

Evaluación de los sistemas de medición de la fuerza muscular en el ámbito de la práctica musical. Aproximación a un prototipo apto para la práctica instrumental

Evaluation of the systems for measuring muscle strength applied to musical practice.
Approach to a prototype suitable for instrumental practice

Gomila-Serra B ^{1,4}, Rosset-Llobet J ^{1,2}, Padullés-Rius JM ³, Fàbregas-Molas S ², Bonet-Bonet J ⁵

¹ Fundació Ciència i Art - Terrassa, Barcelona. ² Institut de Fisiologia i Medicina de l'Art - Terrassa, Barcelona. ³ Grup de Recerca en Ciències de l'Esport. ⁴ Grup d'Investigació Social i Educativa en l'Activitat Física i l'Esport - INEFC Barcelona. ⁵ INEFC Barcelona.

Resumen

Objetivo: Evaluar los sistemas de medida de la fuerza, en tiempo real, que ejerce la mano sobre el instrumento al tocar (piano y guitarra) y conocer la fuerza ejercida por la mano del músico, en tiempo real, sobre el instrumento.

Material y Método: Se analizaron sobre el instrumento, utilizando como sujetos un guitarrista y un pianista experimentados. Para cada sistema analizado se valoró el grado de interferencia con el gesto técnico musical; la posibilidad de intercambiarlo cómodamente de un instrumento a otro; la resistencia al deterioro con el uso (especialmente al trabajar sobre cuerdas); la existencia de un sistema y *software* de captura y análisis de los datos que permitiera al usuario definir alarmas o niveles de alerta útiles para poder hacer un trabajo de reeducación de la tensión utilizada para tocar (*biofeedback*). Se estableció un protocolo de pruebas y se experimentó con cada uno de los sistemas mencionados sobre ambos instrumentos (piano y guitarra). Finalmente, con el método que dio mejor resultado se procedió al estudio de la fuerza ejercida por la mano del músico sobre el instrumento.

Resultados: Las medidas recogidas mostraron en el caso de la guitarra un pico de fuerza máximo de 9,14N (0,93Kg) y en el piano se superaban habitualmente los 9,8N (1kg de fuerza).

Conclusiones: Los sensores de presión miniaturizados recubiertos con una funda de látex ultrafino han resultado ser eficaces para el estudio de la fuerza isométrica y concéntrica desarrollada por la mano del músico.

Palabras clave: medición de fuerza, presión, sensores miniatura, mano, piano, guitarra, músico.

Abstract

Objective: determine, in real time, its usefulness in the study of the force exerted by the hand of the musician on the instrument (piano and guitar) and the force exerted by the hand of the musician on the instrument, in real time.

Material and methods: Systems better adapted to the requirements of musical practice were chosen and analyzed on the instrument, using as experimental subjects a guitarist and a pianist. For every system examined the following was considered: the degree of interference with the musical technical act; easiness to swap the system from one instrument to another; resistance to deterioration with use (especially working on strings) and existence of a system and software to capture and analyze data that allow the user to set alarms or alert levels that will help him to do reeducation of the tension used to play (*biofeedback*) were analysed.

Results: The guitar measures showed a maximum peak force of 9.14 N (0.93Kg) and the piano usually exceeded 9.8 N (1kg force). The other analyzed systems (thermal imaging, Chronopic, EMG and accelerometer) let us study the force, however important limiting factors behaved they were discarded.

Conclusions: Miniature pressure sensors coated with an ultrathin latex sheath have proved effective for the study of the isometric and concentric force developed by the hand of the musician.

Keywords:

Force measurement, pressure, miniature sensors, hand, piano, guitar, musician.

Correspondencia

B. Gomila Serra
Ctra. de Montcada 668. 08227 Terrassa.
e-mail: betlem@fcart.org

I Introducción

La supuestamente placentera actividad de tocar un instrumento musical se asocia con un elevado índice de problemas médicos que se manifiestan a partir del segundo o tercer año de formación y, en uno de cada tres músicos, frenan o terminan con su carrera musical [1-4]. En los trabajadores manuales la aplicación de excesiva fuerza con la mano es más dañina que los movimientos monótonos repetitivos [5-7].

