

Desarrollo de Metodología para el Estudio del Ángulo de Flexión de Cabeza y Cuello

Development of a Methodology for Studying the Bending Angle of Head and Neck

Selena L. Linares¹, Lilibeth. A. Zambrano^{1,2}

¹Grupo de Biomecánica, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela

²Departamento de Ciencias y Técnicas de la Construcción, Universidad Metropolitana, Caracas, Venezuela
selke16@gmail.com, lazambrano@usb.ve, lzambrano@unimet.edu.ve

Abstract — The increment in the use of cell phones and similar products in recent years has caused a growth of the number of young patients with neck pain, headache and shoulders pain, showing early degeneration of the cervical spine, particularly associated to a poor posture adopted when using the cell phone. The purpose of this paper is to propose a methodology to study the flexion angle of the head and neck, evaluating different positions respect to the spine, starting from a standing position (looking forward) to the maximum flexion angle, through a motion analysis system, to be applied in future studies to determinate the maximum flexion angle anatomically allowed to use a cell phone. This movement was made in four cases, from the subject standing up to the subject seated. It was possible to propose a methodology that encompasses both the selection and placement of markers in head and neck, that allows the calculation of the muscle forces and moments and the joint moments, using inverse kinematics and dynamics applied to a musculoskeletal model for each case with specialized open source software (OpenSim).

Keywords — Angle of the head and neck, cervical spine, flexion, motion analysis.

Resumen — El incremento en el uso de los teléfonos celulares y productos similares, en los últimos años ha provocado un aumento de pacientes jóvenes con molestias en cuello, cabeza y hombros, mostrando una degeneración temprana de la columna, asociado particularmente a la mala postura adoptada al usar el celular. El propósito del trabajo es proponer una metodología para estudiar el ángulo de flexión de cabeza y cuello, evaluando distintas posiciones de los mismos con respecto a la columna, partiendo desde la posición erguida (mirada hacia el frente) hasta el ángulo de flexión máximo mediante un sistema de captura de movimiento, para ser aplicada en futuros estudios y se pueda determinar el ángulo de flexión máximo permitido anatómicamente al utilizar un celular. Este movimiento se realizó en cuatro casos, desde el sujeto parado hasta el sujeto sentado. Se logró proponer una metodología que abarca tanto la selección y ubicación de los marcadores en cabeza y cuello, como el cálculo de fuerzas y momentos musculares y momentos en las articulaciones, con un programa especializado de código abierto (OpenSim) mediante la cinemática y dinámica inversa aplicadas a un modelo músculo-esquelético para cada caso.

Palabras claves — Análisis de movimiento, ángulo de cabeza y cuello, columna cervical, flexión.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, con el avance de la tecnología el ser humano se ha hecho dependiente del teléfono celular, debido a que es un instrumento que facilita la comunicación por medio de llamadas, mensajes de texto, internet, etc. Como se expresa en [1], en el 2010 se publicó un estudio indicando que los niños y adolescentes entre las edades de 8 y 18 años envían aproximadamente 118 mensajes de texto por día. Las personas pasan la mayoría del tiempo enviando mensajes de texto sin darse cuenta de que realizan una mala postura al flexionar la cabeza y el cuello, produciendo molestias en el cuello, hombros, dolor de cabeza, y adormecimiento de extremidades superiores. Estos síntomas están relacionados con problemas en la zona cervical, mostrando una degeneración temprana de la columna vertebral.

Es importante estudiar el ángulo de flexión de cabeza y cuello debido a que con las malas posturas adoptadas se puede sobrecargar los elementos anatómicos de la columna cervical, causando una hiperflexión de la zona cervical [2] y varios problemas mecánicos de la columna, tales como el desgaste prematuro de las articulaciones vertebrales y del disco intervertebral, dolores de cabeza de origen cervical [3] o la manifestación de dolor localizado en la parte posterior y lateral del cuello, debido a molestias originadas en los músculos y ligamentos del cuello. Al hiperflexionar la cabeza y el cuello se puede ocasionar la pérdida o rectificación de la lordosis cervical, curva en el plano sagital que es producto de la forma estructural de los discos intervertebrales [2]. Esta curvatura es importante porque mantiene el centro de gravedad de la cabeza en equilibrio y ayuda a amortiguar el peso de la cabeza.

