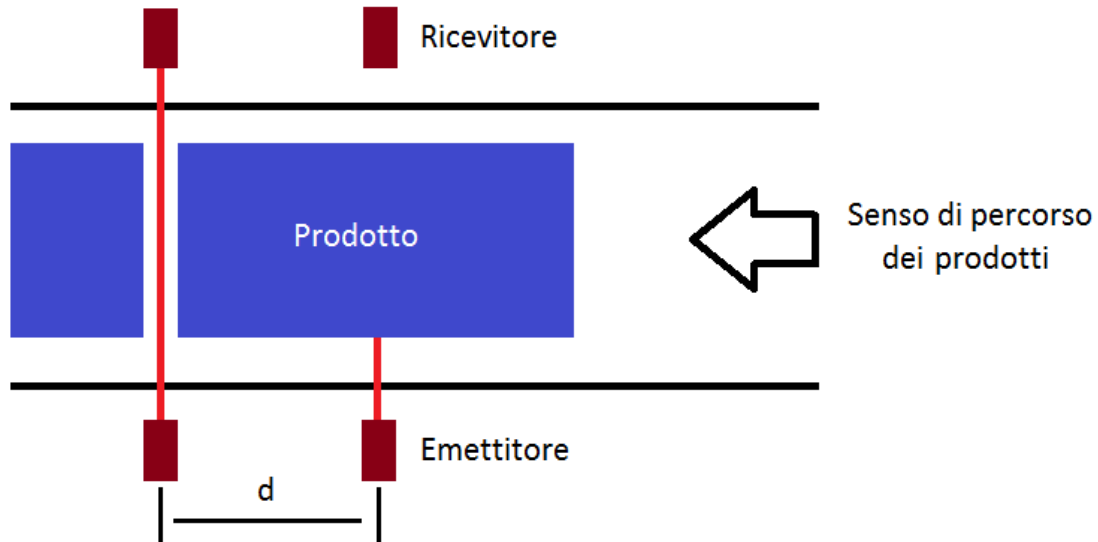


Fig. 3.9: Funzionamento del sensore

Posizionando due fotocellule di questo tipo a valle del ultimo ballerino orizzontale, si possono misurare la lunghezza di ogni prodotto e la velocità reale del nastro. In effetti, nota la distanza d tra le due fotocellule, misurando il tempo necessario alla zona tagliata per passare da una fotocellula all'altra, si valuta la velocità. Una volta nota quest'ultima, si può stimare la lunghezza di ogni prodotto valutando il tempo smaltito tra due rilevamenti consecutivi di un'unica fotocellula.

La stima della velocità reale del nastro in prossimità del sottosistema master permette di valutare l'errore di slittamento effettivamente presente:

$$err = \frac{V_{master\ teorica} - V_{master\ reale}}{V_{master\ teorica}}$$

In un secondo tempo, si propone un'azione di controllo che ha l'obiettivo di modificare la velocità reale del gruppo master in caso di errore misurato, senza alterare però il funzionamento dei ballerini orizzontali e dell'utensile di lavoro. In effetti, come introdotto in precedenza, il comando degli sliders e dell'utensile viene erogato tramite l'angolo master, che tiene in considerazione la velocità teorica del sottogruppo master. Questa velocità teorica, essendo per definizione quella desiderata, consente agli sliders e all'utensile di avere già le giuste informazioni per un funzionamento ottimo.

Si elabora quindi una velocità di controllo del master $V_{master\ controllo}$ che ha l'espressione seguente:

$$V_{master\ controllo} = \frac{V_{master\ teorica}}{1 - err}$$

Quando l'errore misurato è nullo, il funzionamento è perfetto e quindi non è necessario regolare la velocità teorica del flusso della macchina. Quando l'errore non è nullo, si modifica la velocità del master in modo tale da avere una velocità reale pari a quella teorica. In effetti:

$$V_{master\ reale} = (1 - err) \cdot V_{master\ controllo}$$

Quindi:

$$V_{master\ reale} = (1 - err) \cdot \frac{V_{master\ teorica}}{1 - err} = V_{master\ teorica}$$

Per esempio, nel caso studiato, si ha una velocità teorica del nastro nel gruppo master con un valore di 0.4 m/s. Però esiste un errore di 1% dovuto allo slittamento durante il trascinamento e quindi la velocità reale del nastro è pari a 0.396 m/s. La strategia di controllo in questo caso dà come istruzione al sottosistema master di aumentare la sua velocità e si ha quindi una velocità di controllo del master pari a:

$$V_{master\ controllo} = \frac{V_{master\ teorica}}{1 - err} = \frac{0.4}{0.99} \cong 0.404\ m/s$$

In questo modo, siccome la velocità reale del master tiene in conto l'errore di 1%, si avrà un valore $V_{master\ reale}$ pari a quello di $V_{master\ teorica}$, ossia 0.4 m/s.

3.1.4 – Implementazione del controllo sul modello Simulink

Al livello del modello Simulink, si crea un sottosistema in carica di analizzare i dati per elaborare una correzione da apportare alla macchina (Fig. 3.10):

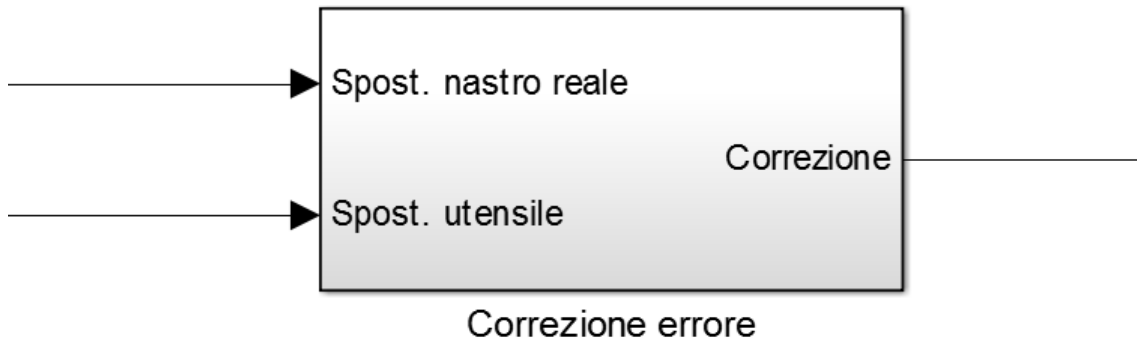


Fig. 3.10: Sottosistema Simulink in carica di elaborare l'azione di controllo

Questo sottosistema necessita sia la lettura dello spostamento reale del nastro che quella dello spostamento compiuto dall'utensile di taglio. In effetti quest'ultima informazione risulta essere utile per capire il momento in cui viene effettuato il taglio. Il sottosistema valuta poi l'eventuale presenza di un errore sulla lunghezza dei pezzi prodotti ed elabora un segnale di correzione da retroazionare per correggere l'errore ed impostare un buon funzionamento della macchina. Il segnale di correzione scelto in uscita di questo gruppo è l'entità $1 - err$.

All'interno del sottosistema in Fig. 3.10 esiste una funzione di stima dell'errore. Quando l'utensile di taglio è in posizione minima, si rilevano la posizione reale sul nastro in cui viene effettuata la lavorazione e l'istante del taglio. Si mantengono questi valori in memoria fino al taglio successivo dove si rilevano di nuovo la posizione reale del taglio sul nastro ed il suo istante. Calcolando la differenza tra le due posizioni si ottiene la lunghezza effettiva del prodotto, mentre tra i due istanti si valuta il tempo di ciclo. Si riesce dunque a stimare la velocità reale del nastro trascinato dal master $V_{master\ reale}$:

$$V_{master\ reale} = \frac{L_{pezzo\ reale}}{T_{ciclo}}$$

Si confronta questo valore con la velocità teorica del master $V_{master\ teorica}$ per ottenere il coefficiente correttivo seguente:

$$1 - err = \frac{V_{master\ reale}}{V_{master\ teorica}}$$

Questo coefficiente correttivo viene retroazionato sul sottosistema master. Come accennato nel sottoparagrafo precedente, si va ad introdurre l'azione di controllo in questo gruppo per

cambiare la velocità di trascinamento del materiale dato che la velocità reale risulta essere diversa di quella teorica desiderata.

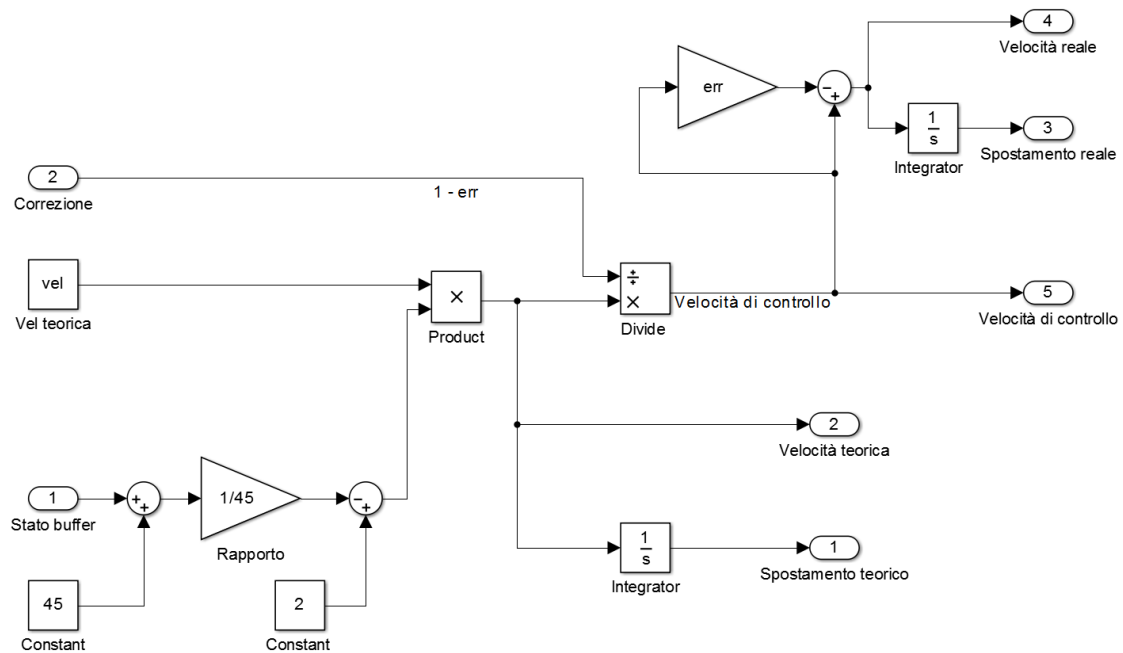


Fig. 3.11: Introduzione della correzione nel sottosistema master

Si riprende lo schema Simulink presentato in Fig. 2.16 al quale si aggiunge l'azione di controllo denominata *correzione* in Fig. 3.11. Si nota che, come introdotto in precedenza, si divide la velocità teorica di funzionamento del master dalla correzione per ottenere la velocità di controllo:

$$V_{master\ controllo} = \frac{V_{master\ teorica}}{1 - err}$$

In questo modo si riesce a cambiare la velocità reale del gruppo master senza alterare il funzionamento degli sliders e dell'utensile di taglio che si riferiscono alla velocità teorica del master per costruire le loro leggi di moto.

