

# Validación de modelacion cinemática y dinámica de un robot delta 3 GDL a través de ROS y ADAMS

Autor: Iván Alejandro Fernández Gracia<sup>1</sup>

Autor: Rodrigo Eduardo Soto Castro<sup>1</sup>

Profesor Guia: Michael Gabriel Miranda Sandoval<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Santiago de Chile. Facultad de Ingeniería.

Departamento de Ingeniería Mecánica

12 de abril de 2021



# Contenido

- 1 Motivación
- 2 Objetivos
- 3 Teoría
  - Flujo de trabajo para modelación cinemática y dinámica
  - Método A
  - Método B
  - ADAMS
  - Trayectoria
  - Visualización
  - Espacio de trabajo
- 4 Desarrollo
  - Trayectorias y torques de actuadores
  - Visualización
  - Espacio de trabajo
- 5 Especificaciones robot delta
- 6 Resultados
  - Visualización
  - Dinámica inversa de trayectorias
  - Espacio de trabajo
- 7 Conclusiones
- 8 Futuras líneas de investigación y referencias



# Contenido

1 Motivación

2 Objetivos

3 Teoría

- Flujo de trabajo para modelación cinemática y dinámica
- Método A
- Método B
- ADAMS
- Trayectoria
- Visualización
- Espacio de trabajo

4 Desarrollo

- Trayectorias y torques de actuadores
- Visualización
- Espacio de trabajo

5 Especificaciones robot delta

6 Resultados

- Visualización
- Dinámica inversa de trayectorias
- Espacio de trabajo

7 Conclusiones

8 Futuras líneas de investigación y referencias

## Punto de vista educacional

- **Desconexión** entre la industria y la academia latente en nuestro departamento de ingeniería mecánica de la USACH.

## Punto de vista teórico

- Sistemas robóticos complejos producen **lentitud** y **altos costos** en el **desarrollo** e **implementación** de la robótica a escala mundial.
- Los esquemas de controles de robots basados solo en la **cinemática de posición** son **insuficientes** para una excelente precisión.

## Punto de vista industrial

- Uso en los últimos años de robots paralelos en operaciones de '**pick and place**' en diversas áreas en la industria, tales como la **agronomía y manufactura**. Estas áreas son una de las más desarrolladas en Chile según el PIB real.



# Contenido

- 1 Motivación
- 2 Objetivos
- 3 Teoría
  - Flujo de trabajo para modelación cinemática y dinámica
  - Método A
  - Método B
  - ADAMS
  - Trayectoria
  - Visualización
  - Espacio de trabajo
- 4 Desarrollo
  - Trayectorias y torques de actuadores
  - Visualización
  - Espacio de trabajo
- 5 Especificaciones robot delta
- 6 Resultados
  - Visualización
  - Dinámica inversa de trayectorias
  - Espacio de trabajo
- 7 Conclusiones
- 8 Futuras líneas de investigación y referencias

# Objetivos



## Hipótesis

Es posible **realizar** el **modelamiento cinemático y dinámica** de un robot delta a través de softwares libres y **validarlo** por medio de un software educativo.

## Objetivos específicos

- 1 **Crear** algoritmos que calculen trayectorias lineales en el espacio cartesiano con perfil de velocidad trapezoidal.
- 2 **Crear** algoritmos que resuelva la cinemática y dinámica.
- 3 **Determinar** el espacio de trabajo a partir de restricciones impuestas.
- 4 **Simular** el movimiento de las piezas mecánicas del robot a través de una herramienta de visualización.
- 5 **Calcular** la dinámica por medio de un software de análisis mecánico.
- 6 **Comparar** los resultados de la dinámica calculados por los algoritmos y por el software de análisis mecánico.



# Contenido

1 Motivación

2 Objetivos

3 Teoría

- Flujo de trabajo para modelación cinemática y dinámica
- Método A
- Método B
- ADAMS
- Trayectoria
- Visualización
- Espacio de trabajo

4 Desarrollo

- Trayectorias y torques de actuadores
- Visualización
- Espacio de trabajo

5 Especificaciones robot delta

6 Resultados

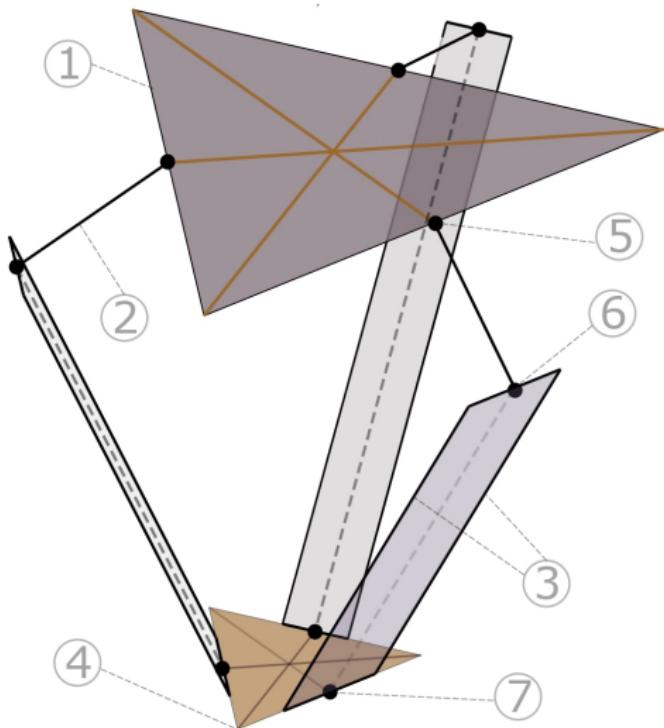
- Visualización
- Dinámica inversa de trayectorias
- Espacio de trabajo

7 Conclusiones

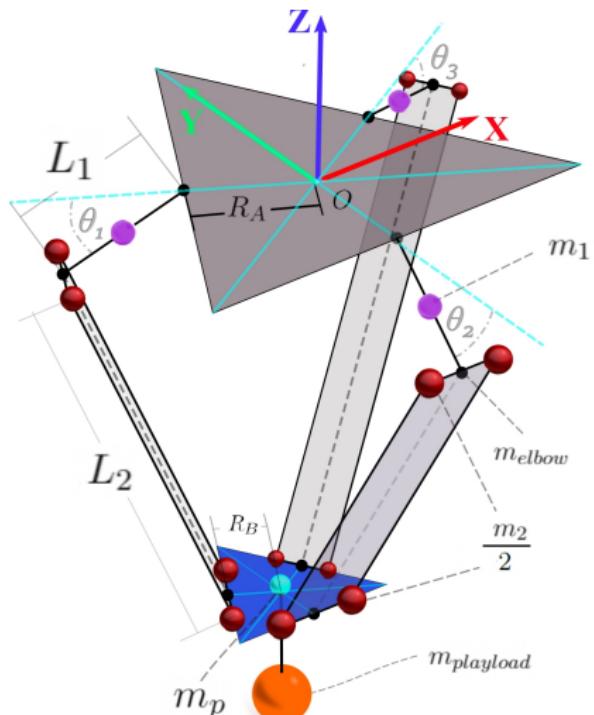
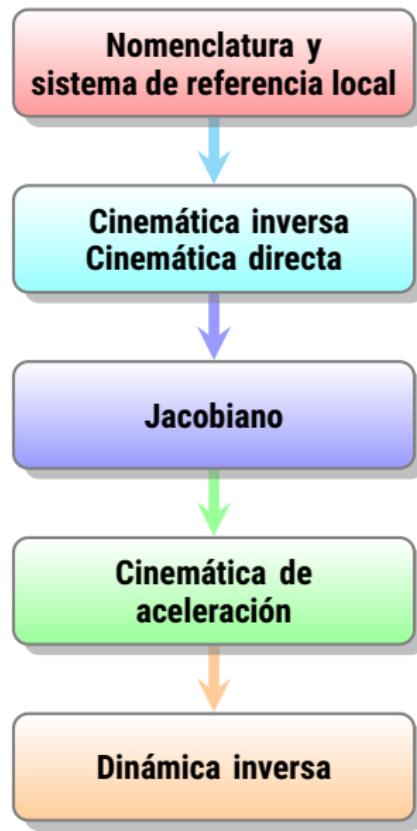
8 Futuras líneas de investigación y referencias

# Teoría: Descripción robot delta

Numero	Pieza Mecánica
1	Base fija
2	Brazo
3	Antebrazo (2 varillas)
4	Base Móvil
5	Actuador o junta revoluta
6	Junta esférica
7	Junta esférica



# Teoría: Flujo de trabajo método A y B



Sistema de referencia global  $XYZ$  y orden de ángulos de los brazos  $\theta_{i \in \{1,2,3\}}$ .

