



DESARROLLO Y APLICACIONES DE
NEUROPRÓTESIS DEL SISTEMA
VESTIBULAR Y EL EQUILIBRIO

ENRIQUE SOTO
INSTITUTO DE FISIOLÓGÍA, BUAP

DESARROLLO Y APLICACIONES DE NEUROPRÓTESIS DEL SISTEMA VESTIBULAR Y EL EQUILIBRIO

La bipedestación es inherentemente inestable y sujeta a múltiples perturbaciones. El control de la postura en los animales bípedos involucra una integración compleja de información sensorial propioceptiva, vestibular y visual. Los órganos vestibulares periféricos actúan como sensores de aceleraciones lineales y angulares de la cabeza. Los centros de control cerebrales usan la información vestibular para definir la posición cefálica con respecto al entorno, relacionándola con entradas de otros sistemas sensoriales para producir respuestas motoras y mantener el equilibrio y la estabilización de la mirada. Además, el aparato vestibular genera procesos cognitivos que modulan el movimiento, previenen oscilaciones y definen una vertical para realinear el cuerpo. La entrada vestibular contribuye así a la navegación del sujeto en su entorno, a la generación de un mapa de referencia inercial y a procesos cognitivos relacionados con la imagen y el esquema corporal.

Función vestibular en la vejez y en la enfermedad

El envejecimiento se relaciona de manera significativa con la aparición de desequilibrio. Se sabe que el 40 % de pacientes geriátricos, en algún momento de su vida, ha consultado a algún médico por “mareo”. De todos los pacientes mayores de 60 años, 20 % ha experimentado vértigo lo bastante grave como para que afecte sus actividades cotidianas (Agrawal, 2017). El vértigo es la causa del 1 % de consultas médicas en EE. UU. En el anciano, el mareo y el vértigo están asociados a enfermedades cardiovasculares, neurológicas o a disfunción vestibular; en sujetos jóvenes,

usualmente, a disfunción vestibular periférica. La degradación de la función vestibular en la edad adulta se denomina presbivestibulopatía, condición que es, en cierta forma, análoga a la pérdida visual y auditiva que sufren los ancianos. Desde el punto de vista social, los individuos con vértigo y mareo evitan sistemáticamente participar en reuniones aun en su casa, y evitan también salir de casa debido a la inestabilidad y temor a caminar, lo que afecta significativamente su calidad de vida.

Por otra parte, las lesiones vestibulares son altamente discapacitantes. Ante un desplazamiento, el sujeto con daño vestibular recibe señales alteradas de su movimiento, lo que produce la sensación de vértigo. La rehabilitación es importante para mejorar la calidad de vida de los pacientes, ya que les permite reintegrarse a sus actividades y limita el avance del deterioro de su función vestibular. La investigación orientada al desarrollo de alternativas terapéuticas y dispositivos prostéticos para el tratamiento de los desórdenes vestibulares es de suma importancia y permitirá, en el futuro, ofrecer mejores perspectivas a los sujetos con daño vestibular.

En nuestro trabajo de investigación nos hemos centrado en el desarrollo de dispositivos prostéticos como una medida para contrarrestar los efectos de las alteraciones vestibulares, ya sea por patologías específicas o por la vejez.

Función vestibular en vuelos espaciales

La exploración espacial entraña numerosos desafíos técnicos, incluidos los referentes a los sistemas de propulsión, la salud y la medicina espacial humana,

el costo de las tecnologías espaciales, los aspectos ambientales relacionados con la producción y el lanzamiento, la eliminación activa de desechos en el espacio y el mantenimiento en órbita, entre otros. A medida que aumenta la duración de las misiones espaciales, los requisitos para evitar alteraciones de salud se vuelven más complejos. Es necesario desarrollar medidas para contrarrestar las alteraciones fisiológicas y de salud, porque el éxito de las misiones podría verse comprometido si los astronautas no pueden llevar a cabo funciones esenciales. Las fallas en el desempeño sensoriomotor durante el pilotaje, la actividad extravehicular o las tareas de orientación plantean riesgos importantes para las misiones. Es por ello necesario abordar los problemas que produce la ingravidez antes de considerar seriamente las misiones humanas de larga duración.

En nuestro trabajo hemos encontrado que los dispositivos de prótesis vestibulares constituyen una contramedida a los cambios fisiológicos inducidos por la microgravedad, particularmente aquellos asociados con el sistema vestibular y el conflicto neurosensorial, los cuales pueden conducir a alteraciones significativas en el ser humano y su desempeño en el espacio (Soto y Vega, 2024) (Figura 1).

Figura 1. *Aplicaciones del dispositivo. El dispositivo tiene dos vertientes: una de orden médico, relacionada con las lesiones vestibulares y con el deterioro de la función vestibular por la vejez (presbivestibulopatía), y otra de orden aeroespacial, relacionada principalmente con el uso del dispositivo como medida para contrarrestar los efectos deletéreos de la microgravedad sobre las funciones cognitivas y motoras.*

Uso médico (Prótesis vestibular)

- Lesiones vestibulares
- Fobias y problemas cognitivos
- Caídas en ancianos

Uso Aero-espacial (Dispositivo de estabilización)

- Contramedida de los efectos de la Microgravedad
- Entrenamiento de pilotos

Estimulación Galvánica Vestibular (EGV) y el desarrollo de una prótesis vestibular