3.1.5 – Analisi dei risultati ottenuti

Si è simulato il comportamento della macchina di taglio al volo controllata tramite lo strumento di simulazione sviluppato su Simulink. In questa parte sono elencati i risultati più notevoli per quanto riguarda l'aggiunta della correzione dell'errore ed il buon funzionamento della macchina.

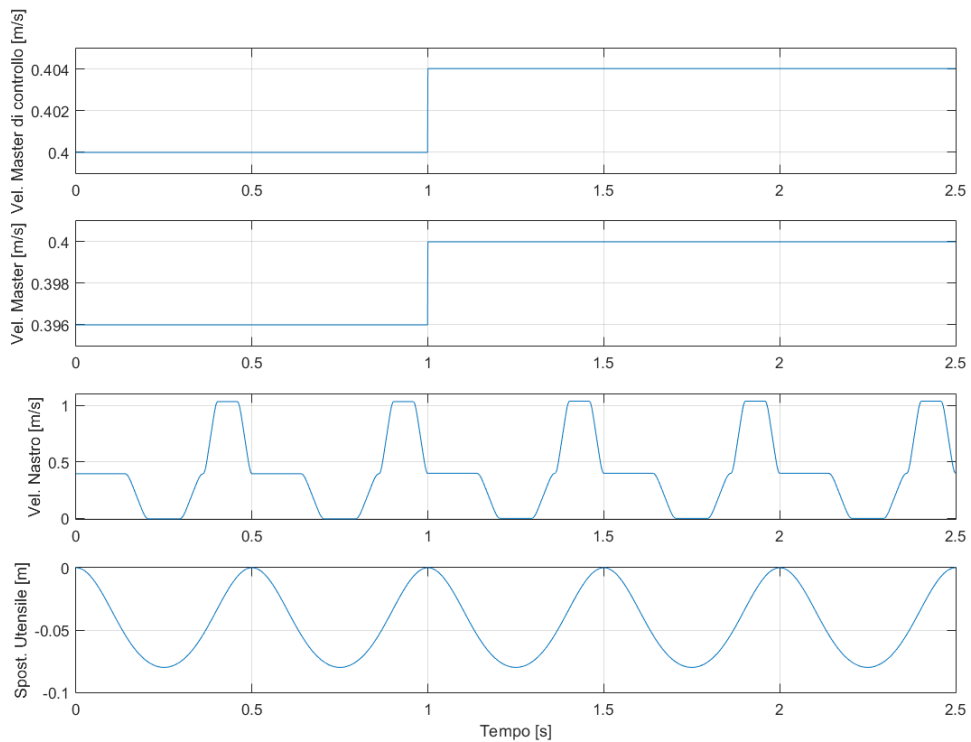


Fig. 3.12: Diagramma delle fasi della macchina controllata

In Fig. 3.12 si nota che all’inizio, la velocità del sottosistema master è pari a 0.396 m/s ed è quindi diversa della velocità desiderata di 0.4 m/s che permette di ottenere la lunghezza di prodotto richiesta. All’istante $T=1s$, il controllo si aziona e la velocità di controllo si alza fino al valore di 0.404 m/s. Nello stesso momento, la velocità reale del master raggiunge il valore di 0.4 m/s. Il sottosistema master accelera per produrre dei prodotti più lunghi; in effetti il tempo di ciclo T_{ciclo} rimane fisso a 0.5 s quindi aumentando la velocità di trascinamento del nastro si aumenta la quantità di materiale che passa tra due tagli consecutivi e quindi la lunghezza dei pezzi prodotti.

Zoomando sul grafico della velocità del nastro nella zona di lavorazione al momento del taglio (Fig 3.13), si evidenzia come, dopo la correzione dell’errore, il taglio avvenga mentre il nastro è effettivamente fermo.

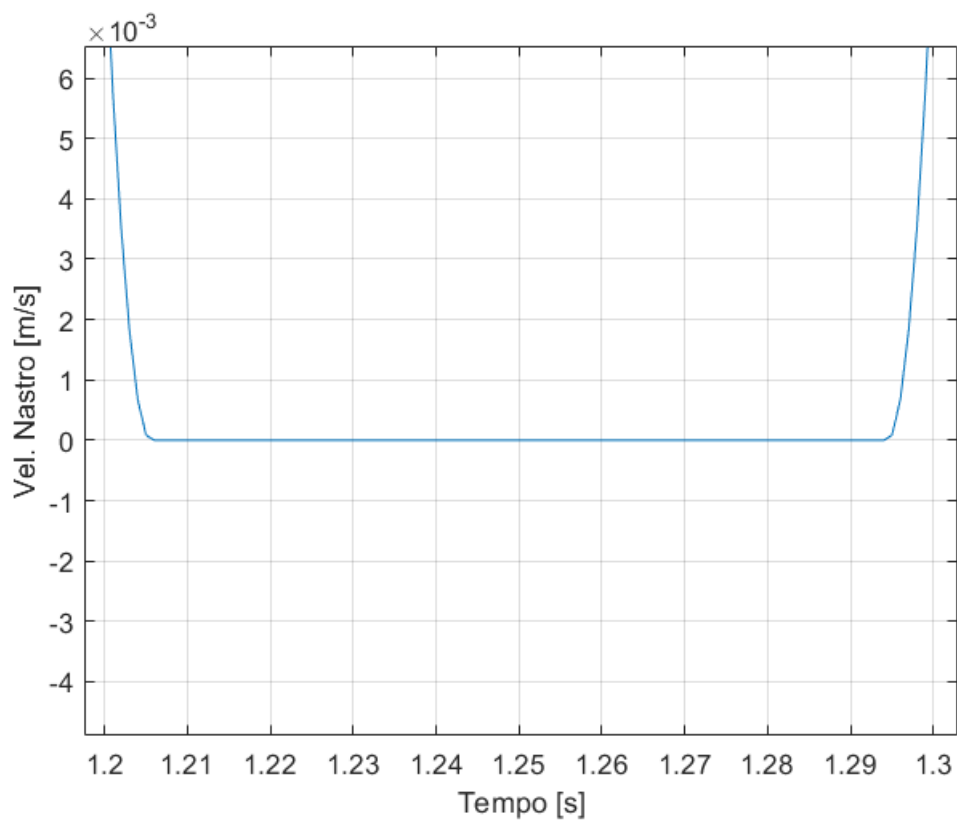


Fig. 3.13: Zoom sulla velocità del nastro nella zona di lavorazione

Come è stato evidenziato nel sottoparagrafo 3.1.2 in Fig. 3.6, l'errore presente tra la velocità teorica e reale, rappresenta un serio problema per quanto riguarda la precisione del taglio. Con l'effetto correttivo introdotto dal controllo, viene assicurato un nastro fermo nella zona di taglio e vengono dunque garantite delle buone condizioni di lavorazione.

Il funzionamento dell'azione di controllo può essere esposto tramite la Fig. 3.14 seguente:

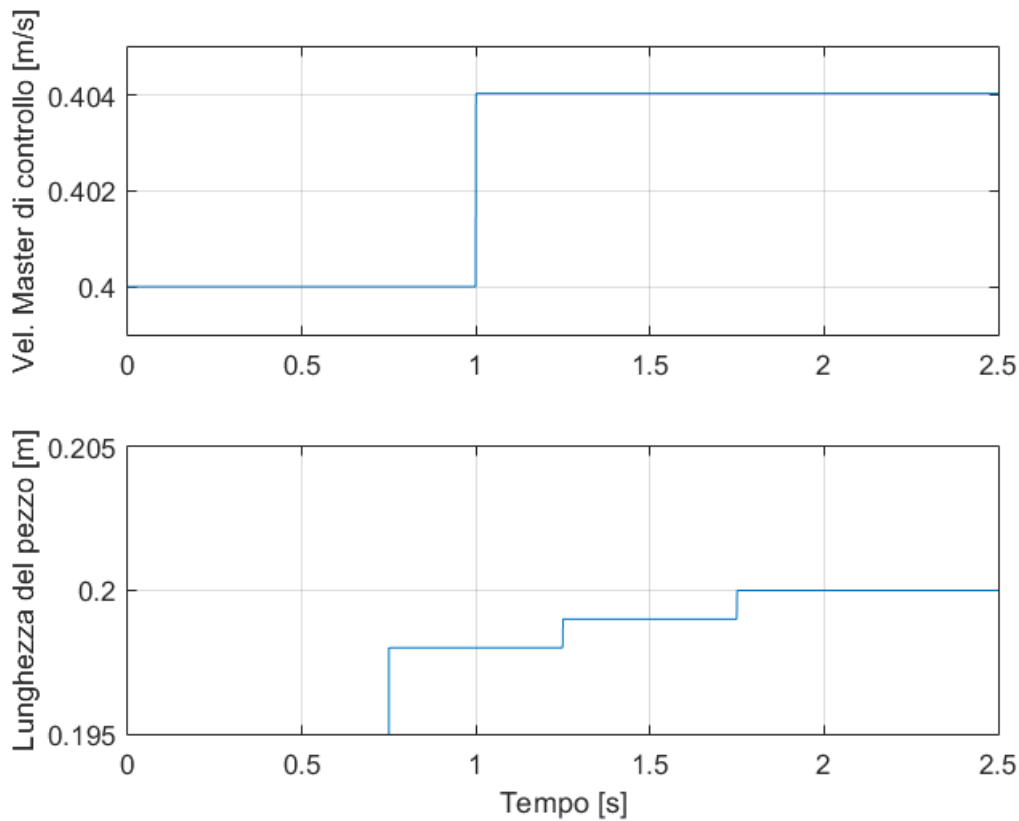


Fig. 3.14: Evoluzione della correzione e della lunghezza dei pezzi nel tempo

All'inizio non ci sono pezzi prodotti e la velocità di controllo è costante pari alla velocità teorica di funzionamento, 0.4 m/s. All'istante $T=0.75s$ si misura la lunghezza del primo pezzo. Si ha una lunghezza di 0.198 m inferiore alla lunghezza desiderata di 0.2 m. Il controllore riceve quest'informazione ed elabora un'azione di correzione solo all'istante $T=1s$, dopo un tempo di $\frac{T_{ciclo}}{2}$; corrispondente alla fine di un ciclo. Questo permette di avere i ballerini orizzontali fermi nella loro posizione iniziale ed evitare quindi un'accelerazione del nastro dalla parte del gruppo master quando gli sliders sono ancora in movimento. In questo modo si evitano delle tensioni all'interno del nastro presente sulla catena tra il master e la zona di lavorazione. Il fatto di aspettare la fine del ciclo per iniettare la correzione obbliga il pezzo successivo a non avere la lunghezza desiderata. In effetti dalla Fig. 3.14 si nota che il secondo pezzo misurato è lungo 0.199 m perché il cambio della velocità di trascinamento ha avuto luogo durante la sua produzione. Si ricorda che il taglio del materiale si effettua alla metà del ciclo e quindi un pezzo viene prodotto a cavallo su due cicli. Tuttavia, tutti i pezzi successivi hanno una lunghezza di 0.2 m pari alla lunghezza di prodotto desiderata. La correzione permette infatti, una volta introdotta, di produrre con precisione tutti i pezzi lavorati nel seguito.

Si nota che nel caso simulato si presuppone di poter leggere la lunghezza dei pezzi nell'istante in cui vengono tagliati. Come introdotto nel sottoparagrafo precedente, il sensore di misura è nella realtà posizionato più a valle nella catena di produzione e quindi si dovrebbe aspettare più tempo per potere accedere all'informazione sulla lunghezza dei pezzi; ad esempio quest'informazione potrebbe avere un numero di dieci cicli di ritardo se ci sono dieci pezzi tra la zona di taglio e il sensore di misura. Per comodità grafica, si è scelto di accedere a quest'informazione in tempo reale per non rappresentare decine di cicli sui grafici.

In Fig. 3.14, si osserva che la velocità di controllo è costituita da un gradino. In effetti, si è presupposto di dare un'azione di controllo istantanea alla macchina creando quindi un'accelerazione infinita del nastro trascinato dal sottosistema master nell'istante della correzione. Ovviamente, nella realtà, il sottogruppo del master non è in grado di seguire tale tipo di legge di controllo però gli attuatori vanno sollecitati fortemente dovendo gestire delle forze d'inerzia molto elevate e si corrono dei rischi di danneggiamento.

Si propone quindi di fornire una legge di controllo più dolce nell'ottica di alleggerire lo sforzo degli attuatori presenti nel gruppo di trascinamento del nastro. In più, siccome il primo pezzo prodotto dopo l'inizio del controllo non ha la lunghezza richiesta, è possibile non raggiungere la velocità di controllo sin da subito ma solo dopo un tempo $\frac{T_{ciclo}}{2}$. Si decide dunque di elaborare un azione di controllo con una funzione del secondo ordine:

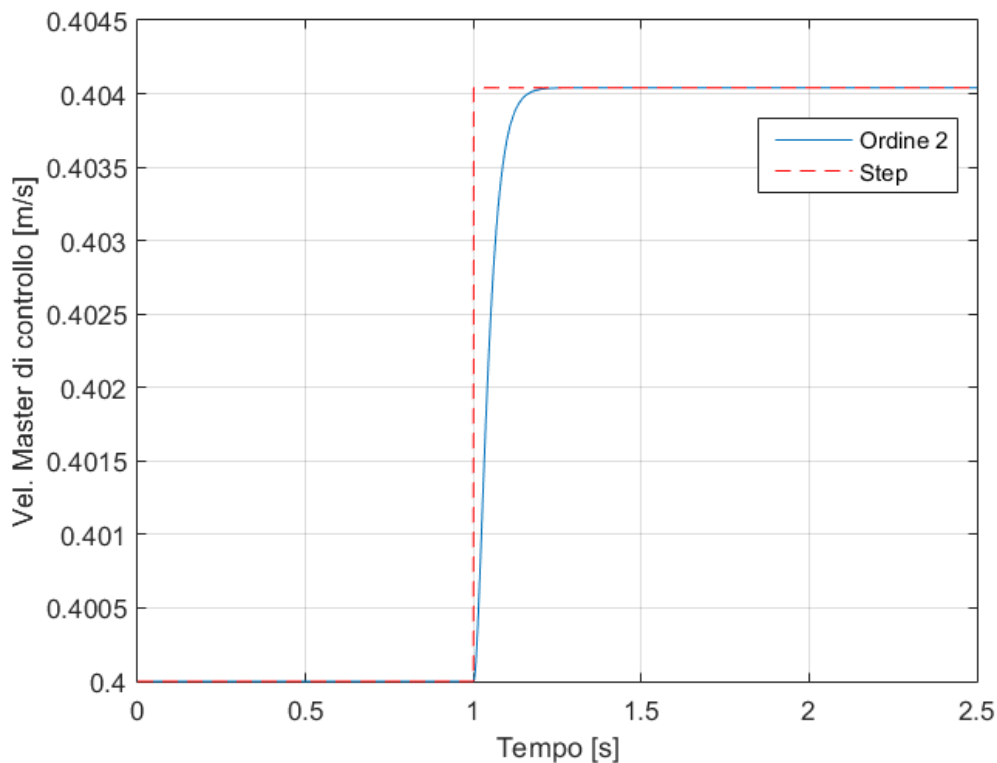


Fig. 3.15: Velocità di controllo: confronto tra uno step ed una curva di ordine 2

Per introdurre tale funzione nel modello Simulink si è deciso di filtrare il segnale precedente con un filtro del secondo ordine la cui espressione nel dominio di Laplace viene riportata in seguito:

$$F(s) = \frac{1}{\left(1 + s \cdot \frac{T_{ciclo}}{20}\right)^2}$$

Questo filtro permette di raggiungere la velocità finale di controllo in un tempo sufficientemente breve per non compromettere la lunghezza di un altro pezzo e permette anche di ottenere dei valori di accelerazioni del nastro ragionevoli nel sottosistema master come evidenziato nella figura seguente:

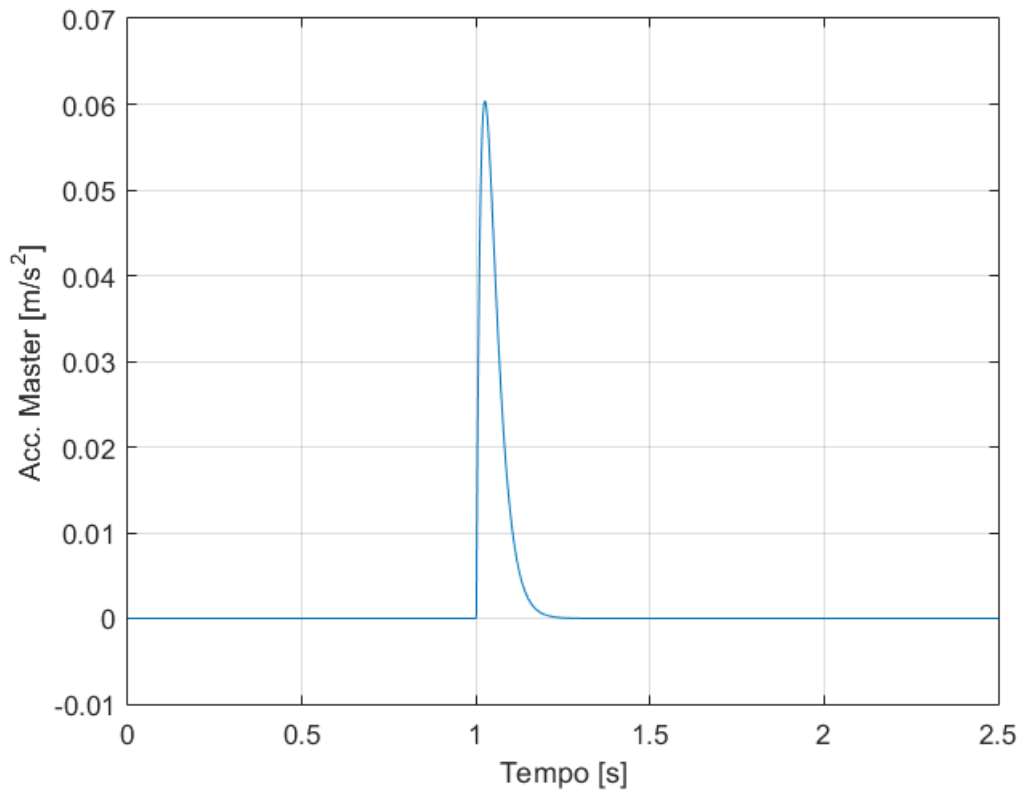


Fig. 3.16: Accelerazione del nastro nel sottosistema master

Si osserva che l'accelerazione che deve compiere il nastro trascinato dal master è continua e ha un valore massimo pari a 0.06 m/s² che risulta essere molto ragionevole nell'ottica di non stressare gli attuatori del gruppo di trascinamento.