# Teoría: Método A (Jacobiano)



Bucle cerrado

$$\overrightarrow{A_i B_i} + \overrightarrow{B_i C_i} = \overrightarrow{OP} + \overrightarrow{PC_i} - \overrightarrow{OA_i} ; \quad i \in \{1, 2, 3\}$$

Al derivar la ecuación del bucle cerrado y separar términos  $v_p$  y  $\dot{\theta}$

$$J_x v_p = J_\theta \dot{\theta}$$

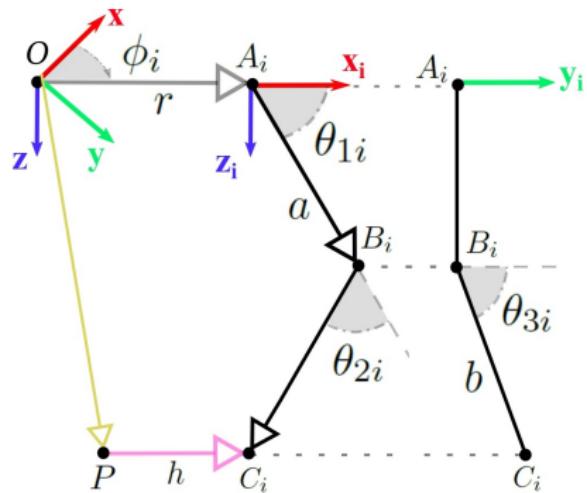
$$\begin{bmatrix} J_{1x} & J_{1y} & J_{1z} \\ J_{2x} & J_{2y} & J_{2z} \\ J_{3x} & J_{3y} & J_{3z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{px} \\ v_{py} \\ v_{pz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{1\theta} & 0 & 0 \\ 0 & J_{2\theta} & 0 \\ 0 & 0 & J_{3\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \end{bmatrix}$$

$$J_{1x} = \cos(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \sin \theta_{3i} \cos \phi_i - \cos \theta_{3i} \sin \phi_i$$

$$J_{1y} = \cos(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \sin \theta_{3i} \sin \phi_i + \cos \theta_{3i} \cos \phi_i$$

$$J_{1z} = \sin(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \sin \theta_{3i}$$

$$J_{i\theta} = a \sin \theta_{2i} \sin \theta_{3i}$$



Jacobiano

$$v_p = J\dot{\theta}$$

- $J = J_x^{-1} J_\theta$  es el **jacobiano** del robot delta
- $v_p = [v_{px}, v_{py}, v_{pz}]^T$  es la **velocidad del punto** P de la base móvil
- $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_{11}, \dot{\theta}_{12}, \dot{\theta}_{13}]^T$  es la **velocidad angular** de los actuadores

# Teoría: Método A (Dinámica)

Teoría ecuaciones de Lagrange para sistemas con ligaduras holónomas en forma explícita

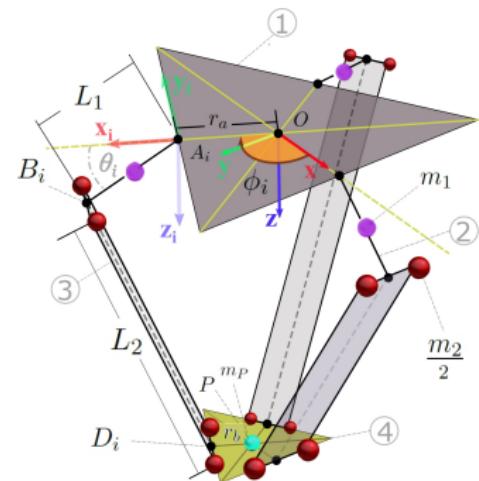
$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{q}_j} \right) - \frac{\delta L}{\delta q_j} = \sum_{l=1}^{K^{(h)}} \lambda_l \frac{\delta f_l^{(h)}}{\delta q_j} + Q_j^{(NU)}(q_j)$$

Ec. de Lagrange con coordenadas generalizadas  $q_j = [X_p, Y_p, Z_p]$

$$(m_p + 3m_2)\ddot{X}_p - 2 \sum_{l=i=1}^3 \lambda_l (X_P - r \cos \phi_i - L_1 \cos \theta_i \cos \phi_i) = F_{px}$$

$$(m_P + 3m_2)\ddot{Y}_p - 2 \sum_{l=i=1}^3 \lambda_l (Y_P - r \sin \phi_i - L_1 \cos \theta_i \sin \phi_i) = F_{py}$$

$$(m_P + 3m_2)\ddot{Z}_p - 2 \sum_{l=i=1}^3 \lambda_l (Z_P - L_1 \sin \theta_i) - (m_p + 3m_2)g = F_{pz}$$



Dinámica inversa: Ecuaciones de Lagrange con las coordenadas generalizadas  $q_j = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]$

$$\tau_i = \left( \frac{1}{3}m_1 + m_2 \right) L_1^2 \ddot{\theta}_i - \left( \frac{1}{2}m_1 + m_2 \right) g L_1 \cos \theta_i - 2\lambda_i L_1 [(X_P \cos \phi_i + Y_P \sin \phi_i - r) \sin \theta_i - Z_P \cos \theta_i]$$



# Teoría: Método B (Jacobiano)

## Ecuaciones de restricción

$$\|\vec{\xi}_{J_i P_i}\|^2 - L_B^2 = \vec{s}_i^T \cdot \vec{s}_i - L_B^2 = 0 \quad ; \quad i \in \{1, 2, 3\}$$

Donde:

$$\vec{s}_i = \vec{P}_0 - (\vec{F}_i + \vec{\xi}_{F_i J_i}) = \begin{bmatrix} P_{0x} \\ P_{0y} \\ P_{0z} \end{bmatrix} - R_i^R \left( \begin{bmatrix} R \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A \cos(\theta_i) \\ 0 \\ -L_A \sin(\theta_i) \end{bmatrix} \right)$$

Al derivar la ecuación de restricción y separando los términos  $\vec{P}_0$  y  $\vec{\theta}$

$$\vec{P}_0 = -J_1 J_2 \vec{\theta}$$

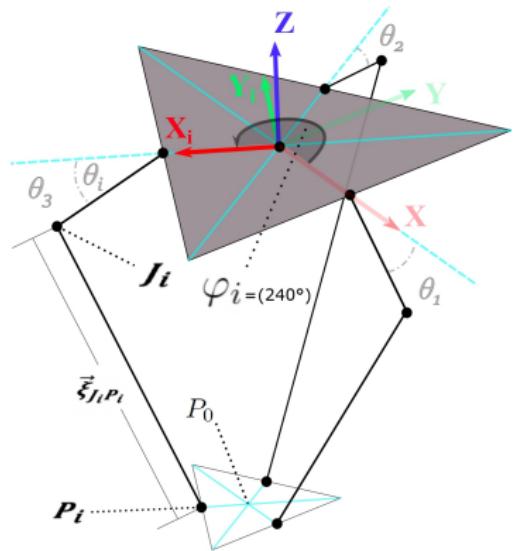
$$\begin{bmatrix} \dot{P}_{0x} \\ \dot{P}_{0y} \\ \dot{P}_{0z} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \vec{s}_1^T \\ \vec{s}_2^T \\ \vec{s}_3^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \vec{s}_1^T \cdot \vec{b}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \vec{s}_2^T \cdot \vec{b}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \vec{s}_3^T \cdot \vec{b}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix}$$

Donde:  $\vec{b}_i = R_i^R [L_A \sin(\theta_i), 0, L_A \cos(\theta_i)]$

## Jacobiano

$$\vec{P}_0 = J \vec{\theta}$$

- $J = -J_1 J_2$  es el **jacobiano** del robot delta
- $\vec{P}_0 = [\dot{P}_{0x}, \dot{P}_{0y}, \dot{P}_{0z}]^T$  es la **velocidad del punto**  $P_0$  de la base móvil y  $\vec{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$  es la **velocidad angular** de los actuadores



# Teoría: Método B (Dinámica)

Trabajo virtual: Principio de D'Alembert

**Caso estático:** El trabajo virtual  $\delta W$  producido por una **fuerza externa**  $F_i$  que actúa sobre un cuerpo produciendo un **desplazamiento lineal virtual**  $\delta r_i$ :

$$\delta W = \sum_{i=1}^N F_i * \delta r_i = 0$$

**Caso dinámico:** La ecuación anterior se puede extender agregando **fuerzas iniciales** y rotación. Agregando el trabajo virtual  $\delta W$  producido por un **torque externo**  $\tau$  que actúa sobre el mismo cuerpo produciendo un **desplazamiento angular virtual**  $\delta\theta$ :

$$\delta W = \sum_{i=1}^N [(F_i - m_i a_i) * \delta r_i + (\tau - I \ddot{\theta}) * \delta\theta] = 0$$

Dinámica inversa: torque de actuadores

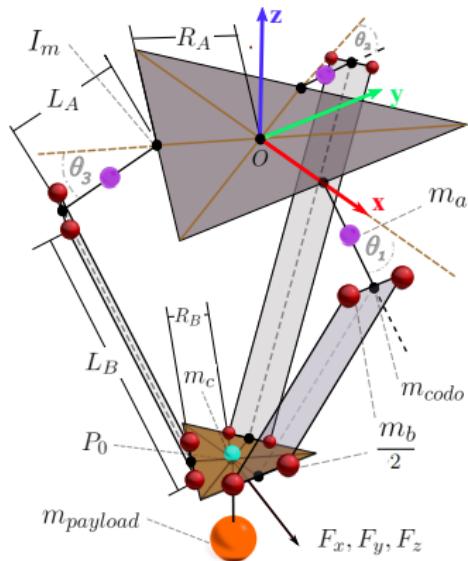
$$\vec{\tau} = I_b \vec{\dot{\theta}} + J^T m_{nt} \vec{P}_0 - J^T \vec{F}_g - \vec{\tau}_{Gb}$$

$$\vec{\tau} = M(\theta) \vec{\dot{\theta}} + C(\theta, \dot{\theta}) \vec{\dot{\theta}} + \vec{G}(\theta)$$

