

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
VICERRECTORÍA ACADÉMICA GENERAL
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
7ª Convocatoria interna de Proyectos de Investigación 2012-2013
“Sede Principal y Vicerrectoría Universidad Abierta y a Distancia”

GUÍA PARA LA PRESENTACIÓN DE PROYECTOS

I. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Los proyectos de investigación deberán inscribirse como parte de una de las líneas de investigación establecidas por la Universidad.

Denominación de la línea Medular (máximo 5 renglones)	Línea Alberto Magno: ciencia, tecnología y medio ambiente
Denominación de la línea(s) Activa(s) (máximo 10 renglones)	Diseño mecánico asistido por computador Robótica y automatización
Pertinencia del proyecto dentro de la línea(s) Activa(s) (máximo 10 renglones)	El proyecto está enfocado al diseño, construcción y puesta en marcha de un sistema mecánico que pueda ser empleado en un robot para la manipulación de materiales. Se continúa la exploración iniciada en los semilleros de Ingeniería Mecánica y en el grupo de investigación GEAMEC en el campo de la aplicación de los mecanismos paralelos en manipuladores robóticos. El estudio mecánico de este tipo de manipuladores es imprescindible para el diseño y fabricación del dispositivo así como para el planteamiento del control. De manera puntual este proyecto fortalece, dinamiza y da continuidad a la línea activa de investigación “robótica” de la División de Ingenierías, la cual posee amplia trayectoria en la institución Universidad Santo Tomás, con un aporte disciplinar desde la Facultad de Ingeniería Mecánica.
Programa académico o unidad académica que sustenta la línea: Ingeniería Mecánica	

1. INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Título del proyecto: Diseño y Fabricación de un manipulador industrial de arquitectura paralela de tres grados de libertad para aplicaciones pick and place.		
Investigador Principal: Henry Octavio Cortés Ramos Correo electrónico: henrycortes@usantotomas.edu.co Teléfono: 3135922237		
Dirección de correspondencia: Diagonal 83, No. 73-15		
Nombre del Grupo de Investigación: Grupo de Estudios y Aplicaciones en Ingeniería Mecánica GEAMEC (COL0003688).		Total de Investigadores: (2)
Investigadores que componen el grupo	Dirección electrónica	Calidad
1. Henry Octavio Cortés Ramos 2. Carlos Julio Camacho López 3. 4. 5.	henrycortes@usantotomas.edu.co carloscamacho@usantotomas.edu.co	Investigador principal Coinvestigador
Facultad y Programa Académico en el que presta servicios el investigador principal: Facultad de Ingeniería Mecánica		
Línea de Investigación: Diseño mecánico asistido por computador, Simulación numérica.		
Lugar de Ejecución del Proyecto: Ciudad: Bogotá Departamento: Cundinamarca		
Duración del Proyecto (en meses): 11		
Tipo de Proyecto: (marque con x) Investigación Aplicada() Desarrollo Tecnológico (X) Investigación Básica () Desarrollo productivo o empresarial ()		
Tipo de Financiación solicitada:		
Financiamiento Total:		\$ 20.000.000.00
Valor solicitado a la Universidad (FODEIN):		\$ 20.000.000.00
Valor Contrapartida/Unidad Académica:		\$ 27.606.000.00
Valor Contrapartida/Convenio entidad externa:		\$ 0-
Valor total del Proyecto:		\$ 47.606.000.00
Descriptor / Palabras claves:		Diseño Óptimo, CAD/CAE, DFMA, Manipuladores, Arquitectura paralela, Pick and Place

2. RESUMEN EJECUTIVO DEL PROYECTO

En este anteproyecto de investigación se propone el diseño y construcción de un manipulador industrial tipo delta que será utilizado en aplicaciones pick and place.

Este tipo de robot es ampliamente usado en una gran cantidad de procesos de automatización industrial aliviando al ser humano de tareas altamente repetitivas. Dentro de sus ventajas se encuentran velocidades altas, excelente relación peso vs carga y excelente comportamiento dinámico.

El desarrollo de este tipo de mecanismos a nivel industrial requiere la aplicación de metodologías de diseño que garanticen la precisión y el adecuado comportamiento del mecanismo. En la actualidad el estado del arte en el estudio de estos robots llega hasta la mejora de una o máximo dos características de desempeño a través de la resolución de un problema de optimización mediante el uso de algoritmos computacionales heurísticos. Sin embargo para el diseño requerido en una aplicación industrial es necesario tener en cuenta las diversas características de ingeniería deseadas y las diferentes medidas de desempeño a que deben ser sometidos en las etapas preliminares de diseño. Adicionalmente el grado de exigencia al que va a estar sometido un dispositivo robótico industrial justifica la aplicación de metodologías de diseño moderno como lo son *DFX* (*Design For Manufacturing and Assembly, For Reliability, For Environment, etc.*) permitiendo así establecer condiciones y restricciones en el diseño óptimo para la construcción de este tipo de máquinas.

Las líneas de investigación en procesos de manufactura y robótica del grupo de investigación GEAMEC de la facultad de Ingeniería Mecánica viene adelantando desde el 2009 el desarrollo de un prototipo didáctico de arquitectura paralela tipo delta de 3 cadenas cinemáticas a partir del cual se han desarrollado pruebas de posicionamiento y control de movimientos.

Dando continuidad a los resultados alcanzados, la presente propuesta de investigación establece que es posible realizar el diseño óptimo y la correspondiente construcción de un dispositivo industrial de acuerdo a las restricciones de espacio de trabajo que den respuesta a problemas reales de automatización industrial. Para tal fin se realizará el diseño óptimo paramétrico de componentes y ensambles, análisis dinámicos incluyendo consideraciones inerciales, geometría y materiales deformables, y vibraciones existentes dentro de las cadenas cinemáticas del dispositivo.

