

UN EJEMPLO DE PROBLEMA DE INGENIERÍA PARA LA ENSEÑANZA DE BIOMECÁNICA POSTURAL EN LA CARRERA DE BIOINGENIERÍA

Fernando Muñoz, Departamento de Electrónica y Automática, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), fmunoz@gateme.unsj.edu.ar

Silvia Elizabeth Rodrigo, Departamento de Electrónica y Automática, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), srodrigo@gateme.unsj.edu.ar

Carina del Valle Herrera, Departamento de Electrónica y Automática, Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), cherrera@gateme.unsj.edu.ar

Resumen— La Biomecánica Postural se relaciona con las características geométricas y cinéticas de las posturas típicas del cuerpo humano, tales como la bipedestación y sedestación. Desde el punto de vista de la Ingeniería Biomédica y Bioingeniería, interesa estudiar particularmente la postura de bipedestación, con el fin de cuantificar y analizar las oscilaciones posturales a nivel de la cabeza o de los pies. Tal análisis constituye una herramienta diagnóstica para el médico especialista en trastornos del equilibrio de origen vestibular o central. En este contexto se desarrolla dicha temática en la asignatura “Biomecánica”, correspondiente al 5° semestre de la carrera de Bioingeniería de la UNSJ. Para su abordaje se integran fundamentos teóricos -que se articulan horizontal y verticalmente con otros contenidos de la carrera- y de actividades prácticas bajo la modalidad denominada Resolución de Problemas de Ingeniería para las carreras de Ingeniería Biomédica y Bioingeniería. Se describe aquí la metodología empleada en la cátedra “Biomecánica” para este proceso de enseñanza-aprendizaje sobre Biomecánica Postural, su implementación a partir del año 2015 y se analiza la importancia de formar competencias en el alumno, que le permitan abordar Actividades Profesionales reservadas al Título de Ingeniero Biomédico y Bioingeniero vinculadas con esta temática, tal como lo reglamenta la Resolución Ministerial N° 1603-04.

Palabras clave— *bipedestación, oscilaciones posturales, competencias*

1. Introducción

La bipedestación es una postura distintiva del ser humano, indispensable para la realización de actividades de la vida diaria. Tal postura se caracteriza por una base de sustentación estrecha y una posición alineada en forma óptima de los segmentos corporales, por efecto de la presencia de las curvaturas cervical, torácica y lumbar de la columna vertebral, típicas en sujetos adultos saludables. En estas condiciones, la postura de bipedestación demanda el mínimo gasto de energía metabólica, dejando a los músculos en libertad y disponibles para la ejecución de actividades [1, 2].

Desde el punto de vista geométrico, la postura bípeda puede definirse como la alineación vertical que adquieren los distintos segmentos y articulaciones del cuerpo humano para mantener esta postura. Por su parte, desde el punto de vista cinético, la postura de bipedestación se describe a partir del equilibrio dinámico que se establece entre la fuerza del peso corporal (virtualmente aplicada en su centro de masa o de gravedad CDG) y la fuerza de reacción del suelo (FRS), cuyo punto de aplicación sobre la planta del pie se conoce como centro de presiones (CDP) [2].

Además, durante la postura de bipedestación, las posiciones del CDG y CDP no son fijas, sino que permanentemente son modificadas por el sistema nervioso central (SNC) para mantener el equilibrio corporal, neutralizando así el efecto de las fuerzas y momentos desestabilizantes. Tal como se observa en la Figura 1, durante la bipedestación la componente vertical de la FRS (R) se equilibra con la del peso corporal (W), a través de la corrección permanente de la posición del CDP [2].