Matriz de masa:  $M(\theta) = I_b + J^T m_{nt} J$

Coeficiente de Coriolis:  $C(\theta, \dot{\theta}) = J^T m_{nt} J$

Términos de gravedad:  $\vec{G}(\theta) = -J^T \vec{F}_g - \vec{\tau}_{Gb}$



$$I_b = [I_{b1}, 0, 0; 0, I_{b2}, 0; 0, 0, I_{b3}]$$

$$I_{bi} = I_m + L_A^2 \left( \frac{m_a}{3} + m_{codo} + 2rm_b \right)$$

$$m_{nt} = m_c + m_{payload} + 3 * 2 * (1 - r)m_b$$

$$\vec{F}_g = m_{nt} [0 \ 0 \ -g]^T$$

# Teoría: ADAMS



DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA  
MECÁNICA  
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE



# Teoría: Trayectoria

## Trayectorias en **línea recta**

Una trayectoria en **línea recta** en el **espacio cartesiano** comienza con una configuración  $X_{\text{inicio}}$  y hasta una configuración final  $X_{\text{fin}}$ . La escala temporal de la trayectoria lineal es  $s(t)$ .

$$X : s \rightarrow \Re^3$$

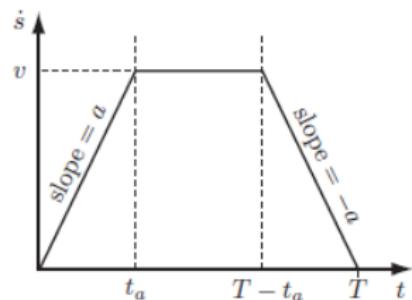
$$X : [0; 1] \rightarrow \Re^3$$

$$X(s) = X_{\text{inicio}} + s(X_{\text{fin}} - X_{\text{inicio}})$$

## Escala de tiempo: Perfil de velocidad trapezoidal (**LSPB**)

Constan de 3 fases:

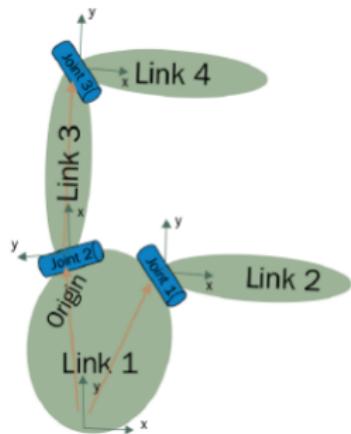
- **Aceleración constante**  $\ddot{s} = a$  de tiempo  $t_a$
- **Velocidad constante**  $\dot{s} = v$  de tiempo  $t = T - 2t_a$
- **Desaceleración constante**  $\ddot{s} = -a$  de tiempo  $t_a$





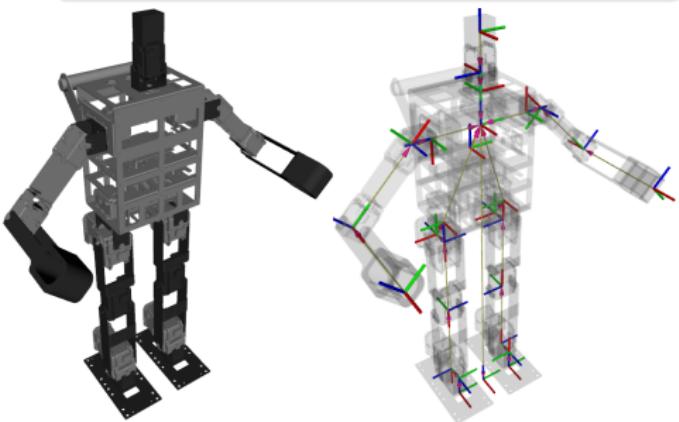
## Unified Robot Description Format (URDF)

En ROS es posible visualizar un **modelo 3D** de un robot mediante el uso de archivos URDF. La descripción del modelo consiste básicamente en unir dos conjuntos: el conjunto de **enlaces (link)** y el conjunto de **uniones (joint)**.



## Transform Frames (tf)

Tf está diseñada para proporcionar una forma estándar de realizar un seguimiento de los **marcos de coordenadas** y transformar los datos dentro de todo el sistema a lo largo del tiempo. El paquete tf puede **rastrear y mantener la relación** entre múltiples marcos de coordenadas.

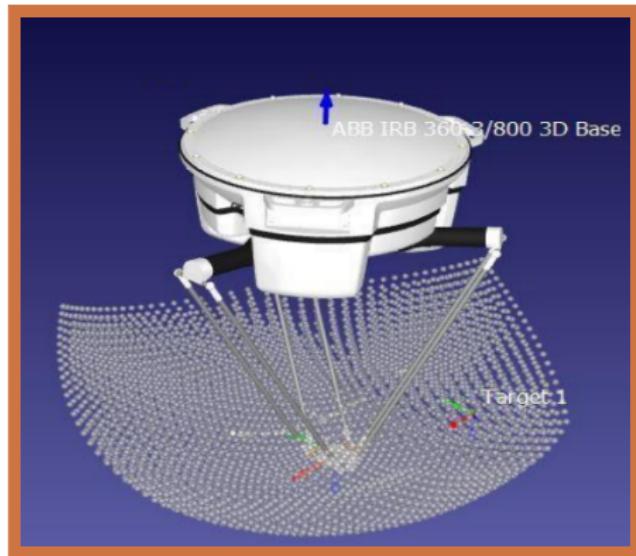


# Teoría: Espacio de trabajo



## Definición

El **método de discretización**, que se basa en métodos numéricos, consiste en discretizar el espacio en tres dimensiones, resolviendo la **cinemática inversa** para cada punto y verificando las **restricciones** que limitan dicho espacio de trabajo

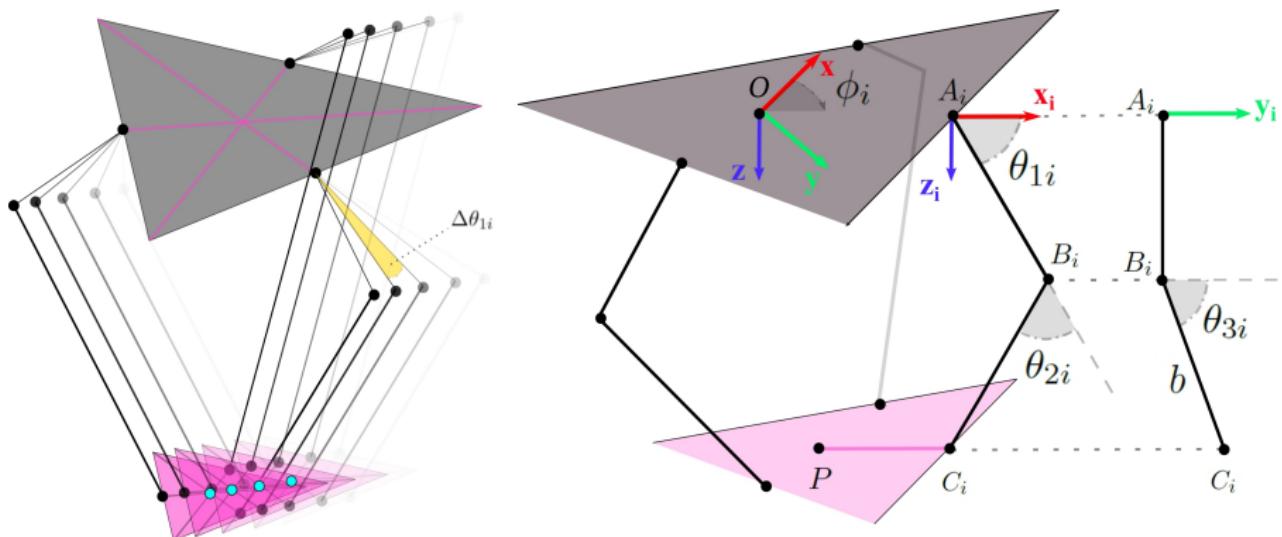


Espacio de trabajo robot  
ABB irb 360-3/800



- **Límites** impuesto en los **ángulos de los actuadores**  $[\theta_{1i,min} - \theta_{1i,max}]$  para cada actuador  $i \in \{1, 2, 3\}$ .
- Resolución basada en tamaño del paso de los actuadores, es decir, la **discretización**  $\Delta\theta_{1i}$  del rango impuesto por los límites del punto anterior para cada actuador  $i \in \{1, 2, 3\}$ .
- Restricciones de **ángulos internos**  $\theta_{2i}$  y  $\theta_{3i}$  en base a restricción de las juntas o rotulas .
- Singularidades que se determinan mediante el **determinante del jacobiano**  $J = J_x^{-1}J_\theta$  cuando este es cercano a 0.
- **Límites**  $X, Y$  y  $Z$  comúnmente impuestos por los fabricantes. Generalmente son volúmenes geométricos como cilindros o paralelepípedos.

