

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale***  
***«Analisi cinematica di due meccanismi per l'estensione  
di flap su aeromobili e di un pantografo ferroviario»***

Tutor universitario: Prof. Matteo Massaro

Laureando: *Alberto Foltran 1225587*

Padova, 17/11/2022

- Questa tesi ha lo scopo di presentare l'analisi cinematica e di descrivere il funzionamento di 3 meccanismi, due riguardanti l'estensione di flap su aeromobili ed uno relativo alla movimentazione di un pantografo ferroviario. Di questi saranno anche illustrate le caratteristiche strutturali, le differenze e l'ambito di utilizzo.
- Sarà presentato uno studio cinematico effettuato tramite il software WORKING MODEL 2D per ognuno dei suddetti meccanismi del quale sarà descritta la procedura operativa.
- Lo scopo finale è quello di modellare i meccanismi a partire dal modello reale e tramite l'analisi cinematica ricavare le posizioni e rapporti di velocità dei membri e punti notevoli in funzione del movimento dei membri generatori del moto.



## Tipologie di ipersostentatori sul bordo di uscita



semplice o plain flap



a fessura o slotted flap



a spacco o split flap



a scorrimento o Fowler flap

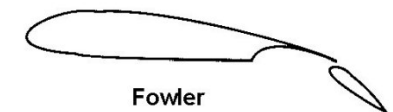
## Tipologia Fowler flap

Movimento composto da rotazione e traslazione.

Caratterizzati da: maggiore efficienza e controllabilità del velivolo in particolari configurazioni di volo.

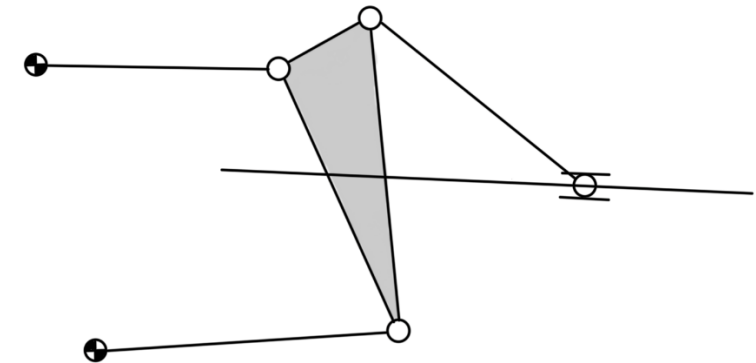
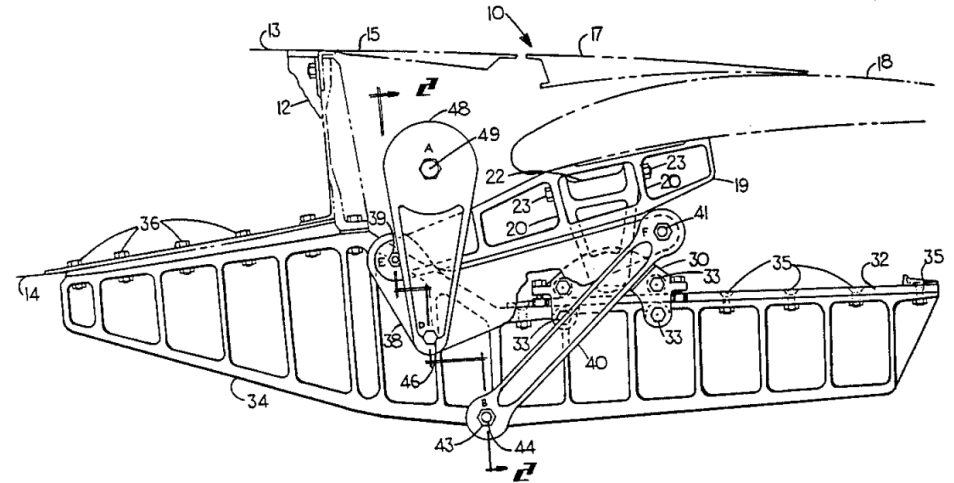
Esistono anche con doppio e triplo stadio ma a fronte di una crescente efficienza si pone l'incremento del peso e la complessità di progettazione.

Entrambi i brevetti in esame rientrano nella tipologia di flap '*Single slotted Fowler flaps*'.



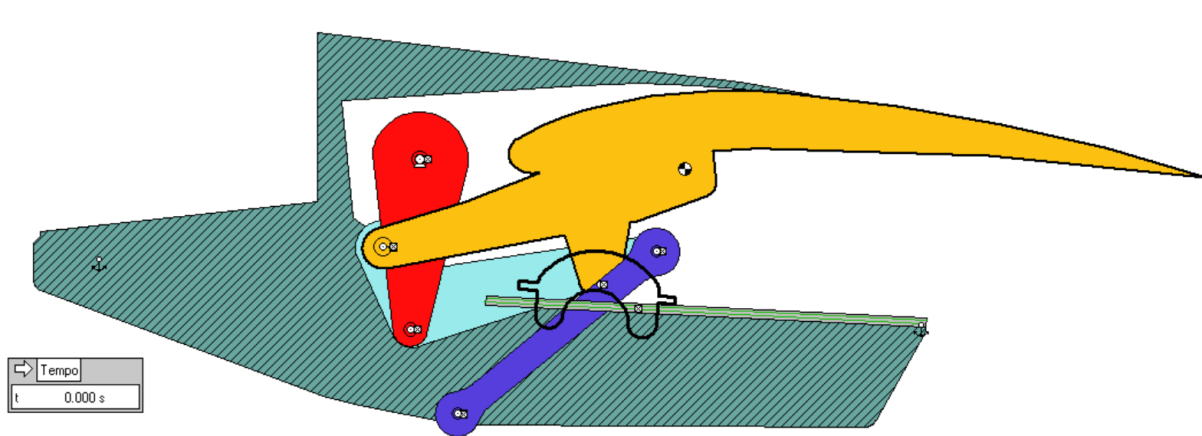
Single slotted Fowler flaps

Il cinematismo è la composizione di un quadrilatero articolato ed una diade RRP, il primo è mosso da un bilanciere motore il quale movimentata il quadrilatero che essendo vincolato al gruppo di Assur di 3<sup>a</sup> specie tramite un collegamento rigido permette al cinematismo di mantenere un grado di libertà. La diade RRP termina con una coppia prismatica solidale al telaio sul quale scorre il pattino, a quest'ultimo è collegato il flap (schematizzato nella figura seguente tramite una biella) che rappresenta il membro studiato tramite l'analisi cinematica.

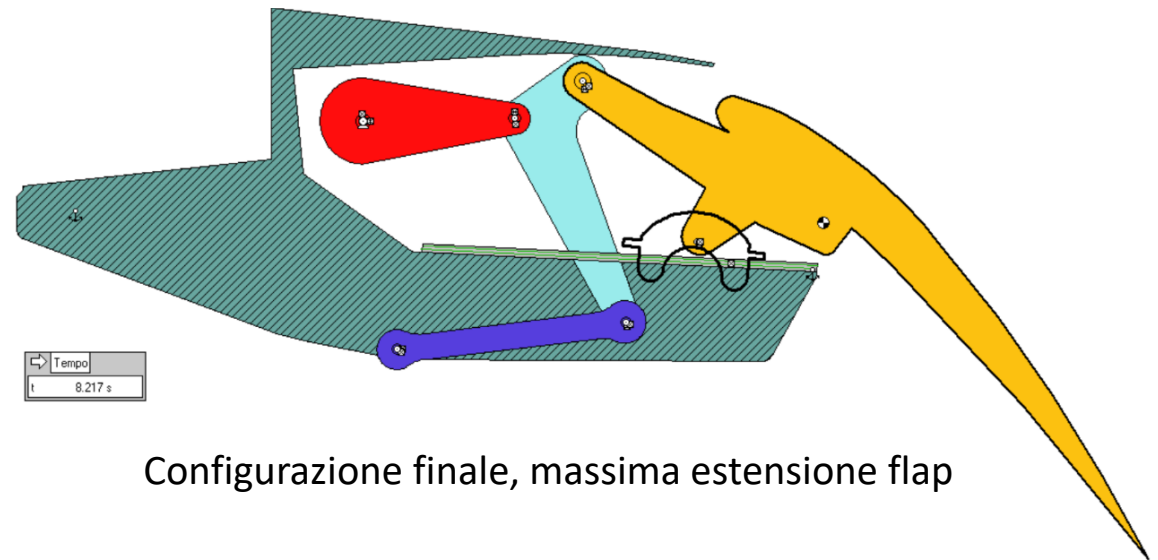


$$gdl = 3(6 - 1) - 2 \cdot 7 = 15 - 14 = 1$$

con  $m = 6$ ,  $C_1 = 7$  (6 coppie R, 1 coppia P) e  $C_2 = 0$ .



