



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

HERRAMIENTA PARA EL ANALISIS DE LA CINEMATICA DEL MIEMBRO SUPERIOR EN EL LEVANTAMIENTO DE PESOS SOBRE EL HOMBRO

Luis Eduardo Bautista Rojas, maeinf21@uis.edu.co¹

Luis Carlos Gómez Florez, lcgomezf@uis.edu.co²

John Faber Archila, jfarchid@uis.edu.co¹

John Jairo Sanabria, maeinfo7@uis.edu.co¹

¹ Universidad Industrial de Santander, Carrera 27 con Calle 9 Ciudadela Universitaria, Grupo de Investigación en Robotica de Servicio y Diseño - GIROD. Edificio Diseño Industrial Of. 321, Bucaramanga, Colombia.

² Universidad Industrial de Santander, Carrera 27 con Calle 9 Ciudadela Universitaria, Grupo de Investigación en Sistemas y Tecnología de la Información STI.

Resumen : *Un problema ergonómico muy frecuente en los puestos de trabajo en los cuales los operarios realizan movimientos repetitivos de manejo de cargas, es el levantamiento de pesos por encima de la cabeza. Este es un movimiento muy problemático porque puede provocar sobrecargas en la articulación del hombro si no es realizado adecuadamente. La sobrecarga del hombro puede ocasionar lesiones a nivel de la articulación y especialmente a los músculos del manguito de los rotadores. En este trabajo se plantea la creación de una herramienta computacional basada en el modelamiento de la geometría de las transformaciones lineales de elementos finitos que permitirá conocer el comportamiento cinemático del miembro superior bajos las condiciones del problema ergonómico y que servirá para conocerlo más profundamente desde el punto de vista biomecánico y realizar recomendaciones mas concretas al estudio de la ergonomía de los puestos de trabajo y su uso en la bioingeniería para el desarrollo de aplicaciones más eficientes.*

Palabras-clave: *Biomecanica, Ergonomia, Manejo de cargas, Bioingenieria .*

1. INTRODUCCION

La ergonomía es una disciplina que busca mejorar notablemente el ambiente laboral de las personas en industrias de cualquier tipo mediante el análisis de los puestos de trabajo, la relación hombre-tecnología y el ambiente laboral adaptándolo de manera armónica para mejorar el rendimiento del operario y evitar el deterioro progresivo de la salud del mismo ocasionada por condiciones negativas para su desempeño laboral. En la industria productiva al igual que en muchas otras el manejo de cargas bajo circunstancias especiales genera una condición muy específica de esfuerzo corporal. Junto a la condición mencionada anteriormente se tiene en cuenta los ciclos repetitivos de la tarea realizada ya que aumenta el nivel de esfuerzo de manera considerable y progresiva. En este trabajo se enfoca el análisis específico del manejo de cargas por alturas sobre los hombros, ya que dicha posición genera un sobreesfuerzo interesante sobre una zona del miembro superior conocida como el Manguito de los Rotadores, compuesto por una serie de tendones que soportan de manera mecánica los esfuerzos ocasionados por la carga y que afectan directamente al operario, presentándose de manera prevalente a partir de los 25 años y en un alto porcentaje de los operarios sometidos a los esfuerzos descritos. Dichos esfuerzos presentados de manera repetida y exagerada, inicialmente pueden dar lugar a un intenso dolor que antecederá a lesiones o inflamaciones que dé no ser atendidas de manera adecuada pueden causar una rotura de los tendones del manguito.

Mediante la aplicación de la Geometría de las transformaciones lineales de elementos finitos se establece un modelo matemático que buscan entender más claramente a movilidad del miembro superior al momento de realizar manejo de cargas sobre condiciones especiales logrando describir detalladamente de manera espacial y cinemática de los movimientos que en un trabajo posterior nos permitirá realizar un análisis de tipo biomecánico. Este estudio es el inicio de un trabajo que busca determinar los esfuerzos mecánicos a los que se ve sometido el miembro superior realizando tareas como las mencionadas. Para el posterior análisis se considera al miembro superior como una extremidad con 8 grados de libertad compuesta por lo movimientos propios y restricciones naturales de las articulaciones de las que se compone (hombro, codo y muñeca) y que nos permitirá recrear las fases del movimiento propio de manejos de cargas sobre la cabeza. En este trabajo se describe inicialmente la anatomía y fisiología propia del miembro superior seguida del análisis biomecánico de la extremidad, posteriormente en la sección 2 se explican los

factores humanos a tener en cuenta en los movimientos y de qué manera estos pueden afectar la salud del operario. Finalmente se describirá la cinemática directa y el diseño de la aplicación desarrollada en Matlab®.

2. EL MIEMBRO SUPERIOR

2.1 Anatomía

El miembro (extremidad) superior se caracteriza por su movilidad y la capacidad para sujetar y manipular. Estas características se dan cuando se realizan tareas habituales. El miembro superior, en el cuerpo humano, es cada una de las extremidades que se fijan a la parte superior del tronco. Está compuesto por cuatro partes fácilmente distinguibles en la Figura (1): mano, antebrazo, brazo y cintura escapular, y que serán las usadas en el desarrollo de este trabajo.

2.2 Cintura Escapular

La cintura escapular es el segmento proximal del miembro superior. Se extiende desde la base del cuello hasta el borde inferior del músculo pectoral mayor. Fija la articulación glenohumeral al tronco, de manera que constituye la comunicación entre el miembro superior y el tronco. La cintura escapular se encuentra formada por la escápula y la clavícula como se puede observar en la Figura (2).

