



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## DISEÑO MECÁNICO EN DETALLE DE UN MANIPULADOR DE ARQUITECTURA PARALELA CON INTEGRACIÓN COMPLETA DE TECNOLOGÍAS AVANZADAS CAD/CAE.

Ing. Carlos Julio Camacho López, MSc.<sup>1</sup>, Juan David Nieto Yukopila<sup>2</sup>, William Zamir Muñoz Camelo<sup>3</sup>.

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia  
correo-e: [carloscamacho@usantotomas.edu.co](mailto:carloscamacho@usantotomas.edu.co)

<sup>2</sup> Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia  
Corro-e: [juannieto@usantotomas.edu.co](mailto:juannieto@usantotomas.edu.co)

<sup>3</sup> Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia  
Corro-e: [williammunoz@usantotomas.edu.co](mailto:williammunoz@usantotomas.edu.co)

### RESUMEN

Este trabajo plantea el diseño mecánico de un robot de arquitectura paralela de tres grados de libertad para aplicaciones Pick and Place. Este proceso fue desarrollado con la implementación de la metodología de diseño de productos y la integración de tecnologías CAD/CAE.

Durante la definición del diseño se empleó la técnica de Despliegue de la Función de Calidad (QFD), se evaluaron alternativas de solución y se definió el diseño en detalle teniendo en cuenta criterios de manufacturabilidad y ensamblabilidad (DFMA). Esto se complementó con la integración de las tecnologías CAD/CAE para agilizar el proceso de diseño. Definida la geometría de componentes y ensambles, se procede con el análisis estructural a partir del estado de cargas, transferido directamente de la simulación dinámica multicuerpos del recorrido crítico del manipulador, con los cuales se realizaron los análisis de elementos finitos, tanto en criterios estáticos como dinámicos de carga. Además se incorpora, de manera básica, la dinámica de cuerpos flexibles para combinar tanto la deformación elástica como el movimiento de cuerpos rígidos, permitiendo evidenciar el efecto de la flexibilidad de componentes en el funcionamiento y precisión del manipulador. El área temática del proyecto corresponde a D – Diseño y proyecto de componentes y maquinas.

**Palabras Claves:** *Diseño conceptual, integración CAD/CAE, cuerpos flexibles.*



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo, enmarcado dentro del proyecto *“Diseño y Fabricación de un manipulador industrial de arquitectura paralela de tres grados de libertad para aplicaciones pick and place”*, parte de los resultados de los trabajos cinemáticos y dinámicos realizados institucionalmente, en donde se creó interfaz paramétrica, por medio de ciertas medidas clave del manipulador y las respectivas masas, para determinar el movimiento de cada actuador y el torque necesario para cumplir con las trayectorias definidas [1]. Además se fabricó un prototipo funcional tipo delta de 3 cadenas cinemáticas (denominado PK43), a partir del cual se han llevado a cabo pruebas de posicionamiento y control de movimientos. Esto permitió realizar estudios sobre optimización del volumen de trabajo [2] y caracterización de los perfiles de desplazamiento, velocidad y aceleración [3].

El diseño mecánico del manipulador semi-industrial tipo delta, empieza con la implementación de la metodología de diseño conceptual [4, 5, 6]. Para determinar las dimensiones y/o geometría definitivas del modelo, se recurrió a las herramientas CAD/CAE para desarrollar simulaciones dinámicas de multicuerpos que determinen los estados de cargas teniendo en cuenta la interacción entre componentes. Los resultados de estas simulaciones permiten visualizar las condiciones dinámicas críticas (velocidad máxima y porcentaje de aceleración y desaceleración de la trayectoria, etc.), con las cuales el manipulador funciona correctamente. Además, con los estados de carga se realiza un manejo de datos para determinar aquellos puntos relevantes, dentro de la trayectoria crítica, con los cuales es necesario realizar un análisis estructural (estático y fatiga) para verificar el comportamiento de una parte específica del manipulador frente a las cargas presentes.