De igual forma el diseño de detalle del dispositivo deberá cumplir con restricciones de manufacturabilidad, ensamblabilidad y ajustabilidad para garantizar el funcionamiento adecuado bajo un escenario de trabajo industrial.

Los resultados esperados comprenden: una metodología para el diseño de este tipo de robots, un software de diseño óptimo geométrico de manipuladores delta que maximice la destreza bajo restricciones en espacio de trabajo, un prototipo funcional del robot, una ponencia en evento nacional o internacional y un artículo en revista indexada.

3. DESCRIPCIÓN DE LA PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

3.1 TEMA Y PLANTEAMIENTO DE LA PREGUNTA O PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

En la mayoría de procesos de producción de alimentos implementados alrededor del mundo, las etapas finales corresponden al empaque. Esta etapa se puede dividir a su vez, en pasos más concretos como son la introducción del producto en su bolsa o empaque original, la paletización (ordenamiento de los paquetes en cajas) y el manejo de las cajas para el envío a los distribuidores [1,2]. Para el segundo paso, se utilizan generalmente elementos de transporte como bandas transportadoras, bandas de rodillos con palets, etc. [3, 4] en los que los productos se colocan en desorden para luego ser organizados dentro de cajas. Sin embargo, la mayoría de las industrias realizan esta etapa manualmente por lo que algunas empresas dedicadas a la automatización industrial han comenzado a ofrecer soluciones en esta área [5].

Dentro de las soluciones propuestas por los fabricantes en los últimos años se cuenta la utilización de manipuladores robóticos, generalmente del tipo serial (Puma o Gantry) [6, 7] tanto para la paletización como para el manejo y apilamiento de las cajas para envío. Este tipo de manipuladores son los más populares y estudiados [8] no solo para la industria de alimentos sino para todo tipo de empresas. Dentro de sus ventajas se encuentran el gran tamaño de su espacio de trabajo y la simplicidad en el cálculo de la cinemática. Anteriormente se creía que una de sus desventajas era la relación peso vs capacidad de carga, pero actualmente gracias a los avances en las tecnologías de control se consiguen manipuladores seriales con relaciones 1:1, es decir que son capaces de levantar su propio peso [7, 6, 9]; sin embargo continúan presentando el inconveniente de no poder manejar velocidades muy altas debido a la inercia que poseen.

Una familia de mecanismos que permiten movimientos con velocidades considerablemente altas y presentan ventajas en cuanto a la dinámica son los mecanismos paralelos. Estos aparecieron hacia los años 80 pero hasta la fecha no han sido muy populares. El más famoso de estos es la plataforma de Stewart, utilizada inicialmente para la prueba de neumáticos de aviones [10]. Después de esta, la más conocida es el robot delta, patentado en 1990 [11] simplemente como un dispositivo para el

movimiento de elementos en el espacio, sin embargo, esta creación se ha perfeccionado con los años y ha sido utilizada por fabricantes de robots a nivel mundial como ABB [12]. Esta plataforma es ofrecida actualmente como dispositivo para la manipulación, organización y empaque de productos, especialmente alimentos, productos farmacéuticos y electrónicos por empresas como ABB [7], Schneider Electric [13], y Adept [14] . Estos manipuladores logran actualmente tiempos de ciclo menores a 0.5 segundos (llegando hasta 0.3 segundos) moviendo cargas hasta de 3 kg [5]. Las referencias más recientes presentadas por los fabricantes ofrecen, su fabricación en materiales acordes a la operación en ambientes que requieran niveles mínimos de contaminación (caso de los alimentos y los componentes electrónicos).

Como todos los mecanismos paralelos, los robots delta muestran excelentes relaciones peso vs carga a mover y excelente comportamiento dinámico. Sin embargo, también presentan inconvenientes que impiden la popularización de estos mecanismos tales como el espacio de trabajo reducido en comparación con el tamaño de la plataforma y la presencia de singularidades dentro del espacio alcanzable [10]. Como solución a estos inconvenientes, hasta el momento no se ha propuesto la utilización de tamaño de espacio de trabajo variable, por el contrario, en todas las plataformas desarrolladas, la ubicación de los actuadores se encuentra fija, así como la longitud de cada uno de los miembros. Esta variación en el espacio de trabajo permitiría, además de un mejor comportamiento dinámico acomodarse a diferentes espacios de trabajo.

Además del desarrollo de la dinámica y control de manipuladores tanto seriales como paralelos, otras líneas de desarrollo son el conocimiento del entorno por medio de sistemas de visión artificial y el diseño de efectores. La primera se sustenta no solo en el hecho de ahorrar dinero al no ser necesarios dispositivos adicionales en la línea de producción para posicionar y orientar los productos sino por la flexibilidad y la capacidad de realizar selección de calidad (por ejemplo, colocar los productos defectuosos en un sitio y los admisibles en otro) [5]. Generalmente estos sistemas de visión se proporcionan junto al manipulador con una interfaz de programación conjunta [15]. Estos sistemas no se utilizan como realimentación para el sistema de control del manipulador sino simplemente para ubicar la posición y orientación del producto en la banda transportadora [16]. La realimentación del mecanismo se realiza entonces no en el espacio cartesiano sino en el espacio

articular.

En cuanto a la segunda línea de desarrollo, se debe considerar que el tiempo de sujeción ocupa de 15% a 30% del tiempo total de ciclo. Para su diseño se debe considerar que el producto será sometido casi hasta 12 gravedades y debe estar sujetado en forma estable sin llegar a ser dañado. Generalmente se utilizan efectores neumáticos (por vacío) o mecánicos (pinzas). Los diseños neumáticos son más veloces pero la opción mecánica ofrece mayor seguridad y posicionamiento más preciso [5].