# Teoría: Restricciones espacio de trabajo



2 tipos de restricciones del espacio de trabajo



# Contenido

1 Motivación

2 Objetivos

3 Teoría

- Flujo de trabajo para modelación cinemática y dinámica
- Método A
- Método B
- ADAMS
- Trayectoria
- Visualización
- Espacio de trabajo

4 Desarrollo

- Trayectorias y torques de actuadores
- Visualización
- Espacio de trabajo

5 Especificaciones robot delta

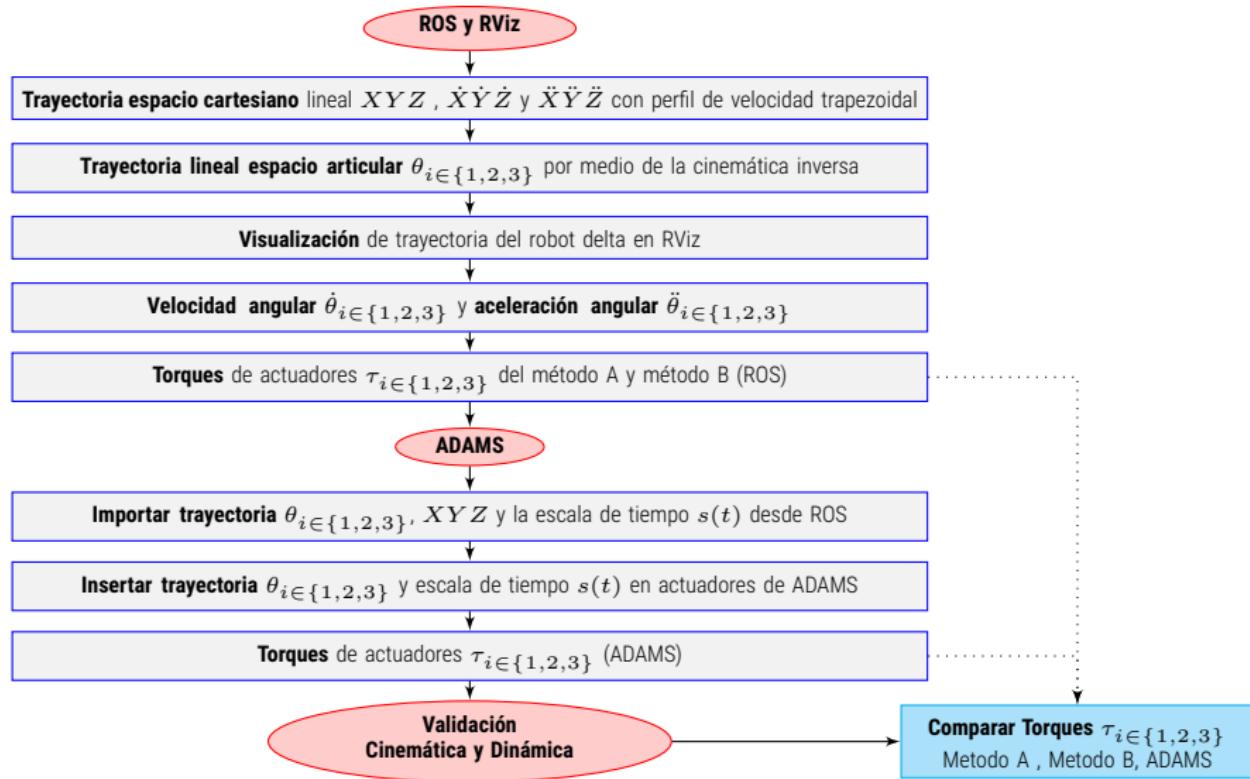
6 Resultados

- Visualización
- Dinámica inversa de trayectorias
- Espacio de trabajo

7 Conclusiones

8 Futuras líneas de investigación y referencias

# Desarrollo: Flujo de trabajo validación dinámica





# Desarrollo: Trayectorias simuladas

Las trayectorias que se crean para comprobar los algoritmos de cinemática y dinámica son:

Trayectoria	$P_i(x, y, z)[mm]$	$P_f(x, y, z)[mm]$	$v_{max}[\frac{mm}{s}]$	$a_{max}[\frac{mm}{s^2}]$
1	(-300,0,-450)	(300,150,-750)	2000	40000
2	(-300,-150,-450)	(300,150,-750)	2000	40000
3	<b>(300,-150,-450)</b>	<b>(-300,150,-750)</b>	<b>2000</b>	<b>40000</b>
4	(400,150,-450)	(-400,150,-450)	2000	40000
5	(-300,0,-450)	(300,150,-750)	200	10000
6	(-300,-150,-450)	(300,150,-750)	200	10000
7	<b>(300,-150,-450)</b>	<b>(-300,150,-750)</b>	<b>200</b>	<b>10000</b>
8	(400,150,-450)	(-400,150,-450)	200	10000

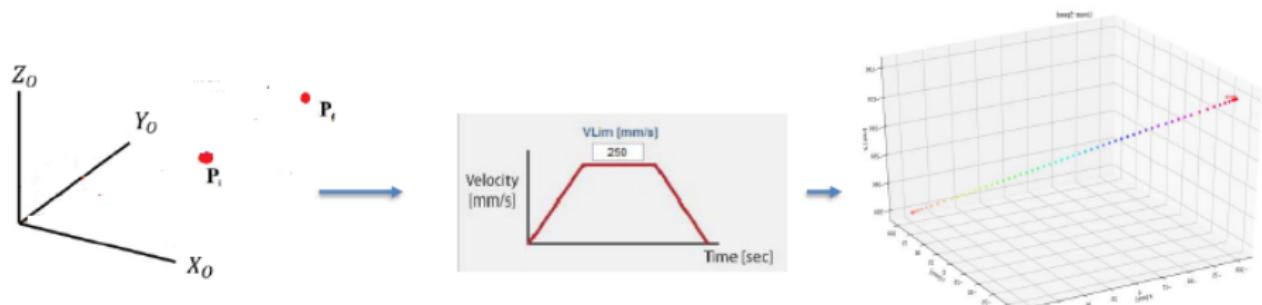
Trayectorias simuladas

# Desarrollo: Trayectoria



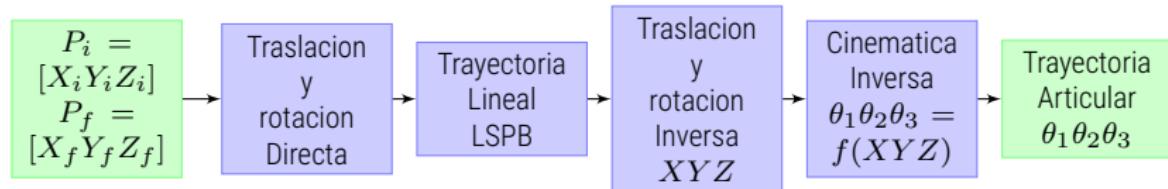
Puntos de la trayectoria en el **espacio cartesiano**  $XYZ$  y **espacio articular**  $\theta_1\theta_2\theta_3$  con **escala temporal**  $s(t)$

Entradas y salidas de la función de trayectoria

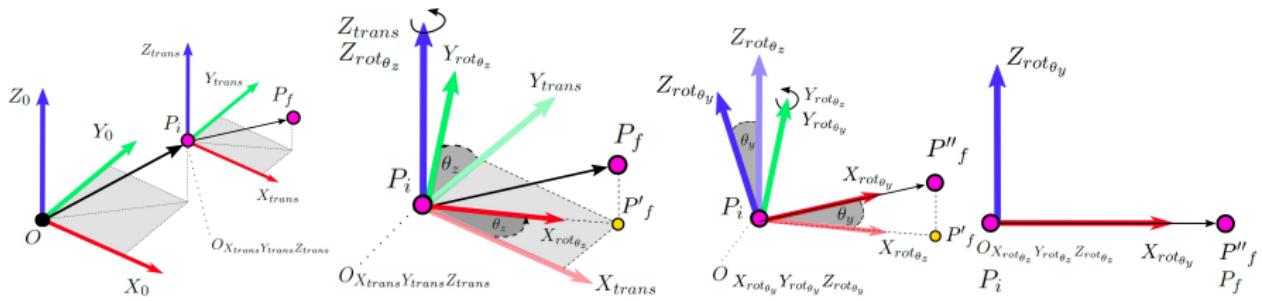


Ejemplo gráfico del diagrama de flujo para la creación de trayectoria lineal con perfil trapezoidal.