## 2 METODOLOGÍA DE DISEÑO

La metodología de diseño parte de lo que desea el cliente del producto, (requerimientos del cliente) y las limitantes (o restricciones) en diferentes ámbitos (económicos, dimensionales, técnicos, entre otros) para su realización. Las restricciones dimensionales del manipulador son obtenidas a partir de acotar, con base en el espacio total de trabajo, las zonas donde el manipulador presenta mayor destreza, para finalmente obtener un volumen que no presente singularidades. Realizando un trabajo de optimización dinámica se obtuvieron las medidas mínimas de la cadena cinemática para cubrir dicho volumen [2]. Estas restricciones se pueden apreciar en la Figura 1.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

# FoDAMI

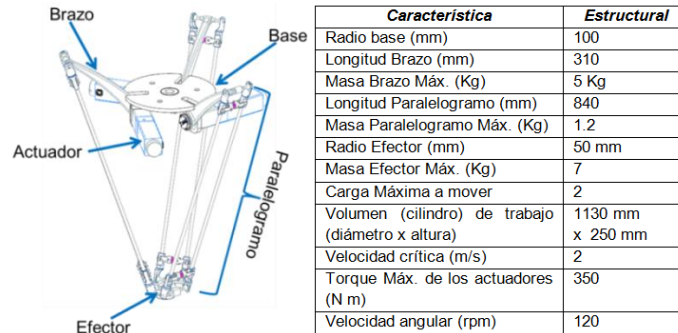


Figura 1. Estructura básica de un robot tipo Delta y las restricciones de diseño Fuente: [2]

Con esta información primaria, la matriz de despliegue de función calidad (QFD) traslada los requerimientos del cliente en objetivos de diseño medibles y permite identificar parámetros críticos, priorizando aquellos que deben ser cumplidos con mayor urgencia [4]. Posteriormente se desarrollan las funciones necesarias para cumplir con el objetivo principal del manipulador: “Transportar un producto de un punto en el espacio a otro, correctamente”. Teniendo claro qué desea el cliente y las funciones que debe cumplir el producto para lograr ese deseo, se evalúan cualitativamente con base en las funciones antes mencionadas y los criterios presentados por la metodología de DFMA [5, 6, 7], las alternativas de diseño. La metodología de diseño conceptual utilizada está detallada en la Figura 2.

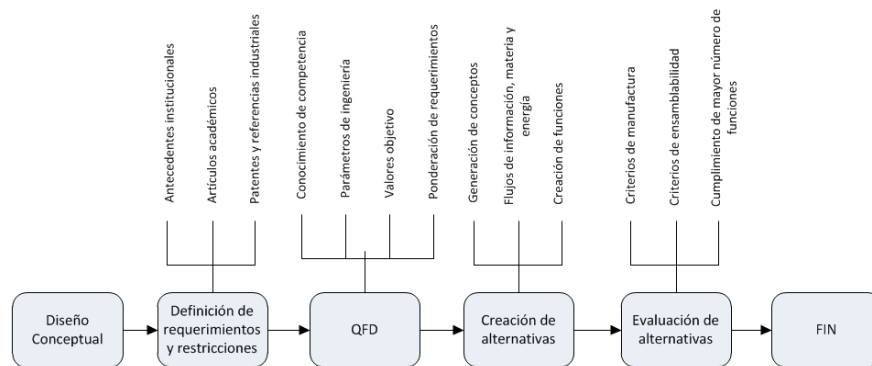


Figura 2. Diagrama de flujo del diseño conceptual. Fuente: [4]

## 2.1 Alternativas de diseño

Para el desarrollo de este apartado, primero se analizaron las diferentes fuentes de información, tanto académicas como industriales, para tener un punto de partida en la decisión de la topología inicial de los componentes cinemáticos, además para comprender las necesidades y condiciones a



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

las que se enfrenta en un entorno de trabajo real. Después de proponer las opciones posibles, se modelaron y detallaron, posteriormente se descartaron aquellas que tuviesen problemas básicos que impidieran un movimiento libre del manipulador en el volumen de trabajo y elementos que necesitaran de nuevos equipos para su fabricación. Acto seguido, teniendo en cuenta las funciones propuestas se realizó una evaluación detallada del grado de satisfacción de cada alternativa frente a dichas funciones. Finalmente, la alternativa que tuviese una mayor calificación sería la seleccionada. Las opciones seleccionadas se puede observar en la Tabla 1. y se corrigieron, con ayuda de las herramientas CAD, basados en las funciones donde presentaron deficiencias.