Se divide en tres regiones: anterior, media y posterior o escapular.

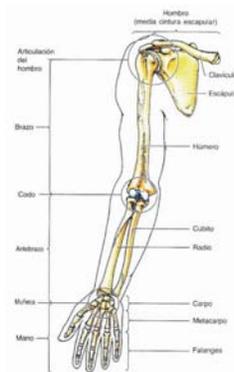


Figura 1. Miembro Superior. (K. Moore “Anatomía con Orientación Clínica”, 4 Ed. Editorial Lippincott, Williams & Wilkins)

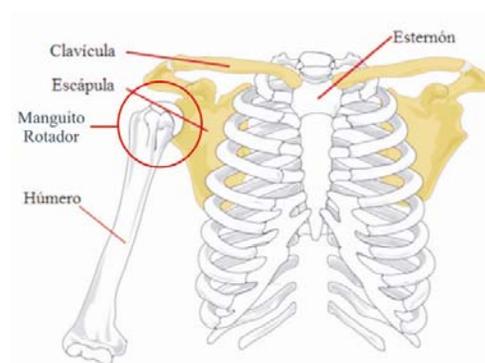


Figura 2. Cintura Escapular y Manguito de los Rotadores. (K. Moore “Anatomía con Orientación Clínica”, 4 Ed. Editorial Lippincott, Williams & Wilkins)

2.2 El Manguito de los Rotadores

El manguito de los rotadores es el término anatómico dado al conjunto de músculos y tendones que proporcionan estabilidad al hombro. Todos estos músculos están conectados a la cabeza del húmero formando un puño en la articulación. Su importancia estriba en mantener la cabeza del húmero dentro de la fosa glenoidea de la escápula. Este manguito forma continuidad con la cápsula de la articulación del hombro. El manguito muscular de los rotadores suele dañarse tras el repetido uso del miembro superior por encima del plano horizontal. La elevación hacia adelante hace que la cabeza humeral, con el hombro en flexión anterógrada, choque contra el acromión y el ligamento coracoacromial, que rozan contra el tendón del supraespinoso. La inflamación recurrente del manguito de los rotadores, constituye una causa corriente de dolor en el hombro y desgarro del manguito de los rotadores

3. FACTORES HUMANOS

Los factores humanos o ergonomía estudian cómo adecuar la relación del ser humano con su entorno, según la definición oficial del Consejo de la Asociación Internacional de Ergonomía IEA. Una de sus ramas, la ergonomía física, estudia las posturas más apropiadas para realizar las tareas del hogar y del puesto de trabajo, para el manejo de cargas y materiales y para los movimientos repetitivos, entre otros aspectos. Se entiende por movimientos repetidos a un grupo de movimientos continuos, mantenidos durante un trabajo que implica al mismo conjunto osteomuscular provocando en el mismo fatiga muscular, sobrecarga, dolor y por último lesión. Se indica que el trabajo se considera repetido cuando la duración del ciclo de trabajo fundamental es menor de 30 segundos (Silverstein et al, 1986).

3.1 Manipulación de cargas por encima del hombro

Tendinitis del manguito de rotadores: los trastornos aparecen en trabajos donde los codos deben estar en posición elevada, o en actividades donde se tensan los tendones o la bolsa subacromial; se asocia con acciones de levantar y alcanzar, y con un uso continuado del brazo en abducción o flexión.

Según el Decreto Real de Manipulación de Cargas España Ed. 2003, se entiende por manipulación manual de cargas cualquier operación de transporte o sujeción de una carga por parte de uno o varios trabajadores, como el levantamiento, la colocación, el empuje, la tracción o el desplazamiento, que por sus características o condiciones ergonómicas inadecuadas entrañe riesgos, en particular dorso lumbar, para los trabajadores.

Así mismo también se considera que la manipulación manual de toda carga que pese más de 3 kg (ISO/CD 11228, Ergonomics - Manual Handling) puede entrañar un potencial riesgo dorso lumbar no tolerable, ya que a pesar de ser una carga bastante ligera, si se manipula en unas condiciones ergonómicas desfavorables (alejada del cuerpo, con posturas inadecuadas, muy frecuentemente, en condiciones ambientales desfavorables, con suelos inestables, etc.), podría generar un riesgo.

3.2 Descripción del Movimiento de manipulación

Los Movimientos que el cuerpo realiza para cumplir con la tarea de llevar cargas por encima de los hombros se describen básicamente en dos fases, levantar y colocar, mostrados en la figura (3):

- Fase 0: Levantamiento de la carga desde su reposo hasta la altura de la cintura. A partir de aquí se realizara al análisis del movimiento, ya que los movimientos anteriores no son de interés para este trabajo.
- Fase 1: Levantar, consiste en llevar la carga desde la cintura hasta la altura del pecho.
- Fase 2: Colocar, Movimiento de la carga desde la altura del pecho hasta colocarla en su posición final generalmente a una altura sobre la cabeza u hombros.

