

## **Diseño paramétrico integrado al análisis cinemático de un dispositivo de sujeción accionado a velocidad variable**

Fernando Cappellari, Matías Ameri <sup>(1)</sup>, Pedro Staffolani <sup>(2)</sup>, Luís Lifschitz <sup>(3)</sup> y Héctor Brito <sup>(4)</sup>

*Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto  
Ruta Nacional 36 – Km. 601, (X5804BYA) Río Cuarto, Argentina – fcappellari@ing.unrc.edu.ar*

<sup>(1)</sup> *matiasameri@yahoo.com.ar*

<sup>(2)</sup> *pstaffolani@ing.unrc.edu.ar*

<sup>(3)</sup> *llifschitz@ing.unrc.edu.ar*

<sup>(4)</sup> *hbrito@ing.unrc.edu.ar*

### **RESUMEN**

El propósito de este trabajo es la determinación de las posiciones, velocidades y aceleraciones en los puntos de contacto de las mordazas del conjunto de un dispositivo de sujeción y liberación controlada aplicable a ensayos bajo condiciones de microgravedad y vacío.

En primer término se traza un diagrama cinemático con su respectivo análisis analítico. Luego se determinan en forma numérica las variables de este dispositivo. Cabe acotar que el diseño de este dispositivo se encuentra integrado a un modelado paramétrico. Esto permite visualizar, el modelo "virtual", en forma inmediata con las nuevas variaciones en las medidas que surgen del nuevo cálculo.

La determinación numérica de las variables mencionadas se realiza modelando distintas aceleraciones de corredera.

Los resultados se grafican para aceleración de corredera: nula, constante y distinta de cero, como así también variable en el tiempo.

A partir de los resultados se infieren las Conclusiones referentes a los casos analizados.

Este trabajo se desarrolla dentro del Proyecto de Investigación: Diseño y construcción de un dispositivo mecánico para un montaje de sujeción y liberación controlada de módulos propulsivos en ambientes de microgravedad y vacío; enmarcado en el programa de investigación: Definición tecnológica de un propulsor de plasma estacionario de propelente sólido y de sus dispositivos de ensayo, que se realiza en nuestra Unidad Académica, y se encuentra subvencionado por la Secretaria de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto.

**Palabras Claves:** Dispositivo Sujeción, Diseño Paramétrico Integrado, Microgravedad.

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de la microgravedad ( $\mu$ -G) en ensayos experimentales ha tenido un desarrollo muy intenso en los últimos años, siendo una de las alternativas posibles para llevar a cabo dichos ensayos la realización de vuelos del tipo parabólicos [1,2].

Particularmente los ensayos experimentales son realizados en estructuras de soporte del tipo fijas o de movimiento restringido mediante bandas flexibles al medio generador de la  $\mu$ -G.

Debido a las características inherentes a los sistemas de sujeción, y teniendo presente que las vibraciones producidas por el avión son transmitidas a través del sistema de soporte al dispositivo a ensayar, no hay una independencia total entre dicho dispositivo y el sistema soporte disponible en el avión.

Sin embargo cuando el dispositivo experimental requiere una total liberación dentro del espacio físico disponible, es necesario recurrir a un sistema de soporte y liberación que minimice las perturbaciones cinemáticas residuales producidas por el ambiente en que se llevará a cabo.

Cobra particular relevancia el diseño de un dispositivo de sujeción y liberación, ya que ello permite la realización de ensayos experimentales en vuelos parabólicos estandarizados, en un mayor número y con un menor costo de operación con respecto a su realización en órbita terrestre (International Space Station).

Se pretende determinar la cinemática del diseño de un dispositivo de montaje y sujeción con posterior liberación.

Cabe acotar que el dispositivo será utilizado, en particular, para la evaluación de técnicas de propulsión eléctrica aplicables a microsátélites [3].

Se cuenta con un modelo de diseño paramétrico del dispositivo tal como se muestra en la Figura 1, cuyas variables de diseño se encuentran integradas al cálculo estructural y al cinemático del dispositivo [4].