Tabla 1 Diagrama selección de alternativas propuestas para cada de la cadena cinemática

Componente	Alt. 1	Alt. 2	Componente	Alt. 1	Alt. 2
Base			Unión Paralelogramo		
Brazo			Efector		
Junta o unión			Estructura		

### 3 SIMULACIÓN DINÁMICA DE MULTICUERPOS

Este método consiste en aislar una parte o cuerpo, definido como un conjunto de subsistemas (rígidos y/o deformables), donde sus movimientos están interconectados entre sí por medio de juntas cinemáticas y/o fuerza externas, y que a fin de estudiar su comportamiento son reemplazados por fuerzas y momentos equivalentes a los producidos por interacción entre elementos del sistema original. [8].

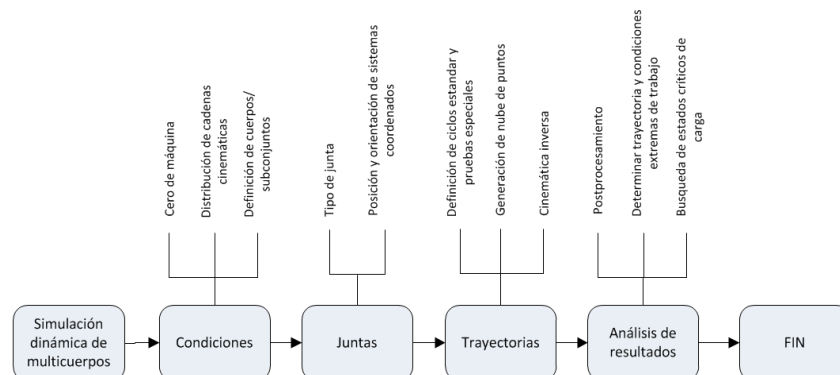


Figura 3. Diagrama de flujo de proceso de simulación dinámica de multicuerpos



### 3.1 Condiciones de la simulación

Con respecto a la cinemática inversa y las dimensiones optimas de este tipo de robots desarrollado en procesos previos de esta investigación [1, 2], el modelo virtual cumple con los siguientes criterios dimensionales:

- *La distribución de las tres cadenas cinemáticas:* Debido a la arquitectura, cada cadena cinemática debe estar espaciada a un ángulo de  $120^\circ$  respecto al mismo eje. El diseño del componente Base es el que garantiza la precisión del montaje.
- *Posicionamiento del sistema Coordinado General:* El plano XY del sistema absoluto del ensamble se encuentra en el mismo plano del centro de los motores, requerido para garantizar movimientos reales en los servomotores.
- *Cero de máquina:* La posición del centro del eje de los motores y del centro de las juntas esféricas entre el paralelogramo y el brazo deben encontrarse en el mismo plano (Ver Figura 4).
- *Coincidencia de coordenadas:* Si el mecanismo está posicionado en el cero de máquina, las coordenadas XY tanto del centro de la base como del efector, deben coincidir.
- *Definición de elementos:* Buscando simplificar el número de elementos a analizar, se seleccionaron los componentes principales de la arquitectura básica del robot, eligiendo aquellas piezas que tienen una sujeción directa con los elementos principales (brazo, efector, etc.) y así conformar un sólido principal de estudio.
- *Masa de los componentes:* La masa de cada elemento de análisis se concentra en el centroide del mismo.