# Desarrollo: Trayectoria



Flujo de trabajo para la creación de trayectorias



(a) Traslación

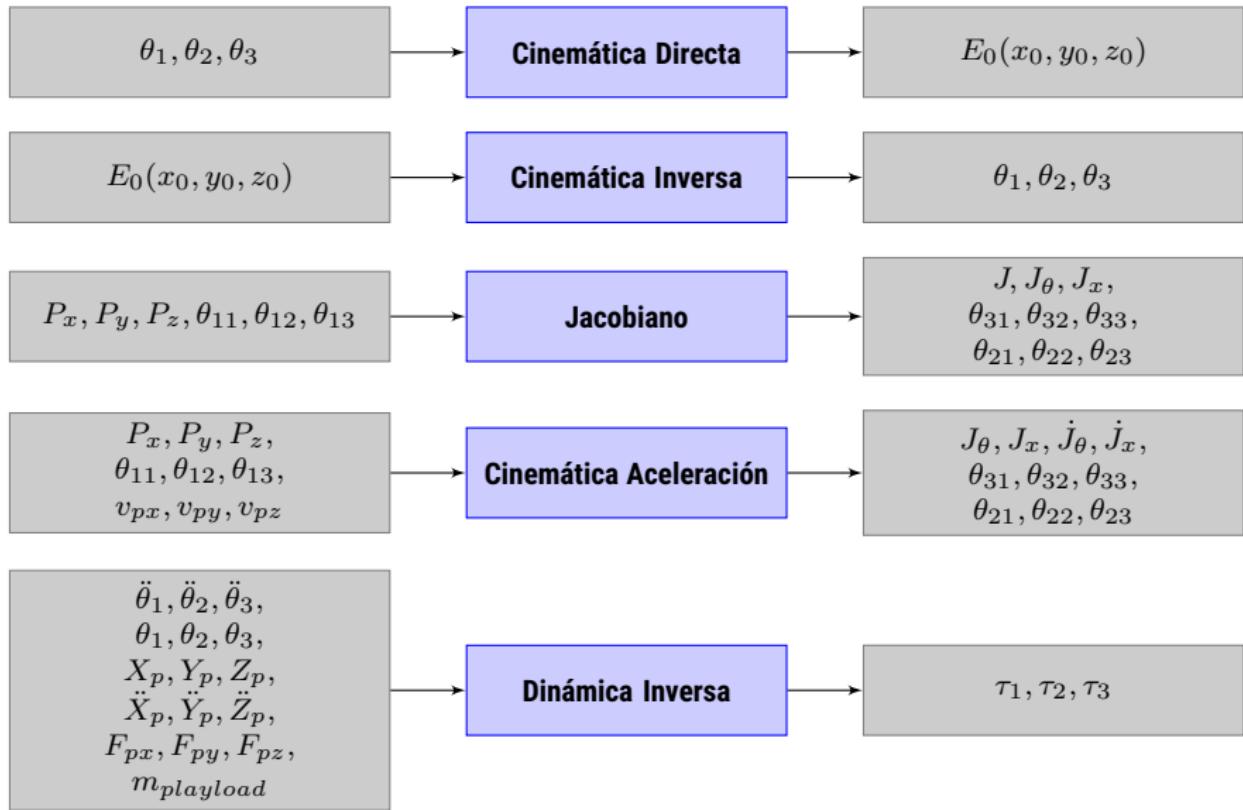
(b) Rotación  $\theta_z$

(c) Rotación  $\theta_y$

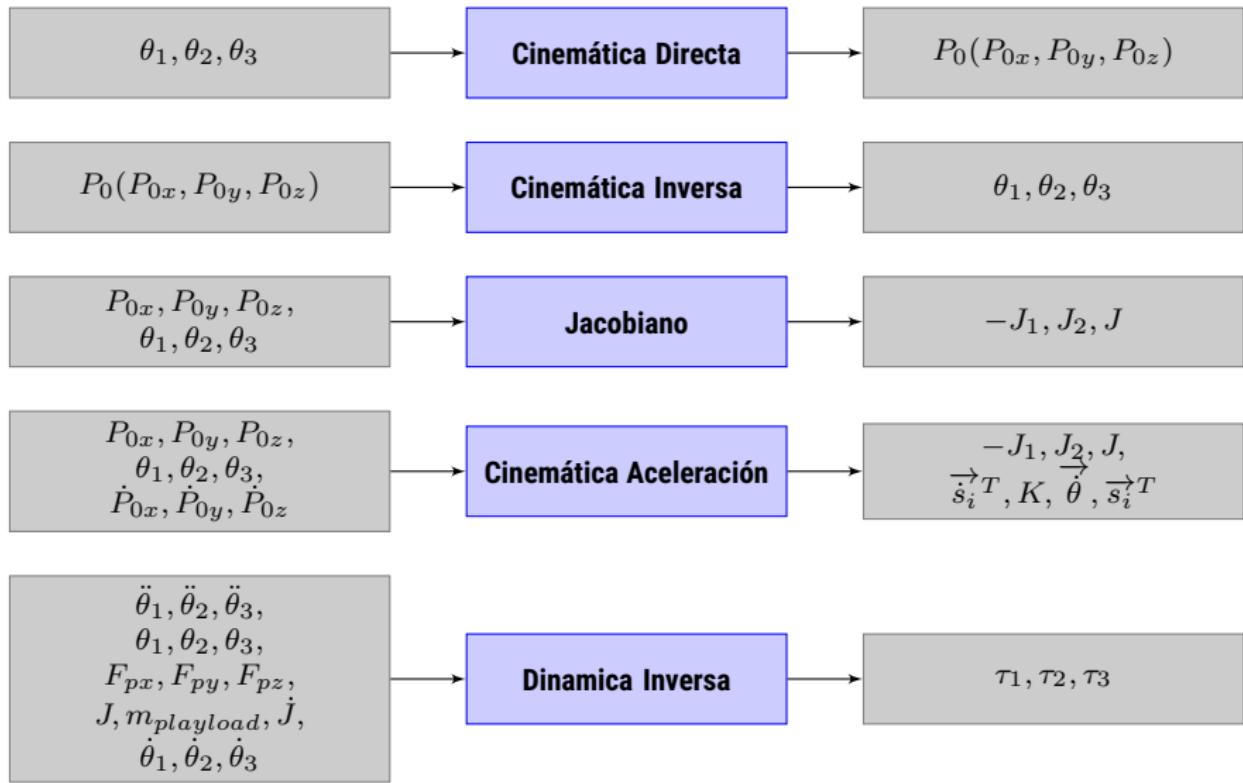
(d) Se aplica LSPB

Traslación y rotación directa ; aplicación de LSPB

# Desarrollo: Método A



# Desarrollo: Método B



# Desarrollo: ADAMS



DEPARTAMENTO DE  
INGENIERÍA  
MECÁNICA  
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE



## Trayectoria ROS

Trayectoria  $\theta_{i \in \{1,2,3\}}$

Trayectoria  $XYZ$

Escala de tiempo  $s(t)$

Ángulo  $\theta_{2i}$

Ángulo  $\theta_{3i}$

Nombres de juntas URDF



**Insertar modelo del  
robot (URDF) en RViz**

Diagrama de flujo de pasos para obtener la visualización del robot delta

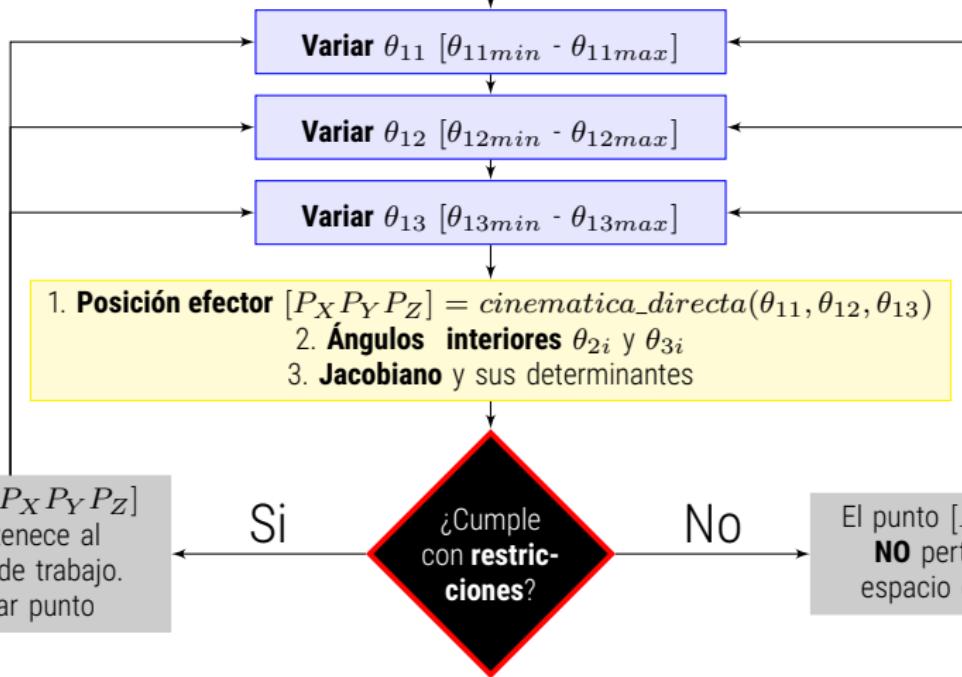
Simbología	Nombre
$\theta_{11}$	base_brazo1
$\theta_{12}$	base_brazo2
$\theta_{13}$	base_brazo3
$X$	act_x
$Y$	act_y
$Z$	act_z

Simbología	Nombre
$\theta_{21}$	codo1_a
$\theta_{31}$	codo1_b
$\theta_{22}$	codo2_a
$\theta_{32}$	codo2_b
$\theta_{23}$	codo3_a
$\theta_{33}$	codo3_b

