

Análisis Cinemático de un Exoesqueleto de Partes Superiores de 7 GDL

Elkin Veslin, Jules Ghislain Slama, Max Suell Dutra, Omar Lengerke

Abstract—Actualmente algunas de las aplicaciones de los exoesqueletos de partes superiores son la rehabilitación y la amplificación de las habilidades del brazo humano. Nuestro estudio se enfoca en las aplicaciones de rehabilitación, en las cuales se busca restaurar las funciones de los miembros atrofiados. Como etapa esencial en el entendimiento de la movilidad del brazo, está el análisis cinemático, análisis hecho a partir de las mismas teorías que envuelven el estudio de actuadores robóticos industriales. Este estudio es la base para el objetivo final de una primera etapa: determinar del espacio de trabajo del brazo humano teniendo en cuenta los rangos de movilidad en las articulaciones a los cuales un exoesqueleto estaría sometido. Para este análisis se consideró un modelo de 7 GDL que describe los movimientos y las restricciones de cada una de las articulaciones del brazo (hombro, codo y muñeca) y con él se define el alcance real que tiene la muñeca a través del espacio de trabajo del sistema. Gráficas y conclusiones acompañan este documento.

Palabras clave —brazo humano, espacio de trabajo, exoesqueleto, modelo cinemático, movilidad.

I. INTRODUCCIÓN

LOS exoesqueletos de partes superiores forman parte de un grupo de sistemas robóticos denominados EXOESQUELETOS, que a su vez hace parte de un grupo denominado *Wearable Robots* (Robots de vestir), estos son sistemas robóticos que visten el cuerpo humano para cumplir funciones específicas. Estas funciones los catalogan en los siguientes subgrupos: ROBOTS ORTÓPTICOS, que son sistemas cuya función es reemplazar las funciones un miembro perdido, ROBOTS PROSTÉTICOS, cuya función es la de rehabilitar un miembro que se encuentra atrofiado, sea por un accidente o por una deficiencia patológica, y finalmente, los ROBOTS EXTENSORES [1] cuya función es la de aumentar las habilidades del miembro al que está unido, esta habilidades esta relacionada con la fuerza.

Investigadores como Kazerooni [2], prefieren dividir el estudio de los exoesqueletos en dos partes, en la primera, están los sistemas unidos a los brazos, denominados, exoesqueletos de partes superiores, y tema del cual esta enfocado este documento, y finalmente están aquellos sistemas que están

unidos a las piernas, denominados exoesqueletos de partes inferiores. De esta forma es posible visionar muchas aplicaciones para cada sistema por separado, enfatizando además, en que el exoesqueleto está en sus etapas iniciales y se necesitan fuertes investigaciones para asegurarse que ambos sistemas trabajen en óptimas condiciones por separado, para poder así, hacer una integración de ambos, como se ha visto en otros trabajos donde se aprecia una integración de ambos sistemas.

Pons [3], define a una exoesqueleto como un sistema biomecatrónico, donde el mecanismo está adaptado a la estructura física del cuerpo humano, con un control que puede provenir de las mismas señales del cerebro, con sensores conectados a la piel humana y con actuadores que son analógicos a las funciones del cuerpo, todos estos elementos pueden actuar como un solo sistema integrado que puede desarrollar variadas actividades.

Desde su concepción hace más de 60 años [4], las aplicaciones potenciales de los exoesqueletos de partes superiores están enfocadas en: recuperaciones terapéuticas [5],[6], como sistema de asistencia para labores de amplificación de la fuerza humana [7], como dispositivo háptico para simulaciones virtuales [8],[9] y como dispositivo maestro para procesos de teleoperación [10]. Además, de estos trabajos mencionados, existen más documentos relacionados con los exoesqueletos o *Wearable Robots*, todos estos trabajos pueden ser clasificados dentro de las tres áreas enunciadas.

El diseño mecánico de sistemas exoesqueletos están inspirados en el estudio de los sistemas biológicos, en particular del cuerpo humano, buscando de esta forma, la interacción robot y humano, donde se busca crear sistemas que sean obedientes a los movimientos del cuerpo, este estudio implica la obtención de un modelo que permita predecir el comportamiento del sistema. Otra necesidad radica en que estas inspiraciones biológicas permiten la creación de sistemas mecánicos más compactos y confiables y por supuesto, energéticamente viables [2].

Así, como parte esencial en el entendimiento de la movilidad del brazo, está el análisis cinemático, análisis hecho a partir de las mismas teorías que envuelven el estudio de actuadores robóticos industriales. Este estudio es la base para el objetivo final de una primera etapa: determinar del espacio de trabajo del brazo humano teniendo en cuenta los rangos de movilidad en las articulaciones a los cuales un exoesqueleto estaría sometido. Para este análisis se consideró un modelo de

7 GDL que describe los movimientos y las restricciones de cada una de las articulaciones del brazo (hombro, codo y muñeca) y con él se define el alcance real que tiene la muñeca a través del espacio de trabajo del sistema.

En este documento, se describe el estudio cinemático de un exoesqueleto de partes superiores, con un modelo propuesto. En la sección II, se describe el acercamiento cinemático a través de las consideraciones morfológicas y matemáticas que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del este estudio. En la sección III, se aplicará el análisis cinemático para elaborar el espacio de trabajo del sistema propuesto, y finalmente, en la sección IV, se presentarán las conclusiones finales y próximos trabajos a desarrollar.