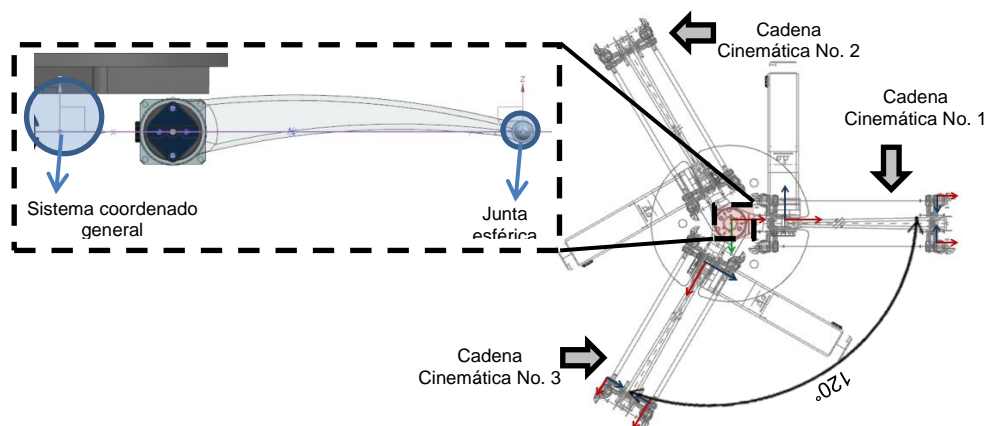


Figura 4. Disposición de los CSYS de las juntas de revolución y las juntas esféricas superiores (Brazo ubicado en posición cero máquina)



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## 3.2 Definición de juntas y sistemas coordenados relativos

Las juntas representan la unión entre componentes mecánicos y las cuales restringen el movimiento de un sistema multicuerpo; sin ellas, un elemento se encuentra libre en el espacio (6 grados de libertad). Las juntas utilizadas en el modelo dinámico fueron definidas para restringir adecuadamente cada componente del modelo virtual y lograr una proximidad con el manipulador en condiciones reales. Para la implementación de una herramienta computacional CAE, inicialmente se debe configurar y definir adecuadamente la posición y orientación de los sistemas coordenados de cada una de las juntas, ya que el software calcula las fuerzas y momentos presentes en cada una según el sistema coordenado general (ver Figura 4).

## 3.3 Definición de las trayectorias

Para hablar de la determinación de las trayectorias de simulación se debe recordar el espacio o volumen de trabajo definido por optimización [2], el cual consiste en un cilindro a una distancia de 600 mm del plano XY desde el sistema coordenado general de la máquina. Este cilindro tiene un diámetro de 1130 mm y una altura de 250 mm. Teniendo en cuenta estas dimensiones, se realizaron las simulaciones para verificar el desempeño del robot en diferentes condiciones de velocidad y de desplazamiento.

Dichas simulaciones parten de una nube de puntos en el espacio, que definen la trayectoria a seguir por el efector final, y por medio de la aplicación de cinemática inversa se tradujeron a movimientos angulares en cada uno de los servomotores del manipulador. Puesto que este tipo de robots son utilizados por su alta rigidez frente a movimientos de alta velocidad, fue necesario desarrollar perfiles suavizados de velocidad durante cada trayectoria, y así controlar la aceleración y desaceleración del movimiento del manipulador, con el fin de reducir los esfuerzos en el manipulador (ver Figura 5). Esto fue llevado a cabo por el grupo de investigación MAIR de la Universidad Santo Tomás [3].

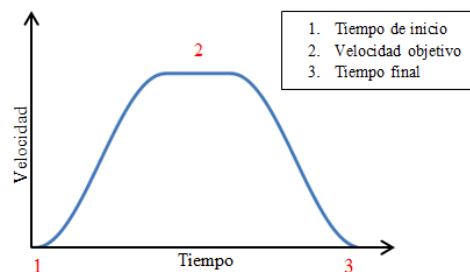
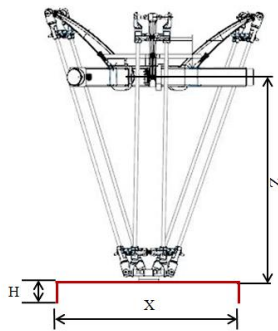


Figura 5. Perfil de velocidad senoidal



Para la selección de las trayectorias, se tomó como referencia y parámetro de comparación, los ciclos industriales estándar empleados para la evaluación de este tipo de robots por diferentes empresas especializadas en este campo [9, 10, 11]. Además se realizaron unas pruebas especiales para evaluar si el manipulador no presentaba colisiones e interferencia entre sus componentes dentro del barrido del volumen de trabajo. Las dimensiones, geometría y posición en el espacio de las trayectorias se muestran en la Figura 6.