Infine, si propongono i risultati di una simulazione in cui l'errore di slittamento cambia nel corso del processo. In effetti, risulta interessante valutare una situazione di questo tipo poiché l'errore non è necessariamente costante all'interno di una macchina di taglio al volo durante tutto il

tempo di lavorazione. Un turno di produzione dura molte ore ed è possibile non avere un valore fisso di errore di slittamento durante tutto questo periodo. La macchina disegnata deve allora essere capace di gestire queste situazioni per modificare la legge di controllo più volte se necessario.

Si sceglie un tempo di simulazione di 8s corrispondente a 16 cicli. Si considera in un primo tempo un errore pari all'1% che cambia inopinatamente di valore nel corso della simulazione per prendere un valore di 2% dopo 5s di simulazione.

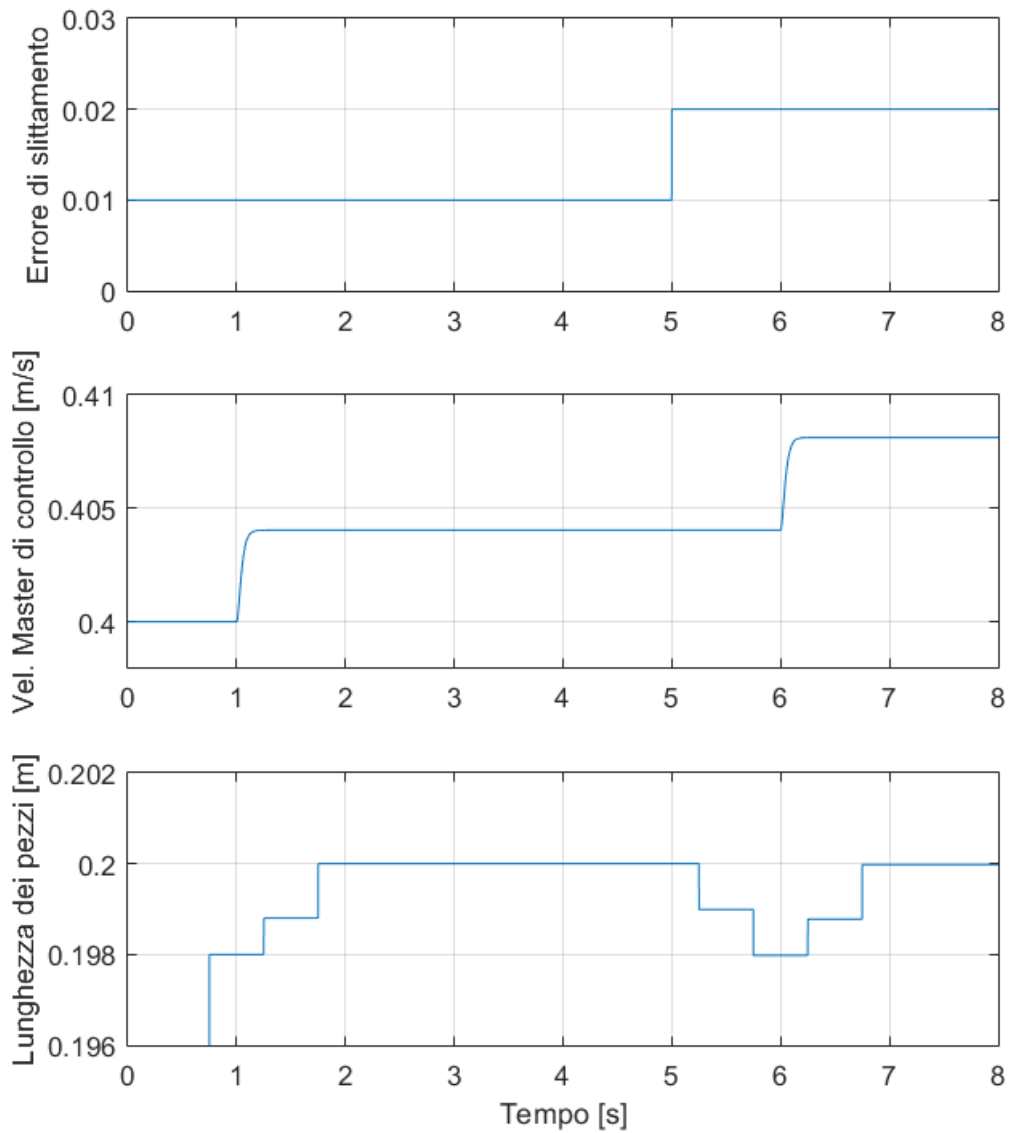


Fig. 3.17: Cambio dell'errore durante la simulazione

All'istante $T=1s$ si attiva il controllo proposto in precedenza per riportare la produzione dei pezzi con una lunghezza pari a quella desiderata. All'istante $T=5s$, l'errore cambia e diventa di 2%; la macchina inizia quindi a produrre dei pezzi di lunghezza inferiore a quella teorica. Il regolatore misura la lunghezza del secondo pezzo fuori norma all'istante $T=5.75s$ per elaborare un'azione di controllo all'istante $T=6s$ e riportare la produzione verso un valore di lunghezza pari a quella desiderata di 0.2 m dopo soltanto due cicli.

Si nota che il regolatore deve aspettare il secondo pezzo con una lunghezza sbagliata per valutare l'entità dell'errore presente. In effetti, come evidenziato in precedenza, la produzione di un pezzo ha luogo a cavallo di due cicli; e quindi si potrebbe sbagliare nella valutazione dell'errore commesso se si tenesse in considerazione la misura del primo pezzo fuori norma.

3.2 – Controllo di una macchina effettuando degli operazioni in posizioni particolari

3.2.1 – Introduzione

Un altro utilizzo frequente delle macchine di taglio al volo è di effettuare un'operazione su del materiale in una posizione ben precisa. Quest'operazione può essere di diverso tipo: ad esempio si potrebbe tagliare della carta in una posizione particolare che cambia nel tempo. Oppure si potrebbe stampare su un prodotto già tagliato e prestampato. Si potrebbe anche effettuare una saldatura su un acciaio. Se si devono lavorare dei prodotti avendo una certa lunghezza finita, si deve conoscere la loro posizione ai fini di effettuare opportunatamente l'operazione prevista. Questo caso può essere diverso da quello precedente che vedeva un flusso di materiale continuo arrivare nella zona di lavorazione; mentre in questo nuovo caso, risulta possibile avere dei pezzi di lunghezza finita su un nastro trasportatore in ingresso della macchina.

In questa parte, si propone di riprendere la macchina di taglio al volo studiata in precedenza e di dovere tagliare diversi prodotti avendo tutti, a priori, una lunghezza diversa.

3.2.2 – Strategia di controllo

Nota il tipo di lavorazione, risulta fondamentale conoscere la posizione del taglio da eseguire prima dell'arrivo del prodotto nella zona di lavorazione. Si deve quindi posizionare un sensore a monte di quella zona sulla catena di produzione (Fig. 3.18).

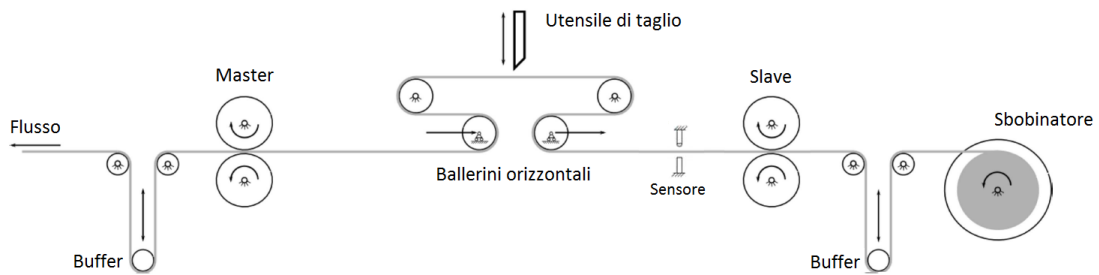


Fig. 3.18: Posizione del sensore a monte della zona di lavorazione

Tale sensore ha il compito di rilevare la posizione esatta in cui viene richiesta la lavorazione e trasmettere l'informazione al controllore per aggiustare il moto della macchina e realizzare con precisione le operazioni previste. Nel caso studiato, si presuppone ad esempio di leggere delle righe tratteggiate prestampate sul materiale da tagliare. Non si conosce a priori la frequenza con cui viene richiesta l'operazione di taglio ed è quindi necessario rilevare la posizione di ogni riga per controllare la macchina. In più, si potrebbe anche utilizzare un secondo sensore posizionato a valle della zona di taglio (Fig. 3.19) che avrebbe il compito di verificare la lunghezza di ogni pezzo prodotto.

