



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**SISTEMA DE SEGURIDAD EMG PARA
MANIPULADORES TELEOPERADOS**

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

MARÍN PILLAJO LEONARDO EMANUEL

DIRECTOR: ING. BONILLA VENEGAS FÉLIX VLADIMIR, MSC

Quito, Agosto 2017

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO PROYECTO DE TITULACIÓN



DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1718120163
APELLIDO Y NOMBRES:	MARÍN PILLAJO LEONARDO EMANUEL
DIRECCIÓN:	GRAL. MURGEON Y 10 DE AGOSTO
EMAIL:	leom_2.0@hotmail.com
TELÉFONO FIJO:	2 320-0785
TELÉFONO MOVIL:	0995381127

DATOS DE LA OBRA	
TITULO:	SISTEMA DE SEGURIDAD EMG PARA MANIPULADORES TELEOPERADOS
AUTOR O AUTORES:	MARÍN PILLAJO LEONARDO EMANUEL
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	2017/08/08
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	ING. BONILLA VENEGAS FÉLIX VLADIMIR, MSC
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MECATRÓNICA
RESUMEN:	<p>El propósito del presente trabajo es crear un sistema de seguridad electromiográfico para controlar manipuladores teleoperados usando señales electromiográficas de superficie sEMG. Las señales sEMG de la actividad muscular de la mano fueron obtenidas mediante un brazalete Myo que identifica esta actividad por medio de sensores superficiales capaces de detectar las señales electromiográficas que generan los músculos. La integración del sistema se realizó en la plataforma Simulink de Matlab para procesar, identificar, validar y controlar el robot por medio de las señales. Para analizar la naturaleza de las gesticulaciones de las manos se realizó el análisis a partir de aproximación temporal que permitió la extracción de características de las señales. Se determinó que los parámetros Integrado electromiográfico (IEMG), Media del valor absoluto (MAV), Media cuadrática (RMS) y Varianza (VAR) tienen correlación directa con el tipo de movimiento que realiza la mano. Estos parámetros permiten realizar la clasificación de las gesticulaciones. Para clasificar los movimientos fist, spread fingers, wave right, wave left, elder y voor se</p>

	<p>utilizaron 6 redes neuronales, las cuales permiten activar 3 grados de libertad del manipulador Mitsubishi RV-2JA. Para la integración y verificación del sistema en tiempo real se aplicó hardware in the loop (HIL), que permitió ejecutar el modelo de la planta, la conexión con el sistema de control y comunicación adecuada para verificar que el sistema controla los 3 grados de libertad del robot.</p>
PALABRAS CLAVES:	Electromiografía de superficie, Hardware in the loop, RNA: Red neuronal artificial, Robot Mitsubishi RV-2JA, Sistema de seguridad electromiográfico para robots teleoperados.
ABSTRACT:	<p>The purpose of the present work is to create an electromyographic safety system to control teleoperated manipulators using sEMG surface electromyographic signals. The sEMG signals of the muscular activity of the hand were obtained through a Myo bracelet that identifies this activity by means of superficial sensors capable of detecting the electromyographic signals generated by the muscles. The integration of the system was performed in Matlab's Simulink platform to process, identify, validate and control the robot through the signals. In order to analyze the nature of hand gestures, the analysis based on a temporal approximation that allowed the extraction of characteristics of the signals was performed. It was determined that the parameters Electromyographic Integrated (IEMG), Mean of absolute value (MAV), Quadratic mean (RMS) and Variance (VAR) have direct correlation with the type of movement the hand performs. These parameters allow the classification of the gestures. In order to classify the fist, spread fingers, wave right, wave left, elder and voor movements, 6 neuronal networks were used, which allow to activate the 3 degrees of freedom of the Mitsubishi RV-2JA manipulator. For the real-time integration and verification of the system, hardware in the loop (HIL) was applied, which allowed the execution of the plant model, the connection with the appropriate control and communication system to verify that the system controls the 3 degrees of freedom of the robot.</p>

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



KEYWORDS:

Surface electromyography, Hardware in the loop, RNA: Artificial neural network, Robot Mitsubishi RV-2JA, Electromyographic safety system for teleoperated robots.

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f. _____

Marín Pillajo Leonardo Emanuel

1718120163

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN



Yo, **MARÍN PILLAJO LEONARDO EMANUEL**, CI 171812183 autor/a del proyecto titulado: **sistema de seguridad EMG para manipuladores teleoperados** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN MECATRÓNICA** en la Universidad Tecnológica Equinoccial.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad Tecnológica Equinoccial a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 2017/05/08

f.

Marín Pillajo Leonardo Emanuel

1718120163

© Universidad Tecnológica Equinoccial 2017.
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo **MARÍN PILLAJO LEONARDO EMANUEL**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



Marín Pillajo Leonardo Emanuel

C.I. 1718120163

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "**Sistema de seguridad EMG para manipuladores teleoperados**", que, para aspirar al título de **Ingeniero en Mecatrónica** fue desarrollado por **Marín Pillajo Leonardo Emanuel**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



ING. Bonilla Venegas Félix Vladimir, MSc

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I. 1710300045

DEDICATORIA

El presente trabajo que con mucho ahínco y sacrificio lo realice luego de pasar horas tras horas de desvelo, estudio y dedicación lo dedico a:

A mis padres por haber sido el pilar fundamental en el trayecto y culminación de mi carrera, por haberme exigido llegar a feliz término, por haber dedicado esfuerzo ante las adversidades, por haber confiado en mi capacidad y por haberme inculcado valores como familia y como ser humano.

A mis hermanos por haber compartido conmigo nuestra juventud por haber sido mucho más que un hermano unos verdaderos amigos por valiosas ayudas en mis momentos difíciles, por haberme soportado una que otra falta de atención, por ser ellos quienes supieron brindarme su apoyo y ayuda incondicional para poder llegar a feliz término.

A mi familia que de una u otra manera estuvieron presentes en todos los momentos de reuniones y haberme apoyado espiritual y moralmente.

A mis compañeros con quienes compartimos muchos momentos difíciles y también muchas alegrías.

A mis amigos quienes me brindaron todo su apoyo en todo momento con quienes compartí momento alegres, sanos y de gran provecho.

Leonardo Emanuel Marín Pillajo

AGRADECIMIENTO

A Dios, por estar conmigo y haberme permitido estar con salud y vida por darme su luz como guía para llegar a ser un hombre de bien y un excelente profesional al servicio de los demás.

A la Universidad Tecnológica Equinoccial por haberme abierto sus puertas camino a la enseñanza y a la excelencia para ser un gran profesional al servicio de la sociedad.

A mis Maestros excelentes profesionales quienes impartieron su sabiduría para que pueda yo ser como ellos siempre enfocados a la innovación, al talento y la superación constante del aprendizaje.

Al excelente grupo de profesionales que encontré en el transcurso de mis estudios y en especial al MSC. Ingeniero Bonilla Venegas Félix Vladimir director de mi tesis.

A mis Padres, hermanos, familiares, amigos, a todos quienes contribuyeron para llegar a feliz término de mi Carrera Profesional.

Leonardo Emanuel Marín Pillajo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUCCIÓN	
2. METODOLOGÍA	
2.1. METODOLOGÍA MECATRÓNICA DEL SISTEMA.....	6
2.1.1. Conceptos de operación.....	6
2.1.2. Requisitos del sistema y arquitectura	6
2.1.3. Diseño.....	12
2.1.4. Pruebas, Integración y verificación en el entorno virtual.....	14
2.1.5. Sistema de verificación y validación.....	16
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
CONCLUSIONES.....	24
RECOMENDACIONES.....	25
BIBLIOGRAFÍA	26
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1. Características de la señal sEMG, posición de mano FIST.	14
Tabla 2. Numero de neuronas y error de la señal sEMG de la RNA, posición de mano FIST.	15
Tabla 3. Archivos .mat utilizados para cada posición de mano.	21

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1. Diagrama de bloques del proceso de detección y acondicionamiento de señales mioeléctricas.	1
Figura 2. Esquema general de control EMG.....	2
Figura 3. Diagrama de bloques del sistema EMG.	3
Figura 4. Diagrama general del control de una prótesis transfemoral mioeléctrica.	4
Figura 5. Esquema metodológico general.....	6
Figura 6. Diagrama de bloques del sistema.....	7
Figura 7. Pila de desarrollo del Myo desde una aplicación.	8
Figura 8. Posiciones de la mano del operador, utilizando el brazalete Myo...9	
Figura 9. Datos graficados de la posición FIST.....	10
Figura 10. Extracción de características de la señal EMG.	10
Figura 11. Entrenamiento de la red neuronal artificial. X: Características de la señal sEMG, Y: Respuesta de la RNA, W: Pesos sinápticos.	12
Figura 12. Arquitectura del programa diseñado en Matlab-Simulink.	13
Figura 13. Integración del sistema al entorno virtual del servomotor.	16
Figura 14. Sistema “hardware in the loop” HIL.	16
Figura 15. Integración del sistema al servo motor.	17
Figura 16. Mitsubishi RV-2AJ.	17
Figura 17. Subsistema de control de la articulación J1.....	18
Figura 18. Movimiento angular de la articulación J1. (a)Desplazamiento angular positivo. (b) Desplazamiento angular negativo.	19
Figura 19. Torque de la articulación J1. (a) Torque generado por Fist. (b) Torque generado por Spread Fingers.....	19
Figura 20. Características de FIST. (a)Señal sEMG del sensor 8. (b)IEMG. (c)MAV. (d)RMS. (e)VAR.	22
Figura 21. Movimiento de la articulación J1. (a)Desplazamiento angular positivo. (b)Torque generado.	23
Figura 22. Señales sEMG de la posición de mano FIST.	23

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
Anexo 1: Representación de las articulaciones.	28
Anexo 2: Subsistema THRESHOLD_FILTER	30
Anexo 3: Subsistema STADISTICAL_ANALISYS	31
Anexo 4: Subsistema NNET	33
Anexo 5: Subsistema BINARY	34
Anexo 6: Características de las señales EMG	35
Anexo 7: Número de neuronas ocultas	37
Anexo 8: Entorno virtual del servomotor	38
Anexo 9: Funcionamiento del sistema	39
Anexo 10: Representación SimMechanics.....	40
Anexo 11: Subsistema de control de movimiento	41
Anexo 12: Movimiento de las articulaciones	42
Anexo 13: Características Mitsubishi RV-2AJ	48

RESUMEN

El propósito del presente trabajo es crear un sistema de seguridad electromiográfico para controlar manipuladores teleoperados usando señales electromiográficas de superficie sEMG. Las señales sEMG de la actividad muscular de la mano fueron obtenidas mediante un brazalete Myo que identifica esta actividad por medio de sensores superficiales capaces de detectar las señales electromiográficas que generan los músculos. La integración del sistema se realizó en la plataforma Simulink de Matlab para procesar, identificar, validar y controlar el robot por medio de las señales. Para analizar la naturaleza de las gesticulaciones de las manos se realizó el análisis a partir de aproximación temporal que permitió la extracción de características de las señales. Se determinó que los parámetros Integrado electromiográfico (IEMG), Media del valor absoluto (MAV), Media cuadrática (RMS) y Varianza (VAR) tienen correlación directa con el tipo de movimiento que realiza la mano. Estos parámetros permiten realizar la clasificación de las gesticulaciones. Para clasificar los movimientos fist, spread fingers, wave right, wave left, elder y voor se utilizaron 6 redes neuronales, las cuales permiten activar 3 grados de libertad del manipulador Mitsubishi RV-2JA. Para la integración y verificación del sistema en tiempo real se aplicó hardware in the loop (HIL), que permitió ejecutar el modelo de la planta, la conexión con el sistema de control y comunicación adecuada para verificar que el sistema controla los 3 grados de libertad del robot.

Palabras Claves:

Electromiografía de superficie, Hardware in the loop, RNA: Red neuronal artificial, Robot Mitsubishi RV-2JA, Sistema de seguridad electromiográfico para robots teleoperados.

ABSTRACT

The purpose of the present work is to create an electromyographic safety system to control teleoperated manipulators using sEMG surface electromyographic signals. The sEMG signals of the muscular activity of the hand were obtained through a Myo bracelet that identifies this activity by means of superficial sensors capable of detecting the electromyographic signals generated by the muscles. The integration of the system was performed in Matlab's Simulink platform to process, identify, validate and control the robot through the signals. In order to analyze the nature of hand gestures, the analysis based on a temporal approximation that allowed the extraction of characteristics of the signals was performed. It was determined that the parameters Electromyographic Integrated (IEMG), Mean of absolute value (MAV), Quadratic mean (RMS) and Variance (VAR) have direct correlation with the type of movement the hand performs. These parameters allow the classification of the gestures. In order to classify the fist, spread fingers, wave right, wave left, elder and voor movements, 6 neuronal networks were used, which allow to activate the 3 degrees of freedom of the Mitsubishi RV-2JA manipulator. For the real-time integration and verification of the system, hardware in the loop (HIL) was applied, which allowed the execution of the plant model, the connection with the appropriate control and communication system to verify that the system controls the 3 degrees of freedom of the robot.

Keywords:

Surface electromyography, Hardware in the loop, RNA: Artificial neural network, Robot Mitsubishi RV-2JA, Electromyographic safety system for teleoperated robots.

1. INTRODUCCIÓN

Analizando que en la actualidad se está incurriendo en el uso de la electromiografía como canal de enlace bioelectrónico para controlar dispositivos mecatrónicos, que están sustituyendo a la interfaz de usuario (UI) tales como joysticks y keyboards, por interfaces naturales. Sin embargo, no es posible modificar o cambiar las interfaces en todas las aplicaciones en las que se requiere precisión, porque las señales sEMG no presentan patrones constantes para identificar el movimiento de las articulaciones. No obstante, pueden utilizarse para determinar movimientos deseados en las articulaciones y tener un enlace bioelectrónico, para garantizar que el sistema mecatrónico se mueva por la trayectoria deseada.

Ramiro, Vergara, Vázquez, Hernández & Juárez (2011) desarrollaron el trabajo “Detección y Acondicionamiento de Señales Mioeléctricas”. En este trabajo se muestra que es posible utilizar las señales electromiográficas generadas por los músculos del brazo para activar el encendido y apagado de dispositivos electromecánicos. En este trabajo se utilizó amplificadores operacionales, amplificadores de instrumentación, acoples de tierra, filtro pasa altas, filtro pasa baja y filtro pasa banda.

En la figura se describe el proceso que se sigue para captar las señales electromiográficas, para lo cual se requiere de tres etapas principales: detección, acondicionamiento (amplificación y filtrado) y aplicación en un actuador.

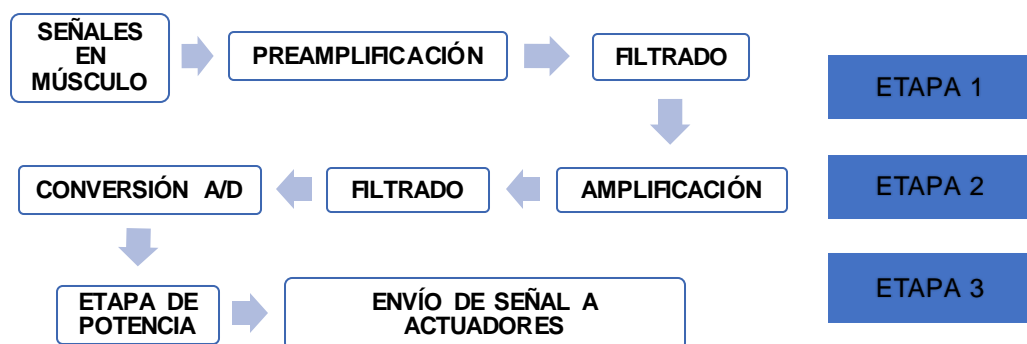


Figura 1. Proceso de detección y acondicionamiento de señales mioeléctricas.
(Ramiro, et al., 2011)

Una vez que la señal fue filtrada y amplificada, se aplicó para la activación y desactivación un motor de corriente continua y de una lámpara de 100 watts. Cuando el músculo se contrae se activa el motor, cuando se vuelve a contraer se desactiva el motor y se activa la lámpara.

Los resultados obtenidos demostraron que es posible detectar de manera fácil las señales electromiográficas generada por la contracción de los músculos del brazo. También demostraron que se pueden desarrollar dispositivos y prótesis controladas por electromiografía.

Gutiérrez, Orozco & Suárez (2005) desarrollaron el trabajo “Determinación de movimientos a partir de señales electromiográficas utilizando máquinas de soporte vectorial”. En este trabajo se utilizó una metodología que parte del diseño y construcción de un sistema de instrumentación para la captación de señales electromiográficas utilizando normatividad SENIAM (Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles) para electromiografía de superficie y sus características. También aplicaron técnicas de procesamiento y caracterización basadas en: aproximación temporal, modelamiento paramétrico AR (autoregressive), STFT (Short Time Fourier Transform) y Wavelets.

Las técnicas aplicadas permitieron que las señales adquiridas sean analizadas exitosamente teniendo en cuenta la normatividad SENIAM para la adquisición de señales sEMG, así como las técnicas de adquisición y procesamiento.

La utilización de entornos virtuales tridimensionales muestra que el trabajo puede ser aplicado en procesos industriales como también para ayudar a personas con discapacidad donde el movimiento de un par de músculos es suficiente para controlar un dispositivo que pueda prestar un servicio.

El esquema de la figura 2 está diseñado con el fin de caracterizar los patrones de movimiento del sistema fisiológico brazo-antebrazo, para que sean reconocidos por un clasificador con porcentajes de acierto superiores al 90%. Y para la visualización de resultados se creó un entorno virtual.