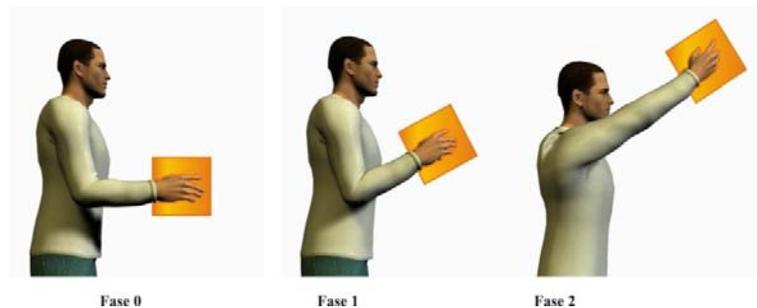


Figura 3. Fases de Levantamiento de la Carga

4. CINEMATICA DIRECTA

Con el modelo cinemático directo se conocen los movimientos de los grados de libertad del miembro y se desea encontrar la posición final del mismo. Para encontrar el modelo cinemático directo se utiliza el método de transformaciones lineales por medio de matrices homogéneas, el cual consiste en realizar los movimientos necesarios desde la base fija hasta el último vínculo, para cada movimiento se obtienen las matrices homogéneas y el resultado final es el producto de las matrices (Archila et al, 2008). En el análisis cinemática se asume que el brazo se comporta como una cadena cinemática abierta compuesta por los tramos y las articulaciones del miembro superior. La conformación estructural del miembro superior dispuesta al análisis en este trabajo es la siguiente:

- Segmento 1: Hombro (Clavícula y Escápula)
- Segmento 2: Brazo (Húmero)
- Segmento 3: Antebrazo (Cúbito y Radio)
- Segmento 4: Mano (Carpó, metacarpo, Falanges)

Es necesario tener en cuenta las consideraciones hechas por Pons para el estudio del brazo en donde toda la mano es considerada como un solo segmento, de esta forma la estructura que se usa para el análisis tendrá los cuatro segmentos descritos anteriormente unidos entre sí por las articulaciones de la muñeca, el codo y el hombro, quienes sujetan el miembro superior al cuerpo (Pons et al, 2008). Teniendo en cuenta las características propias del miembro superior y las condiciones de análisis es necesario tener en consideración el trabajo de Rocon, (Rocon et al 2005):

- El comportamiento mecánico del brazo es independiente del resto de cuerpo.
- Todos los componentes de cada segmento, incluidos los huesos y las partes suaves forman parte del mismo cuerpo rígido.

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

Como consideró Pons en su trabajo, las alturas se consideran constantes mediante una relación numérica con la talla (altura, según percentil adecuado) y presentados en la tabla (1). Teniendo en cuenta los segmentos, ahora se describen las uniones o articulaciones de dichos elementos que nos permitirán comprender y definir los grados de libertad. Es también necesario aclarar que se han tomado todas las uniones como ideales (Barrientos, 1997).

Tabla 1. Longitud de los Segmentos

LONGITUD DE LOS SEGMENTOS	
SEGMENTO	DISTANCIA
Hombro (L1)	0.094 H
Brazo (L2)	0.186 H
Antebrazo (L3)	0.146 H
Mano (L4)	0.108 H

H= Altura del cuerpo en Centímetros.

Las articulaciones que unen los segmentos mencionados anteriormente y los movimientos naturales, basados en (Carignan et al, 2005), a cada una de ellas se describen a continuación y se muestran en la figura (4):

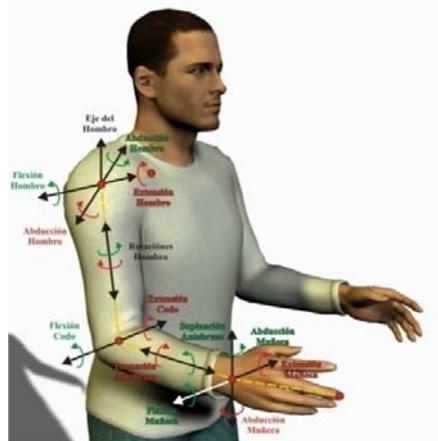


Figura 4. Movimientos del Miembro Superior

Articulación del Hombro:

Es la encargada de unir la escapula y clavícula con el humero. El comportamiento de esta articulación es muy similar al de una articulación esférica o enartrosica, en la que se pueden describir 3 grados de libertad (Gowitzke et al, 2000) y un comportamiento multiaxial. Para esta articulación se consideran lo siguientes tipos de movimientos:

- *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°.
- *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.
- *Circundicción*: 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°.

Articulación del Codo:

Realiza la unión del Húmero con el Cúbito y Radio. Esta articulación presenta movimientos en un solo plano comportándose como una articulación Artrodia y permite movimientos de manera uniaxial.

Es necesario aclarar que el segmento de antebrazo-muñeca puede girar sobre su propio eje, generando una rotación propia del segmento y no de la articulación de codo. Dicha rotación no afecta directamente la posición de la mano pero sí su orientación, debido a esto, algunos autores prefieren trasladar dicha rotación directamente a la muñeca para simplificar los estudios cinemáticos del sistema (Wang et al, 1998). Para esta articulación se observaron los siguientes movimientos:

- *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°.

- *Pronación- Supinación:* es la rotación al redor 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°.