Configurazione di partenza, con flap ritratto



Configurazione finale, massima estensione flap

I valori dati di partenza: velocità angolare di rotazione del bilanciere motore 0.2 rad/s per generare un tempo di estensione e ritiro del flap paragonabile a valori reali, ovvero intorno agli 8-10 secondi.

Il passo successivo è quello di identificare i punti di partenza e di fine corsa del cinematismo, assumendo come angolazione massima dei flap alla massima estensione pari a  $45^\circ$  (circa 0.785 radianti), attraverso un procedimento manuale sono stati identificati il frame finale del movimento e l'intervallo di tempo impiegato per compiere il movimento.

Frame finale : 493

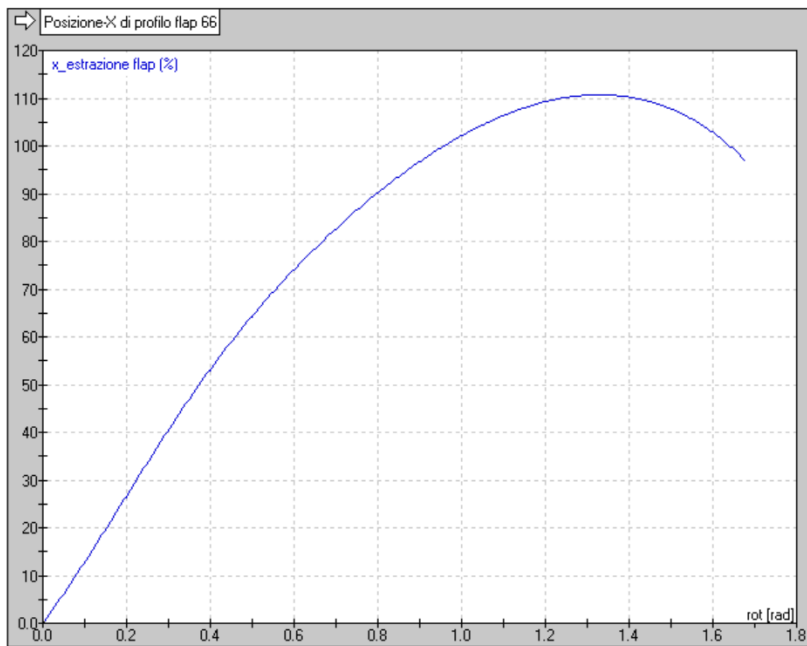
Tempo di estensione = 8,217 s

**Analisi di posizione:**

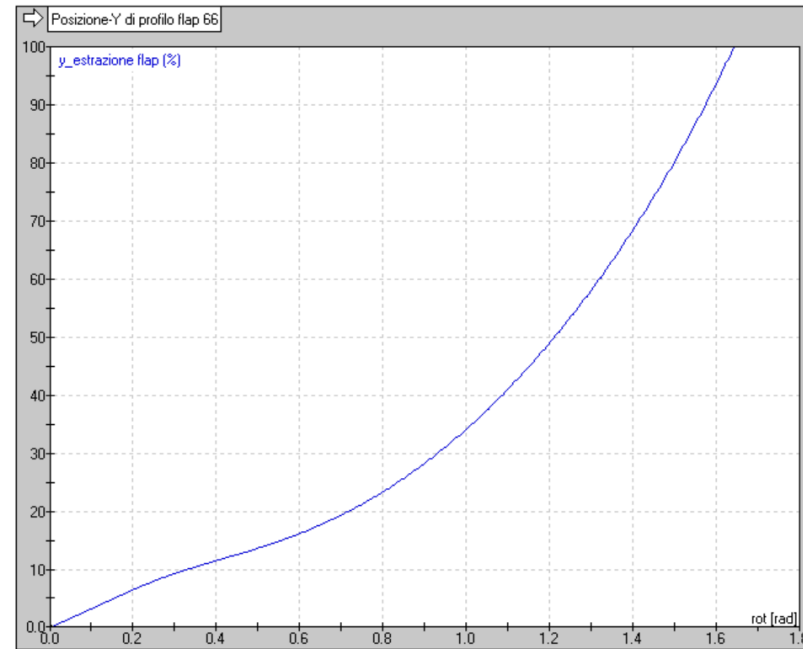
L'analisi di posizione ha lo scopo di determinare la posizione del flap in funzione del movimento del bilanciere motore in ogni istante di tempo, a tale scopo sfrutto la funzione 'misura posizione' di WM.

$X_0 = 1248.919 \text{ m}$        $X_f = 1671.820 \text{ m}$     Escursione\_X = 422.901 m

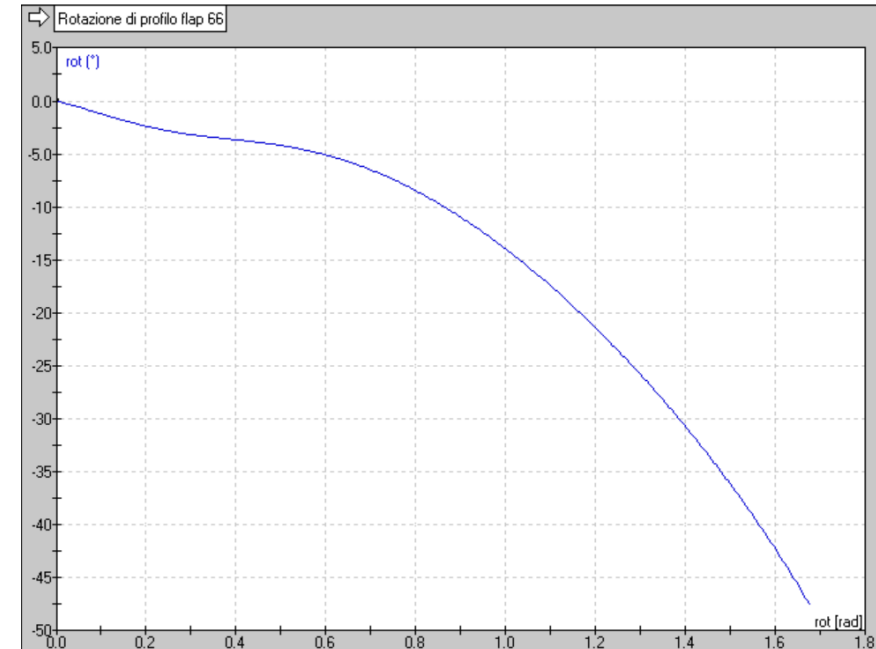
$Y_0 = 579.201 \text{ m}$      $Y_f = 403.104 \text{ m}$     Escursione\_y = 176.097 m



Ext. flap lungo X =  $((\text{Body}[66].p.x - 1248.919)/422.901)*100$



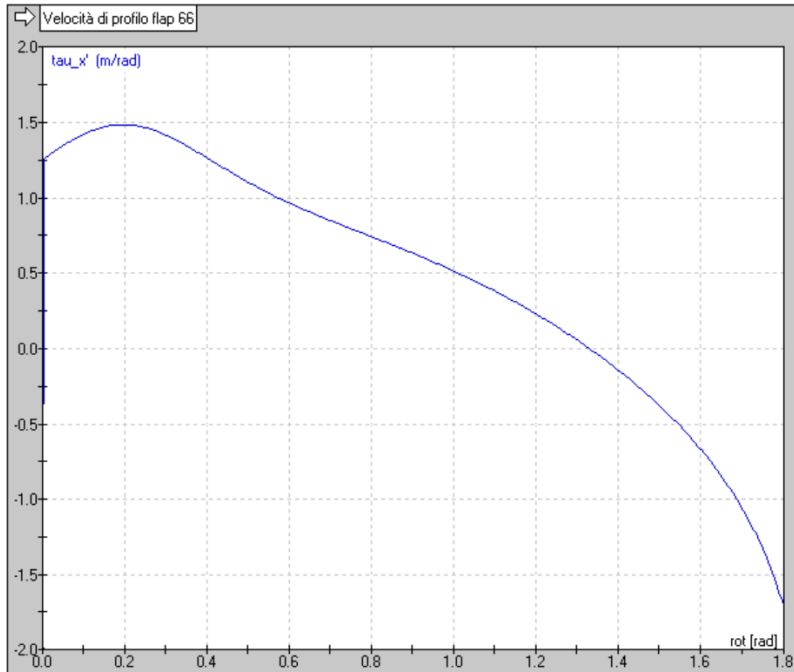
Ext. flap lungo Y =  $((579.201 - \text{Body}[66].p.y)/176.097)*100$