Prueba	Z (mm)	X (mm)	H (mm)
C2530525	600	305	25
C2571025	600	710	25
C2501130250	600	1130	250
CPRUEBA	600	710	50

Figura 6. Medidas y locación de las pruebas de simulación dinámica

### 3.4 Análisis de resultados

El post-proceso de las simulaciones dinámicas permite determinar el torque necesario para realizar las trayectorias propuestas, y además se tiene un criterio de decisión para definir las variables de trabajo críticas del manipulador.

Debido a la gran cantidad de datos, puesto que los resultados son presentados como componentes de fuerzas y momentos presentes en cada junta, en cierto intervalo de tiempo, se desarrolló un método de filtrado con el fin de para hallar los estados críticos de carga. Este método parte de la situación encontrada en la obtención de datos, donde las zonas de alta aceleración dentro de la trayectoria coincidían con los puntos de mayor magnitud de fuerza (y momento) de las diferentes juntas. Estos lugares, a su vez, empatan con las zonas del ciclo donde, debido a la forma de la trayectoria, el manipulador se detiene para cambiar de dirección. Este fenómeno se presenta por la inercia de los componentes, ya que para mantener su recorrido este debe generar una carga mayor a la producida por la masa de los elementos, presentando los picos de carga (ver Figura 7). Por lo tanto, la selección se realizó filtrando las mayores aceleraciones presentes en el efector, para cada prueba, ya que es allí donde se concentra la energía cinética del manipulador [12], y tomando dichos tiempos, se trasladó a la información antes presentada para generar los estados de carga con los cuales se realizaron los diferentes casos de análisis de elementos finitos. De las pruebas simuladas, se determinó que la trayectoria conocida como CPRUEBA, realizada con una velocidad de 1400 mm/s y un porcentaje de aceleración del 30%, es la que representa,



estructuralmente, el límite de trabajo para el manipulador. Con estas condiciones, el manipulador alcanza el ciclo estándar 25/305/25 en 0.5071 segundos, indicando que el robot diseñado es 1.7 veces más lento, respecto a nuestro competidor industrial más cercano: el manipulador ABB IRB 360.

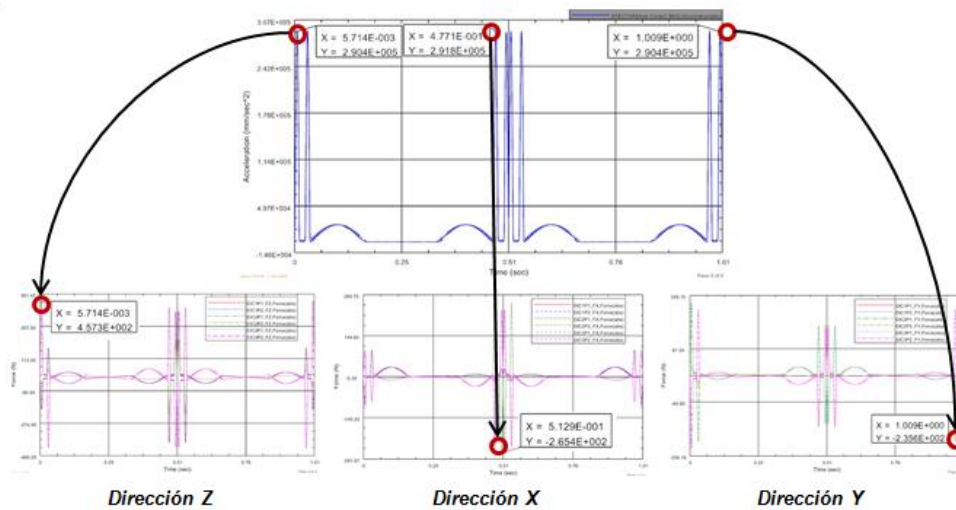


Figura 7. Aceleración ( $\text{mm/s}^2$ ) sobre el centroide del efector (superior) y componentes de fuerza (N) aplicadas sobre las juntas del efector (inferior) en el ciclo CPRUEBA.

