



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ELÉCTRICA Y ELETRÓNICA CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

**“METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO DEL  
MECANISMO UTILIZADO EN EL SISTEMA DE CIERRE DE UNA  
MÁQUINA INYECTORA TIANJIAN PL 1200, MEDIANTE LA  
APLICACIÓN DE UN MÉTODO NUMÉRICO”**

**AUTOR: SACOTTO RUBIO EDWIN SANTIAGO**

**ING. DIRECTOR: ING. MANJARRÉS ARIAS, FELIX JAVIER M. Sc  
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**



# CONTENIDO

Planteamiento del problema

Justificación

Objetivos

Mecanismo perteneciente al sistema de cierre de la máquina inyectora tianjian PL1200

Métodos numéricos

Metodología análisis cinemático

Metodología análisis cinético

Análisis de resultados

Conclusiones

Recomendaciones



# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desventajas de las diferentes metodologías: El tiempo requerido para hacer alguna modificación durante el diseño de un mecanismo de acuerdo a una necesidad específica. Precisión de los resultados depende de la habilidad de dibujo o cálculo de la persona a cargo.

El análisis dinámico de mecanismos con lleva a la resolución de sistemas de ecuaciones no lineales, los cuales tienden a ser matemáticamente complejos.

**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DINÁMICO DEL MECANISMO UTILIZADO EN EL SISTEMA DE CIERRE DE UNA MÁQUINA INYECTORA TIANJIAN PL 1200, MEDIANTE LA APLICACIÓN DE UN MÉTODO NUMÉRICO**

Diseños de mecanismos ineficaces e ineficientes aumentan los riesgos de daño en maquinas, por ende aumenta costos de producción y mantenimiento.

Establecer velocidades de arranque, aceleraciones, desaceleraciones, fuerza de cierre, protección y extracción del molde son parámetros que influyen en la calidad de la pieza, desempeño del ciclo y costo de operación.



# JUSTIFICACIÓN

- El presente proyecto pretende determinar un método alternativo para el análisis dinámico de mecanismos planos, en este caso aplicado al sistema de cierre de una maquina inyectora de plástico, utilizando un método numérico que permita obtener resultados eficientes. Es importante recalcar que el uso de los métodos numéricos no es el de mayor aplicación debido a su complejidad, pero provee ventajas como: la modificación rápida de parámetros (variables), en el mecanismo (sistema no lineal), para un posible rediseño en base a necesidades específicas.



# OBJETIVOS

## Objetivo General:

- Generar una metodología para el análisis dinámico del mecanismo del sistema de cierre en una máquina inyectora TIANJIAN PL 1200.

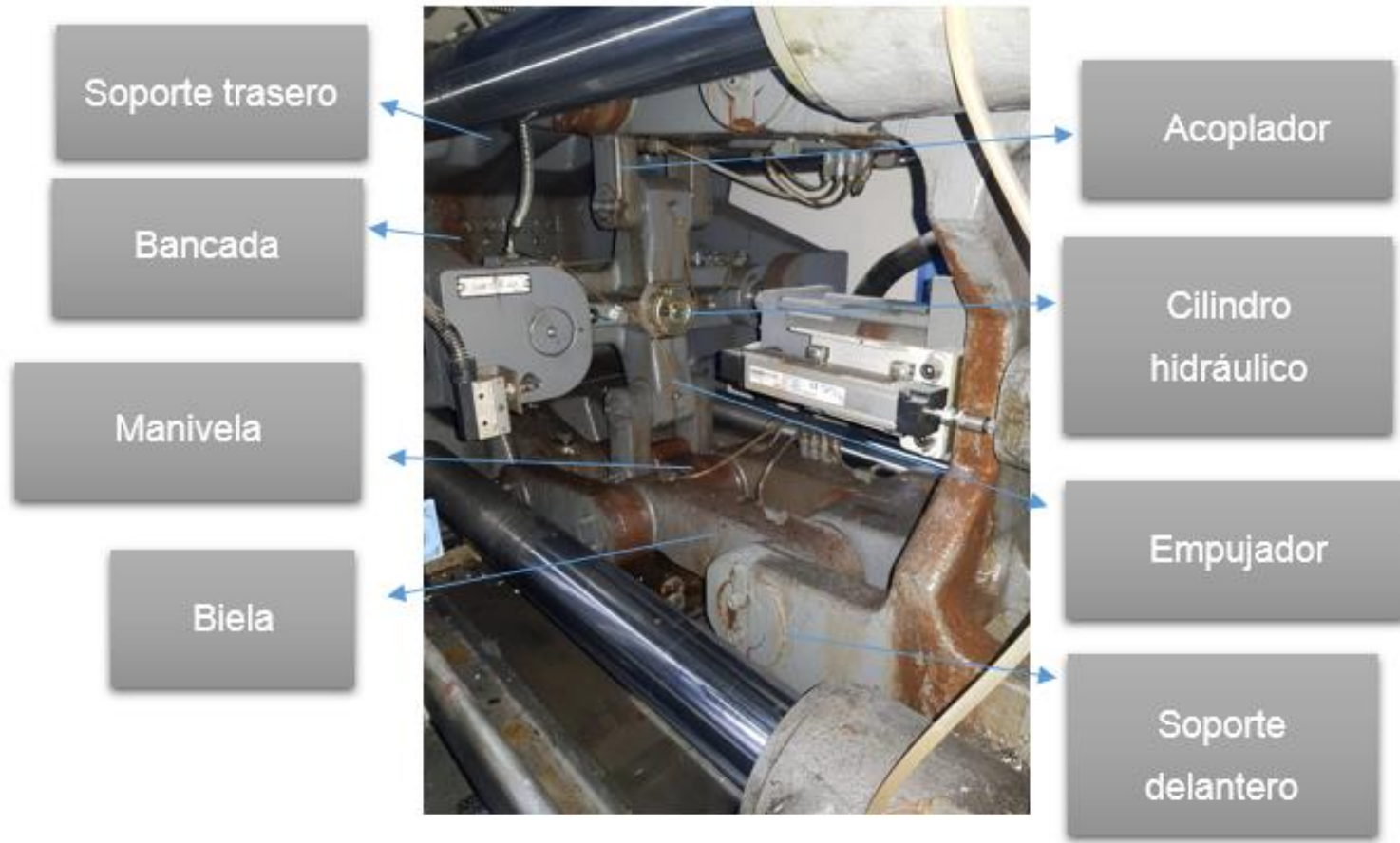


## *Objetivos Específicos:*

- Determinar el método numérico adecuado para la resolución de las ecuaciones no lineales del sistema.
- Realizar una programación en el software MATLAB, que disponga de una interfaz amigable con el usuario (GUI) con el fin de implementar la metodología de análisis dinámico.
- Comparar los resultados de la metodología del presente proyecto, con los resultados del software ANSYS (estudio CAE), para su validación.



# MECANISMO PERTENECIENTE AL SISTEMA DE CIERRE DE LA MÁQUINA INYECTORA TIANJIAN PL1200

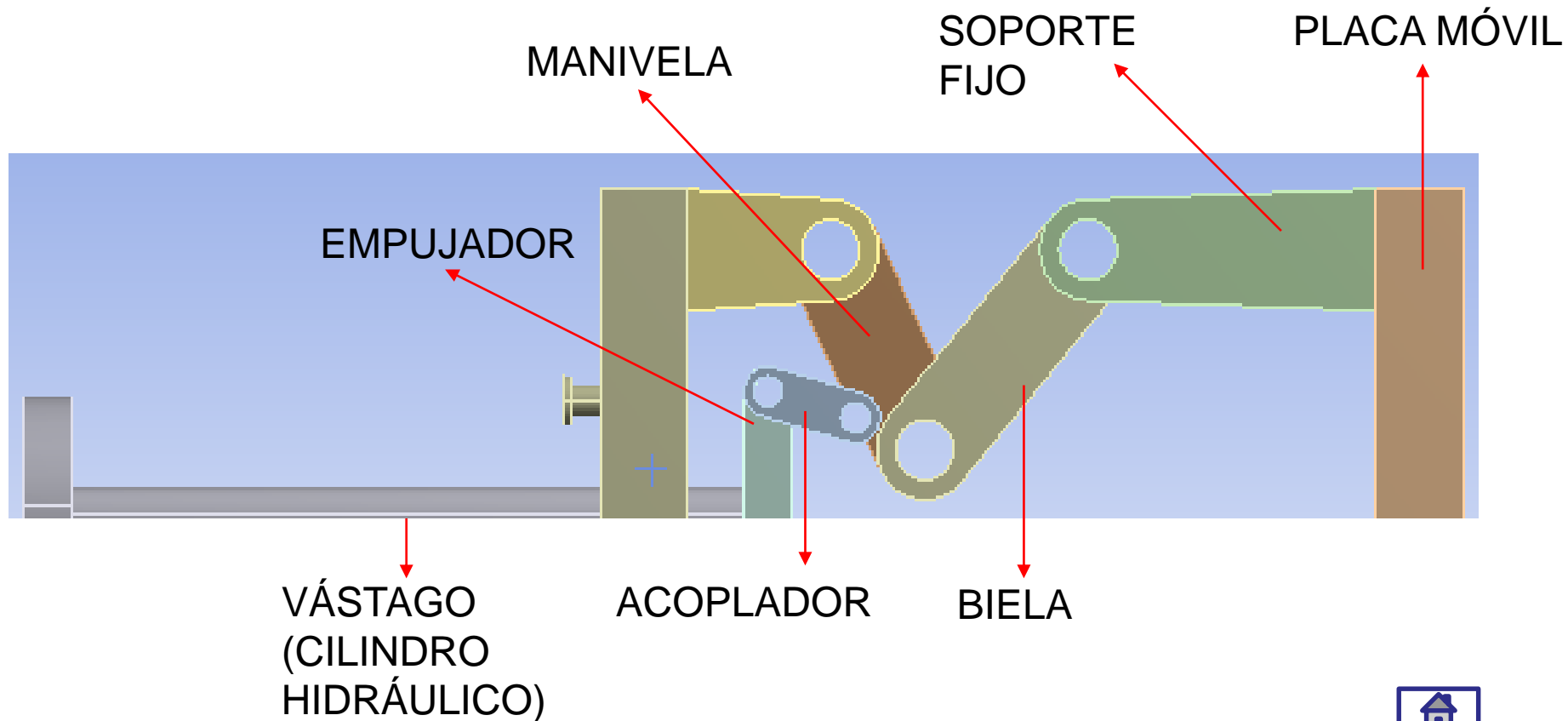


- El sistema de cierre está conformado por dos mecanismos simétricos, por lo tanto el mecanismo para el cual se desarrollará la metodología a lo largo de este proyecto de titulación es el conformado por un solo grupo de rodillas.

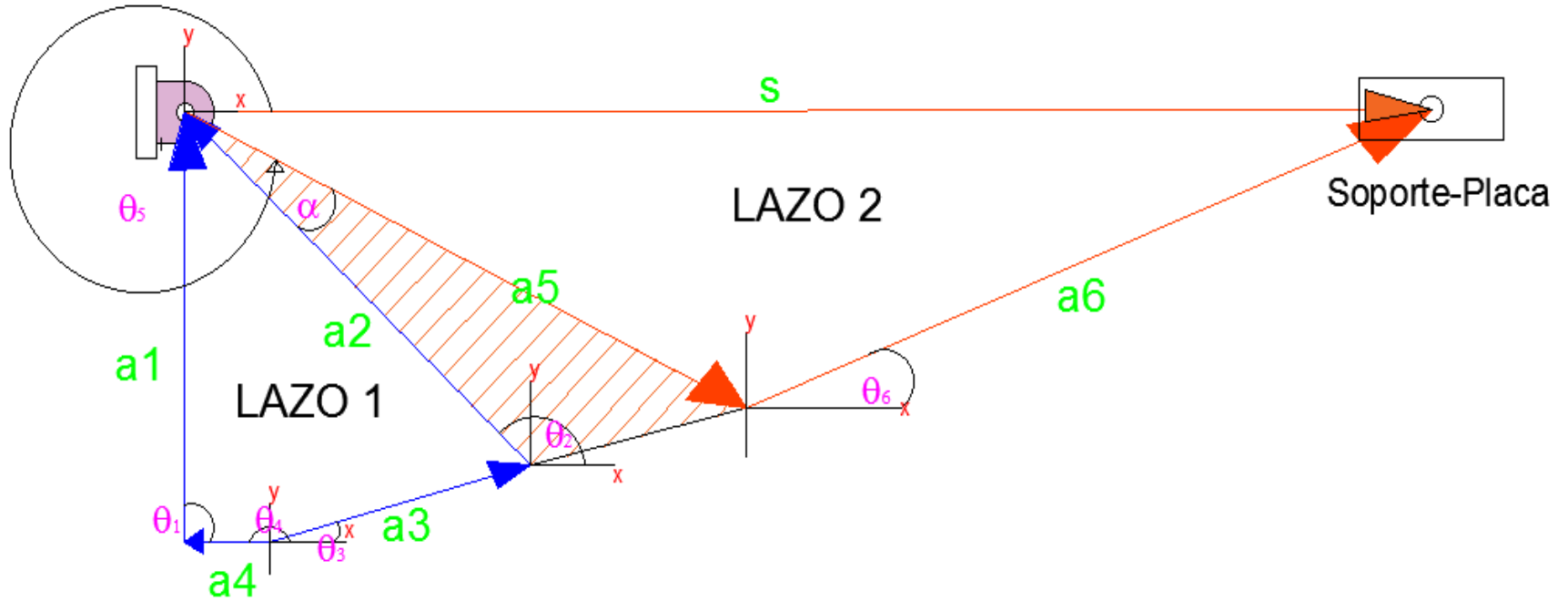




# Modelo CAD



# Representación vectorial del mecanismo



El lazo 1 se identifica como un mecanismo de cuatro barras conformado por los vectores  $\vec{a1}, \vec{a2}, \vec{a3}, \vec{a4}$  donde:

- $\vec{a1}$ : Es el vector que representa la bancada del mecanismo.
- $\vec{a2}$ : Es el vector conducido que representa al eslabón manivela en el lazo 1.
- $\vec{a3}$ : Es el vector que representa al eslabón acoplador.
- $\vec{a4}$ : Es el vector posición del conjunto empujador-cilindro, que conforman un solo eslabón que en este proyecto se denomina impulsor, con respecto a la bancada.

En el lazo 2 se puede observar un mecanismo biela-manivela-corredera conformado por los vectores  $\vec{a5}, \vec{a6}, \vec{s}$  donde:

- $\vec{a5}$ : Es el vector que representa al eslabón manivela en el lazo 2.
- $\vec{a6}$ : Es el vector que representa al eslabón biela.
- $\vec{s}$ : Es el vector que representa la posición del conjunto soporte-placa móvil con respecto a la bancada.



# ECUACIONES DE CIERRE

Lazo 1

$$\vec{a}_2 + \vec{a}_3 = \vec{a}_1 + \vec{a}_4$$

Lazo 2

$$\vec{a}_5 + \vec{a}_6 = \vec{s}$$



Las ecuaciones escalares que representan las componentes en los ejes  $x$  y  $y$  de las ecuaciones vectoriales están dadas por:

Lazo 1

$$a_2 \cos(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_3) = a_1 \cos(\theta_1) + a_4 \cos(\theta_4)$$

$$a_2 \sin(\theta_2) + a_3 \sin(\theta_3) = a_1 \sin(\theta_1) + a_4 \sin(\theta_4)$$

Lazo 2

$$a_5 \cos(\theta_5) + a_6 \cos(\theta_6) = s$$

$$a_5 \sin(\theta_5) + a_6 \sin(\theta_6) = 0$$

Siendo  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3, \vec{a}_4, \vec{a}_5, \vec{a}_6, \theta_1, \theta_4$  los parámetros de entrada para del mecanismo. Las variables  $\theta_2, \theta_3, \theta_6$  y el vector posición  $\vec{s}$  son las incógnitas de posición a encontrar para poder describir por completo el sistema. El ángulo de posición del vector  $\vec{a}_5$  se obtiene realizando operaciones de geometría plana básica, donde  $\theta_5 = \theta_2 + \alpha + \pi$ .