El presente proyecto se propone desarrollar una metodología para el estudio del ángulo de flexión de la cabeza y cuello, evaluando distintas posiciones de estos elementos anatómicos con respecto a la columna, partiendo desde la posición erguida de la cabeza (mirada hacia el frente) hasta el ángulo de flexión máximo permitido anatómicamente al utilizar un teléfono celular, haciendo uso de un sistema de captura de movimiento y la utilización de un modelo músculo-esquelético de la columna cervical en un programa especializado, OpenSim, el cual es un paquete

de software libre que permite construir, intercambiar y analizar modelos computarizados del sistema musculoesquelético así como realizar simulaciones dinámicas de movimiento, a través de la realización de un análisis de la cinemática inversa, dinámica inversa y una optimización estática [4].

II. METODOLOGÍA

Para la realización de este trabajo, en primer lugar se detalló la estructura de la columna vertebral y los rangos permitidos anatómicamente al flexionar la cabeza. Seguidamente, se investigaron los protocolos existentes para la ubicación de marcadores para estudios específicos de cabeza y cuello por medio de la captura de movimiento. No se encontraron protocolos para tal evaluación, por lo que se eligieron distintos marcadores en varios puntos anatómicos, de acuerdo con los protocolos de estudios de análisis de movimiento utilizados en el análisis de la marcha humana [5], para así: ayudar a ubicar el centro de gravedad de la cabeza y darle forma al sujeto [5]. Asimismo, estos marcadores fueron ubicados de tal manera que se facilitara el cálculo del ángulo de la flexión de la cabeza y cuello, mediante vectores.

A. Captura de Movimiento.

La captura de movimiento se realizó en el Centro de Análisis de Movimiento de la Universidad Simón Bolívar (CAM-USB) en Caracas, Venezuela, el cual consta de un sistema de 6 cámaras infrarrojas modelo HAWK. Los marcadores utilizados fueron de 20mm de diámetro. Las capturas fueron procesadas con el software Cortex® (Motion Analysis), para la obtención de los archivos de la trayectoria de los marcadores. Para el estudio se utilizó un solo individuo: de 25 años, con un peso de 56 kg, sexo femenino, con un historial médico libre de dolores o trastornos de cuello.

Se utilizaron 14 marcadores, de los cuales sólo tres están ubicados según el protocolo de Helen Hayes, como se muestra en [5], al realizar un estudio de la marcha del ser humano. Estos fueron ubicados en el tope de la cabeza, hombro derecho e izquierdo. Los 11 restantes se ubicaron en la parte frontal y posterior de la cabeza, en la nariz, barbilla, en el cuello, centro de gravedad de la cabeza y en la apófisis espinosa de C6, observar Fig. 1, para facilitar la ubicación del centro de gravedad de la cabeza y darle forma al sujeto.

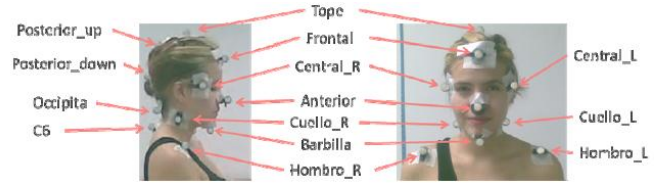


Fig. 1. Ubicación de los marcadores en el sujeto. Tomadas en el laboratorio de análisis de movimiento.

La primera captura que se realizó fue un ensayo estático que permitió crear el modelo biomecánico a utilizar en todos los análisis, donde el sujeto se colocó en la posición de bipedestación o erguida, con el tronco y la cabeza rectos y firmes, mirando hacia el frente durante 0.99 segundos. Luego se realizó la captura de movimiento, la cual consistió en mover la cabeza con respecto al cuello, partiendo de la posición erguida de la cabeza (mirada hacia el frente) flexionando hasta el ángulo máximo posible sin que el sujeto sufriera algún dolor mientras utilizaba el celular, ya sea para enviar o leer un mensaje de texto, y finalmente volver a la posición inicial. Este movimiento se realizó en cuatro casos diferentes: en el primero, el sujeto se encontraba en la posición de bipedestación (parado); en el segundo la persona se encontraba sentada con la cabeza vertical en una posición cómoda con el torso y los hombros rectos, en el tercer caso el sujeto estaba sentado en una posición sin los hombros y el torso recto, en la cual se sintiera lo más relajado posible. Por último en el cuarto caso, el sujeto se encontraba sentado y sólo se flexionó la cabeza sin volver a la posición inicial, observar la Fig. 2.