#### 4 ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Para el proceso de enmallado en los diferentes elementos, se realizó un proceso de control de malla a priori, dependiendo de los lugares donde existiera un posible concentrador de esfuerzos y lugares críticos según ciertos criterios teóricos.

Los estados de carga seleccionados, debido a que son componentes de carga puntuales, fueron conectados a las juntas por medio de un enmallado 1D, con el fin de transmitir su acción al área enmallada circundante. Además, gracias a la integración de las simulaciones dinámicas multicuerpos y FEA no fue necesario aplicar restricciones sobre el modelo, ya que al aislar los elementos del ensamble total, los estados de carga obtenidos son la reacciones presentes para compensar el movimiento realizado por el manipulador durante las trayectorias.

Las piezas del ensamble fueron conectadas por medio de un contacto sin fricción, el cual no permite un movimiento relativo entre elementos pero tiene en cuenta los esfuerzos de contacto entre piezas, ya que genera una malla donde los nodos superficiales coinciden entre sí. En la Figura 8 se puede observar el proceso de preparación y análisis de elementos finitos realizado con uno de los componentes.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

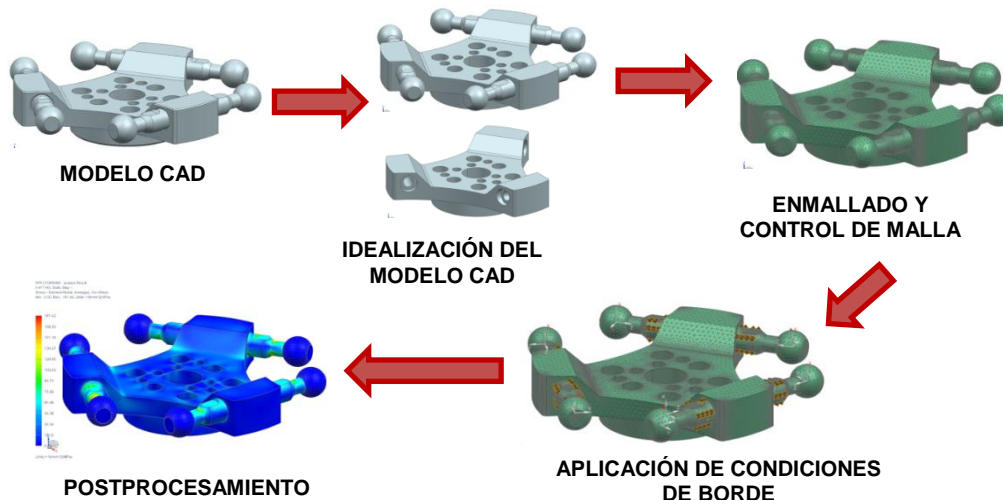


Figura 8. Proceso de preparación y análisis de elementos finitos

Para obtener una mayor precisión de los datos, con los estados de carga se generó una serie de casos de análisis para determinar la condición crítica del manipulador. Posteriormente en el caso de mayor magnitud en los esfuerzos, por medio del método convergencia, las zonas donde se presentará un alto valor de esfuerzo concentrado, se realizó un refinamiento de malla con el fin de tener una mayor fidelidad de los resultados.

## 4.1 Análisis de fatiga

Las propiedades de fatiga se definieron según las variables que definen la curva de esfuerzo-vida de cada material, es decir el coeficiente y exponente de resistencia a la fatiga. Dependiendo del tipo de material, dúctil o frágil, se usaron los principios de vida infinita o el límite de resistencia a la fatiga respectivamente. Debido a las posibilidades y limitaciones del software de análisis, además de tener como fin simplificarlo, se tuvieron en cuenta las siguientes suposiciones:

- *Superficies a analizar libres de esfuerzos de tracción localizados (Esfuerzos por montajes y efectos residuales del procesos de fabricación)*
- *Definición del ciclaje:* El ciclo de esfuerzos se obtiene del valor esfuerzo máximo presentado en el elemento y se repite, en forma de onda triangular completamente reversible  $n$  veces. El manipulador se somete a 500 horas, que representan el trabajo pesado de una máquina de uso continuo. En ciclos equivalen a  $1 \cdot 10^7$  ciclos aproximadamente.
- *Cargas Proporcionales:* Se asume que la relación entre los 2 esfuerzos principales es constante. Esta relación es conocida como *relación biaxial*.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

- *Aproximación de amplitud efectiva de Von Mises*: Después de seleccionar los dos ejes principales y la dirección de carga primaria, se procesan los datos de esfuerzo, teniendo en cuenta la suposición de carga proporcional, se calcula la amplitud y el esfuerzo medio de la prueba. Una vez realizado, se usa la relación biaxial para actualizar las ecuaciones de esfuerzo-vida.

Durante el post-procesamiento se usó el factor de seguridad por fatiga, el cual compara el esfuerzo último a tensión, corregido según las condiciones del elemento, con los esfuerzos generados por una carga repetida completamente reversible, donde el valor máximo es obtenido directamente de los resultados del análisis estructural. Estos resultados tienen en cuenta una corrección teórica de la curva de esfuerzo-deformación, debido a que las propiedades mecánicas del material pueden variar gracias a la repetición de la fuerza por un tiempo prologando. En la Figura 9 se muestra el resultado del análisis de fatiga, donde un valor inferior a 1, color rojo, significa que se presentará un inicio de grieta en dicho lugar a los ciclos definidos con anterioridad.

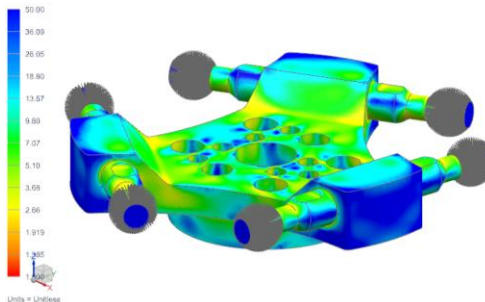


Figura 9. Factor de seguridad por fatiga del efector final

## 4.2 Elementos Flexibles

La capacidad de flexibilidad solamente se aplicó sobre las barras de los paralelogramos principalmente, debido a que su gran longitud y su sección transversal pequeña, presenta poca rigidez por lo que se considera un elemento a tener en consideración por su esbeltez [13, 14], Los resultados arrojados muestran que sobre los puntos extremos, donde comienza y/o terminan los recorridos, en este caso las rectas, se presentan las mayores variaciones respecto a la trayectoria programada (ver Figura 10). Esto se presenta debido a los cambios de velocidad, se generan unos picos de aceleración, por lo cual la inercia de los componentes móviles contribuye a generar pequeñas deformaciones que se ven reflejadas en las desviaciones de la trayectoria original. Estas se encuentran en el orden de 1.8 centésimas de milímetro. Esto indica que las condiciones de trabajo críticas, afectan la precisión por encima del valor máximo permisible, por lo cual es



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

recomendable disminuir estas variables para conseguir la repetibilidad necesaria para trabajar en las aplicaciones “*pick and place*”.