## Funciones de variable vectorial

$$\begin{aligned} f_1 \left( \begin{array}{c} \vec{x} \\ \vec{x} \\ \vec{x} \end{array} \right) &= a_2 \cos(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_3) - a_1 \cos(\theta_1) - a_4 \cos(\theta_4) = 0 \\ f_2 \left( \begin{array}{c} \vec{x} \\ \vec{x} \\ \vec{x} \end{array} \right) &= a_2 \sin(\theta_2) + a_3 \sin(\theta_3) - a_1 \sin(\theta_1) - a_4 \sin(\theta_4) = 0 \\ f_3 \left( \begin{array}{c} \vec{x} \\ \vec{x} \\ \vec{x} \end{array} \right) &= a_5 \cos(\theta_5) + a_6 \cos(\theta_6) - s \\ f_4 \left( \begin{array}{c} \vec{x} \\ \vec{x} \\ \vec{x} \end{array} \right) &= a_5 \sin(\theta_5) + a_6 \sin(\theta_6) \end{aligned}$$

Donde  $\vec{x} = (\theta_2, \theta_3, \theta_6, \vec{s})$

## Función vectorial de variable vectorial

$$\vec{f}(\vec{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\vec{x}) \\ f_2(\vec{x}) \\ f_3(\vec{x}) \\ f_4(\vec{x}) \end{bmatrix}$$

Donde  $\vec{x} = (\theta_2, \theta_3, \theta_6, \vec{s})$

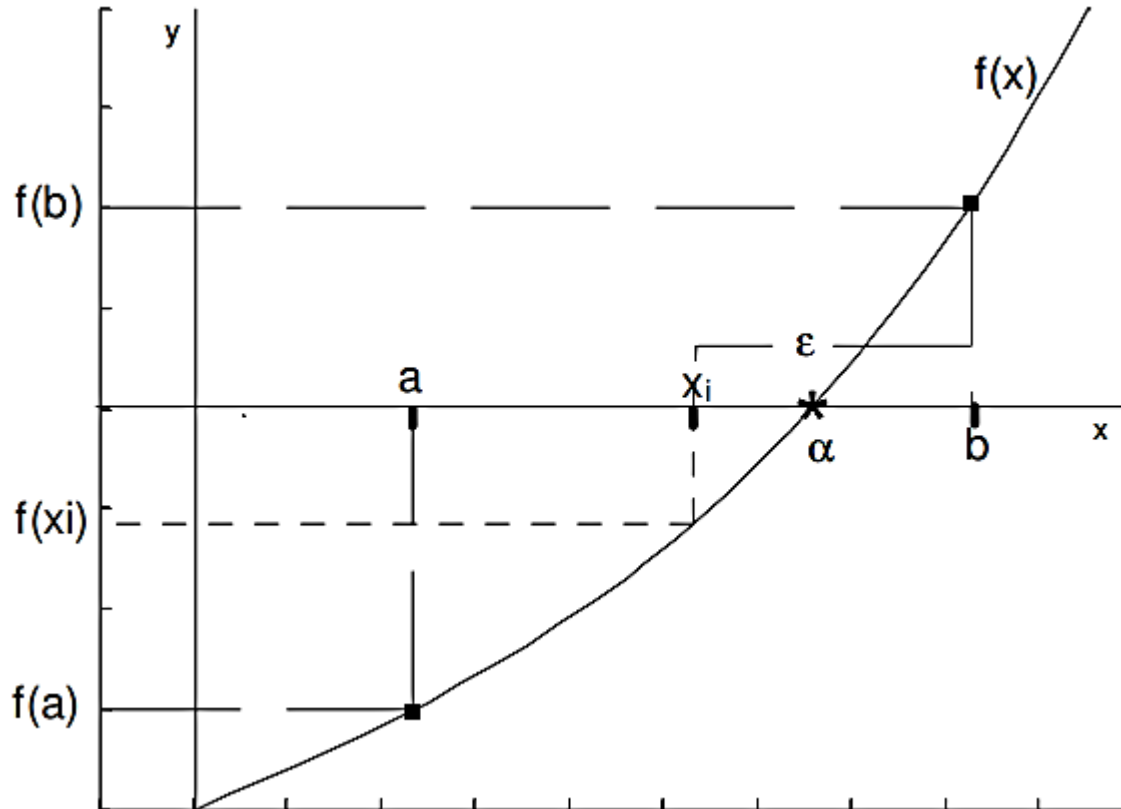
# ***MÉTODOS NUMÉRICOS PARA RESOLUCIÓN DE ECUACIONES NO LINEALES***

- 1. MÉTODO DE BISECCIÓN**
- 2. MÉTODO DE REGULA FALSI**
- 3. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON**





# MÉTODO BISECCIÓN



*Nuevo limite*

$$\frac{a + b}{2} = x_i$$

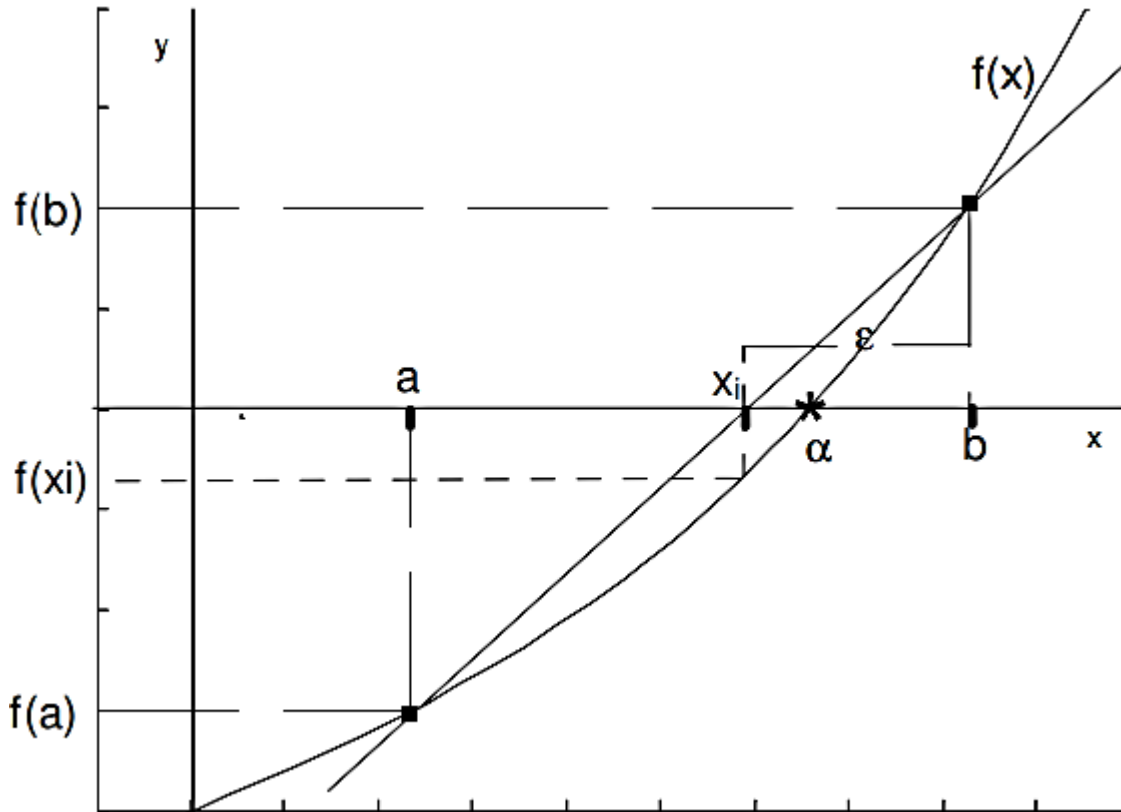
*Cambio de limite*

$$f(a)f(b) < 0$$

Limite superior



# MÉTODO REGULA-FALSI



*Nuevo limite*

$$\frac{y - f(a)}{f(b) - f(a)} = \frac{x - a}{b - a}$$

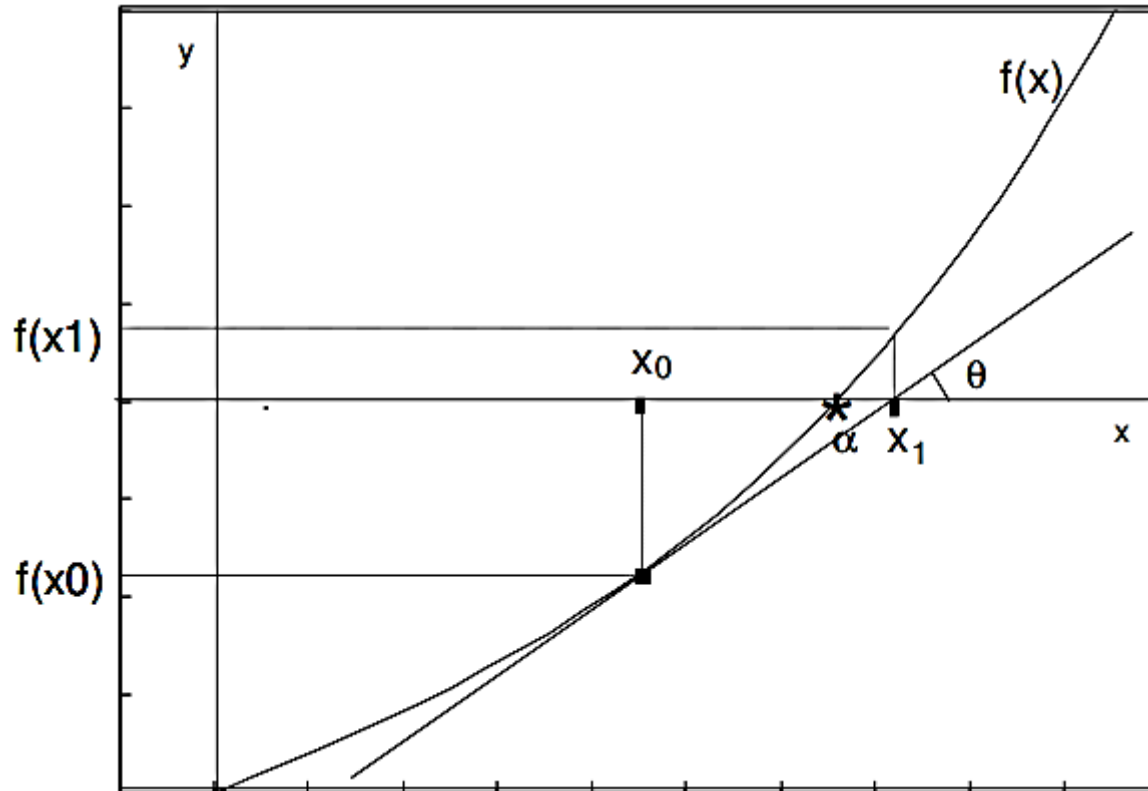
*Cambio de limite*

$$f(a)f(b) < 0$$

Limite superior



# MÉTODO NEWTON-RAPHSON



*Ecuación recta tangente*

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

*Criterio finalización*

$$\left| \vec{x}_{n+1} - \vec{x}_n \right| \leq \epsilon$$



Método	Ventajas	Desventajas
Bisección	<ul style="list-style-type: none"> <li>El error se acota fácilmente</li> <li>Siempre converge.</li> <li>Es conveniente para delimitar el intervalo en el cual está la raíz.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>No tiene en cuenta la magnitud de los valores de la función en las aproximaciones calculadas, lo que hace que aproximaciones intermedias pasen desapercibidas.</li> <li>Su convergencia es muy lenta.</li> </ul>
Regula Falsi	<ul style="list-style-type: none"> <li>Los mismos que la bisección.</li> <li>Converge más rápido que la bisección.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La longitud del sub-intervalo en el que se encuentra la raíz en general no tiende a cero, lo que hace que solo uno de los extremos se aproxime a la raíz, evitando aproximaciones intermedias que pueden surgir en aproximaciones desde el otro extremo.</li> <li>No se puede prever el número de iteraciones</li> </ul>
Newton-Raphson	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se necesita de un solo valor inicial.</li> <li>El método converge cuadráticamente para raíces simples y linealmente para raíces múltiples.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es necesario calcular la derivada de la función</li> <li>Nos e puede prever el número de iteraciones.</li> <li>La convergencia no es asegurada si el valor inicial está muy alejado de la raíz</li> </ul>



- Es el método que converge más rápido, esto se traduce en una menor cantidad de iteraciones lo cual produce una mayor velocidad en el análisis y una reducción en el uso de recursos de un computador.
- La metodología tiene que ser efectiva, por lo tanto no se puede obviar ninguna raíz, lo cual no es garantizado por los otros métodos.
- El cálculo de la derivada de la función no es una desventaja en este caso, pues para la resolución de las velocidades de los eslabones es necesario encontrar dicha derivada.
- Debido que se necesita encontrar la posición de los eslabones en intervalos específicos, resulta mucho más conveniente el necesitar de un solo valor inicial para comenzar las iteraciones a comparación de tener que encontrar un rango, en otras palabras dos valores iniciales, en el cual se encuentre cada posición (raíz).



# METODOLOGÍA DE ANÁLISIS CINEMÁTICO

## ***APROXIMACIÓN LINEAL DE UNA FUNCIÓN DE VARIABLE VECTORIAL***

De acuerdo a Rico (2013), la aproximación mediante series de Taylor de una función real de variable vectorial  $f(\vec{x})$  en un punto  $\vec{x}$  cercano a  $\vec{x}_0$  es la siguiente:

$$\begin{aligned} f(\vec{x}) \approx & a_0 + b_1(x_1 - x_{0-1}) + b_2(x_2 - x_{0-2}) + \dots + b_n(x_n - x_{n-0}) + \\ & c_{11}(x_1 - x_{0-1})^2 + c_{12}(x_1 - x_{0-1})(x_2 - x_{0-2}) + \dots + c_{1n}(x_1 - x_{0-1})(x_n - x_{0-n}) + \\ & c_{21}(x_2 - x_{0-2})(x_1 - x_{0-1}) + c_{22}(x_2 - x_{0-2})^2 + \dots + c_{2n}(x_2 - x_{0-2})(x_n - x_{0-n}) + \dots \\ & c_{n1}(x_n - x_{0-n})(x_1 - x_{0-1}) + c_{n2}(x_n - x_{0-n})(x_2 - x_{0-2}) + \dots + c_{nn}(x_n - x_{0-n})^2 + \dots \end{aligned}$$



- La aproximación lineal se completa al determinar los coeficientes  $a_0, b_1, \dots, b_n$ ; para determinar los coeficientes se realizan los siguientes pasos:
- El coeficiente  $a_0$  se determina sustituyendo  $\vec{x} = \vec{x}_0$  e

$$f(\vec{x}_0) = a_0 + b_1(x_{0-1} - x_{0-1}) + b_2(x_{0-2} - x_{0-2}) + \dots + b_n(x_{n-0} - x_{n-0}) = a_0$$

- El coeficiente  $b_i$  se determina derivando la aproximación respecto a  $x_i$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} f(\vec{x}) = b_i + \dots$$



- Sustituyendo  $\vec{x} = \vec{x}_0$  en la aproximación lineal anterior

$$\frac{\partial}{\partial x_i} f(\vec{x}_0) = b_i$$

- La aproximación lineal de  $f(\vec{x})$  se representa

$$f(\vec{x}) = f(\vec{x}_0) + \frac{\partial}{\partial x_1} f(\vec{x}_0) (x_1 - x_{0-1}) + \frac{\partial}{\partial x_2} f(\vec{x}_0) (x_2 - x_{0-2}) + \dots + \frac{\partial}{\partial x_n} f(\vec{x}_0) (x_n - x_{n-0})$$

$$f(\vec{x}) = f(\vec{x}_0) + \nabla f(\vec{x}_0)^T (\vec{x} - \vec{x}_0)$$





# APROXIMACIÓN LINEAL DE UNA FUNCIÓN VECTORIAL DE VARIABLE VECTORIAL

$$\vec{f}(\vec{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\vec{x}) \\ f_2(\vec{x}) \\ \vdots \\ f_n(\vec{x}) \end{bmatrix}$$

$$\vec{f}(\vec{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\vec{x}_0) + \nabla f_1(\vec{x}_0)^T (\vec{x} - \vec{x}_0) \\ f_2(\vec{x}_0) + \nabla f_2(\vec{x}_0)^T (\vec{x} - \vec{x}_0) \\ \vdots \\ f_n(\vec{x}_0) + \nabla f_n(\vec{x}_0)^T (\vec{x} - \vec{x}_0) \end{bmatrix}$$



$$\vec{f}(\vec{x}) = \vec{f}(\vec{x}_0) + \begin{bmatrix} \nabla f_1(\vec{x}_0)^T \\ \nabla f_2(\vec{x}_0)^T \\ \vdots \\ \nabla f_n(\vec{x}_0)^T \end{bmatrix} (\vec{x} - \vec{x}_0)$$

En este punto, la matriz de gradientes de las n funciones reales que componen a la función vectorial se identifica como la matriz jacobiana del sistema, que en su forma extendida se expresa de la siguiente manera:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} f_1(\vec{x}_0) & \frac{\partial}{\partial x_2} f_1(\vec{x}_0) & \cdots & \frac{\partial}{\partial x_n} f_1(\vec{x}_0) \\ \frac{\partial}{\partial x_1} f_2(\vec{x}_0) & \frac{\partial}{\partial x_2} f_2(\vec{x}_0) & \cdots & \frac{\partial}{\partial x_n} f_2(\vec{x}_0) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_1} f_n(\vec{x}_0) & \frac{\partial}{\partial x_2} f_n(\vec{x}_0) & \cdots & \frac{\partial}{\partial x_n} f_n(\vec{x}_0) \end{bmatrix}$$