En el entorno musical, hay que ejercer cierta fuerza sobre la tecla, la cuerda o la llave del instrumento. Sin embargo, aplicar mayor fuerza no significa que exista algún cambio en el resultado sonoro y, por el contrario, hay más demanda muscular. El uso de excesiva fuerza es más patente durante el proceso de aprendizaje. Como ocurre en cualquier actividad motriz compleja, cuando el sujeto no tiene automatizada la tarea, tiende a utilizar una tensión muscular añadida que le permite mejorar la ejecución. Lo deseable es que, una vez automatizado el acto motor, esa tensión desaparezca. Pero, a menudo, y como también acontece en otros ámbitos, entre ellos el deportivo, el proceso de aprendizaje se detiene sin haberse superado esta fase [8][9].

Cada vez existe mayor consenso en que la aplicación reiterada de esta tensión sobrante es claramente perjudicial [6][10][11]; sin embargo, este proceso es inconsciente y, por tanto, difícilmente perceptible, cuantificable y modificable.

No disponemos de la tecnología adecuada que permita saber cuál es la fuerza precisa que debe realizar para tocar, ni tampoco estudios que cuantifiquen la relevancia de este factor en la práctica instrumental.

Nuestra hipótesis es que, si el intérprete fuera consciente y rebajara esa fuerza excesiva que está ejerciendo, las patologías que sufren los músicos, incluso noveles y, por extensión, los trabajadores manuales, podrían disminuir. Por ello, nos planteamos como objetivos de esta investigación estudiar los sistemas de medición existentes que puedan tener alguna aplicabilidad en el músico y, a partir de la información obtenida, desarrollar un sistema de medición lo más ajustado posible a los requerimientos del músico. El sistema debería permitir el estudio en tiempo real de la fuerza ejercida por la mano sobre el instrumento para po-

der precisar cuáles son las cargas de fuerza muscular que desarrolla el músico a ese nivel sin interferir significativamente sobre la ejecución.

Para diseñar el prototipo hemos experimentado en una línea prioritaria, en la que el sistema de medida no interfiriera, ni con el músico ni con el instrumento, y una segunda línea donde sí se aceptaba que el sistema produjera un cierto grado de interferencia.

I Material y métodos

Participaron en la prueba piloto una pianista y un guitarrista, sin patología del sistema músculo-esquelético, con estudios de grado medio. El protocolo fue aprobado por el comité ético de la Fundació Ciència i Art y los dos participantes dieron su consentimiento informado por escrito a participar en las pruebas.

1- Instrumentos musicales: durante toda la investigación se utilizaron un piano de cola, Samick SG205, y una guitarra acústica, Starsun con cuerdas Fender.

2- Sistemas de medición: Sin interferencia, cuando no existía contacto ni con el músico, ni con el instrumento musical (Tabla 1). Las mediciones directas fueron aquellas que se compararon con un patrón de referencia preestablecido y convencional. Así medimos directamente la actividad eléctrica de un músculo a través de la electromiografía. Cuando estas medidas no se pudieron efectuar por comparación directa con el patrón de referencia, sino que se extrapolaron a partir de cálculos matemáticos, era una medición indirecta.

A) La cámara de termografía ARTCA-320 (Infaimon España) era un microbolómetro capaz de visualizar y capturar imágenes térmicas. Capturaba imágenes de 320x240 píxeles y medía temperaturas entre -40 y 540°C, con un sensor Unti-Coolong Microbolometer (Refrigeración Peltier), con un PixelPitch de 23,5 µm, velocidad de captura de 25 imágenes/sec progresivas, longitud de onda de 8 a 14 µm y una lente de 8 mm.

B) El sistema ChronoPic (Chronojump, España) era una tarjeta, a través de una o más plataformas de contacto, que registró la frecuencia de impactos producidos y cronometró el contacto, así como el tiempo transcurrido entre eventos producidos y enviar los resultados a un PC a través de un puerto serie.

Tabla 1.

	Sistemas valorados y experimentados	Material	Medida
A	Medición de la temperatura superficial del instrumento y del músico a través de una cámara de termografía.	Cámara de termografía.	Indirecta
B	Medición del impacto de los dedos sobre el instrumento.	Sistema Chronopic.	Indirecta

Tabla 2.