Articulación de la Muñeca:

Encargada de unir el Brazo (Cúbito y Radio) con la Mano. En esta articulación se presentan 2 grados de libertad. El comportamiento de esta articulación puede ser tanto biaxial como multiaxial, los movimientos descritos por esta articulación son:

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

5. MODELAMIENTO MATEMATICO

Por medio de la geometría de las transformaciones lineales de elementos finitos se describe la posición de los diferentes elementos que componen el miembro superior en función de las rotaciones de sus grados de libertad, analizados en la sección anterior. Para el modelo se ha adoptado el análisis del miembro superior con 8 (ocho) grados de libertad. Las transformaciones lineales se representarán por medio de matrices de rotación donde se describirán las rotaciones en torno a los ejes de referencia X, Y, y Z, finalmente se describirán las traslaciones realizadas en los ejes. Las ecuaciones 1 a 4 describen las matrices de transformaciones lineales según el modelo presentado por Barrientos para el modelamiento de operaciones para describir los movimientos del miembro superior.

$$R(x, \phi1) = \begin{bmatrix} \cos \phi1 & -\text{sen} \phi1 & 0 & 0 \\ \text{sen} \phi1 & \cos \phi1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R(z, \phi3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi3 & -\text{sen} \phi3 & 0 \\ 0 & \text{sen} \phi3 & \cos \phi3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R(y, \phi2) = \begin{bmatrix} \cos \phi2 & 0 & \text{sen} \phi2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\text{sen} \phi2 & 0 & \cos \phi2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T(d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & dx \\ 0 & 1 & 0 & dy \\ 0 & 0 & 1 & dz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

El modelo presentado corresponde a 8 grados de libertad descritos de la siguiente manera: la Clavícula, con un grado de libertad Rotacional. El hombro con tres grados de libertad. El Codo, con dos grados de libertad y finalmente la muñeca, con dos grados de libertad. Algunos autores realizan análisis del miembro superior con diferentes grados de libertad, el modelo de 8 GDL ha sido adoptado por autores como M. Benati,1980; C. Carignan, 2005 y J. Perry, 2006 en sus trabajos de análisis cinemático. Para dar inicio al análisis el modelo cinemático del miembro superior se establece una cadena cinemática abierta, debido a que existe una única secuencia de articulaciones, conectando los puntos inicial y final de los eslabones de la cadena (Siciliano et al, 2009).

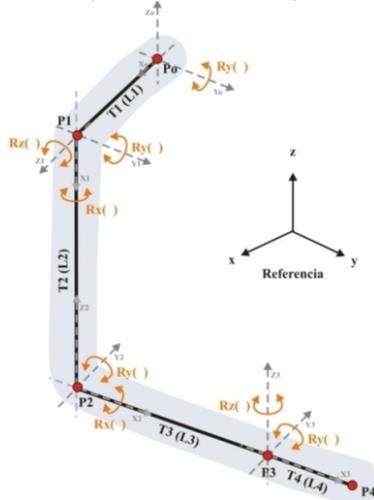


Figura 5. Descripción de las transformaciones en el miembro superior.

También es necesario establecer los ejes de referencia sobre los cuales se iniciará el análisis de los movimientos, a dichos movimientos se les ha asignado una notación específica con respecto al marco de referencia ilustrado en la figura (5). Teniendo en cuenta lo anterior se indica que los movimientos de flexión - extensión se realizan en torno al eje Y, las rotaciones se indican alrededor Del eje Z y los movimientos restantes en el eje X. Además de esto se han fijado los puntos de referencia P0, P1, P2, P3 y P4, como articulaciones y las longitudes L1, L2, L3 y L4 para los segmentos del miembro superior que se forman entre los puntos descritos anteriormente los cuales presentan un desplazamiento en el eje X (Yang et al, 2001). Tomando las recomendaciones de (Veslin et al, 2007), el conjunto de ecuaciones presentadas a continuación describe detalladamente las transformaciones realizadas desde el punto inicial Po en la base de la clavícula hasta los puntos P1, P2, P3 y P4, modelando el movimiento desde el punto inicial hasta cada uno de los segmentos a manera de transformaciones lineales (T).

$$\text{Link1} = T1 (X0, L1).R \left(Y0, \frac{\pi}{2} \right).Ry(Y0, \alpha0) \quad (5)$$

$$\text{Link 2} = T2 (X1, L2).R \left(-Y1, \frac{\pi}{2} \right).R \left(Z1, \frac{\pi}{2} \right).Ry(Y1, \alpha1).Rx(X1, \gamma1).Rz(Z1, \beta1) \quad (6)$$

$$\text{Link 3} = T3 (X2, L3).Ry(Y2, \alpha2).Rz(Z2, \beta2) \quad (7)$$

$$\text{Link 4} = T4 (X3, L4).Rz(Z3, \beta3).Ry(Y3, \alpha3) \quad (8)$$

Teniendo en cuenta los puntos referenciados y las transformaciones necesarias para calcular las posiciones individuales de cada punto durante el movimiento se procede a analizar individualmente cada una de las fases presentes en el movimiento de manejo de carga.

FASE 1: Descrita por la Flexión y Rotación de la articulación del hombro (P1) y la flexión del codo (P2) para alcanzar la posición mostrada en la figura (7). En esta fase se presentan: una extensión Rz ($\beta1$) sobre el eje Z1 en la articulación P1, al igual que una rotación Rx ($\gamma1$) sobre el eje X1 en la articulación P1. También se observa sobre la articulación P2 rotación Rz ($\beta2$) sobre el eje Z2.

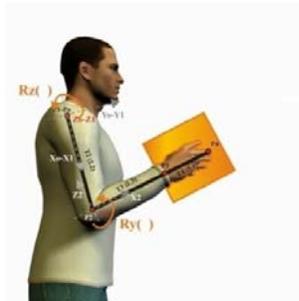


Figura 6. Descripción de las transformaciones en la Fase 1 del movimiento.

