

PROYECTO MULTI E INTERDISCIPLINARIO PIMI-15-04

"Control adaptativo basado en inteligencia artificial aplicado a un sistema mecatrónico fundado en un robot paralelo para la diagnosis y rehabilitación"

En la ciudad de Quito D.M., a los veinte y un días del mes de agosto del año dos mil veinte, comparecen a la celebración de la presente Acta de Finalización del Proyecto Multi e Interdisciplinario **PIMI-15-04: "Control adaptativo basado en inteligencia artificial aplicado a un sistema mecatrónico fundado en un robot paralelo para la diagnosis y rehabilitación"**, por una parte, la **Dra. Alexandra Patricia Alvarado Cevallos** en calidad de **Vicerrectora de Investigación, Innovación y Vinculación** de la Escuela Politécnica Nacional, y por otra el **M.Sc. Iván Zambrano** en calidad de **Director de Proyecto Multi e Interdisciplinario PIMI-15-04**, al tenor de lo siguiente:

1. ANTECEDENTES:

- a) El 4 de mayo de 2015, el Consejo de Investigación y Proyección Social mediante Resolución 22, aprueba el Cronograma de la Convocatoria para la presentación de Proyectos de Investigación Internos, Semilla, Junior y Multi e Interdisciplinarios 2015.
- b) El 21 de septiembre de 2015, al amparo de lo dispuesto por Consejo de Investigación y Proyección Social, mediante Resolución 53, se aprobaron los proyectos de la Convocatoria 2015, entre ellos el proyecto Multi e Interdisciplinario denominado: "*Control adaptativo basado en inteligencia artificial aplicado a un sistema mecatrónico fundado en un robot paralelo para la diagnosis y rehabilitación*", presentado por el M.Sc. Iván Zambrano.
- c) Mediante Memorando EPN-VIPS-2016-0098-M del 27 de enero de 2016, se informa a los directores de los proyectos Multi e Interdisciplinario 2015 que la fecha de inicio de los proyectos es el 1 de marzo de 2016.
- d) Mediante Memorando EPN-VIPS-2016-0593-M del 31 de mayo de 2016, se informa a los directores de los proyectos que debido a que la asignación de fondos tuvo retrasos, la fecha de inicio de los proyectos es el 1 de junio de 2016.

2. DATOS GENERALES DEL PROYECTO:

Código de Proyecto	PIMI-15-04
Nombre del Proyecto	<i>Control adaptativo basado en inteligencia artificial aplicado a un sistema mecatrónico fundado en un robot paralelo para la diagnosis y rehabilitación.</i>
Director del Proyecto	ZAMBRANO OREJUELA OSCAR IVAN
Colaboradores del Proyecto	CRUZ DAVALOS PATRICIO JAVIER GRANJA RAMIREZ MARIO GERMAN VENEGAS TORO WILLIAM RICARDO ROSALES ACOSTA JORGE ANDRES SOTO AYMAR LUIS RICARDO RODAS BENALCAZAR ANA VERONICA- DESV.
Departamento	DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
Líneas de Investigación	<ul style="list-style-type: none"> • ELEMENTOS FINITOS CON APLICACIONES • EQUIPOS MEDICOS • CONTROL AUTOMATICO • ROBOTICA Y MECATRONICA • INTELIGENCIA ARTIFICIAL • MAQUINAS Y MECANISMOS



Objetivo	<i>Desarrollar un Laboratorio Bioingeniería del que actualmente no dispone la EPN.</i>
Duración del Proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Inicio: 1 de junio del 2016</i> • <i>Fin planificado: 31 de mayo del 2019</i> • <i>Prórroga Ordinaria: hasta el 31 de diciembre de 2019</i> • <i>Duración total: 42 meses</i>
Entrega del Informe Final	<i>16 de junio del 2020</i>
Presupuesto asignado	<i>\$ 199.668,55 USD (CIENTO NOVENTA Y NUEVE MIL SEISCIENTOS SESENTA Y OCHO Y 55/100. DÓLARES AMERICANOS)</i>
Presupuesto ejecutado	<i>\$ 172.911,00 USD (CIENTO SETENTA Y DOS MIL NOVECIENTOS ONCE DÓLARES AMERICANOS CON 00/100).</i>