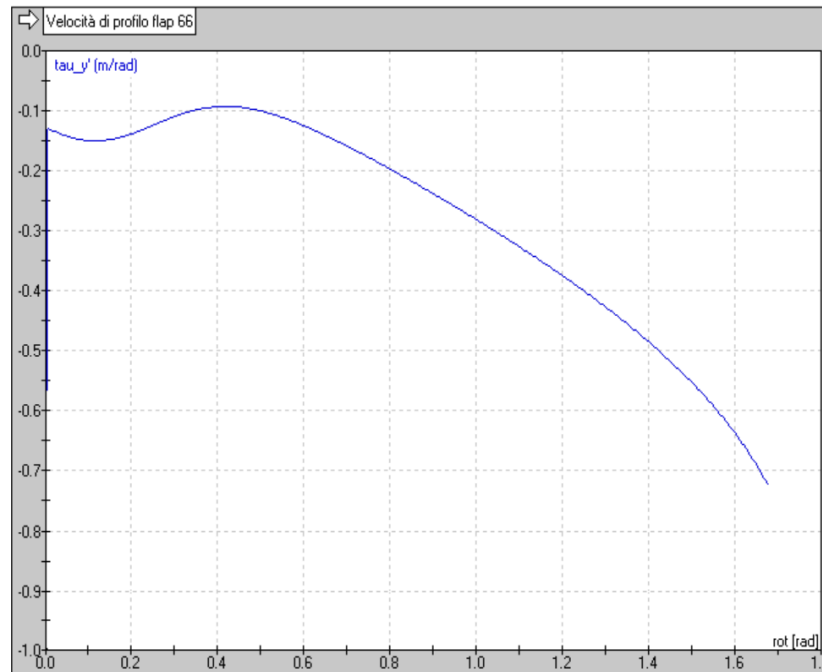
Rot. flap espressa in gradi =  $(\text{Body}[66].p.r - 0.004)*(360/(2*\pi))$

**Analisi di velocità:**

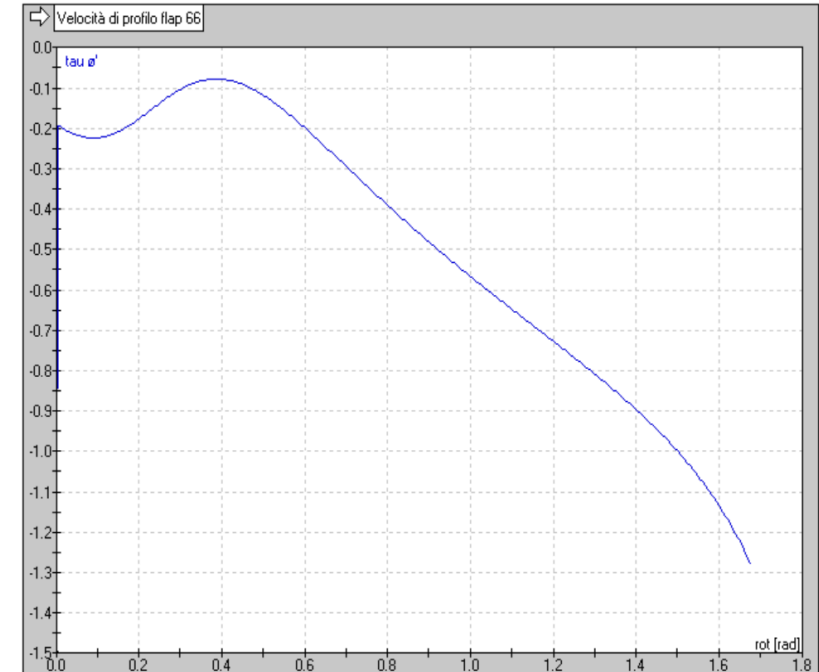
Per l'analisi di velocità è sufficiente modificare le equazioni risultanti dal comando "misura velocità" del corpo "[66]" (rappresentante il flap mobile in WM) lungo X,Y e di rotazione ponendo a denominatore la velocità della coordinata libera q' (velocità di rotazione del bilanciere movente).