II. EN LA CINEMÁTICA DIRECTA

A. Análisis morfológico

En la naturaleza, los diseños biológicos de los organismos vivos permiten la adaptabilidad en el entorno, sea este una selva o un desierto, los mecanismos de la evolución han realizado transformaciones en el cuerpo de los seres vivos según sean las circunstancias, de ahí, la diversidad de diseños existentes y también, la extinción de aquellas especies que no se pudieron adaptar al entorno. Se puede hablar entonces, que existe un mecanismo de optimización que está transformando nuestra estructura en función de una meta, la supervivencia.

El buen diseño de un exoesqueleto debe tener en cuenta el sistema con el que va a interactuar, en la naturaleza, los sistemas biológicos tienen sus propios actuadores y sistemas de control, generalmente mas complejos que las de los mismos robots, y por esta complejidad, es preciso hacer simplificaciones en varios aspectos, conservando las características generales del sistema, este proceso de copiar diseños de la naturaleza, se llama bioimitación [3].

Este concepto es clave para dar entrada a el estudio cinemático del exoesqueleto de partes superiores. Se inicia con el objetivo de querer entender el funcionamiento del brazo al que va a estar ligado. De esta forma, esta primera parte se enfoca en el estudio la morfología del sistema humano, para aplicar luego en ellas las herramientas matemáticas para su modelamiento. Así, obtenemos un modelo matemático reducido y analógico al modelo real.

En nuestro cuerpo, el brazo es la extremidad superior que va desde el hombro hasta la punta de los dedos, este miembro está dividido en tres segmentos: el brazo, el antebrazo y la mano. El brazo está unido al cuerpo con el hombro y al antebrazo a por el codo, mientras que el antebrazo está unido a la mano por la muñeca.

El análisis cinemático, es efectuado a partir de la estructura ósea que compone el brazo. El miembro completo está ligado al cuerpo a través de la clavícula y el omoplato, la estructura ósea del brazo está conformada por el húmero, en el antebrazo por el radio y la ulna, y en la mano por las falanges y el metacarpo.

De acuerdo con Pons [3], para el estudio del brazo toda la

mano es considerada como un solo segmento, de esta forma, al estructura del brazo es simplificada en tres segmentos unidos entre ellos por la juntas y unidos al cuerpo a través del hombro. Dado las características del sistema que se está estudiando, es preciso tener en cuenta varias consideraciones, enunciadas por Rocon [11] en su trabajo:

--Primero, el comportamiento mecánico del brazo es independiente del resto de cuerpo.

--Segundo, todos los componentes de cada segmento, incluidos los huesos y las partes suaves forman parte del mismo cuerpo rígido.

--Tercero, las deformaciones de las partes suaves (músculos, piel, etc.) no afectan significativamente las propiedades mecánicas de todo el segmento.

La distancia de los segmentos se considera constante, y depende de la altura del individuo a través de una relación numérica, estos valores fueron registrados por Pons[3] y se pueden apreciar en la siguiente tabla.

Definidos los segmentos, es preciso también definir los grados de libertad de cada una de las juntas, las cuales, dependiendo del número de movimientos pueden ser uni, bi o multiaxiales [12], es decir, permiten movimientos en un, dos o tres grados de libertad y planos oblicuos generados por la rotación de los segmentos. Todas las juntas son consideradas ideales [11].

TABLA I
LONGITUD DE LOS SEGMENTOS

Segmento	Distancia
Brazo(l_1)	0.186 H
Antebrazo(l_2)	0.146 H
Mano(l_3)	0.108 H

H= altura del cuerpo en centímetros.

La primera junta del brazo es el hombro, su morfología es comparada con la de una junta esférica la cual permite el movimiento en tres grados de libertad, así, acorde a la definición en [12], el hombro es considerado una junta multiaxial. Los nombres de los movimientos que realiza esta junta son:

1) *Flexión-Extensión*: es el movimiento que lleva al bíceps para al frente o para atrás del plano frontal del cuerpo, el rango de movimientos va de 130° a 180° para la flexión, mientras que para la extensión va de 30° a 80° .

2) *Abducción- Aducción*: es el movimiento que lleva el brazo hacia o fuera de la línea media del cuerpo, el hombro puede alcanzar 180° de abducción, pero sólo 50° de aducción.

2) *Circundición*: es el movimiento realizado alrededor del húmero. La rotación puede ser interna con movimientos que van desde los 60° hasta los 90° , o externa donde alcanza los 90°

La segunda junta del sistema es el codo. El codo es considerado como una junta uniaxial ya que solo permite movimientos en un solo plano, igual a una bisagra, pero el segmento del antebrazo unido a la muñeca, puede girar en torno de su propio eje, siendo así, que el movimiento que no es propio de la junta sino del segmento, Esta rotación no afecta al

posición de la mano, mas si su orientación, por lo que algunos autores gustan de trasladar esta rotación hacia la muñeca para simplificar los estudios de la cinemática inversa [13], en este estudio se considerara esta rotación en el hombro [3]. Para concluir, los movimientos del codo son:

1) *Flexión-Extensión*: es el movimiento alrededor del eje transversal que permite a la palma de la mano acercarse o alejarse del brazo, la palma puede alcanzar una inclinación de 140° .

2) *Pronación- Supinación*: es la rotación alrededor del eje del antebrazo. La pronación es el movimiento que lleva la palma de la mano para bajo de los pulgares, con una rotación de hasta 80° , mientras que la supinación lleva la mano para afuera, con un ángulo máximo de 80° .