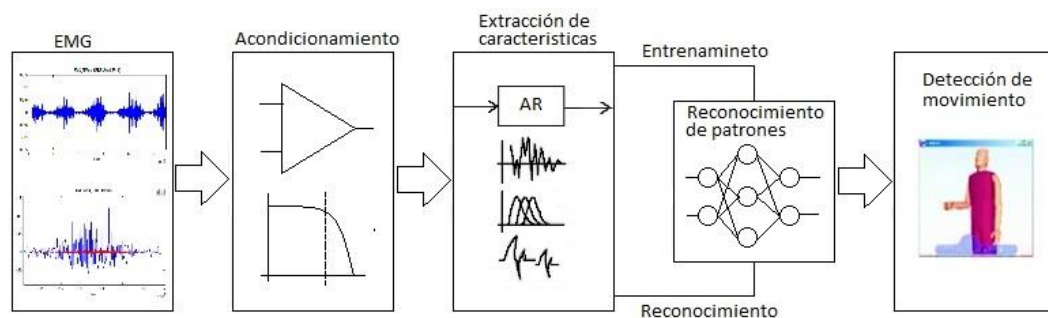


Figura 2. Esquema general de control EMG.
(Gutiérrez, et al., 2005)

Riaño & Quintero (2010) desarrollaron el trabajo “Control de una mano virtual usando señales electromiográficas”. En este trabajo se muestra la construcción de un brazalete de electrodos que permiten la detección de señales electromiográficas tomadas en el antebrazo de una persona, con la finalidad de permitir al operador controlar una mano en un ambiente virtual.

En el trabajo se utilizó amplificadores de instrumentación, filtro pasa banda, amplificador de voltaje amplificador sumador, filtro Notch y convertidor A/D. Una vez que la señal fue filtrada y amplificada se procedió al procesamiento de las señales para tener claro cuáles son los métodos de extracción de

características tales como: aproximación temporal (cruce por cero, valor RMS, cambio de pendiente y longitud de onda), aproximación espectral (periodograma y espectrograma). También se aplicó el funcionamiento de las redes neuronales y su aplicación como método de inteligencia artificial para la clasificación de patrones de movimiento.

El entorno virtual utilizado para este trabajo sirve para observar una mano y controlar sus movimientos con las señales obtenidas por medio de sEMG sin la necesidad de construir una real.

En la figura 3 se puede observar el diagrama de bloques del sistema EMG en base al desarrollo tecnológico relacionado con el uso de señales de origen electrofisiológico en tareas de rehabilitación para pacientes con discapacidad y/o en interacción hombre-máquina.

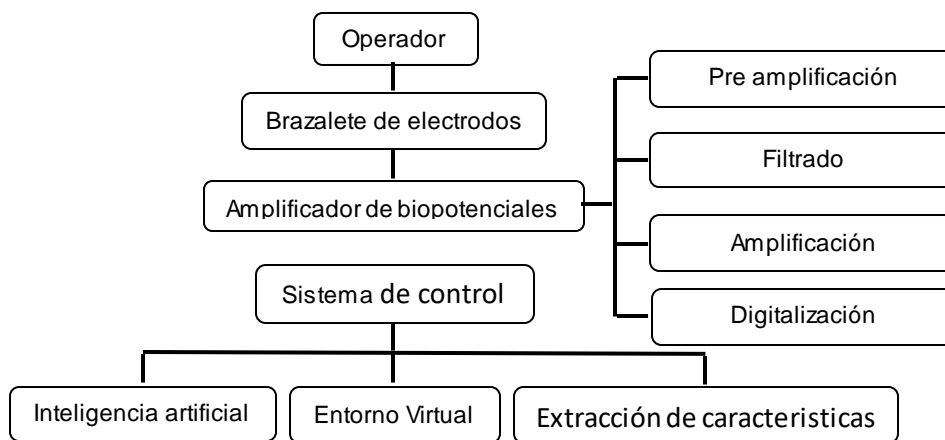


Figura 3. Diagrama de bloques del sistema EMG.
(Riaño & Quintero, 2010)

En el 2008 los Ingenieros J. Villarejo, E. Caicedo, O. Campo desarrollaron el trabajo “Detección de la intención de movimiento durante la marcha a partir de señales electromiográficas”. En este trabajo se presenta el desarrollo de un software para el procesamiento, caracterización y clasificación de señales electromiográficas de superficie aplicando técnicas de inteligencia computacional y determinar la función que debe realizar una prótesis transfemoral basada en el sistema de control mioeléctrica en tiempo real.

En la figura 4 se pretende implementar un sistema de detección de intención de movimiento a partir de señales EMG producidas en el músculo específico con el fin de obtener una caracterización de intención de movimiento en la pierna.

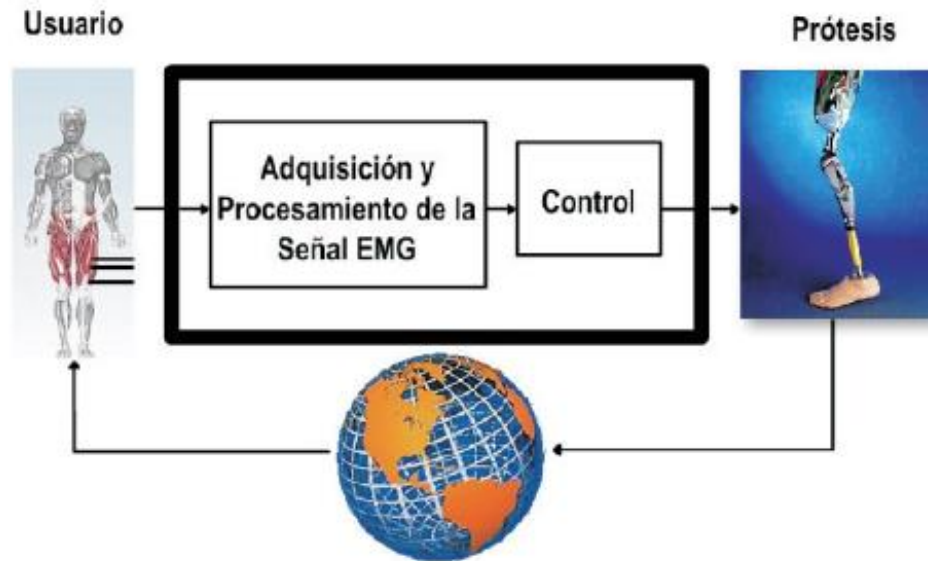


Figura 4. Diagrama general del control de una prótesis transfemoral mioeléctrica. (Villarejo, et al., 2008)

Para la adquisición y análisis de la señal EMG para el control de dispositivos protésicos se implementó los siguientes módulos:

Acondicionamiento y procesamiento: filtro pasa bajo y filtro pasa alto

Extracción de características: dominio del tiempo (valor medio absoluto, valor absoluto medio diferencial, valor medio absoluto en pendiente, amplitud de Willison, varianza de la señal EMG, cruce por cero, cambio de signo en pendiente, valor RMS y momentos de orden superior), modelos autorregresivos (coeficiente del modelo AR), dominio de la frecuencia (potencia promedio, potencia máxima, frecuencia de la máxima potencia y análisis Cepstrum) y tiempo-frecuencia (Wavelet Packet).

1. Reducción de dimensionalidad: normalización
2. Reconocimiento de patrones: se implementó redes neuronales artificiales

A través del desarrollo del sistema de seguridad sEMG, será posible controlar los manipuladores teleoperados. Para lo cual es necesario realizar la adquisición y tratamiento de las señales sEMG específicas que controlan el dispositivo mecatrónico. Logrando que el enlace bioelectrónico entre operador y máquina se realice de forma correcta.

El trabajo tiene como objetivo general el desarrollar un sistema de seguridad electromiográfico para controlar con efectividad el enlace bioelectrónico del manipulador de 3 grados de libertad (cintura, brazo y antebrazo) teleoperado. Y como objetivos específicos:

- Identificar los músculos del antebrazo que pueden ser utilizados para operar el robot de manera remota.

- Realizar caracterización de señales sEMG a partir de aproximación temporal.
- Determinar la estructura de las redes neuronales para la identificación de movimiento.
- Diseñar e implementar una interface entre el sistema de identificación de movimiento y el controlador del manipulador teleoperado.

En relación a los trabajos; “Detección y Acondicionamiento de Señales Mieléctricas”, “Determinación de movimientos a partir de señales electromiográficas utilizando máquinas de soporte vectorial”, “Control de una mano virtual usando señales electromiográficas” y “Detección de la intensidad de movimiento durante la marcha a partir de señales electromiográficas”, es posible afirmar que los objetivos del presente trabajo de titulación son alcanzables. Adicional, las herramientas seleccionadas para el desarrollo permitirán diseñar un sistema de seguridad electromiográfico para controlar movimientos de los 3 grados de libertad J1, J2 y J3, del robot Mitsubishi RV-2AJ.

2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto es necesario identificar los músculos de las articulaciones que interactúan y, posteriormente, diseñar e implementar una interface entre el sistema de identificación de movimiento y el controlador del manipulador teleoperado. (Gutiérrez & Castillo, 2006) La implementación se efectuará por medio de la interface entre el sistema de adquisición de señales y el entorno virtual del sistema robótico.

2.1. METODOLOGÍA MECATRÓNICA DEL SISTEMA

El esquema de la metodología genérica que se ha definido en este trabajo se basa en el modelo en V que comprende: conceptos, requisitos y arquitectura, diseño (mecánico, eléctrico, electrónico), pruebas, integración, verificación y validación. (Forsberg, Mooz & Cotterman, 2005) como se puede observar en la Figura 5.

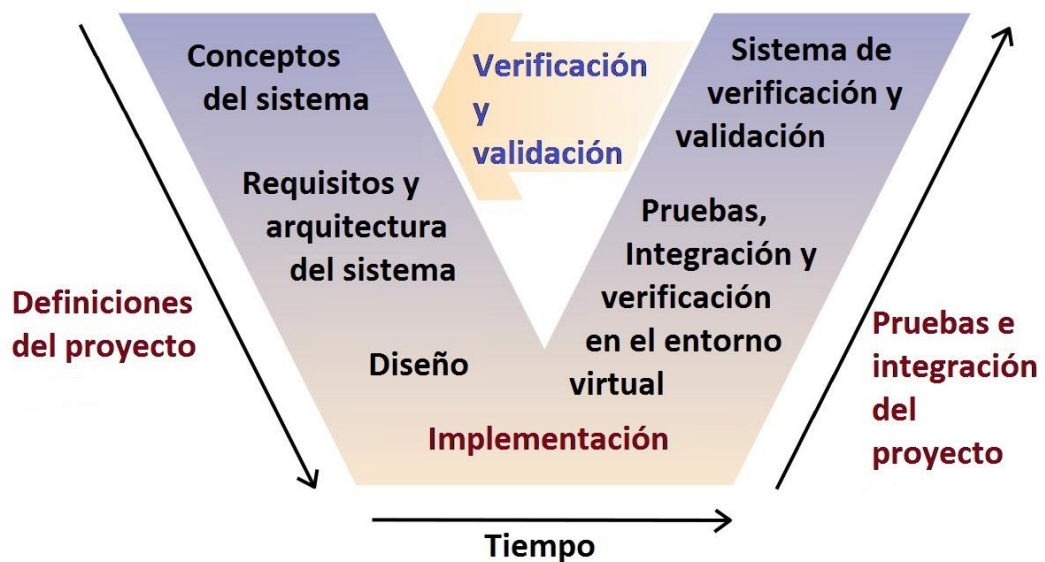


Figura 5. Esquema metodológico general.

2.1.1. Conceptos de operación

El sistema de seguridad electromiográfico está diseñado para que el operador teleopere al robot. Las señales sEMG, que son tomadas del operador, pertenecen a movimientos musculares específicos. Estas señales son procesadas en el programa que se encarga de extraer las características de cada señal con la finalidad de determinar el tipo de movimiento que realizará el robot. Las características de las señales sEMG ingresan a la red neuronal artificial que activa la articulación del robot que se desee mover con determinada posición de la mano.

2.1.2. Requisitos del sistema y arquitectura

En el desarrollo del sistema se utilizó el brazalete Myo como dispositivo de entrada para la adquisición de datos. Los datos de entrada son analizados mediante el programa en Matlab-Simulink que proporciona datos de

entrenamiento para las redes neuronales del sistema. (Morais, Neves, Masieroand y Castro, 2016) En un entorno virtual, que emula el robot, se validarán los resultados del procesamiento y entrenamiento del sistema.

En la figura 6, se puede apreciar el diagrama de forma general del flujo de datos, mecanismos y conexiones involucrados en el desarrollo del sistema. (Isermann, 1996)

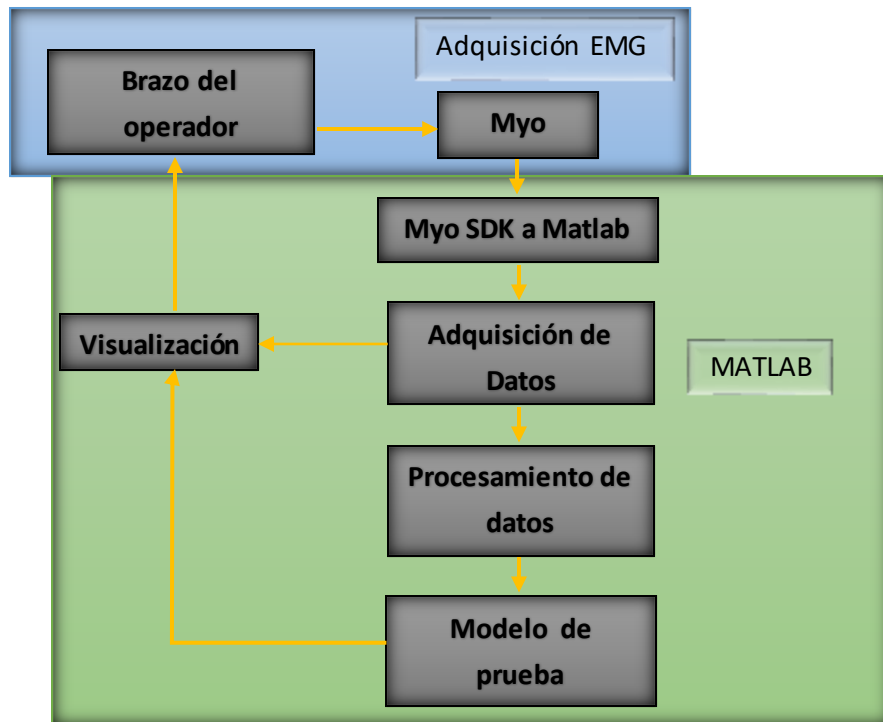


Figura 6. Diagrama de flujo del sistema.

Para la adquisición de datos se utilizó el brazalete Myo, este dispositivo es capaz de adquirir señales sEMG de 8 diferentes lugares, a través de una pulsera en tiempo real. El brazalete Myo proporciona dos tipos de datos, datos espaciales y datos gestuales. Los datos espaciales significan la orientación y el movimiento de brazo, en términos de un cuaternión que puede convertirse en otras representaciones, como una matriz de rotación o ángulo de Euler y en un vector de aceleración que representa la aceleración que el brazalete Myo está experimentando en un momento dado. (Caro, 2016) Los datos de varias poses le dicen a la aplicación lo que el operador está haciendo con su mano, qué brazo se está usando y en qué dirección está orientada. Además, una aplicación puede proporcionar retroalimentación al operador emitiendo un comando de vibración. Los datos se envían a una computadora a través de la comunicación Bluetooth a una aplicación en forma de eventos, que identifican el brazalete Myo enviando los datos y proporcionando una marca de tiempo del momento en que se recibió el evento. Con el fin de acceder a los eventos y datos generados por el Myo, se va a utilizar las herramientas y los códigos proporcionados por el SDK.

Para habilitar la comunicación con el brazalete Myo en un nivel físico, el SDK contiene una librería llamada libmyo que analiza los datos del Bluetooth del dispositivo en una C API, lo que permite el acceso de aplicaciones en varios lenguajes de programación, tanto los datos sin procesar, como el construido en el clasificador del dispositivo. Como se ilustra en la figura 7, pila de desarrollo del Myo desde una aplicación que utiliza el SDK hasta un dispositivo Myo físico.

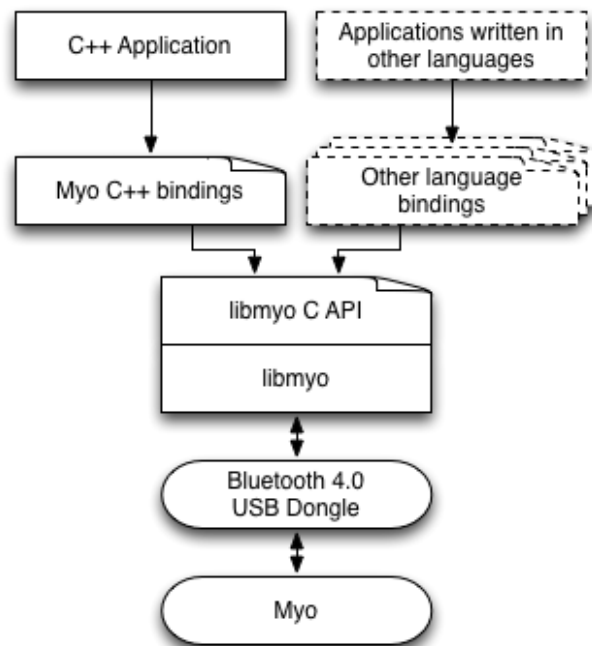


Figura 7. Pila de desarrollo del Myo desde una aplicación.

Las posiciones de mano utilizadas para el desarrollo del sistema se determinaron de tal forma que puedan asemejarse al manipulador de 3 grados de libertad y cumplan con el comportamiento deseado.

En la figura 8 se puede observar las diferentes posiciones de la mano que fueron usadas para representar cada grado de libertad. A cada grado libertad corresponde dos posiciones diferentes, primer grado de libertad (fist y spread fingers), segundo grado de libertad (wave right y wave left) y tercer grado de libertad (elder y voor). En el ANEXO 1 se indica cual es el comportamiento deseado de cada posición de mano.