## ***APROXIMACIÓN LINEAL DE UNA FUNCIÓN VECTORIAL DE VARIABLE VECTORIAL***

$$\vec{f}(\vec{x}) = \vec{f}(\vec{x}_0) + J(\vec{x}_0)(\vec{x} - \vec{x}_0)$$



## RESOLUCIÓN DE FUNCIÓN VECTORIAL DE VARIABLE VECTORIAL

$$\vec{f}(\vec{x}) = 0$$

$$0 = \vec{f}(\vec{x}_0) + J(\vec{x}_0)(\vec{x} - \vec{x}_0)$$

$$\vec{x} = \vec{x}_0 + J(\vec{x}_0)^{-1}[-\vec{f}(\vec{x}_0)]$$



Generalizando el método de Newton-Raphson para la resolución de una función vectorial de variable vectorial se obtiene:

$$\vec{x}_{n+1} = \vec{x}_n + J(\vec{x}_n)^{-1} \left[ -\vec{f}(\vec{x}_n) \right]$$

$$J = \begin{bmatrix} -a_2 \sin(\theta_2) & -a_3 \sin(\theta_3) & 0 & 0 \\ a_2 \cos(\theta_2) & a_3 \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ -a_5 \sin(\theta_2 + \alpha + \pi) & 0 & -a_6 \sin(\theta_6) & 1 \\ a_5 \cos(\theta_2 + \alpha + \pi) & 0 & a_6 \cos(\theta_6) & 0 \end{bmatrix}$$

El criterio de finalización se representa

$$\left| \vec{x}_{n+1} - \vec{x}_n \right| \leq \epsilon$$



# ANÁLISIS DE POSICIÓN

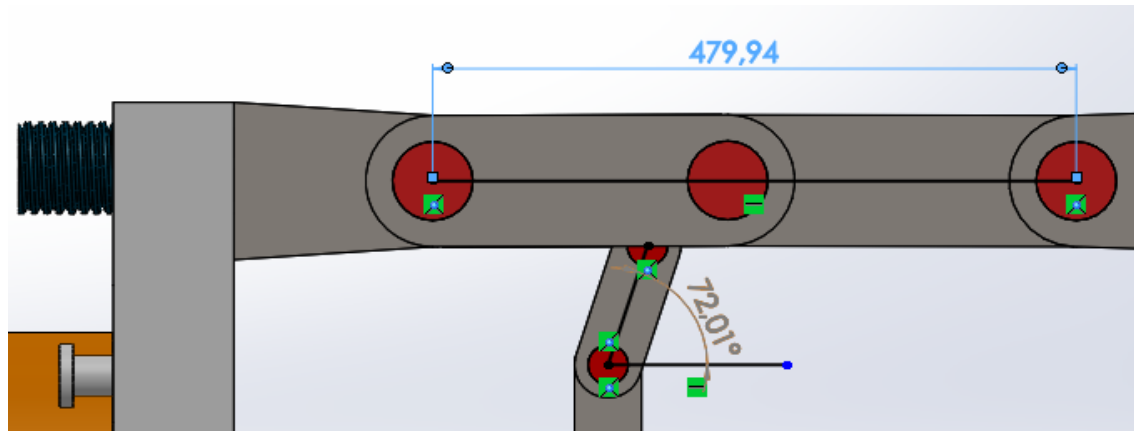
Se ha implementado, en un programa de MATLAB, el proceso iterativo que utiliza el método de Newton-Raphson para la resolución del problema de posición. Para ello, los parámetros del mecanismo son los siguientes:

- Bancada:  $a_1 = 140 \text{ mm}$
- Conducido:  $a_2 = 167.63 \text{ mm}$
- Acoplador:  $a_3 = 95 \text{ mm}$
- Recorrido del impulsor:  $a_4 = (-60, \dots, 190) \text{ mm}$
- Manivela:  $a_5 = 220 \text{ mm}$
- Biela:  $a_6 = 260 \text{ mm}$
- Ángulo  $\theta_1 = \frac{\pi}{2} \text{ rad}$
- Ángulo  $\theta_4 = \pi \text{ rad}$

- El error permisible dependerá de la magnitud del vector corrección de cada sistema, pero, usualmente al implementar MATLAB como recurso de operación de métodos numéricos, se suelen elegir errores de entre  $1e^{-8}$  y  $1e^{-12}$  esto con el fin de evitar el uso excesivo de recursos en el computador y obtener una cantidad significativa de decimales en las respuestas. (Esfandiari, 2017)
- Para este proyecto se escoge un valor de error de  $1e^{-8}$ .



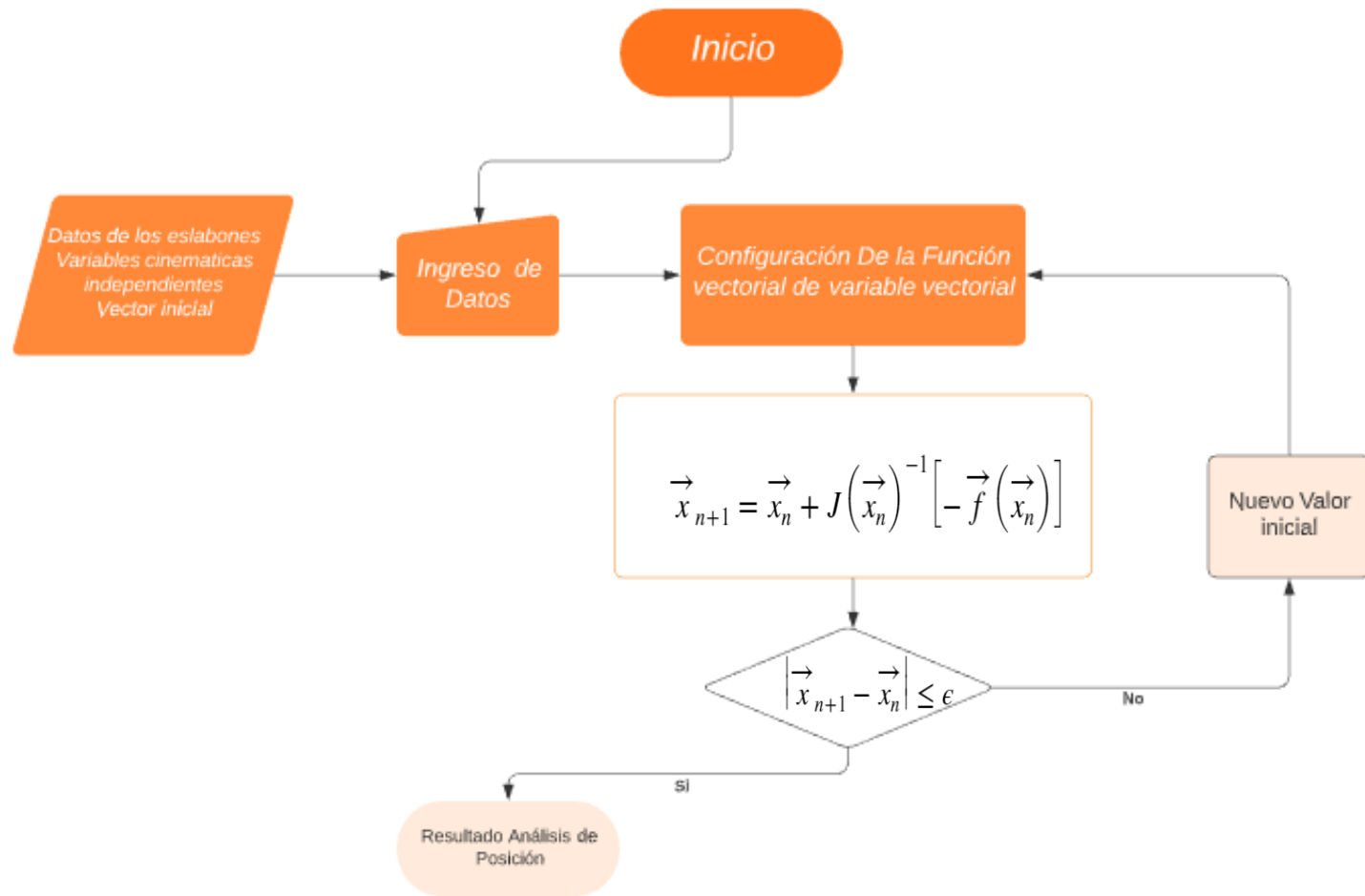
- El vector de aproximación inicial se define como  $\vec{x}_0 = [\theta_{0-2}, \theta_{0-3}, \theta_{0-6}, s_0]$



$$\vec{x}_0 = [30 * \text{pi}/180; \text{pi}; 30 * \text{pi}/180; 480]$$

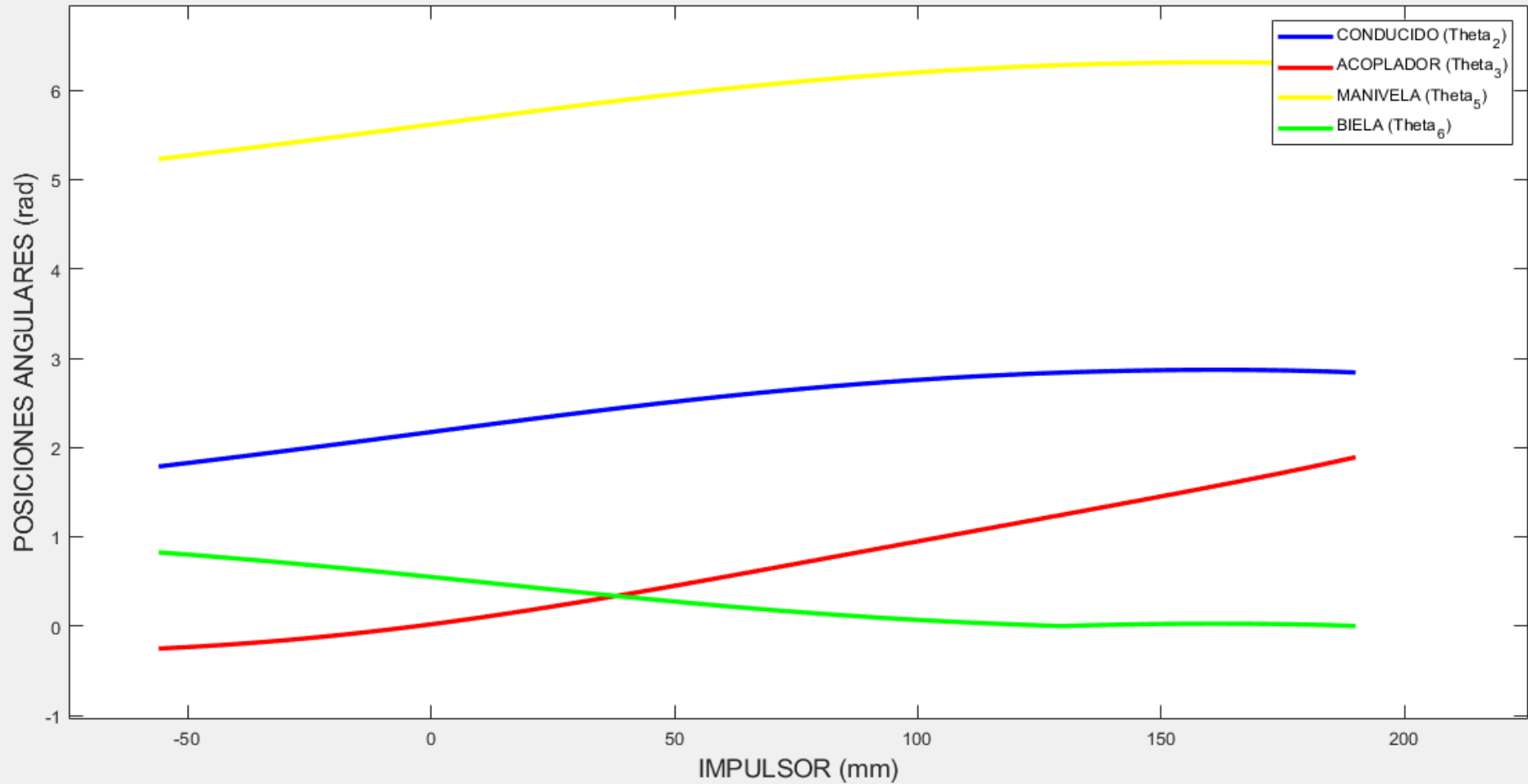




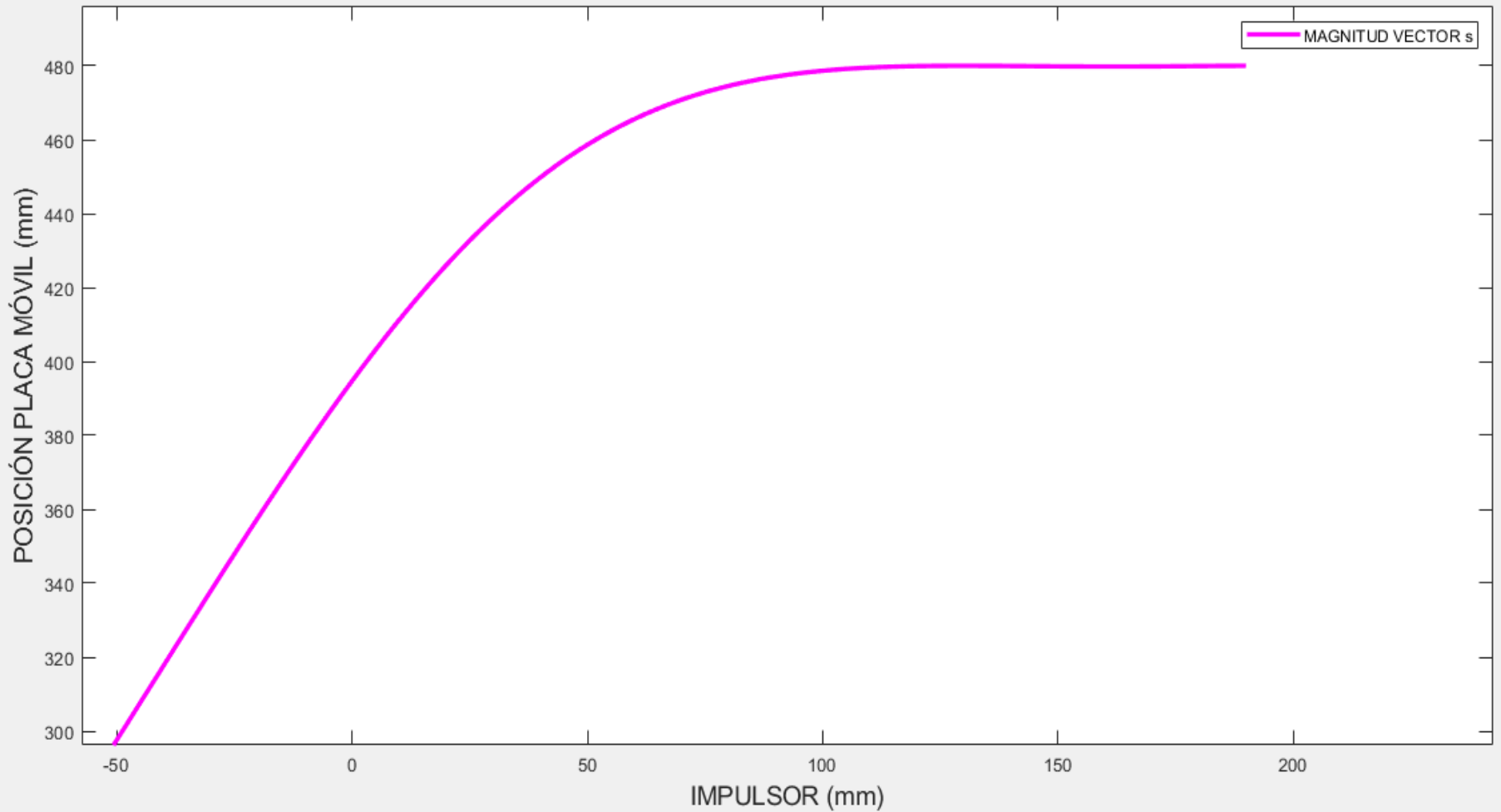


# RESULTADOS ANÁLISIS DE POSICIÓN

## POSICIONES ANGULARES DE LOS ES LABONES VS. IMPULSOR



## POSICIÓN PLACA MÓVIL VS. IMPULSOR



# ANÁLISIS DE VELOCIDAD

$$g_1(\omega_2, \omega_3, \omega_6, v_s) = -a_2 \omega_2 \sin(\theta_2) - a_3 \omega_3 \sin(\theta_3) + a_4 v_4 \sin(\theta_4) = 0$$

$$g_2(\omega_2, \omega_3, \omega_6, v_s) = a_2 \omega_2 \cos(\theta_2) + a_3 \omega_3 \cos(\theta_3) - a_4 v_4 \cos(\theta_4) = 0$$