La última junta es la muñeca, que conecta la mano con el antebrazo, de acuerdo al modelo, la mano puede ser biaxial o multiaxial, para este análisis se considera el primer tipo de modelo, los movimientos que describen esta junta son:

1) *Flexión-Extensión*: es el movimiento alrededor del eje transversal que permite a la palma de la mano acercarse o alejarse del antebrazo, la palma puede alcanzar una inclinación de 90° .

2) *Abducción- Aducción*: es el movimiento alrededor del eje antero-posterior que mueve la mano hasta la ulna (abducción), o hasta el radio (aducción), los ángulos van desde los 30° o 40° para abducción y 15° para aducción.

La mano es considerada una extensión rígida del antebrazo, partiendo de la suposición que los movimientos de ella no tienen un efecto significativo en el miembro completo [11], esto es necesario para determinar un equivalente de cuerpo rígido en el segmento e así facilitar el análisis.

Todos estos movimientos son descritos en la Figura 1.

B. Modelamiento matemático.

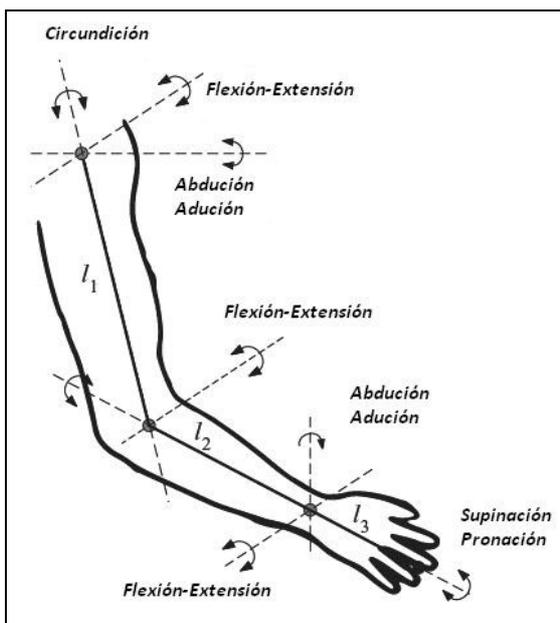


Fig. 1. Descripción gráfica de los movimientos del brazo, imagen extraída del libro, *Wearable Robots: Biomechatronical Exoskeleton*, J. L. Pons, 2005.

Para describir la posición de las partes del brazo en función de las rotaciones de sus grados de libertad, se integra el análisis de los movimientos hecho en la sección A, con los conceptos conocidos de robótica clásica, en este caso, a través del método de las matrices de transformaciones homogéneas [19], (1-3) describe las rotaciones en torno de los tres ejes X, Y y Z, mientras que (4) describe las traslaciones en cualquiera de los ejes.

$$R_z(\beta) = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\text{sen} \beta & 0 & 0 \\ \text{sen} \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_y(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & \text{sen} \alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen} \alpha & 0 & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_x(\gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\text{sen} \gamma & 0 \\ 0 & \text{sen} \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

En (4), es preciso definir en cual, o cuales ejes se va a efectuar el movimiento de translación.

Según Pons [3], un modelo simplificado que describe la cinemática del brazo y se ajusta a las necesidades de obediencia y ergonomía del mismo, es un modelo compuesto por 7 grados de libertad, este estaría conformado por tres grados de libertad en el hombro, dos grados de libertad en el codo y dos grados de libertad en la muñeca. Este modelo ha sido adoptado por autores como M. Benati [14], C. Carignan [5] y J. Perry [15] en sus trabajos de análisis cinemático. Otros modelos adicionan más grados de libertad en el hombro, aumentado a 5, pero terminan ignorando los movimientos que son efectuados por la mano, tal es el caso de Wood [16], y otros que, contrariamente, los tienen en cuenta como Engin [17] y Schiele [18]. Obsérvese que los estudios mas recientes adoptan estructuras más complejas para su estudio, obedeciendo a conceptos de ergonomía ligados a la comodidad y obediencia en el movimiento brazo-robot. Este adoptará el modelo definido por Pons [3].

Para efectos de análisis, el modelo cinemático del brazo, obedece a una cadena cinemática abierta, ya que solo existe un secuencia de juntas unidas, conectando los dos finales de la cadena [19].

Como primer paso, se definen los ejes en los que se llevarán a cabo cada uno de los movimientos descritos en la sección A (ver Figura 2), a cada movimiento se le es asociado un símbolo

y una orientación con respecto al marco de referencia ilustrado. Así, todos los movimientos de flexión-extensión suceden en torno del eje Y, los movimientos de rotación en torno del hueso alrededor de Z, y los restante alrededor del eje X. En el hombro tenemos un caso especial, donde tres rotaciones interactúan en torno del mismo punto sin existir un desplazamiento, este tipo de configuración es denominado puño esférico. Todos los desplazamientos referentes a las distancias de los segmentos (l_1, l_2 y l_3) ocurren en el eje Z, mas por la orientación del sistema son desplazamientos negativos.