3. INFORME FINAL:

Mediante Memorando Nro. EPN-PIMI-15-04-2020-0008-M del 16 de junio de 2020 el M.Sc. Iván Zambrano, Director del Proyecto PIMI-15-04, presenta el Informe Final del Proyecto Multi e Interdisciplinario PIMI-15-04. El informe es revisado por la Dirección de Investigación, se anexa y forma parte integrante de la presente Acta de Finalización, cuyas conclusiones y productos generados son:

CONCLUSIONES:

- El modelo matemático y ecuaciones generadas en el estudio cinemático del robot paralelo 3 UPS + 1 RPU entrega curvas de simulación en concordancia con lo esperado para este tipo de robot, además se valida el tipo de articulaciones determinadas inicialmente.
- El desarrollo del modelo dinámico significó un gran esfuerzo y tiempo de trabajo. Se utilizó la formulación de Gibbs Appell para obtener uno de los principales productos de esta investigación, esto es, el conjunto de ecuaciones no lineales que gobiernan el comportamiento dinámico del robot. La simulación nos permite conocer la necesidad de hacer ajustes para poder acercarnos a la realidad.
- A fin de tener una primera validación de los modelos cinemático y dinámico, se desarrolla un modelo del robot con toda la información necesaria y se realizan las simulaciones en Matlab y Adams View, se establece un error hasta del 20%, este resultado se consideró importante para continuar con lo planificado. A este punto fue posible obtener un grupo de publicaciones como producto importante de esta etapa.
- El modelo dinámico es complejo y necesita ser ajustado para facilitar la implementación del sistema de control. Se disminuyen los errores a través del desarrollo de un modelo dinámico lineal con respecto a parámetros inerciales (masa, primer momento de masa y momento de inercia) y se incorpora un modelo de fricción en parámetros de Coulomb y viscosidad. En las validaciones con Adams View se disminuye el error hasta un 12%, valor que se estima aceptable para los propósitos de nuestro proyecto.
- Se demuestra la validez de la hipótesis para reducir el modelo dinámico lineal, obteniendo un modelo en parámetros base, mediante el método numérico de descomposición en valores singulares. Este método utiliza una curva de identificación de parámetros base generada mediante series de Fourier finitas, optimizada a través de algoritmos de minimización restringida por

recorrido, velocidad y aceleración de los actuadores lineales, y también el espacio de trabajo de las articulaciones esféricas del robot paralelo.

- Se cuantifica el grado de compatibilidad del modelo dinámico reducido, a través del cálculo del error cuadrático medio determinado entre las fuerzas generalizadas de las articulaciones independientes obtenidas con dicho modelo y comparado con las fuerzas simuladas en el software Adams/View para una trayectoria generada mediante series de Fourier finitas. Los valores obtenidos son aceptables de acuerdo a referencias establecidas en el estado del arte. Los productos establecidos en los puntos d, e y f, son fundamentales, esto debe ser validado plenamente a través de mediciones en un prototipo real del robot, los resultados son la base para las publicaciones Q1.
- Se desarrolla un sistema de control que permite controlar las trayectorias de rehabilitación definidas. Se utiliza software libres ROS y OROCOS, a fin de garantizar buenos resultados en la aplicación de la arquitectura abierta de control del robot paralelo, además se facilita el desarrollo y testeo de diversos módulos de programación implementados. Las trayectorias pueden ser grabadas y por tanto reproducidas a fin de aplicar al paciente actividades de rehabilitación sin la presencia del profesional fisioterapistas.
- Se diseñó y ensambló el robot paralelo con éxito, este prototipo permitió tomar datos experimentalmente para comparar con los datos de las simulaciones.
- En la simulación del mecanismo se observó que en la configuración $X=0$, $\theta=0^\circ$, $\psi=0^\circ$, el robot caía en una singularidad. Esto significa que en esa posición la plataforma pierde estabilidad y no puede ser controlada de ninguna forma. Con el fin de evitar problemas con las singularidades de modo permanente, se modificó la geometría del robot, para lograrlo se eliminó la simetría en la disposición de las uniones de las extremidades tanto en la base como en la plataforma móvil. Debido a esto se rediseñó la geometría para la construcción del robot; así como la generación de trayectorias de pruebas.
- Es necesario continuar con esta investigación considerando las aplicaciones que este robot puede tener en actividades de rehabilitación de rodilla, al poder entregar el servicio atendiendo las decisiones del personal de sanidad, pero también facilitando al paciente su rehabilitación, disminuyendo sus costos, evitando su traslado diario en condiciones complicadas y liberando su tiempo a fin de cumplir con sus actividades programas en porcentajes aceptables.