Desde este punto de vista el desarrollo de este tipo de mecanismos a nivel industrial requiere de la aplicación de técnicas y metodologías de diseño que garanticen la precisión y el adecuado comportamiento del mecanismo. Para tal fin, las metodologías de diseño *DFX* (*Design for manufacturing and assembly*[17], *for reliability, for environment*, etc) permiten establecer condiciones y restricciones en el diseño óptimo para la construcción de máquinas.

Las diferentes aplicaciones en donde esta máquina centra actualmente sus intereses [7, 13, 14] permiten establecer requerimientos específicos en el diseño tales como: Precisión en la construcción (Ajustes y tolerancias), Análisis dinámico y de sólidos deformables para el manipulador de acuerdo a flexibilidad, efectos inerciales y a la vibración existente en sus componentes, caracterización de las deformaciones existentes debido a la rigidez propia del modelo. Gran parte de los análisis existentes emplean el análisis de sólidos completamente rígidos [18], sin embargo para condiciones específicas de funcionamiento se deben garantizar que la rigidez del manipulador cumple con las restricciones de precisión y exactitud en el posicionamiento final del manipulador.

Hipótesis y pregunta de investigación

La industria de los snacks en Colombia incluye papas fritas, chocolatinas, caramelos, cereales en grano y en barra y otros productos que son consumidos entre comidas. Esta industria se viene consolidando en el país desde hace más de 50 años y sigue en crecimiento. Según las estadísticas las papas fritas son el snack más consumido.

En varias visitas realizadas por el grupo de investigación GEAMEC, a empresas del sector, se ha encontrado que por ser productos de consumo masivo, sus líneas de producción se encuentran con un grado de automatización elevado, sin embargo, la sección de embalaje es la que menor nivel de automatización posee y en la mayoría de los casos esta labor se realiza de forma manual, utilizando cerca del 40% del personal de la línea de producción.

La anterior situación se presenta porque usualmente el producto empacado es depositado en una banda transportadora en forma desordenada y este debe ser contado y organizado con el fin de realizar el embalaje final, función compleja de automatizar, debido a que se requiere suplir las capacidades de visión, manipulación y toma de decisiones que utiliza el ser humano en las tareas de organización.

Este tipo de problemas de automatización han sido y siguen siendo un tema de estudio global, a causa de la necesidad de hacer los procesos más eficientes y disminuir la realización de tareas repetitivas por el ser humano. Debido a su grado de complejidad y necesidad de rápida respuesta, por lo masivo del proceso, se ha planteado por parte de los grupos de investigación en automatización, la implementación de manipuladores robóticos con capacidad de visión artificial y algoritmos sofisticados que permitan responder a los requerimientos del sistema.

Las líneas de investigación en procesos de manufactura y robótica del grupo de investigación GEAMEC de la facultad de ingeniería Mecánica, viene adelantando desde el segundo semestre del 2009 una propuesta de solución a este problema utilizando dispositivos de arquitectura paralela. A través de la participación en la sexta convocatoria interna de proyectos de investigación¹ se ha desarrollado: un prototipo funcional de arquitectura paralela tipo delta de 3 cadenas cinemáticas (Figura 1) a partir del cual se han desarrolla pruebas de posicionamiento y control de movimientos. Durante el desarrollo del proyecto se obtuvieron prototipos virtuales y se han determinado y caracterizado los perfiles de desplazamiento, velocidad y aceleración (Figura 2). De igual forma, se

¹ Diseño del control para un manipulador tipo paralelo de tres grados de libertad para aplicaciones pick and place. Sexta convocatoria interna de proyectos de investigación, 2011. Universidad Santo Tomas. Código interno 6013011101.

determinaron los torques requeridos para la ejecución del movimiento de acuerdo a desplazamientos esperados en un robot industrial de arquitectura paralela.

Actualmente se cuenta con un controlador industrial para interpolación en más de 3 ejes y los respectivos actuadores para el montaje en el manipulador (Figura 3).



Figura 1. Prototipo funcional de arquitectura paralela tipo delta de 3 cadenas cinemáticas.

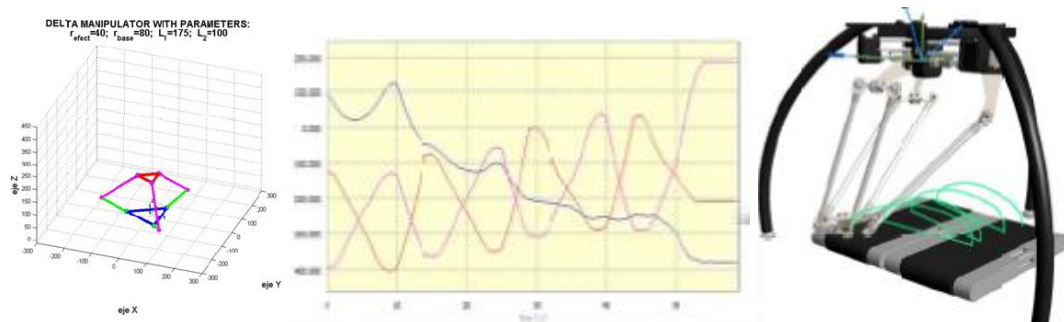


Figura 2. Prototipo Virtual y análisis de cinemática inversa para la definición de perfiles de desplazamiento, velocidad, aceleración y torque requeridos en los motores del dispositivo.



Figura 3. Controlador industrial para su implementación en el dispositivo de arquitectura paralela de 3 cadenas cinemáticas.

En continuidad con los resultados alcanzados, la presente propuesta de investigación establece que es posible realizar el diseño óptimo y la correspondiente construcción de un dispositivo industrial de acuerdo a las restricciones de espacio de trabajo que den respuesta a problemas reales de manipulación de productos. Para tal fin se debe realizar: Diseño óptimo paramétrico de componentes y ensambles, análisis dinámicos incluyendo consideraciones inerciales, geometría y materiales deformables (Elásticamente), y vibraciones existentes dentro de las diferentes cadenas cinemáticas del dispositivo. De igual forma el diseño de detalle del dispositivo deberá cumplir con restricciones de manufacturabilidad, ensamblabilidad y ajustabilidad para garantizar el funcionamiento adecuado bajo un escenario de trabajo industrial.