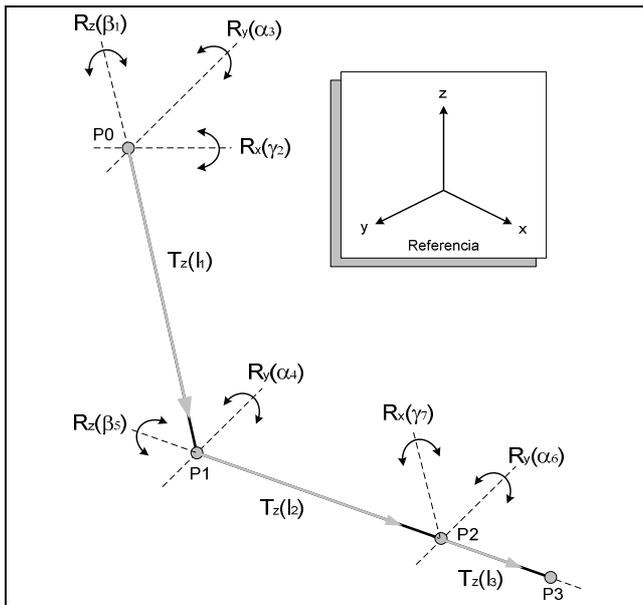


Fig. 2. Descripción de las transformaciones a lo largo del sistema.

Existen cuatro puntos de referencia (P0, P1, P2 y P3) determinados en la Figura 2, ellos definirán el recorrido a través del sistema, el conjunto de ecuaciones (5) describen el número y tipo de transformaciones que se dan desde el origen (P0), localizado en el hombro, hasta cada uno de los puntos de referencia (P1, P2 Y P3). De esta forma, la matriz de transformaciones resultante, definirá la posición en XYZ y la orientación con respecto al origen (P0) de cada uno de los finales de segmento.

$$\begin{aligned} T_0^1(\beta_1, \alpha_2, \gamma_3) &= R_y(\alpha_2)R_x(\gamma_3)R_z(\beta_1)T_z(l_1) \\ T_0^2(\beta_1, \alpha_2, \gamma_3, \alpha_4, \beta_5) &= T_0^1R_y(\alpha_4)R_z(\beta_5)T_z(l_2) \\ T_0^3(\beta_1, \alpha_2, \gamma_3, \alpha_4, \beta_5, \alpha_6, \gamma_7) &= T_0^2R_y(\alpha_6)R_x(\gamma_7) \end{aligned} \quad (5)$$

Después de varias pruebas, se llegó a la conclusión que el mejor modelo que describe los movimientos en el hombro (T_0^1) está basado en una combinación de rotaciones de tipo YXZ, de esta forma, el primer movimiento que se da es el de flexión-extensión, luego abducción-aducción, para finalmente concluir con la circunducción. Esta selección obedece a criterios de movimiento y de cómo a través de las multiplicaciones consecutivas de las matrices homogéneas la orientación

resultante final afecta la visualización y la posición final de un punto, una respuesta mas natural, permite observar un mejor desempeño y obtener un análisis más claro de lo que acontece a través de la variación de los ángulos en cada una de las juntas.

El análisis es compatible para ambos brazos, pero es importante observar el signo de los ángulos para cada uno de los movimientos ya que a pesar de ser análogos, tienen orientaciones diferentes, también, acorde a los parámetros establecidos por las matrices de transformación homogénea, se estandariza toda rotación contraria a las manecillas del reloj como positiva.

Este modelo matemático fue implementado en MATLAB®, de esta forma, se obtiene un análisis gráfico para así observar el comportamiento del sistema a partir de los valores asignados. La figura 3 ilustra un primer ejemplo, donde el sistema se encuentra en la posición anatómica. Todos las juntas están posicionadas en el origen, es decir, tienen una rotación de 0° o 0 radianes. Las tres barras representan los segmentos del conjunto del brazo, la figura triangular es el cuerpo, y la esfera la cabeza humana. Todas las pruebas se hicieron para un individuo con una altura de 175 cm.

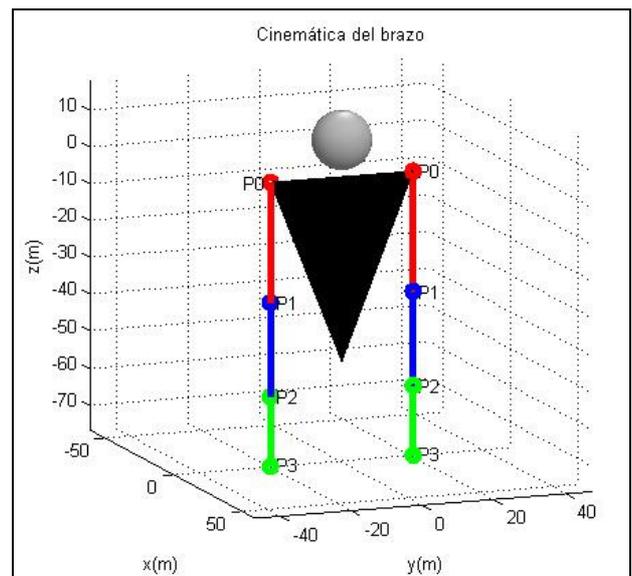


Fig. 3. Exoesqueleto en posición anatómica, con todos los ángulos de las juntas a un valor de 0° .

El conjunto de ilustraciones 4-7, muestra diferentes posiciones del sistema, acorde con las restricciones anatómicas mencionadas en el inciso A para diferentes valores de los ángulos de rotación. Estas restricciones físicas establecen los rangos de trabajo y las distancias máximas en las que los miembros se pueden mover, el estudio de estos movimientos y sus restricciones permiten la determinación del espacio de trabajo, que es el volumen dentro del cual todos los movimientos posibles de un sistema robótico están contenidos, y que será el trabajo descrito en el inciso III.