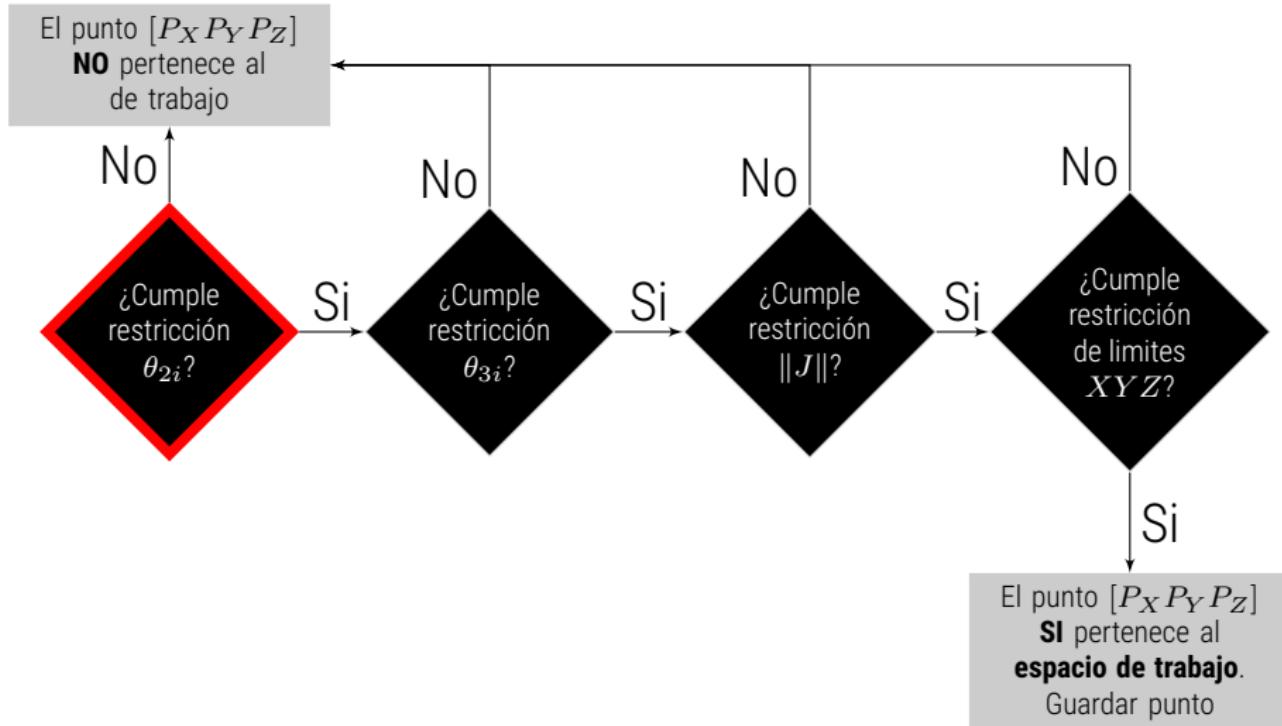
# Desarrollo: Espacio de trabajo



Dimensiones del robot y parámetros de **restricciones**



# Desarrollo: Espacio de trabajo



# Desarrollo: Espacio de trabajo



Restricción	Explicación	Min	Max
$\theta_{1i}$	Ángulo brazo	-90°	90°
$\Delta\theta_{1i}$	Discretización de rangos $\theta_{1i}$	5°	
$\theta_{2i}$	Ángulo interior	5°	175°
$\theta_{3i}$	Ángulo interior	45°	135°
$J_x$	Jacobiano base móvil	$6 * 10^{-1}$	
$J_\theta$	Jacobiano actuadores	$4 * 10^{-3}$	
$X$	Límite X de espacio de trabajo	-400[mm]	+400[mm]
$Y$	Límite Y de espacio de trabajo	-400[mm]	+400[mm]
$Z$	Límite Z de espacio de trabajo	-300[mm]	-750[mm]



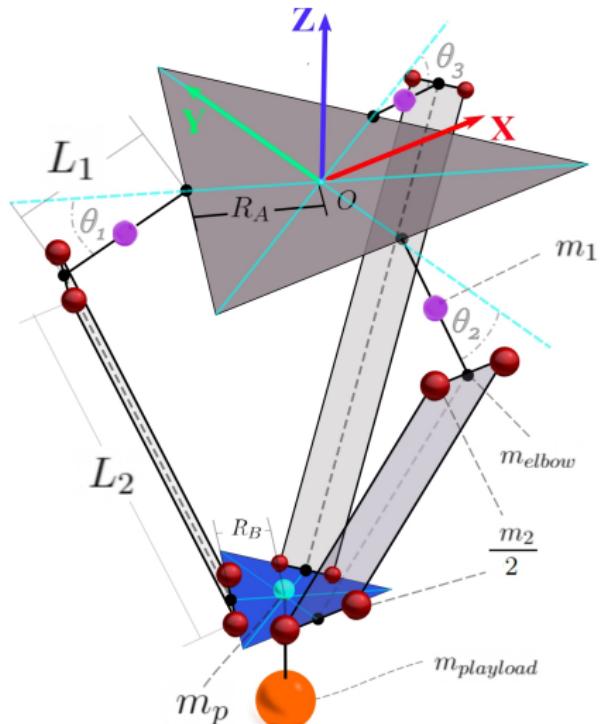
# Contenido

- 1 Motivación
- 2 Objetivos
- 3 Teoría
  - Flujo de trabajo para modelación cinemática y dinámica
  - Método A
  - Método B
  - ADAMS
  - Trayectoria
  - Visualización
  - Espacio de trabajo
- 4 Desarrollo
  - Trayectorias y torques de actuadores
  - Visualización
  - Espacio de trabajo
- 5 Especificaciones robot delta
- 6 Resultados
  - Visualización
  - Dinámica inversa de trayectorias
  - Espacio de trabajo
- 7 Conclusiones
- 8 Futuras líneas de investigación y referencias

# Especificaciones robot delta

Parámetro	Valor
$L_1$	620 [mm]
$L_2$	880 [mm]
$R_A$	210 [mm]
$R_B$	50 [mm]
$m_1$	2.213 [kg]
$m_2$	657.5 [kg]
$m_p$	0.510 [kg]
$m_{payload}$	0 [kg]
$m_{elbow}$	0 [kg]
$I_m$	0 [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]
$r_{mass}$	0.5
$g$	9.81 [m/s <sup>2</sup> ]

Parámetros robot delta



Representación gráfica robot delta



# Contenido

1 Motivación

2 Objetivos

3 Teoría

- Flujo de trabajo para modelación cinemática y dinámica
- Método A
- Método B
- ADAMS
- Trayectoria
- Visualización
- Espacio de trabajo