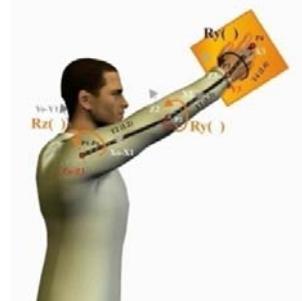


Figura 7. Descripción de las transformaciones en la Fase 2 del movimiento.

FASE 2: Descrita por la Flexión en la clavícula (Po), Flexión y Rotación de la articulación del hombro (P1), la flexión del codo (P2) y finalmente una flexión de la muñeca (P3) para alcanzar la posición mostrada en la figura (7). En esta fase se presentan: una flexión Ry ($\alpha0$) sobre el eje Yo en la articulación Po, una extensión Rz ($\beta1$) sobre el eje Z1 en la articulación P1, al igual que una rotación Rx ($\gamma1$) sobre el eje X1 en la articulación P1. También se observa sobre la articulación P2 rotación Rz ($\beta2$) sobre el eje Z2, finalmente sobre P3 se visualiza una flexión en Ry ($\alpha3$) sobre el eje Y3 y una abducción en Z3 ($\beta3$).

Es necesario especificar que el análisis realizado es completamente valido para ambas extremidades de manera análoga y simétrica teniendo en cuenta los signos de los ángulos y la orientación de los mismos. Para evitar inconvenientes de orientación de los ejes de referencia se adopta para el análisis toda rotación anti horaria como positiva.

Tabla 2. Longitud de las Extremidades

LONGITUD DE LAS EXTREMIDADES	
EXTREMIDAD	DIMENSION
Hombro (L1)	15,93 cm
Brazo (L2)	31,62 cm
Antebrazo (L3)	24,82 cm
Mano (L4)	18,36 cm

Tabla 3. Ángulos de Restricción para el movimiento
ÁNGULOS DE REESTRICCION PARA CADA ARTICULACION

ARTICULACION - MOVIMIENTO	ANGULO
Clavícula - Elevación	0° a 30°
Hombro - Flexión	130° a 180°
Hombro - Circundicción Interna	60° a 90°
Codo - Flexión	Hasta 140°
Codo - Pronación	Hasta 80°
Muñeca - Flexión	Hasta 90°
Muñeca - Aducción	Hasta 15°

El modelo planteado anteriormente se implementó en Matlab®, buscando obtener un análisis gráfico más exacto a partir de los valores ingresados y conocer los movimientos teniendo en cuenta los ángulos naturales que restringen el movimiento de las articulaciones observadas. Las graficas obtenidas se realizaron con cálculos para un sujeto de estatura promedio 1,70 cm, siendo las dimensiones de las extremidades relacionadas en la tabla (2).

En la figura (8) se observa la fase 0 o fase de reposo a partir de donde se inicia el movimiento de levantamiento de carga. En la figura (9) se muestra la fase 1 del movimiento, donde se encuentra flexión y rotación de la articulación del hombro al igual que una flexión en la articulación del codo. En la figura (10) se muestra la fase 2, donde se encuentra Flexión en la clavícula, Flexión y Rotación de la articulación del hombro, la flexión del codo y finalmente una flexión de la muñeca.

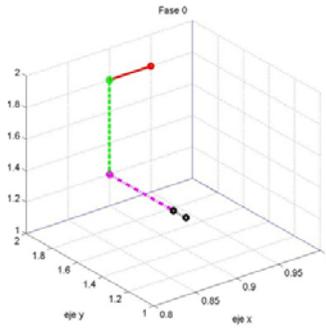


Figura 8. Fase 0 de levantamiento de la Carga

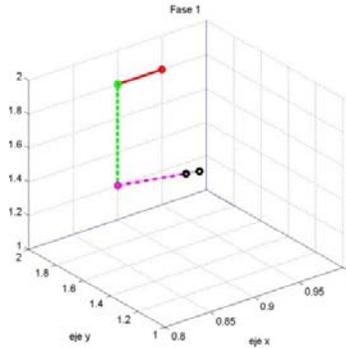


Figura 9. Fase 1 de levantamiento de la Carga

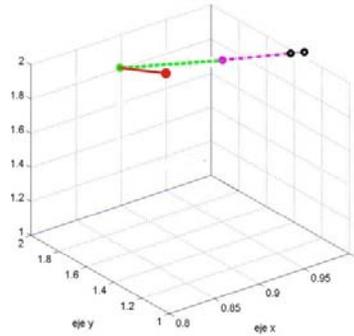


Figura 10. Fase 2 de levantamiento de la Carga

6. ESTÁTICA DEL MOVIMIENTO DE MANEJO DE CARGA

Durante el desarrollo del movimiento es preciso conocer de qué manera afecta la carga a cada una de las secciones del miembro superior. De la misma manera es necesario conocer el impacto que tiene la carga en las articulaciones y más especialmente en la articulación de hombro que alberga la zona de la anatomía humana que estudiamos en este trabajo. El estudio de la distribución de cargas por el miembro superior se inicia teniendo en cuenta la longitud de los segmentos usada durante el desarrollo este trabajo y de la misma manera las transformaciones que se presentan durante las diferentes fases del movimiento de levantamiento de la carga sobre los hombro ilustradas en la figura (4).