Fig. 2. Casos de estudio.

Al realizarse estudios de flexión de cabeza y cuello se evalúan los movimientos en el plano sagital, donde se aprecian los rangos de los movimientos de flexo-extensión del cuello.

B. Modelo músculo-esquelético.

El modelo músculo-esquelético consta de un primer archivo donde se define la estructura del modelo, los diferentes grados de libertad y los rangos de movimientos de cada una de las articulaciones, y de un segundo archivo que especifica los músculos y sus características. Con respecto a la geometría del esqueleto del modelo, está definido por una representación digitalizada del cráneo, la mandíbula, la

columna vertebral, la caja torácica, las dos clavículas y las dos escápulas.

El archivo de las articulaciones “.jnt” utilizado fue producto de la manipulación de dos archivos (ver Fig. 3): el “Neck6dof.jnt” y el “Neck24dof.jnt” obtenidos de [6] y creados por [7].

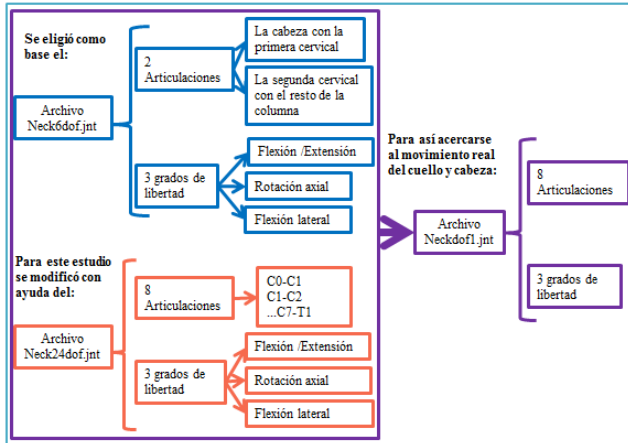


Figura 3. Esquema explicativo de la creación del archivo de las articulaciones “Neckdof1.jnt” del modelo.

El archivo “Neck6dof.jnt” se eligió como base, debido a que es la última actualización existente en [6], el cual contiene un modelo dividido en dos articulaciones y tres grados de libertad para cada una de ellas como se muestra en la Fig. 3. Este se modificó con ayuda del archivo “Neck24dof.jnt” para que el modelo contenga 8 articulaciones cervicales intervertebrales, (C0-C1, C1-C2, C2-C3, C4-C5, C5-C6, C6-C7 y C7-T1), y que cada una de ellas tengan los tres grados de libertad: flexión-extensión (pitch), rotación axial (yaw) y flexión lateral (roll) y no se divida en sólo dos articulaciones. El archivo final se nombró “Neckdof1.jnt”

Con respecto a los músculos se utilizó el archivo llamado “NeckMusNew.msl”, tomado de [7], el cual contenía 19 músculos, solamente del lado derecho del cuello. La mayoría de los datos de la arquitectura de estos músculos fueron tomados del estudio mostrado en [7, 8]. Aunque utilizar este modelo músculo-esquelético, con los músculos de un solo lado, podía facilitar el estudio debido a la simetría del modelo, este archivo se modificó añadiéndole los músculos del lado izquierdo, observar Fig. 4, para poder confirmar que cada músculo similar recibe la misma carga en cada lado.

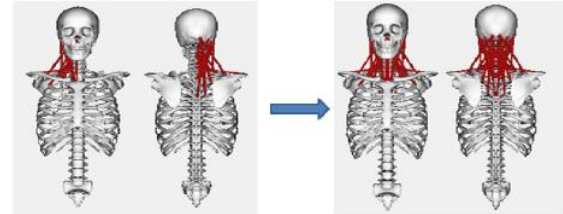


Fig. 4. Modificación del archivo “.msl” Adición de los músculos del lado izquierdo al modelo musculo-esquelético.

Para crear un modelo músculo-esquelético se necesitan suministrar 5 parámetros de cada músculo al programa, en el archivo “NeckMusNew.msl”, estos datos son esenciales para el cálculo de la fuerza muscular. Los parámetros son: la fuerza isométrica máxima, longitud óptima de la fibra del músculo, el ángulo entre el tendón y el músculo, longitud de tendón y la máxima velocidad de contracción.