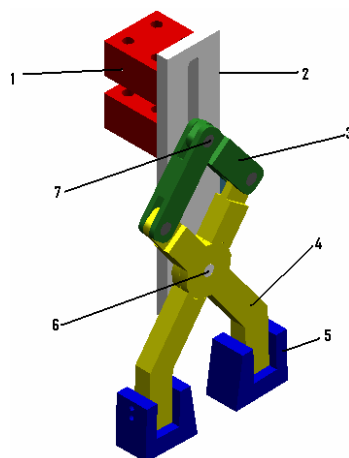


Figura 1. Modelo del dispositivo

En Tabla 1 se encuentran, en forma general, la denominación de los elementos constitutivos del dispositivo sujeción y liberación.

*Tabla 1. Denominación de los componentes del dispositivo*

<b>Nº</b>	<b>Nombre</b>
1	Anclaje actuador de estado sólido – Resorte
2	Placa Guía Corredera
3	Barra Acopladora
4	Barra Balancín
5	Mordaza
6	Eje Articulación Rotación
7	Eje Articulación Roto-Traslación

El mecanismo opera de la siguiente manera:

Las mordazas presionan al elemento a ensayar a través de dos superficies de contacto, y a su vez están fijadas con bulones a las barras balancín.

Las barras balancín son accionadas por dos barras acopladoras y pivotan en un eje de articulación rotación que está fijo en la placa guía corredera.

Las barras acopladoras se conectan con la barra balancín y al eje articulación roto-traslación, permitiendo girar con la barra balancín y desplazarse, al tiempo que puede rotar sobre la guía de la placa guía corredera.

El eje articulación roto-traslación además de conectarse con las barras acopladoras está anclado a la masa de accionamiento actuador de estado sólido (resorte muscular), que a su vez está fijo a la placa guía corredera.

## **2. TÉCNICA DE INTEGRACIÓN**

El modelo de diseño integrado que se presentará, a modo de ejemplo, corresponde específicamente a la barra balancín, y los resultados del cálculo estructural deberán estar en cualquier formato del tipo planilla de cálculo.

En primer lugar se realiza un Pre-Diseño, utilizando el software de diseño paramétrico SolidWorks, donde se establecen las restricciones geométricas como así también se definen las variables independientes y dependientes correspondientes.

Las variables paramétricas del diseño son generadas automáticamente por el software de diseño, o pueden ser modificadas de acuerdo al criterio del diseñador. En este caso las variables fueron modificadas convenientemente. El modelo de la barra balancín con sus respectivas variables se muestra en la Figura 2.

El paso siguiente es la modificación de las variables paramétricas del diseño (variables dependientes), asignándoles una correlación con las variables de la planilla de cálculo (variables independientes), donde las variables dependientes asumen los valores de las variables independientes de la planilla de cálculo.

Esto se logra siguiendo los pasos específicos que describe el manual de usuario del software de diseño; básicamente hay que activar la tabla de variables del programa CAD, y seleccionar, de la hoja de cálculo, la variable con el valor apropiado para la relación entre cotas, para luego

pegarla con vínculo en la columna correspondiente a la tabla de variable del programa SolidWorks. En la Figura 3 se muestra la tabla de variables con la respectiva vinculación a la planilla de cálculo.

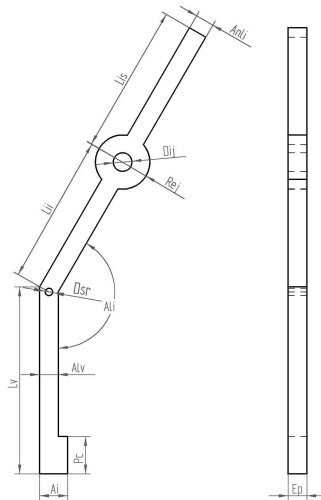


Figura 2. Variables paramétricas de la barra balancín

Tipo	Nombre	Valor	Fórmula
Dim	Lv	100,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Dim	Ali	150,00 °	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Dim	Anli	10,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Dim	Alv	10,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Dim	Ai	15,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Dim	Pc	20,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Dim	Rej	29,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Dim	Ep	10,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Dim	V1580	9,50 mm	(Rej - Anli) / 2
Dim	Li	80,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Dim	V2102	5,00 mm	Alv / 2
Dim	Lis	80,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Dim	V2298	10,00 mm	Anli
Var	PhysicalProperties_1	0,000 kg/mm <sup>3</sup>	
Var	PhysicalProperties_2	0,01	
Var	Dsr	4,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC
Var	Dq	10,00 mm	@C:\FERNANDO\UNRC\GMC