$$\tau_{vx'} = \text{Body}[66].v.x / (400 * \text{Body}[23].v.r)$$

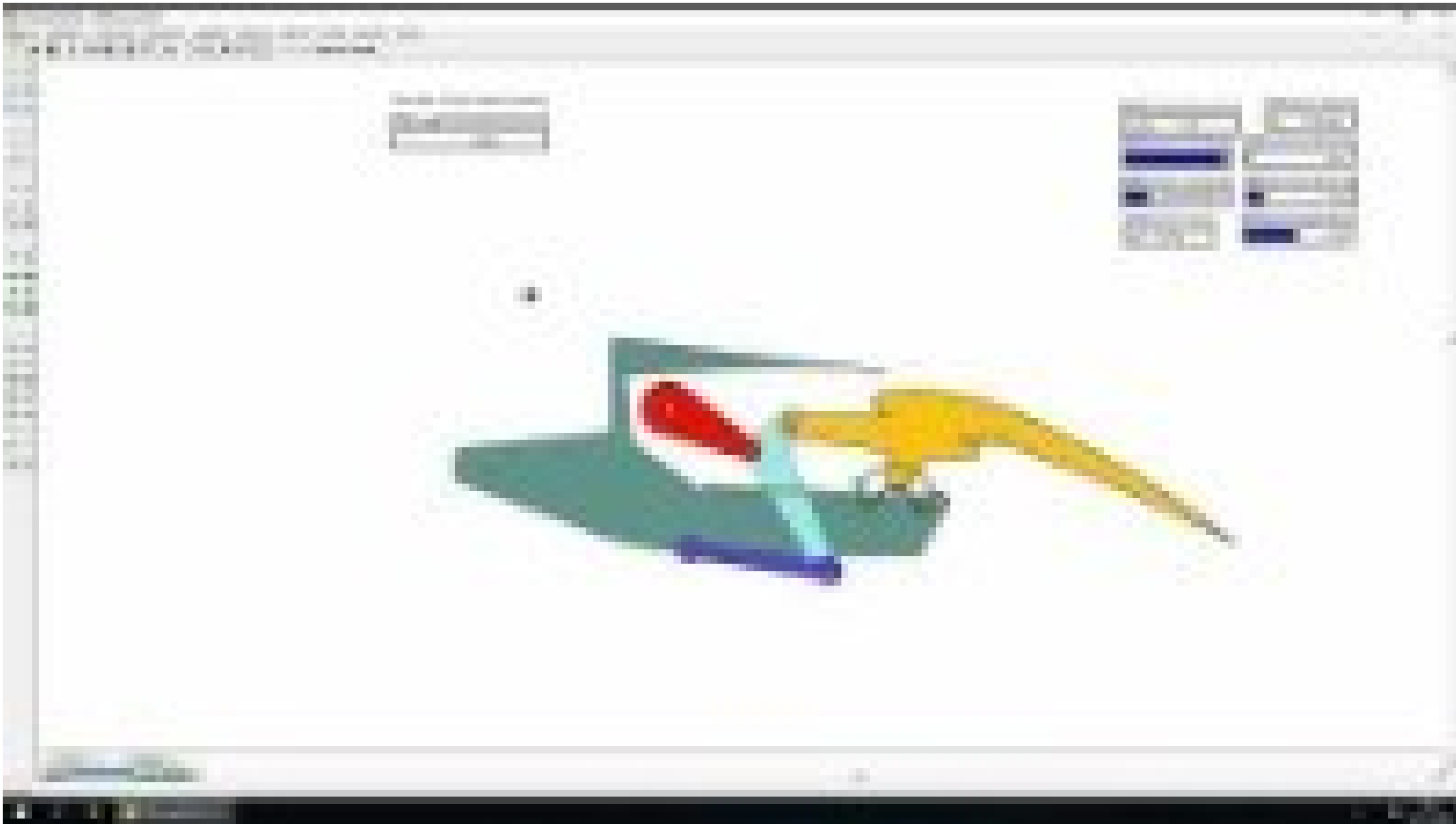


$$\tau_{vy'} = \text{Body}[66].v.y / (400 * \text{Body}[23].v.r)$$



$$\tau_{\theta'} = \text{Body}[66].v.r / \text{Body}[23].v.r$$





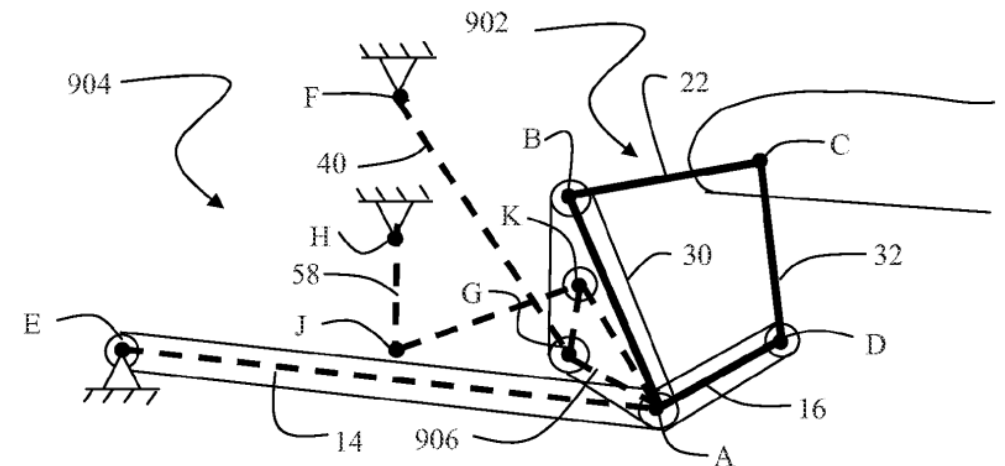
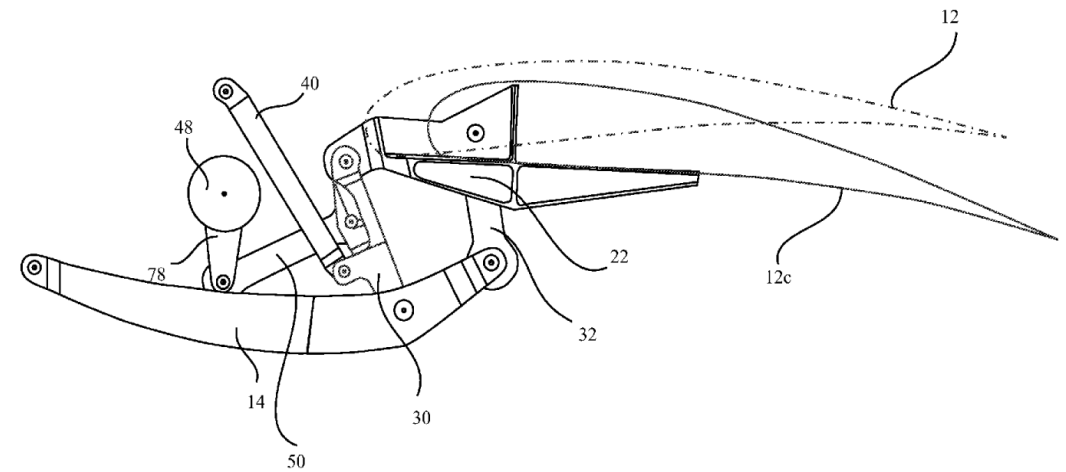
## Cinematismo

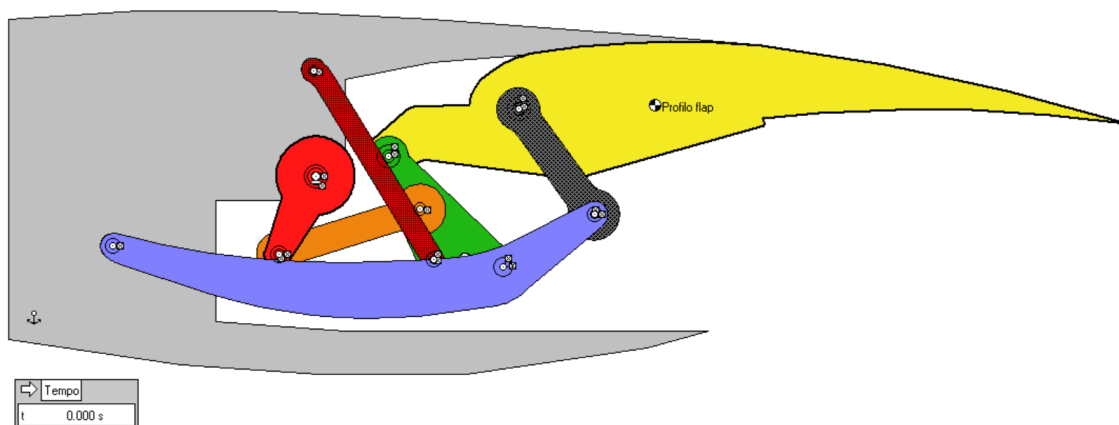
Il moto è trasmesso a partire dal bilanciario al quale è collegata tramite coppia rotoidale una biella che è a sua volta legata tramite coppia rotoidale ad un corpo centrale nel meccanismo dotato di 4 coppie rotoidali. Questi primi tre membri compongono una diade di 1° specie RRR. Lo stesso corpo identificato con il 30 è anche membro del quadrilatero articolato avente come membri il telaio ed i due bilanciari collegati tramite cerniere al telaio.

Infine, per trasmettere il moto al flap vero e proprio è presente un secondo quadrilatero composto dal corpo centrale 30, il bilanciario inferiore dotato di tre coppie rotoidali e da due bielle, una delle quali (quella contraddistinta dal numero 22 nella figura seguente) rappresenta il profilo del flap.

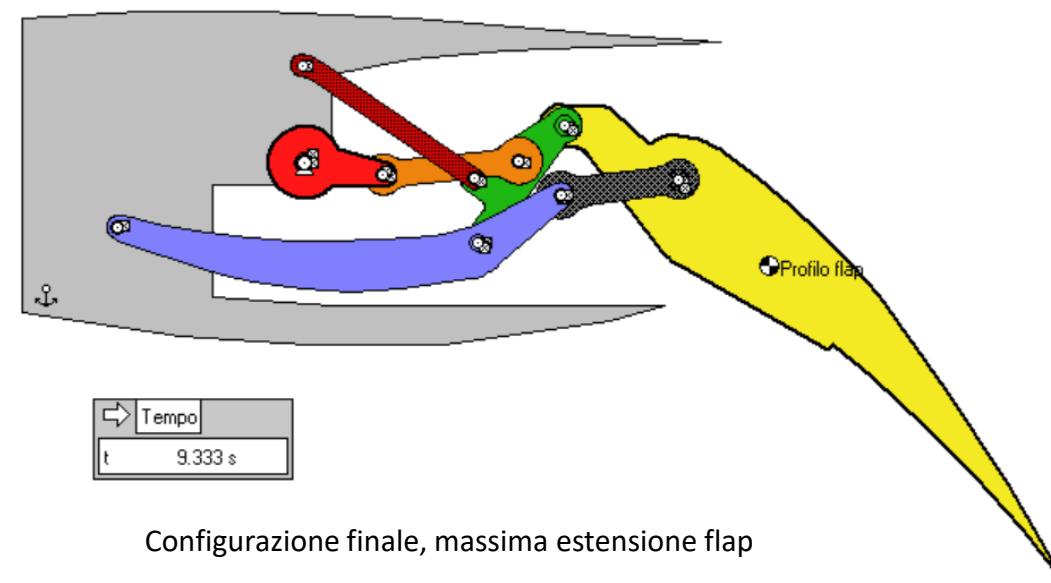
$$gdl = 3(8 - 1) - 2 \cdot 10 = 21 - 20 = 1$$

con  $m = 8$  e  $C1 = 10$  (solo coppie rotoidali) e  $C2 = 0$ .





Configurazione di partenza, con flap ritratto



Configurazione finale, massima estensione flap

In assenza di dati di fabbrica è stata scelta come coordinata libera la velocità angolare del bilanciere pari a 0.2 rad/s, anche per poter effettuare un confronto con il brevetto del 1983 analizzato in precedenza.