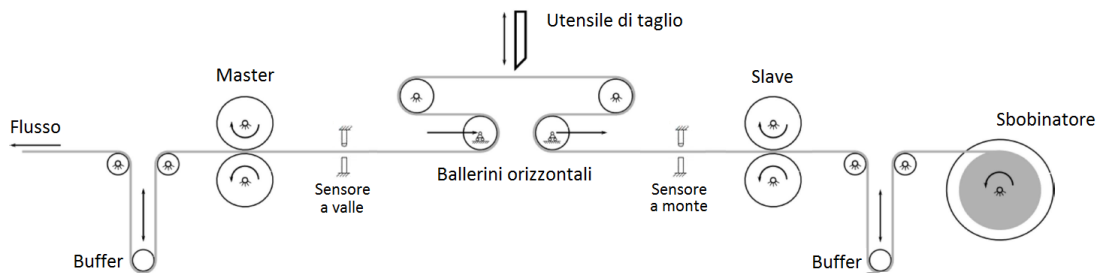


Fig. 3.19: Posizioni dei due sensori a monte e a valle della zona di lavorazione

Posizionare questo secondo sensore a valle della lavorazione permette non soltanto di misurare la lunghezza effettiva di ogni pezzo prodotto, ma permette in più di introdurre, volendo, un'azione di feedback nel controllo della macchina. In effetti, se questo sensore rileva delle lunghezze sbagliate, si potrebbe valutare l'entità dell'errore commesso sulla lunghezza del pezzo ed eventualmente proporre una correzione. Nel caso esaminato, contrariamente al caso presentato nel paragrafo precedente, si presuppone di non avere errori di slittamento e quindi, teoricamente, si può ottenere un buon funzionamento della macchina senza retroazionare le informazioni provenienti da questo secondo sensore.

Si propone un controllo che prenda in considerazione le misure effettuate dal sensore posizionato a monte del taglio. L'obiettivo è quello di misurare la distanza tra due lavorazioni consecutive previste per ottenere la lunghezza di ogni pezzo da produrre. Viene poi suggerito

nel funzionamento della macchina di aggiornare il valore della lunghezza del pezzo L_{pezzo} da produrre mantenendo il tempo di ciclo T_{ciclo} costante. L'aggiornamento della lunghezza da produrre provoca quindi un aggiornamento della velocità di trascinamento, ossia la velocità del sottosistema master V_{master} . Si nota che in questo caso, siccome non vengono considerati eventuali errori al livello del trascinamento del materiale, si presuppone che questa velocità sia quella effettiva del nastro: non esistono più le nozioni di velocità teorica e reale utilizzate nel caso di studio esposto precedentemente.

In questo caso di studio, viene richiesta una lavorazione in una posizione precisa ad ogni ciclo. La strategia di controllo scelta è quindi di aggiornare la velocità del nastro nell'istante in cui si termina una lavorazione in modo tale da produrre interamente il pezzo successivo con una nuova velocità di trascinamento. Come accennato nel sottoparagrafo 3.1.5, l'introduzione di tale tipologia di controllo può provocare delle tensioni all'interno del nastro; in più, il fatto di cambiare il comando della velocità del master V_{master} mentre i ballerini orizzontali sono sempre in movimento porta necessariamente a spostare la posizione in cui si fermano gli sliders. Questo punto verrà analizzato più avanti. Una correzione di questo tipo, però permette di ottenere dei prodotti avendo le lunghezze effettivamente desiderate.

3.2.3 – Implementazione del controllo sul modello Simulink

Nel modello Simulink, si crea inizialmente un sottosistema capace di leggere una tabella di dati contenente la serie delle lunghezze da produrre. In definitiva, questa tabella contiene le misure del sensore posizionato a monte della zona di taglio. Si definisce quindi un vettore contenente le diverse lunghezze da produrre in Matlab e si importano questi dati nel programma Simulink. In un primo luogo, il vettore delle lunghezze viene utilizzato nel sottosistema master quando si deve erogare la velocità del nastro e di conseguenza il suo spostamento.

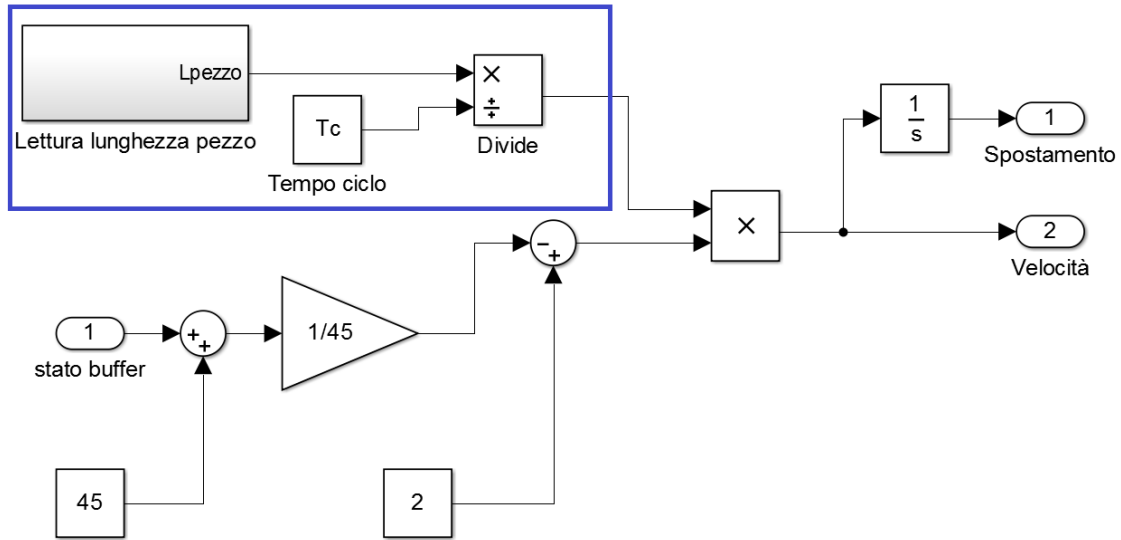


Fig. 3.20: Sottosistema master del caso studiato

Viene ripreso il sottosistema presentato in Fig. 1.6 al quale si sostituisce la velocità dalla parte evidenziata in blu. Si definisce quindi semplicemente la velocità di funzionamento del master come:

$$V_{master} = \frac{L_{pezzo}}{T_{ciclo}}$$

La lunghezza dei pezzi L_{pezzo} cambia nel tempo in funzione della lettura del sensore introdotto a monte della zona di taglio e quindi la velocità del master V_{master} si aggiorna con quest'azione di controllo in feedforward. Come presentato nel Capitolo 1, tale velocità può anche essere regolata in funzione dello stato del buffer disposto a valle del gruppo master; tuttavia nel caso studiato si suppone che lo stato del buffer è neutro e quindi la macchina può funzionare ad un ritmo produttivo normale.

In secondo luogo, la lunghezza dei pezzi da tagliare si aggiorna nella definizione dell'angolo master. In effetti, si ricorda che l'angolo master veniva definito con la formula:

$$\theta = \frac{2\pi}{L_{pezzo} \cdot \tau} \cdot s$$

- Dove:
- θ : angolo master
 - s : spostamento in uscita del sottosistema master
 - L_{pezzo} : lunghezza del pezzo
 - τ : rapporto di trasmissione del master

In più, l'angolo master viene normalizzato per più ampia chiarezza grafica; cioè viene limitato ad un intervallo di $[0^\circ, 360^\circ]$ nel cui si ripete ciclicamente.



Fig. 3.21: Sottosistema di normalizzazione dell'angolo master

Al livello del modello Simulink si crea quindi un sottosistema per realizzare quest'operazione che viene dettagliata nel seguito:

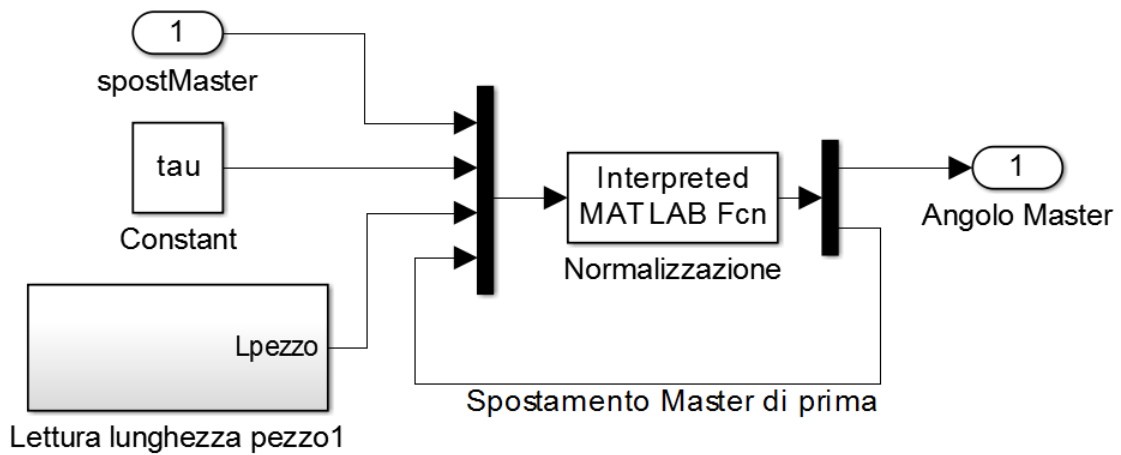


Fig. 3.22: Dettaglio del sottosistema di normalizzazione dell'angolo master

Questo sottosistema sfrutta una funzione esterna sviluppata in codice Matlab che ha come obiettivi di costruire l'angolo master con la formula presentata in pagina precedente e di restringere l'angolo master nell'intervallo precedentemente citato di $[0^\circ, 360^\circ]$.

3.2.4 – Analisi dei risultati ottenuti

In questa parte sono elencati i principali risultati della simulazione della macchina descritta in questo paragrafo. Sono ottenuti grazie allo strumento sviluppato su Simulink presentato in precedenza.

Si suppone di non avere nessun pezzo intermedio tra la zona di taglio e la zona di misura delle posizioni di taglio. Questo implica di dovere lavorare il prodotto nel primo ciclo disponibile dopo la lettura dell'informazione. Si propone un tempo di simulazione di 6s per valutare un numero sufficiente di misure mantenendo una certa comodità grafica. Si ricorda che un ciclo corrisponde a 0.5s e quindi si valuterà la produzione di 12 pezzi in questo esempio di simulazione.