Figura 3. Tabla de variables del software SolidWorks

El modelo virtual logrado del prototipo y los planos de fabricación del dispositivo de montaje y sujeción con posterior liberación permitirán ser modificados y visualizados en forma inmediata de acuerdo a los resultados de los cálculos estructurales y cinemáticos del mecanismo. Esto permitirá ajustar los modelos físico-matemáticos asociados (teniendo en cuenta además una serie de especificaciones del experimento a ensayar) hasta lograr una conformidad con las especificaciones de funcionamiento y de diseño definitivos.

Cabe acotar que esta técnica será aplicable a todos los componentes del dispositivo y al conjunto general.

### 3. METODOLOGÍA

El concepto de grado de libertad o movilidad (M) es fundamental para el análisis del dispositivo. Éste proporcionará el número de entradas o coordenadas independientes y necesarias para predecir la salida del mecanismo y se representa de la siguiente manera:

$$M = 3(L-1) - 2J_1 - J_2 \quad (1)$$

Donde:

$L$ : es el número de eslabones.

$J_1$ : número de juntas completas.

$J_2$ : número de semijuntas.

Un enfoque para realizar el análisis cinemático del dispositivo es crear un lazo vectorial alrededor del eslabonamiento [5]. Los eslabones se representan como vectores posición. En la Figura 4 se muestra el mismo eslabonamiento de cinco barras, pero ahora los eslabones están dibujados como los vectores posición del lazo vectorial. Las longitudes de los vectores son las longitudes de los eslabones, las cuales se conocen.

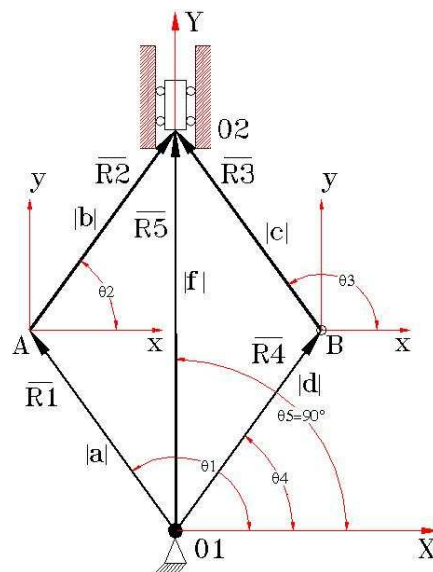


Figura 4. Lazo vectorial del dispositivo

Se pretende determinar las posiciones, de los vectores  $\overline{R}_1$ ,  $\overline{R}_2$ ,  $\overline{R}_3$  y  $\overline{R}_4$  para cada incremento en el movimiento de entrada  $\overline{R}_5$ , y luego derivar, con respecto al tiempo, las ecuaciones de posición para obtener las velocidades; las cuales también se derivan con el fin de obtener las expresiones de aceleración.

Un vez obtenidos los valores de posición, velocidad y aceleración (PVA) angulares de los eslabones, se calculan la posición, velocidad y aceleración lineales en un punto cualquiera perteneciente al eslabón (o al vector asociado), para una entrada dada del mecanismo. En este caso los vectores son  $\overline{R}_1$  y  $\overline{R}_4$  y los puntos particulares son: 1 y 2, (relacionados a los vectores  $\overline{P}$  y  $\overline{U}$ ), que representan los puntos de contacto de las mordazas, tal como se muestra en la Figura 5.