Per identificare i punti di partenza e di fine corsa del cinematismo è stato assunto ancora come valore finale dell'angolo di deflessione massima da raggiungere per il flap il valore di 45° (circa 0.785 radianti). Attraverso un procedimento manuale del tutto analogo al meccanismo precedente sono stati ricavati:

Frame finale : 560

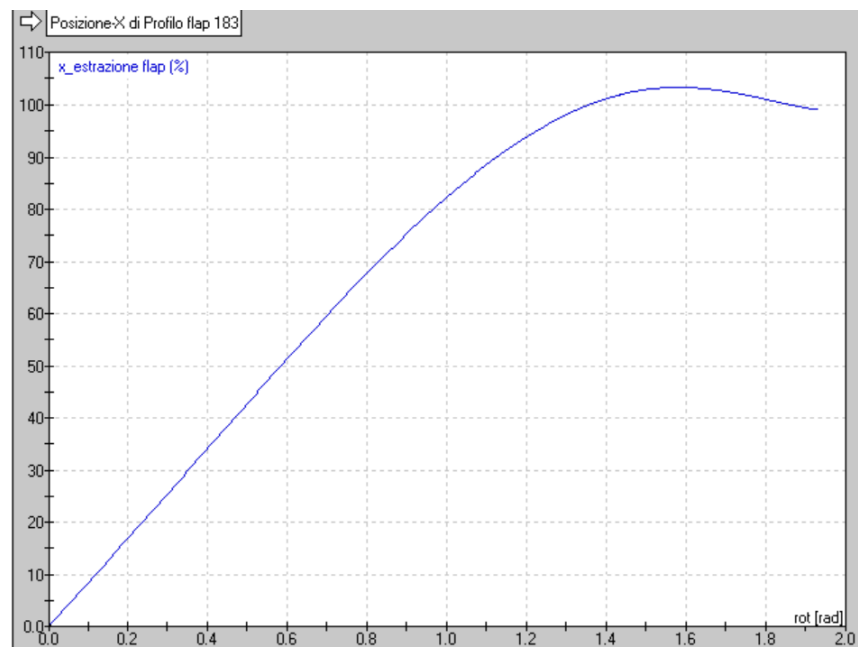
Tempo di estensione = 9,333 s

Analisi di posizione:

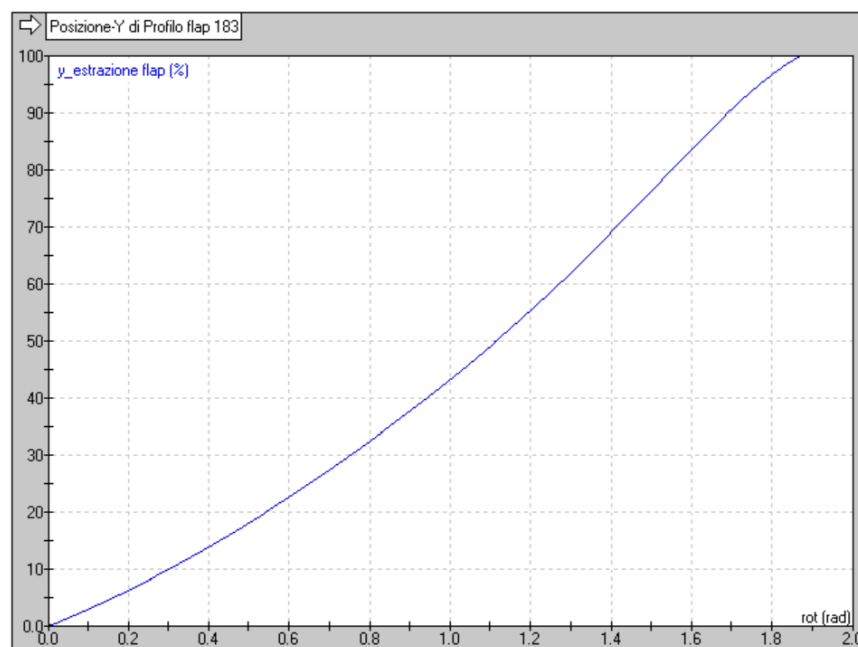
Per determinare le coordinate di posizione del flap in funzione del movimento del bilanciere motore in ogni istante di tempo si esegue la procedura analoga al meccanismo precedente.

$X_0 = 1359.590 \text{ m}$        $X_f = 1430.460 \text{ m}$     Escursione\_X = 192.710 m

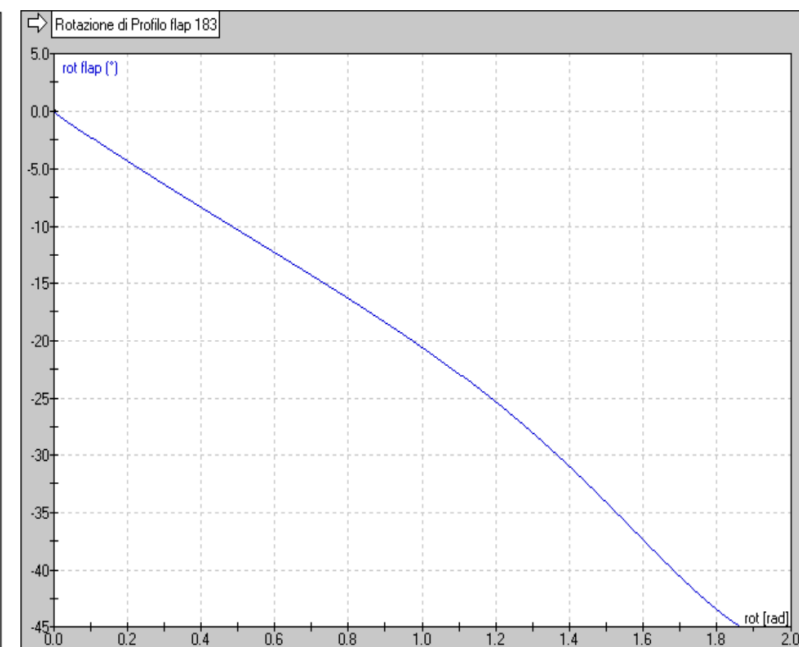
$Y_0 = 1552.300 \text{ m}$        $Y_f = 1218.867 \text{ m}$     Escursione\_y = 211.593 m



Ext. flap lungo X =  $((\text{Body}[183].p.x - 1359.59)/192.710)*100$



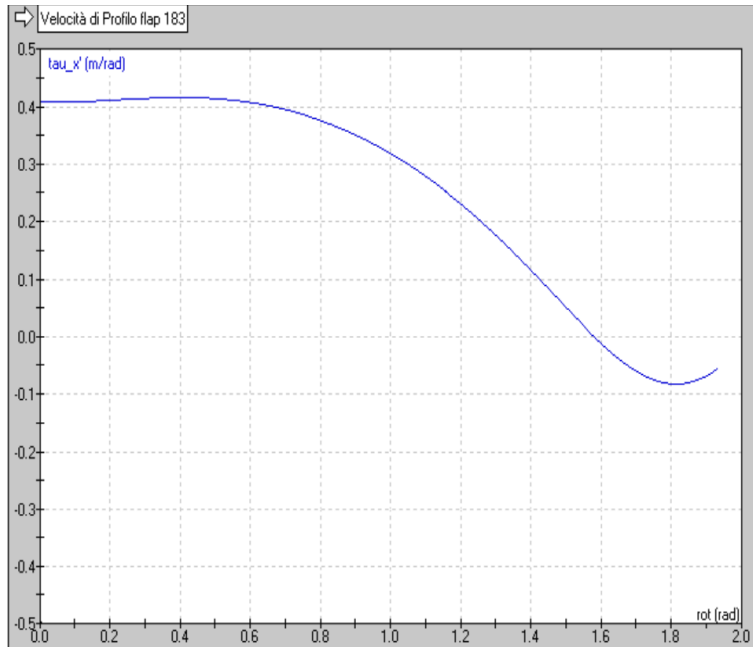
Ext. flap lungo Y =  $((1430.46 - \text{Body}[183].p.y)/211.593)*100$