3.2 MARCO TEÓRICO – MARCO CONCEPTUAL – ESTADO DEL ARTE

3.2.1 Antecedentes y estado del arte

Uno de los primeros diseños de robots paralelos con aplicaciones industriales fue presentado por Willard L. Pollard [10], en el año 1940, consistiendo en un robot de 5 grados de libertad propuesto para tareas de pintura con spray. Posteriormente, Eric Gough [10], en 1947, patenta la plataforma paralela más notoria hasta la época, Gough diseñó un octaedro hexápodo, con lados de longitud variable, destinada a pruebas en el comportamiento de los neumáticos de la compañía escocesa Dunlop. En la actualidad este tipo de plataformas son conocidas con el nombre de MAST (Multi-axis Simulation Table).

Stewart publica un artículo, en 1965, describiendo una plataforma que consta de 6 grados de libertad, para ser utilizada como simulador de vuelo. Este artículo aún está muy vigente para el estudio de este tipo de plataformas y es considerado como uno de los primeros trabajos académicos de análisis de plataformas de tipo paralelo. Cerca del año de 1967 el Ing. Klaus Cappel realiza la patente de una plataforma usada como simulador de movimiento, de 6 grados de libertad, con características similares a la de Stewart. Este fue el principio, para que Hunt sugiriera el uso de los mecanismos paralelos, como robots manipuladores, y allí destacó que se requería un estudio más detallado de este tipo de arquitectura dentro del campo de la robótica, destacando características

propias de este tipo de configuración como la rigidez, precisión y relación carga soportada/peso propio con respecto a los robots seriales.

Fue hasta el año de 1979, cuando McCallion y Pham proponen utilizar una plataforma de Stewart como manipulador en una celda de ensamblaje robotizada, argumentando que el efector final era menos sensible a los errores, frente a los sensores articulares en los robots seriales. Su gran rigidez hace que las deformaciones presentadas en los actuadores sean mínimas y de allí su gran precisión en el posicionamiento del manipulador. Reymond Clavel [10], en 1990, realizó una serie de modificaciones a la plataforma de Stewart, debido a la complejidad del estudio cinemático y elevados costos de fabricación que tenían las uniones esféricas entre sus actuadores. Así aparecen los manipuladores tipo delta de tres y cuatro grados de libertad que disminuyen las desventajas mencionadas. Este manipulador, es un paralelepípedo, con tres grados de libertad, consta de una base fija y una plataforma móvil, unidas mediante tres cadenas cinemáticas cerradas. Los motores se encuentran anclados a la base fija, de tal manera que la masa a mover se disminuye y esto aumenta considerablemente las aceleraciones del manipulador.

Actualmente, encontramos en el mercado distintos tipos de robots manipuladores paralelos usados en distintas aplicaciones [18] : el robot Delta de R. Clavel; el robot Tricept patentado por K.N. Neumann, utilizado principalmente en máquinas herramientas de media precisión e incursionando en el campo de la medicina; la plataforma de Gough, que es el manipulador más fabricado a nivel mundial, utilizado para orientación de antenas, telescopios, paneles solares, simuladores de vuelo, ensamble de componentes, posicionamiento de piezas y como máquina herramienta de media precisión.

A nivel nacional hay algunos estudios que han originado prototipos preliminares de robots de arquitectura paralela. Sin embargo la mayoría de ellos están actualmente en una etapa temprana de desarrollo donde aún hay diversas mejoras por realizar desde el punto de vista de diseño, fabricación y control.

Como antecedente institucional se cuenta con el estudio y el prototipo resultado del proyecto de investigación.

3.2.2 Marco teórico – marco conceptual

Dentro de las líneas actuales de investigación que buscan solucionar problemas aun presentes en los robots de arquitectura paralela se destacan las siguientes:

Diseño Mecánico

Actualmente, es objeto de estudio encontrar una metodología adecuada para diseñar cualquier tipo de arquitectura de un robot paralelo, dado el número y el tipo de grados de libertad. En un caso general la dificultad surge cuando se desea combinar varios tipos de grados de libertad, entre traslacionales y rotacionales.

La metodología de diseño en ingeniería de un dispositivo mecatrónico incluye la fases de diseño conceptual donde se establecen los criterios de desempeño y alternativas de solución, la fase de diseño preliminar donde se establece la arquitectura y las características principales de la mejor alternativa de diseño y por último la fase de diseño de detalle donde con criterios de *DFX* (*Design for manufacturing and assembly, for reliability, for environment, etc.*) se obtiene el diseño final con los detalles suficientes para su posterior fabricación y ensamble.

Cinemática

Dentro de este elemento, se encuentran: la cinemática directa y la cinemática inversa. Se han presentado diversos algoritmos que facilitan la solución. Merlet [4], Innocenti [20]. Sólo se han encontrado soluciones analíticas para arquitecturas especiales como la presentada por Lee [21], y variaciones del mismo como las de Ku [22], cuyo análisis del modelo cinemático directo de la plataforma de Stewart es realizado mediante el método de Newton-Raphson, exponiendo una mayor simplicidad y eficiencia. Yang [23] utiliza un algoritmo basado en información sensorial de las articulaciones pasivas para simulaciones en línea y Newton-Raphson para las fuera de línea, en un caso particular de manipuladores de seis grados de libertad. Una forma más de resolver la cinemática directa, es la propuesta por Merlet [19] y Arai [24] 2, que utiliza sensores de posición y de orientación para calcular la postura de la plataforma móvil. Bonev [25], utiliza tres sensores lineales extras, para determinar dicha posición.