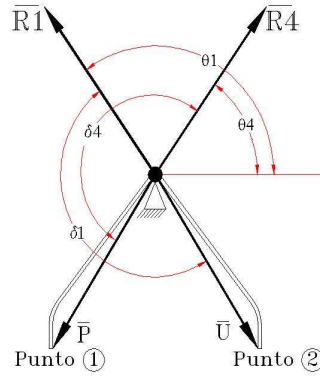


Figura 5. Ubicación de los puntos 1 y 2 con respecto a los vectores  $\overline{R_1}$  y  $\overline{R_4}$

#### 4. DESARROLLO

Para el dispositivo de sujeción y liberación se determinaran los grados de libertad, las PVA angulares de los vectores  $\overline{R_1}$ ,  $\overline{R_2}$ ,  $\overline{R_3}$  y  $\overline{R_4}$  y las PVA lineales de los puntos 1 y 2 bajo las siguientes hipótesis:

- 1- Eslabones completamente rígidos.
- 2- Velocidad variable del eje articulación roto-traslación (asociado al vector  $\overline{R_5}$ ).
- 3- Rozamiento nulo en todo el dispositivo.

Los valores de las longitudes de los vectores se muestran en Tabla 2.

Tabla 2. Longitud de vectores

$ \overline{R_1}  =  \overline{R_4}  = 120 \text{ mm}$	$ \overline{R_2}  =  \overline{R_3}  = 130 \text{ mm}$
$ \overline{R_5}  = f \Rightarrow \text{variable: } 93.5 \text{ mm} \leq f \leq 219.3 \text{ mm}$	
$ \overline{U}  = 134.3 \text{ mm}$	$ \overline{P}  = 134.3 \text{ mm}$
$\theta_5 = 90^\circ$	$\delta_1 = 154^\circ$ $\delta_4 = 206^\circ$

En la figura 6 se muestra en forma esquemática y acotado el mecanismo en las dos posiciones límites de funcionamiento.

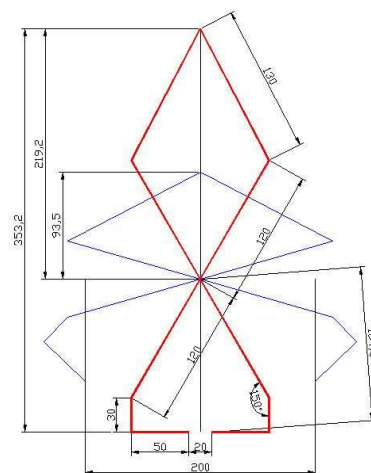


Figura 6. Dimensiones generales del dispositivo de sujeción y liberación

#### 4.1. Cálculo de la movilidad

Si:  $L = 5$ ;  $J_1 = 5$  y  $J_2 = 1$  la movilidad resulta:  $M = 1$

La variable independiente que controlaremos es  $\ddot{f}$ , es decir el módulo de la aceleración del vector  $\overline{R_5}$ . Para el análisis de posición necesitaremos  $f$ , o sea la posición de la corredera y para el análisis de velocidad necesitamos  $\dot{f}$ . Cabe acotar que al contar con la aceleración de la variable independiente, la integraremos con respecto al tiempo para obtener velocidad y posición para el restante análisis.

#### 4.2. Ecuación de lazo vectorial

Para el mecanismo de sujeción es:

$$\overline{R_1} + \overline{R_2} - \overline{R_5} = \overline{0} \quad (2)$$

$$\overline{R_3} + \overline{R_4} - \overline{R_5} = \overline{0} \quad (3)$$

Se determinan los ángulos desconocidos  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ , sustituyendo en la ecuación de lazo (2) y (3), con notación de números complejos, asociada a cada vector:

$$ae^{j\theta_1} + be^{j\theta_2} - fe^{j\theta_5} = 0 \quad (4)$$

$$ce^{j\theta_3} + de^{j\theta_4} - fe^{j\theta_5} = 0 \quad (5)$$

De acuerdo a la igualdad de algunos eslabones, obtenemos una relación entre los ángulos:

$$\theta_1 = 180^\circ - \theta_4 \quad (6)$$

$$\theta_3 = 180^\circ - \theta_2 \quad (7)$$

De la expresiones (4) se obtienen dos expresiones algebraicas de la siguiente forma:

$$\theta_1 = h(a, b, \theta_5, f) \quad (8)$$

$$\theta_2 = g(a, b, \theta_5, f) \quad (9)$$

En forma análoga para la ecuación (5). Si se deriva la ecuación (4), con respecto al tiempo, se obtienen expresiones de velocidad:

$$\omega_1 = h(a, b, \theta_5, \theta_1, \theta_3, f, \dot{f}) \quad (10)$$

$$\omega_2 = h(a, b, \theta_5, \theta_1, \theta_3, f, \dot{f}) \quad (11)$$

En forma análoga para la ecuación (5).

Si se deriva la ecuación (4) dos veces con respecto al tiempo se obtienen expresiones de aceleración:

$$\alpha_1 = h(a, b, \theta_5, \theta_1, \theta_3, \omega_1, \omega_2, \omega_3, f, \dot{f}, \ddot{f}) \quad (12)$$

$$\alpha_2 = h(a, b, \theta_5, \theta_1, \theta_3, \omega_1, \omega_2, \omega_3, f, \dot{f}, \ddot{f}) \quad (13)$$

En forma análoga para la ecuación (5).

### 4.3. Análisis del punto (1)

Una vez determinados los valores de PVA angulares para cada valor de entrada  $f$ , se determinaron los PVA lineales para el punto 1 de la figura 3, resultando:

Posición

$$\overline{P} = pe^{j(\theta_4 + \delta_4)} \quad (14)$$

Velocidad

$$\overline{V}_p = j \cdot pe^{j(\theta_4 + \delta_4)} \omega_4 \quad (15)$$

Aceleración

$$\overline{A}_p = j \cdot pe^{j(\theta_4 + \delta_4)} \alpha_4 - pe^{j(\theta_4 + \delta_4)} \omega_4^2 \quad (16)$$

## 5. RESULTADOS CON CORREDERA A VELOCIDAD CONSTANTE

La resolución numérica de las ecuaciones (14) a (16) a través de un software apropiado entregan como resultado la gráfica de: posición (separación de las mordazas), en Figura 7, y velocidad y aceleración, en Figura 8. Cabe señalar que para mayor simplicidad las gráficas se representan solo para el punto (1).

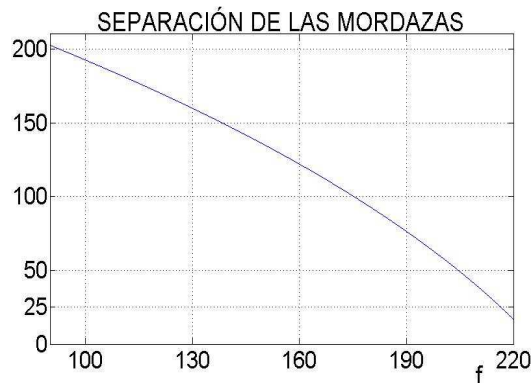


Figura 7. Separación de las mordazas en función de la variable independiente  $f$

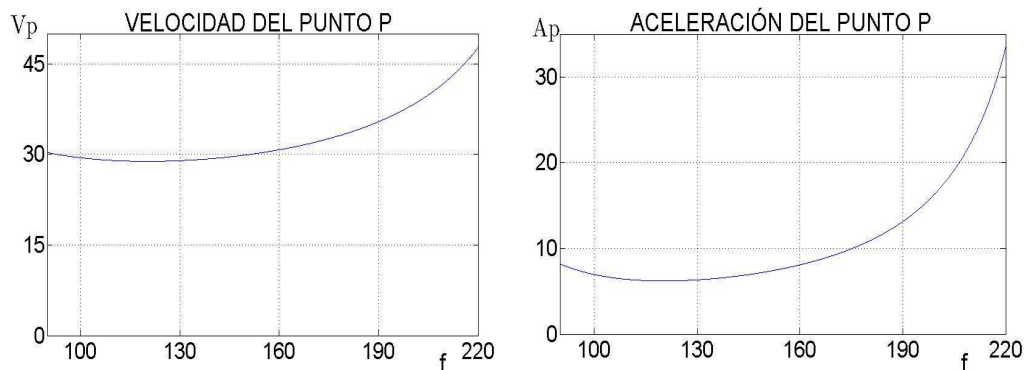


Figura 8. Velocidad y aceleración del punto (1) en función de la variable independiente  $f$