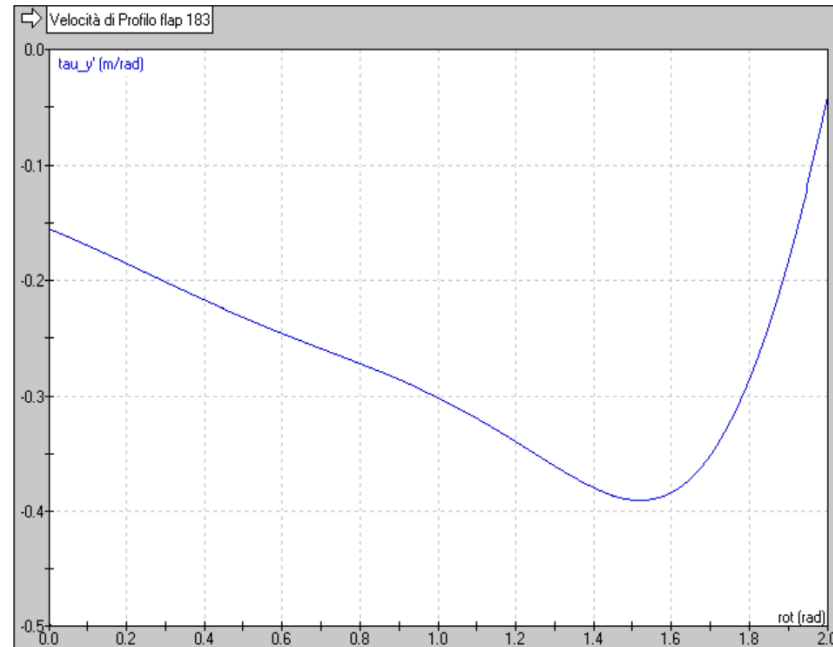
Rot. flap espressa in gradi =  $(\text{Body}[183].p.r - 0.358)*(360/(2*\pi))$

**Analisi di velocità:**

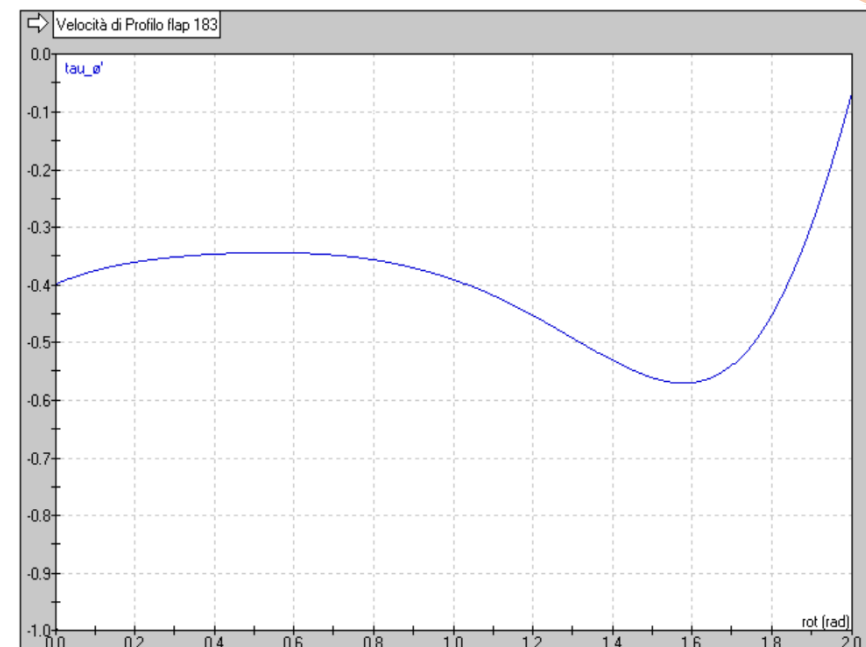
Come per il meccanismo precedente per l'analisi di velocità è sufficiente modificare le equazioni risultanti dal comando 'misura velocità' del corpo "[183]" (rappresentante il flap mobile in WM) lungo X,Y e di rotazione ponendo a denominatore la velocità della coordinata libera  $q'$  (velocità di rotazione del bilanciere movente) .



$$\tau_{vx}' = \text{Body}[183].v.x / (400 * \text{Body}[266].v.r)$$



$$\tau_{vy}' = \text{Body}[183].v.y / (400 * \text{Body}[266].v.r)$$



$$\tau_{\theta}' = \text{Body}[183].v.r / \text{Body}[266].v.r$$

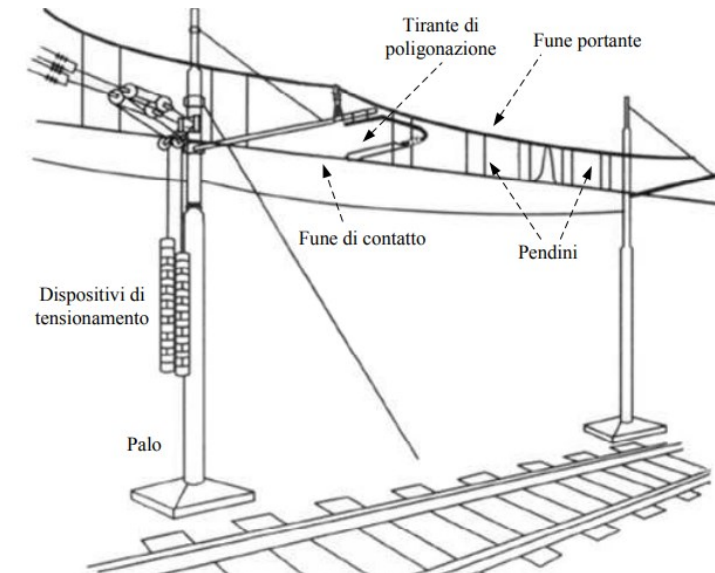
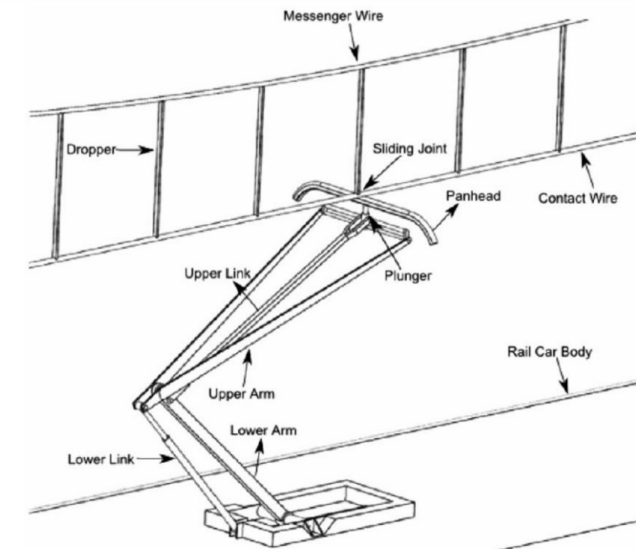


Il pantografo è un dispositivo articolato che consente la captazione dell'energia elettrica necessaria alla locomozione e al funzionamento di veicoli filoferrotranviari.

## Sistema fisico di utilizzo

### 1) *Catenaria*

Ha il compito di distribuire l'energia elettrica. Una successione di **pali**, ad una distanza di circa **60m**, detta distanza di **campata**, sorreggono una o più funi portanti attraverso delle **sospensioni**. Le **funi portanti** hanno sostengono le **funi di contatto** attraverso dei **pendini** posti ad intervalli di circa **7m**. Per limitare l'usura degli striscianti la fune di contatto viene tesa in direzione trasversale tramite dei **tiranti di poligonazione** in modo che durante la marcia il punto di contatto spazi maggiore rendendo così uniforme l'usura dello strisciante.



## 2) Pantografo

La struttura del sistema è scomponibile nei due livelli di sospensione e la testa.

