

Parallel kinematics machine tools: Research, development and future trends

David Alfonso Serje-Martínez & Jovanny Alejandro Pacheco-Bolívar

Universidad del Norte, Barranquilla – Colombia. dserje@ingenieros.com, jpacheco@uninorte.edu.co

Received: August 12th, 2016. Received in revised form: March 7th, 2017. Accepted: March 21th, 2017.

Abstract

Since its introduction in the middle 90s, parallel kinematics machine tools (PKMT) created high expectations through their possible roles in industry. More than twenty years have gone since then (1994), and even though these kinematic structures have provided excellent performance regarding dynamic capacity, stability, precision, and rigidity, its impact on the market hasn't been the expected one. What could have gone wrong? ¿More research is required? ¿Is it a market concern?. This article, explores these questions, based on the beginnings of parallel kinematics, its strengths and weaknesses, it analyzes its current situation and forecasts future developments, making a particular focus on three axis milling machines.

Keywords: Parallel kinematics, Milling machine, CNC, Machine tools, Dynamics, Performance.

Cinemática paralela en la máquina-herramienta: Investigación, desarrollo y tendencias futuras

Resumen

Desde su presentación a la sociedad a mediados de los 90's, las Máquinas Herramientas de Cinemática Paralela (MHCP), han suscitado grandes expectativas por el papel que pueden jugar en la industria. Han pasado más de veinte años desde esa fecha (1994) y pese a que estas arquitecturas han entregado prestaciones nunca antes vistas en términos de capacidad dinámica, precisión y rigidez, su impacto en el mercado, no ha sido el esperado. ¿Qué pudo haber fallado? ¿Hace falta más desarrollo? ¿Es cuestión de mercado?. Este artículo, intenta resolver estos interrogantes, partiendo de los inicios de la cinemática paralela, sus fortalezas y debilidades, analiza su situación actual y prevé sus desarrollos futuros haciendo especial énfasis en las fresadoras de 3 ejes.

Palabras clave: Cinemática paralela, Fresadoras, CNC, Máquinas herramientas, Dinámica, Desempeño.

1. Introducción

Desde su aparición, las máquinas herramientas como fresadoras, taladros, tornos y robots de ejes fijos adoptaron un tipo de arquitectura similar conocida como arquitectura serial o de lazo abierto, la cual no ha variado sustancialmente en el tiempo. Dicha arquitectura, se encuentra constituida por una serie de elementos o eslabones unidos mediante articulaciones que permiten un movimiento relativo entre cada par de eslabones constitutivos (Fig. 1). Esto implica que cada eje debe soportar las cargas impuestas por los eslabones posteriores en la cadena cinemática, incluyendo en algunos

casos el peso de los actuadores [1] y que el error de posicionamiento es aditivo, puesto que un posicionamiento inexacto en un eje afecta a la ubicación de las juntas posteriores en la cadena cinemática [2-4]. Adicional a esta condición de diseño, se tiene que estos sistemas requieren de bases con una gran inercia para poder satisfacer los requerimientos de estabilidad dinámica [5].

Pese a estas restricciones impuestas por la construcción de los equipos, avances en materiales, actuadores, sistemas de transmisión y de control han mejorado las capacidades de las máquinas herramientas seriales, pero los diseños siempre serán penalizados por la aplicación de una cadena cinemática abierta.

How to cite: Serje-Martínez, D. A., and PachecoBolívar, J. A., Cinemática paralela en la máquina-herramienta: Investigación, desarrollo y tendencias futuras DYNA 84 (201) pp. 17-26, 2017.

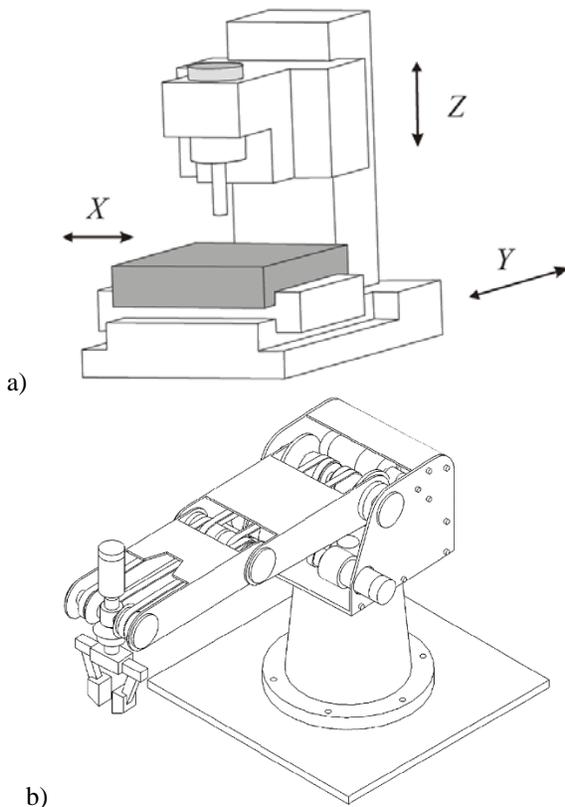


Figura 1. Cadenas cinemáticas abiertas (en serie). a) Fresadora convencional. b) Manipulador Scorbot.
Fuente: Figura a) [10], Figura b) Elaboración propia.

Como sistemas alternativos para cubrir estas deficiencias, se han desarrollado las primeras máquinas-herramientas de cinemática paralela, las cuales fueron presentadas al mundo en 1994 en la International Manufacturing Technology Show (IMTS). Dichas máquinas se caracterizan porque todos los eslabones del mecanismo se conectan directamente al chasis de la máquina al cabezal de corte o efector final (conformando una cadena cinemática cerrada). La principal ventaja de estas máquinas es que ninguno de los ejes debe soportar la carga de otro eje en movimiento. Como consecuencia de ello, los accionamientos pueden ser más pequeños, al igual que las masas en movimiento de la máquina [6-9].

El objetivo de este artículo es entregar una revisión del desarrollo actual de máquinas herramientas con cinemática paralela y sus características en contraste con las máquinas seriales, al igual que sus múltiples campos de aplicación con un énfasis especial en fresadoras de 3 ejes. Asimismo, se resumen desarrollos futuros y potenciales áreas de investigación.

2. Breve historia

El uso de cadenas cinemáticas cerradas no es novedoso, y su aplicación se había explorado incluso antes de que se acuñara el término robot. Algunos problemas teóricos relacionados a esta clase de mecanismos fueron estudiados

inicialmente por los matemáticos como Christopher Wren (1645), Cauchy (1813) y Lebesgue (1867).