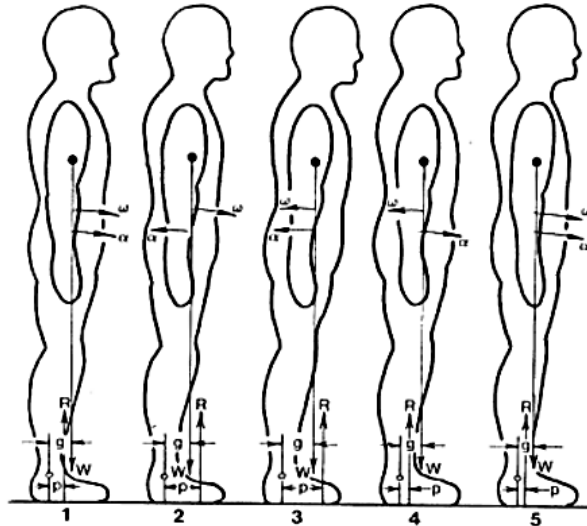


Figura 1. Sujeto en bipedestación. Las 5 posiciones muestran la localización del CDG (punto de aplicación del vector W) y del CDP (punto de aplicación del vector R). Ambas fuerzas se equilibran dinámicamente mediante los momentos que ejercen alrededor de la articulación del tobillo, siendo g y p los brazos de momentos de W y R , respectivamente [2].

Se conoce también que este movimiento del CDP durante la postura bípeda se logra por efecto del control sobre los músculos posturales que ejerce permanentemente el SNC para mantener el equilibrio corporal. En efecto, el SN integra información derivada de receptores sensoriales en los sistemas vestibular, visual y propioceptivo, así como de los reflejos posturales y de la memoria, a partir de lo cual genera una respuesta motora que permite mantener la bipedestación [3].

Para valorar la contribución de estos mecanismos para el logro del equilibrio corporal, se han desarrollado diversas técnicas diagnósticas, basadas en el registro con cámaras de video o plataformas de fuerza, de las oscilaciones posturales generadas durante la bipedestación por el movimiento de la cabeza o de los pies, respectivamente. Estas técnicas se emplean en conjunto con las pruebas de Romberg y de Unterberger-Fukuda, que permiten examinar el rol de los receptores sensoriales específicos de la postura, de tal manera de detectar alteraciones del equilibrio provenientes de vértigo o inestabilidad, relacionadas con el sistema vestibular o el SNC [4, 5].

Es justamente el registro de las oscilaciones posturales en bipedestación y el posterior procesamiento de esta información lo que se vincula directamente con el campo laboral del ingeniero biomédico y bioingeniero, al integrar conocimientos científicos y tecnológicos con el fin de brindar una herramienta diagnóstica al médico especialista en trastornos del equilibrio, de origen vestibular o central.

En este contexto se desarrolla la temática de Biomecánica Postural en la asignatura “Biomecánica”, en el 5° semestre de la carrera de Bioingeniería de la UNSJ. Para su abordaje se integran fundamentos teóricos -que se articulan horizontal y verticalmente

con otros contenidos de la carrera- y actividades prácticas bajo la modalidad Resolución de Problemas de Ingeniería para las carreras de Ingeniería Biomédica y Bioingeniería, definida por la Resolución Ministerial N° 1603-04 (en adelante, RM 1603-04) [6].

En las secciones siguientes se describe la metodología empleada para este proceso de enseñanza-aprendizaje sobre Biomecánica Postural en la cátedra “Biomecánica” de la UNSJ, su implementación desde el año 2015 y se analiza la importancia de formar competencias en el alumno, que le permitan abordar las Actividades Profesionales reservadas al Título de Ingeniero Biomédico y Bioingeniero vinculadas con esta temática, tal como lo reglamenta la RM 1603-04 [6]. En particular, a través de esta experiencia educativa se pretende propiciar la generación y logro de competencias relacionadas con la Actividad Profesional vinculada a la adquisición y procesamiento de señales biomédicas (prevista en la RM 1603-04 [6]), tales como las registradas durante las oscilaciones posturales del cuerpo humano durante pruebas de bipedestación, con el objeto de brindar una herramienta de diagnóstico al médico especialista en trastornos del equilibrio de origen vestibular o central.

2. Materiales y Métodos

La planificación en “Biomecánica” de los contenidos sobre Biomecánica Postural prevé desarrollar la temática mediante clases teóricas y clases prácticas. En las clases teóricas, a cargo de la Profesora Titular, se revisan los conceptos de estabilidad, balance y equilibrio y se aplican al análisis de las posturas corporales. Se describen también los mecanismos neurofisiológicos implicados en el control de la bipedestación, así como los fundamentos de las técnicas estáticas y funcionales utilizadas para su valoración en condiciones normales y patológicas [1-5]. Asimismo, se mencionan las fuentes de información a consultar por los alumnos para profundizar sobre estos contenidos (disponibles en la bibliografía sugerida [1-5] y a través de documentos de cátedra).