Para realizar el análisis estático de manera ordenada se iniciará por esquematizar los segmentos del miembro superior, posteriormente se representa mediante vectores las fuerzas que actúan sobre la cadenas óseas, seguidamente se determinan los valores longitudinales antropométricos del miembro superior y que se relacionan en la tabla (2). Posteriormente se descomponen las fuerzas resultantes en sus componentes ortogonales y finalmente se fijan las condiciones de equilibrio para calcular las fuerzas y momentos involucrados en el movimiento analizado. Es indispensable la definición del diagrama de cuerpo libre de los movimientos que se presentan, para poder conocer las fuerzas ilustradas en las figuras (11) y (12) y que interaccionan en cada una de las secciones del miembro superior.

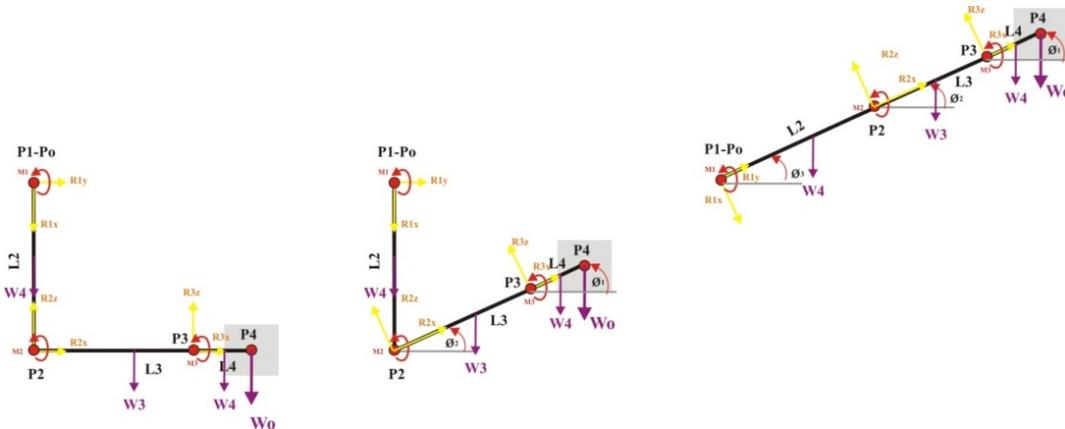


Figura 11. Diagrama de Cuerpo libre Fase 0, Fase 1 y Fase 2.

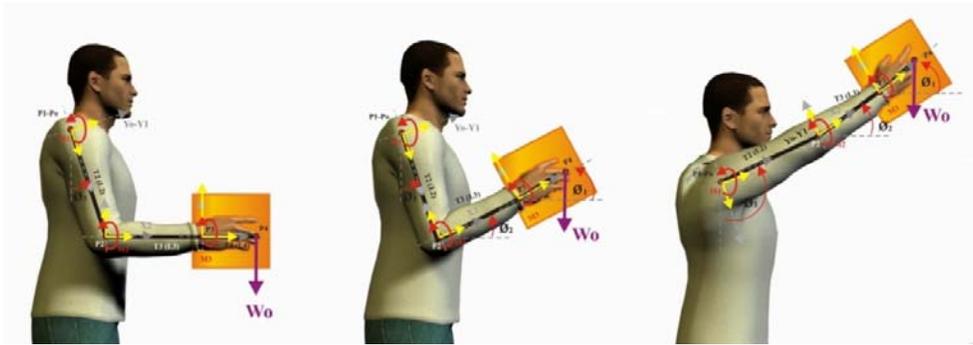


Figura 12. Comportamiento del peso en las fases del Movimiento

Para el diagrama se definen las siguientes convenciones:

Wo : Carga a levantar.

Wi: Peso en la articulación.

Wri: fuerza resultante en la articulación i

Rxi: Reacción en el eje X de la articulación i.

Ryi: Reacción en el eje Y de la articulación i.

Rzi: Reacción en el eje Z de la articulación i.

Mi: momento en la articulación i.

θi : Ángulo de la articulación i.

Todas las longitudes y ángulos de restricción usados se han tomado de la tabla (2) y (3) respectivamente. A continuación se describen las ecuaciones obtenidas del análisis de cada uno de los segmentos del miembro superior:

Aplicando el modelo de Newton obtenemos:

$$R_x + R_y + R_z + F_{mx} + F_{my} + F_{mz} + W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 0_x + 0_y + 0_z$$

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_{w1} + M_{w2} + M_{w3} + M_{w4} + W_o = 0$$

Segmento Po-P1

$$R_1 = W_1 \cos \theta_1$$

Segmento P1-P2-P3-P4

$$W_4 L_4 \cos \theta_4 + W_3 L_3 \cos \theta_3 + W_2 L_2 \cos \theta_2 = 0$$

En la figura (13) se muestra la fase 0 del movimiento, y el comportamiento de la carga en cada una de las extremidades del miembro superior, así mismo las reacciones en cada una de las articulaciones.