Un ejemplo de esta clase de estructuras fue patentada en 1928 por Gwinnett para ser empleada como una plataforma en un teatro de películas [11]. En 1947 Gough estableció los principios básicos de un mecanismo con una estructura de lazo cerrado que permite el posicionamiento y orientación de una plataforma móvil con miras a probar el desgaste de neumáticos (Fig. 2a) [12]. En este mecanismo, el efector en movimiento es una plataforma hexagonal en la cual todos sus vértices se conectan a un eslabón por medio de juntas de tipo rótula. El otro extremo de los eslabones se fija a la base mediante una junta universal. Un actuador lineal permite la modificación de la longitud total del eslabón; es una estructura con cinemática de lazo cerrado, accionada por seis actuadores lineales.

A inicios de la década de 1960, con el desarrollo de la industria aeronáutica, los incrementos en los costos asociados al entrenamiento de los pilotos aunados a la necesidad de probar nuevos equipos en tierra, orientó a los investigadores a estudiar mecanismos con múltiples grados de libertad que pudieran simular una plataforma pesada con grandes cargas dinámicas. Es así como en 1965, Stewart sugiere el uso de una estructura con cinemática paralela para simuladores de vuelo. A este mecanismo se refiere generalmente como plataforma Stewart (Fig. 2b) [13]. La misma arquitectura ofrece ventajas como una alta precisión en el posicionamiento.

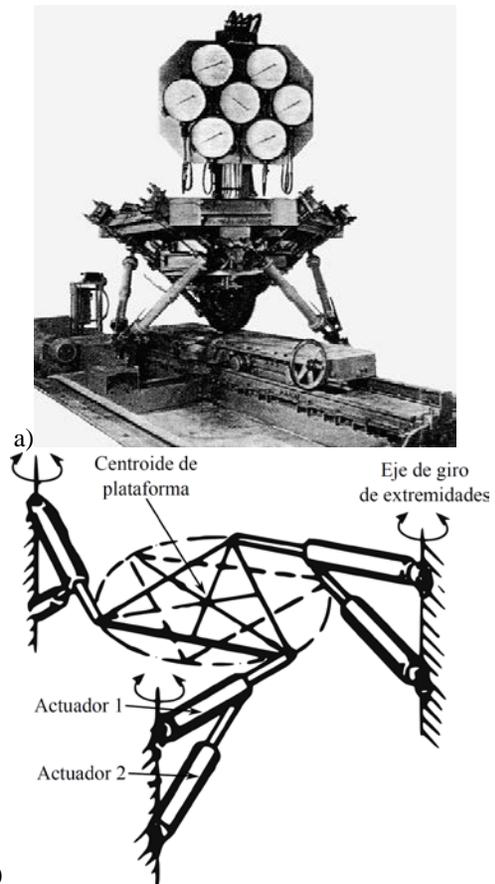


Figura 2. Plataformas con cinemática paralela. a) Plataforma Gough (1947). b) Plataforma Stewart (1965)
Fuente: Figura a) [5], Figura b) Adaptado de [13].

Esta alta precisión se debe al hecho de que los elementos trabajan esencialmente en tensión/compresión y virtualmente no sujetos a flexión (por tanto propensos a bajas deformaciones). Debido a su arquitectura, se contaba adicionalmente con actuadores de menor potencia y eslabones de menor tamaño, reduciendo hasta en un 26% el consumo energético de un manipulador serial de tamaño similar [5]. El uso de actuadores lineales para estos sistemas es interesante debido a que estos sistemas disponen de excelentes características en cuanto a masa, velocidad, aceleración y amplitud de movimiento, aunados a una buena precisión en el posicionamiento dada la ausencia de cargas de flexión.

Cabe destacar, que la plataforma desarrollada por Stewart reproduce en una de sus modificaciones, el diseño de Gough como se puede evidenciar en la Fig.2b. Su diseño inicial (Fig. 3), difiere de la anterior y encontraba su aplicación sólo en el campo de la aeronáutica como se ha mencionado anteriormente. Irónicamente, pese al desarrollo previo por parte de Gough, su diseño se conoce a menudo como plataforma Stewart [14].

En 1962 Cappel, propuso un hexápodo basado en el modelo de Gough para ser empleado como simulador de movimiento (Fig. 4). Con ello, recibió una patente en 1967 [15]. Adicionalmente, desarrolló varios robots paralelos para ensayos de vibración. Es por esto que en conjunto con Gough y Stewart es considerado como uno de los pioneros de la robótica con cinemática paralela.

En la época de 1960, se consideraron otras aplicaciones posibles para las plataformas con esta arquitectura, como en rociadores de pintura y máquinas herramienta, pero se rechazaron a favor de las configuraciones en serie principalmente debido a la ausencia de sistemas de control avanzados.

Las estructuras paralelas han sido redescubiertas en la década de 1980 por la comunidad interesada en la robótica [9]. Se desarrollaron diseños populares como el robot Delta (Clavel 1988 [16] y 1989 [17], Fig. 5) y el Hexa (Pierrot 1991 [18], Fig. 5), los cuales han sido comercializados y se pueden encontrar en diferentes aplicaciones industriales como manipuladores de gran rapidez y precisión [19].

En la actualidad estas unidades han gozado de gran aceptación y su aplicación en el campo del posicionamiento rápido de componentes (Fig. 6), por lo cual grandes fabricantes como Adept o ABB han adoptado esta arquitectura [20].

Han surgido otras aplicaciones como la desarrollada por ABB en 2012 para el movimiento de paneles en líneas de producción (Fig. 7), con una capacidad de desplazamiento de hasta 16 piezas por minuto a partir de dos brazos seriales que cierran la cadena cinemática con ayuda de una barra acopladora, maximizando la capacidad dinámica del conjunto.

A lo largo de los años de progreso de esta arquitectura, muchos prototipos para fresado u otros procesos se han desarrollado en la industria e institutos de investigación. Estos desarrollos continúan vigentes y prueba de ello son las múltiples patentes relacionadas a máquinas de cinemática paralela que lo constatan y pueden ser consultadas en Parallemic [21].

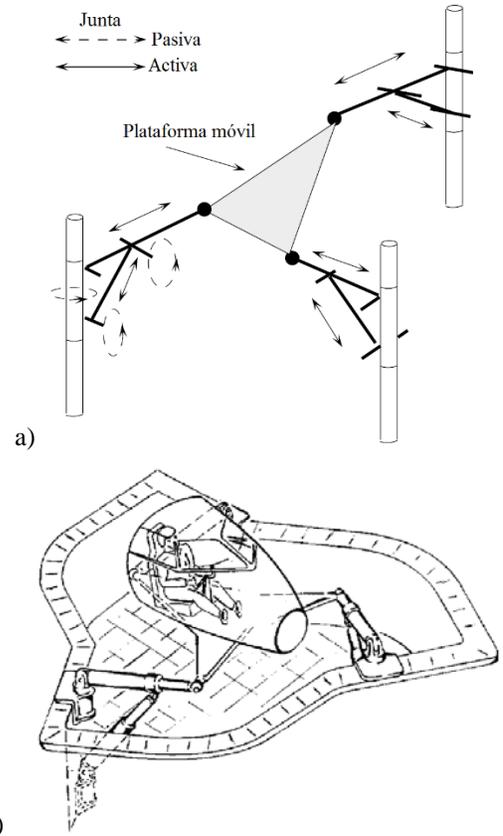


Figura 3. Plataforma Stewart inicial. a) Representación. b) Prototipo. Fuente: Figura a) Adaptado de [5], Figura b) [13].