PRODUCTOS:

- Artículo enviado: *Parallel Robot for Knee Rehabilitation: Reduced Order Dynamic Linear Model, Mechanical Assembly and Control System Architecture*; Elizabeth Armas, Patricio Cruz, Ricardo Soto, Henry Lema, Mario Granja, Andrés Rosales, Iván Zambrano Orejuela; *Mechatronics* (Q1); mayo 2020.
- Artículo enviado: *Experimental Analysis of Type II Singularities and Assembly Change Points in a 3UPS+RPU Parallel Robot*; Vicente Mata Amela, Ángel Valera, Miguel Díaz, Iván Zambrano Orejuela, José Luis Pulloquina, Paul Zamora; *Mechanism and Machine Theory* (Q1); abril 2020.

- Artículo publicado: *Utilización del middleware orocos para la implementación de controladores en tiempo real*; Iván Zambrano, Ana Rodas, Fabricio Tipantocta; Innova Research Journal; Vol 3, No. 10.1, 184-194; DOI: <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n10.1.2018.754>; Octubre 2018.
- Memorias de Evento: *Evaluación de la cercanía a singularidades mediante índices de transmisión de salida en un robot paralelo 3UPS + RPU*; Vicente Mata Amela, Ángel Valera, Miguel Díaz, Iván Zambrano Orejuela, José Luis Pulloquina.; *Memorias XIV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*; ISBN 978-958-52438-6-6; octubre 2019.
- Memorias de evento: *Dynamic Model of a Parallel Robot Type 3UPS + 1RPU for Knee Rehabilitation*; J. L. Pulloquina, S. M. Aquino, E. R. Pozo, P. J. Cruz and O. I. Zambrano.; *2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA) (Scopus)*, Barranquilla, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/CCRA.2018.8588150
- Memorias de evento: *Análisis Cinemático de un Robot Paralelo de tipología 3UPE-RPU*; Morales, R. Baño, D., Zambrano, I., Rosales, A. ; *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology Volume 2018 (Scopus)*; DOI: 10.18687/LACCEI2018.1.1.451; Julio 2018
- Memorias de evento: *Mathematical model of a planar four-link mechanism for motion of the cruciate ligaments of the knee joint and validation of the model using video analysis*; M. Gómez, I. Zambrano and A. Rosales; *2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*; Salinas, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ETCM.2017.8247479.; Octubre 2017
- Memorias de evento: *Análisis cinemático de la rodilla, aplicando el método de eje finito helicoidal*; Ivan Zambrano; Jaime Zagal; *Memorias del Primer Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación – CIBSIR-2017*; ISBN:978-9978-10-302-9; Noviembre 2017.
- Memorias de evento: *Análisis dinámico de un robot paralelo mediante Gibbs Appell y el principio de trabajos virtuales*; Ivan Zambrano, David Pareja C., María Alejandra Pazmiño; *Memorias del Primer Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación – CIBSIR-2017*; ISBN:978-9978-10-302-9; Noviembre 2017.
- Memorias de evento: *Análisis cinemático y dinámico de un robot paralelo según el principio de trabajos virtuales para rehabilitación*; Iván Zambrano, William Venegas, Miguel Aquino, Edwin Pozo; *Memorias del Primer Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación – CIBSIR-2017*; ISBN:978-9978-10-302-9; Noviembre 2017.
- Capítulo de Libro: *Modelo cinemático y Dinámico no Lineal de un Robot Paralelo 3 UPS+RPU*; Iván Zambrano, Andrés Rosales, Daysi A. Baño; Elizabeth Armas; *Avances de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación en Latino América 2019 – CIBSIR-2018*, ISBN: 978-9942-784-66-7; Octubre 2019.
- Capítulo de libro: *Desarrollo e implementación de un sistema de visión artificial y seguimiento de objetivos humanos por un cuadricóptero de exteriores utilizando Mat-Lab*; Mario Granja; Erick Herrera, Jonathan Loor; *Avances de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación en Latino América 2019 – CIBSIR-2018*, ISBN: 978-9942-784-66-7; Octubre 2019.
- Capítulo de libro: *Desarrollo de controladores por software para un manipulador usando Orocós*; Iván Zambrano, Ana Rodas; Javier Acosta; *Avances de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación en Latino América 2019 – CIBSIR-2018*, ISBN: 978-9942-784-66-7; Octubre 2019.

- Ponencia: *Evaluación de la cercanía a singularidades mediante índices de transmisión de salida en un robot paralelo 3UPS + RPU*; José Luis Pulloquina; XIV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica; Cartagena-Colombia; Octubre 2019
- Ponencia: *Análisis Cinemático de un Robot Paralelo de tipología 3UPE-RPU*; Daysi Baño; XVI LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology; Lima- Peru; Julio 2018.
- Ponencia: *Dynamic Model of a Parallel Robot Type 3UPS + 1RPU for knee Rehabilitation*; José Luis Pulloquina; 2018 IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA); Barranquilla-Colombia; Noviembre 2018
- Presentación a la comunidad politécnica: *Presentación de resultados iniciales de los proyectos de investigación desarrollados entre la Escuela Politécnica Nacional y la Universidad Politécnica de Valencia, en el área de Biomecánica*; Seminario; Quito-Ecuador; Marzo 2017.
- Proyecto de titulación: *Análisis de video del comportamiento cinemático de la rodilla, usando el método de eje finito helicoidal*; Ingeniería Mecánica; Zagal Molina, Jaime Javier; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19001>; Diciembre 2017.
- Proyecto de titulación: *Ajuste de un modelo de rodilla basado en el mecanismo 4R para movimientos planos, usando video análisis para capturar el movimiento*; Ingeniería Mecánica; Gómez Toapanta Mario Bayardo; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17948>; Agosto 2017.
- Proyecto de titulación: *Análisis cinemático y simulación del robot paralelo de tipología 3UPE-RPU*; Ingeniería Mecánica; Morales Palma William Rolando; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17247>; Marzo 2017
- Proyecto de titulación: *Estudio de la aplicación de las ecuaciones de Gibbs Appell en el análisis dinámico de un robot paralelo 3UPE-1RPU*; Ingeniería Mecánica; Pareja Carrillo David Rodrigo, Pazmiño Apolo María Alejandra; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19150>; Febrero 2018.
- Proyecto de titulación: *Validación cinemática de un robot paralelo de tipología 3UPS-RPU*; ; Ingeniería Mecánica; Cristian Andrés Flores Parra, Daniel Sebastián López Arboleda; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19967>; Enero 2019.
- Proyecto de titulación: *Diseño, construcción, ensamble y pruebas de un robot paralelo 3UPS+1RPU para rehabilitación de rodilla*; Ingeniería Mecánica; Navarrete Cisneros Josué Ricardo, Sánchez Ruiz Geovanny Xavier; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20582>; Diciembre 2019.
- Proyecto titulación: *Diseño y construcción de un mecanismo para ayuda técnica en la marcha de niños con trastorno neuromotor*; Ingeniería Mecánica; Serrano Barahona Guillermo Israel, Valencia Castro Óscar Guillermo; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20190>; Abril 2019.
- Tesis de maestría: *Análisis Cinemático Inverso y Directo del Robot Paralelo*; Maestría en Diseño, Producción y Automatización Industrial ; Fernández Yáñez, Lorena Alejandra Sotomayor Reinoso, Luisa Fernanda; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16868>; Noviembre 2016.
- Tesis de maestría: *Modelo dinámico de un robot paralelo para rehabilitación de rodilla*; Maestría en Diseño, Producción y Automatización Industrial; Aquino Arroba, Sócrates Miguel Pozo Safía, Edwin; Rodolfo; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18939>; Noviembre 2017.

- Tesis de maestría: *Desarrollo de controladores por software para un manipulador usando OROCOS*; Maestría en Diseño, Producción y Automatización Industrial; Acosta Ruales, Christian Javier; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20207>; Abril 2019.
- Tesis de maestría: *Análisis de compatibilidad del modelo dinámico de un robot paralelo tipo 3UPS+1RPU para rehabilitación de rodilla*, mediante simulación de mecanismos en MSC Adams; Maestría en Mecatrónica y Robótica; Pulloquina Zapata, José Luis; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19567>; Julio 2018.
- Tesis de Maestría: *Desarrollo del modelo dinámico lineal en parámetros inerciales de un robot paralelo para rehabilitación de rodilla*; Maestría en Mecatrónica y Robótica; Armas Freire, Catalina Elizabeth; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19887>; Diciembre 2018.
- Tesis de Maestría: *Análisis de singularidades y espacio de trabajo del robot paralelo de tipología 3UPERPU*; Maestría en Mecatrónica y Robótica; Tumbaco Mendoza, Diana Carolina; <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20249>; Abril 2019.
- Presentación: *Socialización de resultados obtenidos en los Proyectos de Investigación PIJ-15-08 y PIMI-15-04*; Auditorio de la Universidad Regional Amazónica Ikiam – Tena/Napo; Noviembre 2018.
- Ponencia: *Mathematical Model of a Planar Four-Link Mechanism for motion of the cruciate ligaments of the knee joint; and validation of the model using video analysis*; Andrés Rosales; ETCM-IEEE Second Ecuador Technical Chapter Meeting 2017; Salinas- Ecuador; Octubre 2017.
- Ponencia: *Modelo Cinemático y Dinámico no Lineal de un Robot Paralelo 3UPS+RPU*; Iván Zambrano; Segundo Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación – CIBISIR-2018; Ibarra-Ecuador; Diciembre 2018.
- Ponencia: *Análisis de singularidades y espacio de trabajo del robot paralelo de tipología 3UPE-RPU*; Diana Tumbaco; Segundo Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación – CIBISIR-2018; Ibarra-Ecuador; Diciembre 2018.
- Ponencia: *Validación cinemática del robot paralelo de tipología 3UPS + 1RPU*; Cristian Flores, Daniel Lopez; Segundo Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación – CIBISIR-2018; Ibarra-Ecuador; Diciembre 2018.
- Ponencia: *Modelo dinámico del robot paralelo para rehabilitación de rodilla*; Elizabeth Armas; Segundo Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación – CIBISIR-2018; Ibarra-Ecuador; Diciembre 2018.
- Ponencia: *Desarrollo de controladores por software para un manipulador usando Orocós*; Javier Acosta; Segundo Congreso Internacional de Bioingeniería y Sistemas Inteligentes de Rehabilitación – CIBISIR-2018; Ibarra-Ecuador; Diciembre 2018.

4. LIQUIDACIÓN ECONÓMICA:

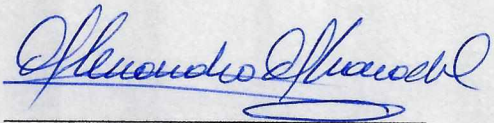
El monto asignado al Proyecto Multi e Interdisciplinario PIMI-15-04 fue de \$ 199.668,55 USD (CIENTO NOVENTA Y NUEVE MIL SEISCIENTOS SESENTA Y OCHO Y 55/100. DÓLARES AMERICANOS), y se ejecutaron \$ 172.911,00 USD (CIENTO SETENTA Y DOS MIL NOVECIENTOS ONCE DÓLARES AMERICANOS CON 00/100), conforme al detalle emitido por la Unidad de Gestión de Investigación y Proyección Social del Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Vinculación, que se adjunta a la presente Acta y forma parte integrante de la misma.

5. FINALIZACIÓN:

Con la presente Acta se declara finalizado y cerrado el Proyecto Multi e Interdisciplinario PIMI-15-04 "Control adaptativo basado en inteligencia artificial aplicado a un sistema mecatrónico fundado en un robot paralelo para la diagnosis y rehabilitación.

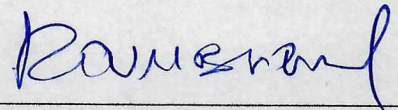
Para constancia de lo ejecutado y por estar de acuerdo con el contenido de la presente Acta, las partes libre y voluntariamente suscriben la misma, en tres ejemplares de igual contenido, tenor y valor legal.

Dado en la ciudad de Quito, D.M. a los veinte y un días del mes de agosto del año dos mil veinte.



Dra. Alexandra Alvarado
**Vicerrectora de Investigación,
Innovación y Vinculación**

np/cc



M.Sc. Iván Zambrano
**Director del Proyecto
PIMI-15-04**

*Recibido
Iván Zambrano
21 de Agosto - 2022*