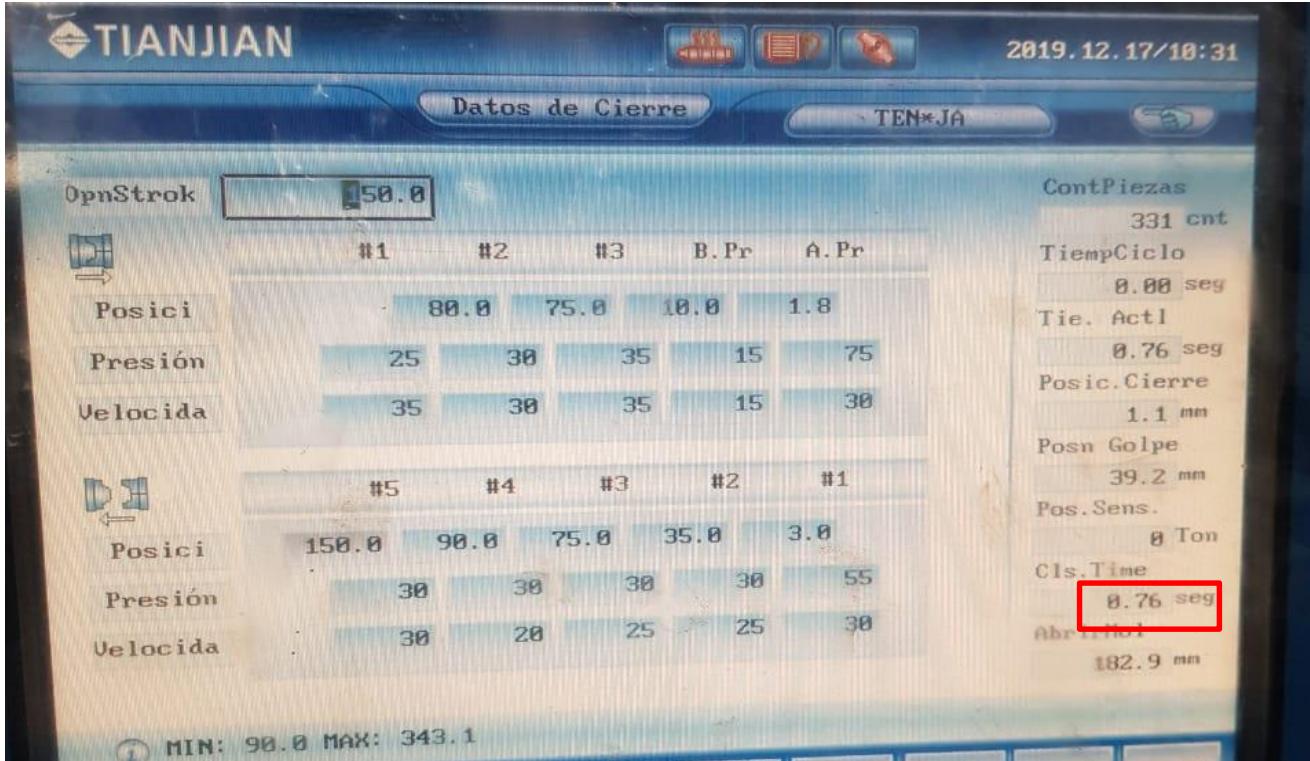
$$g_3(\omega_2, \omega_3, \omega_6, v_s) = -a_5 \omega_5 \sin(\theta_5) - a_6 \omega_6 \sin(\theta_6) - v_s = 0$$

$$g_4(\omega_2, \omega_3, \omega_6, v_s) = a_5 \omega_5 \cos(\theta_5) + a_6 \omega_6 \cos(\theta_6) = 0$$

$$\begin{bmatrix} \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_6 \\ v_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_2 \sin(\theta_2) & -a_3 \sin(\theta_3) & 0 & 0 \\ a_2 \cos(\theta_2) & a_3 \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ -a_5 \sin(\theta_2 + \alpha + \pi) & 0 & -a_6 \sin(\theta_6) & 1 \\ a_5 \cos(\theta_2 + \alpha + \pi) & 0 & a_6 \cos(\theta_6) & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -a_4 v_4 \sin(\theta_4) \\ a_4 v_4 \cos(\theta_4) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$



# Valores iniciales



$$v = \frac{d}{t}$$

$v$ : Es la velocidad de un cuerpo o partícula.

$d$ : Es la distancia recorrida de un cuerpo o partícula.

$t$ : Es la el tiempo en el cual recorrió dicha distancia.

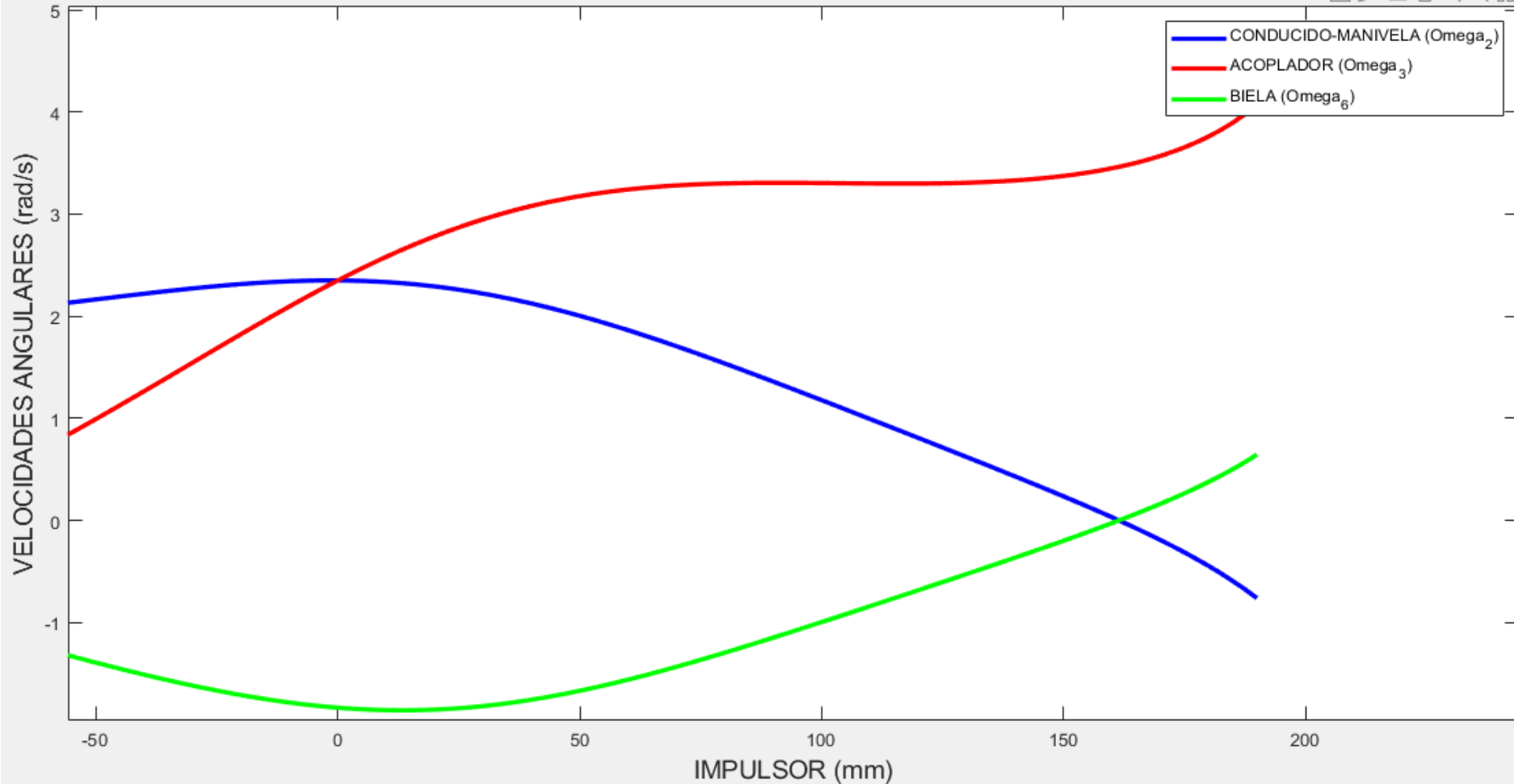
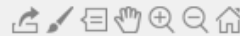
$$v_4 = \frac{250 \text{ mm}}{0.76 \text{ s}}$$

$$v_4 = 328.9474 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

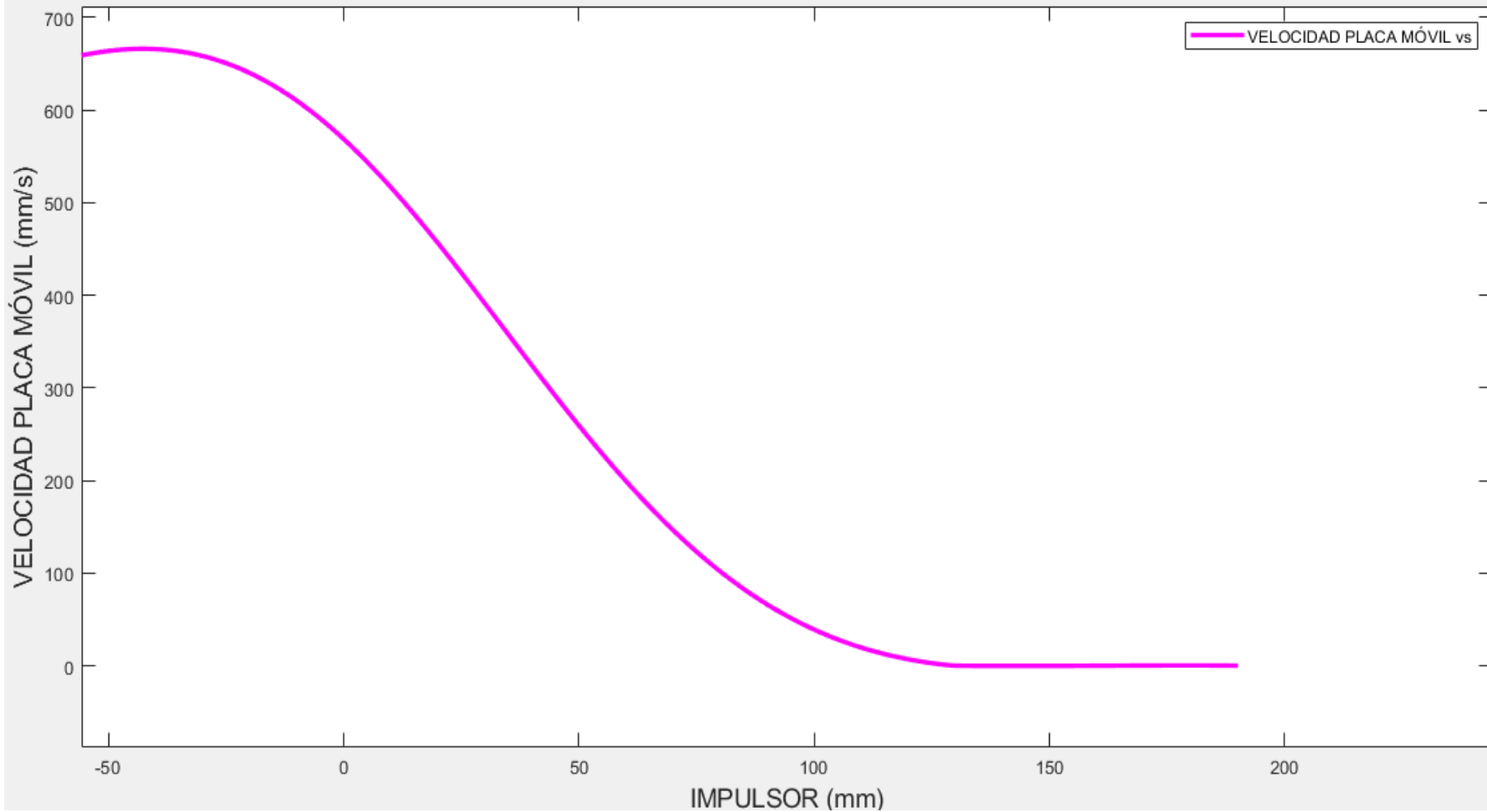


# RESULTADOS ANÁLISIS DE VELOCIDAD

## VELOCIDADES ANGULARES DE LOS ESLABONES VS. IMPULSOR



## VELOCIDAD PLACA MÓVIL VS. IMPULSOR





# ANÁLISIS DE ACELERACIÓN

$$h_1(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_6, \dot{v}_s) = -a_2 \sin(\theta_2) \alpha_2 - a_2 \omega_2^2 \cos(\theta_2) - a_3 \sin(\theta_3) \alpha_3 \\ - a_3 \omega_3^2 \cos(\theta_3) + a_4 \sin(\theta_4) \dot{v}_4 + a_4 v_4^2 \cos(\theta_4) = 0$$

$$h_2(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_6, \dot{v}_s) = a_2 \cos(\theta_2) \alpha_2 - a_2 \omega_2^2 \sin(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_3) \alpha_3 \\ - a_3 \omega_3^2 \sin(\theta_3) - a_4 \cos(\theta_4) \dot{v}_4 + a_4 v_4^2 \sin(\theta_4) = 0$$

$$h_3(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_6, \dot{v}_s) = -a_5 \sin(\theta_5) \alpha_5 - a_5 \omega_5^2 \cos(\theta_5) - a_6 \sin(\theta_6) \alpha_6 \\ - a_6 \omega_6^2 \cos(\theta_6) - \dot{v}_s = 0$$

$$h_4(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_6, \dot{v}_s) = a_5 \cos(\theta_5) \alpha_5 - a_5 \omega_5^2 \sin(\theta_5) + a_6 \cos(\theta_6) \alpha_6 \\ - a_6 \omega_6^2 \sin(\theta_6) = 0$$

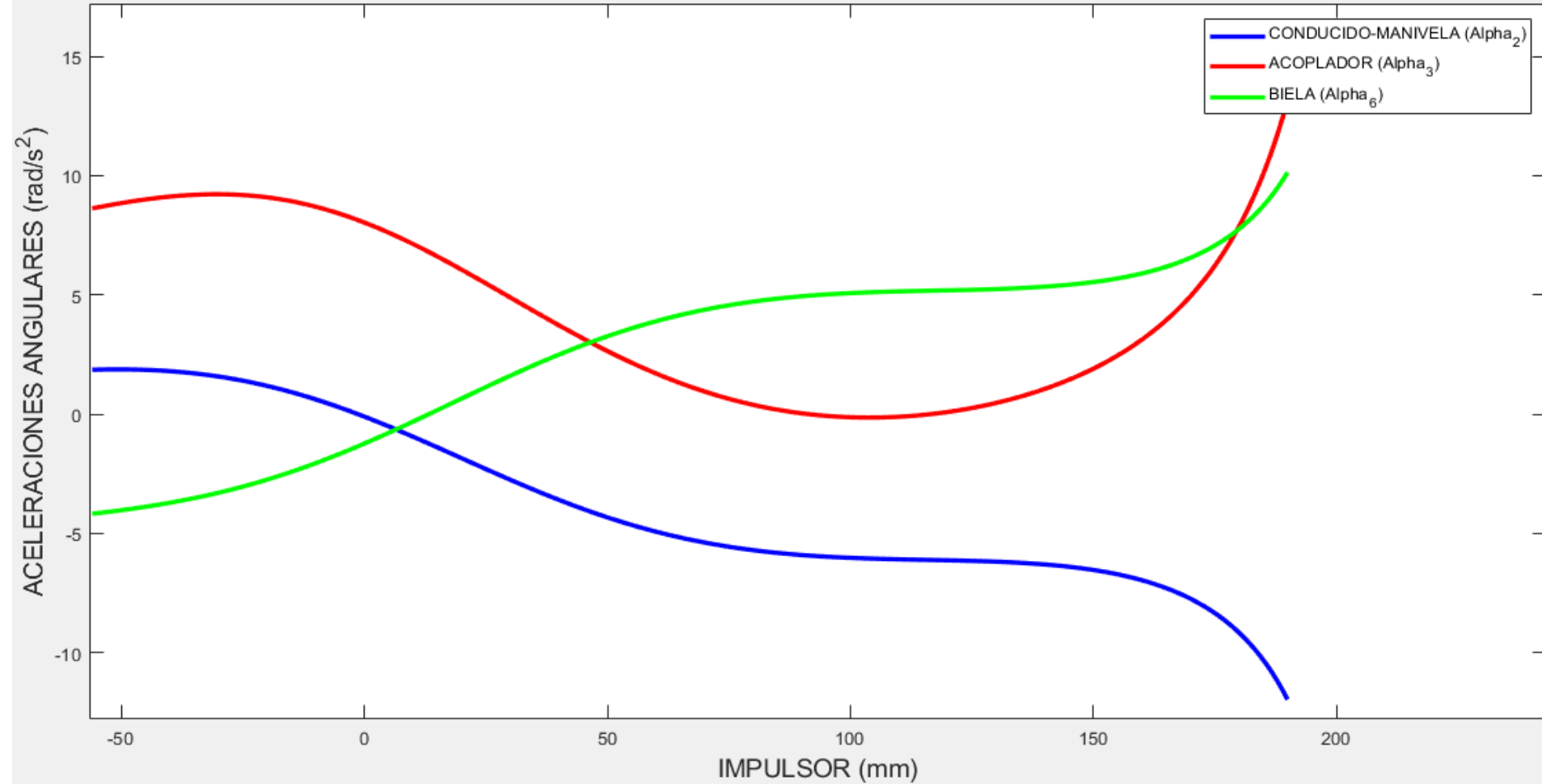
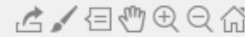
$$\begin{bmatrix} \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_6 \\ \dot{v}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_2 \sin(\theta_2) & -a_3 \sin(\theta_3) & 0 & 0 \\ a_2 \cos(\theta_2) & a_3 \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ -a_5 \sin(\theta_2 + \alpha + \pi) & 0 & -a_6 \sin(\theta_6) & 1 \\ a_5 \cos(\theta_2 + \alpha + \pi) & 0 & a_6 \cos(\theta_6) & 0 \end{bmatrix}^{-1}$$

$$\times \begin{bmatrix} a_2 \omega_2^2 \cos(\theta_2) + a_3 \omega_3^2 \cos(\theta_3) - a_4 v_4^2 \cos(\theta_4) - a_4 \sin(\theta_4) \dot{v}_4 \\ a_2 \omega_2^2 \sin(\theta_2) + a_3 \omega_3^2 \sin(\theta_3) - a_4 v_4^2 \sin(\theta_4) + a_4 \cos(\theta_4) \dot{v}_4 \\ a_5 \omega_2^2 \cos(\theta_2 + \alpha + \pi) + a_6 \omega_6^2 \cos(\theta_6) \\ a_5 \omega_2^2 \sin(\theta_2 + \alpha + \pi) + a_6 \omega_6^2 \sin(\theta_6) \end{bmatrix}$$