Al tener los dos archivos se procedió a crear el modelo músculo-esquelético “.osim”.

C. Escala.

La escala es una herramienta, por medio de la cual el modelo biomecánico genérico adopta las medidas reales del sujeto de estudio en el ensayo estático. Antes de realizar la escala se verificó en OpenSim el sistema de coordenadas del archivo de los marcadores experimentales “.trc”. Los marcadores debían tener el mismo sistema de coordenadas que el modelo musculo-esquelético, por esto se transformó el archivo, rotando el eje de los marcadores en x,y,z hasta hacerlos coincidir con el eje del modelo.

Obtenido el modelo, se realizó la escala, donde se utilizaron 3 archivos de entrada, los cuales fueron: El modelo músculo-esquelético (“.osim”), los marcadores virtuales (“.xml”) y los marcadores experimentales (“.trc”), y se obtuvo como archivo de salida el modelo escalado (“scaled.osim”), ver Fig. 5.

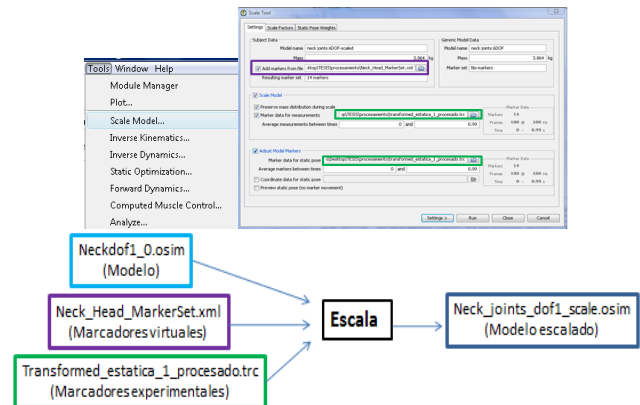


Fig. 5. Procedimiento y esquema de archivos de entrada y salida en la escala del modelo.

- El archivo “Neckdof1_0.osim” contiene el modelo músculo-esquelético de la cabeza y cuello.
- El archivo “Neck_Head_MarkerSet.xml” contiene una lista del conjunto de los marcadores virtuales, se especifica en qué segmento del modelo se colocan y su ubicación en el mismo. Los marcadores virtuales tienen que coincidir con los 14 marcadores experimentales.
- El archivo “transformed_estatica_1_procesado.trc” contiene la ubicación del conjunto de marcadores experimentales en un ensayo estático.
- El archivo “Neck_joints_dof1_scaled.osim” es el resultado de la escala, que contiene al modelo músculo-esquelético con las medidas del sujeto y los 14 marcadores.

D. Cinemática Inversa.

Después de la escala, se calculó la Cinemática Inversa, con la cual se calculó el valor de las coordenadas generalizadas, es decir, el ángulo de cada articulación vertebral y las posiciones de los marcadores experimentales tomados en el laboratorio de análisis de movimiento. Los archivos utilizados en la cinemática inversa fueron el modelo resultante de la escala y el archivo “.trc” que contiene la ubicación de los marcadores experimentales al realizar el movimiento de flexión en cada caso.

E. Dinámica Inversa.

Luego de la cinemática inversa, se calculó la Dinámica Inversa, mediante la cual se determinaron las fuerzas generalizadas o fuerzas netas y torques en cada articulación intervertebral que son responsables del movimiento, como consecuencia del peso de la cabeza y de los 5 parámetros introducidos en el archivo de los músculos. El archivo utilizado en la dinámica inversa fue el archivo resultado de la cinemática inversa llamado automáticamente por el programa IK TRIAL.

F. Gráficas en OpenSim.

OpenSim reporta los resultados de las simulaciones mediante gráficas, de las cuales se puede exportar los datos de origen.

G. Cálculo del ángulo de cabeza y cuello.

Se calculó el ángulo de la cabeza y del cuello en la posición inicial y de flexión máxima mediante vectores construidos con los marcadores del sujeto y con respecto al eje horizontal, al tener la mirada un ángulo de 90° con respecto a la superficie del teléfono celular. Para esto se agregaron al modelo dos marcadores virtuales para facilitar el cálculo: el trago (*tragus*), eminencia de forma triangular en la parte externa de la oreja; y el nasión (*nasion*), zona deprimida del hueso nasal, ubicado entre los ojos. En la Fig. 6 el trago está resaltado como un punto de color negro, el

nasion de color anaranjado y los puntos azules los marcadores experimentales.