Destreza

Un robot paralelo, puede entrar en singularidad, cuando las fuerzas articulares, no pueden equilibrar los esfuerzos sobre la plataforma móvil. Gosselin y Angeles [26], denominan esta situación como singularidades de segundo tipo, realizando un estudio analítico del caso. Matemáticamente, representa la anulación del determinante de la matriz jacobiana inversa. Aunque esta matriz sea conocida, el resultado de la evaluación de la misma puede requerir métodos como los propuestos por Douady [27]. La geometría de Grassman utilizada por Merlet [28], enumera con gran detalle las condiciones geométricas singulares de distintas configuraciones paralelas. El problema, que es objeto de estudio actualmente, y aún está por resolver, es determinar singularidades dentro del espacio de trabajo de un robot. Hasta el momento, se han desarrollado planificaciones de trayectorias, con el fin de evitar dichas singularidades [29, 30]. También es útil planificar la trayectoria entre dos puntos, como lo hicieron Dasgupta y Mruthyunjaya [31].

Espacio de trabajo

Una de las representaciones del espacio de trabajo en un robot paralelo, se logra, a partir de un proceso de discretización de la trayectoria como lo plantea Fitcher [32] y Arai [33], o por un algoritmo como el propuesto por Merlet [19] y Gosselin [34], que consta de un algoritmo geométrico bastante ágil, que tiene en cuenta los límites de los actuadores, las interferencias y las restricciones de las articulaciones. Por otro lado, Haug [35], formaliza una metodología general para el análisis de la destreza y el espacio de trabajo utilizando la matriz jacobiana. Masory y Wang [36], incluyen las variables angulares de los actuadores. Un problema, consiste en determinar las dimensiones óptimas de un robot para su efectivo desempeño dentro de un espacio de trabajo determinado, este esquema fue propuesto inicialmente por Merlet [37], y es uno de los objetos de estudio del presente trabajo.

Dinámica

Al ser de gran complejidad, han surgido diversos enfoques en el análisis dinámico de los robots paralelos; autores como Dasgupta, Mruthyunjaya, Yang, Tsai, Kholi, entre otros, sugieren utilizar la formulación de Newton-Euler; mientras que autores como Lebret, Clavel, Pang, Shahinpoor,

prefieren métodos con formulación langrangiana; y por último Miller, Codourey y Burdet, Tsai, Wang, Gosselin proponen el principio de los trabajos virtuales para la solución de la dinámica [33].

Control

El control de este tipo de mecanismos, es aún un campo abierto, pero aun así hay algunos aportes valiosos. Liu [38] menciona algunos elementos prácticos en el control dinámico. Trabaja con una plataforma Stewart aplicada a un centro de mecanizado, poniendo a prueba el control, ya que posee demasiadas tareas computacionales que cumplir en tiempo real y dificulta la solución de su cinemática directa. Sistemas basados en redes neuronales, resultan ser superiores con respecto al control cinemático como lo estudiaron Hatip y Ozgoren [39], en un trabajo realizado a una plataforma estabilizadora del movimiento de una embarcación. La planeación de trayectorias, trabajada por Harris [40], muestra la diferencia entre trayectorias helicoidales y trayectorias en línea recta. Dentro de los robots con altas velocidades, es necesario resolver el sistema dinámico para obtener un control óptimo. Para ello se sugieren simplificaciones en el modelo como lo trabaja Reboulet [41], Pierrot [42] y Do [43]. Modelos como el de Lee y Geng [44], que muestran una simplificación en la inercia y la flexibilidad de las cadenas cinemáticas, son objeto de estudio.

Optimización

Los estudios en este campo apenas comienzan, lo más común es la optimización de trayectorias como lo muestra Harris [40]. Otros abordajes incluyen la optimización paramétrica basada en distintos parámetros de diseño, como por ejemplo el bajo consumo de energía [41], aumento en el espacio de trabajo [44], alta destreza y alta rigidez [45]. Todos estos estudios tienen en común, el uso de algoritmos heurísticos para dar solución al problema de optimización.

3.3. JUSTIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE NECESIDADES DEL MEDIO EXTERNO Y PERTINENCIA EN EL MARCO INSTITUCIONAL.

El proyecto proporciona un gran aporte al área de la robótica y diseño de maquinas ya que los manipuladores paralelos, a diferencias de los seriales se encuentran actualmente en desarrollo y existen aún muchas interrogantes y problemas por resolver, siendo el diseño en detalle uno de los

principales. Por otro lado, los intentos por desarrollar este tipo de plataformas (en diseño, fabricación y control de movimientos) plantean soluciones en su mayoría con hardware de desarrollo (tarjetas controladoras no aptas para el entorno industrial), modelos robustos o sin la calidad industrial que requieren estos mecanismos paralelos.

Desde el punto de vista institucional, la generación de conocimiento para aplicaciones de tecnología de punta permite ampliar posibilidades para la visibilidad a nivel internacional y por lo tanto para el intercambio de conocimiento y el establecimiento de relaciones con Universidades y entidades nacionales e internacionales.

A nivel industrial, esta tecnología desarrollada inicialmente en la academia es de fácil transferencia e implementación en empresas del sector de snacks y puede ampliarse su espectro a otro tipo de aplicaciones como manipulación de alimentos, elementos producidos en forma discreta, control de calidad, entre otros. Adicionalmente, el desarrollo de este tipo de manipuladores permitirá grandes ahorros y aumentos de productividad y competitividad por cuanto aumenta la eficiencia y acaba con los cuellos de botella generados en puntos específicos de líneas de producción como puede ser el paletizado y empaque para el caso de esta aplicación específica. Por otro lado, el desarrollo de este tipo de maquinas permitirá dar soluciones de diseño, construcción y automatización de forma integral y de aplicación industrial, con un alto grado de precisión y complejidad. Por lo anterior se justifica el desarrollo de este tipo de manipuladores ya que abre el camino de investigación para el diseño de maquinas de alta precisión a través de la aplicación de herramientas modernas y metodologías para diseño optimo.