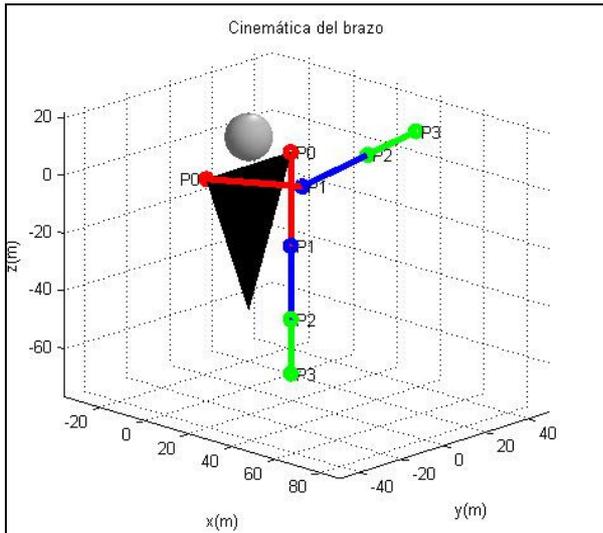


Fig. 4. Movimiento del brazo derecho del sistema. Con rotaciones a nivel del hombro en los ejes X y Y.

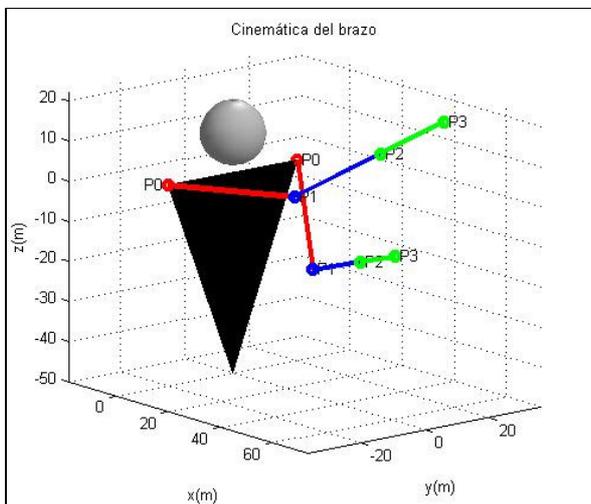


Fig. 5. Rotación de ambos brazos, con movimiento de flexión en ambos codos.

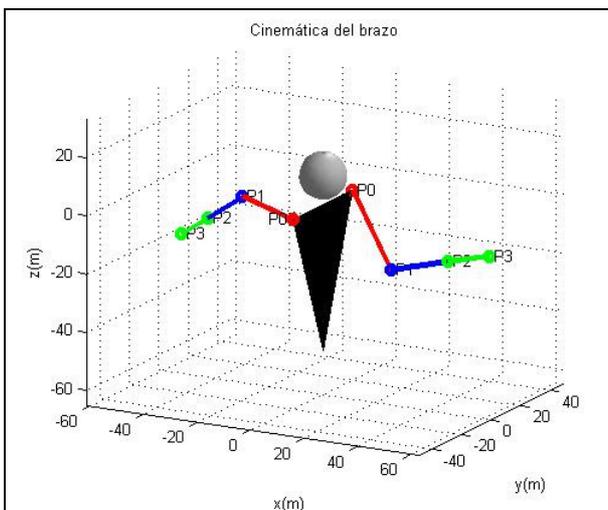


Fig. 6. Rotación de los brazos a través de los planos del cuerpo.

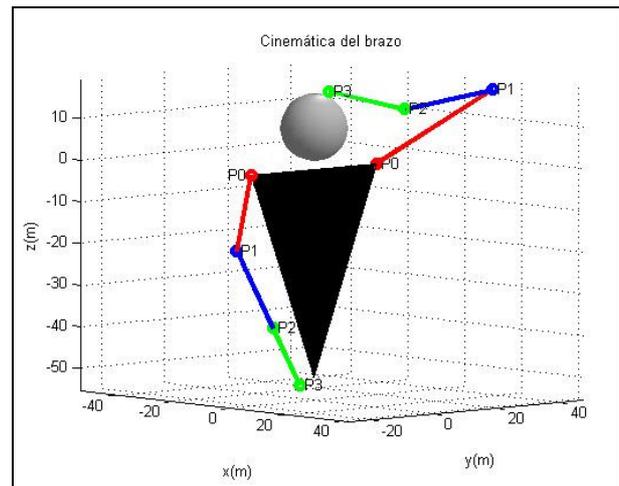


Fig. 7. Rotación de la mano izquierda y rotación del brazo derecho hacia la parte posterior del cuerpo.

III. ESPACIO DE TRABAJO

Las propiedades del espacio de trabajo representan un importante criterio en la validación, programación y diseño de manipuladores mecánicos, robots y otros dispositivos. A través del análisis del espacio de trabajo del brazo humano, es posible obtener información tanto para el diseño y control de los mecanismos, como también, para tener un entendimiento de las propiedades de movimiento en función de las distancias del brazo.

Existen una gran variedad de aplicaciones que motivan el análisis del espacio de trabajo. Una comparación de los espacios de trabajo entre distintos modelos de manipuladores ofrece una herramienta para el diseño y la comparación de las capacidades de un sistema robótico. En el caso del cuerpo humano, el estudio del espacio de trabajo permite definir el planeamiento y control de procesos de rehabilitación, comparando el espacio de trabajo de un sujeto normal, con los de una persona con deficiencias patológicas, las diferencias existentes pueden ser aplicadas para estudios de diagnóstico [20].