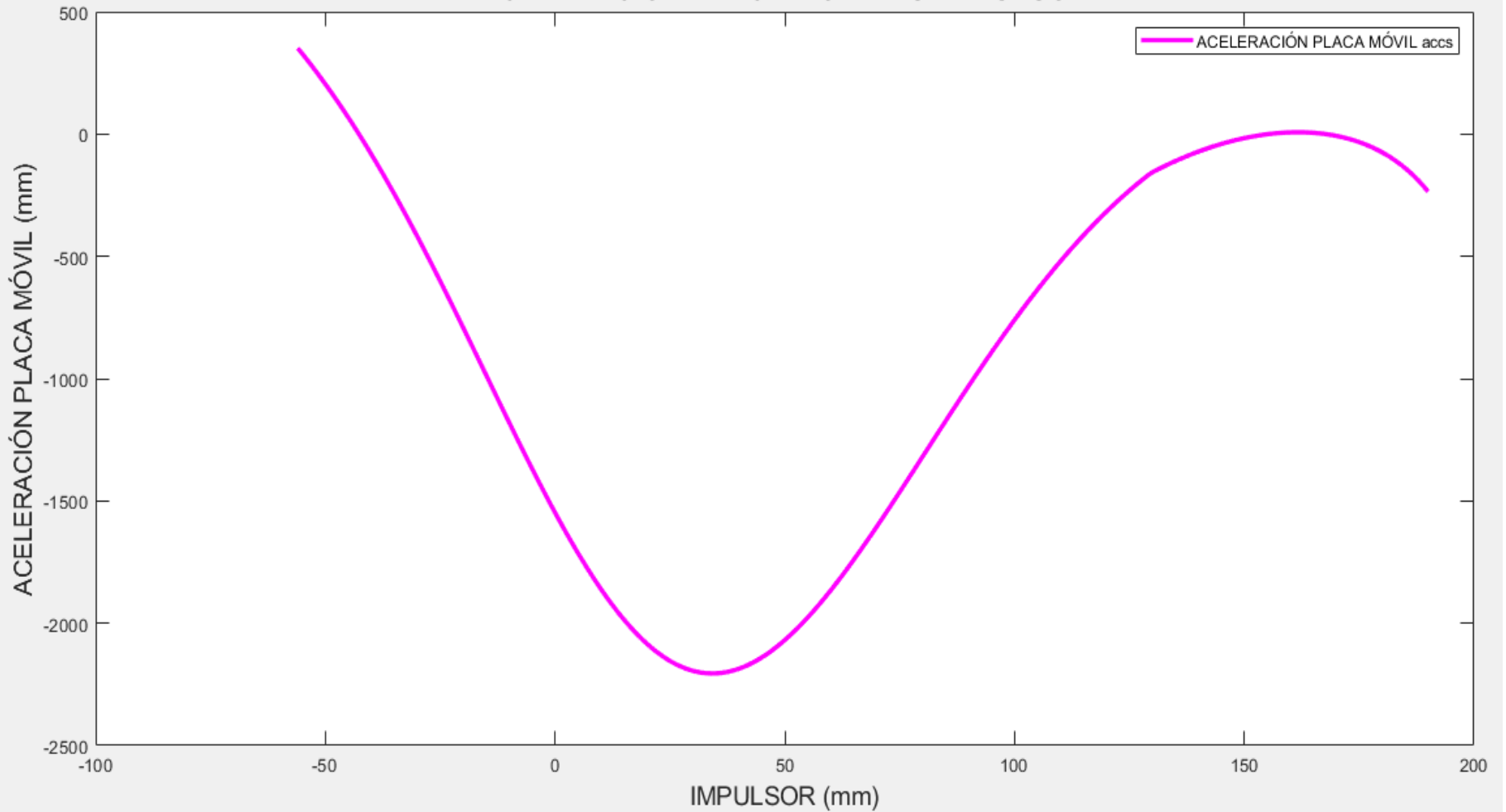


# RESULTADOS ANÁLISIS DE ACELERACIÓN

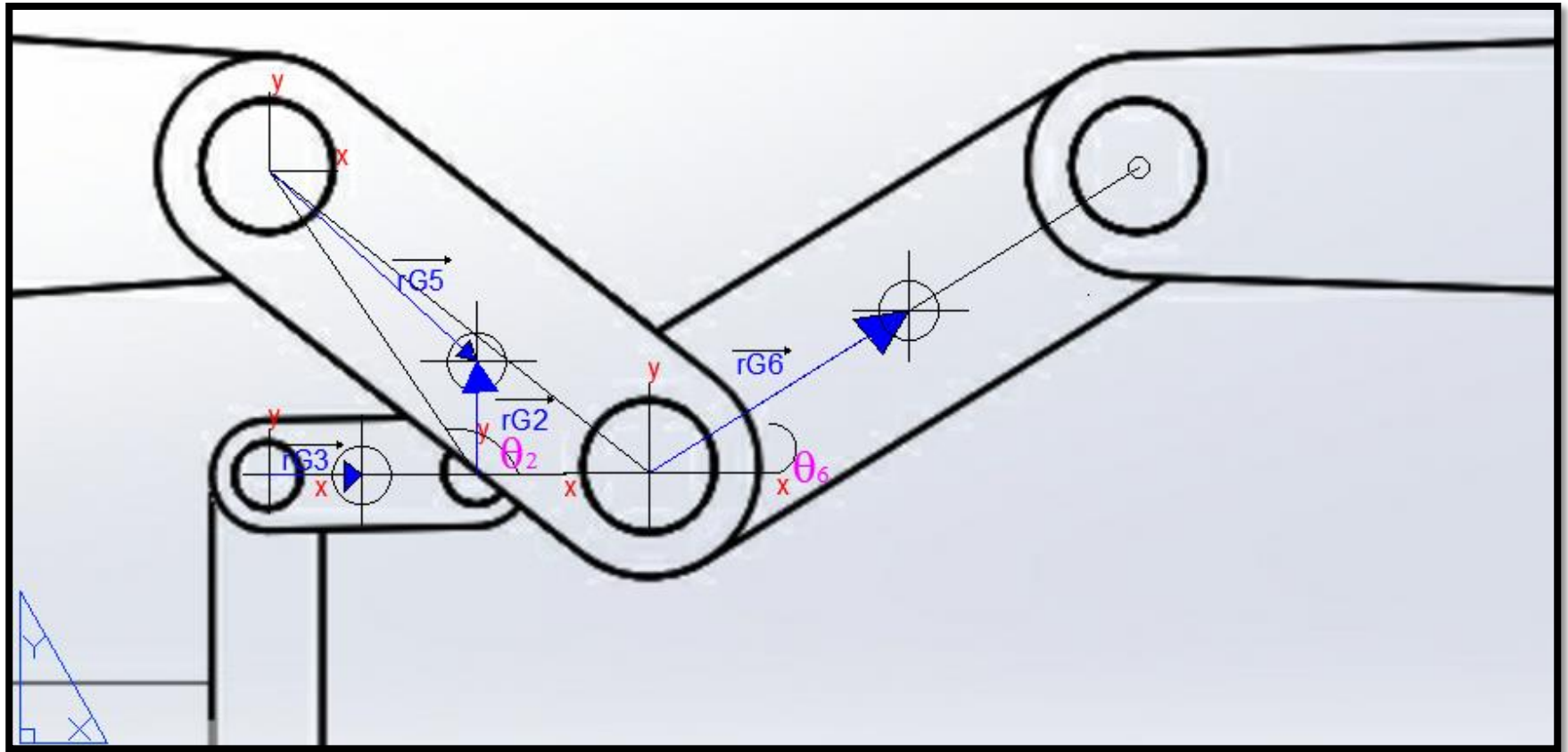
## ACELERACIONES ANGULARES DE LOS ESLABONES VS. IMPULSOR



## ACELERACIÓN PLACA MÓVIL VS. IMPULSOR



# ACELERACIONES DE CENTROS DE MASA



# ECUACIONES

$$\vec{a}_{CG3} = \alpha_3 \times \vec{r}_{G3} - \omega_3^2 \vec{r}_{G3}$$

$$\vec{a}_{CG4} = 0$$

$$\vec{a}_{CG5} = \alpha_5 \times \vec{r}_{G5} - \omega_5^2 \vec{r}_{G5}$$

$$\vec{a}_{CG6} = 2\vec{a}_{CG5} + \alpha_6 \times \vec{r}_{G6} - \omega_6^2 \vec{r}_{G6}$$

$$\vec{a}_{CGs} = \dot{v}_s$$



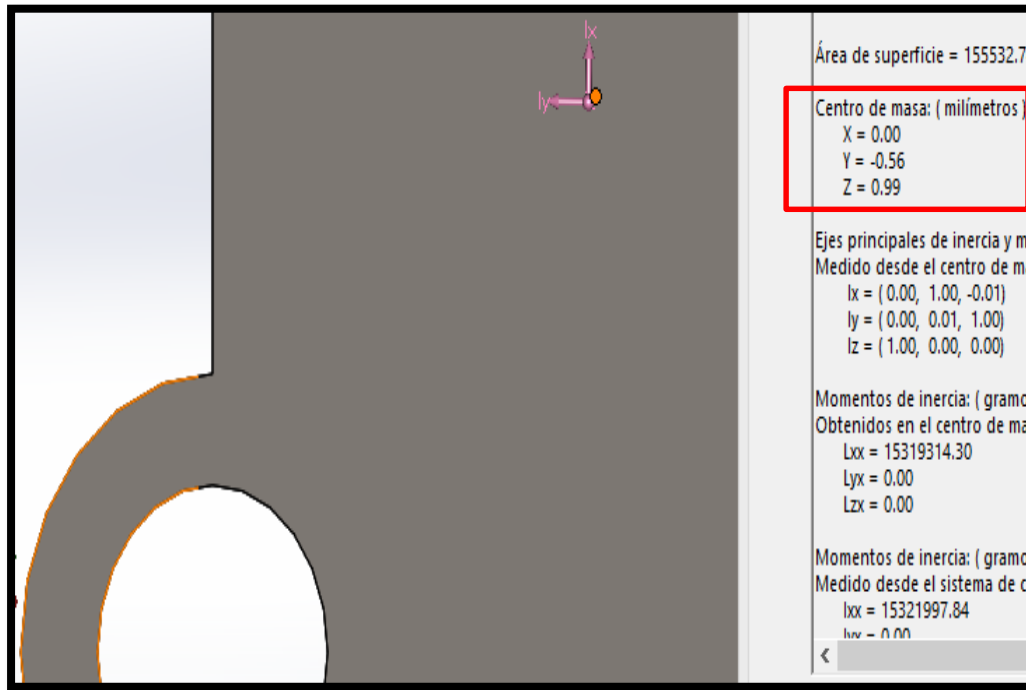
# Vectores de localización

$$\vec{r}_{G3} = r_{G3x} \hat{i} + r_{G3y} \hat{j} = \frac{a_3}{2} [\cos(\theta_3) \hat{i} + \sin(\theta_3) \hat{j}]$$

$$\vec{r}_{G5} = r_{G5x} \hat{i} + r_{G5y} \hat{j} = \frac{a_5}{2} [\cos(\theta_5) \hat{i} + \sin(\theta_5) \hat{j}]$$

$$\vec{r}_{G6} = r_{G6x} \hat{i} + r_{G6y} \hat{j} = \frac{a_6}{2} [\cos(\theta_6) \hat{i} + \sin(\theta_6) \hat{j}]$$