	Sistemas valorados y experimentados	Material	Medida
C	Electromiografía de superficie.	MuscleLab EMG 4000E.	Indirecta
D	Aplicación de un acelerómetro en el músico, en una zona de no interferencia.	Acelerómetros triaxiales Plux.	Directa
E	Medición a través de la colocación de sensores en el músico en zona de interferencia.	Minisensor ForcePlux circular.	Directa

C) Para las mediciones con interferencia, cuando existía contacto del sistema de medida con el instrumento o con el músico (Tabla 2), se utilizó el MuscleLab EMG 4000E (Ergotest Innovation, Noruega), un dispositivo conectado a un ordenador portátil para realizar el análisis neuromuscular y detectar y amplificar los procesos biológicos que ocurrían en la contracción muscular, tanto dinámica como isométrica. También medía variables mecánicas lineales y angulares (velocidad, aceleración, fuerza y potencia). Además, permitía medir la posición, el ángulo articular, la velocidad, la aceleración, la fuerza, la potencia y la EMG al disponer de 16 canales.

D) El acelerómetro triaxial Plux (Plux, Portugal) detectó los cambios de movimiento en los tres ejes, con una amplitud de medición ± 3 g y resiste a los golpes de hasta 10 kg.

E) El minisensor ForcePlux circular (Plux, Portugal) de fuerza circular, con un grosor de 0,2 mm. Con su bajo tiempo de respuesta ofrecía un rendimiento máximo, proporcionando información a tiempo real. El límite de carga máxima era de 10 kg/cm². El acelerómetro triaxial Plux y los minisensores circulares Plux se conectaron al emisor-procesador BioPlux mini (Plux, Portugal), un sistema de medición telemétrico que se destaca por su reducido tamaño (8,4 cm x 5,3 cm x 1,8 cm) y por su ligereza (86 g de peso). Los datos fueron transmitidos del procesador al ordenador por tecnología Bluetooth. El sistema efectuó el procesamiento en tiempo real y constaba de un acondicionador y un procesador para el registro y tratamiento de la señal, además de un software para la visualización, almacenado y tratamiento de los datos recibidos.

El protocolo seguido durante todas las pruebas fue, en la guitarra, la ejecución de acordes de DO Mayor y escala de La Mayor a 84 ppm. En el piano, escala de DO Mayor y RE Mayor a 84 ppm y 126 ppm. La escala de Re Mayor en el piano servía para probar la adaptación del acelerómetro y los sensores de fuerza a las teclas de sostenidos, con forma y tamaño diferente a las teclas blancas.

El procedimiento seguido en los diferentes sistemas consistió en: A) Con la cámara de termografía ARTCA-320 se mi-

dió la temperatura superficial del instrumento y de la extremidad superior del músico a través de la cámara de termografía. Se colocó la cámara a 1,5 m de distancia del sujeto y se midió mediante la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético la temperatura superficial del sujeto y del instrumento. B) Sistema Chronopic. Sobre un interruptor formado por dos láminas separadas y cubierto por una tela plástica, se simuló un teclado de dos octavas. En realidad, en el momento de contacto sobre el teclado ficticio, el sujeto estaba presionando sobre una de las láminas cerrando el circuito cerrado. Ello permitía obtener una medida directa de la frecuencia de los impactos ejercidos, la duración de cada impacto y el tiempo entre los diferentes eventos. C) MuscleLab 4000 EMG: electromiografía de superficie. Se fijaron los electrodos en la parte central de los músculos flexores de los dedos de la mano izquierda, mediante la capa autoadhesiva que llevan incorporados los sensores. Se inició la medición para detectar la respuesta eléctrica de la contracción muscular, los niveles y los tiempos de activación muscular. D) Acelerómetro triaxial Plux: se ubicó el acelerómetro triaxial, sujetado con una cinta adhesiva suave en la parte posterior del dedo, una zona que se consideró que no interferiría con la interpretación musical. Inicialmente se colocó el sensor de manera que su extremo coincidiese con el final del dedo y después se experimentó en posiciones más proximales, sin llegar a superar la tercera falange. Las pruebas se realizaron en el dedo índice, corazón y anular de la mano izquierda. 5. Con los sensores colocados en el músico en zona de interferencia, se experimentó con los diferentes sensores de fuerza Plux (circular menor y mediano). Se colocó un solo sensor en un único dedo y se probó en los dedos anular, índice y pulgar. Para determinar la colocación del sensor, tanto en la guitarra como en el piano, se observó la zona de contacto del músico con el instrumento, ese sería el punto exacto donde se ubicaría el sensor. Para su fijación se utilizó cinta adhesiva suave y, posteriormente, se sustituyó por una funda de látex ultrafino, que cubría el dedo, el sensor y el cableado.

