

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN JUNIOR PIJ-16-13

"Clasificación de señales electromiográficas del brazo humano usando técnicas de reconocimiento de patrones y Machine Learning"

En la ciudad de Quito D.M., a los veintiséis días del mes de agosto del año dos mil veintiuno, comparecen a la celebración de la presente Acta de Finalización del Proyecto de Investigación Junior **PIJ-16-13 "Clasificación de señales electromiográficas del brazo humano usando técnicas de reconocimiento de patrones y Machine Learning"**, 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 **Dr. Marco Enrique Benalcázar Palacios** en calidad de **Director del Proyecto de Investigación Junior PIJ-16-13**, al tenor de lo siguiente:

1. ANTECEDENTES:

- a) El 9 de mayo de 2016, el Consejo de Investigación y Proyección Social mediante Resolución 036/16, aprueba el Cronograma de lanzamiento de la Convocatoria para la presentación de Proyectos de Investigación Internos, Semilla, Junior y Multi e Interdisciplinarios 2016.
- b) El 9 de febrero de 2017, al amparo de lo dispuesto por Consejo de Investigación y Proyección Social, mediante Resolución 012/17, se aprobaron los proyectos de la Convocatoria 2016 presentados en el *Informe Final de Evaluación de los Proyectos de Investigación de la Convocatoria 2016*, entre ellos el denominado "*Clasificación de señales electromiográficas del brazo humano usando técnicas de reconocimiento de patrones y Machine Learning*", presentado por el Dr. Marco Enrique Benalcázar Palacios.
- c) Mediante Memorando EPN-VIPS-2017-0476-M del 6 de marzo de 2017 se notifica la aprobación del proyecto, y mediante Memorando EPN-VIPS-2017-0747-M del 10 de abril de 2017, se informa a los Directores de los proyectos Junior 2016 que la fecha de inicio de los proyectos es el 17 de abril del 2017.
- d) Mediante Memorando EPN-CIYPS-2019-0084-M del 28 de marzo de 2019, se comunica al Director del proyecto PIJ-16-13, la Resolución RCIPS-062-2019 del 26 de marzo de 2019 de Consejo de Investigación y Proyección Social, con la cual se aprueba la prórroga ordinaria del proyecto hasta el 16 de octubre de 2019.

2. DATOS GENERALES DEL PROYECTO:

Código de Proyecto	PIJ-16-13
Nombre del Proyecto	<i>Clasificación de señales electromiográficas del brazo humano usando técnicas de reconocimiento de patrones y Machine Learning</i>
Director del Proyecto	MARCO ENRIQUE BENALCAZAR PALACIOS
Colaboradores del Proyecto	ANDRES GABRIEL JARAMILLO YANEZ MARCO ANTONIO SEGURA MORALES CARLOS EDUARDO ANCHUNDIA VALENCIA PATRICIO XAVIER ZAMBRANO RODRIGUEZ
Departamento	Informática y Ciencias de la Computación (DICC)
Línea de Investigación	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas inteligentes
Objetivo	<i>Desarrollar un nuevo modelo de clasificación de señales electromiográfica del brazo humano usando técnicas de reconocimiento de patrones y machine learning</i>

Duración del Proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • Inicio: 17 de abril del 2017 • Fin planificado: 16 de abril del 2019 • Prórroga ordinaria hasta: 16 de octubre de 2019 • Duración total: 30 meses
Presupuesto asignado	\$ 78.699,58 USD
Presupuesto ejecutado	\$ 72.597,38 USD
Entrega del Informe Final	28 de abril del 2021

3. INFORME FINAL:

Mediante Memorandos EPN-PIJ-16-13-2021-0002-M y EPN-PIJ-16-13-2021-0003-M del 28 de abril de 2021, el Dr. Marco Enrique Benalcázar Palacios, Director del Proyecto de Investigación Junior PIJ-16-13, presenta el Informe Final del Proyecto que dirige. El Informe Final y la documentación presentada son revisados por la Dirección de Investigación, se anexan y forman parte integrante del Acta de Finalización, cuyas conclusiones y productos generados son:

CONCLUSIONES:

- En el Proyecto de Investigación PIJ-16-13 se desarrollaron 8 modelos de clasificación de gestos de la mano usando técnicas de machine learning y reconocimiento de patrones. Los modelos desarrollados tienen como entrada señales electromiográficas, EMG, adquiridas usando el sensor comercial Myo Armband, colocado en el antebrazo de un usuario. Estos modelos permiten clasificar 5 o más gestos de la mano, mediante un proceso de entrenamiento computacional. Este entrenamiento está basado en el uso de señales EMG de al menos 5 repeticiones por cada gesto a clasificar.
- Las técnicas de machine learning y reconocimiento de patrones estudiadas en el desarrollo del proyecto de investigación PIJ-16-13 incluyen: k-nearest neighbors (kNN), redes neuronales artificiales feed-forward, redes neuronales artificiales recurrentes con celdas de memoria LSTM, autoencoders y máquinas de vectores de soporte (SVMs por sus siglas en inglés). De estas técnicas, la que permitió obtener la mejor exactitud de clasificación en 10 clases de interés es kNN, con un valor de 96.6%, usando para el entrenamiento 100 repeticiones por cada clase de interés. Los modelos de clasificación de 6 clases basados en el uso de redes neuronales artificiales feed-forward, redes neuronales artificiales recurrentes con celdas de memoria LSTM, y SVMs tuvieron una exactitud de 95.8%, 95.2% y 95.3%, respectivamente, usando para el entrenamiento 25 repeticiones por cada clase de interés.
- Los modelos de clasificación de gestos entrenables por cada usuario (i.e., modelos específicos) permitieron obtener mejores exactitudes de clasificación que los modelos de clasificación generales (i.e., modelos que se entrenan con los datos de un conjunto de usuarios y se testean sobre cualquier usuario). Esto se debe a que los modelos específicos evitan el problema de variabilidad inter-personal de las señales EMG, al ser entrenados con las señales EMG de cada persona que los utiliza. De esta manera, los modelos específicos deben resolver únicamente la variabilidad intra-personal de las señales EMG. Por otro lado, los modelos generales deben resolver un problema más complejo que los modelos específicos, problema que incluye tanto la variabilidad inter-personal como la variabilidad intra-personal de las señales EMG.
- En todos los modelos de clasificación desarrollados se observó que la exactitud de clasificación aumentó, de manera asintótica, a medida que se incrementó el número de repeticiones por cada clase de interés.
- Los prototipos de software y hardware desarrollados en el presente proyecto proveen evidencia empírica del potencial práctico y adecuada funcionalidad y usabilidad de los modelos de

clasificación de gestos de la mano propuestos. Todos los prototipos de software y hardware desarrollados tienen un tiempo de respuesta inferior a 300 ms, lo cual implica que funcionan en tiempo real.

- El uso de señales EMG medidas en el antebrazo permite clasificar gestos que involucran únicamente movimientos de la mano. Esto se debe a que el movimiento de la mano se da por la contracción de los músculos que están en el antebrazo, lo cual produce señales eléctricas (i.e., señales EMG) que se pueden medir en el antebrazo. Para la clasificación de movimientos combinados de la mano, del antebrazo y del brazo se requiere usar señales adicionales a las EMG medidas en el antebrazo. Estas señales adicionales deben contener información no sólo de la contracción muscular, sino también del movimiento de las extremidades (i.e., señales de una unidad de medida inercial, IMU por sus siglas en inglés).

PRODUCTOS:

1. Artículo: "*Real-Time Hand Gesture Recognition Using Surface Electromyography and Machine Learning: A Systematic Literature Review*"; Andrés Jaramillo, Marco Benalcázar, Elisa Mena; *Sensors* (Indexada en Scopus Q2); ISSN: 14243210, 14248220; DOI: <https://doi.org/10.3390/s20092467>; abril 2020;
2. Artículo: "*Sign Language Recognition Using Wearable Electronics: Implementing k-Nearest Neighbors with Dynamic Time Warping and Convolutional Neural Network Algorithms*"; Giovanni Saggio, Pietro Cavallo, Mariachiara Ricci, Vitro Errico, Jonathan Zea, Marco Benalcázar; *Sensors* (Indexada en Scopus Q2); ISSN: 14243210, 14248220; DOI: <https://doi.org/10.3390/s20143879>, julio 2020.
3. Artículo: "*Hand gesture recognition using machine learning and the Myo armband*" (Indexado en SCOPUS); Marco Benalcázar, Andrés Jaramillo, Jonathan Zea, Andrés Páez, Víctor Andaluz; Memorias del evento "*2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*" desarrollado en Kos, Grecia; ISSN: 20761465; DOI: 10.23919/EUSIPCO.2017.8081366; octubre 2017
4. Artículo: "*Real-time hand gesture recognition using the Myo armband and muscle activity detection*" (Indexado en SCOPUS); Marco Benalcázar, Cristhian Motoche, Jonathan Zea, Andrés Jaramillo, Carlos Anchundia, Patricio Zambrano, Marco Segura, Freddy Benalcázar Palacios, María Pérez; Memorias del evento "*2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*" desarrollado en Salinas – Ecuador; ISBN: 978-1-5386-3894-1, 978-1-5386-3895-8; DOI: 10.1109/ETCM.2017.8247458; enero 2018.
5. Artículo: "*Real-time hand gesture recognition with EMG using machine learning*"; (Indexado en SCOPUS); Andrés Jaramillo, Marco Benalcázar; Memorias del evento "*2017 IEEE Second Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*" desarrollado en Salinas – Ecuador; ISBN: 978-1-5386-3894-1, 978-1-5386-3895-8; DOI: 10.1109/ETCM.2017.8247487; enero 2018.
6. Artículo: "*Real-Time Hand Gesture Recognition Based on Artificial Feed-Forward Neural Networks and EMG*" (Indexado en SCOPUS); Marco Benalcázar, Carlos Anchundia, Jonathan Zea, Patricio Zambrano, Andrés Jaramillo, Marco Segura; Memorias del evento "*2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*" desarrollado en Roma, Italia; ISSN: 20761465; DOI: 10.23919/EUSIPCO.2018.8553126; diciembre 2018.
7. Artículo: "*Real-time hand gesture recognition based on electromyographic signals and artificial neural networks*" (Indexado en SCOPUS); Cristhian Motoche, Marco Benalcázar; Memorias del evento "*27th International Conference on Artificial Neural Networks, ICANN 2018*" desarrollado en Rhodes, Grecia; ISBN: 978-3-030-01418-6; DOI: 10.1007/978-3-030-01418-6_35; diciembre 2018.

8. Artículo: "*Design of a Software Architecture and Practical Applications to Exploit the Capabilities of a Human Arm Gesture Recognition System*" (Indexado en SCOPUS); Fabrizio Eloy Ramírez, Marco Segura, Marco Benalcázar; Memorias del evento "*2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*" (SJR: 0.13) desarrollado en Cuenca – Ecuador; ISBN: 978-1-5386-6657-9; DOI: 10.1109/ETCM.2018.8580267; diciembre 2018.
9. Artículo: "*Real-Time Hand Gesture Recognition Model Using Deep Learning Techniques and EMG Signals*" (Indexado en SCOPUS); Edison Chung, Marco Benalcázar; Memorias del evento "*2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*" desarrollado en Coruña, España; ISSN: 20761465; DOI: 10.23919/EUSIPCO.2019.8903136; noviembre 2019.
10. Artículo: "*Real-Time Hand Gesture Recognition: A Long Short-Term Memory Approach with Electromyography*"; Jonathan Zea, Marco Benalcázar; *Advances in Intelligent Systems and Computing book series* (Indexado en SCOPUS Q3); ISBN: 978-303033613-4; DOI: 10.1007/978-3-030-33614-1_11; octubre 2019.
11. Artículo: "*A Novel Technique for Improving the Robustness to Sensor Rotation in Hand Gesture Recognition Using sEMG*"; Victor Vimos, Marco Benalcázar, Alex Oña, Patricio Cruz; *Advances in Intelligent Systems and Computing book series* (Indexado en SCOPUS Q3); ISBN: 978-3-030-33614-1; DOI: DOIhttps://doi.org/10.1007/978-3-030-33614-1_16; octubre 2019.
12. Artículo: "*Short-Term Hand Gesture Recognition using Electromyography in the Transient State, Support Vector Machines, and Discrete Wavelet Transform*" (Indexado en SCOPUS); Andrés Jaramillo, Luis Unapanta, Marco Benalcázar; Memorias del evento "*2019 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)*" desarrollada en Guayaquil, Ecuador; ISBN: 978-1-7281-5666-8; DOI: 10.1109/LA-CCI47412.2019.9036757; marzo 2020.
13. Artículo: "*A Model for Real-Time Hand Gesture Recognition Using Electromyography (EMG), Covariances and Feed-Forward Artificial Neural Networks*"; Marco Benalcázar, José González, Andrés Jaramillo, Carlos Anchundia, Patricio Zambrano, Marco Segura; Memorias del evento "*2020 IEEE ANDESCON*" desarrollada, en Quito, Ecuador; ISBN: 978-1-7281-9365-6; DOI: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9271979; diciembre 2020.
14. Ponencia: "*Real-Time Hand Gesture Recognition Based on Artificial Feed-Forward Neural Networks and EMG*"; Marco Benalcázar; *26th European Signal Processing Conference – EUSIPCO 2018*; Italia, Roma; septiembre de 2018.
15. Ponencia: "*Real-Time Hand Gesture Recognition Model Using Deep Learning Techniques and EMG Signals*"; Marco Benalcázar; *27th European Signal Processing Conference*; Coruña, España; septiembre de 2019.
16. Ponencia: "*Short-Term Hand Gesture Recognition using Electromyography in the Transient State, Support Vector Machines, and Discrete Wavelet Transform*"; Marco Benalcázar; *2019 Latin-American Conference on Computational Intelligence, LA-CCI 2019*; Guayaquil - Ecuador; noviembre de 2019.
17. Ponencia: "*A Model for Real-Time Hand Gesture Recognition Using Electromyography (EMG), Covariances and Feed-Forward Artificial Neural Networks*"; Marco Benalcázar; *Andean Council of the IEEE (ANDESCON 2020)*; Quito, Ecuador; octubre de 2020.
18. Póster: "*Hand Gesture Recognition Using Machine Learning and the Myo Armband*"; Marco Benalcázar; *25th European Signal Processing Conference EUSIPCO 2017*; Kos, Grecia; agosto 2017.
19. Proyecto de mayor alcance: PIGR-19-07 "Reconocimiento de gestos de la mano usando señales electromiográficas e inteligencia artificial y su aplicación para la implementación de interfaces humano - máquina y humano – humano" que tiene como objetivo: desarrollar sistemas generales

y específicos por usuario para el reconocimiento de gestos de la mano mediante el uso de señales electromiográficas (EMG), señales de orientación del antebrazo y técnicas de inteligencia artificial y su aplicación para la implementación de interfaces humano-máquina y humano-humano. Proyecto aprobado en la Convocatoria 2019.

20. Proyecto de Titulación de Ingeniería en Sistemas Informáticos y de Computación: "*Reconocimiento de gestos de la mano en tiempo real usando señales electromiográficas y redes neuronales artificiales*"; Cristhian Alberto Motoche Macas; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19598>; julio 2018.
21. Proyecto de Titulación de Ingeniería en Sistemas Informáticos y de Computación: "*Modelo de reconocimiento en tiempo real de gestos de la mano utilizando técnicas de deep learning y señales electromiográficas*"; Edison Alejandro Chung Liu; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19667>; agosto 2018.
22. Proyecto de Titulación de Ingeniería en Sistemas Informáticos y de Computación: "*Reconocimiento de gestos de la mano en tiempo real basado en señales electromiográficas utilizando Myo Armband con wavelets y máquinas de vectores de soporte*"; Luis Daniel Unapanta Benavides; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20242>; mayo 2019.
23. Proyecto de Titulación de Ingeniería en Sistemas Informáticos y de Computación: "*Diseño de una arquitectura de Software y aplicaciones prácticas para explotar las capacidades de un sistema de reconocimiento de gestos del brazo humano*"; Fabrizio Eloy Ramírez Cutimbo; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20026>; diciembre 2019.
24. Proyecto de Titulación de Ingeniería en Sistemas Informáticos y de Computación: "*Desarrollo de un modelo de reconocimiento en tiempo real de gestos de la mano usando señales electromiográficas, covarianzas y redes neuronales artificiales*"; José David González Gavilánez; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20573>; febrero 2019.
25. Proyecto de Titulación de Ingeniería en Electrónica y Control: "*Implementación de un sistema de clasificación de gestos del brazo humano utilizando Myo Armband para mando a distancia de un brazo robótico de 3GDL*"; Jonathan Alejandro Zea Guachamín; URL: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19190>; febrero 2018.

4. LIQUIDACIÓN ECONÓMICA:

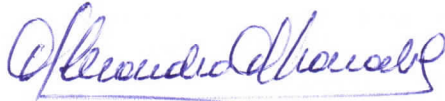
El monto asignado al Proyecto de Investigación Junior PIJ-16-13 fue de \$78.699,58 USD (setenta y ocho mil seiscientos noventa y nueve dólares americanos, con 58/100), y se ejecutaron \$ 72.597,38 USD (setenta y dos mil quinientos noventa y siete dólares americanos, con 38/100), conforme al detalle emitido 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:

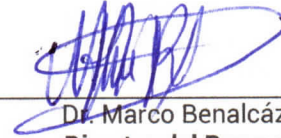
Con la presente Acta se declara finalizado y cerrado el Proyecto de Investigación Junior PIJ-16-13 "*Clasificación de señales electromiográficas del brazo humano usando técnicas de reconocimiento de patrones y Machine Learning*".

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 veintiséis días del mes de agosto del año dos mil veintiuno.



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



Dr. Marco Benalcázar
**Director del Proyecto
PIJ-16-13**

AGBT