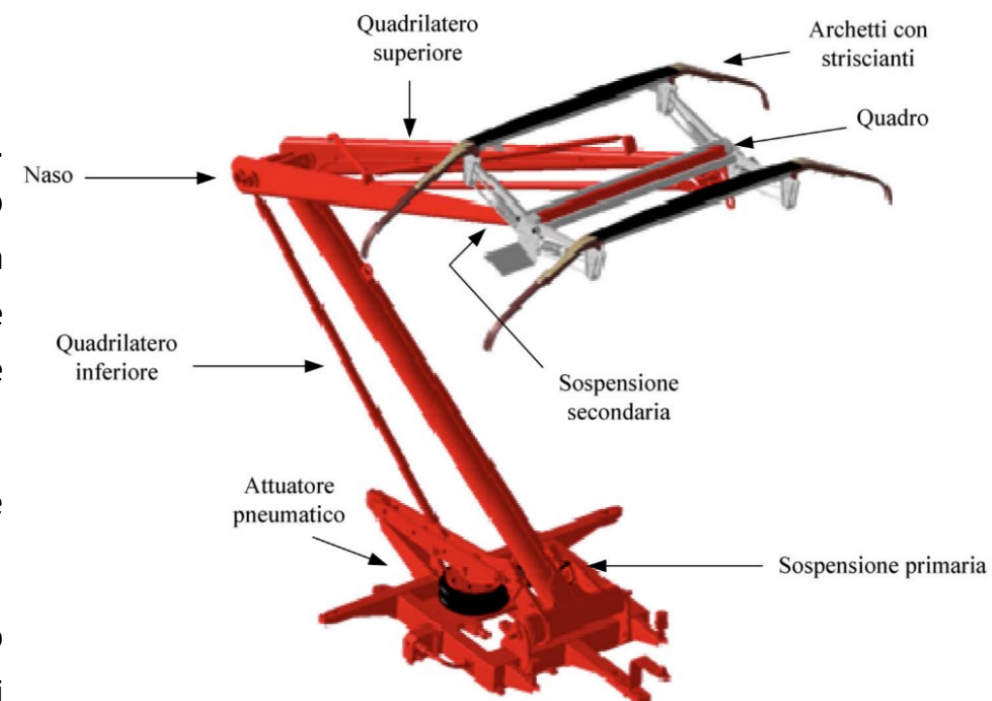
Alla base del quadrilatero inferiore è presente il **telaio di base** supportato da degli **isolatori**. Alloggiato nella base è presente l'**attuatore pneumatico** che movimentata il quadrilatero inferiore e permette la sospensione primaria fornendo anche il precarico statico, ossia la forza necessaria per garantire il contatto tra fune e strisciante. Il collegamento tra i due quadrilateri avviene tramite tre cerniere che collegano le rispettive aste, questa parte è comunemente detta '**naso**'.

Il quadrilatero superiore è poi collegato agli archetti dal secondo livello di sospensione composto da **molle ad elica** la cui analisi esula dal presente lavoro di tesi.

L'estremità superiore della sospensione appartenente al quadrilatero superiore è detto '**quadro**'; mentre l'estremo superiore del sistema sono gli **archetti** che ospitano gli **striscianti**. L'insieme degli archetti e della sospensione secondaria è chiamata '**testa**'.

Gli archetti, solitamente in acciaio o in lega leggera hanno fissati gli striscianti, elementi in grafite e rame sinterizzati, che sono a contatto con la catenaria.

Nella presente trattazione verrà preso in esame il modello di pantografo **ATR 95**, in utilizzo in ambito ferroviario su locomotive dei treni ad alta velocità **Frecciarossa (ETR500)** per linee a 25 kV in corrente alternata.





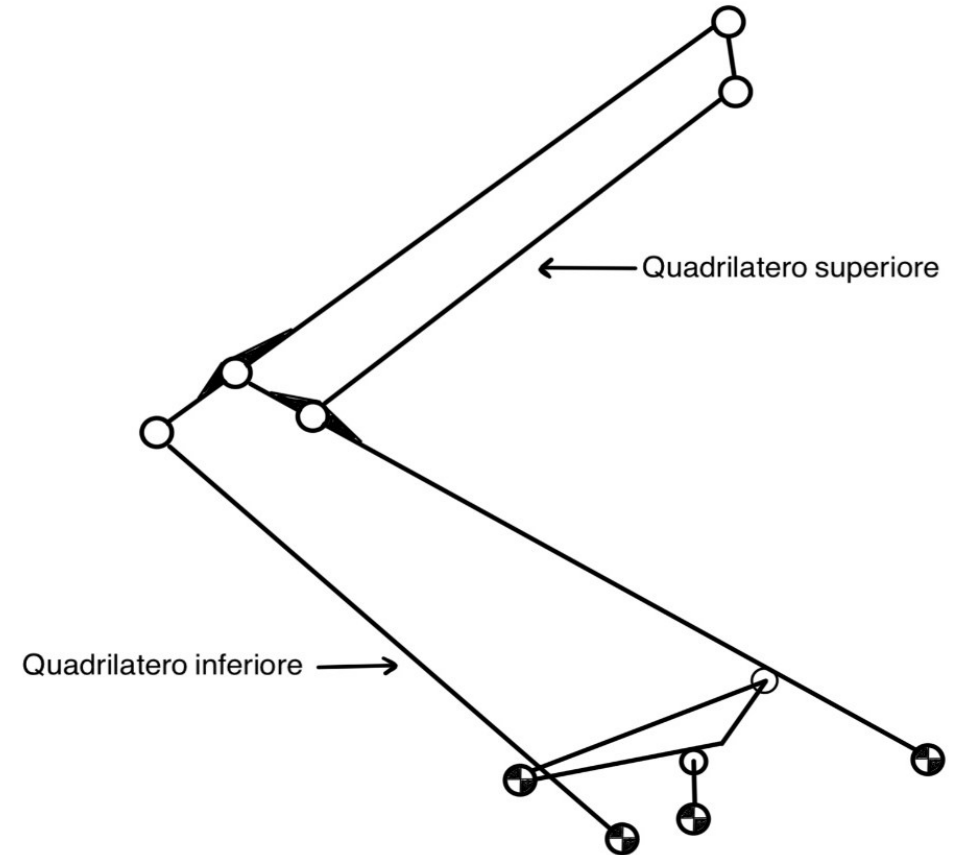
## Cinematismo

Il cinematismo è la composizione di un doppio quadrilatero articolato, esso mantiene dunque un grado di libertà verificabile tramite l'equazione di Grübler e permette di generare approssimativamente un moto di pura traslazione verticale del quadro.

$$\text{Eq di Grübler : } gdl = 3(8 - 1) - 2 \cdot 9 - 2 = 21 - 18 - 2 = 1$$

Con  $m = 8$ ,  $C_1 = 9$  (coppie rotoidali),  $C_2 = 2$  (coppie a camma)

La traslazione verticale degli striscianti sulla testa del pantografo avviene mediante un meccanismo comandato da una molla attuatrice pneumatica ad aria posta alla base del dispositivo, la quale muove un bilanciere tramite una camma (forza) che interagendo con l'asta principale del quadrilatero inferiore tramite un accoppiamento a camma trasmette il moto all'intero quadrilatero inferiore. Quest'ultimo attraverso il naso movimentata il quadrilatero superiore generando il movimento della testa del pantografo.



**Analisi cinematica:**

In questo caso la coordinata libera è rappresentata dall'estensione della molla attuatrice alla base del meccanismo, a cui è stato assegnato un andamento sinusoidale per poter determinare il range di movimento.

Determinazione dei coefficienti tramite procedimento manuale:

$$q_{\max} = 6.559 \text{ m} \quad q_{\min} = 2.123 \text{ m}$$

E' possibile ora ricavare l'ampiezza  $A$  e la semiampiezza  $A/2$  del moto della molla attuatrice.

$$A = q_{\max} - q_{\min} = 4.436 \text{ m} \quad A/2 = 2.218 \text{ m}$$

La pulsazione è stata stabilita in modo empirico in base all'osservazione della realtà in quanto osservando i tempi di dispiegamento e ripiegamento dei pantografi dei treni è stato scelto un tempo di salita di 6 secondi.