Para determinar la fuerza ejercida por la mano del músico sobre el instrumento, se midió con el sistema que dio

mejor resultado siguiendo, tanto en la guitarra como en el piano, el mismo protocolo.

I Resultados

De los sistemas explorados para el desarrollo del prototipo, en la línea de investigación donde no había interferencia entre músico e instrumento, hallamos que la medición de la temperatura superficial del instrumento y del músico (Figura 1), permitía tocar sin ningún tipo de obstáculo entre el músico e instrumento musical. Sin embargo, no se detectaron cambios de temperatura significativos durante la interpretación musical y, cuando se observaron, la resolución temporal era muy baja, el aumento del esfuerzo realizado comportaba cambios en la temperatura al cabo de minutos de estar tocando, y se requería mucho tiempo de ejercitación para conseguir apreciar alguna modificación. Por otro lado, una vez captados los valores de temperatura, resultó muy complicado interpretar los cambios y convertir estos valores, de la piel de la zona ejercitada o de la superficie del propio instrumento musical, en indicadores de fuerza. Otros factores limitantes fueron la complejidad de calibrar el sistema y su elevado coste.

El sistema Chronopic permitió el movimiento de las manos totalmente libres de cables y sensores pero se desestimó pues no era viable aplicarlo directamente sobre el instrumento (piano, guitarra,...) Además, al medir con el teclado simulado, la acción efectuada al tocar no se ajustaba al movimiento real. También fue difícil su aplicación y manejo para la población no experta, precisaba de un rediseño del circuito y lo más importante, no proporcionaba una medida directa de la fuerza.

En los sistemas de medición donde había contacto con el instrumento o con el músico, la EMG permitió registrar la

lectura de la fuerza de forma indirecta a partir de la señal electromiográfica de superficie. Sin embargo, era preciso tipificar los músculos utilizados para cada instrumento, aspecto no descrito en amplitud en la literatura médica o técnica, y, en segundo lugar, era necesario establecer unos modelos de comportamiento generalizables para todos los músicos, lo cual no era nuestro objeto de estudio. El resto de sensores del sistema MuscleLab (galgas extensiométricas o uniaxiales, así como los acelerómetros) resultaron ser de excesivo tamaño, no aptos para el trabajo sobre el instrumento musical y no proporcionaban información útil sobre la fuerza.

La aplicación del acelerómetro en el dorso del dedo, resultó una de las mejores alternativas, al no haber ningún objeto que interfería entre dedos e instrumento. Después de varias pruebas colocando el acelerómetro en zonas diferentes de la tercera falange del dedo, no se registró ningún tipo de señal de fuerza en la fase isométrica, sin embargo, sí se detectaba el cambio de velocidad del dedo hasta el momento del impacto, por ello se consideró este sistema de gran interés para estudios donde la aceleración sea un factor relevante, como podría ser la fatiga muscular, tanto en músicos como otros colectivos de trabajadores manuales. Aún así, no resultó útil para la medición de la fuerza realizada.

E) Minisensor ForcePlux circular fue el único método que nos ofreció medidas directas de la fuerza ejercida. Entre los modelos existentes, el sensor de 0,2 mm de grosor y un área de $\pm 0,1 \text{ cm}^2$ resultó el más adecuado. Interfería escasamente en el gesto técnico musical pues, al ser tan pequeña la zona cubierta por el sensor, la mayor parte del pulpejo podía contactar con el instrumento. Ello posibilitó tocar con cierta normalidad, y aunque se modificaba la sensibilidad, se mantenía una sensación de tacto suficiente para sentir la cuerda o la tecla (blanca o negra). El sensor mediano, se