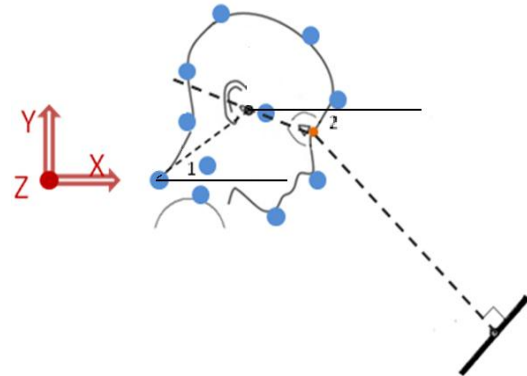


Fig. 6. Cálculo del (1) ángulo de flexión del cuello (2) ángulo de flexión de la cabeza. Modificada de [9].

Para el cálculo de los vectores se utilizaron las coordenadas del marcador C6, resultado de la cinemática inversa. Debido a que los marcadores tragus y nasion no se colocaron al realizar la captura del movimiento, con la cinemática inversa no se obtuvieron los valores de las coordenadas en el tiempo de estos dos marcadores. Por ello se crearon esos marcadores virtuales en la posición inicial y en el tiempo de flexión máxima. Luego se graficaron los vectores: para el cuello el vector formado por el marcador en C7 y el tragus, para la cabeza el vector formado por el tragus y el nasion, observar Fig. 7. Luego con relaciones trigonométricas se obtuvieron los ángulos de cabeza y cuello en la posición inicial y el de máxima flexión para cada caso de movimiento.

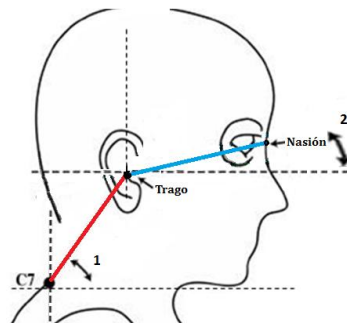


Fig. 7. Ángulo del cuello con la horizontal (1), ángulo de la cabeza horizontal (2), vector C7-trago (línea roja), vector trago-nasión (azul). Modificada de [10].

III. RESULTADOS

La metodología propuesta para estudios de flexión a través de la captura de movimiento para obtener el ángulo de flexión de cabeza y cuello, que producen solicitaciones en la columna cervical sin sobrepasar los límites de resistencia de los diversos elementos anatómicos involucrados, es la siguiente:

1) *Selección de número de pacientes:* Seleccionar el número de pacientes en función de la prevalencia de la enfermedad, utilizando criterios estadísticamente válidos para la selección de la muestra; preferiblemente de los dos sexos y de diferentes edades debido a que la fuerza muscular y la anatomía cambian en función de estas variables.

2) *Captura de análisis de movimiento:* Colocar los 17 marcadores reflectantes en los puntos indicados en la Fig. 8 y Tabla I.

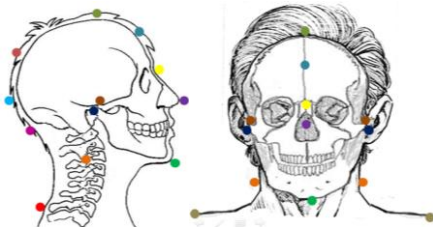


Fig. 8. Los 17 marcadores empleados para la captura de movimiento.