Entre los conceptos abordados en las clases teóricas figura el de límite de estabilidad del cuerpo humano en bipedestación, definido como la frontera de un área del espacio en la que el cuerpo puede mantener su posición sin cambiar la base de sustentación. Tal base de sustentación en bipedestación es descripta por el área del cuerpo que está en contacto con la superficie de soporte (suelo) o bien, como el ángulo máximo que una persona puede desplazar su cuerpo respecto de la vertical, sin modificar su base de sustentación. En base a este concepto, se conoce que en condiciones normales, un sujeto de pie sobre una superficie plana y firme, con los pies separados confortablemente, puede desplazar su CDG unos 12° en dirección antero-posterior (AP) y 16° en dirección medio-lateral (ML). Si en algún momento el CDG cae fuera del límite de estabilidad, la caída es inevitable, a menos que se realice una maniobra rápida de corrección [7].

Por su parte, el desarrollo de las clases prácticas se basa en la modalidad de formación práctica denominada Problemas Abiertos de Ingeniería, definida en la RM 1603-04 como: *“aquellas situaciones reales o hipotéticas cuya solución requiera la aplicación de los conocimientos de las ciencias básicas y de las tecnologías”* [6]. En este marco se ha implementado la Práctica de Gabinete N° 1 (PG1), cuyo objetivo general es aplicar conceptos de biomecánica postural y de procesamiento de señales para valorar y analizar la postura de bipedestación en una situación patológica, tal como la escoliosis.

Para efectuar la PG1, que es conducida y supervisada por los Jefes de Trabajos Prácticos de la asignatura, se utiliza una base de datos de acceso libre, que comprende 1956 estudios tomados en 163 voluntarios, incluyendo sujetos jóvenes y adultos

mayores [8, 9]. La base de datos contiene señales registradas en una plataforma de fuerza durante pruebas de bipedestación realizadas en 4 condiciones: ojos abiertos, superficie de apoyo firme; ojos abiertos, superficie de apoyo inestable (almohadón de goma espuma de 6 cm de altura); ojos cerrados, superficie de apoyo firme; ojos cerrados, superficie de apoyo inestable [8, 9].

Entre las señales contenidas en la base de datos figuran las trayectorias en dirección anteroposterior (AP) y mediolateral (ML) –equivalentes a las coordenadas x e y – del CDP, registradas durante 60 segundos a una frecuencia de muestreo de 100 Hz. La información de la base de datos ha sido filtrada con un pasa bajos de fase cero de Butterworth de cuarto orden, a una frecuencia de corte de 10 Hz [8, 9]. La descripción efectuada por los investigadores que obtuvieron la base de datos [8, 9] indica que durante los ensayos de bipedestación, los participantes permanecieron con los brazos colocados a ambos lados del cuerpo y con los pies descalzos sobre la plataforma de fuerza, formando un ángulo de 20° entre los ejes longitudinales de ambos pies, estando a una distancia de 10 cm entre sí.

En base a esta información, la metodología empleada para efectuar la PG1 consiste en lo siguiente. En primer lugar se solicita a los estudiantes que descarguen los archivos necesarios desde el sitio web de la asignatura, incluyendo la guía de la PG1, en donde se describe el objetivo de esta actividad, su marco conceptual, así como el procedimiento a seguir para su realización. Una vez efectuada la descarga de archivos, se analiza la información contenida en la base de datos, inspeccionando los datos demográficos de los voluntarios, tales como género, edad, peso y altura. Dicha planilla contiene también el nombre del archivo asociado (señal adquirida) y las condiciones en que se realizó el estudio, además de si el sujeto evaluado presenta alguna patología [8, 9].

De esta manera, el examen de esta hoja de datos resulta importante, ya que se indica a los alumnos que seleccionen dentro de la misma, los casos de dos sujetos cuyas señales serán analizadas: un voluntario normal y un paciente con escoliosis. Además, con el fin de realizar una correcta interpretación de los datos, se solicita a los alumnos que releen la documentación para analizar la posición de referencia del sistema de coordenadas utilizado por la plataforma de fuerza. En la Figura 2 se visualiza la posición de los ejes x , y , z de la plataforma.