3.4 OBJETIVOS

3.4.1 Objetivo General

Diseñar y construir un manipulador industrial de arquitectura paralela de tres grados de libertad para aplicaciones Pick and Place.

3.4.2 Objetivos Específicos

- Establecer las dimensiones geométricas óptimas de un manipulador de arquitectura paralela de tres grados de libertad para aplicaciones Pick and Place.
- Realizar el diseño de detalle del manipulador considerando criterios de diseño para la manufacturabilidad y ensamblabilidad (DFMA)
- Construir los diferentes sistemas mecánicos existentes en el manipulador.
- Integrar el sistema mecánico con el control, la sensórica y los actuadores que permitan la completa funcionalidad del manipulador.

3.5 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del manipulador de arquitectura paralela de tres cadenas cinemáticas se plantea inicialmente la definición de requerimientos de diseño de acuerdo a las capacidades de manufactura existentes y a las especificaciones del control industrial desarrollados en proyectos previos de investigación. Posteriormente se definen y evalúan las alternativas de solución para el manipulador industrial. En paralelo a esta actividad y según los requerimientos de diseño se realizara la etapa de optimización paramétrica de la geometría del manipulador para la maximización del espacio de trabajo, la maximización del torque suministrado por los servomotores del manipulador cumpliendo las restricciones de destreza requerida para este tipo de equipos.

Seguido a estas actividades se desarrollará sobre el diseño conceptual seleccionado, el análisis estructural (esfuerzos y deformaciones-rigidez) de los diferentes componentes del manipulador de acuerdo a su comportamiento dinámico (Aceleraciones, modos de vibración, fuerzas y momentos inducidos durante los desplazamientos, y cargas inerciales generadas por el sistema). En esta etapa se desarrollará la optimización estructural paramétrica a partir de aplicación de software CAD/CAE existente en la facultad de ingeniería. A continuación y siguiendo criterios de diseño para la manufacturabilidad y ensamblabilidad (DFMA) se definirá el diseño en detalle del manipulador industrial. Luego de definido este diseño final, se procederá a la fabricación y ensamble de los diferentes componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos. Finalmente se desarrollaran pruebas de funcionamiento, calibración y puesta a punto del manipulador bajo condiciones de desplazamientos reales.

3.6 BIBLIOGRAFÍA

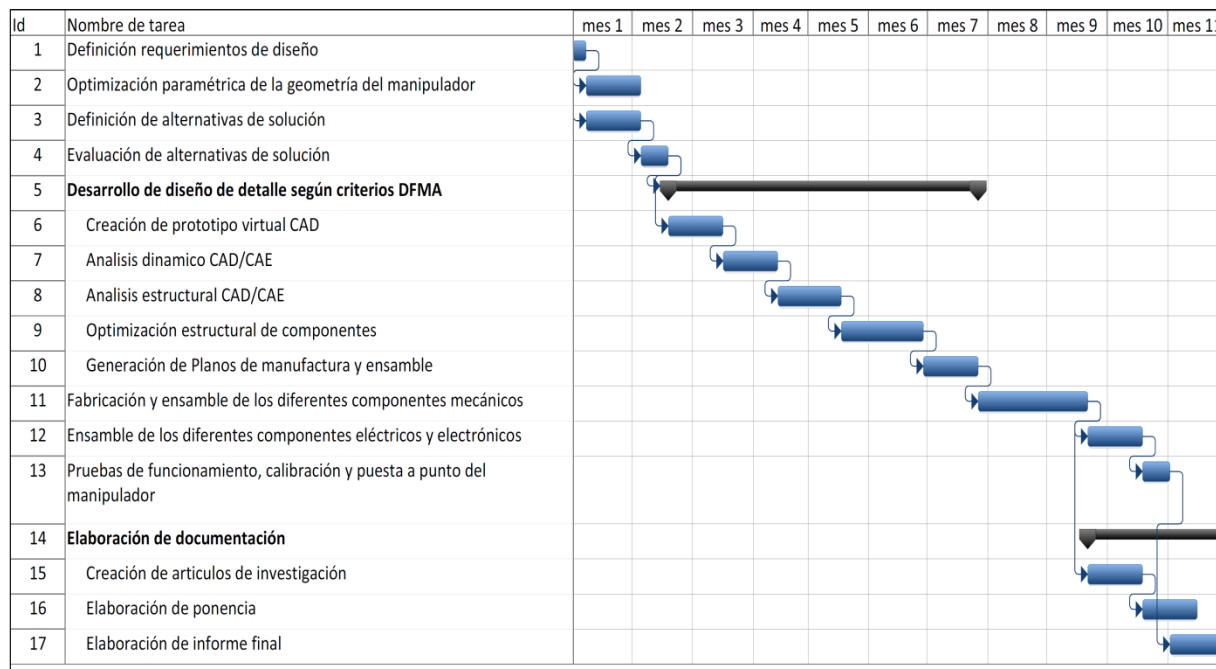
- [1] Packaging automation, "<http://www.pal.co.uk>," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [2] Packaging automation, "http://www.packagingautomation.net/packaging_applications/food_packaging/," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [3] ROPIM, "<http://www.ropim.com/>," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [4] Intelligrated, "<http://www.intelligrated.com/>," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [5] Packworld, "www.packworld.com," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [6] Motoman, "<http://www.motoman.com/products/robots/material-handling-robots.php>," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [7] ABB, "<http://www.abb.com/product/us/9AAC129475.aspx?country=CO>," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [8] B. Siciliano and O. Khatib, Springer handbook of robotics, Springer-Verlag New York Inc, 2008.
- [9] Kuka Robotics, "<http://www.kuka-robotics.com/spain/es/products/>," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [10] J. Merlet, Parallel robots, Springer, 2006.
- [11] Reymond Clavel, "Device for the movement and positioning of an element in space," , 1990.
- [12] P.M. Fredrik Persson, Hakan Hvittfeldt, Jan Larsson, "Industrial robot," , 2007.
- [13] S.E.P. Solutions, "<http://www.elau.com/en/home>," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [14] Adept, "<http://www.adept.com/products/robots>," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [15] Robots Mitsubishi, "<http://www.meau.com/eprise/main/sites/public/Products/Robots/default>," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [16] Catálogo robots industriales Mitsubishi, "https://my.mitsubishi-automation.com/downloads_show.php?tbldownloads=YToyOntzOjExOjZb3J0X2NvbHVtbil7czo3OiJkb2NfbG9jIjtzOjg6InNvcnRfZGlyIjtzOjM6IkFTQyI7fQ%3D%3D&portal_id=6&doc_type=cat%20tech%20leaflet&slang=1,2,17&sstr=MELFA," Consultado 13 de Octubre de 2010.
- [17] Boothroyd, g., product design for manufacture and assembly (2nd edition), new york: marcel dekker incorporated, 2001