## 6. RESULTADOS CON ACELERACIÓN LINEAL DE CORREDERA

Podemos modelar una aceleración de corredera lineal, partiendo de la posición de sujeción, es decir:

$$\ddot{f} = k t \quad \text{con } f_0 = 219.3 \text{ mm} \quad (17)$$

por lo que debe ser  $k < 0$ .

Para  $k = -1$ , se presentan los resultados de velocidad y aceleración del punto (1) en la Figura 9.

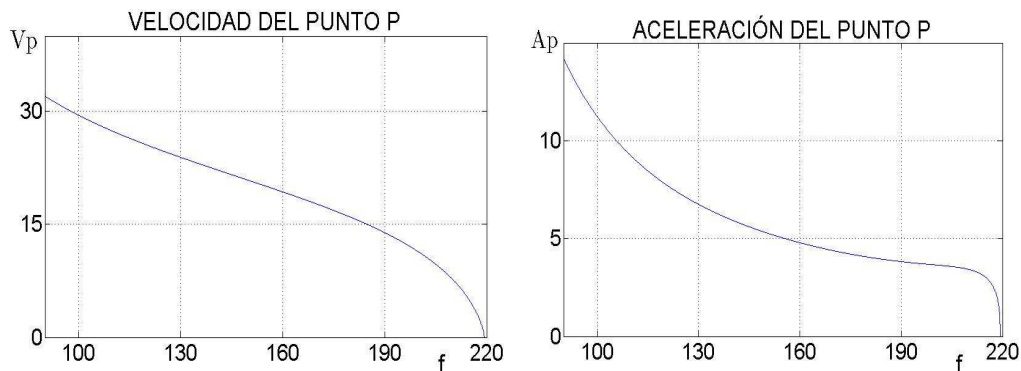


Figura 9. Velocidad y aceleración del punto (1) para aceleración lineal de corredera

## 7. RESULTADOS CON ACELERACIÓN NO-LINEAL DE CORREDERA

Modelamos dos aceleraciones No-Lineales de corredera, para observar las distintas respuestas.

La primera aceleración es:

$$\ddot{f} = -t^2 \quad (18)$$

Con lo cual la velocidad de la corredera evolucionará según la expresión:

$$\dot{f} = -t^3/3 \quad (19)$$

Los resultados de velocidad y aceleración del punto (1), se ilustran en la Figura 10:

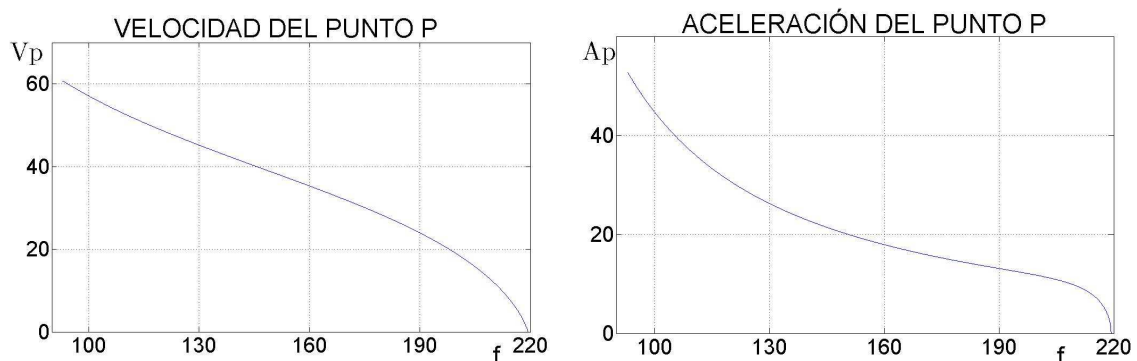


Figura 10. Velocidad y aceleración del punto (1) para aceleración  $-t^2$  de corredera