In un primo tempo si genera un vettore di lunghezze desiderate. Questo vettore può essere qualsiasi e ne viene rappresentato un esempio in seguito:

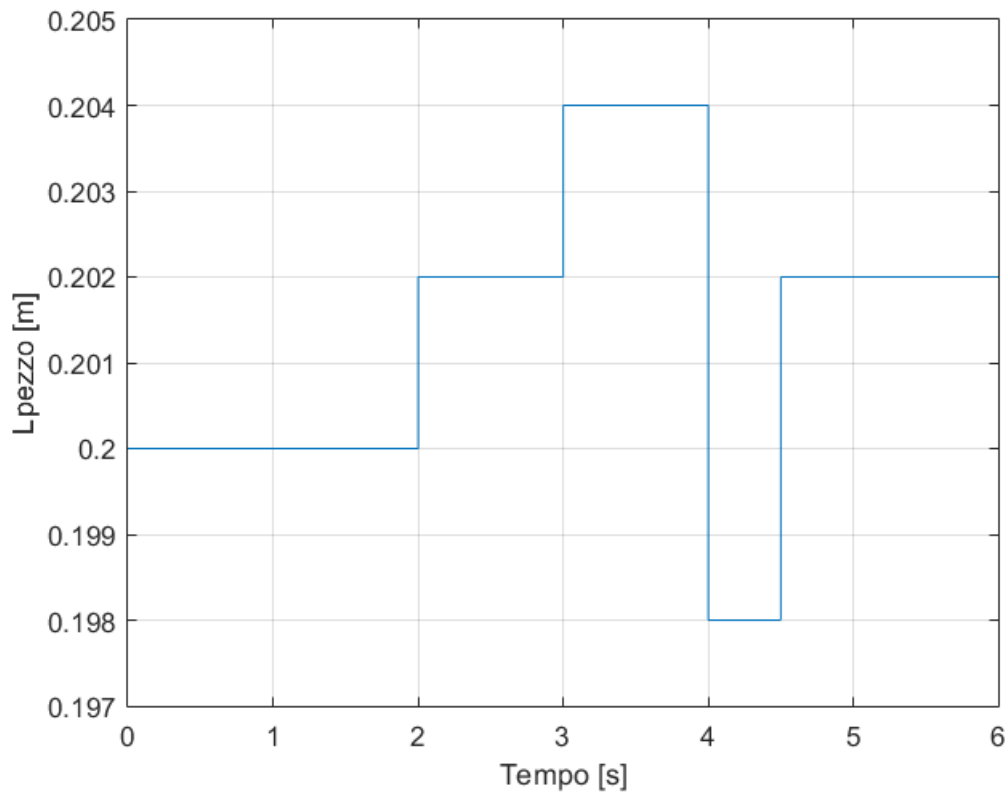


Fig. 3.23: Vettore delle lunghezze dei pezzi desiderati

Si nota che all'inizio, durante quattro cicli, il valore di lunghezza richiesta è pari a 0.2 m. All'istante $T=2s$ il sensore rileva che la prossima lunghezza prodotta deve essere di 0.202 m durante due cicli. Ed il sensore continua a misurare nuove lunghezze nel tempo.

Questo vettore delle lunghezze costituisce direttamente l'azione di feedforward che controlla la velocità di trascinamento del nastro, cioè la velocità del master V_{master} . Questa velocità si adatta quindi all'informazione che riceve nel primo ciclo produttivo immediatamente disponibile dopo la misura:

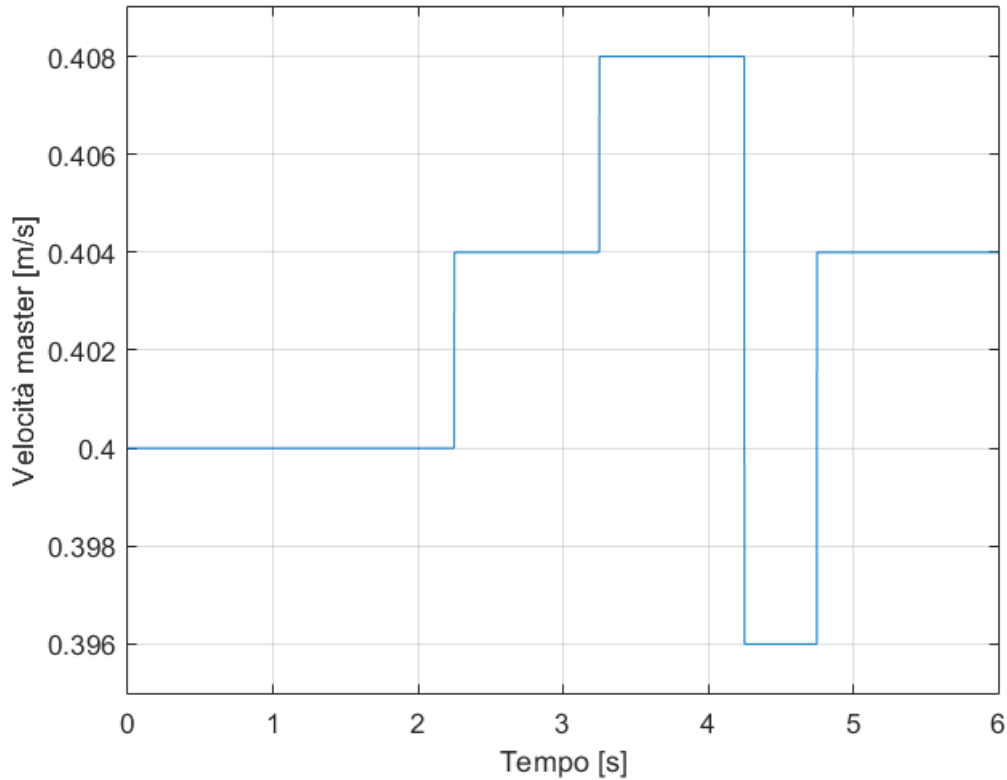


Fig. 3.24: Velocità di trascinamento del nastro controllata

La velocità del sottosistema master si aggiorna man mano che riceve informazioni sulle lunghezze da produrre dalla parte del sensore. Si nota che i cambi di velocità sono fatti "a step" in questa simulazione. Siccome le lunghezze dei pezzi da produrre nel caso studiato hanno spesso valori molto vicini tra di loro, di conseguenza anche i termini in velocità saranno altrettanto vicini: tipicamente si richiede di variare la velocità di qualche millimetro al secondo. Gli attuatori, anche se vengono significativamente sollecitati, sono capaci di colmare tale differenza di velocità in un tempo molto breve e quindi si è deciso di simulare una legge di controllo a gradini. Questa risulta un'ipotesi di simulazione che rende più comoda l'implementazione del controllo.

In più, come accennato in precedenza, si nota che gli step della legge di controllo in velocità risultano sfasati nel tempo per poter iniziare il controllo nell'istante in cui si è appena terminato il taglio precedente che coincide con l'istante in cui inizia il pezzo successivo da produrre (Fig. 3.25):

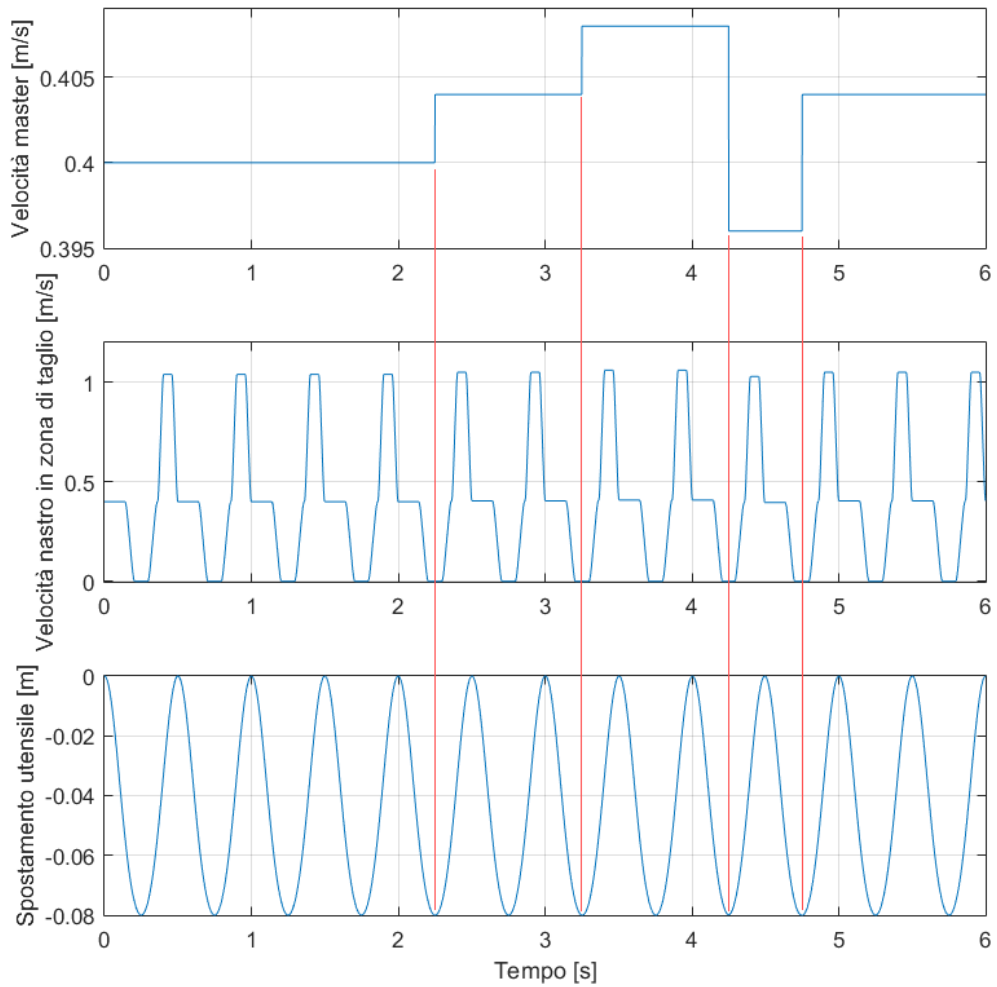


Fig. 3.25: Diagramma delle fasi

Si nota che tutti i cambi di velocità imposti dal controllo al sottosistema master si effettuano in un istante in cui l'utensile finisce di effettuare il taglio precedente. In questo modo si permette al nastro di viaggiare ad una velocità adeguata durante l'intera produzione del pezzo successivo e quindi si rispetta il vincolo di lunghezza come si nota dalla Fig. 3.26:

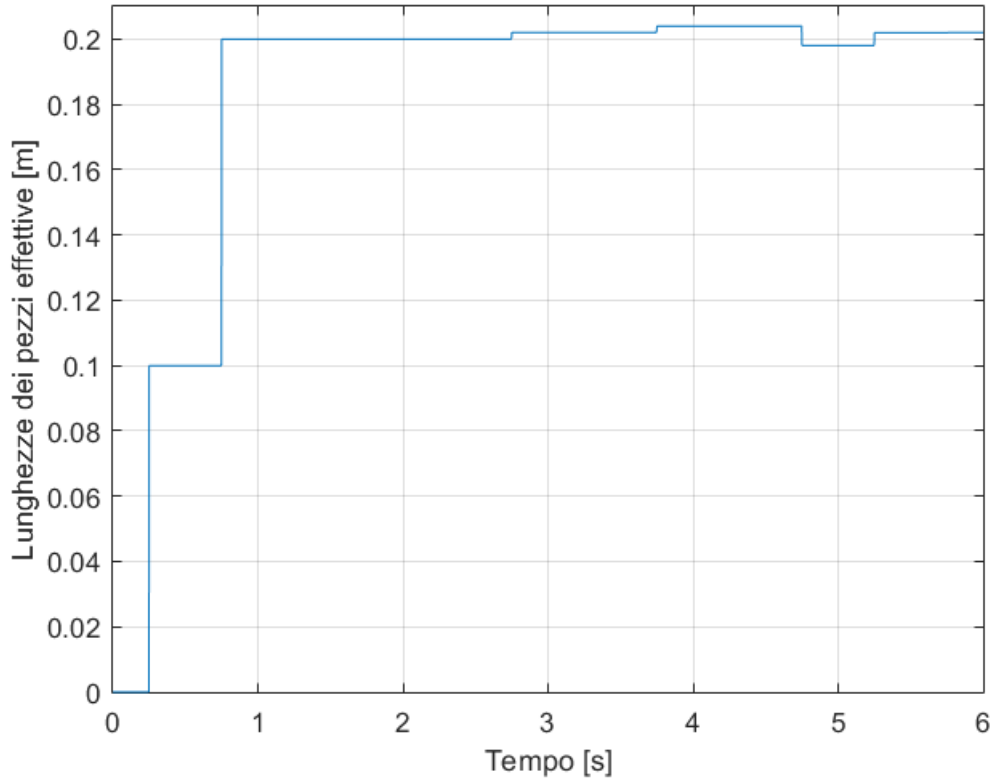


Fig. 3.26: Lunghezze effettive dei pezzi

Innanzitutto si nota, come per i casi simulati in precedenza, che durante l'avvio di macchina viene prodotto un primo pezzo di lunghezza sbagliata pari a 0.1 m perché non si fa in tempo ad effettuare un ciclo completo. Poi si producono tutti i pezzi desiderati con le loro lunghezze giuste come evidenziato dallo zoom in Fig. 3.27:

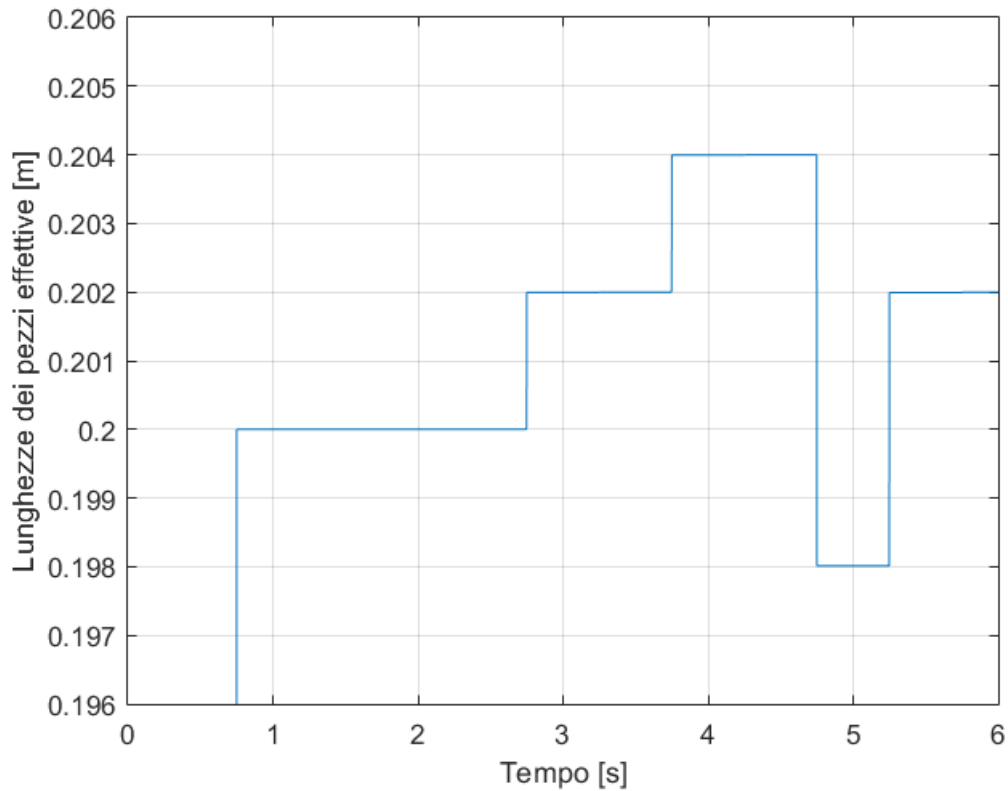


Fig. 3.27: Zoom sulle lunghezze effettive dei pezzi

Questo grafico corrisponde a quello in Fig. 3.23 però sfasato nel tempo di 0.75s. In effetti, servono 0.25s alla macchina per terminare il pezzo precedente ed iniziare quello nuovo. Poi ci sono 0.5s tra un taglio e quello successivo per produrre il pezzo. Si ipotizza di poter misurare la lunghezza del pezzo appena tagliato immediatamente dopo la lavorazione. Questo grafico illustra come il controllo scelto permette alla macchina di taglio al volo di produrre i pezzi desiderati.

In questo esempio si producono perfettamente 4 pezzi lunghi 0.2 m, poi 2 pezzi lunghi 0.202 m e via di seguito.

I risultati di simulazione evidenziano in più che questo controllo permette effettivamente di garantire delle buone condizioni di taglio poiché il nastro rimane fermo nella zona di taglio come si nota dalla Fig. 3.28:

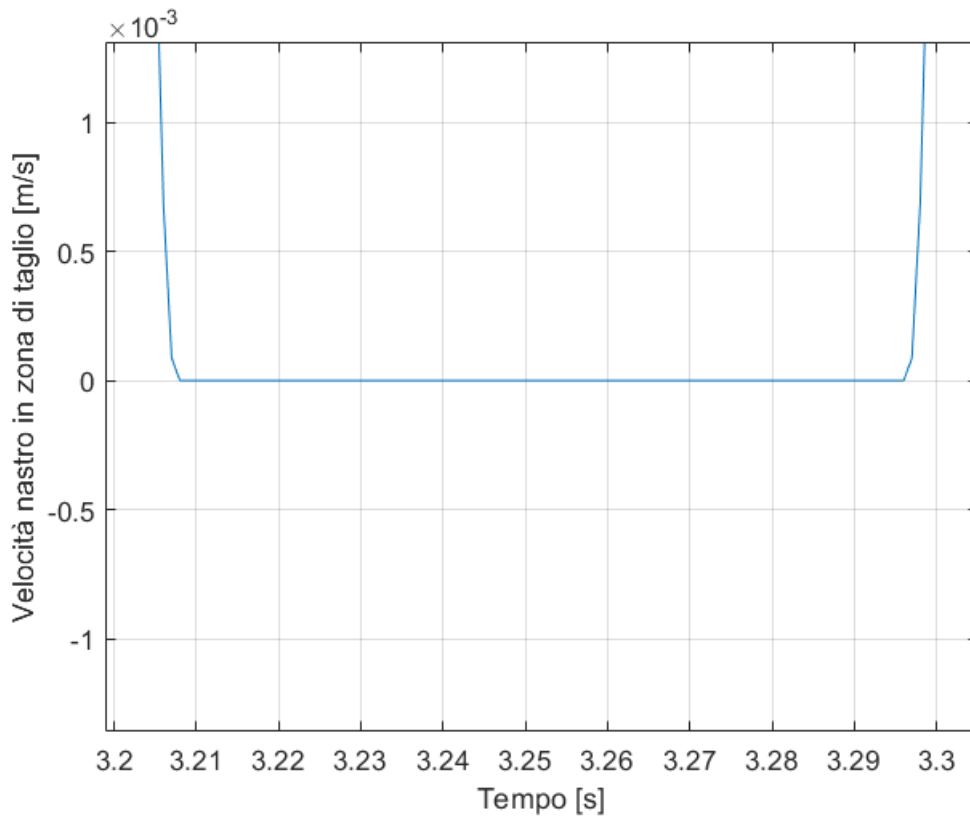


Fig. 3.28: Zoom sulla velocità del nastro in zona di lavorazione

Si valuta un ultimo risultato da questa simulazione: come accennato nel sottoparagrafo 3.2.2, il fatto di modificare la velocità degli sliders mentre sono sempre in moto provoca uno slittamento della posizione di riferimento (Fig. 3.29). In effetti, quando un pezzo viene tagliato, i ballerini orizzontali si stano muovendo per mantenere il nastro fermo nella zona di lavorazione. Viene poi una fase in cui i ballerini orizzontali tornano in posizione riaccelerando il nastro verso la sua velocità di trascinamento nominale; durante questa fase si cambia la velocità di trascinamento del master e di conseguenza si adatta la legge di moto degli sliders. La loro legge di velocità viene infatti modulata mantenendo la stessa forma e quindi non riescono a tornare in posizione.