4 Desarrollo

- Trayectorias y torques de actuadores
- Visualización
- Espacio de trabajo

5 Especificaciones robot delta

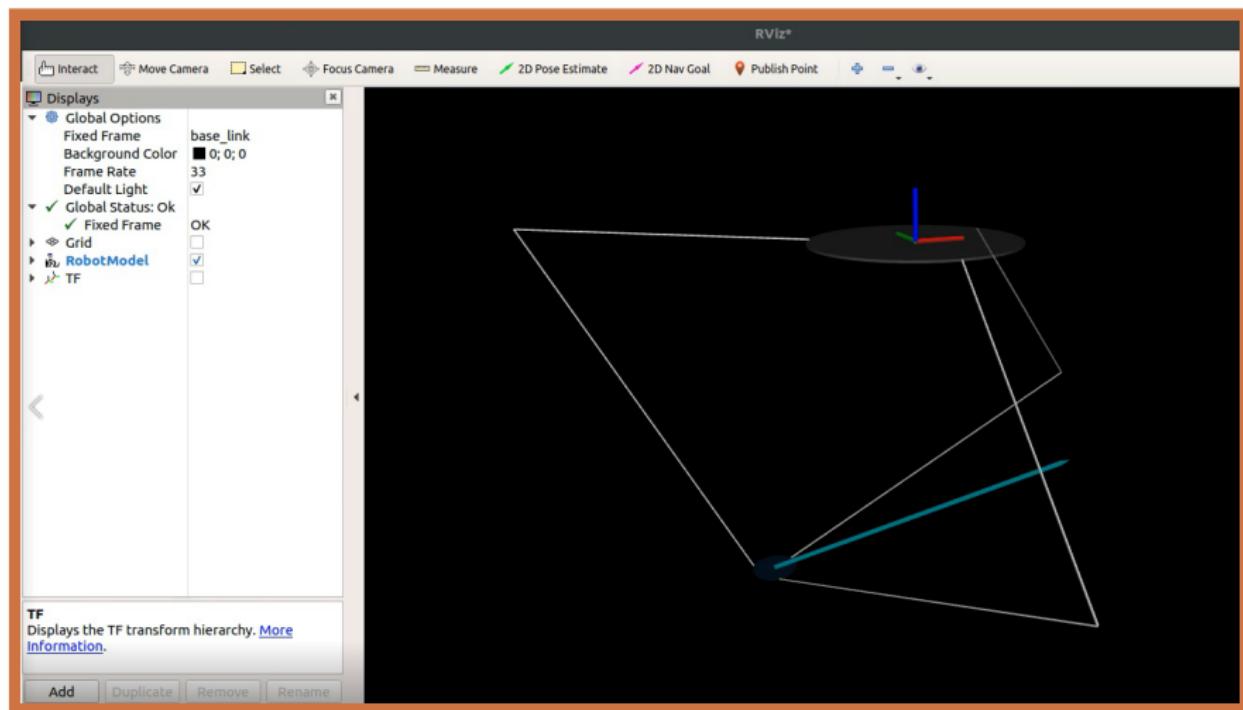
6 Resultados

- Visualización
- Dinámica inversa de trayectorias
- Espacio de trabajo

7 Conclusiones

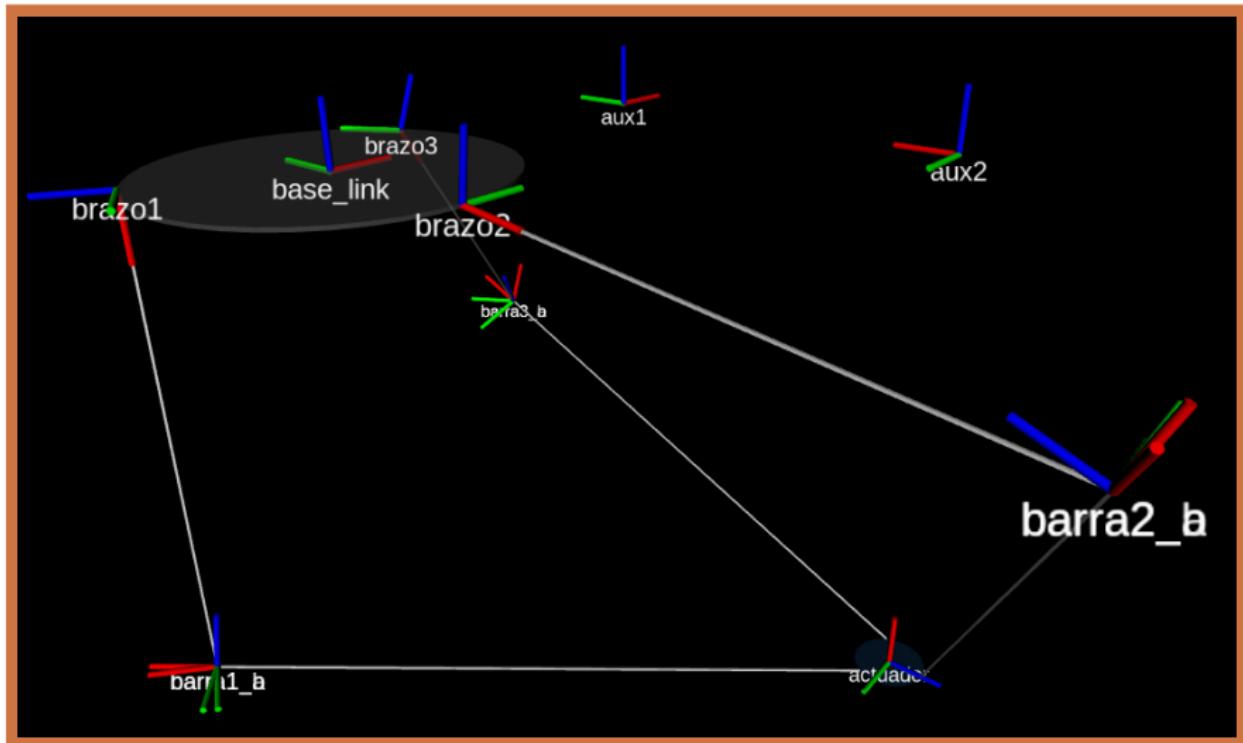
8 Futuras líneas de investigación y referencias

# Resultados: Visualización



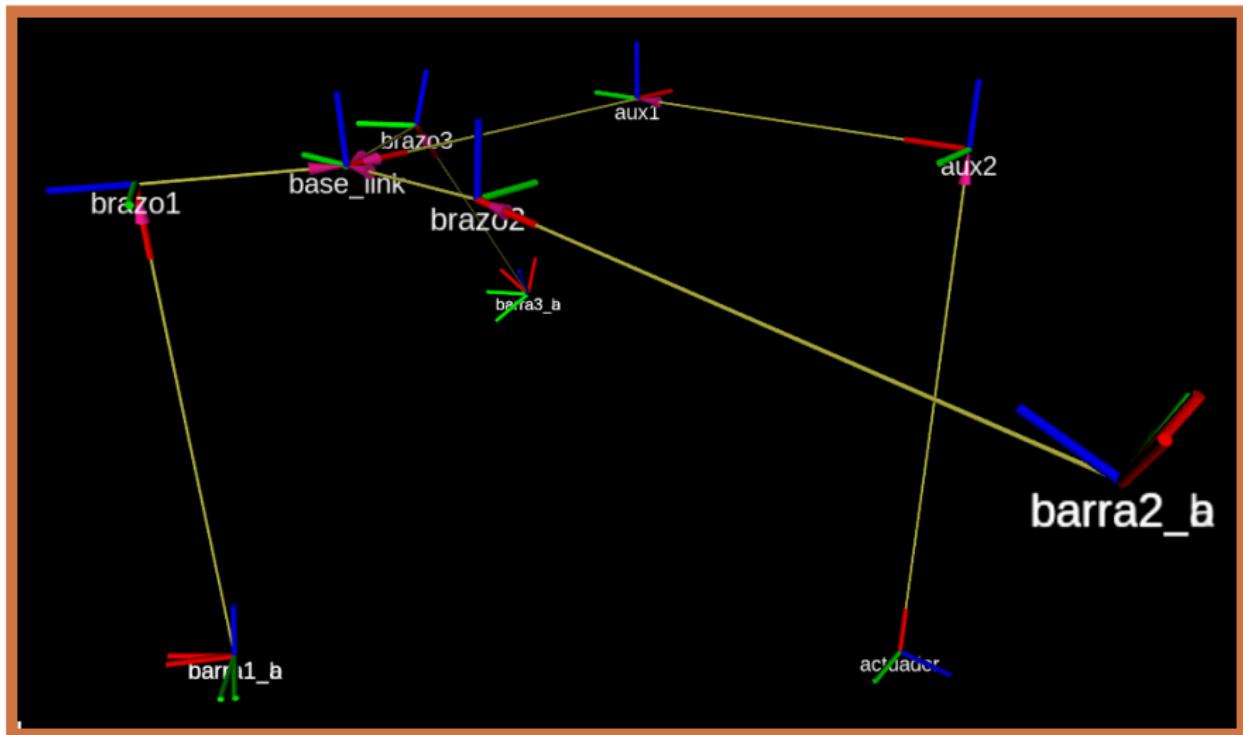
Posición final de simulación de trayectoria 3 en RViz

# Resultados: Visualización



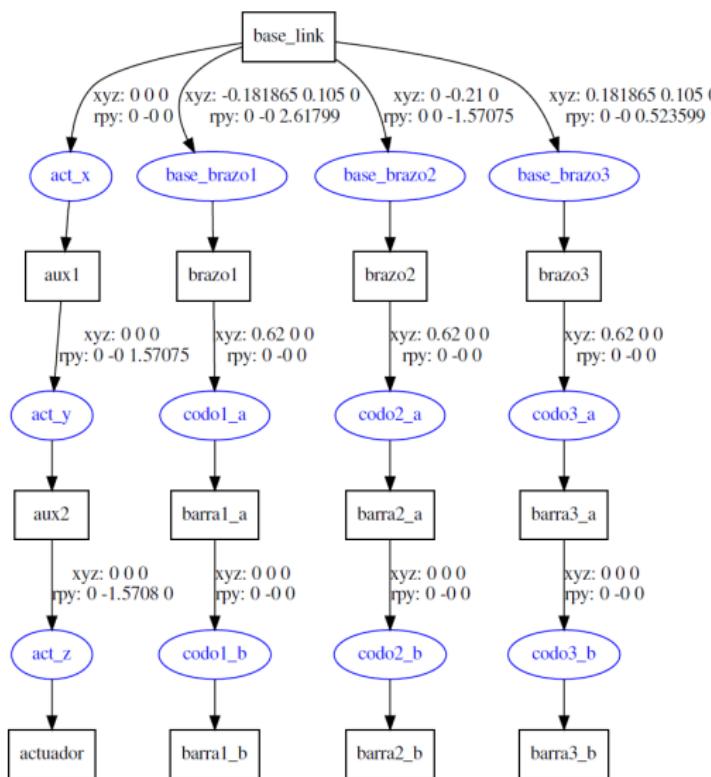
Visualizacion 3D de links y joints del robot delta en RViz