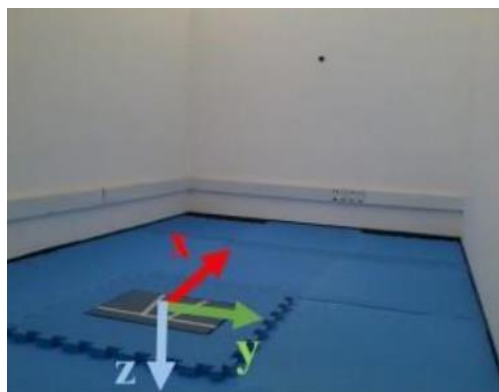


Figura 2. Posicionamiento y orientación de los ejes x , y , z de la plataforma de fuerza [8].

Posteriormente los alumnos realizan la lectura mediante MATLAB®, de la información contenida en la base de datos para los dos sujetos previamente seleccionados. Esta información está referida a: tiempo, fuerzas y momentos generados, descriptos por sus

componentes x, y, z. Dichos parámetros son graficados en función del tiempo, lo que permite visualizar su evolución en el periodo de 60 segundos [8]. La Figura 3 muestra la gráfica correspondiente a las tres componentes de la FRS respecto del tiempo, obtenidas de la base de datos. Por otra parte, se genera un gráfico que contrasta la coordenada AP del CDP versus su correspondiente coordenada ML y que brinda una noción del cambio de posición del CDP durante la prueba efectuada. En la Figura 4 se observa la trayectoria descrita por un sujeto normal, mientras que la Figura 5 presenta un caso patológico (escoliosis).

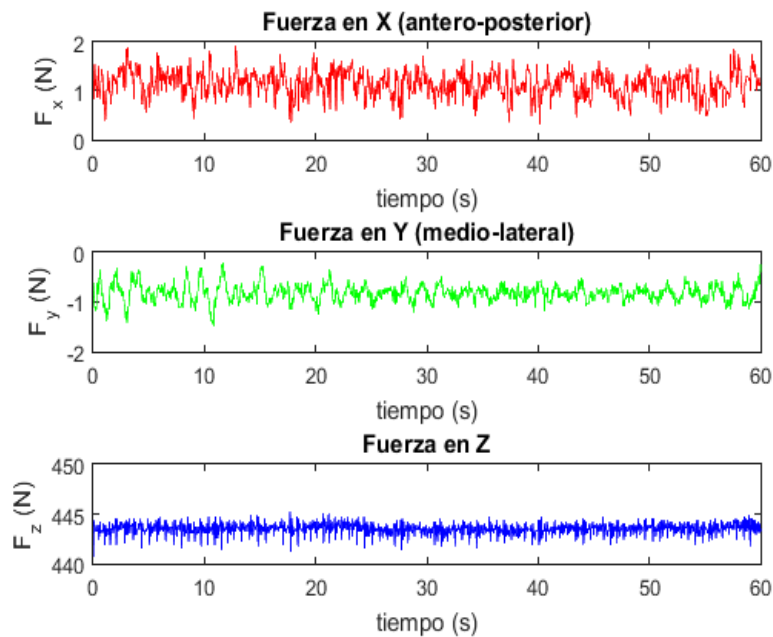


Figura 3. Lectura de la Base de Datos. Gráfica de las 3 componentes de la FRS vs tiempo [8].