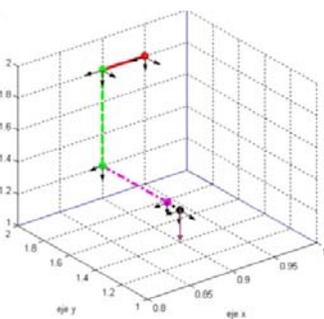


Figura 13. Comportamiento espacial del peso en las Fase 0 del Movimiento

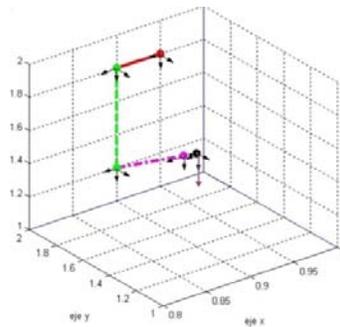


Figura 14. Comportamiento espacial del peso en las Fase 1 del Movimiento

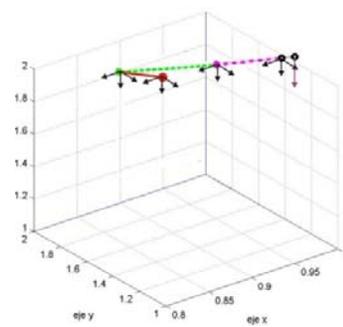


Figura 15. Comportamiento espacial del peso en las Fase 2 del Movimiento

En la figura (14) se muestra la fase 1 del movimiento, y la distribución de las reacciones en cada articulación. En la figura (15) se muestra la fase 2 del movimiento, donde se muestra la dirección de las fuerzas resultantes del movimiento en cada una de las articulaciones.

Después de solucionar las ecuaciones que nos determinaran las fuerzas y reacciones dependiendo de los ángulos de movimiento incluidos en la Tabla (3) aplicados a cada una de las articulaciones encontramos los resultados de las fuerzas presentes en el conjunto del Manguito de los Rotadores y que se visualizan en las figuras (16), (17) y (18).

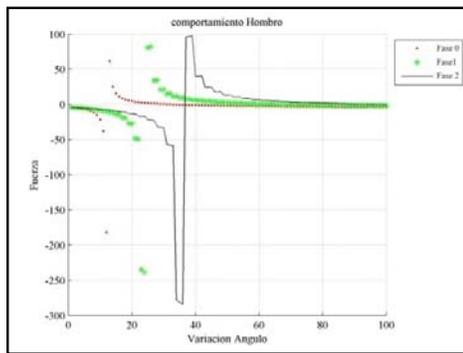


Figura 16. Comportamiento de los esfuerzos sobre la articulación del Hombro.

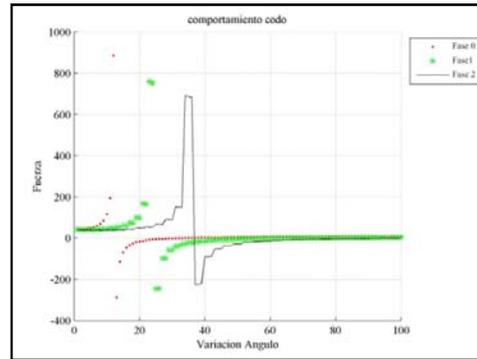


Figura 18. Comportamiento de los esfuerzos sobre la articulación del Codo

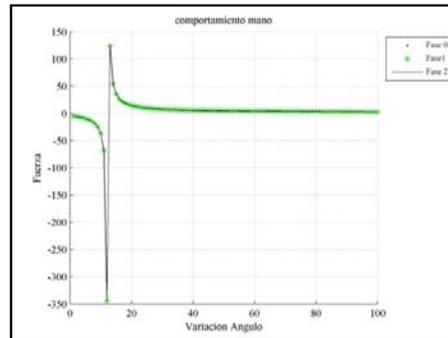


Figura 19. Comportamiento de los esfuerzos sobre la articulación de la mano.

7. CONCLUSIONES

Mediante el trabajo realizado se puede conocer con más precisión los movimientos del miembro superior cuando realiza movimientos de manejo de cargas repetitivas sobre la altura del hombro, además de obtener valiosa información para su posterior aplicación en el diseño de dispositivos o procesos en los cuales el operario realiza este tipo de movimientos.

También se presentan aplicaciones en el diseño de puestos de trabajo, talleres, industrias, en cadenas de producción y ensamblaje donde se presenta muy comúnmente movimientos repetidos y además se pueden presentar lesiones musculoesqueléticas que se pueden convertir enfermedades laborales. Esta herramienta es el primer paso para diseñar un puesto de trabajo más eficiente ya que se puede predecir de manera controlada las posibles consecuencias para la salud del operario evitando y disminuyendo la fatiga muscular y posibles trastornos musculoesqueléticos. La distancia de separación entre la carga manejada y el cuerpo tiene una influencia directa en el esfuerzo mecánico de las extremidades superiores y más intensamente sobre el hombro. Se encontró que la articulación del hombro se ve notoriamente afectada por las cargas del movimiento en la fase 2. Aunque no se esperaba, también se resalta la sobrecarga sobre la articulación de la muñeca presente en todas las fases del movimiento. En la fase 2 del movimiento se resalta una sobrecarga en todas las articulaciones, aunque más notoriamente sobre la articulación del hombro.

El movimiento de levantamiento de pesos sobre los hombros se compone de las rotaciones de los segmentos del miembro superior, para la clavícula una elevación máxima de 15° , para el hombro flexiones y rotaciones entre 0° y 120° grados, para el codo rotaciones y flexiones entre 0° y 90° grados, y para la muñeca entre -15° y 15° de aducción. Todos estos movimientos se pueden realizar teniendo en cuenta las restricciones propias del miembro superior y la distribución de la carga a lo largo de la extremidad en cada una de las fases.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión - VIE de la Universidad Industrial de Santander - UIS, por el apoyo y financiación brindada al proyecto titulado "Estudio y diseño conceptual de una ayuda técnica tipo exoesqueleto" código 5546, de donde surge el presente artículo de investigación.