TABLA I
UBICACIÓN DE LOS MARCADORES EMPLEADOS

Color	Marcador	Ubicación
Verde	Tope	Parte superior de la cabeza.
Azul	Frontal	Parte anterior de la cabeza, en la frente.
Amarillo	Nasion	Nasión, parte deprimida de la nariz.
Púrpura	Anterior	Nariz
Rosado	Posterior_down	Parte posterior de la cabeza, inferior.
Cian	Posterior_up	Parte posterior de la cabeza, superior.
Marrón	Centro_L	Ayuda a ubicar el centro de gravedad de la cabeza, lado izquierdo.
Marrón	Centro_R	Ayuda a ubicar el centro de gravedad de la cabeza, lado derecho.
Naranja	Tragus_L	Trago, parte exterior triangular de la oreja izquierda.
Naranja	Tragus_R	Trago, parte exterior triangular de la oreja derecha.
Verde	Barbilla	Barbilla.
Púrpura	Occipital	Ubicación de la articulación C0-C1.
Amarillo	Cuello_L	Referencia anatómica de la ubicación del IAR, lado izquierdo.
Amarillo	Cuello_R	Referencia anatómica de la ubicación del IAR del cuello, lado derecho.
Rosado	C6	Apófisis espinosa de C7.
Naranja	Hombro_L	Acromion, el punto más alto del hombro izquierdo.
Naranja	Hombro_R	Acromion, el punto más alto del hombro derecho.

Luego, establecer los distintos movimientos que se van a capturar: flexión-extensión. Se debe utilizar un sistema de referencia para que la mirada del sujeto este totalmente recta hacia al frente al inicio de cada análisis, como en la Fig. 9, o de forma alternativa, un sistema que restrinja el movimiento flexión lateral, rotación, permitiendo sólo flexión- extensión,

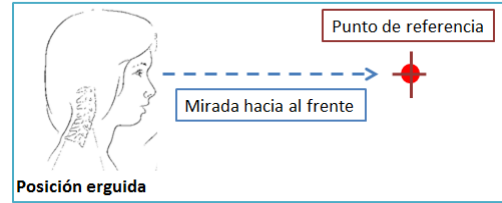


Fig. 9. Referencia para que la mirada del sujeto este hacia el frente. Modificada de [11].

Procesar la captura, para generar el archivo de las coordenadas de los marcadores experimentales (“.trc”).

3) *Modelo Músculo-esquelético en OpenSim:* Crear el modelo músculo-esquelético (“.osim”) con los archivos de las articulaciones (“.jnt”) y el archivo de los músculos (“.msl”). Luego verificar que el sistema de coordenadas del programa OpenSim y el de los marcadores experimentales sean iguales.

Realizar la escala del modelo, para lo cual se necesita:

- Archivos de entrada: Modelo “.osim”, archivo de marcadores experimentales del ensayo estático y archivo de la ubicación en el modelo músculo-esquelético de los marcadores virtuales.
- Archivos de salida: Modelo escalado “scaled.osim”.

Realizar la Cinemática inversa, obteniéndose el valor de las coordenadas generalizadas, es decir, el ángulo de cada articulación vertebral y la variación de la ubicación de los marcadores experimentales con el tiempo. En la Fig. 10 se muestra un ejemplo de la variación de la ubicación de los marcadores y el movimiento de las articulaciones vertebrales, de forma demostrativa.

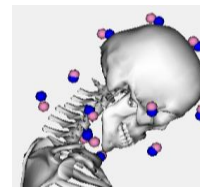


Fig. 10. Ejemplo de un resultado de la cinemática inversa, puntos azules son los 14 marcadores experimentales y los puntos rosados los 14 marcadores virtuales.

Del resultado de la cinemática inversa se debe:

- Reportar el movimiento de las articulaciones.
- Reportar la variación de la ubicación de los marcadores C7, Tragus y Nasion.
- Calcular los vectores entre C7 y tragus, y el de Tragus con Nasion, con las coordenadas anteriores.
- Reportar la pérdida o no de la lordosis cervical.

Realizar la Dinámica inversa, mediante la cual se determinan las fuerzas y momentos generados por los músculos y los momentos en cada articulación intervertebral. Con esto:

- Reportar las Fuerzas Musculares de los músculos flexores.

- Reportar los momentos de los músculos.
- Reportar los momentos en las articulaciones.

Graficar los resultados en OpenSim, de la cual se puede extraer la imagen y la data de los momentos reportados.

4) *Cálculo del ángulo de cabeza y cuello*: Calcular el ángulo de la cabeza y cuello de la posición inicial y de máxima flexión, mediante vectores obtenidos de las coordenadas de los marcadores en cinemática inversa.

- Calcular el ángulo del cuello formado por el marcador en C7 y el tragus con la horizontal.
- Calcular el ángulo de la cabeza formado por el marcador en el tragus y el nasion con la horizontal.