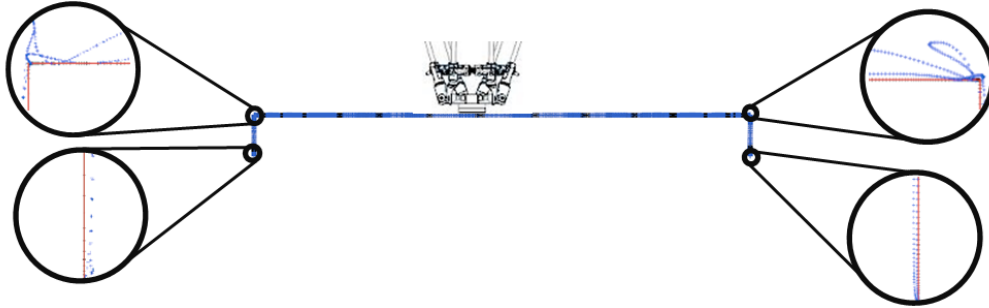


Figura 10. Variaciones de la trayectoria original

## 5 CONCLUSIONES

- La integración CAD/CAE dentro del proceso de diseño de un producto representa para la ingeniería concurrente una gran ayuda. Su principal ventaja es que dentro del proceso de definición y desarrollo del producto permite una gran flexibilidad, ayudando a visualizar y corregir problemas eficazmente, de manera que los cambios de topología, propiedades o dimensiones de un elemento, se puedan ver reflejados en el comportamiento dinámico o estructural en poco tiempo. Resaltando que los avances y exactitud lograda se debe reconocer en parte a la aplicación de la teoría en los diferentes procesos de ingeniería, pues es esta la que permite comprender los problemas y tener la metodología para llegar a soluciones más eficientes.
- Debido a limitaciones técnicas, no se realizó un estudio de elementos flexibles en todos los componentes móviles del manipulador, por lo cual es un punto para profundizar en posteriores proyectos de investigación. Además se espera realizar una validación del modelo computacional del comportamiento estructural y dinámico del prototipo en actual construcción, con el fin de calibrar el modelo virtual con datos más precisos de las condiciones mecánicas y dinámicas.
- Las máquinas de precisión generan un campo de investigación en el que se puede ahondar aprovechando las facilidades que ofrecen las herramientas CAD/CAE, desarrollando avances importantes en temas como la dinámica de cuerpos continuos, co-simulación, calibración del modelo virtual, entre otros. Aunque es necesario disponer de tiempo y esfuerzo debido a la complejidad del problema, existe un gran campo de acción para perfeccionar el modelo virtual en áreas como: optimización topológica, análisis de vibraciones, dinámica de cuerpo y juntas flexibles que permitirán obtener una mayor exactitud en los datos finales.



# IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO  
DOCENTE  
DEL AREA  
MECANICA  
DE LAS  
INGENIERIAS

FoDAMI

## REFERENCIAS

- [1] U. Garcia, «Torque analysis of a three translational degrees of freedom parallel manipulator,» p. 71, 2011.
- [2] J. E. C. Barrantes, Diseño óptimo dimensional de una máquina-robot de arquitectura paralela tipo delta para aplicaciones pick and place, Bogotá: Universidad Santo Tomás (sede Bogotá), 2013.
- [3] J. A. García, «Generación de trayectorias rectas, utilizando perfiles suavizados de velocidad, en máquina con arquitectura paralela pkmr -3dof».
- [4] D. G. Ullman, The Mechanical Design Process, Cuarta ed., Mc Graw-Hill (Higher Education), 2010.
- [5] G. Boothroyd, Assembly Automation and Product Desing, Segunda ed., Taylor & Francis Group, 2005.
- [6] G. Boothroyd, P. Dehurst y W. Knight, Product Design for Manufacture and Assembly, Segunda ed., Marcel Dekker Inc., 2002.
- [7] D. E. Whitney, Mechanical assemblies. Their Design, Manufacture, and Role in Product Development, Primera ed., Oxford University Press, 2004.
- [8] A. A. Shabana, Dynamics of Multibody Systems, Tercera ed., Cambridge University, 2005.
- [9] «ABB,» [En línea]. Available: <http://www.abb.com/product/us/9AAC129475.aspx?country=CO>. [Último acceso: 7 Marzo 2013].
- [10] «Adept,» [En línea]. Available: <http://www.adept.com/products/robots>. [Último acceso: 15 Marzo 2013].
- [11] «S.E.P. Solutions,» [En línea]. Available: <http://www.elau.com/en/home>. [Último acceso: 11 Marzo 2013].
- [12] J. Merlet, Parallel robots, Springer, 2006.
- [13] Y. L. Hwang, «A new approach for dynamic analysis of flexible manipulator systems,» *Elsevier*, vol. 40, p. 925 – 938, 29 September 2004.
- [14] P. E. Santosha Kumar Dwivedy, «Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review,» vol. 41, pp. 749-777, 2006.