9. REFERENCIAS

- Barrientos, A., "Fundamentos de Robótica" Ed. Mac Graw Hill. Barcelona. 1997. pp. 15-38.
- Engin, A. E., Tümer, S. T. "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.
- Shiele, A., Francis, C. T. "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.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, H., Oioio, G. "Robotics Modeling Planning and Control", Springer 2009.
- Silverstein, B., Fine, L., Armstrong, T., Joseph, B.; Buchholz, B., Toberston, M. "Cumulative trauma disorders of the hands and wrist in industry. The ergonomics of working postures. Models methods and cases". Taylor & Francis, London, 1986.
- Carignan, C., Liszka, M., "Design of an Arm Exoskeleton with Scapula Motion for Shoulder Rehabilitation", Advanced Robotics, 2005, ICAR'05, Proceedings, 12th International Conference, 2005, pp. 524-531.
- García, C., Chirivella, C., Page del Pozo, A., Moraga, R., Jorquera, J.. "Evaluación de Riesgos laborales asociados a la carga física". Instituto de Biomecánica de Valencia, 1997.
- Gonzalez, D. "Ergonomía y Psicología" 4 Ed. FC. Pp. 164.170.
- Rocon, E., Pons, J. L. "Case study: study of tremor characteristics based on a biomechanical model of the upper limb". In: J. L. Pons., Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeleton, Jhons Willey & Sons, Ltd, 2005, pp: 80-85.
- Veslin, E., Slama, J., Dutra, M., Lengerke, O. "Análisis Cinemático de un Exoesqueleto de Partes Superiores de 7 GDL", 2007. <<http://catic.unab.edu.co/2congresomecatronica/images/docum/3.pdf>>
- Fundación Europea para la mejora de las condiciones de vida y de trabajo. "Prevención de lesiones por esfuerzo repetitivo", Prevención Express No. 234. Barcelona, March, 1995.
- ISO/CD 11228: "Ergonomics - Manual handling - Part 1: Lifting and carrying. Pr EN 1005 - 2: Safety of machinery - Human physical performance. Part 2: Manual handling of machinery and component parts of machinery".
- Archila, J., Dutra, M., "Study and modeling of KR 6 KUKA robot", Revista Facultad de Ingenierías. Universidad de Antioquia N.º 46 pp. 132-144. Diciembre, 2008
- Perry, J. C., Rosen, J., "Design of a 7 degree of freedom upper limb powered exoskeleton", Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2006. BioRob 2006. The First IEEE/RAS-EMBS International Conference, 2006, pp. 805-810.
- Perry, J. C., Rosen, J., Manning, N., Burns, S., Hannaford, B.. "The Human Arm Kinematics and Dynamics During Daily Activities – Toward a 7 DOF Upper Limb Powered Exoskeleton", Biomedical Robotics and Biomechatronics, 2007. IEEE Xplore.
- Pons, J. L.. Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeleton, Jhon Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- Benati, M., Gaglio, S., Tagliasco, V., Zaccaria, R.. "Antropomorphic robotics", Biological Cybernetics, Vol 38, 1980, 135-140.
- Gowitzke, M., Milner, M.. Scientific Bases of Human Movements, Ed. Paidotribo, 2000.
- "Manipulación Manual de Cargas", Ministerio de trabajo e Inmigración de España, Real Decreto 487/1997, de 14 de abril B.O.E. n° 97, de 23 de abril. Madrid, 2003.
- Yang, N.F., Jin, D. W., Zang, M., C.H. Huang, R.C. Wang. "A Function description for the human upper limb pointing movements performance". 23rd Annual EMBS International Conference, Octubre 25-28, Estambul, Turkia 2001.
- Wang, X., Verriest, J. P.. "A geometric algorithm to predict the arm reach posture for computer-aided ergonomic evaluation", The Journal of Visualization and Posture Animation, 1998, pp. 33-47.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

TOOL FOR THE KINEMATICS ANALYSIS OF THE UPPER LIMB IN LIFTING WEIGHTS ON THE SHOULDER

Luis Eduardo Bautista Rojas, maeinf21@uis.edu.co¹

Luis Carlos Gómez Florez, lcgomezf@uis.edu.co²

John Faber Archila, jfarchid@uis.edu.co¹

John Jairo Sanabria, maeinfo7@uis.edu.co¹

¹ Universidad Industrial de Santander, Carrera 27 con Calle 9 Ciudadela Universitaria, Grupo de Investigación en Robotica de Servicio y Diseño - GIROD. Edificio Diseño Industrial Of. 321, Bucaramanga, Colombia.

² Universidad Industrial de Santander, Carrera 27 con Calle 9 Ciudadela Universitaria, Grupo de Investigación en Sistemas y Tecnología de la Información STI.

Abstract: *A very common ergonomic problem jobs in which workers perform repetitive handling of loads, is lifting weights above her head. This is a gesture very problematic because it may cause overload of the shoulder joint if not done properly. The overuse of the shoulder can cause lesions in the shoulder joint and muscles especially the rotator cuff. This paper proposes the creation of a computational tool based on modeling of the geometry of linear transformations of finite elements that will reveal the kinematic behavior of the upper low ergonomic conditions of the problem and make specific recommendations to study the ergonomics fact in the workplace and their use in bio-engineering to applications more efficient.*

Keywords: *Biomechanics, ergonomics, handling charges, bioengineering.*