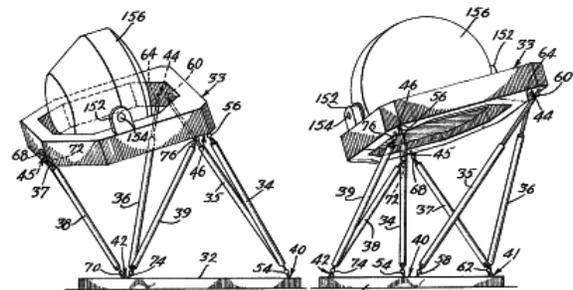


Figura 4. Patente de Klaus Cappel (1967). Fuente: [15].

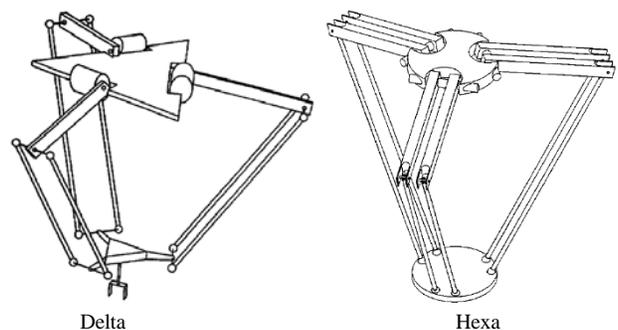


Figura 5. Robots Delta y Hexa. Fuente: [22].

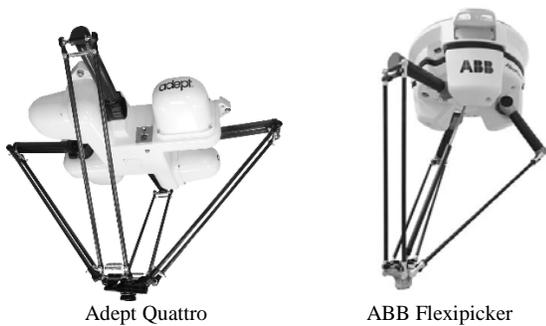


Figura 6. Robots Delta para aplicación industrial.
Fuente: [20].



Figura 7. ABB Twin Robot Bar TRX.
Fuente: [20].

2.. Cinemática y cinética

Una tarea fundamental para los manipuladores es posicionar y orientar el efector final en una forma específica. La arquitectura de los manipuladores es seleccionada y diseñada conforme a su habilidad de brindar una configuración dada. Para posicionar y orientar un cuerpo rígido en el espacio, se requiere generalmente de manipuladores con 6 grados de libertad [23]. En algunos casos, se emplean sub-ensambles de dos o tres grados de libertad cada uno en un sistema más complejo. Por ejemplo, en un manipulador serial, se pueden emplear 3 GDL para posicionar la herramienta y otros 3 GDL para orientarla. En el caso de un manipulador paralelo, se puede alcanzar esta flexibilidad con relativa facilidad, pero generando una cinemática más compleja [9].

El modelo matemático de cada manipulador en particular debe ser desarrollado con el fin de controlar el dispositivo adecuadamente. Dicho modelo en el caso de la cinemática, implica el estudio analítico del movimiento del manipulador, sin considerar las fuerzas y pares que lo originan. Se obtiene entonces una relación entre las variables de las articulaciones y, la ubicación y orientación del efector final. Esta relación puede expresarse en el sentido anterior para la cinemática directa o en sentido contrario para la cinemática inversa [2, 24]. En el caso de los análisis para velocidades y aceleraciones se encuentran ciertas configuraciones denominadas singulares (muy comunes en algunos sistemas de cinemática paralela), las cuales se caracterizan por la pérdida de grados de libertad en el manipulador. Las singularidades se hacen importantes cuando existen dentro del espacio de trabajo cinemático debido a que son causa de múltiples dificultades para el sistema de control, afectando

adicionalmente la destreza del manipulador.

El problema cinemático directo de manipuladores paralelos en contraste con los seriales es muy complejo. Uno de los ejemplos más discutidos es el de la plataforma Stewart con 6GDL, donde se reporta un total de 1320 soluciones, donde las soluciones reales son cerca de 40. Esto induce posteriormente a retos en el control del sistema, dadas estas posibilidades [14].

Existen múltiples métodos para la solución de dicho problema: Eliminación [25], continuación [26], por medio de bases de Grobner [27], y análisis de intervalos [28]. La eliminación no es muy estable numéricamente (puede producir oscilaciones o raíces erradas) a no ser que se establezcan consideraciones especiales en su implementación y etapas, por lo cual es empleado principalmente en casos simples. El método de continuación polinomial es mucho más estable numéricamente dado que se cuenta con algoritmos más evolucionados [29]. Los métodos más rápidos son las bases de Grobner o el análisis de intervalos que también tienen la ventaja de estar certificados numéricamente (no existen raíces nulas y la solución puede obtenerse con un nivel de precisión prescrito) aunque no son apropiados para uso en tiempo real. Otros métodos para resolver este problema consisten en la adición de sensores en las juntas pasivas o en las estructuras móviles; convirtiéndose en una dificultad la determinación del número y ubicación de sensores que otorguen una solución única (al igual que el error inducido). Para casos sencillos, se puede aplicar métodos como el propuesto por Denavit - Hartenberg o por medio de adición de vectores, hasta obtener una expresión analítica [23].

El problema cinemático inverso de manipuladores paralelos en contraste con los seriales generalmente es mucho más sencillo y puede ser resuelto empleando eliminación.

Los modelos dinámicos de un robot tienen por objetivo conocer la relación entre el movimiento del efector y las fuerzas implicadas en el mismo. Su importancia radica en la necesidad que existe de obtener un diseño y control adecuado del sistema, permitiendo dimensionar la estructura mecánica, seleccionar los actuadores y evaluar el desempeño entre otros. Existen dos métodos empleados ampliamente tanto para sistemas seriales como paralelos [30,2,23,9]: Basados en Lagrange (consideraciones energéticas) y basados en Newton-Euler (fuerzas aplicadas). Independientemente de la estrategia empleada para solucionar el problema dinámico, los resultados conllevan a ecuaciones de movimiento que son únicas para el sistema físico.

2.2. Síntesis de mecanismos paralelos

Una metodología sistemática para la síntesis de estas máquinas es propuesta en el texto de Siciliano [14], donde la idea básica es subdividir el mecanismo en unidades funcionales más simples. Las subestructuras cinemáticas para la generación de movimientos en la plataforma, se seleccionan con base a una lista de soluciones predefinidas. Una combinación razonable de estos elementos básicos al igual que el número de accionamientos a emplear, se enumera conforme a los grados de libertad requeridos en el

efector final. La configuración geométrica de las conexiones entre las juntas es predeterminada entonces por un listado de soluciones existentes.