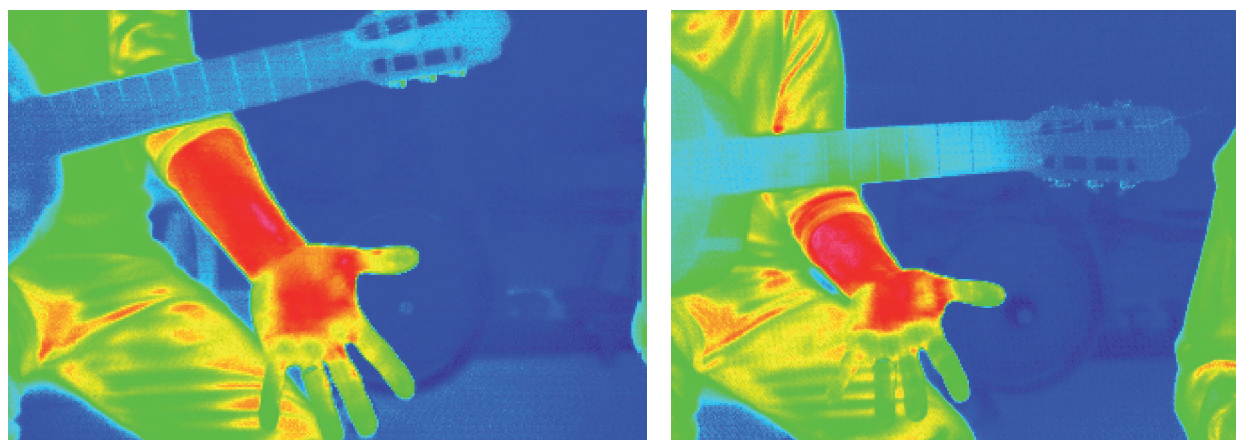


Fig. 1. Figura 1. Se aprecia el aumento de la temperatura en algunas zonas de la palma de la mano (mayor intensidad de rojo). El cambio de temperatura se refleja también en el mástil de la guitarra.

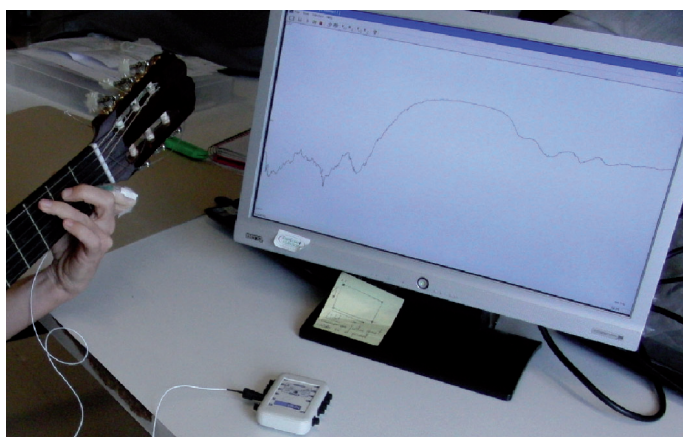


Fig. 2. Minisensor ForcePlux circular colocado en el dedo índice de un guitarrista. Permite cuantificar y visualizar gráficamente y en tiempo real la fuerza ejercida sobre la cuerda al tocar.

descartó por la razón contraria. Cubría la mayor parte de la yema del dedo con lo cual el tacto quedaba tan afectado que se perdía casi toda la sensibilidad.

En las pruebas realizadas con este sistema, el dedo índice fue el más indicado en la recogida de registros de fuerza continua. El sensor aplicado en el anular o pulgar creaba mayor sensación de molestia y en el caso del pulgar con la guitarra, se obtenían únicamente medidas discontinuas (Figura 2).

El mejor resultado se obtuvo al proteger el sensor ubicado sobre el índice con una funda de látex ultrafino que sujetaba tanto el sensor como el cableado. Contrariamente a nuestra hipótesis inicial, creaba mayor interferencia tocar sin la cobertura de látex que con ella.

Con todo lo expuesto, conseguimos disponer de un sistema que, tal y como se requería, recogía e informaba de la fuerza ejercida de forma continua con un *feedback* inmediato, permitía ser intercambiado cómodamente de un instrumento a otro, no se deterioraba fácilmente con su uso, incluso al trabajar sobre las cuerdas y era capaz de medir varias variables simultáneamente, en instrumentos con características diferentes fuesen de teclas o de cuerdas (Gráfico 1).