La EGV es un método de estimulación eléctrica transcraneal que, según cómo se aplica, produce respuestas posturales específicas relacionadas con la activación de los órganos vestibulares, respuestas que influyen en el control de la posición, el equilibrio y la estabilidad visual y cognitiva. El método consiste en aplicar una corriente eléctrica de alrededor de 1 mA mediante electrodos colocados, al menos uno, sobre la apófisis mastoides en la parte posterior del oído. La EGV modula la actividad eléctrica de las neuronas vestibulares de tal forma que la corriente catódica aumenta la frecuencia de descarga de las neuronas, mientras que la anódica la disminuye. Este efecto de la EGV sobre la actividad eléctrica de las neuronas vestibulares produce respuestas análogas al movimiento de la cabeza, por lo que mediante el uso de dichas corrientes se pueden inducir respuestas posturales similares a las que produce el movimiento. En nuestro laboratorio hemos

desarrollado estudios sistemáticos y adecuadamente parametrizados del efecto de la posición de los electrodos, de las polaridades y modalidades de la corriente de la EGV sobre las respuestas posturales, la estabilización visual y la actividad de la corteza cerebral en sujetos experimentales.

El dispositivo prótesis que ha desarrollado nuestro grupo de investigación se basa en el uso de la EGV. La prótesis utiliza un sistema de giróscopos y acelerómetros en tres dimensiones para detectar los desplazamientos de la cabeza, procesar la salida de dichos sensores a través de un modelo matemático de la función vestibular y, finalmente, inyectar una corriente eléctrica mediante electrodos en las regiones periauriculares. Dicho dispositivo y sus variantes han sido patentados tanto en México como en los Estados Unidos y Rusia.

Con el uso de la prótesis, el paciente obtiene información de los movimientos de la cabeza y produce los reflejos necesarios para controlar la postura, contribuye a los procesos relacionados con la generación del esquema corporal y ofrece un bienestar al sujeto, derivado de la capacidad de reconocer su posición y sus desplazamientos en el medio.

El dispositivo de estimulación es de grado médico y, por seguridad, opera con baterías, según la propuesta de patente. La tecnología es confiable y bien tolerada, y no representa riesgo para los pacientes. Estas características determinan que sea un dispositivo novedoso que se puede aplicar en humanos; además, tiene aplicaciones tanto en medicina como en la investigación espacial.

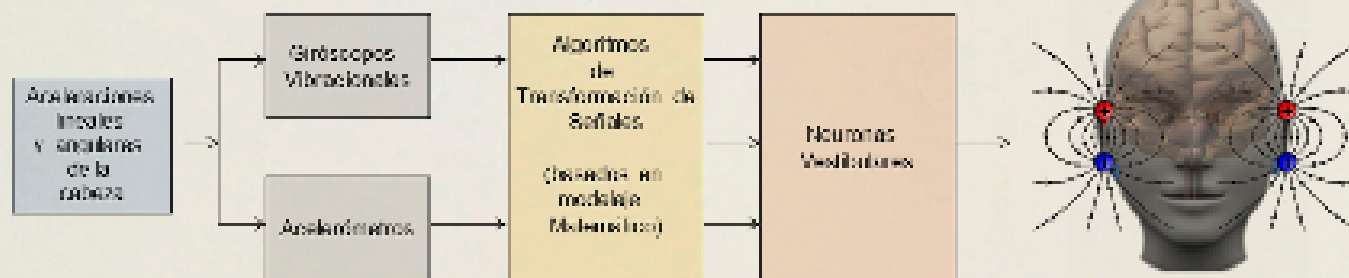


Figura 2. Esquema general del corrector de orientación espacial. Un conjunto de sensores electromecánicos detecta las aceleraciones de la cabeza; su salida se procesa mediante un modelo matemático de la función vestibular. Como resultado, se obtiene una corriente de estimulación que es dependiente del movimiento de la cabeza y permite al sujeto con alteraciones o en microgravedad tener información del desplazamiento de su cabeza.

Conclusiones

Las prótesis vestibulares de carácter no invasivo no requieren de procedimientos quirúrgicos y están basadas en métodos que permiten al sujeto obtener información acerca de las aceleraciones a que se somete la cabeza por sustitución sensorial (por ejemplo, un sonido o un estímulo eléctrico en la piel). En este caso, las capacidades plásticas del paciente juegan un papel esencial en el funcionamiento del sistema prostético. Aunque la patente protege la posibilidad de implantación quirúrgica, hemos insistido en desarrollar el dispositivo en su forma no implantable. Consideramos que así puede tener aplicaciones en la medicina de rehabilitación, para su uso en ancianos y en investigación aeroespacial.

Lecturas recomendadas

Soto E y Vega R. (2024). Use of Galvanic Vestibular Stimulation device as a countermeasure for microgravity effects in spaceflight. *Frontiers in Space Technologies and Space Exploration*, 5:1422868. doi: 10.3389/frspt.2024.1422868

Soto E, Pliego A and Vega R (2023) Vestibular prosthesis: from basic research to clinics. *Frontier in Integrative Neuroscience*, 17:1161860. doi: 10.3389/fnint.2023.1161860

Vega, R., Soto, E., Pliego, A, Alexandrov, A., Alexandrova, A. (2016). Dispositivo para la estabilización de la postura en microgravedad (Cap. 9). *Medicina Espacial*. Coord.: Carrillo Esper R, Díaz Ponce J A, Padrón San Juan L. ANM. pp 121-137. Disponible en: https://www.anmm.org.mx/pdf/acerca_de/CANivANM150/Medicina_Espacial.pdf.