La segunda aceleración de corredera es:

$$\ddot{f} = -t(t - 0,25) \quad (20)$$

Con lo cual la velocidad de la corredera evolucionará según la expresión:

$$\dot{f} = -t^3/3 + 0,125t^2 + C \quad (21)$$

Donde  $C = v_0$  es la velocidad inicial de la corredera que en nuestro caso es igual a cero.

Los resultados de velocidad y aceleración del punto (1), se ilustran en la Figura 11:

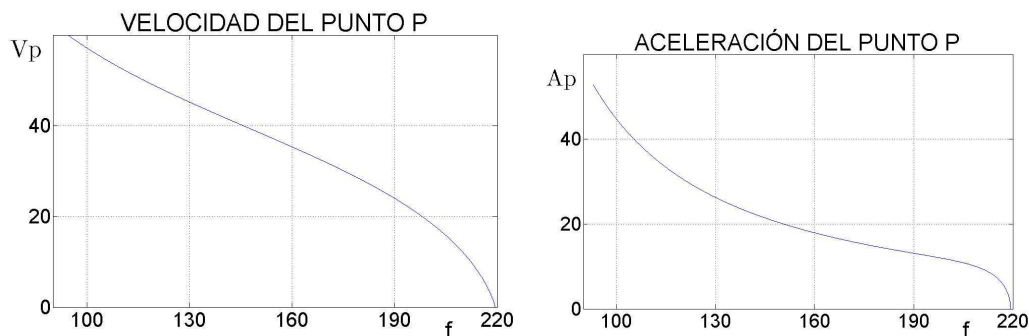


Figura 11. Velocidad y aceleración del punto (1) para aceleración  $-t(t - 0,25)$  de corredera

## 8. CONCLUSIONES

La separación de las mordazas depende solo de la posición de la corredera.

El modelado de la corredera a velocidad constante produce una aceleración excesiva en el punto de contacto por lo que no brinda un buen resultado.

Al plantear una aceleración lineal en la corredera, tal hipótesis es más concordante con la acción que produce un resorte. Vemos que al abrir las mordazas, se parte desde velocidad cero y, si bien la aceleración crece rápidamente, en el momento de apertura ésta es nula, por lo que el elemento sujetado recibirá una perturbación mínima.

Cuando planteamos aceleraciones no-lineales de corredera, observamos que es posible reducir la velocidad de crecimiento de la aceleración, con lo que la apertura puede ser aún más suave.

Se pretende avanzar en la optimización de las variables dimensionales del dispositivo.

## 9. REFERENCIAS

- [1] R. HENDERSON, *The United States Microgravity Science Program*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. – AIAA, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 39th, Reno, NV, (2001).
- [2] V. PLETSER, *Microgravity research during aircraft parabolic flights – The 20 ESA campaigns*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. – AIAA Technical Library – ISSN 0376-4265, no. 82, pp 57-68, (1995).
- [3] H.H. BRITO, *Candidate In-Space Experiment to Test the Electromagnetic Inertia Manipulation Concept*, Space Technology Applications International Forum, 2000 (STAIF-2000) CD-ROM ISBN 1-56396-920-3, Albuquerque NM, (2000).
- [4] F. CAPPELLARI, L. LIFSCHITZ, P. STAFFOLANI, H. BRITO, *Actas del 4to Congreso Nacional, 1er Encuentro Internacional de Profesores e Investigadores del Área de Expresión Gráfica (Egrafía 2004), Modelo paramétrico de un dispositivo de sujeción y liberación para aplicaciones en micro-gravedad*, Rosario, Santa Fe, Argentina, pp 46, I.S.B.N.: 987-43-8229-5, (2004).
- [5] R. NORTON, *Diseño de Maquinaria*, McGraw-Hill, México D.F. ISBN: 970-10-2655-1, (2000).