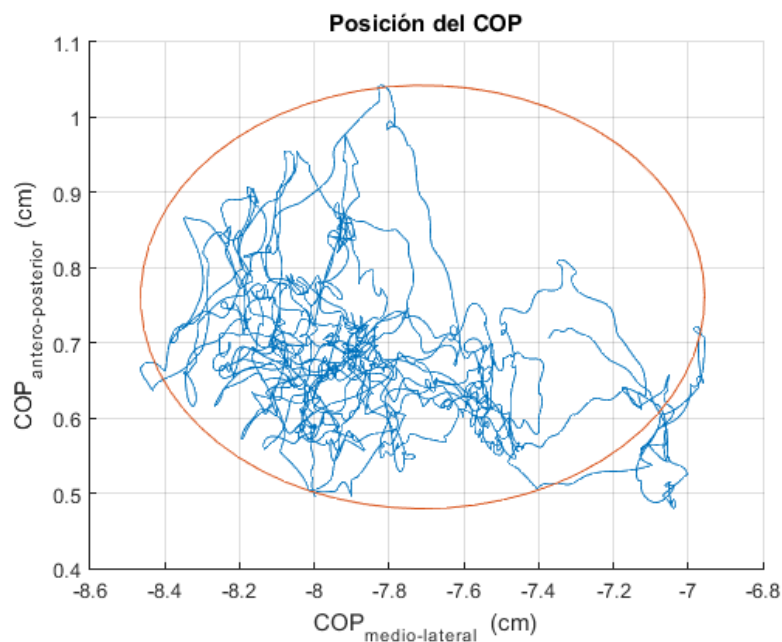


Figura 4. Gráfica de las coordenadas AP y ML del CDP de un sujeto normal. Se observa predominio de la posición del CDP en el cuadrante inferior izquierdo de la figura [8].

En esta etapa de la práctica, se plantea a los alumnos si puede distinguirse un caso normal de uno patológico mediante la observación de las gráficas, lo que evidencia la dificultad de extraer una conclusión a partir de las mismas. Esto conlleva a la necesidad de extraer parámetros de las señales, que permitan caracterizarlas de una manera más sencilla y distinguir entre casos normales y patológicos. Para lograr esto se solicita a los alumnos que extraigan los valores máximos y mínimos de las trayectorias AP y ML del centro de presiones (CDP), rango de desplazamiento en direcciones AP y ML, longitud de la trayectoria en direcciones AP y ML, así como longitud total de estas trayectorias. La extracción de estas características permite además realizar el cálculo de otros parámetros, tal como el área de una elipse conformada por las componentes AP y ML del rango de CDP. El área de esta elipse es un indicativo de la región de estabilidad del sujeto durante la prueba y permitirá establecer posteriormente una relación entre áreas.

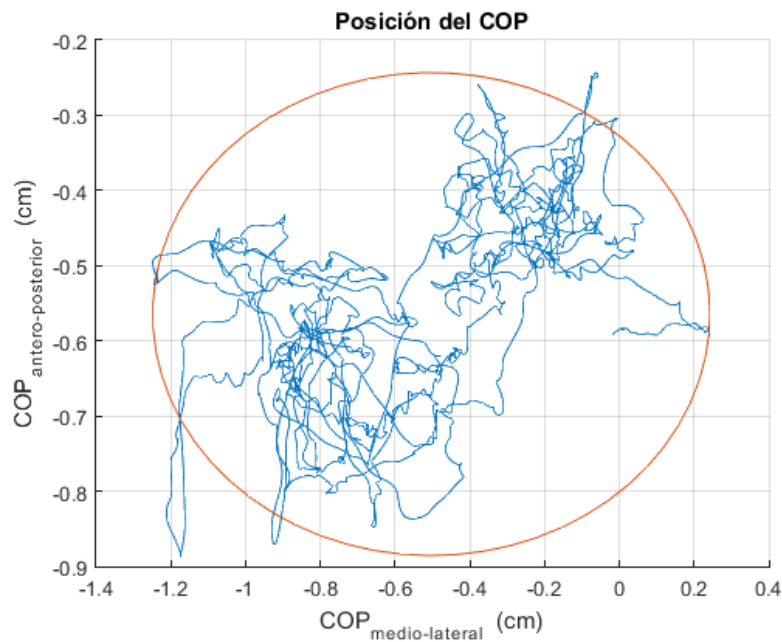


Figura 5. Gráfica de las coordenadas AP y ML del CDP de un sujeto con escoliosis. Se observa la inestabilidad en la posición del CDP [8].

Luego, a partir de las posiciones del CDP en ambas direcciones se calcula su velocidad instantánea. Se extraen también los valores de las velocidades máximas, mínimas y la raíz cuadrática media en ambas direcciones. En todo este proceso, se enfatiza el análisis de las trayectorias AP y ML del CDP, de tal modo que los alumnos comprendan que estas trayectorias (proyectadas dentro de la base de sustentación) se generan mientras el sujeto mantiene el equilibrio en bipedestación, tal como muestra la Figura 6.