A esta metodología se le conoce como síntesis basada en la teoría de grupos, dada su forma de atacar el problema de diseño. Sus limitaciones, se hacen evidentes al considerar únicamente aquellos patrones de movimiento que puedan ser descritos por medio de combinaciones de subgrupos. Otras estrategias para la síntesis de mecanismos paralelos pueden observarse en Merlet [28], Molinari [31], Pritschow [32], Ivanov [33] o Liu [34] donde se propone un acercamiento por medio del uso de atlas o cartas morfológicas. Con el uso de estas cartas, se realiza inicialmente la síntesis estructural del mecanismo (determinando los tipos de juntas y eslabones) para posteriormente resolver la geometría adecuada a la aplicación.

A las combinaciones de mecanismos paralelos con ejes en serie, se les denomina generalmente como sistemas híbridos. Con respecto a esta definición, se puede afirmar que es posible sintetizar un gran número de mecanismos (casi infinitos) con estructura variada según la aplicación. Existen muchas investigaciones y algunos desarrollos de estos sistemas como los presentados por Son [35], Harib [36], Kanaan [37], Liu [38] y Refaat [39] entre otros donde se han comprobado máquinas herramientas híbridas cuyas prestaciones exhiben las ventajas y desventajas tanto de equipos seriales como paralelos.

2.2. Fortalezas y limitaciones

Los manipuladores seriales cuentan con una baja capacidad de carga (en relación a su tamaño) y una pobre precisión dada su cadena cinemática abierta. Adicionalmente, los elementos mecánicos se encuentran sujetos a cargas de flexión lo que requiere de una rigidez y masa elevada. En contraposición, los sistemas con cadena cerrada resuelven muchos de estos inconvenientes al distribuir la carga en los eslabones, incrementando la conectividad de sus elementos [40,14,35]. Algunas de las ventajas y desventajas de los manipuladores paralelos respecto a su contraparte serial, son resumidas en la Tabla 1, en la cual se presenta para cada característica de las arquitecturas una escala de 1 a 5, donde 1 corresponde al criterio menos deseable y 5 al criterio más deseable.

Su elevada rigidez se origina principalmente debido a su alto grado de conectividad, donde las extremidades conectan la estructura fija con el cabezal de corte o el efector directamente, permitiendo una mejor distribución de la carga sobre los elementos mecánicos. Esto origina una mayor complejidad al sistema de control por cuanto su dinámica es no lineal y acoplada requiriendo a menudo de una frecuencia de muestreo superior. La cinemática de los robots paralelos es insensible al escalamiento (la misma estructura puede ser usada para grandes o micro robots) y pueden ser construidos utilizando casi cualquier tipo de actuador o transmisión. Su constitución les limita a un espacio de trabajo reducido y una destreza (o capacidad de orientación) limitada.

Tabla 1. Comparativo entre arquitecturas seriales y paralelas.

Característica	Arquitectura	
	Serial	Paralela
Cinemática	Simple. ★★★★★	Complejo, con presencia de singularidades en la región de trabajo. ★★☆☆☆
Capacidad dinámica	Limitada. ★★★☆☆	Elevada (altas velocidades y aceleraciones). ★★★★★
Rigidez	Pobre (cadena abierta con elementos a flexión). ★★☆☆☆	Excelente (cadena cerrada con elementos a tracción o compresión) ★★★★★
Destreza	Excelente flexibilidad y capacidad de orientación. ★★★★★	Capacidad de orientación limitada. ★★★☆☆
Control	Simple. ★★★★★	Complejo. ★★★☆☆
Relación ET/VM*	Excelente. ★★★★★	Mala o buena según diseño. ★★☆☆☆
Topología del ET	Excelente (geometría regular). ★★★★★	Compleja (restringible a geometrías regulares). ★★★☆☆
Modularidad	Buena. ★★★☆☆	Excelente. ★★★★★

ET: Espacio de Trabajo

VM: Volumen de Máquina

Fuente: Elaboración propia, con datos de [3,6,7,14,42, 4] entre otros

3. Máquinas-herramientas actuales

Dadas sus posibilidades, esta tecnología ha suscitado el interés creciente de investigadores y empresarios. Muchas investigaciones en el área han llegado a ser comercializadas como resultado de la colaboración universidad-empresa. Entre estos casos se encuentran [6, 7]: WZL Aachen-Ingersoll, ETH Zurich-Mikron (Triaglide), Okuma, University of Seoul-Eclipse, HexaM, entre otros (ver Tabla 2).

Como se observa, la actividad en torno a la cinemática paralela se concentra principalmente en Europa y Asia, y el continente americano se ve representado sólo por Estados Unidos. Merlet [5], detalla gran parte del estado del arte de dichas experiencias respecto al análisis y diseño, al igual que métodos empleados para superar los retos inherentes a su diseño.

Las primeras máquinas herramientas con cinemática paralela, emplearon una arquitectura basada en la plataforma Gough [41], como Variax, Okuma, Hexaglide y Eclipse y otros enfocados principalmente al maquinado de componentes complejos que requirieran operaciones de 5 ejes (Fig. 8). Estos equipos tenían mejor rigidez y capacidad dinámica que sus contrapartes seriales, pero tenían una destreza muy limitada que impedía el maquinado en múltiples caras del componente. Otra limitante importante era un gran tamaño de máquina para una región de trabajo muy pequeña. En estos casos los 6 grados de libertad extendieron las posibilidades del equipo pero a un mayor costo en componentes y sistemas de control [3].

Tabla 2.

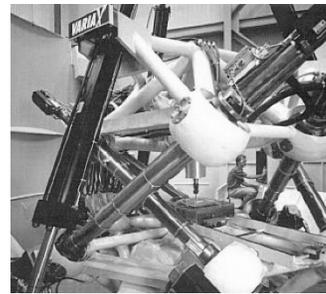
Máquinas herramientas de cinemática paralela desarrolladas a la fecha.