IV. DISCUSIÓN

La metodología propuesta abarca: desde un protocolo para la ubicación de los marcadores para un estudio específico de cabeza y cuello, la creación de un modelo músculo-esquelético de cabeza y cuello, el cálculo de la cinemática y dinámica inversa hasta el cálculo de flexión de cabeza y cuello mediante vectores. Al aplicar esta metodología propuesta en futuros estudios se puede evaluar distintos ángulos de flexión de cabeza y cuello para así determinar el ángulo de flexión de cabeza y cuello máximo permitido anatómicamente al utilizar el celular.

Al crear el modelo músculo-esquelético es importante verificar que el sistema de coordenadas del programa OpenSim y el de los marcadores experimentales sea el mismo, si no se debe rotar el sistema de los marcadores hasta que coincida con el del modelo.

Al ser empleada la metodología propuesta se observó que en la posición estática las vértebras realizaron un movimiento de flexión, extensión, rotación axial y flexión lateral debido a que no se tuvo un sistema que mantuviese al sujeto totalmente estático, y tampoco se dispuso de una referencia visual cero para que el sujeto mantuviese la mirada hacia al frente, para así no introducir ruido en las capturas de movimiento.

El cálculo del ángulo de cabeza y cuello al emplear los 14 marcadores originales no permiten la determinación de los vectores necesarios en el cálculo de los ángulos, esto hizo necesario la creación de 3 marcadores virtuales cuyas coordenadas no aparecen directamente en el estudio, pero que sí pueden ser determinadas a partir del uso de varios marcadores reales. Esto produjo una corrección del protocolo inicialmente empleado y se modificó la cantidad de marcadores reales de 14 a 17, incorporando los 3 nuevos marcadores: el tragus derecho e izquierdo y el nasion, como se muestra en la Tabla I de los resultados.

V. CONCLUSIÓN

Se logró proponer una metodología para al ser aplicada en otros estudios se pueda determinar el ángulo de flexión máximo de cabeza y cuello, que no sobrecarguen los elementos anatómicos de la columna cervical al utilizar un teléfono celular, estableciendo un protocolo para la ubicación de los marcadores para un estudio específico de cabeza y cuello, un modelo músculo-esquelético de cabeza y cuello, el cálculo de la cinemática y dinámica inversa.

Es determinante realizar varias capturas de cada individuo y de varios casos de movimientos tomando en cuenta los requerimientos del estudio, para poder tener una comparación amplia.

Se determinó que para el estudio de sólo flexión debe existir un sistema que restrinja el movimiento de rotación axial y flexión lateral de la cabeza y cuello, para asegurar que estos movimientos no influyen en la simetría de la distribución de las fuerzas musculares.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración del Profesor Rafael Torrealba, por prestar y facilitar el Centro de Análisis de Movimiento Universidad Simón Bolívar para la captura de movimiento realizado en el estudio.

REFERENCIAS

- [1] Family Foundation Study, "GENERATION M2: Media in the Lives of 8- to 18-Year-Olds", 2010, pp. 18.
- [2] DR. Gore, SB. Sepic, GM. Gardner. "Roentgenographic findings of the cervical spine in symptomatic people". 1986.
- [3] DH. Watson, PH. Trott. "Cervical Headache: An investigation of natural head posture and upper cervical flexor muscle performance. 1993.
- [4] F. Anderson and E. Guendelman, "OpenSim User's Guide," 2010.
- [5] M. P. Kadaba, H. K. Ramakrishnan, and M. E. Wootten, "Measurement of lower extremity kinematics during level walking," *J. Orthopaedic Research*, no. 8, pp. 383-392, 1997.
- [6] OpenSim. Available: <https://simtk.org/home/opensim>.
- [7] A. Vasavada, S. Li, S. Delp. "Influence of muscle morphometry and moment arms on the moment-generating capacity of neck muscles". *Spine* 1998; 72:412-22.
- [8] L.K. Kamibayashi y F.J.R. Richmond. "Morphometry of human neck muscles". 1998.
- [9] J. G. Young, M. Trudeau, D. Odell, K. Marinelli and J. T. Dennerlein. "Touch-screen tablet user configurations and case-supported tilt affect head and neck flexion angles". 2011.
- [10] D. Ankrum, K. Nemeth. "Head and neck posture at computer workstations- what's a neutral? 2000.
- [11] A. A. White III, M. M. Panjabi, "Clinical Biomechanics of the Spine".