El programa realizado para el análisis de la cinemática directa, se convierte en una herramienta útil para definir el espacio de trabajo; teniendo en cuenta las restricciones de movimiento en las juntas, se realizarán movimientos a través de todos los ángulos disponibles. El volumen del espacio de trabajo, será definido con la posición de la muñeca [20], [21], de esta forma podemos determinar el alcance que se tiene a lo largo de todos los movimientos posibles y almacenar la posición final resultante.

Los movimientos de flexión y extensión, como también los de abducción y aducción de la mano, no son tenidos en cuenta para este estudio, de la misma forma que el movimiento de rotación que ocurre en el antebrazo, la razón es que estos giros no modifican el alcance que puede tener el pulso [20], así que sus variaciones se pueden considerar despreciables.

De esta forma, todo el estudio del espacio de trabajo se basará en los tres movimientos del hombro y el movimiento de

flexión del codo. Para propósitos de la toma de puntos, el brazo se moverá primero con giros de abducción-aducción, seguido por movimientos de flexión-extensión y finalmente rotación de codo. Pero, se observa que con otras combinaciones de movimiento del brazo pueden alcanzar las mismas posiciones del pulso [21]. Igual que en el apartado anterior, todo el análisis se realizó a partir de un sujeto con una altura de 175 cm.

La figura 8 ilustra el recorrido efectuado por el brazo derecho alrededor de la una misma altura en el hombro, la figura descrita es una circunferencia con radio igual a la sumatoria de la extensión del brazo (l_1) y el antebrazo (l_2). Finalmente el movimiento de flexión en el codo abarca el último espacio posible de translación para el sistema.

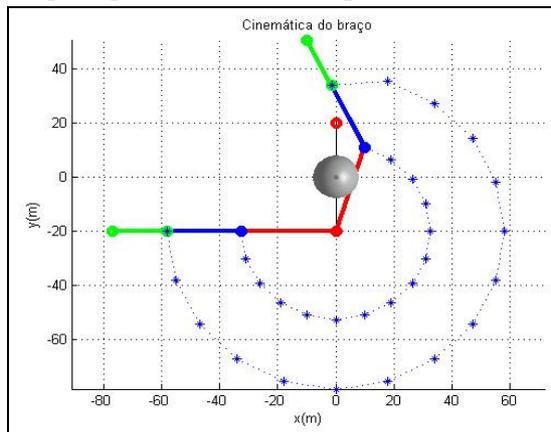


Fig. 8. Rotación del brazo efectuando un giro de abducción aducción.

Repetiendo este mismo trabajo, para diferentes alturas del hombro, son determinadas las posiciones finales de la muñeca para posiciones de abducción-aducción que van desde los 0° hasta los 180° , cuando el brazo está totalmente extendido. La figura 9 ilustra estos movimientos, se puede observar que existe un volumen que el brazo no puede alcanzar, este espacio corresponde a el área cercana a la espalda. La figura 10, es una vista ortogonal de 9, en ella podemos ver que el espacio de trabajo se asemeja a una esfera, donde la superficie de ella define la posición limite para la muñeca.

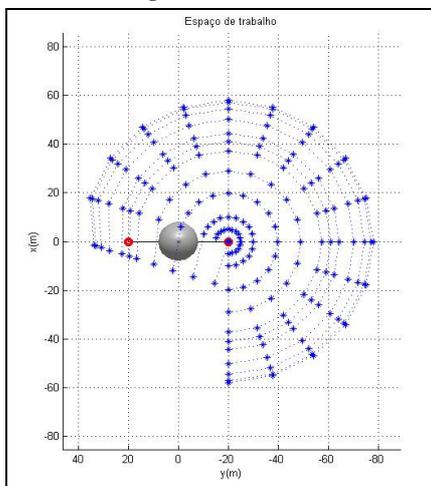


Fig. 9. Vista superior del espacio de trabajo.

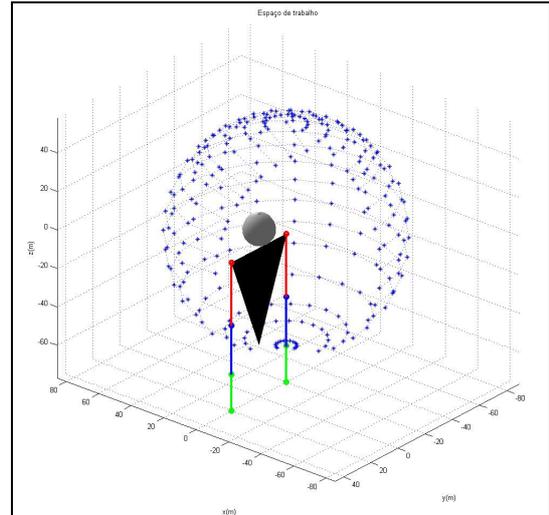


Fig. 10. Vista ortogonal del espacio de trabajo.

El siguiente paso es determinar dentro de la esfera todas las posiciones en las que la muñeca puede estar localizada, realizando barridos con el movimiento de flexión de codo, de tal forma que abarque todo el volumen dentro de la esfera.