EUROPA		
Empresa	Ejes	Aplicación
Demaurex/Delta	3	Manipulador
PKMtricept SL	5	Maquinado, ensamble
Geodetics	6	Maquinado
Carl Zeiss Jena	6	Posicionamiento
Physik, Instrumente	6	Posicionamiento
CMW	6	Maquinado
Lapic Company	6	Medición de coordenadas
Fooke (Triomax)	3	Corte agua/láser
Urane SX (Renault)	3	Taladrado de alta velocidad
Simparalell (Simplex)	5	Maquinado
Starrag Group (Ecospeed 20210)	5	Maquinado
Icon Industries (Tripod 700S)	5	Maquinado
Teknodrom (XT 1100S)	5	Maquinado
Universidad-empresa		
WZL Aachen – Ingersoll	6	Maquinado
FhG Chemnitz – Mikromat	5	Maquinado
IfW Stuttgart – INA (Hexact)	5	Maquinado
ETH Zurich – Mikron (Triaglide)	3	Maquinado
Universidades		
ISW Stuttgart (Linapod)	3	Maquinado
IWF – Hannover	3	Maquinado láser
ETH Zurich (Hexaglide)	6	Maquinado
ITIA – CNR (Acrobat)	6	Maquinado
ESTADOS UNIDOS		
Empresa	Ejes	Aplicación
Tornado 2000 (Hexel)	6	Maquinado
Rotapod (Hexel)	6	Maquinado
Variax (Giddings and Lewis)	6	Maquinado
ASIA		
Universidad-empresa		
Eclipse – Universidad de Seul	6	Maquinado
Leadwell (X-700R)	6	Maquinado
Okuma	6	Maquinado
HexaM	6	Maquinado
Honda Engineering	3	Maquinado
Fanuc Robotics (F-200i)	6	Soldadura

Fuente: Elaboración propia, con adaptaciones de [6][42]

Estudios como los desarrollados por Geldart [43], Patel [44] y Pandilov [45], Son [35], Tlustý [46] entre otros, recopilan la evolución de diferentes equipos de cinemática paralela mientras comparan su desempeño frente a sus contrapartidas seriales. Entre sus hallazgos se destaca que aquellos equipos con arquitectura híbrida (serial-paralela) pueden beneficiarse de las ventajas de ambos mecanismos mientras que se atenúan algunas de sus principales deficiencias; en particular estudios como el realizado por Son [35] evidencian ganancias significativas en espacio de trabajo, sin comprometer mucho la rigidez y manipulabilidad.

Entre los pioneros en diseños basados en arquitectura híbrida, se encuentra el equipo Tricept (Fig. 9), desarrollado por la empresa Neos Robotics bajo la patente de Neumann [47] donde se alcanzan 3 grados de libertad gracias a un mecanismo paralelo y se añade una muñeca serial para mejorar la destreza de la máquina. Esta máquina con eslabones extensibles, se ha implementado en empresas como Boeing, Volkswagen, Audi y Renault entre otras. En este caso, la incorporación de una muñeca serial al mecanismo también implica una pérdida significativa en la rigidez y la capacidad dinámica, factores que serán relevantes según la aplicación.



Variax de Giddings and Lewis



Okuma PM-600 de Okuma



Hexaglide de ETHZ



Eclipse de Sena Technology

Figura 8. Fresadoras de 6 GDL.
Fuente: Según fabricante.

Bajo esta misma arquitectura han surgido otros fabricantes como Teknodrom e Icon Industries que en el año 2015 han introducido sus modelos con 5 ejes para aplicaciones en industria automotriz, aeroespacial u otras en maquinado de componentes que van desde aluminio hasta titanio e inonel.

3.1. Fresadoras de 3 ejes

Las fresadoras de 3 ejes entran en la categoría de equipos de menor movilidad (menos de 5 GDL) y son las más populares en el sector metalmecánico; por ello, en la Tabla 3 se resaltan algunas características de diferentes arquitecturas para máquinas herramientas con dicha capacidad de posicionamiento. Se destaca que los sistemas híbridos (combinación de mecanismos seriales y paralelos) tienden a obtener una relación de espacio de trabajo a espacio de máquina superior (y comparable en algunos casos a máquinas seriales) con excelentes prestaciones dinámicas (velocidades y aceleraciones lineales máximas). Para este nivel de movilidad no se hace tan evidente la penalización al agregar grados de libertad seriales, por cuanto se acostumbra a incorporar máximo 2 GDL a la herramienta de corte (en contraste con 5 o más para sistemas de 6 GDL).

Un ejemplo interesante es el sistema Specht Xperimental, donde se tiene una fresadora horizontal con dos grados de libertad paralelos mediante un mecanismo de tijeras. La mesa de trabajo, brinda otro grado de libertad. La máquina brinda un espacio de trabajo y velocidades importantes [22].

Otros mecanismos paralelos como Orthoglide [49], se diseñaron contemplando un comportamiento cinemático similar a equipos seriales partiendo de un mecanismo puramente traslacional. Otro esquema presente en el equipo LOLA [48] se redujo a un equipo educacional de bajo costo, con mecanismo espacial.

Tabla 3.
Fresadoras de 3 ejes desarrolladas a la fecha.

Fabricante	Modelo	Aplicación	Tipo	ET (mm)	VM (mm)	ET/VM	Vel lineal (m/min)	Acel lin (m/s ²)
Chiron	V-Concept	Fresadora	Híbrido	450*300*300	-	-	120	30
Fatronik	Ulyses	Fresadora	Paralela	500*500*500	-	-	50	5
Heckert	SKM 400	Fresadora	Paralela	630*630*630	-	ND	100	10
Hitachi Seiki	PA 35II	Taladro	Paralela	350*350*200	-	-	100	15
Honda	HVS-500	Fresadora	Híbrido	650*500*400	-	-	60	10
HullerHille	Specht Xperimental	Fresadora	Híbrido	630*630*750	-	-	120/120/60	15/15/10
Krauseco&Mauser	Quickstep HS500	Fresadora	Paralela	630*630*500	-	-	80	20
Mikron	Triaglide	Fresadora	Paralela	170*120*250	-	0,16%	-	15
Reichenbacher	Pegasus	Fresadora (Madera)	Paralela	5000*1400*250	-	ND	120	10
Renault Automation	Urane Sx	Taladro	Paralela	500*500*250	-	0,25%	100	35
SME Tianjin University	3-HSS	Fresadora	NA	diam 500 H400	-	-	20	10
WZL Aachen	DynaM	Fresadora	Híbrido	630*630*500	3000*6000	2,21%	90	15
IRCCyN	Orthoglide	Fresadora	Paralela	200*200*200	-	0,46%	-	-
ISW Stuttgart	Linapod	Fresadora	Paralela	400*400*400	2300*2000*3000	0,46%	45	-
University of Belgrade	LOLA	Fresadora	Paralela	120*100*35	460*355*480	0,54%	10	-
Index	V100	Torno/Fresadora	Paralela	280*280*145	1700*3000*2400	0,09%	50	10
Haas Automation	Minimill	Fresadora	Serial	406*304*254	2000*2000*1600	0,49%	15,2	-
Haas Automation	OM-1A	Fresadora	Serial	203*203*305	1000*1200*2000	0,52%	19,2	-
Light Machines Corp.	spectraLIGHT 200	Fresadora	Serial	216*114*140	560*560*635	1,73%	0,762	-
Techno Inc	RG 5950	Fresadora*	Serial (P. M)	1500*1300*254	1850*2200*1850	6,58%	20,32	-
Charly Robot	Charly4U	Fresadora*	Serial (P. F.)	310*220*160	730*870*620	2,77%	6	-
Okuma	MB-46V	Fresadora	Serial	500*460*460	1900*2700*2750	0,75%	32	4,9
Okuma	MB-500H	Fresadora	Serial	500*500*460	2800*4880*3015	0,28%	60	9,8
Mori Seiki	DuraVertical	Fresadora	Serial	600*530*510	1900*2315*2500	1,47%	36	-

*Fresadoras seriales de pórtico móvil (P. M) y fijo (P. F)

El espacio de trabajo (ET) y el volumen de máquina (VM) se expresan según el alcance a lo largo de los ejes X, Y y Z respectivamente.