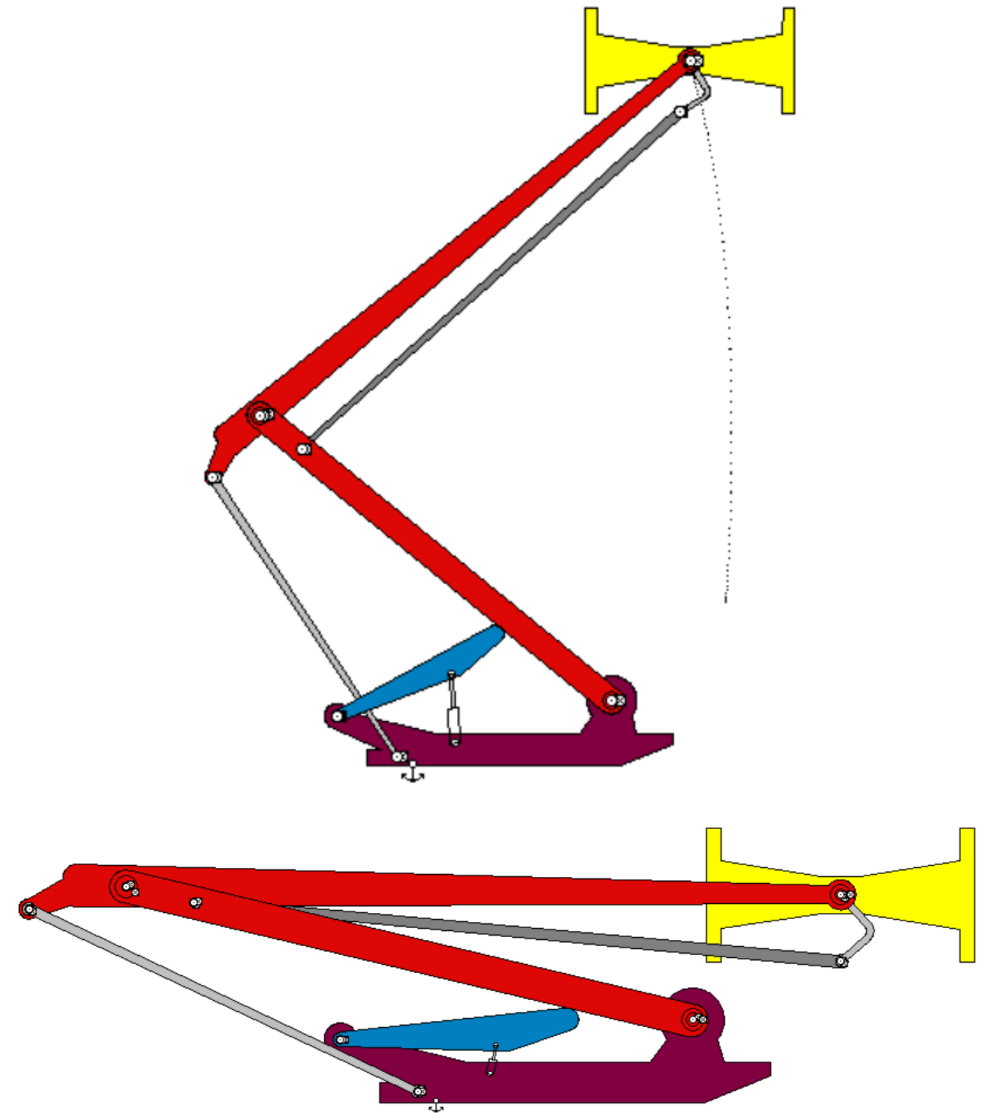
Da cui :  $T = 2 \cdot 6 = 12 \text{ s} \quad \omega = (2 \cdot \pi)/T = \pi/6 \text{ rad/s}$

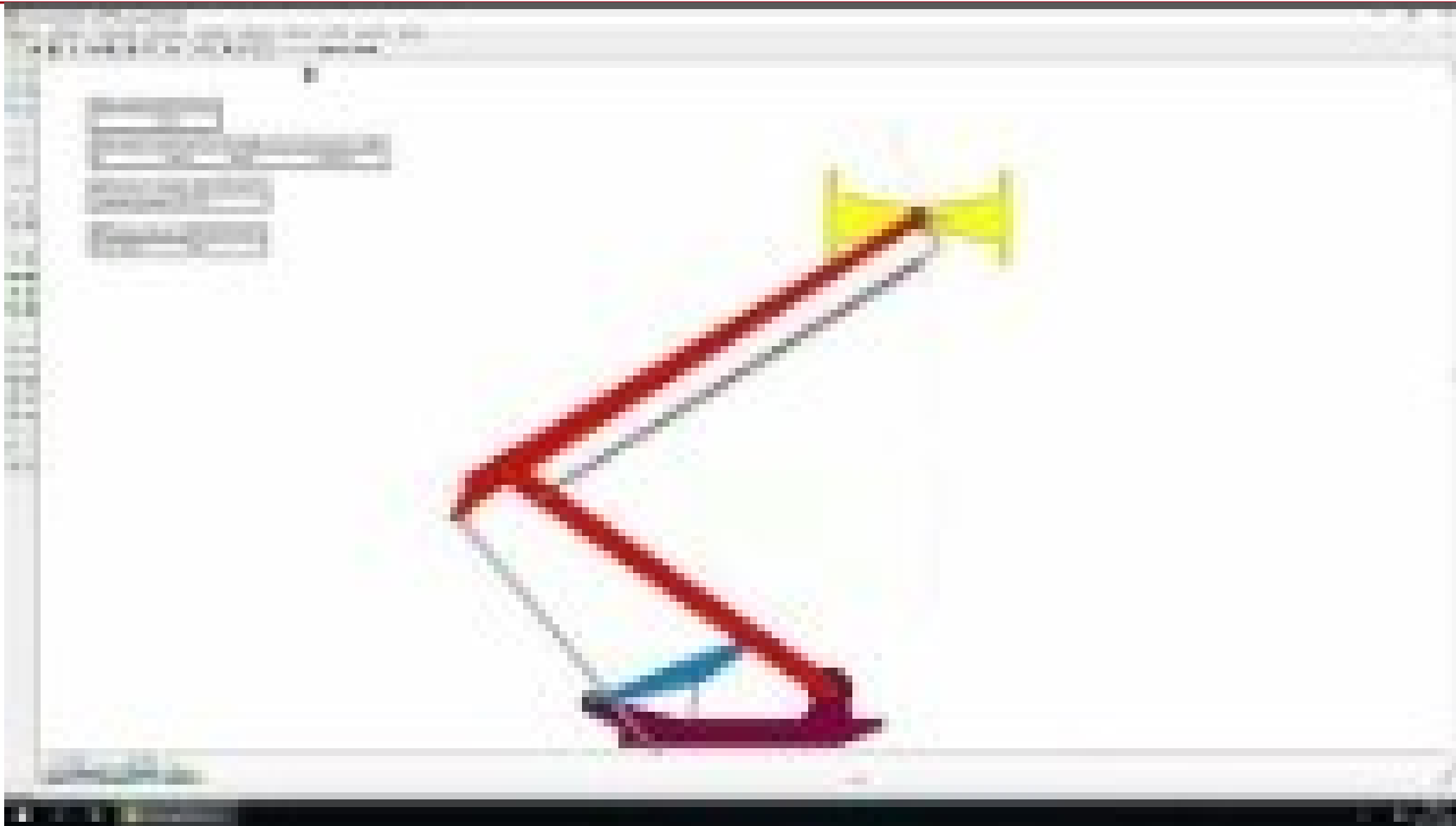
Legge di variazione della lunghezza della molla attuatrice tramite la seguente equazione sinusoidale:

$$q(t) = (2.213 + 2.218) + 2.218 * \sin((\pi/6) * t)$$

La velocità si ricava di conseguenza ed è la derivata nel tempo della funzione sopra determinata:

$$q'(t) = \pi/6 * 2.218 * \cos((\pi/6)*t)$$





- Errori ineliminabili che comporta la modellazione inversa di un meccanismo a partire dalla realtà. Possibile errore implicito nelle proporzioni dei modelli dovuto alla riservatezza di alcuni dati sensibili delle aziende sviluppatrici.
- Le conseguenze sui risultati del pantografo, un modello esatto nell'istante di massimo ripiegamento l'asta del quadrilatero superiore dovrebbe raggiungere la posizione orizzontale sovrapponendosi esattamente all'asta principale del quadrilatero inferiore, minimizzando gli ingombri.
- Altri tipi errori dovuti alla capacità di calcolo del software di simulazione Working Model, include piccole imprecisioni durante l'importazione dei file .dxf che vanno a rendere complicata l'unione dei vari.
- Considerazione sul reale range di utilizzo dei sistemi analizzati, infatti i valori più estremi sono raramente impiegati. Per i flap di tipologia 'Single slotted Fowler flap' è in genere utilizzato un massimo angolo di deflessione di  $40^\circ$  mentre per i pantografi il livello di estrazione del quadro è limitato dallo scopo di favorire il comportamento aerodinamico ed anche dalle caratteristiche della catenaria del sistema di utilizzo