En cuanto al estudio de la fuerza ejercida por la mano del músico, en tiempo real, sobre el instrumento, el sistema de Minisensores ForcePlux circulares, permitió recoger y almacenar información sobre la fuerza media, el pico de fuerza o F_{max} , el índice fuerza-velocidad: $f-v$ (F_{max}/tpf) y la duración de la acción o tiempo de aplicación de cada tipo de fuerza. Tanto en la guitarra como en el piano, estos sensores miniaturizados medían con precisión los valores del rango inferior de fuerzas. Sin embargo, tenían tan alta sensibilidad que, al sobrepasar el kilogramo de fuerza, la señal quedaba saturada y no era posible conocer los valores má-

ximos que el músico desarrollaba. En el piano la saturación se producía casi constantemente. En la guitarra se observó que el pico máximo de fuerza se situaba en 9,14 N (0,93 kg) (Gráfico 2).

Discusión

Esta investigación nos ha confirmado que es posible medir la fuerza ejercida por el músico al tocar. Sin embargo, los sistemas existentes no permiten una medición en condiciones óptimas. Los que no provocan interferencias en la ejecución no aportan datos útiles mientras que los que sí interfieren, además del problema de la mayor o menor interferencia sobre el gesto musical, requieren de futuras modifi-

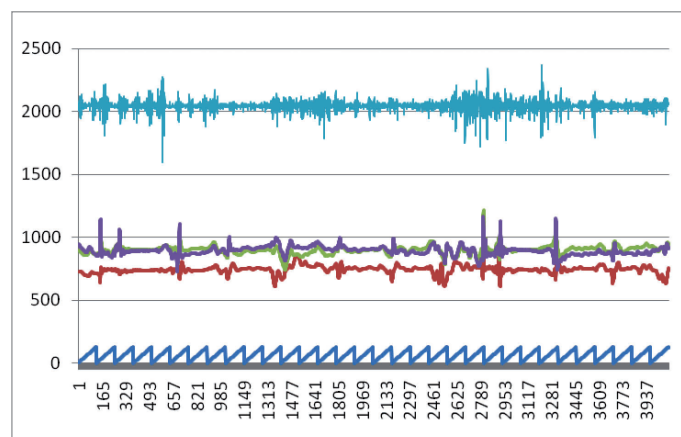


Gráfico 1. Datos obtenidos mediante el sistema Plux. Permite la recogida simultánea de distintas variables: electromiografía de superficie (trazado superior), aceleración (trazados centrales) y las repeticiones realizadas (trazado inferior). En este ejemplo se observan los resultados obtenidos al realizar una escala de DO Mayor en el piano a 84 pulsaciones por minuto (las unidades obtenidas son en microvolts).

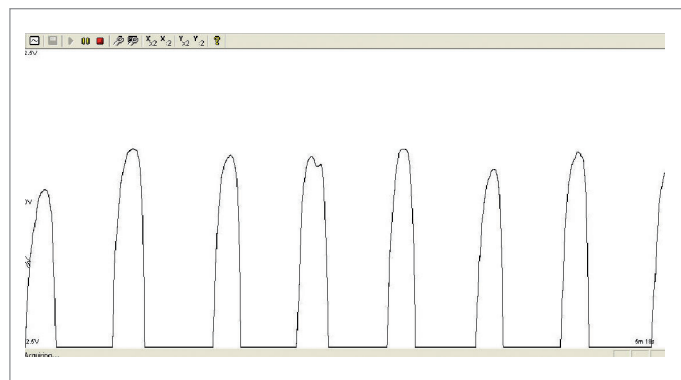


Gráfico 2. Representación gráfica de la fuerza ejercida por el dedo índice al realizar una escala de La Mayor sobre la guitarra. En este caso se registraron valores inferiores a los 3,75 milivolts por lo que no se saturaba la señal obtenida.

caciones. Por lo tanto, el presente trabajo es un punto de inicio, sobre la utilidad del material que se puede encontrar en el mercado. Los resultados de este estudio definen el proceso para ajustar y mejorar las prestaciones y adaptarlos a los requerimientos que demanda la medición de las cargas de fuerza en tiempo real en los músicos. Atendiendo a que esto requiere la modificación de los sensores existentes en posteriores estudios, se deberá contar con la colaboración de las empresas que han desarrollado estos sistemas.