Como penúltima etapa, se les brinda a los alumnos una función desarrollada por el equipo docente de la cátedra, que permite estimar la trayectoria del CDG (tanto en la dirección AP como en la ML) a partir de la trayectoria del CDP. Dicha función emplea conceptos que, si bien escapan a los contenidos vistos por el estudiante a esta altura de la carrera, serán abordados luego por otras cátedras, propiciando así la articulación vertical de contenidos. Para esto, los alumnos generan un código en MATLAB®, que sólo necesita la especificación del nombre del archivo de la base de datos. Dicho código se ejecuta tanto para el sujeto normal, como para el paciente con escoliosis y se analizan luego las cuatro situaciones propuestas: ojos abiertos, superficie de apoyo firme; ojos abiertos, superficie de apoyo inestable; ojos cerrados, superficie de apoyo firme; ojos

cerrados, superficie de apoyo inestable. Finalmente, en base a este análisis, se pide a los alumnos que obtengan sus propias conclusiones del trabajo efectuado durante la PG1.

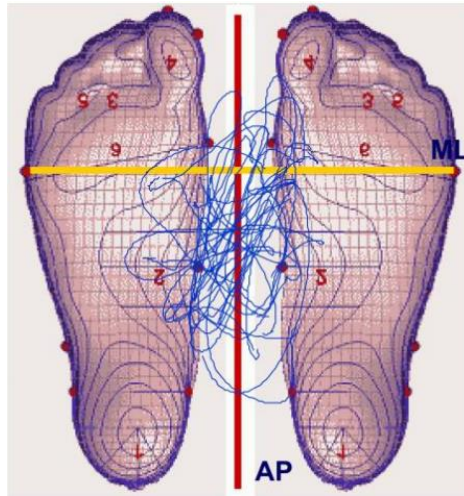


Figura 6. Gráfica del CDP en coordenadas AP y ML, junto con la base de sustentación.

3. Implementación de la Experiencia Educativa

Aplicando la metodología descrita, los alumnos de la cátedra “Biomecánica” vienen efectuando la PG1 desde el año 2015. La actividad tiene una extensión de dos clases, permitiéndole a los alumnos asimilar y aplicar los conceptos teóricos aprendidos, así como y entender el lenguaje de programación de la plataforma MATLAB®. Como parte de los resultados obtenidos mediante la realización de esta práctica, en la Figura 7 se visualiza la estimación de la trayectoria del CDG de un sujeto normal, lograda a partir del modelo del cuerpo humano en bipedestación utilizado y de los datos de la trayectoria del CDP en dirección anteroposterior. Por su parte, en la Figura 8 se observa el resultado equivalente para el caso de un paciente con escoliosis.

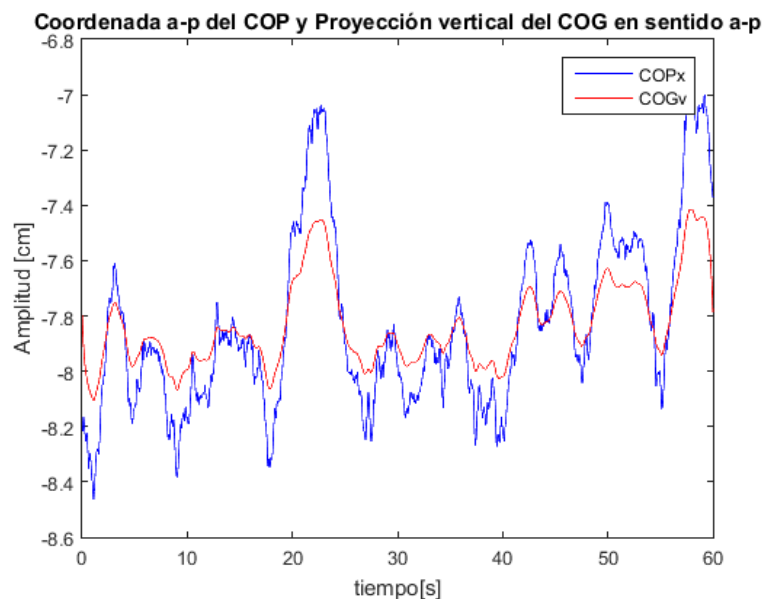


Figura 7. Estimación de la trayectoria del CDG (rojo) a partir de la trayectoria del CDP (azul) en dirección anteroposterior durante la prueba de bipedestación de un sujeto normal.