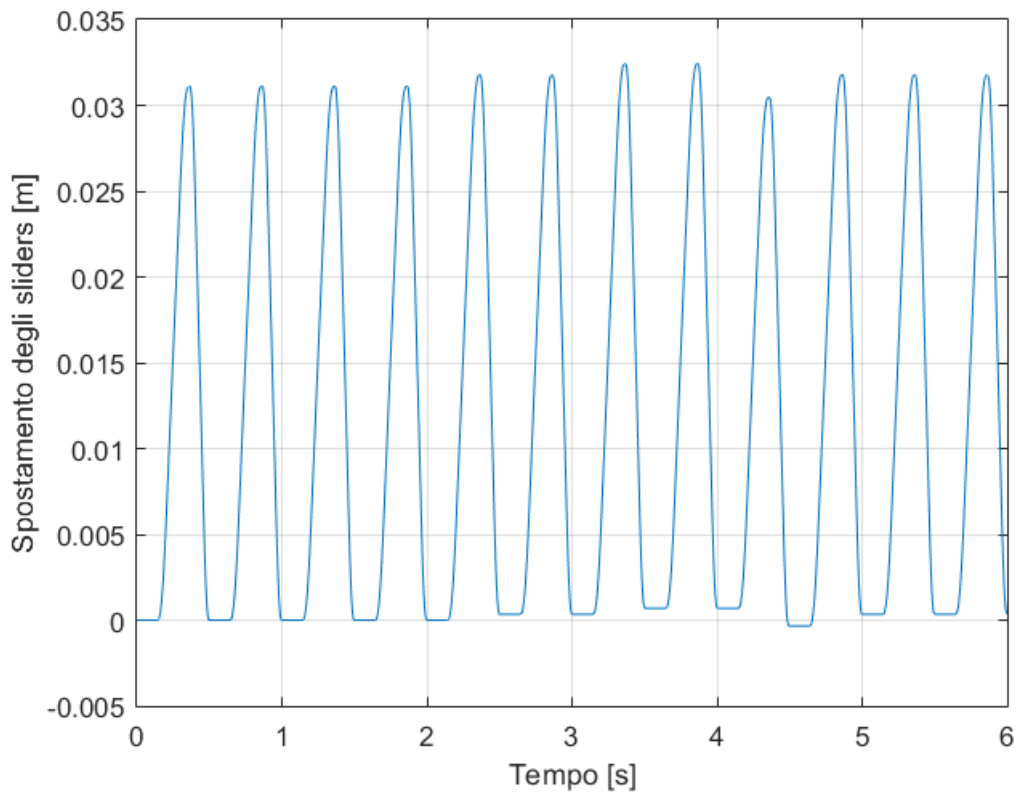


Fig. 3.29: Spostamento dei ballerini orizzontali

Si nota comunque da questo risultato grafico che la posizione di partenza del ballerino orizzontale è spostata di qualche millimetro su una corsa lunga 3 cm. Tendenzialmente, si potrebbe pensare in fase di progettazione degli sliders di adottare un certo margine sulla lunghezza dei loro supporti. In questo modo, uno spostamento di questo tipo delle posizioni minime e massime degli sliders non rappresenterebbe un problema particolare.

Conclusioni

Il lavoro di tesi presentato ha conseguito lo sviluppo di un ambiente di simulazione per le macchine di taglio al volo. Questo strumento, sviluppato sul software Matlab e la sua estensione Simulink, può rappresentare un supporto utile per gli utenti di questo tipo di macchine nell'ottica di studiare e migliorare il loro comportamento in ambito industriale. Tramite lo studio di due casi particolari, il programma di simulazione prodiga degli ottimi risultati permettendo di studiare il comportamento delle diverse parti costituenti la macchina. Permette di elaborare delle informazioni utili nella fase di progettazione della macchina, potendo ovviamente simulare e prevedere il comportamento di una macchina complessa senza costruire nessun prototipo. Questo strumento è allo stesso modo utile in fase di set up di tale tipo di macchina, permettendo di ridurre i tempi di non produzione piuttosto lunghi per questi impianti. In effetti, nel corso della produzione, se le macchine di taglio al volo non vengono regolate, si verificano spesso degli errori di produzione dovuti a diverse problematiche. Quest'ambiente di simulazione propone un approccio di controllo efficace nei casi studiati che permette sicuramente di gestire gli errori di produzione velocemente e quindi risulta essere di un particolare interesse nella fase di impostazione della macchina.

I possibili sviluppi futuri potrebbero essere:

- 1 – Sviluppo di ulteriore strategie di controllo significative. In questo lavoro di tesi sono stati proposti due applicazioni che riguardano dei casi comunemente incontrati dagli esperti del settore però ne esistono tanti altri.
- 2 – Utilizzo dello strumento di simulazione in maniera congiunta con un'azienda lavorando con delle macchine di taglio al volo ai fini di confrontare i risultati ottenuti con il funzionamento di una macchina reale.
- 3 – Utilizzo dello strumento di simulazione come supporto nella progettazione e l'impostazione di una macchina industriale.

Bibliografia

- [1] Liberopoulos, G., Tsarouhas, P. "Reliability analysis of an automated pizza production line", *Journal of Food Engineering*, (2005), 69(1), pages 79-96
- [2] Shewchuck, J.P., Moodie, C.L., "Definition and classification of manufacturing flexibility types and measure", *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, (1998), 10 (4), pages 325-349
- [3] Lin, Jen-Chang, Tai, Jen-Chao, Huang, Hsing-Hsin, "Design and manufacture of an Automatic Wrapping Machine", *International IEEE/IAS Conference on Industrial Automation and Control: Emerging Technologies, Proceedings*, (1995), pages 698-701
- [4] Cromarty, A.D. "Automating a horizontal flow-wrapping machine", *IEE Colloquium (Digest)*, (1994), 176, pages 1-5
- [5] Machado, C., Mendes, J., Fonseca, J., "Intelligent Cutting-off of Pipes and Bars", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 03*, (2003), vol.1, pages 460-465
- [6] Huazhu Wu, Changyou Wang, Changguang Zhang, "Design of Servo Controller for Flying Shear Machine Based on ARM and FPGA", *Journal of Networks*, vol.9, no.11, (2014), pages 3038-3045
- [7] Shao, W., Chi, R., Yu, L., "Synchronizing servo motion and iterative learning control for automatic high speed horizontal flow wrapper", *Proceedings of the 2012 24th Chinese Control and Decision Conference, CCDC*, (2012), art. no. 6244470, pages 2994-2998
- [8] Hansen, D., Holtz, J., Kennel, R., "Cutter distance sensors for an adaptive position/torque control in cross cutters", *IEEE Industry application magazine*, (2003), vol.9, no.5 Sept/Oct, pages 33-39
- [9] Varvatsoulakis, M.N., "Design and implementation issues of a control system for rotary saw cutting", *Control Engineering Practice*, (2009), 17, pages 198-202

- [10] Visvambharan, B.B., "On-line digital control system for a flying saw cutting machine in tube mills", Industrial Electronics Society, IECON 88. Proceedings, 14 Annual Conference of, (1988), vol.2, pages 385-390
- [11] Shepherd, R., "A Computer-Controlled Flying Shear", Students' Quarterly Journal, (1964), vol.34, no.135, pages 143-148
- [12] Peric, N., Petrovic, I., "Flying Shear Control System", IEEE Transactions on Industry Applications, (1990), vol.26 (6), pages 1049-1056
- [13] Khare, M.R., "Automatic System for Measuring and Controlling the Length of a Moving Product in Industries", IEEE Transactions on instrumentation and measurement, (2008), 57 (4), pages 781-790
- [14] Cinquemani, S., Giberti, H., "An innovative Tool for Simulation and Control of a Flying-Cutting" in "Topics in Modal Analysis, vol.10", Mains Michael (Ed.), pages 227-235, (2015), Springer International Publishing
- [15] Diekmann, A., Luchtefeld, K., "Intermittent drives for cross cutters and flying saws" in "Drive Solutions, Mechatronics for Production and Logistics", Kiel Edwin (Ed.), pages 378-389, (2008), Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [16] Pasch, K.A., Seering, W.P., "On the drive systems for High-performance Machines", Transactions of ASME, (1984), 106, pages 102-108
- [17] Strada, R., Zappa, B., Giberti, H., "An unified design procedure for flying machining operations", ASME 2012 11th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2012, (2012), 2, pages 333-342
- [18] Van de Straete, H.J., Degezelle, P., de Shutter, J., Belmans, R., "Servo Motor Selection Criterion for Mechatronic Application", IEEE/ASME Transaction on mechatronics, (1998), 3, pages 43-50
- [19] Roos, F., Johansson, H., Wikander, J., "Optimal selection of motor and gearhead in mechatronic application", Mechatronics, (2006), 16, pages 63-72
- [20] Giberti, H., Cinquemani, S., Legnani, G., "A practical approach to the selection of the motor-reducer unit in electric drive system", Mechanics Based Design of Structures and Machines, (2011), 39 (3), pages 303-319
- [21] Giberti, H., Cinquemani, S., "On brushless motors continuous duty power rate", ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2010, (2010), 3, pages 863-872