Fuente: Elaboración propia, con adaptaciones de [21,22,49,48].

Luego de revisar la tabla anterior, para los sistemas paralelos se puede observar que cuentan con una relación de espacio de trabajo a volumen de máquina inferior (respecto a los híbridos y/o seriales) con velocidades y aceleraciones lineales considerables. Estos factores son primordiales para hacer una comparación entre arquitecturas aunados a la rigidez mínima, precisión o repetibilidad (según los requerimientos del usuario final).

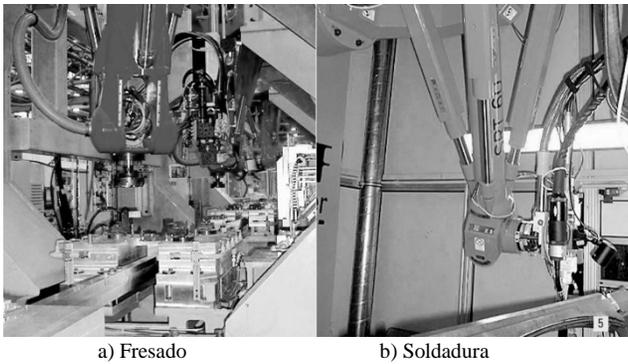
3.2. Otros sectores de aplicación

En la actualidad, muchas estructuras de cinemática paralela han encontrado un nicho de mercado no sólo en simuladores de vuelo o en manipuladores, sino también como máquinas herramientas. Sus aplicaciones a nivel general se imponen en posicionamiento, maquinado y ensamblaje de alta velocidad. A continuación se presentan algunas de las industrias que han empleado esta clase de máquinas [6, 14, 22, 50]:

- **Industria Aeroespacial:** La industria de la aviación moderna, se caracteriza por diseños integrales resultantes en componentes complejos a ser maquinados. Dichos componentes requieren de una remoción de hasta 80% del material inicial, con equipos de 5 ejes o más. Empresas como Boeing y Airbus han visto el potencial de esta

tecnología para mejorar su productividad (Fig. 9).

- **Industria Automotriz:** Este sector requiere el uso de sistemas flexibles o semi-flexibles de manufactura, donde el desempeño al igual que los costos operacionales de los equipos juegan un papel preponderante en la viabilidad económica. Se han implementado trenes de maquinado capaces de satisfacer los requerimientos anteriores para trabajar sobre motores. Algunos equipos concebidos para esta industria y para maquinados complejos se recopilan en la Fig. 10.
- **Otras aplicaciones** incluyen el maquinado de moldes, plásticos y madera. En casos más recientes se han encontrado usos en maquinado con láser, soldadura, micromaquinado, impresión 3d [51] entre otros. También se han desarrollado equipos para el campo de la salud como equipos para la asistencia quirúrgica como plataformas Stewart para cirugía de precisión ([52], Fig. 11), plataformas guiadas por cables para rehabilitación [53] y otros mecanismos de asistencia [54,55], dispositivos de resucitación cardio-pulmonar entre otros [56].
Algunas investigaciones recientes muestran su aplicación al conformado de componentes en lámina metálica, considerándolos como alternativas viables, especialmente si se considera su versatilidad para procesos posteriores en la línea de producción [57].



a) Fresado b) Soldadura
 Figura 9. PKM Tricept en industria aeroespacial.
 Fuente: [58].

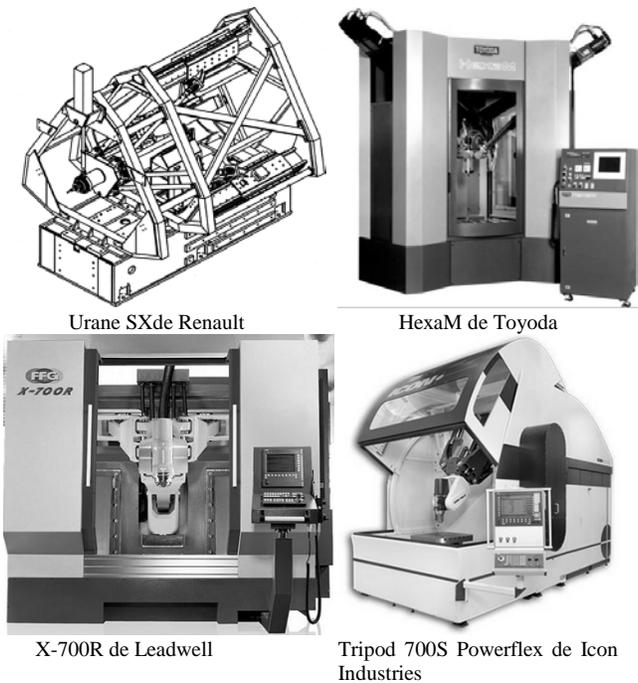


Figura 10. Ejemplo de algunas máquinas herramientas con cinemática paralela empleados en la industria automotriz.
 Fuente: Según fabricante.

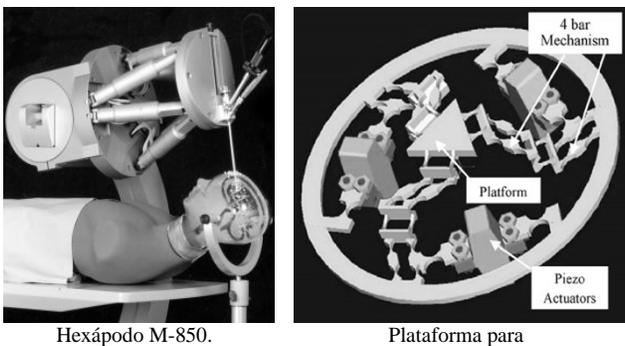


Figura 11. Cinemática paralela en aplicaciones médicas y nanoposicionamiento.
 Fuente: Figura a) Physik Instrumente, Figura b) [59].

En resumen, es posible afirmar que las máquinas de cinemática paralela cuentan con una gran variedad de cualidades que les permiten ofrecerse como excelentes soluciones para problemas de manufactura, automatización y posicionamiento. Información adicional y referencias a algunos artículos de investigación actualizados, pueden encontrarse en Parallelic [21] o INRIA [40].

4. Conclusiones y retos a futuro

Desde sus inicios, las MHCP despertaron gran interés como equipos superiores en las limitantes de los sistemas seriales. Tras años de investigación y desarrollo se han resaltado en múltiples características como rigidez y capacidad dinámica respecto a sus contrapartes seriales, pero han tenido una introducción lenta enfocada principalmente hacia equipos híbridos con arquitecturas como la patentada por Neumann (1988) de 3 GDL paralelos y 2 seriales, que empresas como Icon Industries, Leadwell y Teknodrom aprovecharon para comercializar productos con buena aceptación, gran precisión y versatilidad.