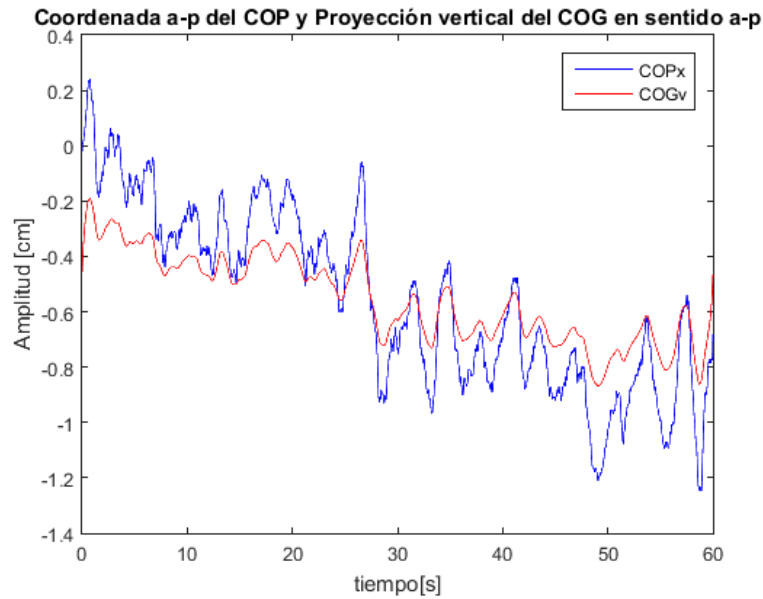


Figura 8. Estimación de la trayectoria del CDG (rojo) a partir de la trayectoria del COP (azul) en dirección anteroposterior durante la prueba de bipedestación de un paciente con escoliosis.

Además, para evaluar las actividades comprendidas en la PG1, se parte de la premisa que la evaluación implica un proceso dividido en tres etapas: a) recolección de información a través de un instrumento de evaluación, b) análisis de tal información por parte del docente y c) juicio para establecer si el aprendizaje del alumno es un reflejo del conocimiento y del desempeño que se espera que logre para cada tema evaluado. En base a esto, la cátedra utilizó un instrumento de evaluación [10], que consiste en:

- una evaluación de tipo sumativa y referida a la norma, para valorar si el alumno ha aprendido los contenidos conceptuales básicos relacionados con la temática sobre ortoprotésica abordada y,
- una evaluación de tipo formativa y referida al criterio que se espera que el alumno pueda desarrollar para adquirir e integrar conocimientos y habilidades que propicien el logro de las competencias generales y específicas planteadas para esta temática.

En particular, para implementar este segundo tipo de evaluación, se solicita a los alumnos que establezcan una comparación entre pruebas análogas para ambos sujetos y que finalmente elaboren una conclusión al respecto, intentando integrar los aspectos teóricos de la Biomecánica Postural con los resultados obtenidos en la práctica. De esta manera, se busca fomentar en el estudiante un pensamiento crítico propio y una metodología de trabajo.

Asimismo, para elaborar la PG1 se conforman grupos de trabajo (hasta 3 alumnos), lo cual promueve no sólo la adquisición e integración de contenidos conceptuales y procedimentales, sino también el desarrollo de contenidos actitudinales, tales como hábitos de colaboración, comunicación y trabajo en equipo entre ellos. Finalmente, para aprobar esta actividad, cada grupo presenta un informe escrito, el cual es evaluado por los Jefes de Trabajos Prácticos de la cátedra.

En la sección siguiente se obtienen las conclusiones de este trabajo y se analiza la manera en que la temática sobre Biomecánica Postural puede contribuir al desarrollo y adquisición de competencias potencialmente útiles para el futuro desempeño profesional de estudiantes de Ingeniería Biomédica y Bioingeniería.