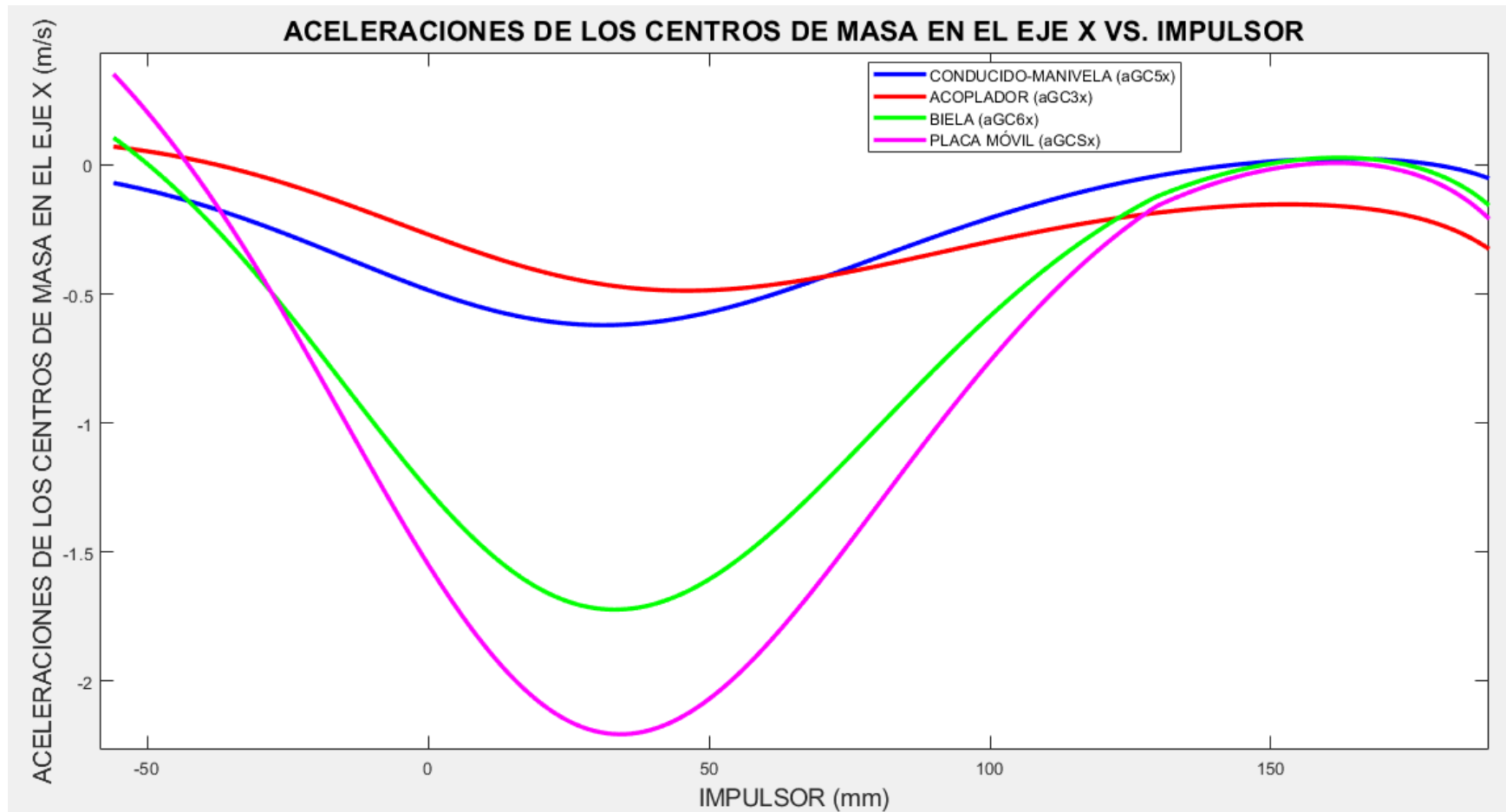


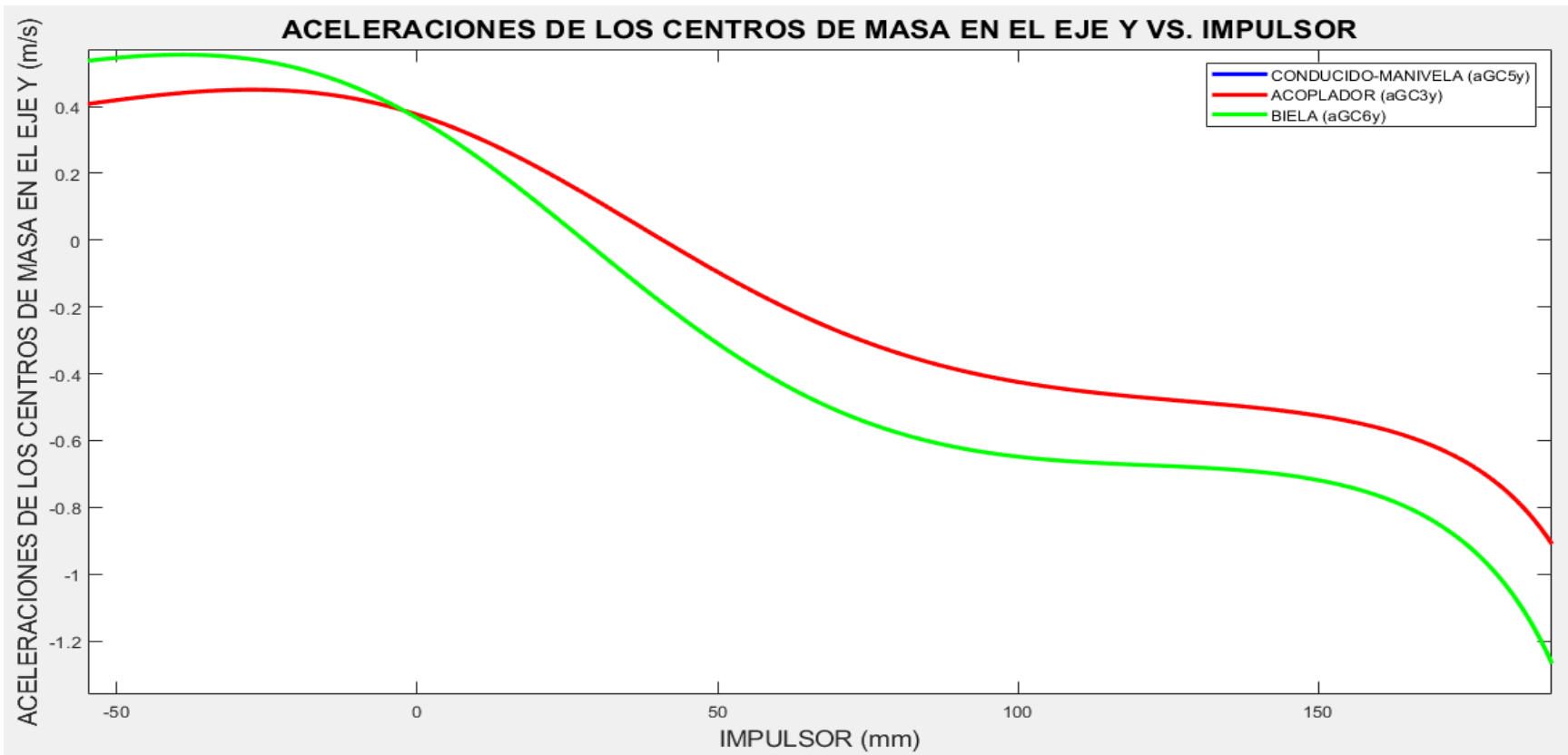
Para una simplificación de cálculo, en este proyecto, se supondrá que el centro de masa es coincidente con el centro geométrico de la representación CAD; por lo tanto, la magnitud de vector  $\vec{r}_{G5}$  será  $\frac{a_5}{2}$





# RESULTADOS ANÁLISIS DE ACELERACIÓN DE CENTROS DE MASA





- Los resultados muestran que las velocidades de los centros de masa en el eje Y de los eslabones manivela y biela

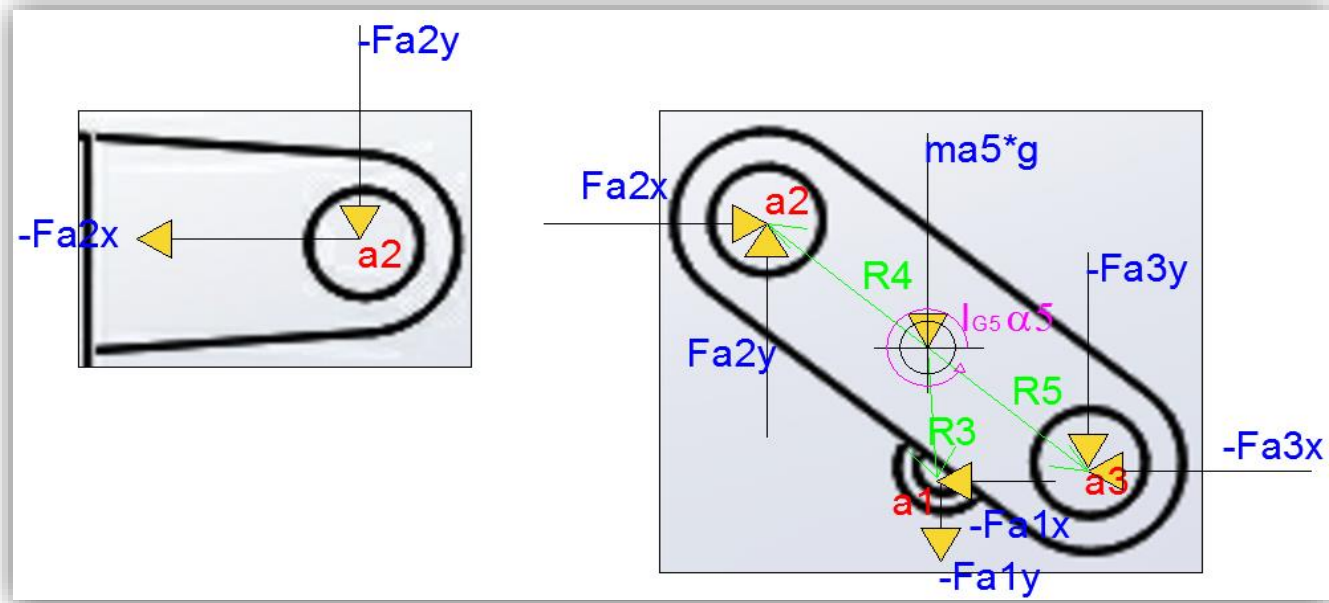


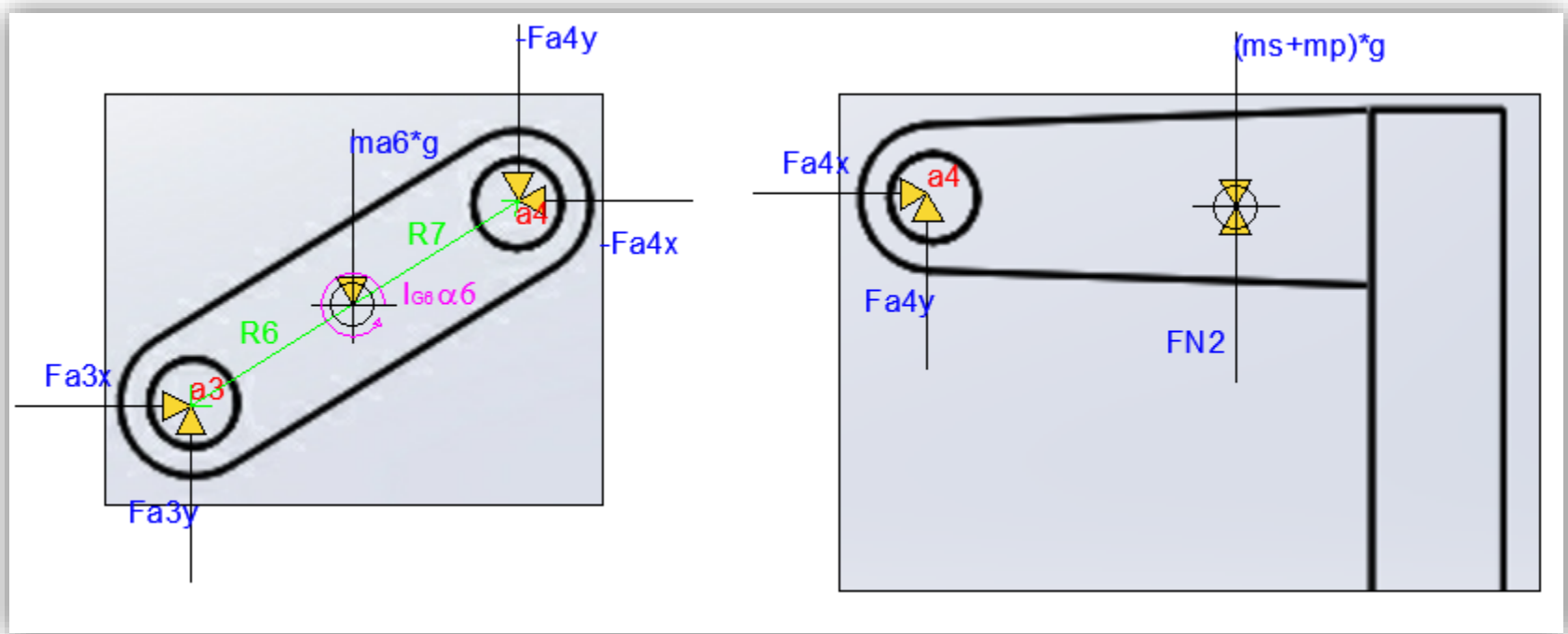
# MÉTODOLÓGIA ANÁLISIS CINÉTICO

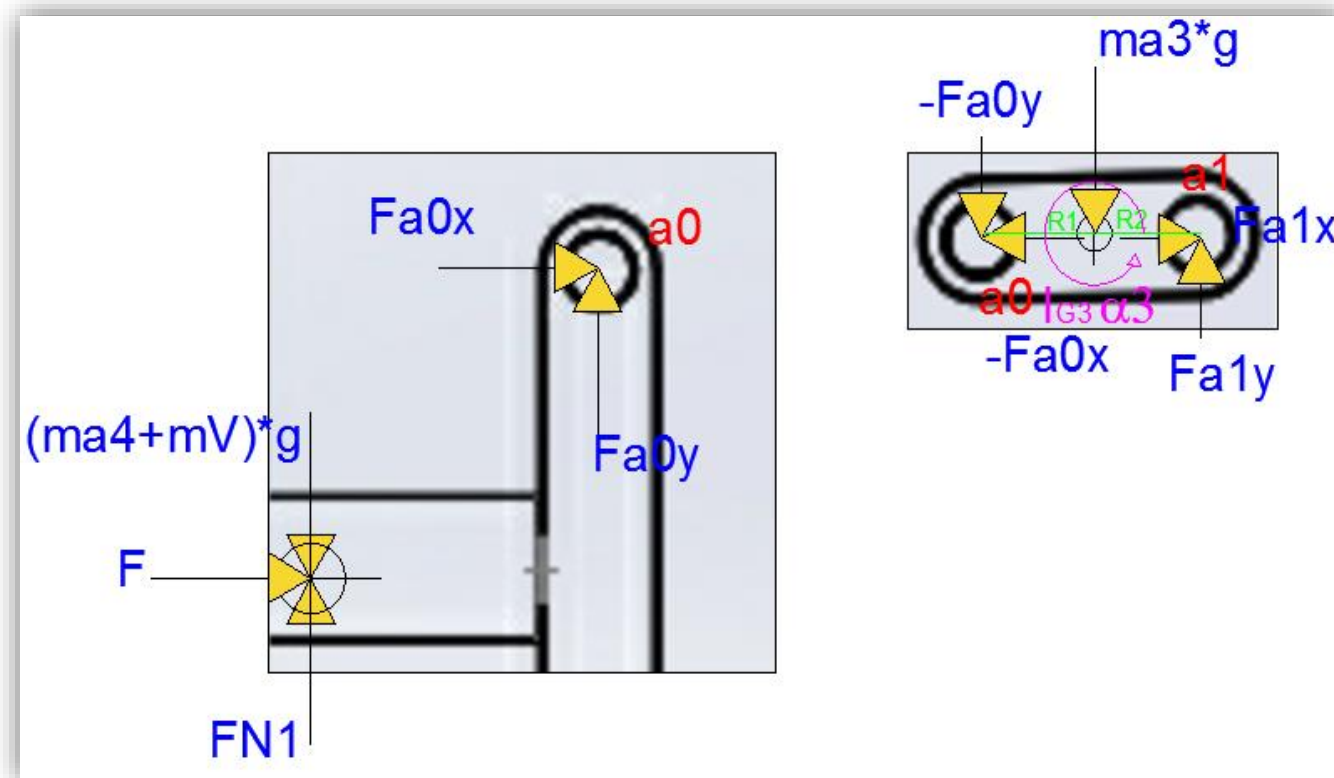
- El procedimiento que determina las fuerzas de reacción, torques de motores o fuerzas de actuadores en un mecanismo, conociendo de antemano las posiciones, velocidades y aceleraciones de cada eslabón, se conoce como análisis dinámico inverso.
- Para realizar el análisis dinámico inverso en el mecanismo tratado en este proyecto, es necesario construir las ecuaciones de movimiento a partir de los diagramas de cuerpo libre.



## Diagramas de cuerpo libre







Los diagramas de cuerpo libre se realizan aplicando la tercera ley de Newton para representar las reacciones de cada junta cinemática ( $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  y  $a_4$ ), así como las fuerzas normales respectivas ( $FN_1$ ,  $FN_2$ ).

Es necesario tomar en cuenta las masas de los eslabones, donde:

- $ma_3$ : Es la masa perteneciente al eslabón acoplador.
- $ma_4$ : Es la masa perteneciente a la pieza empujador que forma parte del eslabón impulsor.
- $ma_5$ : Es la masa perteneciente al eslabón ternario (manivela).
- $ma_6$ : Es la masa perteneciente al eslabón biela.
- $mV$ : Es la masa perteneciente al vástago del cilindro hidráulico que forma parte del eslabón impulsor.
- $mS$ : Es la masa perteneciente al soporte fijo en la placa móvil.
- $mP$ : Es la masa perteneciente a la placa móvil.



## Ecuaciones de movimiento

*Impulsor:*

$$\sum F_x = (m_{a4} + mV) a_{CG4x}$$

$$F_{a0x} + F = (m_{a4} + mV) a_{CG4x}$$

$$\sum F_y = (m_{a4} + mV) a_{CG4y}$$

$$F_{a0y} - (m_{a4} + mV)g + F_{N1} = 0$$

$$F_{a0y} + F_{N1} = (m_{a4} + mV)g$$





*Acoplador:*

$$\sum F_x = m_{a3} \cdot a_{CG3x}$$

$$-F_{a0x} + F_{a1x} = m_{a3} \cdot a_{CG3x}$$

$$\sum F_y = m_{a3} \cdot a_{CG3y}$$

$$-F_{a0y} + F_{a1y} = m_{a3} \cdot a_{CG3y} + m_{a3} \cdot g$$

$$\sum M = I_{G3} \cdot \alpha_3$$

$$F_{a0y} \cdot R_{1x} - F_{a0x} \cdot R_{1y} + F_{a1y} \cdot R_{2x} - F_{a1x} \cdot R_{2y} = I_{G3} \cdot \alpha_3$$



*Manivela:*

$$\sum F_x = m_{a5} \cdot a_{CG5x}$$

$$F_{a2x} - F_{a3x} - F_{a1x} = m_{a5} \cdot a_{CG5x}$$

$$\sum F_y = m_{a5} \cdot a_{CG5y}$$

$$F_{a2y} - F_{a3y} - F_{a1y} - m_{a5} \cdot g = m_{a5} \cdot a_{CG5y}$$

$$\sum M = I_{G5} \cdot \alpha_5$$

$$-F_{a2y} \cdot R_{4x} - F_{a2x} \cdot R_{4y} - F_{a3y} \cdot R_{5x} - F_{a3x} \cdot R_{5y} - F_{a1y} \cdot R_{3x} - F_{a1x} \cdot R_{3y} = I_{G5} \cdot \alpha_5$$



*Biela:*

$$\sum F_x = m_{a6} \cdot a_{CG6x}$$

$$F_{a3x} - F_{a4x} = m_{a6} \cdot a_{CG6x}$$

$$\sum F_y = m_{a6} \cdot a_{CG6y}$$

$$F_{a3y} - F_{a4y} = m_{a6} \cdot a_{CG6y} + m_{a6} \cdot g$$

$$\sum M = I_{G6} \cdot \alpha_6$$

$$-F_{a3y} \cdot R_{6x} + F_{a3x} \cdot R_{6y} - F_{a4y} \cdot R_{7x} + F_{a4x} \cdot R_{7y} = I_{G6} \cdot \alpha_6$$



*Placa móvil:*

$$\sum F_x = (m_s + m_p) \cdot a_{CGsx}$$

$$F_{a4x} = (m_s + m_p) \cdot a_{CGsx}$$

$$\sum F_y = (m_s + m_p) \cdot a_{CGsy}$$

$$F_{a4y} + F_{N2} = (m_s + m_p) \cdot g$$



$$\begin{bmatrix}
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 R_{7y} & -R_{7x} & R_{6y} & -R_{6x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -R_{5y} & -R_{5x} & -R_{4y} & -R_{4x} & -R_{3y} & -R_{3x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{2y} & R_{2x} & -R_{1y} & R_{1x} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 F_{a4x} \\
 F_{a4y} \\
 F_{a3x} \\
 F_{a3y} \\
 F_{a2x} \\
 F_{a2y} \\
 F_{a1x} \\
 F_{a1y} \\
 F_{a0x} \\
 F_{a0y} \\
 F_{N1} \\
 F_{N2}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 (m_s + m_p) \cdot a_{CGsx} \\
 (m_s + m_p) \cdot g \\
 m_{a6} \cdot a_{CG6x} \\
 m_{a6} \cdot a_{CG6y} + m_{a6} \cdot g \\
 I_{G6} \cdot \alpha_6 \\
 m_{a5} \cdot a_{CG5x} \\
 m_{a5} \cdot a_{CG5y} + m_{a5} \cdot g \\
 I_{G5} \cdot \alpha_5 \\
 m_{a3} \cdot a_{CG3x} \\
 m_{a3} \cdot a_{CG3y} + m_{a3} \cdot g \\
 I_{G3} \cdot \alpha_3 \\
 (m_{a4} + mV) a_{CG4x} - F \\
 (m_{a4} + mV)g
 \end{bmatrix}$$