# Resultados: Visualización

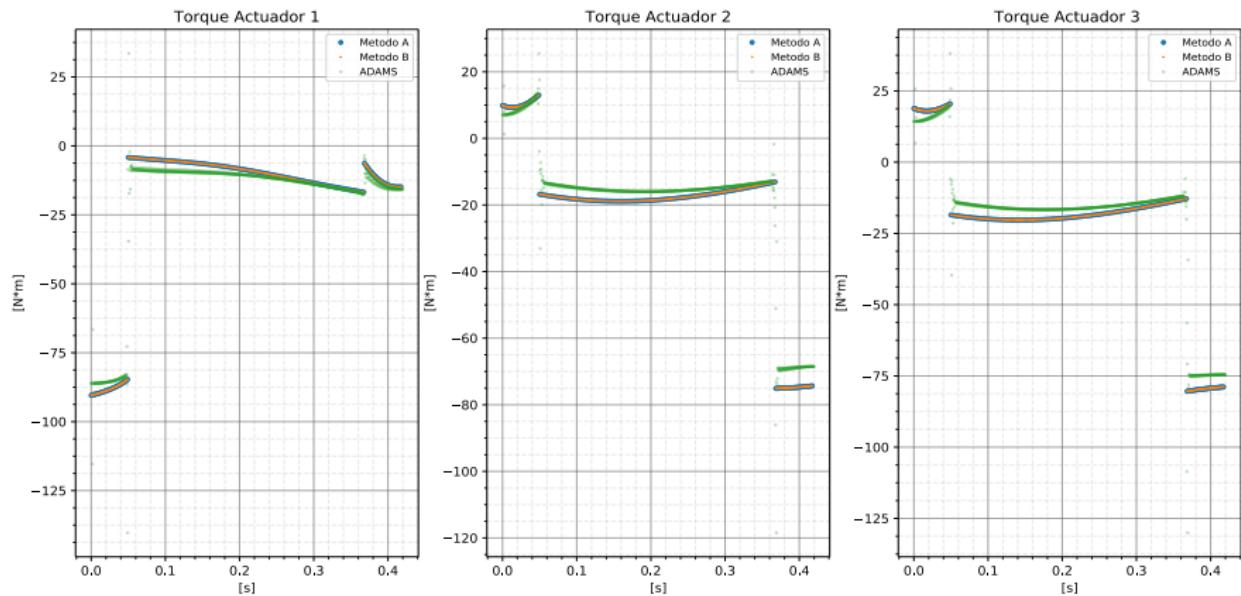


Conexión entre los links y joints del robot delta en RViz

# Resultados: Visualización

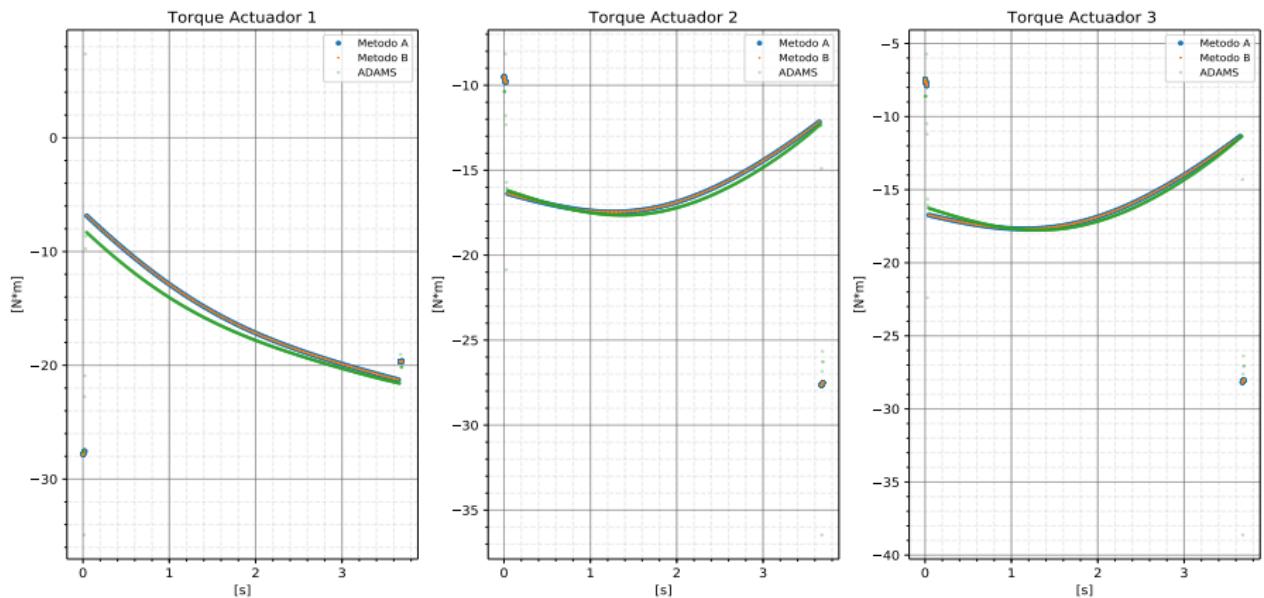


# Resultados: Dinámica inversa



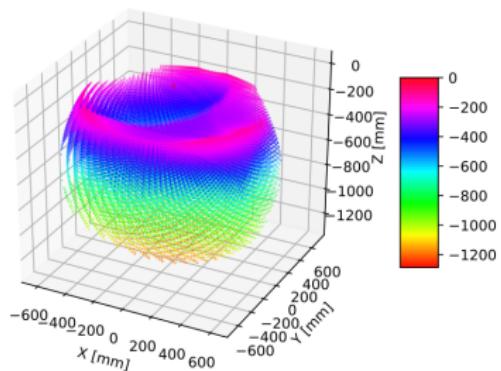
Torque de actuadores para trayectoria 3

# Resultados: Dinámica inversa

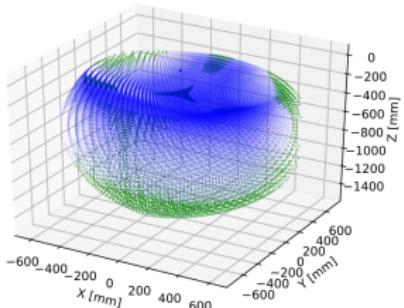


Torque de actuadores para trayectoria 7

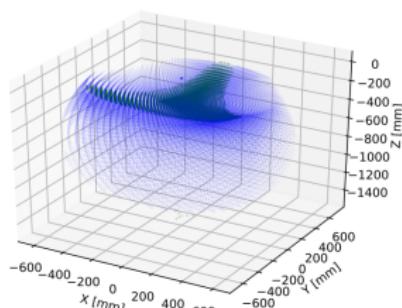
# Resultados: Espacio de trabajo



(a) Puntos alcanzables con restricciones angulares

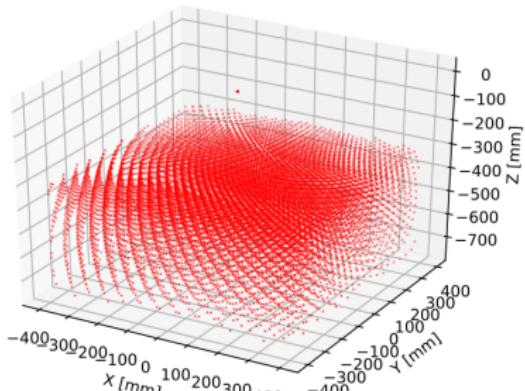


(b) Restricción  $J_x \approx 0$  (verde) y restricciones angulares

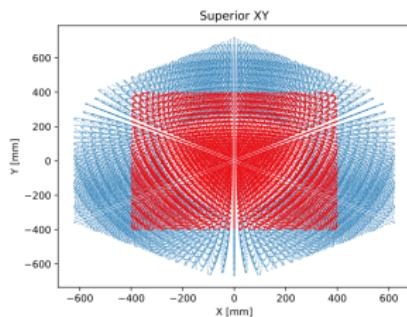


(c) Restricción  $J_\theta \approx 0$  (verde) y restricciones angulares

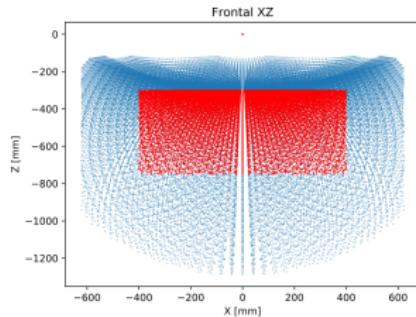
# Resultados: Espacio de trabajo



(a) Espacio de trabajo



(b) Vista plano  $X Y$  de restricciones angulares y espacio de trabajo



(c) Vista plano  $X Z$  de restricciones angulares y espacio de trabajo



# Contenido

- 1 Motivación
- 2 Objetivos
- 3 Teoría
  - Flujo de trabajo para modelación cinemática y dinámica
  - Método A
  - Método B
  - ADAMS
  - Trayectoria
  - Visualización
  - Espacio de trabajo
- 4 Desarrollo
  - Trayectorias y torques de actuadores
  - Visualización
  - Espacio de trabajo
- 5 Especificaciones robot delta
- 6 Resultados
  - Visualización
  - Dinámica inversa de trayectorias
  - Espacio de trabajo
- 7 Conclusiones
- 8 Futuras líneas de investigación y referencias

# Conclusiones

**1 ROS**

**2 Resultados torque trayectorias: Metodo A vs Metodo B vs ADAMS**

**3 Resultados visualización RViz:**

**4 Resultados espacio de trabajo:**



# Contenido

1 Motivación

2 Objetivos

3 Teoría

- Flujo de trabajo para modelación cinemática y dinámica
- Método A
- Método B
- ADAMS
- Trayectoria
- Visualización
- Espacio de trabajo

4 Desarrollo

- Trayectorias y torques de actuadores
- Visualización
- Espacio de trabajo

5 Especificaciones robot delta

6 Resultados

- Visualización
- Dinámica inversa de trayectorias
- Espacio de trabajo

7 Conclusiones

8 Futuras líneas de investigación y referencias

# Futuras líneas de investigación y referencias



## Futuras líneas de investigación

- **Optimización dimensional:** Basado en el menor consumo de energía.
- **Optimización de trayectoria:** Mínima energía y/o tiempo mínimo de trayectoria.
- **Trayectoria pick-and-place:** Curvas quínticas de Pitágoras-Hodógrafa (PH)
- **Calibración con redes neuronales:** Posicionamiento visual
- **Pinzas:** Manipulación de objetos frágiles
- **Visión por computadora:** Detección de objetos en cinta transportadora
- **Actuadores:** Motores paso a paso y control de drivers
- **Curva de torque:** Torques máximos y mínimos vs la velocidad angular

## Referencias

- **Repositorio** en GitHub del proyecto de tesis:  
[https://github.com/IvanFernandezGracia/delta\\_robot\\_tesis](https://github.com/IvanFernandezGracia/delta_robot_tesis)