Los primeros equipos puramente paralelos con 6 GDL habían apuntado a un mercado muy reducido, puesto que en la mayoría de aplicaciones industriales incluso el maquinado de cinco ejes tampoco es requerido [11, 31]. Conforme a ello, se propone avanzar en equipos paralelos de menor movilidad (menos de 5 GDL) con arquitectura híbrida, concentrados en la aplicación industrial que se beneficien de las virtudes de cada tipo de arquitectura.

Como se ha mencionado, el desarrollo de estructuras paralelas para máquinas herramientas es un campo relativamente nuevo y con mucho camino por recorrer. Las posibilidades de trabajos futuros y desarrollos investigativos o tecnológicos en el área no tienen límites. Estos desarrollos se hacen atractivos puesto que, pese a muchos años de haber sido presentada esta tecnología al mercado ha logrado competir y ganar en múltiples aspectos a una arquitectura convencional (serial) con más 200 años de desarrollo y optimización [46, 25]. En este sentido, equipos con cinemática paralela para tareas de manipulación han marcado una gran diferencia con niveles de productividad nunca alcanzables con manipuladores seriales y por gozando de gran aceptación como los robots Delta y Hexa.

Por ello, se requiere más investigación y desarrollo para explotar al máximo su potencial para el mercado de máquinas herramientas. Algunas líneas de investigación se detallan a continuación:

- Calibración y mantenimiento: Desarrollar e implementar procesos de calibración simples, métodos y equipos para la evaluación de la precisión geométrica de fácil implementación industrial.
- Diseño mecánico: Metodologías completas que integren requerimientos, síntesis y optimización de la máquina. Considerando factores como la velocidad, rigidez, facilidad de control, espacio de trabajo entre otros índices de desempeño.
- Diseño de sistemas de control: Permitir mejoras en la precisión y productividad de las máquinas, planeación óptima de trayectorias y estrategias de corte.
- Síntesis de arquitecturas y creación de modelos

dinámicos: Para maximizar factores como la velocidad, rigidez y espacio de trabajo en forma abreviada.

- Diseño de módulos: Desarrollo y optimización de módulos y subcomponentes como juntas universales o esféricas con una mayor rigidez y resolución, a menores costos.

Referencias

- [1] Youssef, H. A. and El-Hofy, H., *Machining technology: Machine tools and operations*. CRC Press, 2008.
- [2] Craig, J.J., *Introduction to robotics: Mechanics and control*. Upper Saddle River, Pearson Prentice Hall, 2005.
- [3] Briot, S. and Bonev, I., Are parallel robots more accurate than serial robots?. *CSME Transactions*, 2007, 31(4), pp. 445-456.
- [4] Bonev, I.A. and Gosselin, C., *Fundamentals of parallel robots*. Springer, 2010.
- [5] Merlet, J.P., *Parallel robots*. Springer Science & Business Media, 2006. DOI: 10.1007/1-4020-4133-0
- [6] Fassi, I. and Wiens, G.J., Multiaxis machining: PKMs and traditional machining centers. *Journal of Manufacturing Processes*, 2000, 2(1), pp. 1-14. DOI: 10.1016/S1526-6125(00)70008-9
- [7] San Martín, Y., Giménez, M., et al., Máquinas de cinemática paralela: Implementación industrial y futuras tendencias [en línea]. Disponible en: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/26569-Maquinas-de-cinemática-paralela-implementación-industrial-y-futuras-tendencias.html>.
- [8] Pritschow, G., Parallel kinematic machines (PKM)—Limitations and new solutions. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2000, 49(1), pp. 275-280. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62945-X
- [9] Zhang, D., *Parallel robotic machine tools*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [10] Groover, M., *Fundamentos de Manufactura Moderna*. 3ª Edición. McGraw Hill, 2007.
- [11] Gwinnett, J.E., Amusement device. U.S. Patent No 1,789,680, 20 Ene. 1931.
- [12] Gough, V.E. and Whitehall, S.G., Universal tyre test machine. *En Proc. FISITA 9th Int. Technical Congress*. 1962. pp. 117-137.
- [13] Stewart, D., A platform with six degrees of freedom. *Proceedings of the institution of mechanical engineers*, 180(1), pp. 371-386, 1965, DOI: 10.1243/PIME_PROC_1965_180_029_02
- [14] Siciliano, B. and Khatib, O. (eds.), *Springer handbook of robotics*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [15] Cappel, K., Motion simulator. U.S. Patent No 3,295,224, 3 Ene. 1967.
- [16] Clavel, R., A fast robot with parallel geometry. *En Proc. Int. Symposium on Industrial Robots*. 1988. pp. 91-100.
- [17] Clavel, R., Device for the movement and positioning of an element in space. U.S. Patent No 4,976,582, 1990.
- [18] Pierrot, F., Dauchez, P. and Fournier, A., HEXA: A fast six-DOF fully parallel robot. *En Advanced Robotics, 1991. 'Robots in Unstructured Environments', 91 ICAR., Fifth International Conference on. IEEE, 1991. pp. 1158-1163. DOI: 10.1109/ICAR.1991.240399*
- [19] Canseco, M.C.M., Diseño de un robot paralelo. *ITECKNE: Innovación e Investigación en Ingeniería*, 6(2), pp. 29-35, 2009. DOI: 10.15332/iteckne.v6i2.273
- [20] Bonev, I., Delta parallel robot — The story of success [online]. Disponible en: <http://www.parallelic.org/Reviews/Review002.html>.
- [21] Parallelic. Patents related to parallel mechanisms [online]. Disponible en: www.parallelic.org/Patents.html.
- [22] Weck, M. and Staimer, D., Parallel kinematic machine tools—Current state and future potentials. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 51(2), pp. 671-683, 2002. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61706-5
- [23] Tsai, L.-W., *Robot analysis: The mechanics of serial and parallel manipulators*. John Wiley & Sons, 1999.
- [24] Barrientos, A., Balaguer, C., et al., *Fundamentos de robótica*. McGraw-Hill, 2007.
- [25] Lee, T.-Y. and Shim, J.-K., Improved dialytic elimination algorithm for the forward kinematics of the general Stewart–Gough platform. *Mechanism and Machine Theory*, 38(6), pp. 563-577, 2003. DOI: 10.1016/S0094-114X(03)00009-0
- [26] Raghavan, M., The Stewart platform of general geometry has 40 configurations. *Journal of Mechanical Design*, 115(2), pp. 277-282, 1993. DOI:10.1115/1.2919188
- [27] Rouillier, F., Real root counting for some robotics problems. *En Computational Kinematics' 95*. Springer Netherlands, 1995, pp. 73-82. DOI: 10.1007/978-94-011-0333-6_8
- [28] Merlet, J.-P., Solving the forward kinematics of a Gough-type parallel manipulator with interval analysis. *The International Journal of Robotics Research*, 23(3), pp. 221-235, 2004. DOI: 10.1177/0278364904039806
- [29] Sommese, A.J. and Wampler, C.W., *The numerical solution of systems of polynomials arising in engineering and science*. Singapore: World Scientific, 2005. DOI: 10.1142/9789812567727
- [30] Briot, S. and Khalil, W., *Dynamics of parallel robots: From rigid bodies to flexible elements*. 1ª Edición. Springer, 2015.
- [31] Tosatti, L.M., et al. An integrated methodology for the design of parallel kinematic machines (PKM). *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 47(1), pp. 341-345, 1998. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62847-9
- [32] Wurst, K.-H., et al., Systematic design of hexapods and other parallel link systems. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 46(1), pp. 291-295, 1997. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60828-2
- [33] Ivanov, A.V. and Klepikov, S.I., Generational synthesis of machine tools with parallel kinematics. *Russian Engineering Research*, 28(7), pp. 697-700, 2008. DOI: 10.3103/S1068798X08070137
- [34] Liu, X.-J. and Wang, J., *Parallel kinematics: Type, kinematics and optimal design*. Springer Science & Business Media, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-36929-2
- [35] Son, S., et al., A hybrid 5-axis CNC milling machine. *Precision Engineering*, 33(4), pp. 430-446, 2009. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2008.12.001
- [36] Harib, K.H., Ullah, A.S. and Hammami, A., A hexapod-based machine tool with hybrid structure: Kinematic analysis and trajectory planning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(9), pp. 1426-1432, 2007. DOI: 10.1016/j.ijmactools.2006.09.021
- [37] Kanaan, D., Wenger, P. and Chablat, D., Kinematic analysis of a serial-parallel machine tool: The VERNE machine. *Mechanism and Machine Theory*, 44(2), pp. 487-498, 2009. DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2008.03.002
- [38] Xie, F.G., et al., Design and experimental study of the SPKM165, a five-axis serial-parallel kinematic milling machine. *Science China Technological Sciences*, 54(5), pp. 1193-1205, 2011. DOI: 10.1007/s11431-011-4314-3
- [39] Refaat, S., et al., High-precision five-axis machine for high-speed material processing using linear motors and parallel-serial kinematics. *In: 2006 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. IEEE, pp. 501-506, 2006. DOI: 10.1109/ETFA.2006.355381*
- [40] INRIA. Information on Parallel Robots [online]. Available at: http://www.sop.inria.fr/members/Jean-Pierre.Merlet/merlet_eng.html
- [41] De Lacalle, N.L. and Mentxaka, A.L. (ed.), *Machine tools for high performance machining*. Springer Science & Business Media, 2008. DOI: 10.1007/978-1-84800-380-4_7
- [42] Tönshoff, H.-K. and Grendel, H., A systematic comparison of parallel kinematics. *In: Parallel Kinematic Machines*. Springer London, pp. 295-312, 1999. DOI: 10.1007/978-1-4471-0885-6_21
- [43] Geldart, M., et al., A direct comparison of the machining performance of a variax 5 axis parallel kinetic machining centre with conventional 3 and 5 axis machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(11), pp. 1107-1116. 2003. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00119-6
- [44] Patel, Y.D., et al., Parallel manipulators applications—A survey. *Modern Mechanical Engineering*, 2(03), pp. 57-64, 2012. DOI: 10.4236/mme.2012.23008
- [45] Pandilov, Z. and Dukovski, V., Parallel kinematics machine tools: Overview-from history to the future. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 10(2), pp. 111-124, 2012.
- [46] Tlustý, J., Ziegert, J. and Ridgeway, S., Fundamental comparison of the use of serial and parallel kinematics for machines tools. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 48(1), pp. 351-356, 1999. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63200-4