La figura 11 ilustra el resultado final, se puede observar espacios restringidos que corresponden a las áreas que en las que los movimientos se interceptan con el cuerpo, y también la definición del sector contiguo a la espalda donde es imposible llegar debido a las restricciones físicas del movimiento. Es importante resaltar, que en condiciones ideales, el espacio de trabajo de ambos brazos es exactamente el mismo.

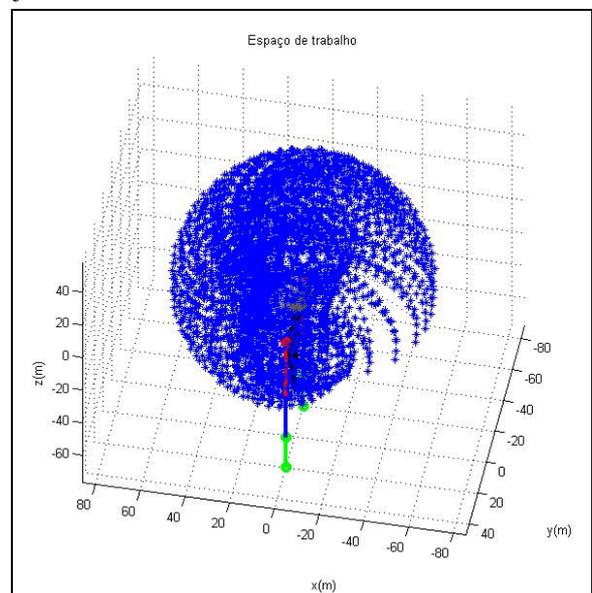


Fig. 11. Vista ortogonal del espacio de trabajo final.

Los movimientos del brazo para este análisis, fueron realizados a partir de condiciones de flexibilidad óptimas (movimientos de hiperextensión), pero estas pueden variar entre las personas en valores que van desde los 5° hasta los 15° . En muchas ocasiones movimientos como la flexión puede

verse reducido por el aumento del tejido blando en el brazo [12], esto en consecuencia influenciará el volumen de la esfera.

El espacio de trabajo está definido por la movilidad de las articulaciones, sean estas, del brazo humano o del sistema mecánico que esta soportando. Así, el espacio de trabajo de una persona que vista un exoesqueleto se puede ver afectado por las restricciones mecánicas que el sistema imponga. La intercepción de los dos volúmenes, será el espacio de trabajo efectivo del operador, por eso es que mejores diseños mecánicos que permitan movimientos más obedientes y de mayor rango, tendrán abarcado una mayor porción de la esfera.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo mostró un estudio cinemático del exoesqueleto de partes superiores basado en la morfología de un brazo humano, aplicando las teorías de la matrices de transformaciones homogéneas se logró determinar un modelo matemático que describía los movimientos que puede realizar el sistema teniendo en cuenta los movimientos y las restricciones de las juntas.

Se implementó este modelo, para la determinar su espacio de trabajo, el cual define los límites de desempeño del mismo. La medición del desempeño un sistema mecánico se relaciona con su capacidad de attingir todas la áreas de el espacio de trabajo del operador, esto esta relacionado con el diseño que tenga el sistema para acompañar de la mejor forma posible los movimientos del operario, y en consecuencia, desempeñar una mejor función que es lo que se busca en estos sistemas.

El próximo trabajo será la creación de trayectorias que estén contenidas dentro del espacio de trabajo, para que el sistema las siga a través del tiempo.

REFERENCIAS

- [1] H. Kazerooni, "Extender: A case study for human-robot interaction via transfer of power and information signals", IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, 1993, pp. 10 – 20.
- [2] H.Kazerooni, "The Berkeley Lower Extremity Exoeskeleton Project". In: M.H.Ang, O. Khatib, *Experimental Robotics IX, STAR 21*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, pp. 291-301.
- [3] J. L. Pons, *Wearable Robots: Biomechatronic Exoeskeleton*, Jhon Wiley & Sons, Ltd, 2008. .
- [4] P. F. Croshaw, *Hardiman I Arm Test - Hardiman I Prototype Project*, General Electric Co Schenectady Ny Specialty Materials Handling Products Operation,1969.
- [5] C. Carignan, M. Liszka, "Design of an Arm Exoeskeleton whith Scapula Motion for Shoulder Rehabilitation", *Advanced Robotics*, 2005, ICAR'05, Proceedings, 12th International Conferencie, 2005, pp. 524-531.
- [6] N.G. Tsararakis, D. G. Caldwell, "Development and control of a 'soft-actuated' exoskeleton for use in physiotherapy and training", *Autonomous Robots 15*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2003, pp. 21-33.
- [7] H. Kazerooni, S. L. Mahoney, "Dynamics and control of robotic systems worn by humans", *Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991, pp. 2399-2405.
- [8] A. Frisoli, F. Rocchi, S. Marcheschi, A. Dettori, F. Salsedo, M. Bergamasco, "A new force-feedback arm exoskeleton for haptic interaction in Virtual Environments", *IEEE Proceedings of the First*

- Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 2005, pp. 195-201
- [9] M. Bergamasco, B. Allotta, L. Bosio, L. Ferretti, G. Parrini, G.M. Prisco, F. Salsedo, G. Sartini, "An Arm Exoskeleton System for Teleoperat ion and Virtual Environments Applications", *Robotics and Automation*, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference, Vol 2. 1994, pp. 1449-1454
- [10] Y. S. Kim, J. Lee, S. Lee, M. Kim, "A Force Reflected Exoskeleton-Type Masterarm for Human-Robot Interaction", *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, Part A: Systems and humans*, Vol. 35, No. 2, 2005, pp. 198 – 212.
- [11] E. Rocon, J. L. Pons, "Case study: study of tremor characteristics based on a biomechanical model of the upper limb". In: J. L. Pons., *Wearable Robots: Biomechatronic Exoeskeleton*, Jhons Willey & Sons, Ltd, 2005, pp. 80-85.
- [12] B. Gowitzke, M. Milner, *Scientific Bases of Human Movements*, Ed. Paidotribo, 2000.
- [13] X. Wang, J. P. Verriest, "A geometric algorithm to predict the arm reach posture for computer-aided ergonomic evaluation", *The Journal of Visuailization and Posture Animation*,1998, pp. 33-47.
- [14] M. Benati, S. Gaglio, V. Tagliasco, R. Zaccaria, "Antropomorfic robotics", *Biological Cybernetics*, Vol 38, 1980, 135-140.
- [15] J. C. Perry, J. Rosen, "Design of a 7 degree of freedom upper limb powered exoeskeleton", *Biomedical Robotics and Biomechatronics*, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference, 2006, pp. 805-810.
- [16] J. E. Wood., S. G. Meek, S. C. Jacobsen, "Quantitation of human shoulder anatomy for prosthetic arm control-II. Anatomy Matrices", *Journal of Biomechanics*, Vol. 22, No. 4, 1989, pp. 309-325.
- [17] A. E. Engin, S. T. Tümer, "Three-dimensional kinematic model and determination of human shoulder complex – Part I: Physical model and determination of joint sinus cones". *Journal of Biomechanical Engineering* 111, 1989, pp.107-112.
- [18] A. Shiele, C. T. Francis, "Kinematics Design to Improve Ergonomics in Human Machine Interaction", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol 14, No 4, 2006, pp. 456-468.
- [19] B. Siciliano, L. Sciavicco, H. Villani, G. Oiolo, *Robotics Modeling Planning and Control*, Springer 2009.
- [20] J. Lenarčič, A. Umek, "Simple Model of Human Arm Reachable Workspace", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol 24, No 8, 1994, pp. 1239-1246
- [21] N. Klopčar , J. Lenarčič, "Kinematic Model for Determination of Human Arm Recheable Worskpace", *Meccanica*, Vol 40, No. 2, 2005, pp. 203-219.

Elkin Veslin Recibió el título de Ingeniero Mecatrónico en la Universidad Autónoma de Bucaramanga-UNAB, Colombia, (2005), fue merecedor de una pasantía en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Estado de México ITESM/CEM, México (2003), donde trabajó en la elaboración de documentos didácticos para prácticas universitarias en Automatización Industrial. Actualmente, como estudiante bolsista de la Capes es candidato al título de Maestría en Ciencias em Engenharia Mecânica en la Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE, Brasil. Sus áreas de investigación están enfocadas los exoesqueletos y la determinación de trayectorias para sistemas mecánicos a través de las teorías de los sistemas diferencialmente planos. Tiene experiencia en automatización industrial, redes industriales y robótica.

Jules Ghislain Slama Recibió el título em "Electronique Electrotechnique Automatique" en la- UNIVERSITÉ DE PROVENCE-FACULTÉ DE ST JEROME (1970), título de - Ecole Nationale Supérieure de Physique (1971), maestría en acústica " DEA d'Acoustique" - Université de Provence (1971) y doctorado en " Acoustique et Dynamique des Vibrations" - Université d'Aix Marseille II (1988). Fue Presidente de la Sociedade Brasileira de Acústica 1984-1985. Actualmente participa en el cuerpo editorial de la revista- Building acoustics (1351-010X) y es profesor asociado de la Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE, Brasil. Tiene experiencia en la área de Ingeniería Mecánica en el área de acústica y vibraciones, en el área de Arquitectura y Urbanismo, con énfasis en Planeamiento y Diseño de Espacio Urbano, actuando principalmente en los

siguientes temas: acústica ambiental, ruido aeroportuario, acústica urbana, y acústica arquitectónica.

Max Suell Dutra Recibió el título de Engenharia Mecânica em la Universidade Federal Fluminense (1987), tiene maestría en Engenharia Mecânica en la Universidade Federal do Rio de Janeiro (1990) y doctorado en Ingeniería Mecánica -Gerhard Mercator- en Universität Duisburg, Alemania (1995). Actualmente es profesor asociado de la Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE, Brasil. Tiene experiencia en el área de Ingeniería Mecánica, con énfasis en Robótica, actuando principalmente en los siguientes temas: diseño mecatrónico, robótica, diseño de máquinas, biomecánica, dinámica no-lineal, sistemas multi-cuerpos, domótica y automatización industrial.

Omar Lengerke Recibió el título de Ingeniero de Sistemas en la Universidad Autónoma de Bucaramanga UNAB- Colombia (1999) y Maestría en Ciencias, Controle y Automatización de Sistemas de Manufactura en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Estado de México ITESM/CEM (2002). Actualmente es estudiante de Doctorado em Ciências em Engenharia Mecânica de la Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Brasil. Tiene experiencia em el área de Ingeniería Mecatrónica, actuando principalmente em los siguientes temas: manipuladores didáticos, sistemas SCADA, instrumentación industrial, automatización industrial, sistemas flexibles de manufactura, robótica, máquinas mecatrónicas, vehículos guiados automáticamente (AGV).