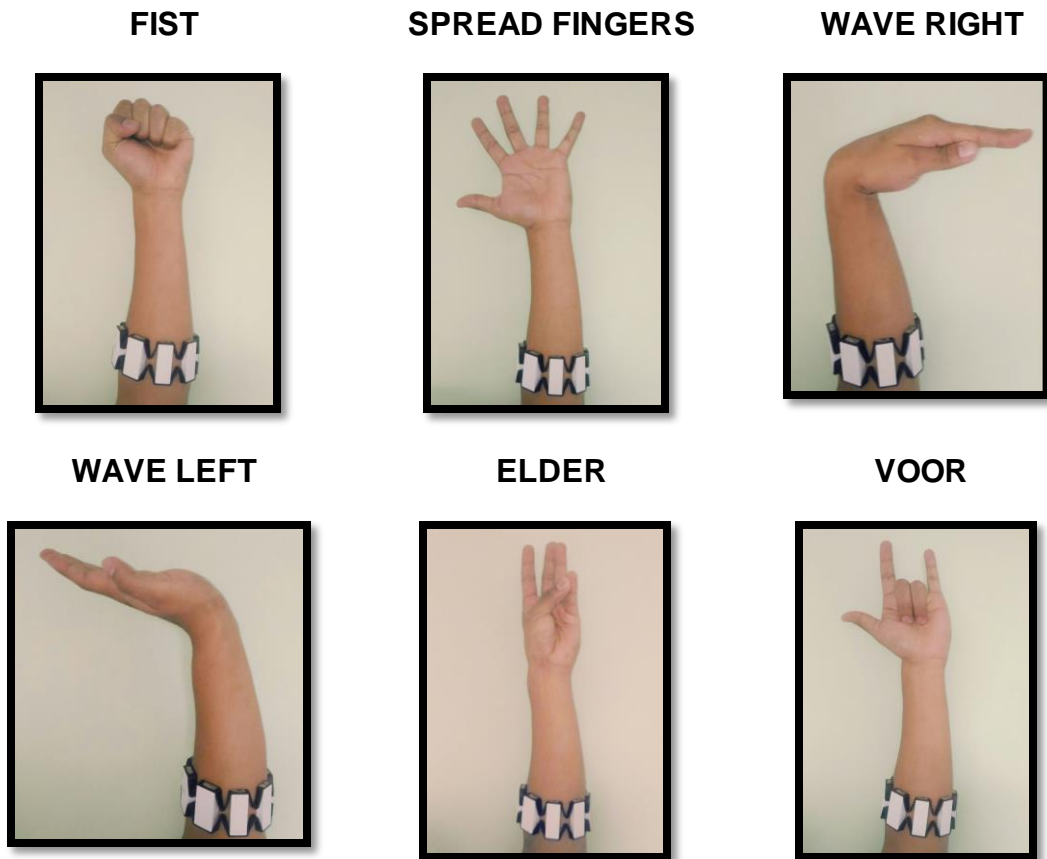


Figura 8. Posiciones de la mano del operador, utilizando el brazalete Myo.

Utilizando los enlaces C++, las bibliotecas y encabezados necesarios incluidos en el SDK del brazalete Myo, podemos analizar los datos espaciales y gestuales directamente a Matlab para el procesamiento posterior. Myo Armband Manager, el software de Thalmic Labs, debe estar funcionando siempre durante la ejecución de los códigos posteriores en Matlab.

Al transmitir datos desde el Myo, sintonizable a una frecuencia de 200Hz, que es la frecuencia real de adquisición del dispositivo, se genera la compilación de códigos que convierte los enlaces C++ del SDK en un objeto Matlab, capaz de transmitir datos en tiempo real en el entorno de Matlab. Los datos cuaternión, giroscopio, acelerómetro y señales sEMG obtenidos del brazalete Myo se representan gráficamente en Matlab.

En la figura 9 se representa gráficamente los datos cuaternión, giroscopio, acelerómetro y señales sEMG obtenidos, cuando el brazalete Myo reconoce la posición FIST de la mano del operador. Cada dato obtenido es representado por un color diferente con su respectiva variable para su análisis.

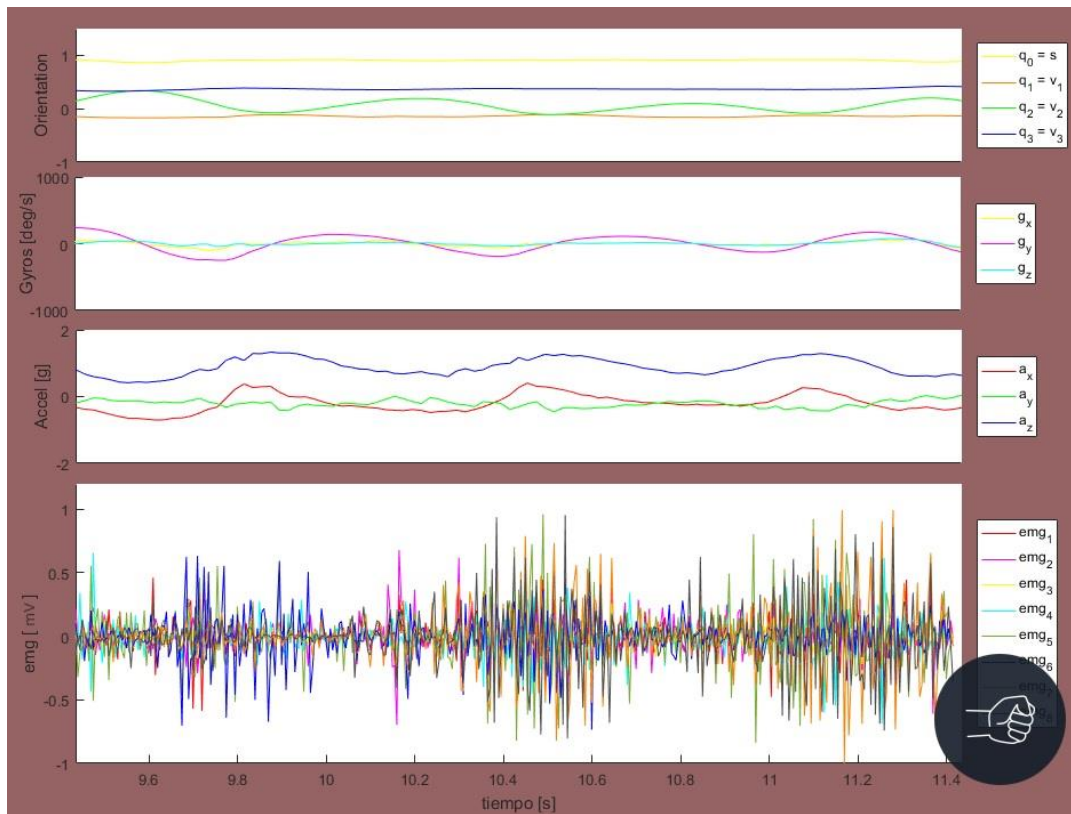


Figura 9. Datos graficados de la posición FIST.

Para la extracción de las características de las señales sEMG se implementó un sistema que analiza y representa matemáticamente en el dominio del tiempo como se muestra en la figura 10. (Ferguson & Dunlop, 2002) Las características en el dominio del tiempo por lo general se calculan rápidamente, debido a que no necesitan una transformación. La obtención de un conjunto de características que representen y determinen la señal permite la caracterización y predicción del comportamiento del sistema. (Phinyomark, Limsakul & Phukpattaranont, 2009)

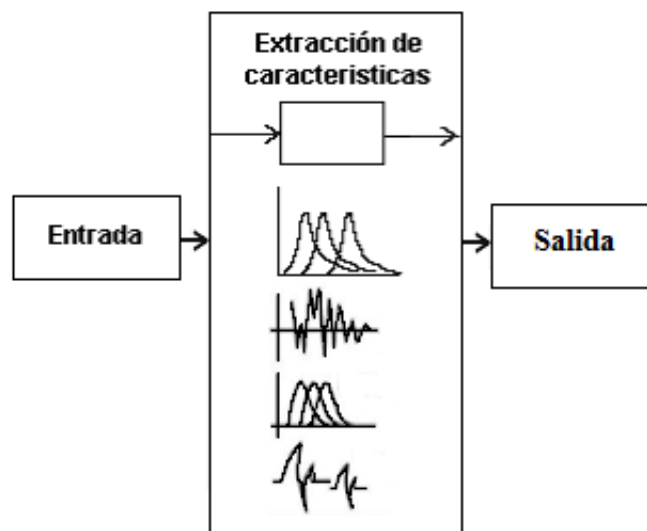


Figura 10. Extracción de características de la señal EMG.

El conjunto de características utilizadas para el análisis y representación matemática de las señales electromiográficas de superficie en el dominio del tiempo son: (Bonilla, Lukyanov, Litvin & Deplov, 2014)

Integrado EMG (IEMG). Se utiliza como un índice para detectar el inicio de la actividad muscular. Está relacionado con el punto de disparo de la secuencia de señales sEMG. Se define como la suma de valores absolutos de la amplitud de la señal EMG y es expresada por la siguiente ecuación:

$$IEMG = \sum_{i=1}^N |Xi| \quad [1]$$

Donde:

Xi : representa la señal EMG en un segmento i

N : se refiere a la longitud de la señal EMG

Media del valor absoluto (MAV). Se calcula tomando la media del valor absoluto de la señal sEMG. Este indicador se puede utilizar para detectar niveles de contracción muscular y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Xi| \quad [2]$$

Media cuadrática (RMS). Está relacionada con la fuerza constante y la contracción no fatigante del músculo. Se refiere a la desviación estándar, que es expresado mediante la siguiente ecuación:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Xi^2} \quad [3]$$

Varianza (VAR). Es el valor medio del cuadrado de la desviación de esa variable. Utiliza la potencia de la señal sEMG como una característica. Sin embargo, la media de la señal EMG es cercana a cero y se expresa por la siguiente ecuación:

$$VAR = \frac{1}{N - 1} \sum_{i=1}^N (Xi - M)^2 \quad [4]$$

Donde:

M : es el valor medio de la señal sEMG

En el modelo de prueba se utilizó las características calculadas para crear datos de entrenamiento adecuado como la entrada de diferentes tipos de modelos y clasificador. Los datos de prueba se adquieren del resultado de los modelos y clasificadores, por lo que se aclara una distinción entre ellos.

En general, los datos de entrenamiento son una compilación de archivos que contienen las características extraídas de todas las posiciones de las manos con las que deseamos entrenar la red neuronal artificial. Y los datos de prueba son los que proporciona la red neuronal artificial para realizar el comportamiento deseado. (Bach, Stavdahl & Fougner, 2009) Entrenar una red neuronal artificial (RNA) es un proceso que modifica el valor de los pesos y vías asociadas a cada neurona. De tal forma que la RNA analice los datos presentados en la entrada y genere una salida, como se muestra en la figura 11.

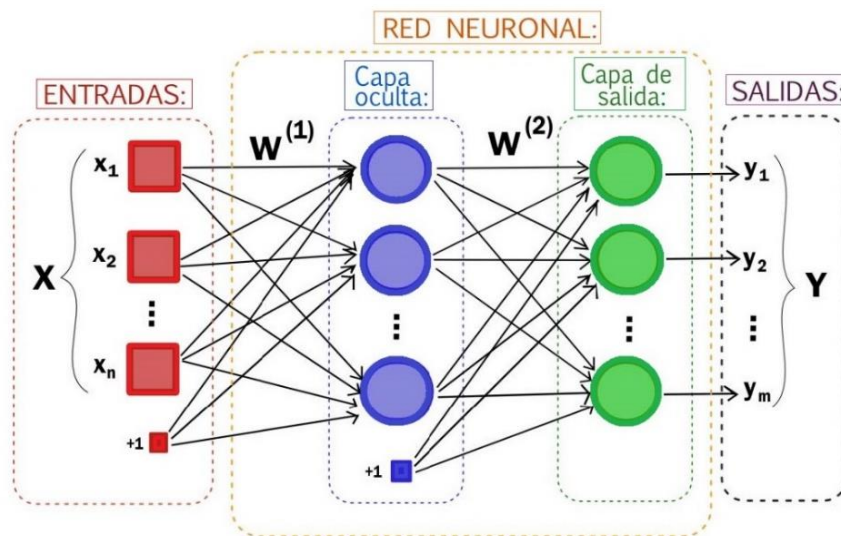


Figura 11. Entrenamiento de la red neuronal artificial. X: Características de la señal sEMG, Y: Respuesta de la RNA, W: Pesos sinápticos.

Los datos de entrada utilizados en el trabajo son los datos obtenidos de la extracción de las características de las señales sEMG y como datos de salida de la RNA se obtienen valores que varían entre 0 y 1, debido a que se aplica la función [5].

$$\text{logsig}(\text{net}) = \frac{1}{1 + e^{-\text{net}}} \quad [5]$$

Donde:

$\text{net} = WX$ para la capa de entrada

Sin embargo, esto no permite que el sistema cumpla su función, por lo que es necesario realizar una condición matemática para que los valores de salida sean cero o uno.

2.1.3. Diseño

Para crear el sistema se utilizó la herramienta SIMULINK de Matlab. El sistema consta de diferentes subsistemas que cumplen funciones específicas tales como filtrar la señal, analizar la señal filtrada, identificación de patrones en la RNA y convertir la señal de salida en valores lógicos para que el sistema

cumpla con el comportamiento deseado. En la figura 12 se observa la arquitectura completa del sistema de seguridad electromiográfico para manipuladores teleoperados.

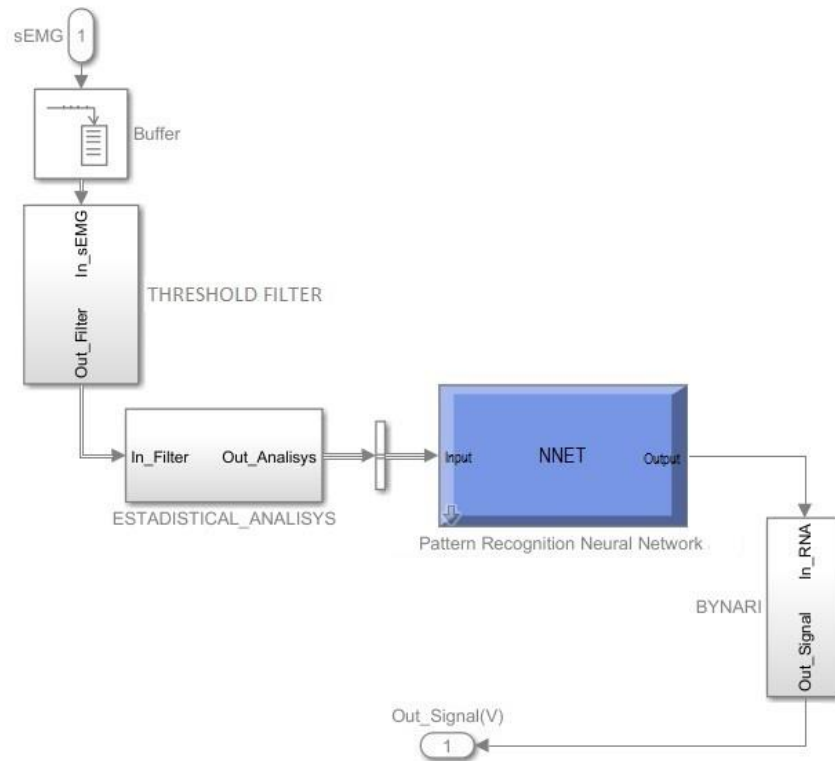


Figura 12. Arquitectura del programa diseñado en Matlab-Simulink.

Los datos de pruebas de las señales electromiográficas de superficie sEMG ingresan por sEMG al subsistema Buffer que se encarga de redistribuir los datos de entrada para producir una salida con un tamaño de fotograma menor, para el sistema se aplicó un tamaño de fotograma igual a 32 muestras.

Cuando el subsistema Buffer redistribuye los datos, estos ingresan por In_sEMG al subsistema THRESHOLD_FILTER que se encargan de analizar las señales para eliminar muestras innecesarias y poder identificar solo las muestras con mayor actividad electromiográfica. En el ANEXO 2 se indica gráficamente el funcionamiento de este subsistema.

Por In_Filter ingresan los datos al subsistema STADISTICAL_ANALISYS que procesa las señales electromiográficas previamente filtradas, para que las funciones que se encuentran en este subsistema analicen y representen matemáticamente las características necesarias para el sistema. En el ANEXO 3 se indica gráficamente el funcionamiento de este subsistema.

Las características extraídas en el subsistema anterior ingresan por input al subsistema NNET pattern Recognition Neuronal Network, que se encarga de identificar los patrones de las posturas de la mano que representa al comportamiento deseado. Este subsistema fue previamente entrenado para

la correcta identificación de patrones de cada postura de mano. En el ANEXO 4 se indica gráficamente el funcionamiento del subsistema.

Como última parte del sistema se encuentra el subsistema BINARY al que ingresa los datos por In_RNA, que se encarga de gestionar la condición necesaria para generar el movimiento de la articulación del robot. En el ANEXO 1 se observa todos los comportamientos deseados y en el ANEXO 5 se indica gráficamente el funcionamiento del subsistema.

Como salida de todos los datos procesados en el sistema de seguridad tenemos Out_Signal(V), que sirve para el análisis virtual del servomotor y validación de los mismos.

2.1.4. Pruebas, Integración y verificación en el entorno virtual

Para las pruebas realizadas con las señales sEMG obtenidas del Myo, al realizar las diferentes posiciones de mano. Es necesario obtener el valor absoluto de cada señal, para obtener el valor medio que permitirá determinar qué señal sEMG tiene mayor actividad muscular.

De las señales sEMG obtenidas del operador se procede a realizar un análisis de las características IEMG, MAV, RMS y VAR, para obtener sus respectivos comportamientos. De los comportamientos de las características se procede a obtener el valor absoluto para obtener el valor medio.

Una vez obtenidos los valores medios de los comportamientos de las características IEMG, MAV, RMS y VAR. Se representan en la tabla para determinar cuál señal sEMG tiene mayor actividad y, con esta señal, se procederá al entrenamiento de la red neuronal.

En la tabla 1 se puede observar los valores correspondientes a las características de las señales electromiográficas obtenidas al ejecutar la posición FIST de la mano, figura 9. En el ANEXO 6 se puede observar todas las tablas de las diferentes posiciones.

Tabla 1. Características de la señal sEMG, posición de mano FIST.

	emg1	emg2	em3	emg4	emg5	emg6	emg7	emg8
Valor Medio	0.0449	0.0385	0.0481	0.0628	0.0897	0.0982	0.0814	0.0833
IEMG	0.5731	0.3816	0.1019	0.1996	0.7386	0.8177	1.1194	1.2671
MAV	0.0179	0.0119	0.0032	0.0062	0.0231	0.0256	0.0350	0.0396
RMS	0.0048	0.0035	0.0014	0.0026	0.0072	0.0082	0.0087	0.0097
VAR	0.0031	0.0014	0.0001	0.0006	0.0036	0.0036	0.0094	0.0116

De las señales obtenidas del giroscopio Myo al realizar las diferentes poses de la mano del operador, escogemos la señal más relevante que se asemeja al comportamiento de las señales sEMG, previo al análisis realizado en el programa Matlab-Simulink. La señal escogida del giroscopio es usada para el entrenamiento de la red neuronal. Las señales del giroscopio Myo de la postura FIST se las puede observar en la figura 9.

Para seleccionar la red neuronal artificial en Matlab es necesario Neural network Toolbox. Para este trabajo se aplicó la Pattern Recognition app, que es una herramienta de reconocimiento de patrón de redes neuronales, permitiendo la solución de un problema de clasificación de reconocimiento de patrones usando una red de dos capas feed-forward patternnet con las neuronas de salida sigmoidea. Para la arquitectura de la red es necesario escoger el número de Neuronas ocultas. Para este caso se procedió a realizar pruebas con 5, 10, 15 y 20 neuronas (Bonilla, Lukyanov, Litvin & Deplov, 2015). Ya con los parámetros seleccionados se procede al entrenamiento de la red usando un algoritmo de aprendizaje supervisado que se usa para entrenar redes neuronales artificiales. Se aplica Backpropagation que es la propagación hacia atrás de errores o retropropagación. Cuando la red neuronal artificial ya está entrenada se procede a generar versiones desplegables de la red neural entrenada, la versión para aplicar en el trabajo es Simulink Diagram.

Para la integración es necesario determinar el error de las diferentes neuronas ocultas usadas. Con este error se puede saber que red neuronal es la adecuada para el proyecto como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Numero de neuronas y error de la señal sEMG de la RNA, posición de mano FIST.

Neuronas ocultas	Error
5	4.39
10	4.29
15	4.44
20	4.29

Con la RNA que presente el menor error al momento del entrenamiento, se puede trabajar de tal forma que la salida se asemeja al comportamiento deseado y cumpla con su finalidad. En el ANEXO 7 se puede observar todas las tablas de los errores de las RNA de las diferentes posiciones de mano.

El entorno virtual mediante el cual se analizó los datos de salida del sistema, es una representación virtual del comportamiento de un servomotor realizado en Matlab-Simulink. La señal ingresa al subsistema H-Brinde que se encarga de generar el movimiento clockwise (horario) o counterclockwise (anti horario) del subsistema DC servomotor, el movimiento del servomotor es analizado por el subsistema Angular Position Sensor y por último se transforma los radianes a grados para la correcta interpretación de los datos. En el bloque Condition se limita el movimiento angular según los datos técnicos del robot Mitsubishi RV-2JA.

Para la verificación de la interface entre el sistema de adquisición de las señales y el entorno virtual del sistema robótico, se emplea los datos de prueba que se generan a la salida del sistema de la figura 13.

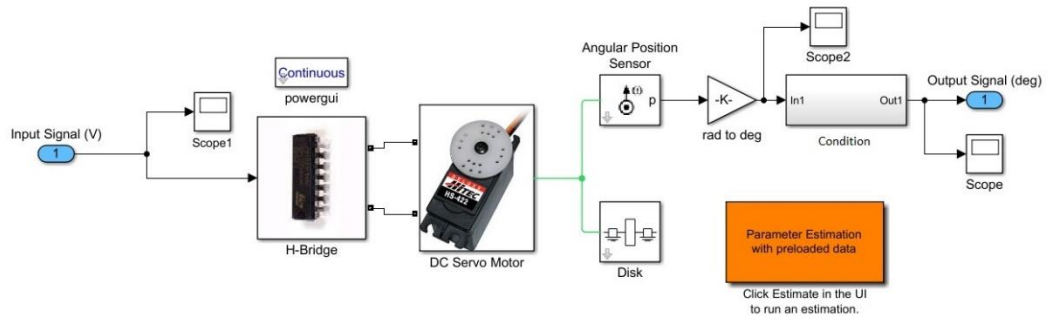


Figura 13. Integración del sistema al entorno virtual del servomotor.

Los datos de prueba se encuentran entre los valores 1 y -1 que ingresan al entorno virtual del servomotor. Como respuesta del entorno virtual se tiene una salida con datos en grados que corresponden al movimiento del servomotor. En el ANEXO 8 se indica gráficamente el funcionamiento del entorno virtual.

2.1.5. Sistema de verificación y validación

En esta etapa se pretende buscar un punto intermedio entre la simulación y la experimentación, que otorgue flexibilidad, sencillez, experimentación y coste. Con la aplicación de un sistema “hardware in the loop” (HIL) que es una forma de simulación y validación en tiempo real, la parte física de una máquina o sistema se sustituye por una simulación. (Gauchía y Sanz, 2008)

En el proyecto se aplicó una simulación HIL basada en PC, figura 14. El entorno de simulación que se utilizó para ejecutar el modelo de planta, permite la conexión con el sistema de control y proporciona la comunicación adecuada con el modelo de planta, parte 1 de la figura 14.

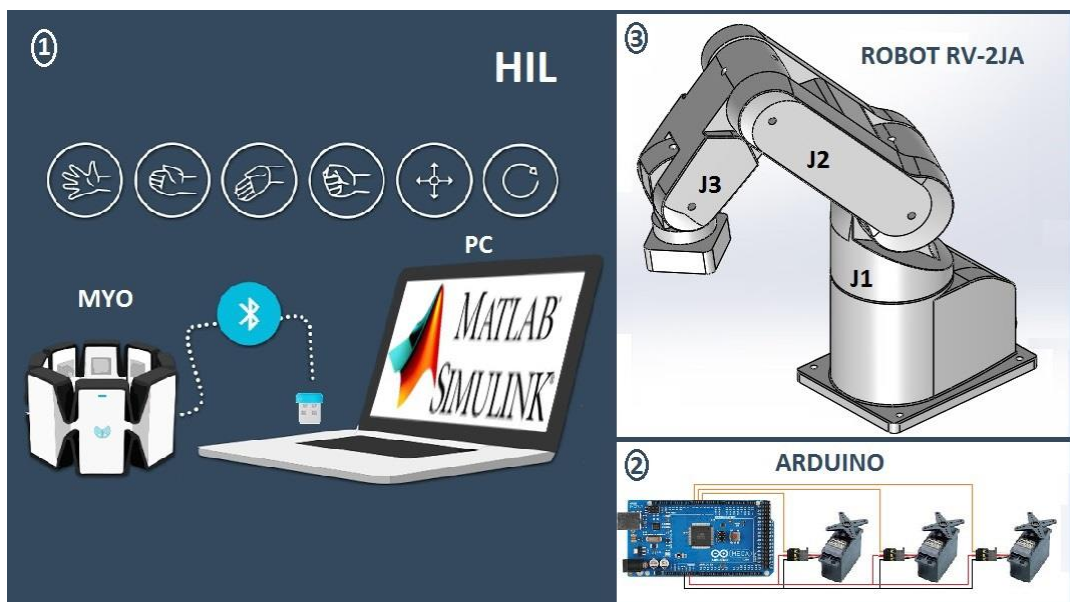


Figura 14. Sistema “hardware in the loop” HIL.

Para la verificación del sistema de seguridad electromiográfico en la práctica, parte 2 de la figura 14, se procedió a generar movimiento del servomotor como respuesta a la acción del sistema de seguridad electromiográfico. En la figura 15 se muestra la vinculación de Matlab-Simulink con la tarjeta arduino para validar el movimiento angular. El movimiento del servomotor representa el comportamiento de una de las articulaciones del brazo robótico Mitsubishi RV-2AJ.

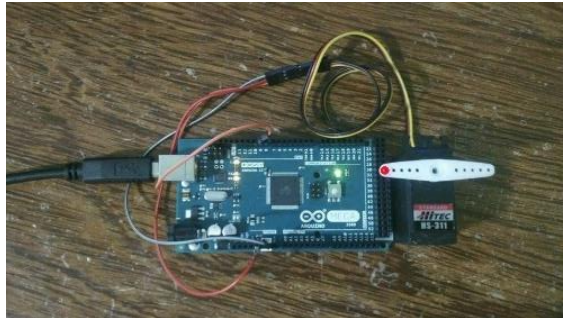


Figura 15. Integración del sistema al servo motor.

Mediante el complemento de Simulink ArduinoIO se pudo establecer la conexión necesaria que permitió verificar que el sistema de seguridad cumple con su finalidad, que es generar movimiento controlado por las señales electromiográficas. En el ANEXO 9 se observa detenidamente cómo se realiza la verificación del sistema de seguridad electromiográfico en la práctica.

Para la validación del sistema de seguridad electromiográfico se realizó el control del robot Mitsubishi RV-2AJ de manera virtual en Matlab-Simulink. Parte 3 de la figura 14. Los 3 grados de libertad que se controlaron en el entorno virtual son cintura, brazo y antebrazo. (Hoyo, Reyes, Rebolledo, Espinosa & Sánchez, 2009) En la figura 16 se observa el robot modelado en un entorno virtual.

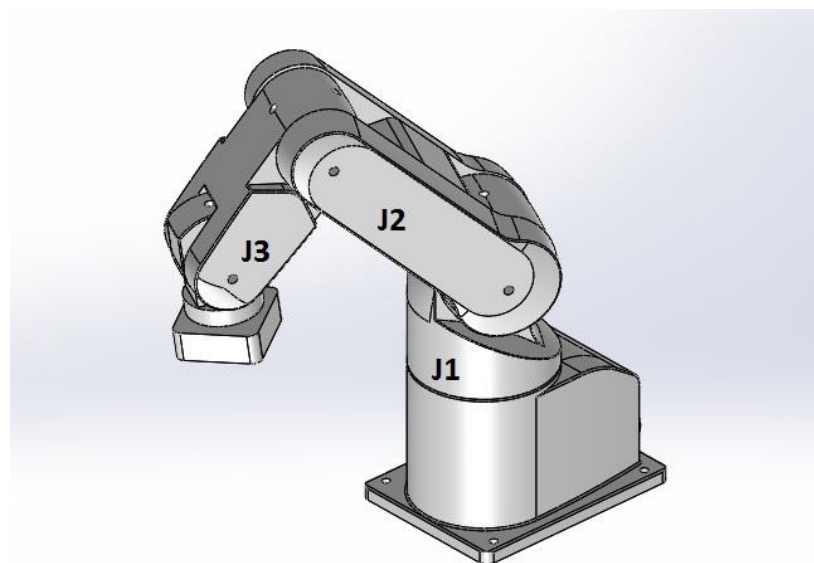


Figura 16. Mitsubishi RV-2AJ.

Los grados de libertad que se controlan con el sistema de seguridad electromiográfico fueron J1, J2 y J3 de la simulación brazo robótico Mitsubishi RV-2AJ, mediante la representación en Simulink de los componentes del mismo. En el ANEXO 10 se observa la representación en Simulink Matlab del brazo robótico.

Para controlar las articulaciones J1 J2 y J3 del robot se implementó en Simulink un subsistema, el cual toma la señal de salida que es generada por el entorno virtual del servomotor. La señal ingresa al bloque Joint Actuator que requiere como entrada el ángulo de movimiento, la velocidad angular y la aceleración angular. Una vez ingresado los valores correspondientes el subsistema interpreta la señal de entrada y generará el movimiento deseado de la articulación. Para verificar el movimiento de la articulación existe el bloque Joint Sensor que permite generar datos para visualizar que la articulación está siendo controlada mediante las señales electromiográficas. En la figura 17 se observa el subsistema de control de la articulación J1.

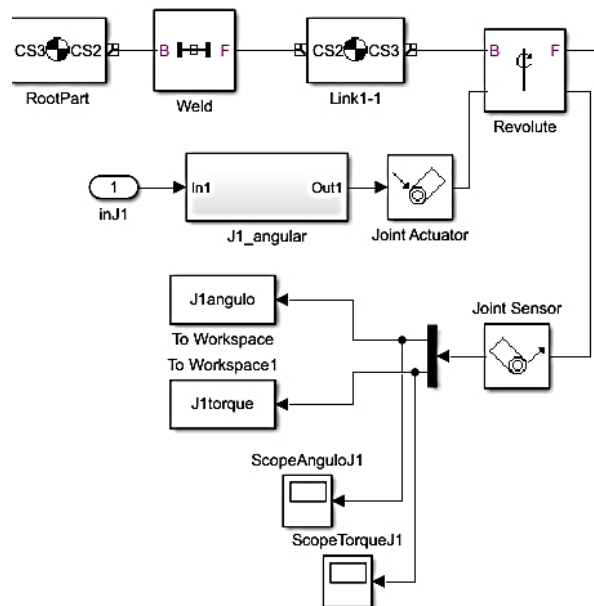


Figura 17. Subsistema de control de la articulación J1.

Para controlar las articulaciones J2 y J3 se implementó el mismo subsistema que se observa en la figura 17. En el ANEXO 11 se observa el subsistema completo encargado de controlar las articulaciones J1, J2 y J3.

En la figura 18 se puede observar como varía el movimiento angular de la articulación J1 de 0 a 150 y 0 a -150 grados cuando es estimulada por la señal electromiográfica de la posición de mano fist y spread fingers, respectivamente. El límite de movimiento de la articulación J1 es de ± 150 grados.

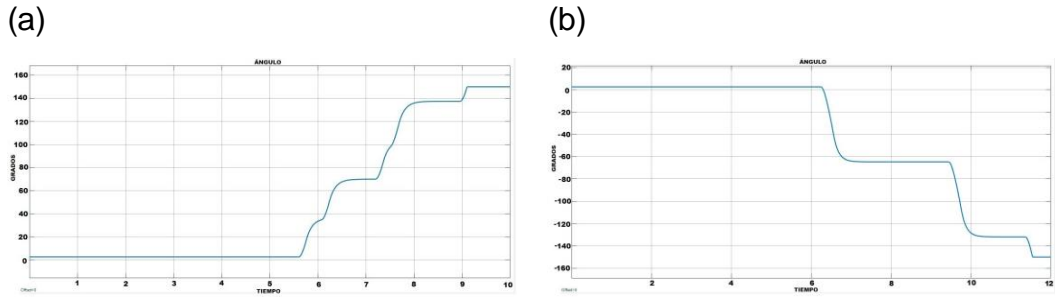


Figura 18. Movimiento angular de la articulación J1. (a)Desplazamiento angular positivo.
(b) Desplazamiento angular negativo.

Cada articulación del brazo robótico Mitsubishi RV-2AJ tiene su respectivo límite de movilidad de grados. En el ANEXO 13 se indican las características del brazo robótico.

Cada articulación que está siendo controlada por el sistema genera movimiento angular. Para una mayor comprensión se procedió a visualizar el movimiento del torque de cada articulación. En la figura 19 se puede observar el comportamiento del torque de la articulación J1, cuando se está moviendo a la posición final del estímulo del sistema electromiográfico.

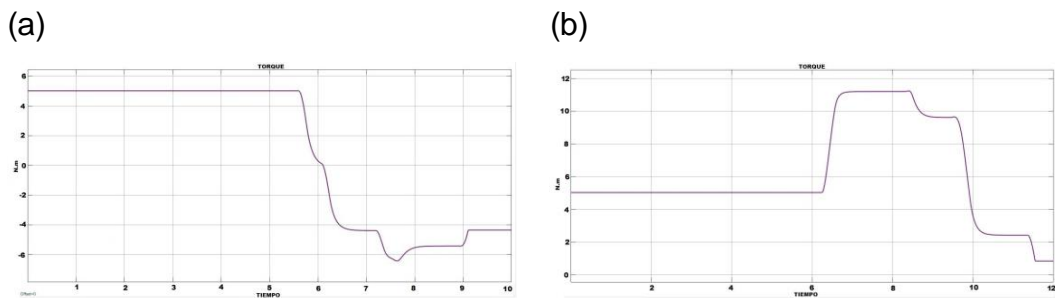


Figura 19. Torque de la articulación J1. (a) Torque generado por Fist. (b) Torque generado por Spread Fingers.

Para comprender el control de las articulaciones del manipulador teleoperado mediante el sistema de seguridad electromiográfico, en el ANEXO 12 se puede observar todos los movimientos angulares y torque de las articulaciones J1, J2 y J3 del brazo robótico.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

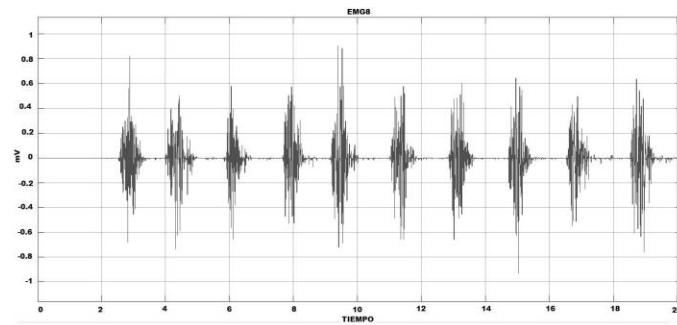
- Para el desarrollo de las pruebas se trabajó con las muestras del brazo de una persona de 27 años de edad, perímetro del antebrazo 25 cm y longitud del antebrazo de 26 cm. Los parámetros fueron medidos como se indica en (Martínez, 1992). Los datos obtenidos por medio del brazalete MYO y las características extraídas de las señales electromiográficas fueron almacenados en archivos .mat Tabla 3, para un manejo en el programa Matlab.

Tabla 3. Archivos .mat utilizados para cada posición de mano.

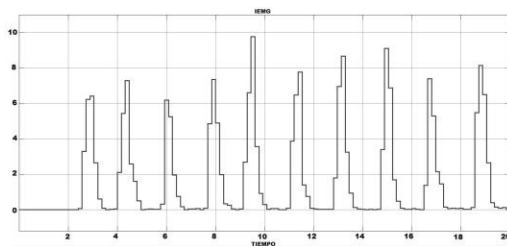
emg1.mat	señal sEMG del sensor 1
emg2.mat	señal sEMG del sensor 2
emg3.mat	señal sEMG del sensor 3
emg4.mat	señal sEMG del sensor 4
emg5.mat	señal sEMG del sensor 5
emg6.mat	señal sEMG del sensor 6
emg7.mat	señal sEMG del sensor 7
emg8.mat	señal sEMG del sensor 8
pod1.mat	señal sEMG y tiempo del sensor 1
pod2.mat	señal sEMG y tiempo del sensor 2
pod3.mat	señal sEMG y tiempo del sensor 3
pod4.mat	señal sEMG y tiempo del sensor 4
pod5.mat	señal sEMG y tiempo del sensor 5
pod6.mat	señal sEMG y tiempo del sensor 6
pod7.mat	señal sEMG y tiempo del sensor 7
pod8.mat	señal sEMG y tiempo del sensor 8
pod_IEMG.mat	Integrado EMG y tiempo del sensor
pod_MAV.mat	Media del valor absoluto y tiempo del sensor
pod_RMS.mat	Media cuadrática y tiempo del sensor
pod_VAR.mat	Varianza y tiempo del sensor
gyro1.mat	Señal del giroscopio x
gyro2.mat	Señal del giroscopio y
gyro3.mat	Señal del giroscopio z
gyrox.mat	Señal y tiempo del giroscopio x
gyroy.mat	Señal y tiempo del giroscopio y
gyroz.mat	Señal y tiempo del giroscopio z
inIEMG.mat	Señal de entrenamiento IEMG para RNA
inMAV.mat	Señal de entrenamiento MAV para RNA
inRMS.mat	Señal de entrenamiento RMS para RNA
inVAR.mat	Señal de entrenamiento VAR para RNA
Inpunts.mat	Entrada de la RNA para entrenamiento
Targets.mat	Clasificación conocida de los datos de entrada
temg.mat	Tiempo de las muestras sEMG
tgyro.mat	Tiempo de las muestras del giroscopio

- Para el análisis de las de las señales sEMG, en el espacio del tiempo, se diseñó una interfaz para visualizar la dinámica de cambio de los parámetros IEMG, MAV, RMS y VAR. Figura 20.

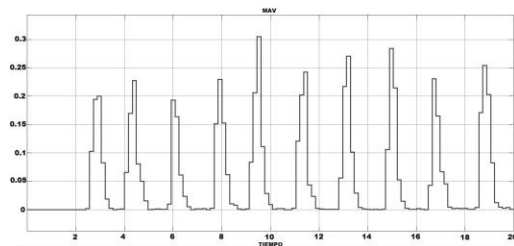
(a)



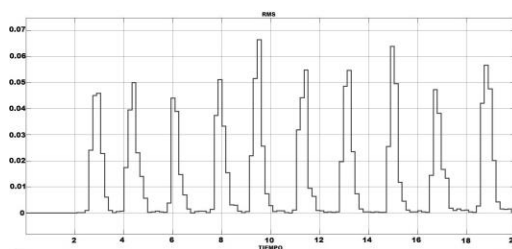
(b)



(c)



(d)



(e)

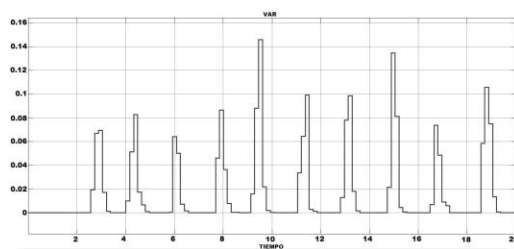


Figura 20. Características de FIST. (a) Señal sEMG del sensor 8. (b) IEMG. (c) MAV. (d) RMS. (e) VAR.

En la figura 20, se puede observar el comportamiento de los parámetros IEMG, MAV, RMS y VAR, de diez movimientos de mano "Fist", de la señal sEMG del sensor 8, obtenido por el brazalete Myo.

- Mediante la aplicación se seleccionaron los parámetros más informativos para entrenar a las redes neuronales artificiales. Sin embargo, fue necesario definir el número de neuronas en las capas ocultas. La metodología implementada fue variar el número de neuronas, calcular el error de entrenamiento y seleccionar la red neuronal que menor error tiene al momento de reconocer los movimientos y posiciones de la mano.
- Con la finalidad de validar la identificación de posiciones realizada por las redes neuronales se implementó el modelo virtual del robot Mitsubishi RV-2AJ. El control del grado de libertad J1, figura 21, se realizó mediante las posiciones de mano "fist" y "spread fingers", J2, y J3 fueron controlados por "wave right" y "wave left", y "elder" y "voor" respectivamente.

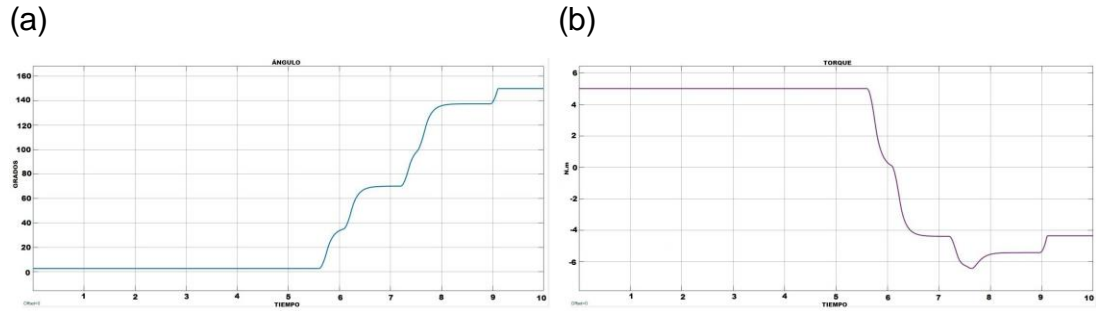


Figura 21. Movimiento de la articulación J1. (a)Desplazamiento angular positivo.
(b)Torque generado.

- Se realizaron varias secuencias de los movimientos de mano en un periodo de tiempo máximo de 20 segundos, figura 22. Por tal motivo, la cantidad de posiciones de mano pueden variar en el tiempo establecido.

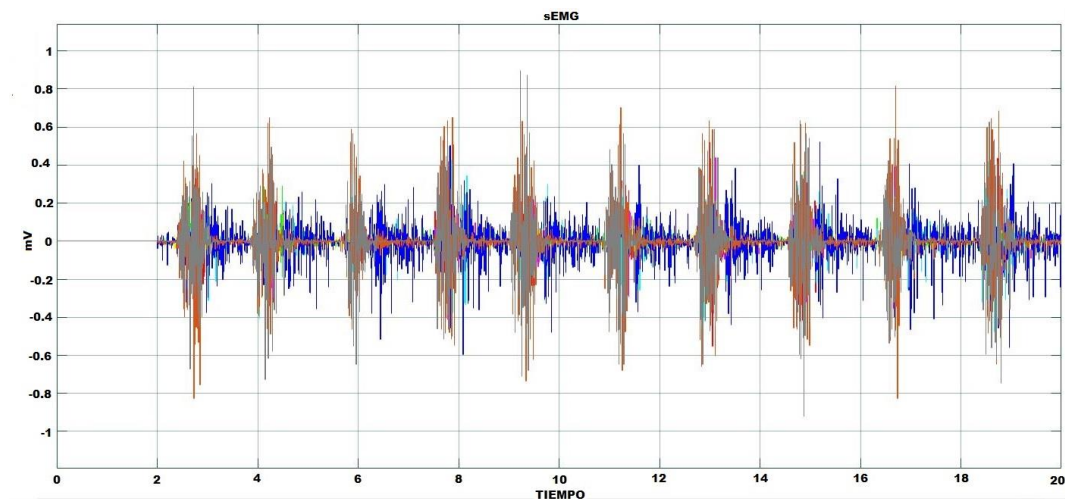


Figura 22. Señales sEMG de la posición de mano FIST.

En la figura 22, se observa gráficamente las señales sEMG obtenidas de los 8 sensores del brazalete Myo, correspondientes a 10 posiciones de mano Fist.

- La integración de los sistemas se realizó en la plataforma Simulink, para validar los resultados del procesamiento de señales, de la identificación de movimientos, y del control del robot. Mediante pruebas HIL se verificó que los ángulos, estimados en el sistema, corresponden a los ángulos en los que se posiciona el servomotor de prueba, figura 15.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Mediante los protocolos de comunicación del SDK del Myo Armband, se pudo obtener los datos sEMG para el procesamiento en Matlab. Para el entrenamiento del sistema, se obtuvieron 10 movimientos, en un tiempo de 20 segundos. Las características del brazo del operador son: Persona de 27 años de edad, perímetro del antebrazo 25 cm y longitud del antebrazo de 26 cm.
- Mediante redes neuronales artificiales se realizó el reconocimiento de los patrones de las diferentes posiciones de mano. La cantidad de neuronas aplicadas en el trabajo varía de 5 o 10, dependiendo de la posición de mano que se requiera reconocer.
- Para obtener patrones linealmente independientes se aplicó un filtro que eliminar muestras innecesarias en la extracción de las características, esta estrategia disminuyó la influencia de la actividad de los músculos que mantienen la posición del cuerpo.
- La interfaz virtual del robot Mitsubishi RV-2AJ permite realizar pruebas HIL con la finalidad de validar el algoritmo de control. Del análisis se pudo observar que, al momento de generar la señal de control mediante la actividad muscular de la gesticulación VOOR, el sistema de reconocimiento falló en un 4.8% en la etapa de entrenamiento; y, en un 3.6% en la etapa de pruebas. Para las otras gesticulaciones el error no supera el 2.5%.
- El uso de técnicas HIL para la simulación y el montaje experimental, permite validar al sistema de control en la etapa de diseño del Sistema.

RECOMENDACIONES

- Al momento de adquirir muestras con el brazalete Myo hay que tener cuidado durante la obtención de los datos, ya que los datos mal tomados afectan al desarrollo de sistemas. Los cuidados a tener en cuenta son: mantener la misma ubicación del brazalete Myo en el antebrazo para todas las posiciones, y relacionar de forma visual los patrones que generan las señales sEMG de cada posición de mano.
- Mediante la aplicación del sistema se controla robots, lo cual permite futuros análisis para el desarrollo de prótesis de miembros superiores controladas por electromiografía.
- En el desarrollo del sistema se analizó las señales electromiográficas mediante aproximación temporal. No obstante, se podría realizar análisis por aproximación espectral, modelamiento paramétrico autorregresivos, transformada rápida de Fourier, transformada Wavelet, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA


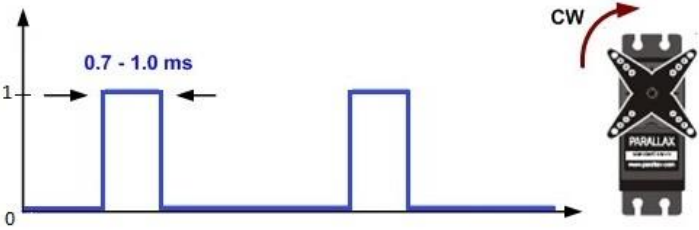

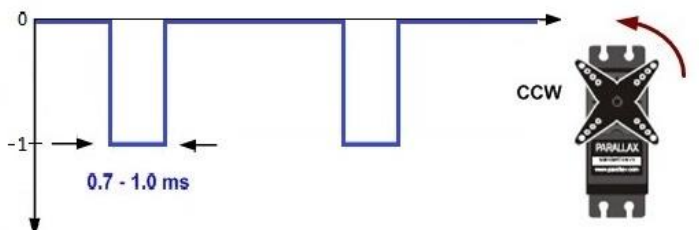

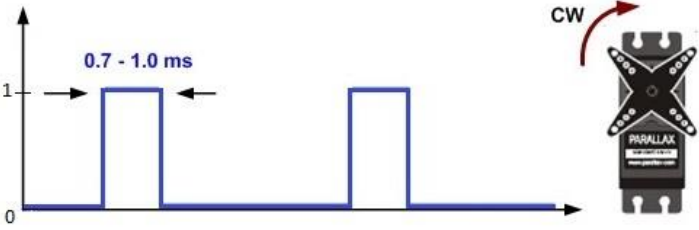

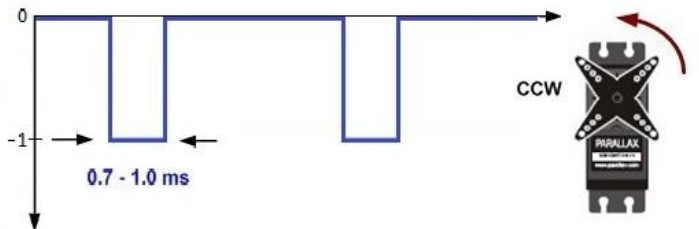
- Ramiro Ramos Mario, Vergara Betancourt Ángel, Vázquez Gerónimo Gustavo, Hernández García Edgar y Juárez Ramiro Luis. (2011). Detección y Acondicionamiento de Señales Mioeléctricas. *10º Congreso Nacional de Mecatrónica*, 10(1), 174-178.
- Álvaro Ángel Orozco Gutiérrez, Gustavo Andrés Betancourt Orozco y Eduardo Giraldo Suárez. (2005). Determinación de movimientos a partir de señales electromiográficas utilizando máquinas de soporte vectorial. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia
- Camilo Andrés Riaño Ríos & Virgilio Eduardo Quintero Machado. (2010). Control de una mano virtual usando señales electromiográficas. Universidad Militar Nueva Granada. Colombia.
- J. Villarejo, E. Caicedo, O. Campo. (2008). Detección de la intensidad de movimiento durante la marcha a partir de señales electromiográficas. Universidad del Valle/Grupo de percepción y sistemas inteligentes, Universidad Autónoma de Occidente/grupo de investigaciones en bioingeniería. Colombia.
- Ricardo Enrique Gutiérrez Carvajal, Ricardo Andrés Castillo Estepa. (2006). Control de manipuladores teleoperados. Universidad Militar "Nueva Granada". *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 16 (1), 28-42.
- Forsberg, K., Mooz, H., Cotterman, H. (2005). *Visualizing Project Management* (en inglés), 3ª edición, John Wiley and Sons, Nueva York, NY.
- Gabriel Doretto Morais, Leonardo C. Neves, Andrey A. Masiero and Maria Claudia F. Castro. (2016). Application of Myo Armband System to Control a Robot Interface. In *Proceedings of the 9th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies*, 1(4), 227-231, ISBN: 978-989-758-170-0.
- Néstor Mauricio Caro Sánchez. (2016). Gesture classification based on electromyography. Czech Technical University in Prague. Czech Republic
- Simon Ferguson, G. Reg Dunlop. (2002). Grasp recognition from myoelectric signals. *Proc. Australasian Conference on Robotics and Automation*. ARAA 83-87.
- Angkoon Phinyomark, Chusak Limsakul, and Pornchai Phukpattaranont. (2009). A novel feature extraction for robust EMG pattern recognition. *Journal of computing*. 1(1), ISSUE 1, ISSN: 2151-9617
- F. Bonilla, A. E. Lukyanov, A. V. Litvin, D. A. Deplov. (2014). Effect of kinematic parameters of elbow motion on biceps electromyographic signal. *Vestnik DSTU* 1(4).133-141


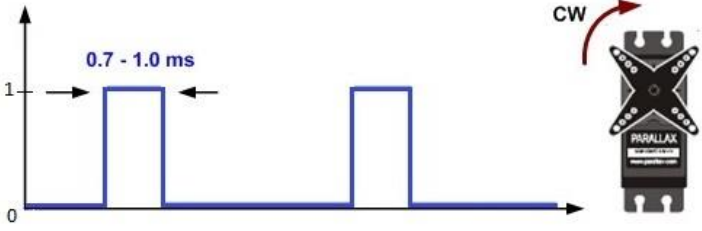

- Ferdinand Bach, Øyvind Stavadahl y Anders Fougner. (2009). Myoelectric signal features for upper limb prostheses. Norwegian University of Science and Technology. Department of Engineering Cybernetics. Norwegian
- F. Bonilla, A. E. Lukyanov, A. V. Litvin, D. A. Deplov. (2015). Identification of the elbow motion kinematic parameters by means of artificial neural networks technology, Vestnik DSTU (1), Rostov on Don. Russia.
- R. Isermann. (2002). Modeling and design methodology for mechatronic systems. Inst. of Autom. Control, Tech. Univ. Darmstadt, Germany. Germany. IEEE/ASME Transaction on mechatronics, 1(1), 16 – 28.
- Lucía Gauchía Babé, Dr. Javier Sanz Feito. (2008). Modelado y simulación HIL (hardware-in-the-loop) de un sistema pila de combustible - batería. Universidad Carlos III de Madrid. España.
- Hoyo, A, Reyes, O, Rebolledo, A, Espinosa, L y Sánchez, G. (2009). Simulación de robots con Matlab y Simulink en escenarios virtuales 3D. Universidad Simón Bolívar. Caracas-Venezuela. I Congreso Iberoamericano de Enseñanza de la Ingeniería.
- Martínez, B. C. (1992). Antropología Física (Vol. I). Nuevo León, Monterrey, Mexico: UANL.

ANEXOS

Anexo 1. Representación de las articulaciones

Representación del comportamiento deseado de cada posición de mano.

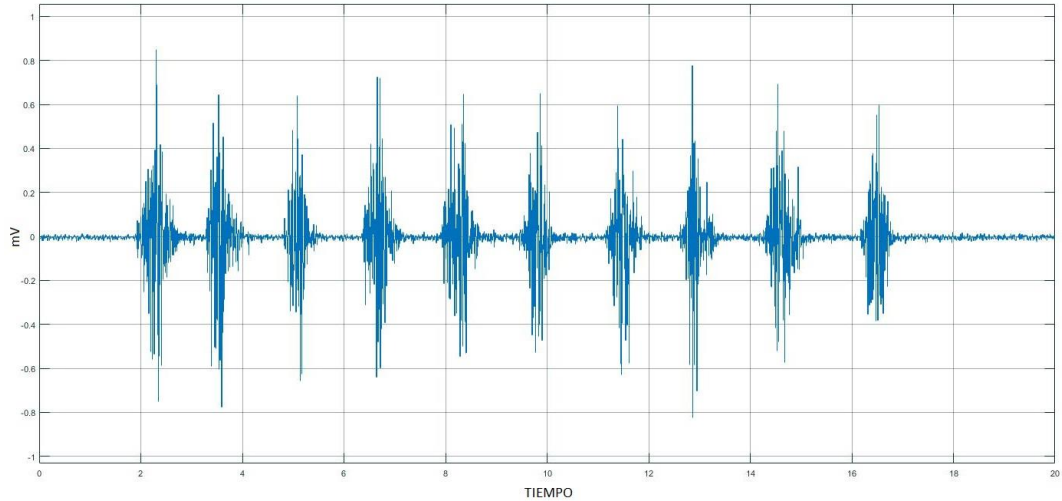
ARTICULACIÓN J1	
FIST	CLOCKWISE (CW)
	<p>Ejemplo</p> 
SPREAD FINGERS	COUNTERCLOCKWISE (CCW)
	<p>Ejemplo</p> 
ARTICULACIÓN J2	
WAVE RIGHT	CLOCKWISE (CW)
	<p>Ejemplo</p> 
WAVE LEFT	COUNTERCLOCKWISE (CCW)
	<p>Ejemplo</p> 

ARTICULACIÓN J2	
ELDER	CLOCKWISE (CW)
	<p>Ejemplo</p> 
	<p>VOOR</p> 

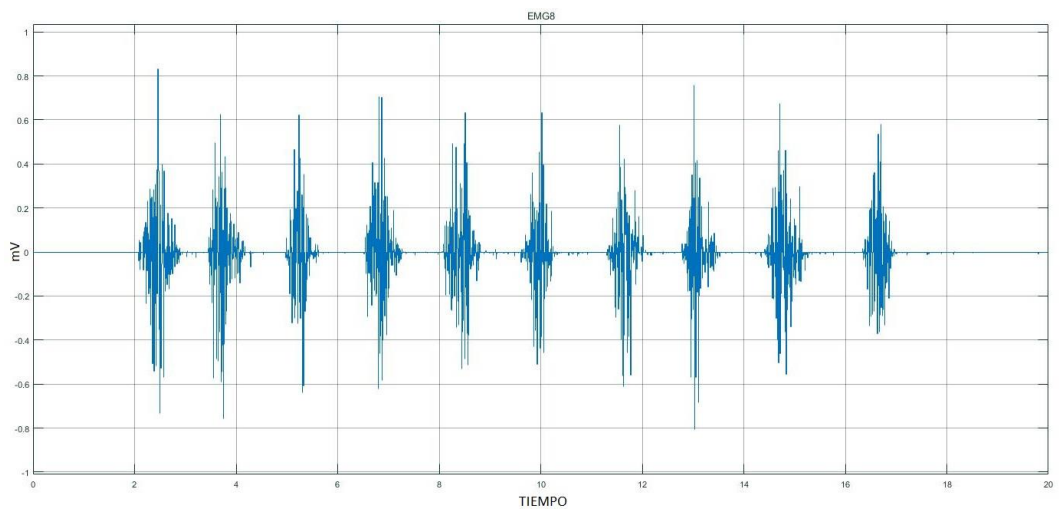
Anexo 2: Subsistema THRESHOLD_FILTER

Funcionamiento del subsistema THRESHOLD_FILTER con 10 muestras de la posición de mano FIST, en un tiempo de 20 segundos.

Señal EMG del sensor 8



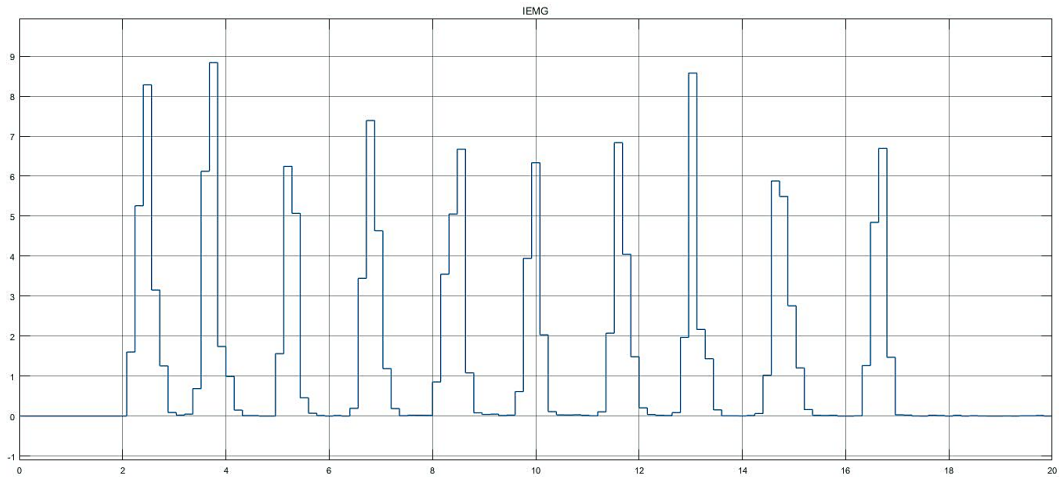
Señal EMG del sensor 8 aplicando el subsistema THRESHOLD_FILTER



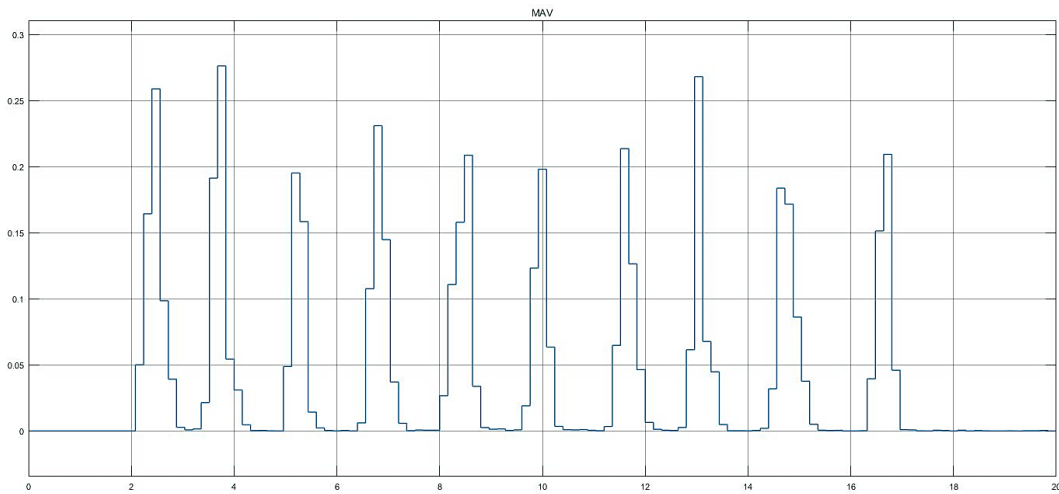
Anexo 3: Subsistema STADISTICAL_ANALISYS

Funcionamiento del subsistema STADISTICAL_ANALISYS con 10 muestras de la posición de mano FIST, en un tiempo de 20 segundos.

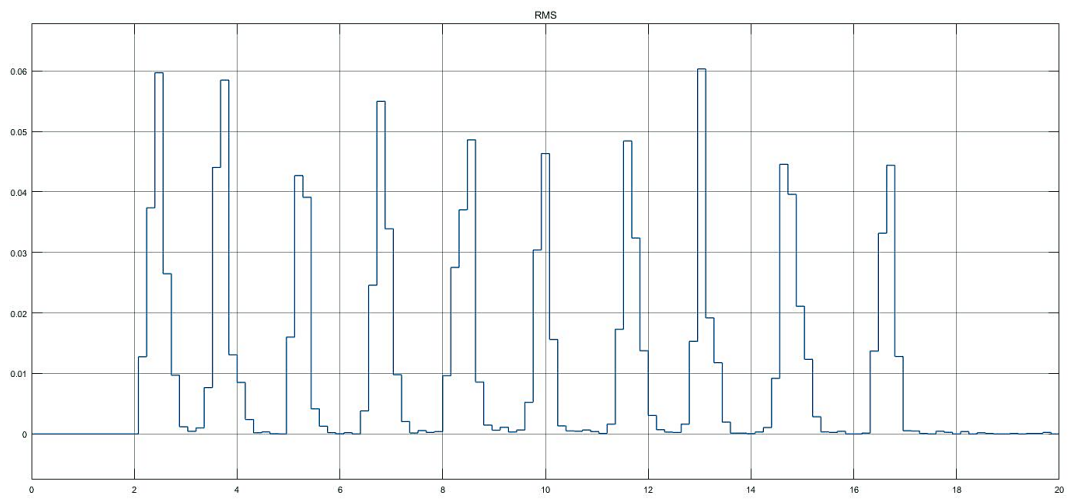
Integrado EMG (IEMG) de la señal EMG del sensor 8



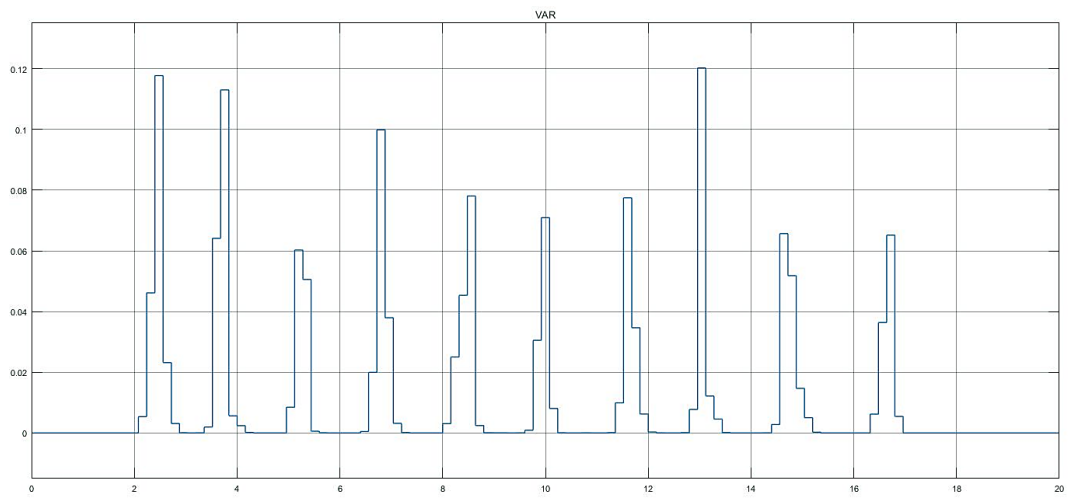
Media del valor absoluto (MAV) de la señal EMG del sensor 8



Media cuadrática (RMS) de la señal EMG del sensor 8



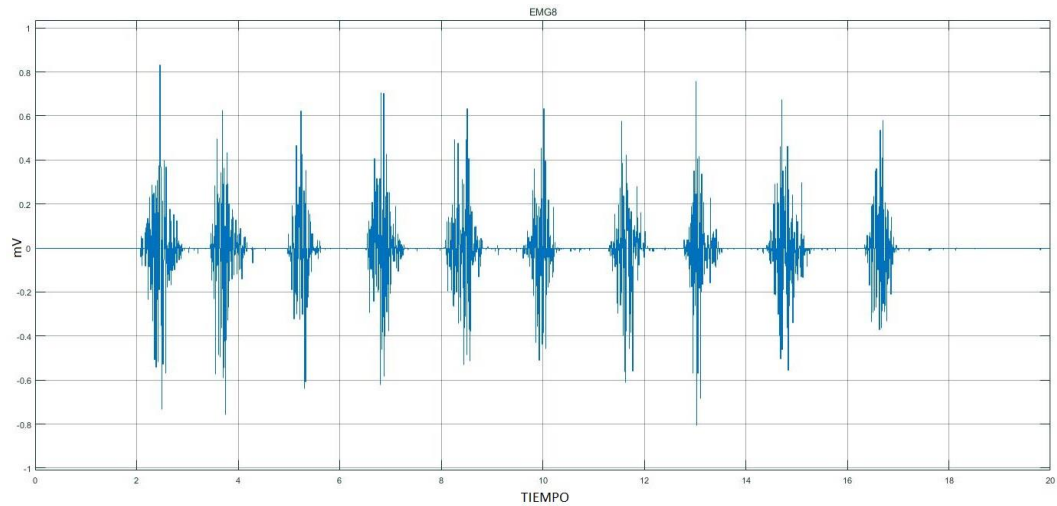
Varianza (VAR) de la señal EMG del sensor 8



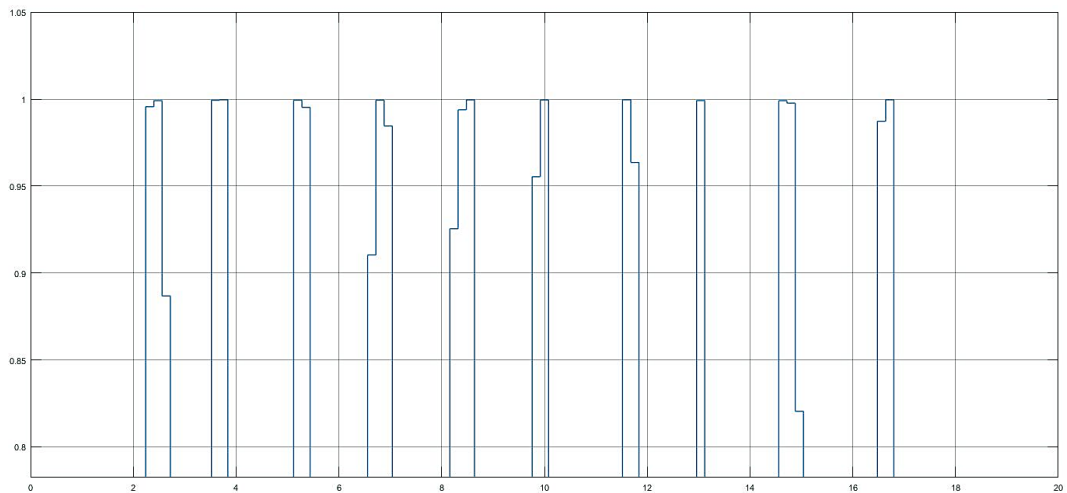
Anexo 4: Subsistema NNET

Funcionamiento del subsistema NNET pattern Recognition Neuronal Network con 10 muestras de la posición de mano FIST, en un tiempo de 20 segundos.

Identificación de los patrones de la señal EMG filtrada del sensor 8



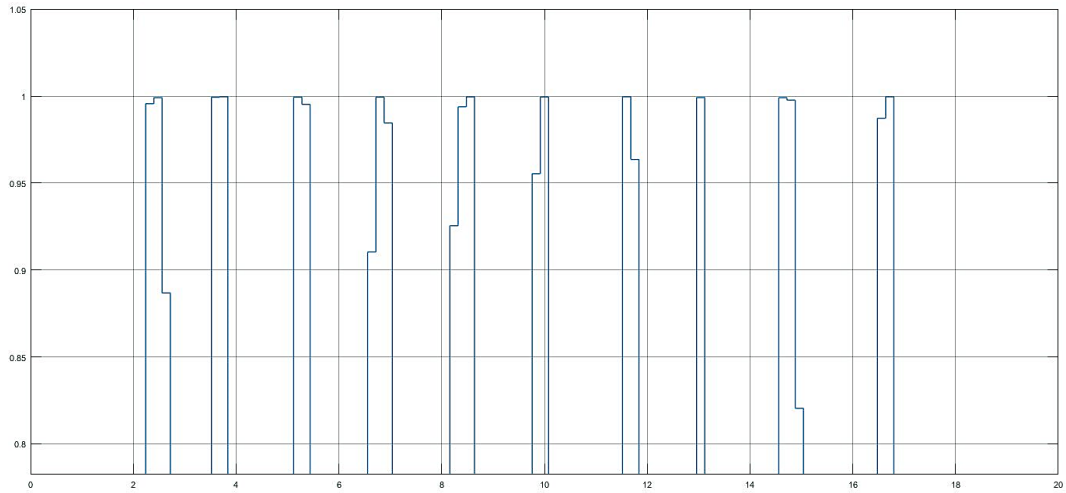
Comportamiento que genera al aplicar la RNA



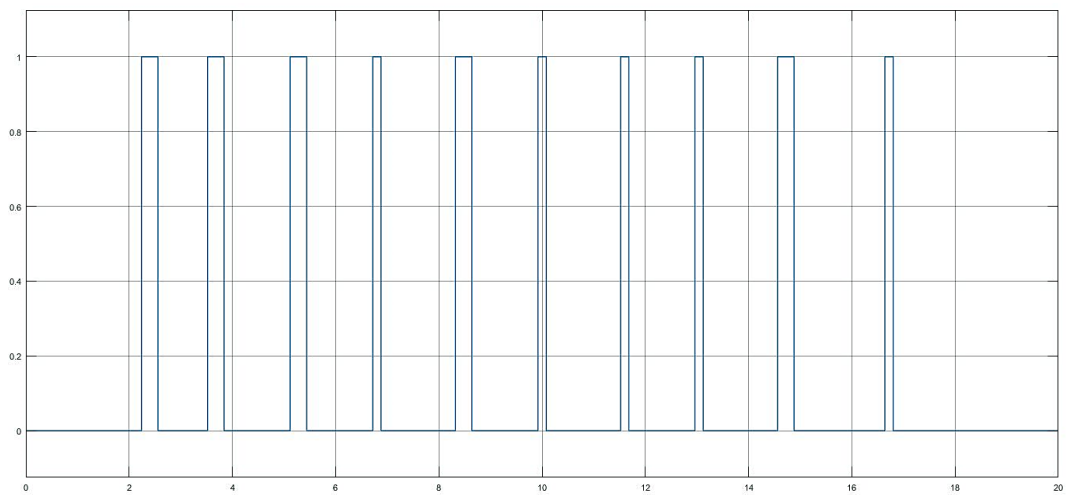
Anexo 5: Subsistema BINARY

Funcionamiento del subsistema BINARY con 10 muestras de la posición de mano FIST, en un tiempo de 20 segundos.

Comportamiento que genera la RNA



Comportamiento deseado generado por la condición del subsistema
BINARY



Anexo 6: Características de las señales EMG

Características de las señales EMG de cada posición de mano, aplicadas en el trabajo. Los valores marcados de color rojo representan la mayor interacción, el color amarillo representa interacción media y el color verde representa interacción baja que tiene cada señal.

FIRST

	emg1	emg2	em3	emg4	emg5	emg6	emg7	emg8
Valor Medio	0.0449	0.0385	0.0481	0.0628	0.0897	0.0982	0.0814	0.0833
IEMG	0.5731	0.3816	0.1019	0.1996	0.7386	0.8177	1.1194	1.2671
MAV	0.0179	0.0119	0.0032	0.0062	0.0231	0.0256	0.0350	0.0396
RMS	0.0048	0.0035	0.0014	0.0026	0.0072	0.0082	0.0087	0.0097
VAR	0.0031	0.0014	0.0001	0.0006	0.0036	0.0036	0.0094	0.0116

SPREAD FINGERS

	emg1	emg2	em3	emg4	emg5	emg6	emg7	emg8
Valor Medio	0.0505	0.0392	0.0422	0.0601	0.1078	0.1193	0.0487	0.0431
IEMG	0.7292	0.5105	0.1473	0.3411	0.9881	0.8017	0.6617	0.6067
MAV	0.0228	0.0160	0.0046	0.0107	0.0309	0.0251	0.0207	0.0190
RMS	0.0060	0.0044	0.0018	0.0036	0.0086	0.0077	0.0053	0.0050
VAR	0.0062	0.0037	0.0004	0.0013	0.0104	0.0075	0.0043	0.0040

WAVE LEFT

	emg1	emg2	em3	emg4	emg5	emg6	emg7	emg8
Valor Medio	0.0178	0.0246	0.0495	0.0942	0.1336	0.1298	0.0786	0.0245
IEMG	0.0770	0.1027	0.1065	0.3547	0.3614	0.3850	0.4345	0.1056
MAV	0.0024	0.0032	0.0033	0.0111	0.0113	0.0120	0.0136	0.0033
RMS	0.0009	0.0013	0.0014	0.0042	0.0043	0.0045	0.0046	0.0013
VAR	0.0004	0.0005	0.0004	0.0032	0.0030	0.0031	0.0039	0.0003

WAVE RIGHT

	emg1	emg2	em3	emg4	emg5	emg6	emg7	emg8
Valor Medio	0.0723	0.1046	0.0855	0.0669	0.0808	0.0971	0.0401	0.0678
IEMG	0.7583	1.3415	0.8685	0.2870	0.1871	0.0551	0.3043	0.7800
MAV	0.0237	0.0419	0.0271	0.0090	0.0058	0.0017	0.0095	0.0244
RMS	0.0065	0.0108	0.0073	0.0033	0.0028	0.0013	0.0028	0.0065
VAR	0.0082	0.0166	0.0081	0.0016	0.0008	0.0002	0.0016	0.0081

ELDER

	emg1	emg2	em3	emg4	emg5	emg6	emg7	emg8
Valor Medio	0.0318	0.0439	0.0335	0.0475	0.0835	0.0958	0.0348	0.0344
IEMG	0.4901	0.5749	0.0958	0.2551	0.4560	0.4740	0.5063	0.5750
MAV	0.0153	0.0180	0.0030	0.0080	0.0143	0.0148	0.0158	0.0180
RMS	0.0044	0.0054	0.0014	0.0032	0.0058	0.0065	0.0046	0.0050
VAR	0.0026	0.0031	0.0001	0.0006	0.0023	0.0027	0.0038	0.0051

VOOR

	emg1	emg2	em3	emg4	emg5	emg6	emg7	emg8
Valor Medio	0.0723	0.1046	0.0855	0.0669	0.0808	0.0971	0.0401	0.0678
IEMG	0.7583	1.3415	0.8685	0.2870	0.1871	0.0551	0.3043	0.7800
MAV	0.0237	0.0419	0.0271	0.0090	0.0058	0.0017	0.0095	0.0244
RMS	0.0065	0.0108	0.0073	0.0033	0.0028	0.0013	0.0028	0.0065
VAR	0.0082	0.0166	0.0081	0.0016	0.0008	0.0002	0.0016	0.0081

Anexo 7: Número de neuronas ocultas

Tablas con el número de neuronas ocultas de la RNA con sus respectivos errores, de las diferentes posiciones de mano aplicadas en el trabajo.

RNA de la posición de la mano FIST

Neuronas ocultas	Error
5	4.39
10	4.29
15	4.44
20	4.29

RNA de la posición de la mano SPREAD FINGERS

Neuronas ocultas	Error
5	4.44
10	4.44
15	4.44
20	4.44

RNA de la posición de la mano WAVE RIGHT

Neuronas ocultas	Error
5	2.93
10	2.93
15	2.93
20	3.42

RNA de la posición de la mano WAVE LEFT

Neuronas ocultas	Error
5	3.87
10	3.87
15	3.87
20	3.87

RNA de la posición de la mano VOOR

Neuronas ocultas	Error
5	3.12
10	3.66
15	3.12
20	3.66

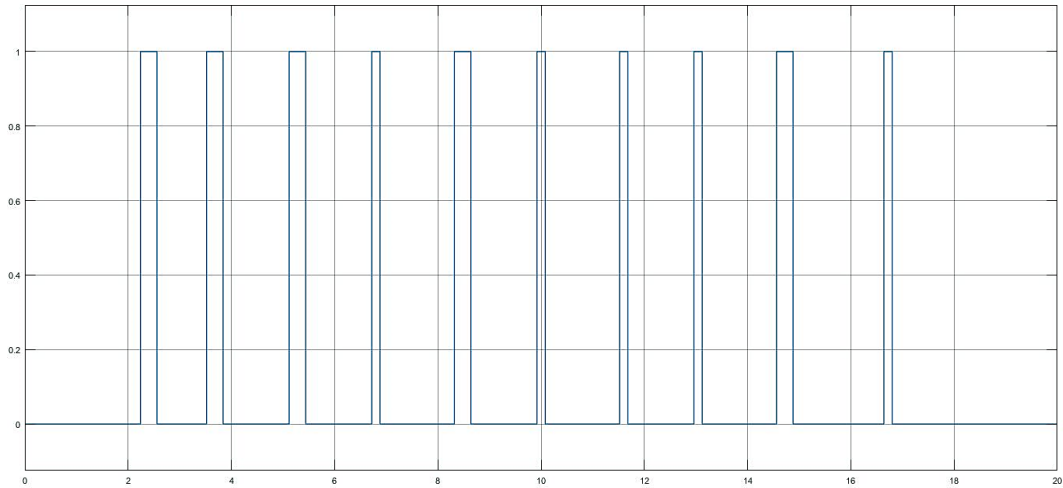
RNA de la posición de la mano ELDER

Neuronas ocultas	Error
5	4.76
10	4.76
15	4.76
20	4.76

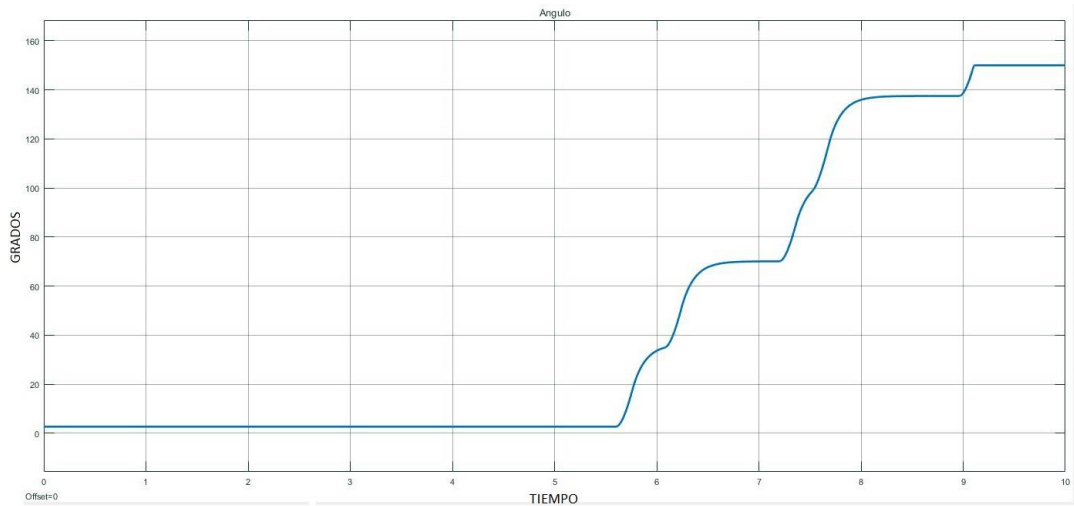
Anexo 8: Entorno virtual del servomotor

Funcionamiento del entorno virtual del servomotor, con 10 muestras de la posición de mano FIST. En las gráficas se observa que cada impulso genera su respectivo movimiento en grados. La respuesta en grados tiene un máximo de 150 y un mínimo de 0.

Pulsos generados por el sistema.



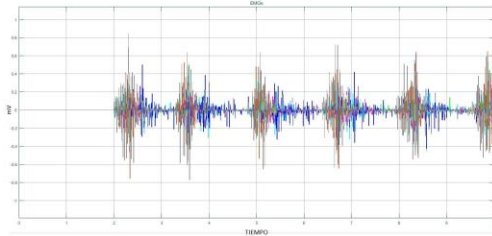
Respuesta del entorno virtual en grados.



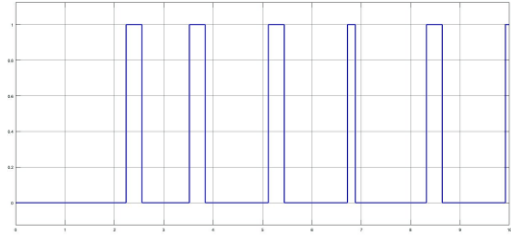
Anexo 9: Funcionamiento del sistema

Verificación del funcionamiento del sistema de seguridad en la práctica. La señal electromiográfica genera movimiento del servomotor.

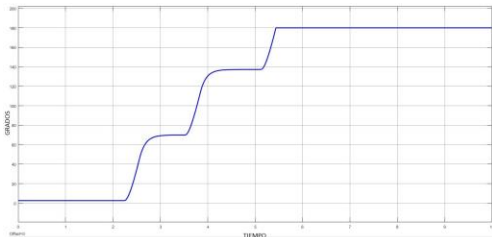
(1) Señal sEMG Fist



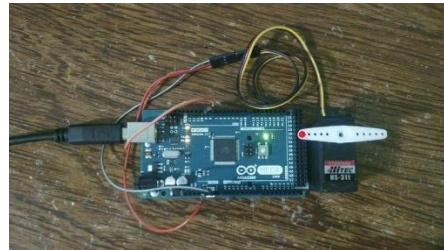
(2) Respuesta del sistema



(3) Salida del sistema



(4) Servomotor 0 grados



(5) Servomotor 70 grados



(6) Servomotor 137 grados



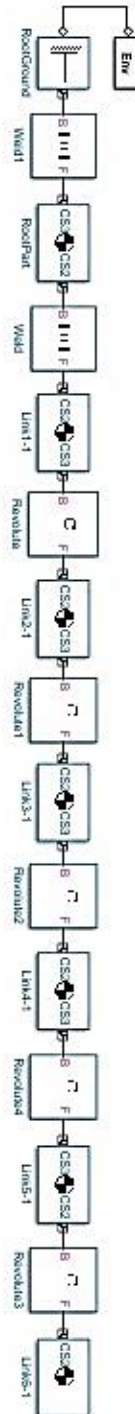
(7) Servomotor 180 grados



Anexo 10: Representación SimMechanics

Representación SimMechanics en Simulink Matlab del brazo robótico Mitsubishi RV-2AJ.

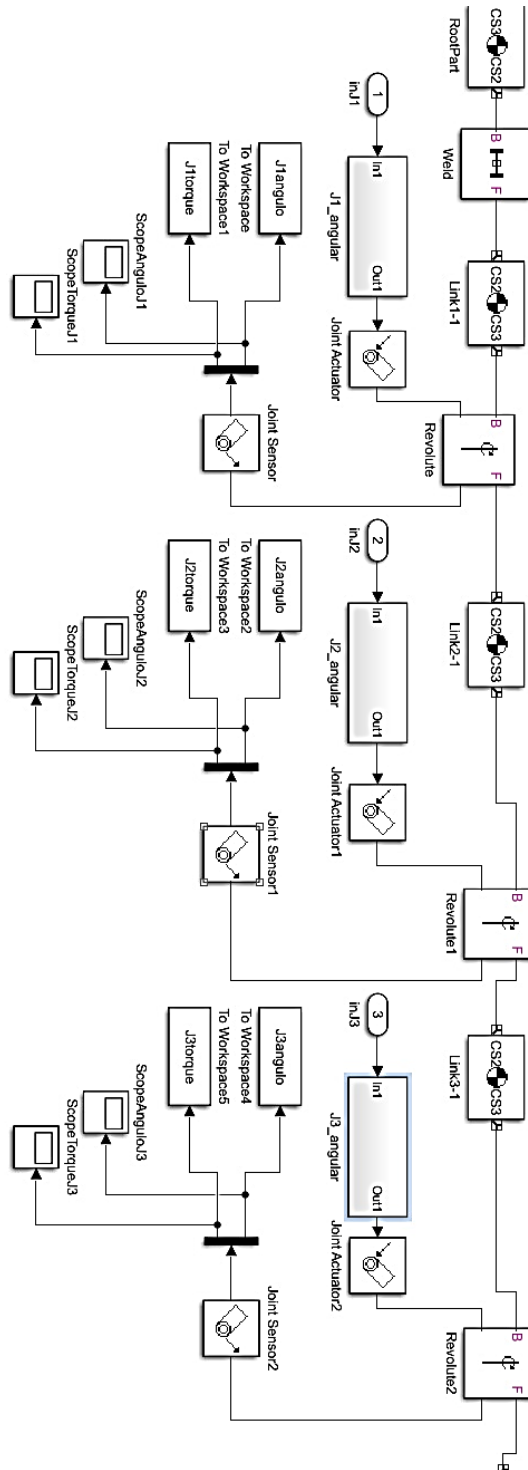
SimMechanics Mitsubishi RV-2AJ Simulink



Anexo 11: Subsistema de control de movimiento

Subsistema encargado de controlar el movimiento de las articulaciones J1, J2 y J3. Del brazo robótico Mitsubishi RV-2AJ.

Control de las articulaciones J1, J2 y J3

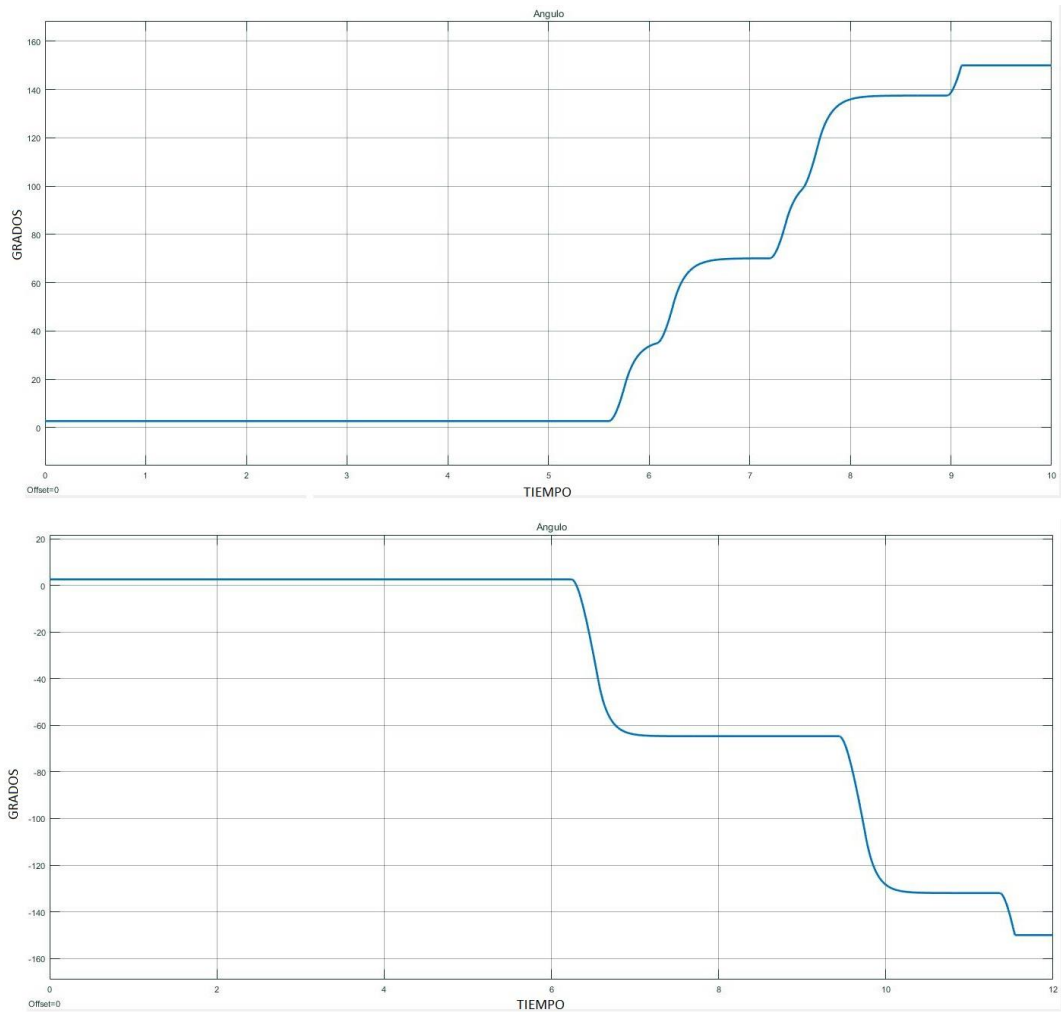


Anexo 12: Movimiento de las articulaciones

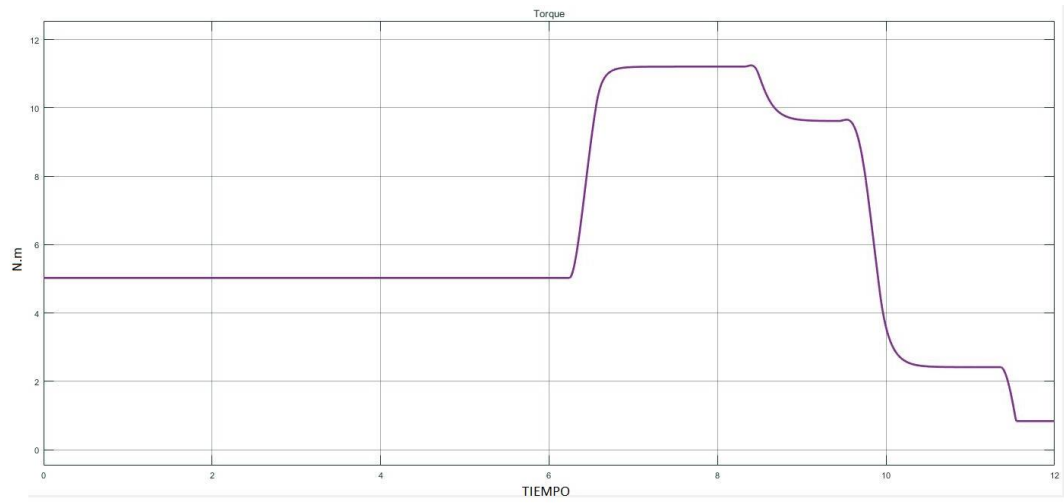
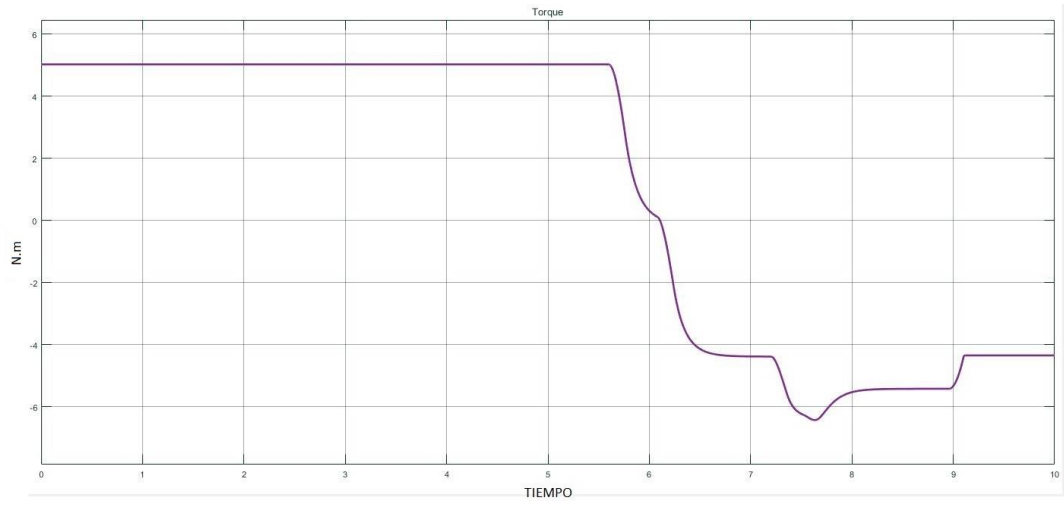
Gráficas de las articulaciones J1, J2 y J3 cuando son controladas por el sistema de seguridad electromiográfico.

El límite de movimiento de la articulación J1 es de ± 150 grados.

J1 Movimiento Angular

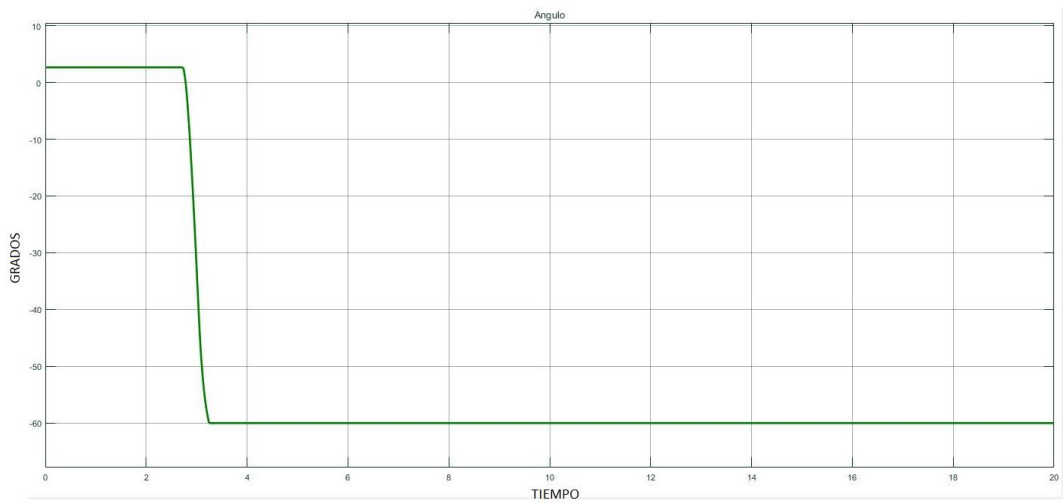
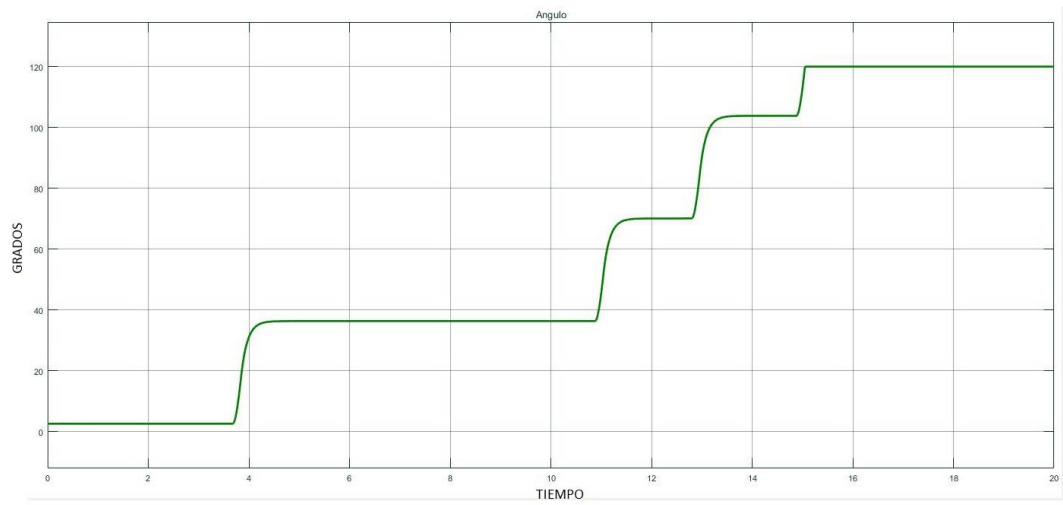


J1 Torque

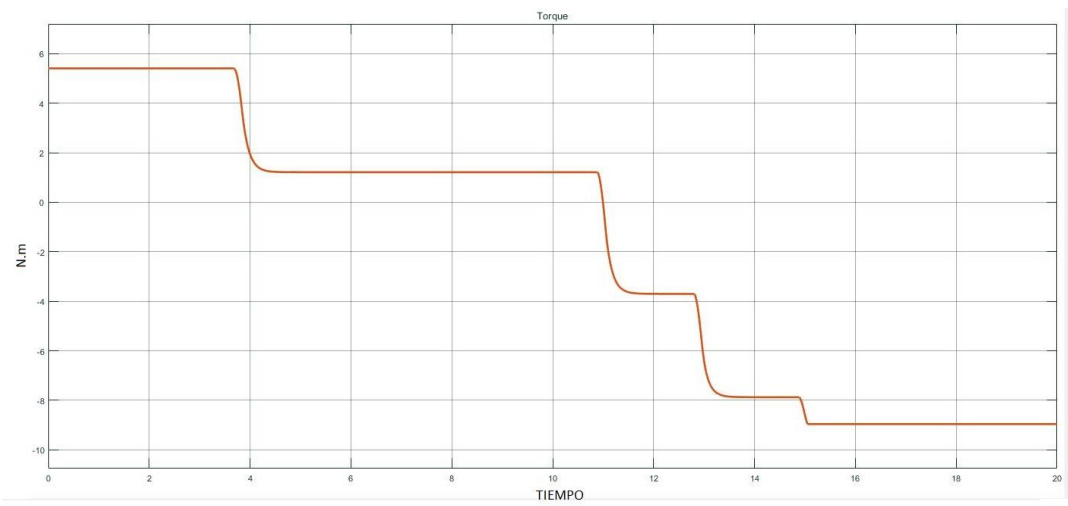
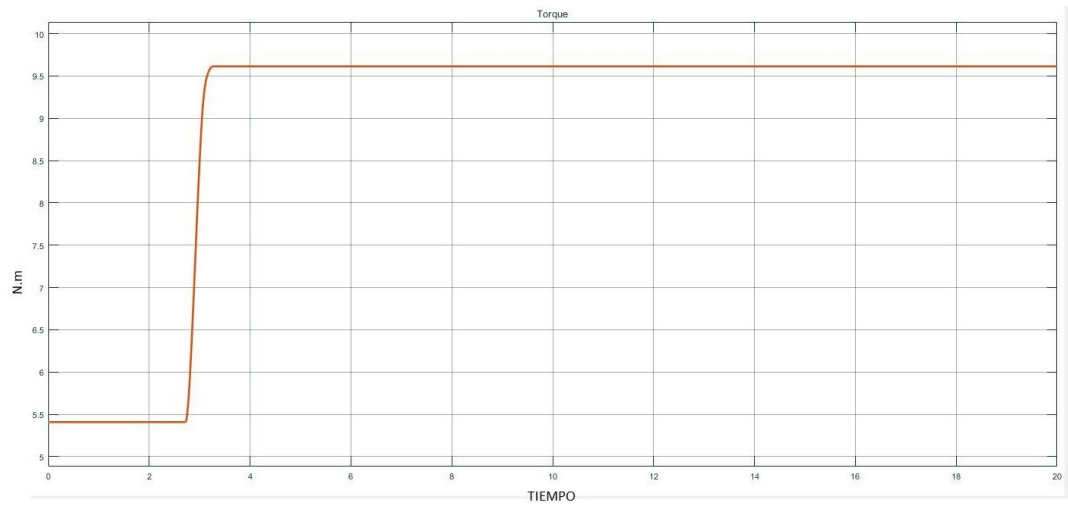


El límite de movimiento de la articulación J2 es de 80(-60~ + 120) grados.

J2 Movimiento Angular

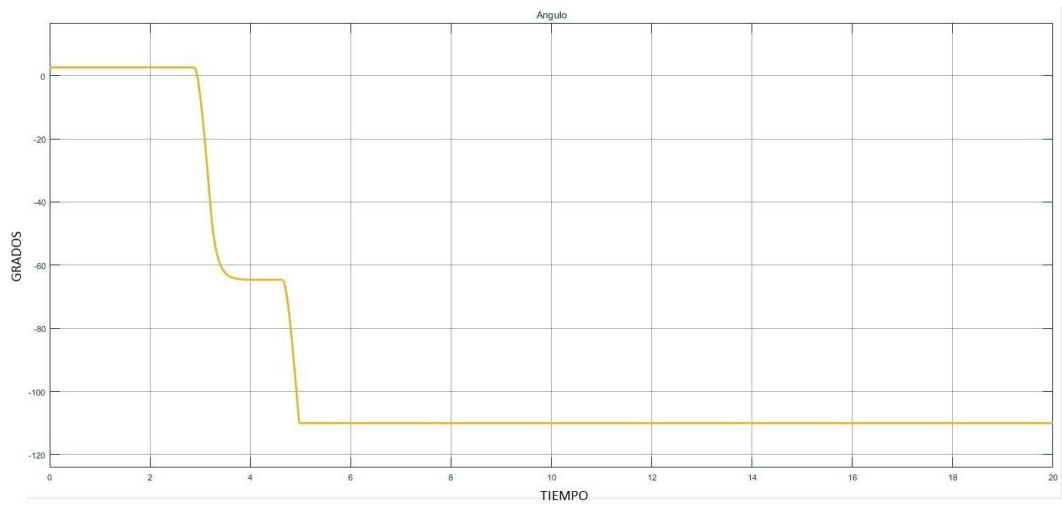
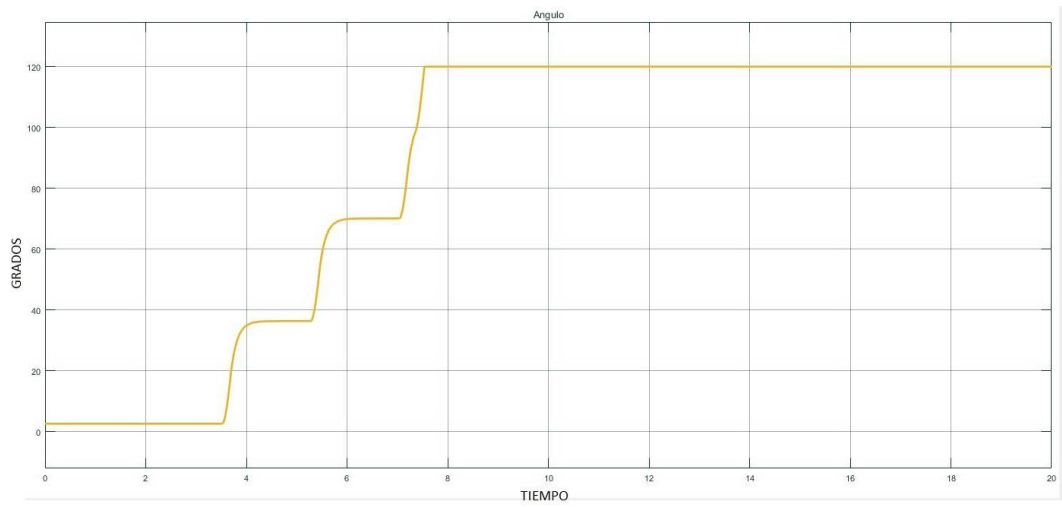


J2 Torque

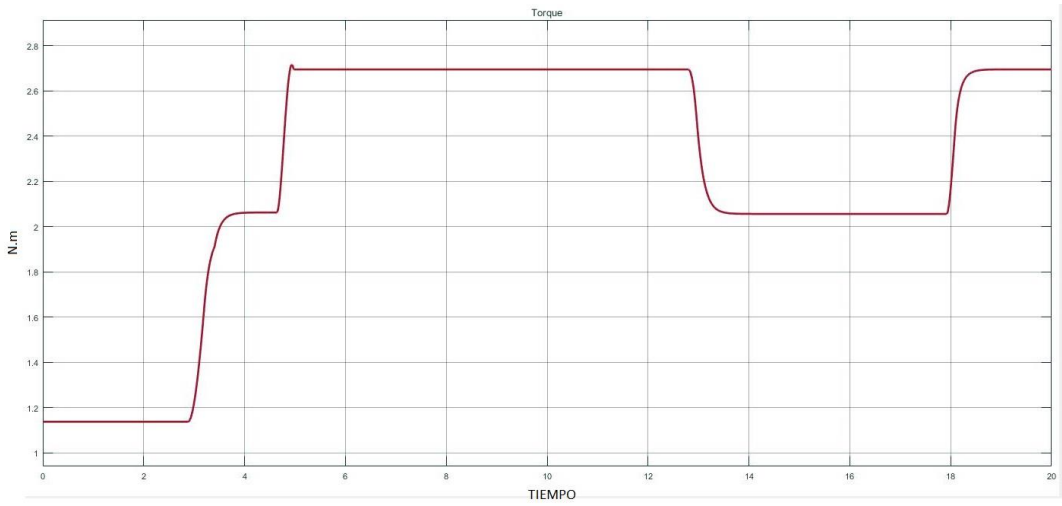
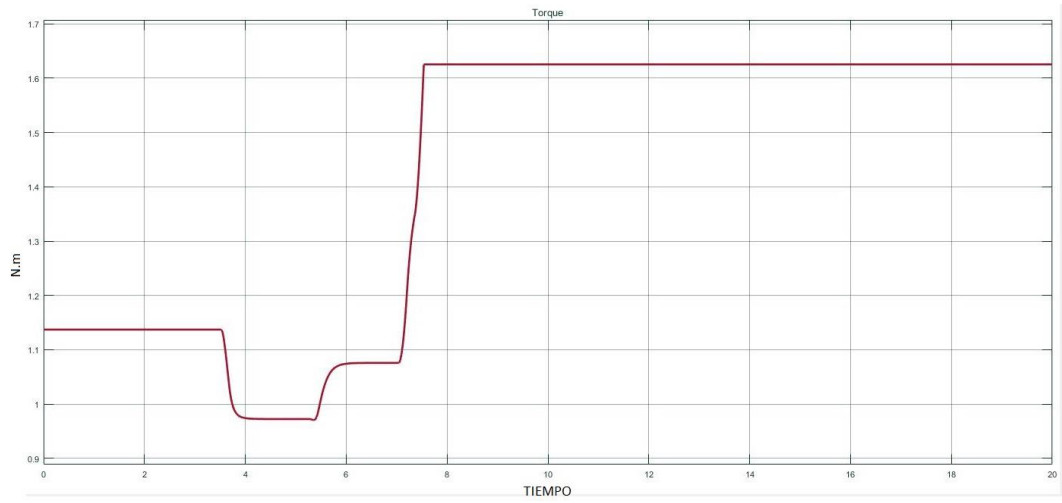


El límite de movimiento de la articulación J3 es de 230(-110~ + 120) grados.

J3 Movimiento Angular



J3 Torque



Anexo 13: Características Mitsubishi RV-2AJ

Características del brazo robótico Mitsubishi RV-2AJ

Modelo RV-2AJ		
Grados de libertad	5	
Motores	Servomotores AC (Ejes J1, J3 y J5 con freno)	
Detección de posición	Encoders absolutos	
Maxima carga (Kg)	2	
Longitud del brazo (mm)	250+160	
Alcance radial máximo (mm)	410	
Limites (grados)	J1	±150
	J2	180(-60~+120)
	J3	230 (-110~+120)
	J4	--
	J5	±90
	J6	±200
Velocidad maxima (grados/s)	J1	180
	J2	90
	J3	135
	J4	--
	J5	180
	J6	210
Velocidad maxima (mm/s)	2100	
Repetibilidad (mm)	±0.02	
Peso (Kg)	17	
Cableado	4 entradas (pinza) / 4 salidas (base)	
Conexiones aire	ø4mm x 4 en la base	
Instalacion	Suelo o techo	