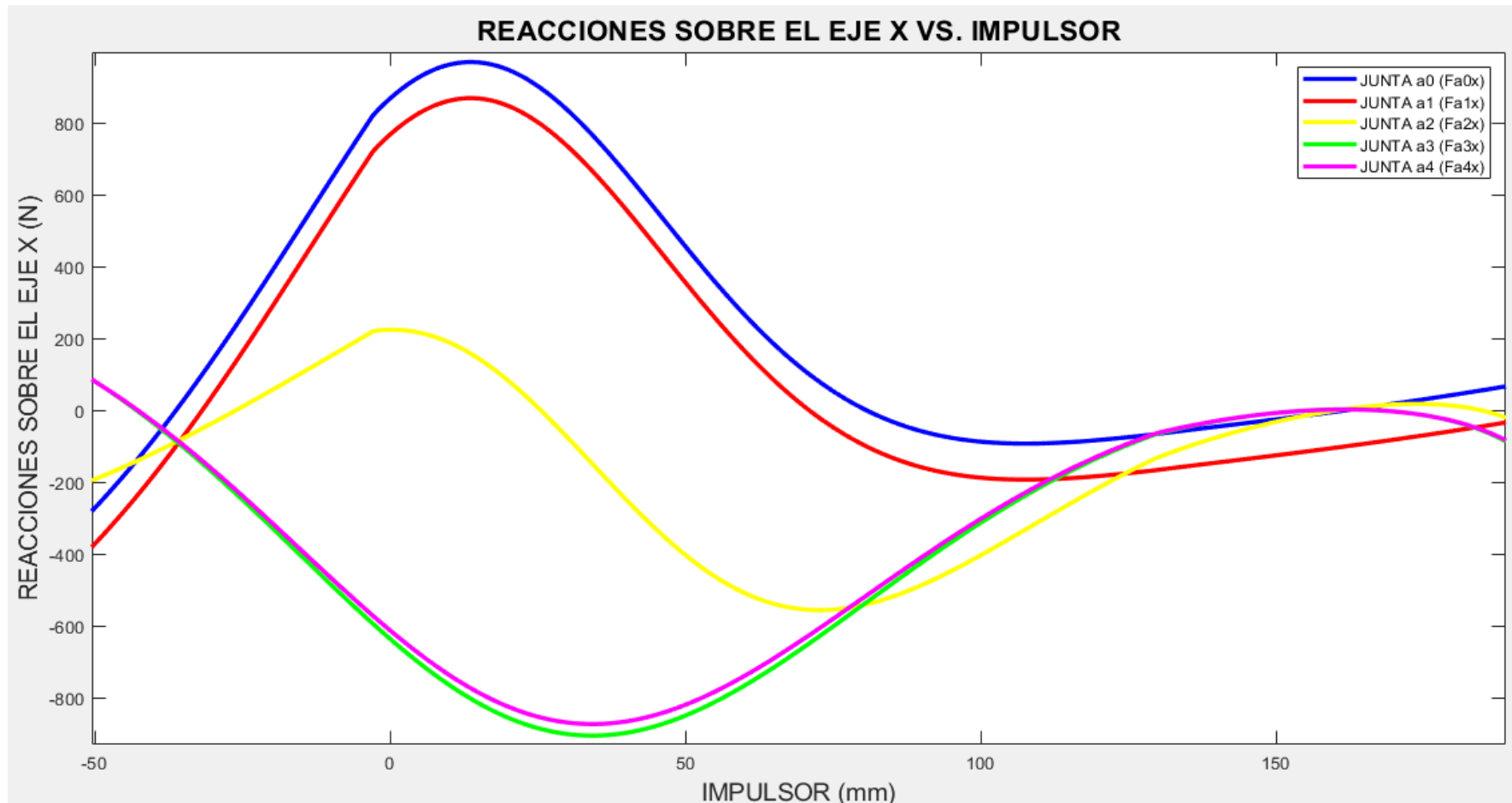
# Datos iniciales

## Geometry

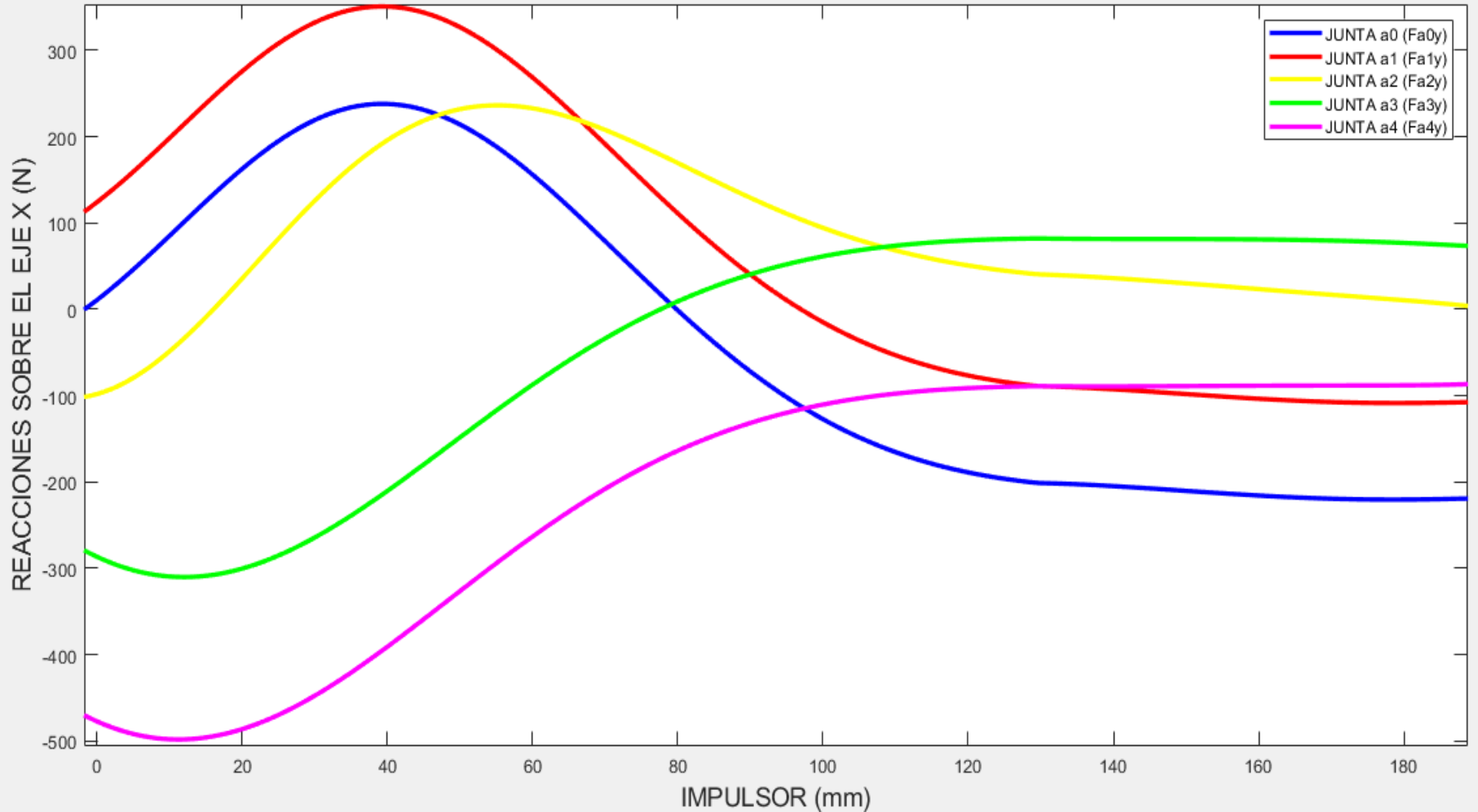
Name	Assignment	Volume (mm <sup>3</sup> )	Mass (kg)	Nodes	Elements	Status	Nonlinear Effects	Stiffness Behavior	Mass Moment of Inertia X (kg·mm <sup>2</sup> )	Mass M
pasador	Structural Steel	1,2043e+006	9,4352	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	4158,8	1,4317
elebador	Structural Steel	1,8549e+005	1,4561	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	2246,9	481,39
elebador	Structural Steel	1,8549e+005	1,4561	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	2246,9	481,39
elebador	Structural Steel	1,8549e+005	1,4561	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	2246,9	481,39
elebador	Structural Steel	1,8549e+005	1,4561	1	1	Not suppressed	N/A	Rigid	2246,9	481,39
soporte trasero fijo	Structural Steel	1,2412e+007	97,436	1	1	Not suppressed	N/A	Rigid	8,6445e+005	2,3574
soporte trasero fijo	Structural Steel	1,2412e+007	97,436	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	8,6445e+005	2,3574
soporte delantero fijo	Structural Steel	3,8502e+006	30,224	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,0773e+005	2,6315
soporte delantero fijo	Structural Steel	3,8502e+006	30,224	1	1	Not suppressed	N/A	Rigid	1,0773e+005	2,6315
rodillera trasera	Structural Steel	2,3969e+006	18,816	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,6998e+005	1,6446
rodillera trasera	Structural Steel	2,3969e+006	18,816	1	1	Not suppressed	N/A	Rigid	1,6998e+005	1,6446
rodillera trasera	Structural Steel	2,3969e+006	18,816	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,6998e+005	1,6446
rodillera trasera	Structural Steel	2,3969e+006	18,816	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,6998e+005	1,6446
rodillera recta	Structural Steel	2,0803e+006	16,33	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,1951e+005	25619
rodillera recta	Structural Steel	2,0803e+006	16,33	1	1	Not suppressed	N/A	Rigid	1,1951e+005	25619
rodillera recta	Structural Steel	2,0569e+006	16,147	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,1779e+005	24316
rodillera recta	Structural Steel	2,0569e+006	16,147	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,1779e+005	24316
rodillera recta	Structural Steel	2,0569e+006	16,147	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,1779e+005	24316
rodillera recta	Structural Steel	2,0569e+006	16,147	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,1779e+005	24316
patines	Structural Steel	1,1813e+007	92,728	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,7472e+007	1,7472
patines	Structural Steel	1,1813e+007	92,728	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,7472e+007	1,7472
base delantera	Structural Steel	3,664e+007	287,62	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	9,8874e+006	9,8874
base delantera	Structural Steel	3,664e+007	287,62	1	1	Not suppressed	N/A	Rigid	9,8874e+006	9,8874
empujador	Structural Steel	1,1092e+006	8,7075	1	1	Not suppressed	N/A	Rigid	54557	7126,1
cilindro	Structural Steel	2,375e+007	186,44	0	0	Suppressed	N/A	Rigid	1,4872e+007	1,4872
bastaño	Structural Steel	4,2412e+006	33,293	1	1	Not suppressed	N/A	Rigid	1,8487e+006	1,8487
base trasera	Structural Steel	3,5779e+007	280,86	1	1	Not suppressed	N/A	Rigid	9,9009e+006	9,9012



# RESULTADOS ANÁLISIS DINÁMICO



## REACCIONES SOBRE EL EJE X VS. IMPULSOR





# INTERFAZ GUI

programa

## Análisis Dinámico

Ingreso De Datos

**Manivela Conducido**

longitud Bancada (a1) 140 mm Masa 16.1475 kg  
 M. Inercia 0.1195 kg.m<sup>2</sup>

**Acoplador**

longitud Conducido(a2) 167.63 mm Masa 1.3051 kg  
 M. Inercia 0.0022 kg.m<sup>2</sup>

**Biela**

longitud Acoplador (a3) 95 mm Masa 16.7364 kg  
 M. Inercia 0.1699 kg.m<sup>2</sup>

**Impulsor**

longitud Manivela (a5) 220 mm Masa 33.2930 kg  
 M. Inercia 10.0088 kg.m<sup>2</sup>

**Placa Móvil**

longitud Biela (a6) 260 mm Masa Vastago 97.4437 kg  
 Masa Soporte Fijo 298.4963 kg

Velocidad Vastago (v4) 328.947 mm/s

Configuración

Rango recorrido del impulsor -56 190 mm

Rango inferior -56 mm Rango superior 190 mm

modo de análisis Reacciones en X (fx)

Tipo de gráficas Colectivo

VERIFICAR

GRAFICAR

Comportamiento del Sistema

### Análisis de Fuerzas de Reaccion en N

JUNTA a0 (Fa0x)  
 JUNTA a1 (Fa1x)  
 JUNTA a2 (Fa2x)  
 JUNTA a3 (Fa3x)  
 JUNTA a4 (Fa4x)

Analisis de posicion  
 2.836 1.891 6.264 0.000 480  
 T2 T3 T5 T6 S

Analisis de velocidad  
 -0.76 4.069 -0.76 0.644 0.022  
 V2 V3 V5 V6 Vs

Analisis de aceleracion  
 -11.9 13.15 -11.9 10.13 -235  
 Acc2 Acc3 Acc5 Acc6 Accs

Escenario



- a) **Botón inicio:** Inicia la aplicación en la portada.
- b) **Ingreso de datos:** Ingresa los parámetros iniciales necesarios para efectuar el análisis.
- c) **Esquema:** Muestra el mecanismo y se referencia las juntas cinemáticas.
- d) **Recorrido del impulsor:** Ingresa los rangos positivo y negativo del recorrido del impulsor.
- e) **Selección de análisis:** Selecciona el tipo de análisis que se efectuara en el sistema.
- f) **Tipo de gráficas:** Selecciona entre mostrar los resultados de manera individual o colectiva.
- g) **Verificar:** Verifica los datos ingresados e inicia el programa.
- h) **Graficar:** Grafica el resultado del análisis dependiendo lo elegido en la selección de análisis.
- i) **Comportamiento del sistema:** Muestra el comportamiento del mecanismo mediante la gráfica correspondiente.
- j) **Sección análisis:** Muestra los últimos datos obtenidos del análisis cinemático del mecanismo



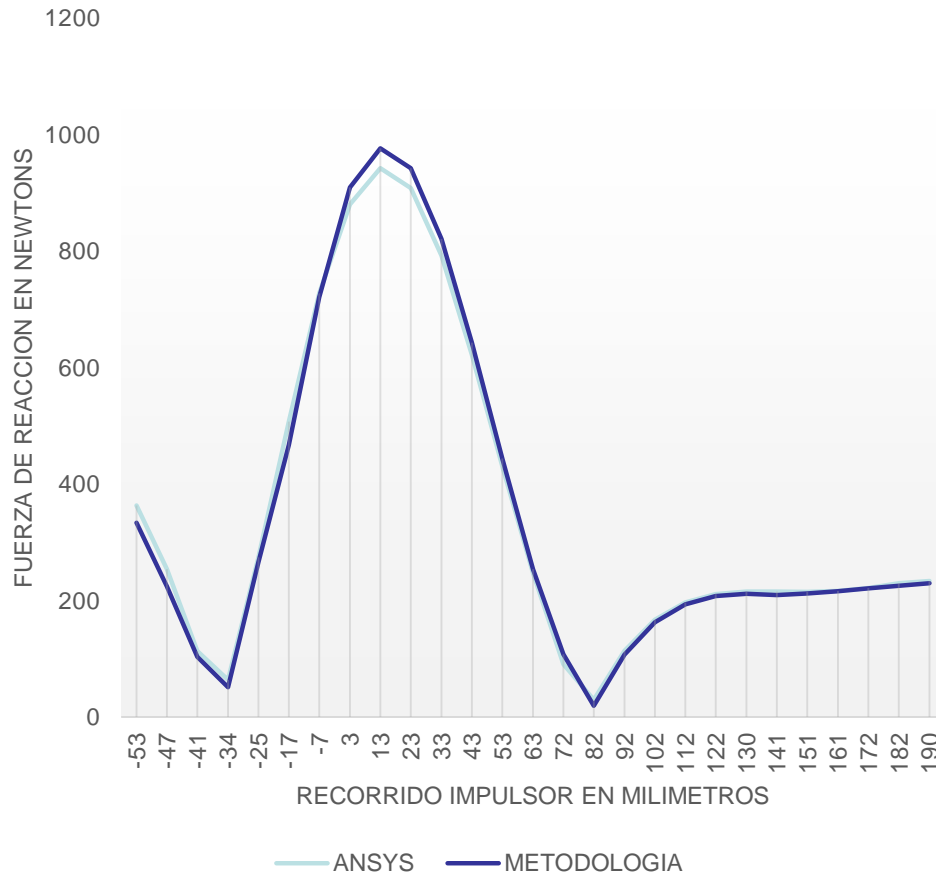
# ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se comparan los resultados del análisis dinámico del mecanismo, mediante software ANSYS, con respecto a la magnitud de la fuerza de reacción total obtenida de la metodología.