4. Conclusiones

En este trabajo se describió y analizó una actividad propuesta a los alumnos de la cátedra “Biomecánica” (Plan de Estudios 2014) de la carrera de Bioingeniería de la UNSJ) para el aprendizaje de la Biomecánica Postural. Mediante las clases teóricas y prácticas dadas sobre esta temática, se busca que los alumnos puedan integrar saberes, vislumbrando particularmente su relación con el campo laboral del ingeniero biomédico y bioingeniero, previsto en las Actividades Profesionales reservadas al Título de Ingeniero Biomédico y Bioingeniero, expresadas en la RM 1603-04 [6].

Entre las Actividades Profesionales señaladas en la RM 1603-04 [6] y vinculadas con la propuesta de este trabajo figuran las de adquirir y procesar señales biomédicas con el objeto de brindar en esta caso, una herramienta de diagnóstico al médico especialista en trastornos del equilibrio de origen vestibular o central. Además, para que el alumno sea capaz de efectuar estas actividades, es necesario propiciar en él durante el cursado, la formación de competencias tecnológicas, sociales y actitudinales, tal como lo contempla el Documento de CONFEDI sobre Competencias en Ingeniería [11].

Entre las competencias tecnológicas expresadas en este documento figuran por ejemplo, la competencia para identificar, formular y resolver problemas de ingeniería, así como la competencia para utilizar de manera efectiva las técnicas y herramientas de la ingeniería [11]. Por su parte, algunas de las competencias sociales y actitudinales señaladas por el CONFEDI son las referidas a las competencias para desempeñarse de manera efectiva en equipos de trabajo, para comunicarse con efectividad y para aprender en forma continua y autónoma [11].

En este sentido, la propuesta mostrada aquí acerca del proceso de enseñanza-aprendizaje sobre Biomecánica Postural en la asignatura “Biomecánica” de la UNSJ, pretende contribuir al desarrollo de algunas de estas competencias tecnológicas, sociales y actitudinales señaladas por el CONFEDI [11], pretendiendo al mismo tiempo responder a lo expresado por la RM 1603-04 [6] respecto de la importancia de incorporar en las asignaturas de las carreras de Bioingeniería y de Ingeniería Biomédica, actividades de formación práctica cuya intensidad “*debe ser adecuadamente estimulada*”.

5. Referencias

- [1] LE HUEC, J.C. et al (2011). Equilibrium of the human body and the gravity line: the basics. *European Spine Journal*, Belgium, v.20, n.5, p.S558–S5636.
- [2] WINTER, D.A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement*. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 383p.
- [3] MASSION, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, v. 4, n. 6, p. 877–887.
- [4] GARCÍA PASTOR, C.; ÁLVAREZ-SOLÍS, G.A. (2014). La prueba de Romberg y Moritz Heinrich Romberg. *Revista Mexicana de Neurociencia*, v. 15, n. 1, p. 31–35.
- [5] HONAKER, J.A. et al. (2009). Fukuda stepping test: sensitivity and specificity. *Journal of American Academic of Audiology*, v. 20, p. 311–314.
- [6] Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología (2004). Comisión Nacional de Evaluación y Acreditación Universitaria (CONEAU), República Argentina, <http://www.coneau.gob.ar/archivos/559.pdf>.

- [7] DUARTE, M., FREITAS, S.M.S.F. (2010). Revision of posturography based on force plate for balance evaluation. *Revista Brasileira de Fisioterapia*, v. 14, n. 3, p.183–192.
- [8] DOS SANTOS, D.A., DUARTE, M. (2016). A public data set of human balance evaluations. *Peer Journal*, v. 4, p. 1–14.
- [9] DOS SANTOS, D.A. et al. (2017). A data set with kinematic and ground reaction forces of human balance. *Peer Journal*, v. 5, p. 1–17.
- [10] CANO GARCÍA, M.E. (2008). La evaluación por competencias en la educación superior. *Revista del Currículum y Formación del Profesorado*, v. 12, n. 3
- [11] CONFEDI (2014). Competencias en Ingeniería. *Documentos de CONFEDI*, República Argentina, https://confedi.org.ar/download/documentos_confedi/Cuadernillo-deCompetencias-del-CONFEDI.pdf.