- [18] L.W. Tsai, Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators, Wiley-Interscience, 1999.
- [19] Direct kinematics and assembly modes of parallel manipulators. Merlet, J. P. 1992, International Journal of Robotics Research,, págs. 11(2), 150-162.
- [20] Innocenti, C. and Parenti-Castelli, V. Echelon form solution of direct kinematics for the general fully-parallel spherical wrist. [aut. libro] Mechanism and Machine Theory. 1993, págs. 553-561.
- [21] Lee, J.D. and Geng, Z. Sydney. Modeling and control of a flexible Stewart platform: IFAC 12th Triennial World Congress, pp 441-444, 1993.
- [22] Ku, D.M. "Direct displacement analysis of a Stewart platform mechanism". Mechanism and Machine Theory, 34(3):453-465. 1999.
- [23] Yang, G., Chen, I-M. and Yeo, S.H. "Design consideration and kinematic modeling for modular reconfigurable parallel robots". In 10th World. 1999.
- [24] Arai, T. "Development of a parallel link manipulator". In ICAR, pages 839-844, Pise, 19-22. 1990.
- [25] Bonev, I.A., Ryu, J. "A simple new closedform solution of the direct kinematics using three linear extra sensors. In IEEE/ASME Int. Conf. onAdvanced Intelligent Mechatronics, pages 526-530, Atlanta, 19-23. 1999.
- [26] Gosselin, C., and Angeles, J. "Singularity analysis of closed-loop kinematic chains". IEEE Trans. on Robotics and Automation, 6(3):281-2901990.
- [27] Douady, D. Contribution à la modélisation des robots parallèles: conception d'un nouveau robot à 3 liaisons et six degrés de liberté. Thèse de doctorat, Université Paris VI, Paris. 1991.
- [28] Merlet, J-P. An algorithm for the forward kinematics of general 6 d.o.f. parallel manipulators. Research Report 1331, INRIA. 1989.
- [29] Sefrioui, J. and Gosselin, C. "Singularity analysis and representation of planar parallel manipulators". Robotics and Autonomous Systems, 10:209-224. 1992.
- [30] Bhattacharya, S., Hatwal, H., and Ghosh, A. "Comparison of an exact and an approximate method of singularity avoidance in platform type parallel manipulators". Mechanism and Machine Theory, 33(7):965-974. 1998.
- [31] Douady, D. Contribution à la modélisation des robots parallèles: conception d'un nouveau robot à 3 liaisons et six degrés de liberté. Thèse de doctorat, Université Paris VI, Paris. 1991.

- [32] Fichter, E.F. A Stewart platform based manipulator: general theory and practical construction. *Int. J. of Robotics Research*, 5(2):157-181. 1986.
- [33] Arai, T., Stoughton, R., and Jaya, Y.M. Micro hand module using parallel link mechanism. In *Japan/USA Symp. on Flexible Automation*, pages 163- 168, San Francisco, 13-15. 1991.
- [34] Gosselin, C. "Determination of the Workspace of 6-DOF Parallel Manipulators," *ASME Journal of Mechanical Design*, vol. 112, pp.167-176, 1990. 1990.
- [35] Haug, E. J. *Computer Aided Kinematics and Dynamics Of Mechanical Systems*, Allyn and Bacon, USA. 1989.
- [36] Masory, O. and Wang, J. (1995). "Workspace evaluation of Stewart platforms". *Advanced robotics*, 9(4), pp 443-461.
- [37] Merlet, J.P. "Designing a parallel robot for a specific workspace". *Rapport de Recherche 2527*, INRIA.. 1995.
- [38] Liu, Y., Huang, T.S. and Faugeras, O.D. Determination of camera location from 2-d to 3-d line and point correspondences. *IEEE Trans. Pat. Anal. Machine Intell.*, n°1, pp 28-37. 1990.
- [39] Hatip, O.E. and Ozgoren M.K. Utilization of a Stewart platform mechanism as a stabilizer. 9th *World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, pages 1393-1396. 1995.
- [40] D.M.J., Harris. Parallel-linkage robot coordinate transformation through screw theory. 9th *World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*, pp1565-1568. 1995.
- [41] Reboulet, C., Berthomieu T. Dynamic model of a six degree of freedom parallel manipulator. *ICAR*, pp 1153-1157. 1991.
- [42] Pierrot, F., Dauchez, P., Fournier, A. Towards a fully-parallel 6 d.o.f. robot for high speed applications. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp 1288-1293, Sacramento. 1991.
- [43] Do W. and Yang, D. Inverse Dynamic Analysis and Simulation of a Platform Type of Robot," *Journal of Robotics Systems*, vol. 5, No. 3, pp. 209-227. 1988.
- [44] Jonathan Hodgins. Design, Optimization, and Prototyping of a Three Translational Degree of Freedom Parallel Robot. MSc. Thesis, University of Ontario Institute of Technology,.2012.
- [45] E. Courteille, D. Deblaise, and P. Maurine, "Design optimization of a Delta-like parallel robot through global stiffness performance evaluation," 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Oct. 2009, pp. 5159-5166.

4. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS BÁSICOS DE LA ORGANIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 CRONOGRAMA GENERAL



4.2 PRESUPUESTO:

TABLAS DE PRESUPUESTO

Tabla 4.2.1 Presupuesto global de la propuesta por fuentes de financiación (en miles de \$).

RUBROS FINANCIABLES	FUENTES		TOTAL
	FODEIN	Contrapartida	
PERSONAL	4.800	18.100	22.900
EQUIPOS	-	9.506	9.560
SOFTWARE	-	-	-
MATERIALES	8.200	-	8.200
SALIDAS DE CAMPO	-	-	-
MATERIAL BIBLIOGRÁFICO	-	-	-
PUBLICACIONES Y PATENTES	1.000	-	1.000
SERVICIOS TÉCNICOS	6.000	-	6.000
VIAJES	-	-	-
TOTAL	20.000	27.606	47.606

Tabla 4.2.2 Descripción de los gastos de personal (en miles de \$).

Investigador	Formación Académica	Función Dentro Del Proyecto	Dedicación Horas / Semana	Recursos		Total
				FODEIN	Contrapartida	
Henry Cortes	PhD	Investigador principal	8H		9.600	9.600
Carlos Camacho	Maestría	Coinvestigador	8H		8.500	8.500
Auxiliares de investigación	Estudiantes pregrado	Auxiliar Diseño y fabricación de los dispositivos mecánicos	8H	3.600		3.600
Auxiliares de investigación	Estudiantes pregrado	Auxiliar Optimización de manipulador	8H	1.200		1.200
TOTAL				4.800	18.100	22.900

Tabla 4.2.4 Descripción y cuantificación de los equipos de uso propio (en miles de \$)

EQUIPO	VALOR
Centro de mecanizado 5 ejes marca Fintech	\$ 3,840
Centro de torneado tipo suizo marca Polygim	\$ 3,456
Taller de máquinas herramienta	\$ 500
Laboratorio de metrología	\$ 750
Software CAD/CAE/CAM (NX-INVENTOR)	\$ 960
TOTAL	\$ 9.506

Tabla 4.2.8 Materiales y suministros (en miles de \$)

Materiales*	Justificación	Valor
Materias primas	Material para la fabricación de los diferentes sistemas Mecánicos	\$ 6.200
Partes y componentes normalizados	Rodamientos, anillos retenedores, acoples, Tornillos y demás elementos normalizados necesarios para el ensamble del equipo	\$ 1.000
Herramientas y insumos	Consumibles y herramientas necesaria para la fabricación en la maquinas herramientas CNC existentes en la facultad	\$ 1.000
TOTAL		\$ 8.200

Tabla 4.2.9 Bibliografía (en miles de \$)

Ítem	Justificación	Valor
TOTAL		

Tabla 4.2.10 Servicios Técnicos (en miles de \$)

Tipo de servicio	Justificación	Valor
Servicios de manufactura y control de calidad especiales	Se requieren desarrollar procesos de manufactura y control de calidad especiales que requieren maquinas herramientas o equipos diferentes a los existentes en la universidad.	\$ 3.000
Asesoría en la implementación del control industrial.	Servicio de asesoría para la implementación y adecuación del control industrial existente al equipo	\$ 3.000
TOTAL		\$ 6.000

4.3 HOJAS DE VIDA

Se anexan hojas de vida (CvLAC) en formato pdf de los investigadores que hacen parte del proyecto. Igualmente se anexa GrupLAC correspondiente del grupo de investigación GEAMEC.

4.4 RESULTADOS Y PRODUCTOS ESPERADOS

Tabla 4.4.1 Generación de nuevo conocimiento

Resultado/Producto esperado	Beneficiario
Un Prototipo funcional del manipulador industrial tipo delta	USTA, Grupo de investigación, Asignaturas relacionadas
Un registro de Software de diseño óptimo geométrico	USTA, Grupo de investigación, Asignaturas relacionadas
Un Artículo en revista indexada	USTA, Grupo de investigación, Comunidad Científica

Tabla 4.4.2 Fortalecimiento de la comunidad científica

Resultado/Producto esperado	Beneficiario
Formación de 5 estudiantes de pregrado	USTA
Una Tesis de pregrado	USTA, Grupo de investigación

Tabla 4.4.3 Apropiación social del conocimiento

Resultado/Producto esperado	Beneficiario
Una Ponencia en evento nacional o internacional	USTA, Grupo de investigación,
Guías para el análisis dinámico y estructural de maquinas en movimiento a través de herramientas CAD/CAE.	USTA, Grupo de investigación
Propuesta de un curso de profundización para el programa de pregrado en ingeniería Mecánica.	Estudiantes Facultad USTA

Tabla 4.4.4 Impactos esperados:

Impacto esperado	Plazo después de finalizado el proyecto: corto, mediano, largo	Supuestos
Fortalecimiento del grupo de investigación GEAMEC (Categoría: curriculares)	Corto	Si el proyecto es aprobado
Transferencia de conocimiento al sector industrial (Categoría: económicos, productividad y competitividad)	Corto y Mediano	Industrias interesadas en la apropiación del conocimiento.
Aumentos en la productividad y Competitividad de sector industrial (Categoría: económicos, productividad y competitividad)	Mediano y Largo Plazo	Requerimientos por parte del sector industrial al grupo de investigación para la generación de desarrollos industriales para el desarrollo y mejoramiento de sus líneas de producción.
Motivación de estudiantes a participar en semilleros de investigación y como auxiliares de investigación (Categoría: curriculares)	Mediano	Socialización de los productos y resultados propios generados por los docentes investigadores