- [47] Neumann, K-E., Robot. U.S. Patent No 4,732,525, 22 Mar. 1988.
- [48] Glavonjic, M., et al., Desktop 3-axis parallel kinematic milling machine. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46(1-4), pp. 51-60, 2010. DOI: 10.1007/s00170-009-2070-3
- [49] Majou, F., Wenger, P. and Chablat, D., Design of a 3 axis parallel machine tool for high speed machining: The Orthoglide. arXiv preprint arXiv:0705.1271, 2007.
- [50] Rehsteiner, F., et al., Putting parallel kinematics machines (PKM) to productive work. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 48(1), pp. 345-350, 1999. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63199-0
- [51] Torres, E.J., Gasca, E.A. y Cortés, C.A., Desarrollo de un robot paralelo 5R para la impresión en 3D. Memorias, 2015.
- [52] Wapler, M., et al., A Stewart platform for precision surgery. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 25(4), pp. 329-334, 2003. DOI: 10.1191/0142331203tm092oa
- [53] Rosati, G., et al., Performance of cable suspended robots for upper limb rehabilitation. In: 2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics. IEEE, 2007. pp. 385-392. DOI: 10.1109/ICORR.2007.4428454
- [54] Rico, B.D.M. and Castañeda, E., Design of a 2DOF parallel mechanism to assist therapies for knee rehabilitation. Ingeniería e Investigación, 36(1), pp. 98-104, 2016. DOI: 10.15446/ing.investig.v36n1.53191
- [55] Tibađuiza, M.A.D.A. y Grosso, J.M., Diseño de un exoesqueleto mecatrónico de brazo basado en screws y robots paralelos. 2do Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica, 2009.
- [56] Gomes, P., Surgical robotics: Reviewing the past, analysing the present, imagining the future. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27(2), pp. 261-266, 2011. DOI: 10.1016/j.rcim.2010.06.009
- [57] Callegari, M., et al., Incremental forming of sheet metal by means of parallel kinematics machines. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 130(5), pp. 054501-054501-5, 2008. DOI: 10.1115/1.2823064
- [58] Tricept. PKM Tricept [online]. Available at: <http://www.pkmtricept.com/>.
- [59] Yao, Q., Dong, J. and Ferreira, P.M., A novel parallel-kinematics mechanism for integrated, multi-axis nanositioning: Part I. kinematics and design for fabrication. Precision Engineering, 32(1), pp. 7-19, 2008. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2007.03.001

D.A. Serje-Martínez, es Ing. Mecánico, de la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. MSc. en Ing. Mecánica, de la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Investigador Grupo de Investigación en Materiales Procesos y Diseño.
ORCID: 0000-0001-9963-9231

J.A. Pacheco-Bolívar, es Ing. Mecánico, de la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. MSc. en Ing. Mecánica, de la Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Dr. en Ciencias de la Ingeniería, del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México. Docente tiempo completo e investigador Grupo de Investigación en Materiales Procesos y Diseño.
ORCID: 0000-0001-7632-7227



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Mecánica

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Mecánica

Mayor información:

E-mail: acmecanica_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 4259262