$$F = \sqrt{F_X^2 + F_Y^2}$$



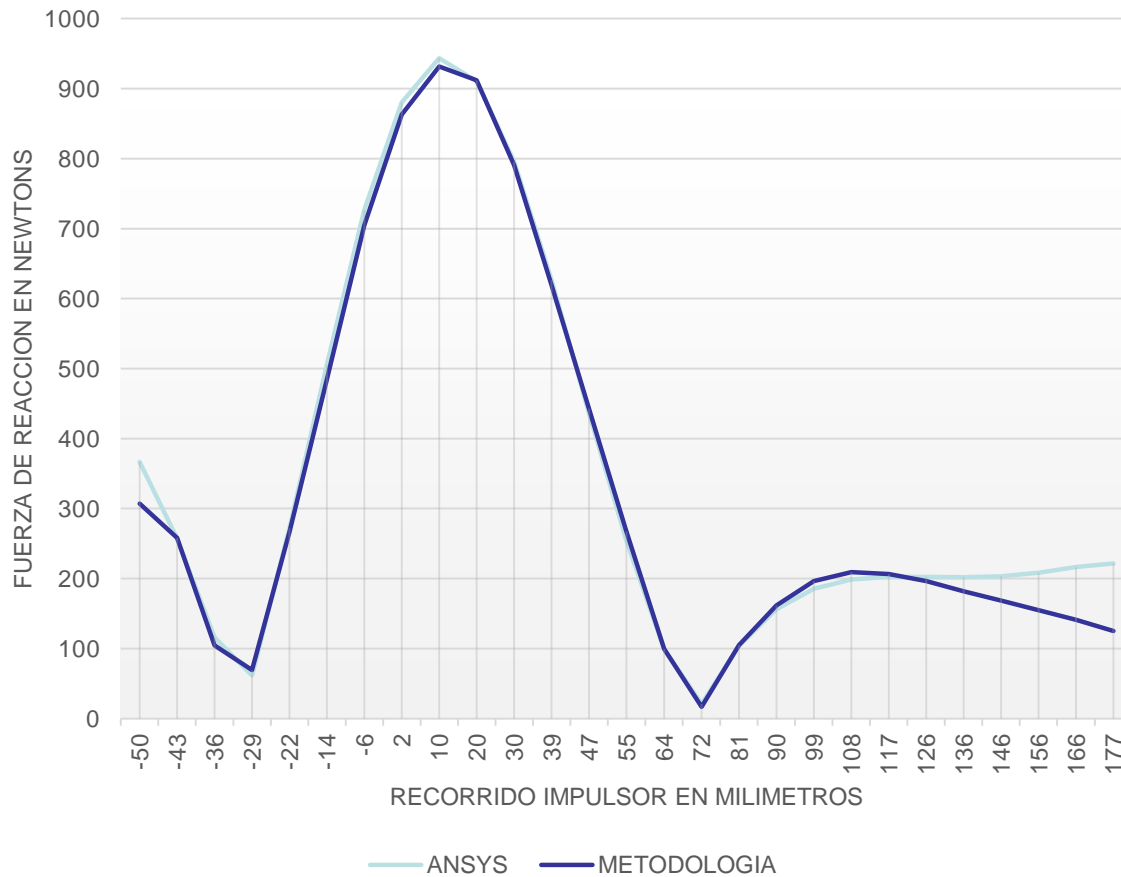
## Resultados cinéticos junta impulsor-acoplador (a0).



Recorrido impulsor	$F_{a0}$ %
-53	8,13
-47	11,70
-41	8,64
-34	19,50
-26	3,01
-16	7,91
-7	0,88
3	3,32
13	3,62
23	3,71
33	3,62
43	3,38
53	3,04
63	2,66
72	18,30
82	35,17
92	5,87
102	2,65
112	1,74
122	1,50
131	1,81
141	2,73
151	1,43
161	0,24
171	0,21
182	1,71
190	1,61
Error Prom %	5,86
Desv.Estandar %	7,65



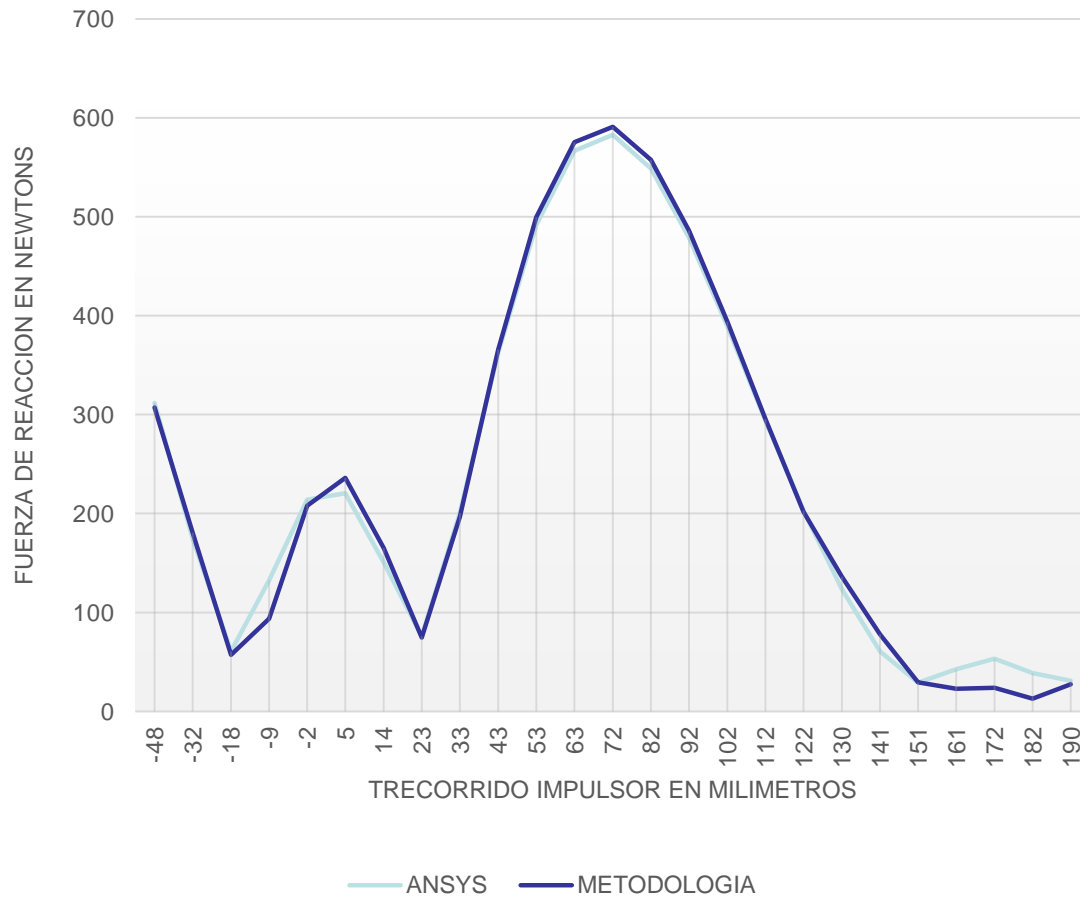
## Resultados cinéticos junta acoplador-manivela (a1).



Recorrido impulsor	$F_{a1}$ %
-50	6,93
-43	0,46
-36	10,09
-29	13,10
-22	2,17
-14	4,15
-6	3,00
2	1,98
10	1,28
20	0,13
30	0,65
39	1,18
47	1,43
55	5,20
64	0,38
72	21,55
81	1,08
90	3,44
99	5,93
108	5,48
117	2,07
126	2,93
136	9,81
146	17,14
156	25,57
166	34,90
177	43,59
Error	8,36
Prom %	
Desv. Estandar %	11,13

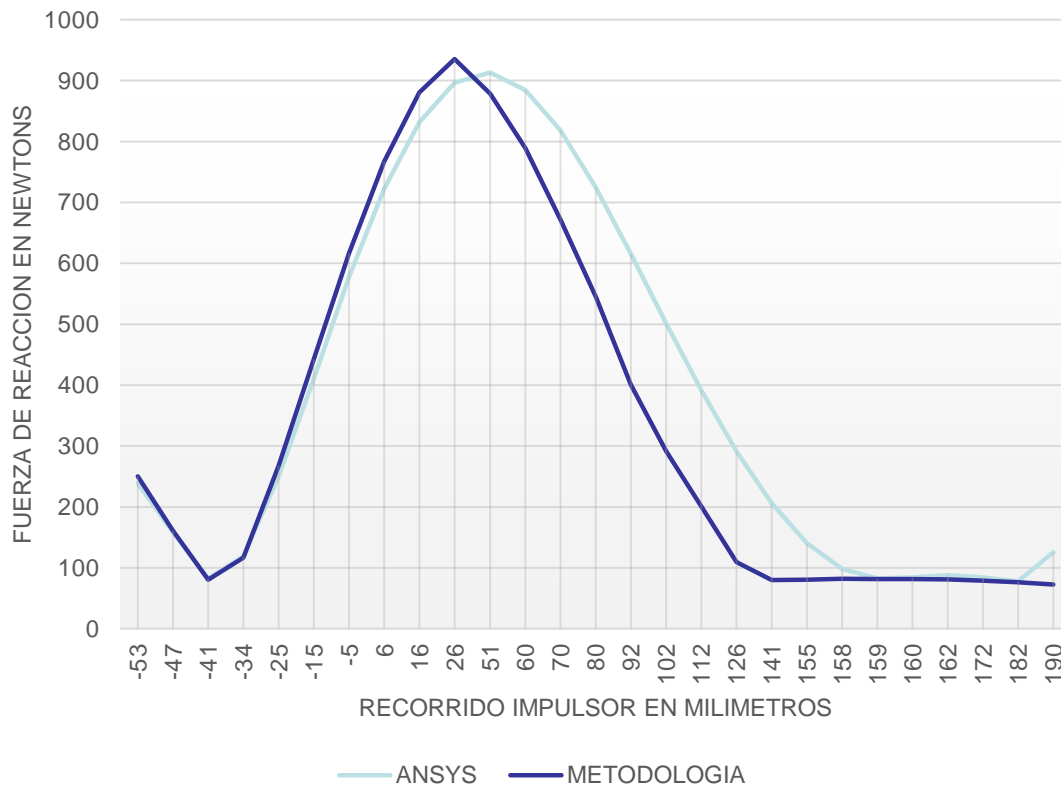


## Resultados cinéticos junta manivela-bancada (a2).



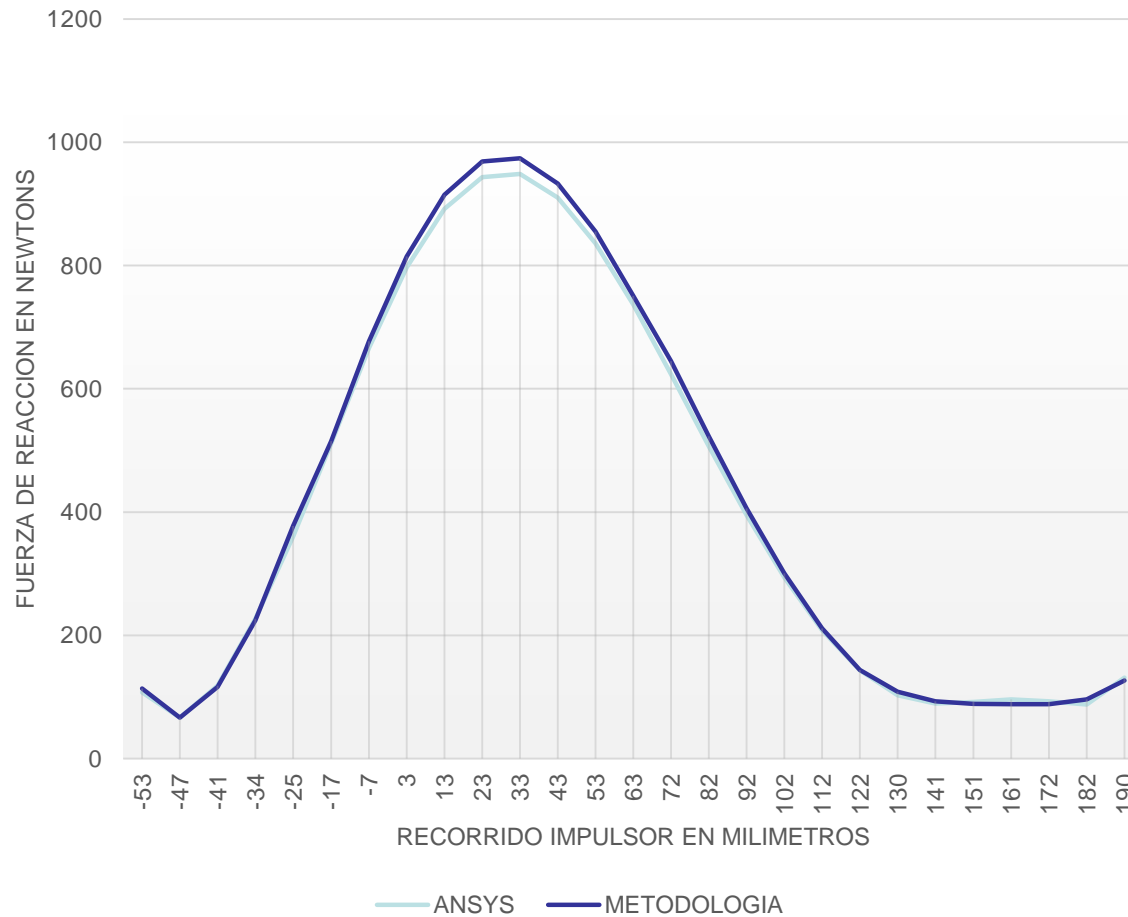
Recorrido impulsor	$F_{a2}$ %
-48	1,43777529
-32	3,28618689
-18	5,55685329
-9	29,31311103
-2	2,89036068
5	6,99237466
14	9,63915929
23	1,63923436
33	1,92231762
43	0,83424087
53	1,52851247
63	1,52027021
72	1,35309962
82	1,58925711
92	1,51329233
102	1,16701402
112	0,52913479
122	0,51579024
130	10,3458808
141	28,5008959
151	0,93821118
161	46,1959214
172	55,0805077
182	66,9967151
190	11,0824087
Error Prom %	11,69
Desv. Estandar %	18,65

## Resultados cinéticos junta manivela-biela (a3).



Recorrido impulsor	$F_{a3}$ %
-53	4,84563853
-47	1,59569381
-41	2,47344394
-34	1,86462777
-25	6,9771561
-17	7,80723047
-7	6,64953042
3	6,17306137
13	5,86995571
23	4,33940111
33	3,82647274
43	10,770429
53	17,9274313
63	24,7009641
72	34,9281354
82	41,8810166
92	48,7143828
102	62,5141428
112	61,2797921
122	42,5631454
130	16,4125794
141	1,37050011
151	3,45687917
161	7,7040874
172	5,73790543
182	2,37351265
190	42,0622692
Error Prom %	17,65
Desv.Estandar %	19,50

# Resultados cinéticos junta biela-placa móvil (a4)



Recorrido impulsor	$F_{a4}$ %
-53	5,67917789
-47	0,29328919
-41	1,86322771
-34	1,14635922
-25	4,69888056
-17	0,65794271
-7	1,6277338
3	2,20006562
13	2,52500603
23	2,66604481
33	2,65569605
43	2,51476293
53	2,2540926
63	1,88039359
72	3,33677021
82	3,14243866
92	2,80781994
102	2,28556987
112	1,4898405
122	0,33735439
130	5,4651685
141	3,98231685
151	3,40548731
161	7,85401806
172	5,04406826
182	9,00966319
190	3,33106942
Error Prom %	3,11
Desv.Estandar %	2,08





# CONCLUSIONES

- Se generó de manera exitosa una metodología para el análisis dinámico del mecanismo del sistema de cierre en una máquina inyectora TIANJIAN PL 1200.
- La información técnica obtenida sobre el método de Newton-Raphson, permitió solventar la necesidad de un método numérico para la resolución de las ecuaciones no lineales que describen al mecanismo, consiguiendo de esta manera desarrollar un proyecto con las exigencias académicas actuales.
- La matriz jacobiana obtenida del análisis de posición del mecanismo resulta ser la matriz característica del sistema que se utiliza para obtener las demás variables cinemáticas de manera más simplificada que utilizando otros métodos de cálculo.
- La aplicación GUI para la implementación de la metodología, permitió, mediante interfaz simple e intuitiva, realizar rápidamente el análisis dinámico del mecanismo y presentar las diversas variables cinemáticas y cinéticas de interés ingenieril.
- La comparación con el software ANSYS, demostró que, la metodología es confiable al obtener un error máximo de 17,65%, con respecto a los resultados arrojados por el programa profesional.



# RECOMENDACIONES

- Se recomienda un cálculo individual de los puntos iniciales para el proceso iterativo de resolución de cada variable, es posible que las divergencias en los resultados cinemáticos sean atenuadas.
- Es recomendable que se realice un cálculo apropiado de los vectores de ubicación de centros de masa de cada eslabón para obtener soluciones mucho más aproximadas, con un software de análisis profesional.
- Se aconseja realizar una comparación de la metodología generada en este proyecto con otro software diferente a ANSYS.



GRACIAS POR SU  
ATENCIÓN



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA