

# Diseño de un Exoesqueleto Antropomórfico de Tele-operación Maestro para la Adquisición de Datos

Néstor Sámago Sánchez, MC. Francesco García Luna, Dr. David Luviano Cruz.

**Resumen**—El objetivo principal del presente artículo es realizar el diseño de un exoesqueleto antropomórfico de tele-operación maestra enfocado en la adquisición de datos, este capta la razón de cambio, producida por el movimiento articular natural de un brazo humano, mediante el uso de sensores MPU 6050 y encoders absolutos bourns, los cuales están implantados estratégicamente en la estructura del exoesqueleto para medir. El diseño se desarrolla mediante software CAD para su visualización mediante modelado 3D y su posterior análisis estructural estático tomando en consideración elementos como la estimación de parámetros antropométricos, determinación del modelo cinemático e implementación de protocolo de comunicación antes de su proceso de manufactura para así evitar errores y retrabajos.

**Palabras clave**—Manipulador, Tele-operación, Anthropometry, Computer Science.

## Introducción

Los sistemas de tele-operación robóticos requieren la interacción entre un operador humano y un sistema robótico remoto a través de un canal de comunicación. Esta tecnología no es novedosa pues sus bases se cimentaron a finales del siglo XX mediante la adquisición de datos y replicación de movimientos del cuerpo humano a través de su procesamiento computacional en la rama de la robótica llamada Animatronic. Su investigación y desarrollo los han colocado en una línea de crecimiento considerable, teniendo así los sistemas tele-operados maestro-esclavo, quienes son los precursores de los exoesqueletos [1].

El origen de los sistemas de tele-operación tiene lugar con el nacimiento de la industria nuclear. Debido al material altamente radioactivo y que resulta peligroso tan solo estar cerca, se requería manejar dichos materiales de algún modo, de esta manera surgen los sistemas de tele-operación. En [1] incursiona en esta área realizando investigaciones pretendiendo desarrollar un manipulador para ser usado por el usuario a distancia. Para los años 50's las investigaciones permitieron llevar el sistema de un accionamiento mecánico a uno por motores y para el año 1954 se creó el primer sistema de tele-operación con un funcionamiento basado en servo controles y electricidad [2].

Debido al avance tecnológico en los 60's, la tele-operación en el campo de las maquinas submarinas se hace notar brindando dispositivos que permitirán una sensación de telepresencia mejorada. En los años 70's la tele-operación llegó a aplicaciones espaciales en los vehículos de control remoto Lunojod I y Lunojod II, logrando así la madurez de los sistemas de tele operación [2]. Por otro lado, fue hasta los años 90's cuando comenzó la adquisición de datos procesando los movimientos de una persona mediante una computadora. Esta tecnología fue impulsada por compañías como Disney Entertainment y Pixar, pero los dispositivos con que realizaban la adquisición de datos se limitaban al uso de videocámaras y trajes especiales con sensores, las grabaciones se llevaban a cabo en un cuarto con equipo e iluminación específica [3]. Como se menciona en [4], los humanos poseemos de forma natural complicados algoritmos de control que empleamos para realizar diversas tareas con múltiples condiciones y bajo un intervalo de tiempo dado. Posteriormente se dio origen al M1, el primer sistema de tele-operación en el cual un manipulador esclavo replica los movimientos realizados por el brazo del usuario mediante un sistema maestro. Por otro lado, los robots son capaces de realizar acciones donde se implique una demanda elevada de fuerza y torques, estos están limitados por su arquitectura y la potencia de sus actuadores. Bajo estas premisas ambos subsistemas dan lugar a un nuevo sistema que aprovecha las ventajas de cada uno y así podemos encontrar desarrollos como las plataformas robóticas para rehabilitación, donde encontramos los sistemas exoesqueléticos conocidos en la rama de la bio-ingeniería como prótesis activas.

Debido a que cada sensor registra de forma distinta sus lecturas, requieren ser procesadas para poder obtener los parámetros deseados y posteriormente eliminar el error que pueda existir en cada medición. Es posible diseñar un sistema de adquisición de datos utilizando sensores. Este prototipo fue desarrollado en un software CAD para su visualización mediante modelado 3D y su posterior análisis y simulación antes de su proceso de manufactura para así evitar errores y retrabajos. La realización de este prototipo se comprende de:

- Estimar los parámetros antropométricos para el diseño de los elementos.
- Determinar el modelo cinemático para considerar las articulaciones y grados de libertad con los que contará la interfaz de captura de datos.
- Diseño del manipulador contemplando los puntos anteriores para un diseño de calidad y funcional.

### Estimación de parámetros

La biomecánica estudia las fuerzas actuantes tanto internas como externas, en general la física de los organismos vivos, así como su repercusión en el cuerpo humano. [5] Estos estudios nos brindan la oportunidad de determinar los elementos necesarios como lo son: centros de gravedad, aceleración, desplazamiento articular, cabe mencionar que dentro de sus aplicaciones destacan los campos de la medicina, deportes y médica, laboral e industrial. En este artículo se presenta el diseño de un mecanismo maestro con el fin de emular las condiciones biomecánicas presentes en las articulaciones rotativas dobles del brazo, las cuales se encuentran en el plano sagital, para su posterior procesamiento y replicación en un dispositivo esclavo.

El plano sagital pertenece a la planimetría del cuerpo humano, la cual se divide en 3 planos principales los cuales se presentan en la figura 1. El plano sagital divide al cuerpo en lado derecho e izquierdo, contando con movimientos de flexión y extensión, así como un eje transversal.

El plano Coronal divide el cuerpo en frontal y posterior, cuenta con movimientos de abducción y aducción, así como un eje anteroposterior.

El plano transversal divide al cuerpo en una mitad superior e inferior contando con los movimientos rotacionales y su eje longitudinal.

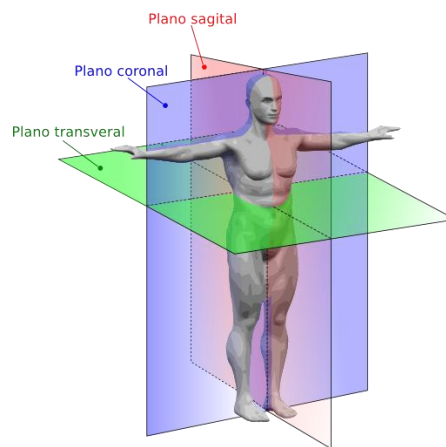


figura 1 Vista de los planos pertenecientes a la planimetría del cuerpo humano

Esto es vital para la realización del mecanismo maestro ya que se debe determinar las medidas correctas para cada articulación. Por lo que para determinar las longitudes de los eslabones del sistema se consideró un tamaño de muestra representativo del total de alumnos inscritos en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez cuya población era conocida, con una confiabilidad del 95 %. Esta muestra se conformó de 198 alumnos (46 mujeres y 153 hombres). Dichos estudiantes fueron invitados a ser parte del estudio.

A cada estudiante se le tomaron las siguientes medidas antropométricas (mostradas en la figura 2): longitud desde el hombro al codo y del codo a la muñeca. La información fue adquirida de acuerdo con los métodos estándar. [6]. Se utilizó un kit antropométrico Rosscraft Centurion para poder obtener las dimensiones y se utilizó un flexómetro para los datos de la muñeca, brazo y antebrazo.

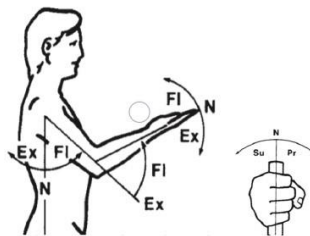


figura 2 Rango de movimiento para extremidad superior donde Ex, Fl, Su & Pr significan extensión, flexión, supinación y pronación respectivamente.

Todas las mediciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ergonomía y Métodos de la UACJ-DMCU. El objetivo de haber tomado dichas dimensiones es simular los principales movimientos de la extremidad superior. [16]:

- Hombro: Flexión/extensión.
- Codo: Flexión/extensión.
- Antebrazo: Pronación/supinación.
- Muñeca: Flexión/extensión, radial/cubital desviación.

Con el fin de obtener datos más confiables y acertados, los participantes usaron ropa ligera. La información recabada fue capturada con el fin de obtener las medidas de tendencia central, así como los percentiles. Los percentiles de los datos antropométricos nos ayudan a estimar la longitud de los links para el robot maestro, dichos percentiles se aprecian en el cuadro 1. Para calcular los percentiles se empleó la siguiente ecuación:

$$P = \mu \pm Z\sigma \tag{1}$$

Donde:

P: Percentil.

$\mu$  : Promedio de la muestra.

$\sigma$ : Desviación estándar de la muestra.

Z: Valor estándar de la distribución normal.

Cuadro 1 Percentiles de los datos antropométricos.

Dimensión Antropométrica	$\mu \pm \sigma$	P95
Longitud Hombro - codo	35;85 ± 3;48	42;12
Longitud Codo - muñeca	28;93 ± 2;07	32;7

### Modelo Cinemático.

Los movimientos del brazo humano se pueden simplificar en articulaciones rotacionales dobles, más el efector final. (mostrado en la figura 3)

1. Hombro - codo.
2. Codo - muñeca.
3. Efector final.

En este trabajo se consideró un manipulador de 3 grados de libertad con uniones rotacionales rígidas. (mostrado en la figura 4). Donde:

l2: link 2 (hombro - codo).

l3: link 3 (codo - muñeca).

qi: Unión articular.

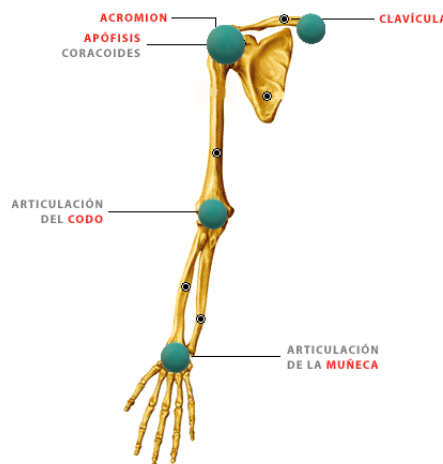


figura 3 Puntos claves mostrados en azul, en donde podemos encontrar la ubicación de las articulaciones duales y el efector final.

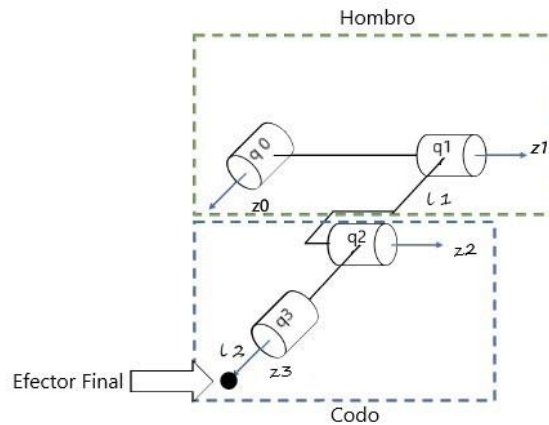


figura 4 Esquema del manipulador mostrando el ángulo  $z_i$  la ubicación de la unión  $q_i$ , y la posición del efector final.

### Sensores.

Los sensores forman parte crucial para el diseño final del mecanismo maestro ya que su ubicación en el diseño repercute en la realización de este, esto con el fin de lograr una medición con la mínima presencia de error. Se implementaron 2 tipos de sensores para la captación del movimiento articular los cuales se aprecian en la figura 5.

- IMU MPU 6050.
- ENCODER ABSOLUTO ECW1J Bourns.

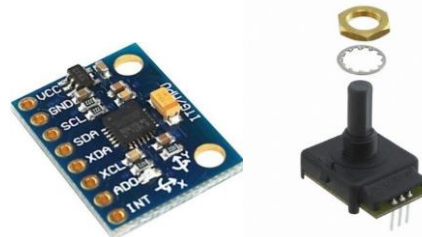


figura 5 IMU (ITG/MPU 6050) Empleada para captura de movimientos y transmitirlos a la placa Arduino(izquierda).

Encoder absoluto ECW1J marca Bourns (derecha) utilizado para sensar la apertura angular de los movimientos pronación- supinación y extensión – flexión.

El módulo MPU 6050 es un doble sensor el cual presenta tanto un giroscopio como un acelerómetro de 6 ejes para la obtención de datos de los ejes (x, y, z) así como los 3 ejes de movimiento (Roll, Pitch, Yaw). Por las propiedades de este sensor se ha utilizado en aplicaciones desde smartphones hasta en sistemas de navegación. El giroscopio es el elemento encargado de la medición de la rotación. Cuenta en su interior con una masa de resonancia en conjunto de unos soportes y un módulo capacitivo el cual produce una tensión en relación con el movimiento angular producido, dicha tensión es la que se procesará de forma digital para poder medirla. Esto lo contiene para cada uno de sus ejes, x, y, z. El acelerómetro cuenta también con 3 sensores internos capacitivos situados en cada uno de sus ejes. Estos detectan la diferencia producida por la aceleración entre una referencia fija y una móvil Por su fácil implantación con Arduino al ser una plataforma libre es que este módulo fue seleccionado, así como por sus características descritas. Los pines del módulo serán conectados con Arduino de la siguiente manera:

- SDA - Señal analógica.
- SCL - Señal analógica.
- VCC - 3.3V.
- GND - GND.
- GND - AD0 (Dirección cero).
- INT - Pin de interrupción PWM.

El encoder posee un accionamiento mecánico un tanto similar a un potenciómetro. Funciona mediante una activación en sus salidas lo que le permite determinar el sentido del giro. Cabe mencionar que el Encoder por sí solo no podría funcionar, por lo que se apoya de un microcontrolador, en este caso, el ATmega de Arduino. Sus principales ventajas son:

- Por ser accionado mecánicamente con una salida digital y con una correcta instalación, tendrá siempre una medición correcta.
- Su precisión está en relación con el código desarrollado por lo que es controlable.

### **Diseño del Sistema Maestro.**

El diseño del sistema de adquisición de datos maestro fue un proceso de etapas enfocadas al mejoramiento basándose en los temas anteriormente presentados en este artículo, así como contemplando 3 ejes importantes como lo son:

- Emulación de las articulaciones biomecánicas.
- Adquisición de los datos en cada grado de libertad correspondiente.
- Comodidad del Operario.

Esto nos permitirá un diseño más eficaz con un margen de error reducido al planificarlo de la siguiente forma:

- Planteamiento del problema: En esta etapa se contemplan las características que debe contener el mecanismo en relación con los objetivos de adquisición de datos planteados.
- Diseño base: Se pone en marcha la realización de los elementos CAD que se ensamblarán posteriormente.
- Cada elemento debe ser realizado bajo la premisa de los 3 ejes anteriormente postulados.

Se investigaron y analizaron las diferentes topologías y, ya que nuestro sistema maestro se centra en la adquisición de datos antropomórfico y con el planteamiento del problema definido, se elige la topología de tipo Antropomórfica. Esta topología pretende ser igual a la humana enfocándose en parámetros como lo son las cadenas cinemáticas, relaciones de posición, grados de libertad. El diseño radica en un exoesqueleto pasivo el cual debe reducir los riesgos de interferencia entre el sistema y el cuerpo. La implantación de una topología antropomórfica minimiza considerablemente elementos del diseño. Cuenta con un mecanismo capaz de proporcionar libertad de movimiento en las articulaciones duales rotativas:

- Clavícula - hombro.
- Hombro - Codo.
- Codo - muñeca.

### **Resumen de resultados**

El diseño fue realizado en Solidworks para poder elaborar posteriormente un prototipo funcional de la extremidad superior contemplando cada uno de los elementos mostrados en la etapa del diseño. La vista isométrica completa del sistema de adquisición de datos se aprecia en la figura 6, en la figura 7 se observa la vista de frente del sistema, así como la similitud con el brazo humano.



figura 6 Vista Isométrica del Sistema de adquisición de datos



figura 7 Apertura del hombro visto desde la vista frontal.

Se añadieron straps de velcro los cuales tienen como objetivo el ajuste del mecanismo al brazo, si bien, como se mencionó anteriormente, se hizo un estudio antropométrico con el fin de estandarizar las medidas de cada elemento, no obstante, es necesario ajustar en referencia a cada operador que utilice el sistema. Al ser estos straps elaborados con velcro, permiten un método funcional y económico, da la apariencia de un diseño sencillo por lo que no representa un peso adicional considerable, esto sin mencionar la facilidad con la que se ajusta el velcro pasando por la hebilla y pegándose a su contraparte.

### Conclusiones

De acorde a la simulación realizada, parece ser el prototipo es funcional y no representa conflicto alguno en sus ensamblajes por lo que no se aprecia inconveniente para su proceso de manufactura. Los sensores fueron probados independientemente funcionando de manera correcta.

### Referencias

- [1] A. Guerrero and P. J. Ramos Giraldo, "Low cost embedded system for machine vision," *Scientia Et Technica*, vol. 19, pp. 163–173, 2014.
- [2] S. Alfaro Ballesteros, "Sistema de tele-operación mediante una interfaz natural de usuario." Repositorio institucional de la Universidad Carlos III de Madrid., p. 164, 2012.
- [3] R. Gutierrez and C. Hernández Rodríguez, "Construcción de un sistema de lectura del movimiento mecánico humano para sureplica ajustada a un prototipo de brazo robótico," *Universita Ciencia. Revista Electrónica de Investigación de la Universidad de Xalapa*, vol. 3, p. 24, 2014.
- [4] J. Grosso and D. A. Tibađuiza Burgos, "Diseño y validación de un exoesqueleto maestro-esclavo para rehabilitación de piernas." Researchgate, pp. 1–7, 2008.
- [5] C. Hugo, "Diseño mecatrónico de un robot esqueleto de extremidad superior para rehabilitación de personas con discapacidad parcial en el codo," *Universidad de Santo Tomás - División de Ingenierías*, vol. 1, p. 108, 2016.
- [6] M. R and S. K, *Lehrbuch de Anthropologia*, 1957.
- [7] P. Stephen, *Bodyspace. Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*. Taylor and Francis, 2003.
- [8] G. B. K. García Luna Francesco, "Simulation of a master-slave tele-operated system for people with muscular atrophy in upper limbs." *Foundations, Research and Spread of Emerging Technologies in Computing Sciences*, vol. 1, p. 5, 2017.
- [9] B. J. Valdez Jonathan, "Understanding the i2c bus," *Texas Instruments Incorporated*, vol. 1, p. 7, 2015.
- [10] X. Z. Yudong Guan, L. Y. Shen Wang, and X. Chen, "The application of scm embedded with bluetooth protocol in wireless data transmission," *Harbin Institute of Technology*, vol. 1, p. 3, 2005.
- [11] A. P. F. Martín, "Wireless personal area network (wpan) and home networking," *Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Departamento de Ingeniería Electrónica.*, vol. 1, p. 180, 2003.