La mejor opción para la medición en tiempo real de la fuerza ejercida al tocar un instrumento musical sería un sistema que no interfiriera en la ejecución pero los sistemas de este tipo que hemos analizado no han dado buenos resultados. Autores han experimentado con otros procedimientos, a priori interesantes. Mascaró et al [12] predijeron la fuerza generada por el dedo, mediante un fotoplethismógrafo, sensor que a partir del color de la uña del dedo, deduce el volumen de sangre bajo la uña y de ahí extrapola la fuerza que está ejerciendo el dedo pero, aunque parece sugerente al no requerir la aplicación de ningún sensor o aparato al músico o al instrumento, adolece de varios problemas que nos llevaron a no considerarla como útil para nuestro estudio. En primer lugar no existen correlaciones establecidas en músicos, entre el color de la uña y la fuerza ejercida. El segundo problema es que se requiere calibrar el sistema en cada medición. Además, los resultados no son inmediatos; el análisis se hace posteriormente, con lo que no se puede informar al músico mientras toca, uno de los principales objetivos del sistema que se quiere conseguir. Por último, las herramientas de captura de la información y su posterior análisis son complejos y de elevado coste.

Otra posibilidad en esta misma línea no interferencial sería medir la fuerza a partir de la aplicación de sensores en el instrumento. Ello presenta diversos inconvenientes que nos han llevado también a descartarlo. Requiere la modificación del instrumento musical, por lo que no se podría trabajar con el del propio músico. Se debería diseñar un sistema de captura para cada uno de los instrumentos. En el caso del piano se deberían aplicar sensores en cada una de las teclas o, en los instrumentos de viento, en cada una de las llaves sobre las que se quisiera trabajar. Además, en algunos instrumentos, como la guitarra, el músico presiona sobre la cuerda y no siempre llega a contactar con la madera del mástil. Si los sensores estuvieran en el mástil, que parece la opción más viable, una parte importante de la información no quedaría registrada. Por otro lado, la señal obtenida sería de tipo analógico, por lo que se requeriría una posterior conversión digital que complicaría un poco más la obtención de datos en tiempo real.

Una vez descartada la posibilidad de encontrar un sistema que permitiese realizar la medición sin que esto interfiriera en la ejecución musical se optó por experimentar con aquellos sistemas que requerían la aplicación de artilugios en el músico o entre el músico y el instrumento. En el caso del sistema multicanal MuscleLab presentó diversas limitaciones. La más destacada es que sin la señal electromiográfica tipificada y sin patrones de comportamiento aplicables a la actividad musical resulta imposible la valoración de la señal eléctrica muscular obtenida.

Por último, en el apartado de resultados afirmábamos que el acelerómetro triaxial Plux no resultó útil para la medición de la fuerza realizada. Esto se debe a que este sistema nos permite extrapolar la fuerza en la fase dinámica del movimiento, pero no informa de la fuerza isométrica ejercida mientras se mantiene la tecla o cuerda presionada, con el añadido de que la fuerza desarrollada en esta fase es la más lesiva por su componente isométrico y porque tiene una duración mucho mayor que la desarrollada en la fase dinámica.

Dentro de esta misma línea y en el intento de medir fuerzas desarrolladas por la mano humana, otros investigadores han presentado propuestas interesantes, que si bien descartamos en la primera fase de análisis de los sistemas existentes, creemos muy atractivos y a tener en cuenta para otras aplicaciones en músicos que no estén sujetos a los condicionantes del presente estudio [13][14]. Se trata de la utilización de materiales sensibles a la presión. Se presentan en formato de papel de silicona y en plástico PVC. En función del grado de fuerza ejercida sobre ellos su color se modifica. Ya que existe una correlación entre el color y la presión ejercida, los datos obtenidos se pueden convertir en una medida numérica indirecta de fuerza. Un aspecto positivo de este sistema es que al tratarse de papeles de un mínimo espesor pueden adaptarse bien al instrumento sin interferir en el movimiento del músico, aunque probablemente sí afecten al tacto. Sin embargo, al no ser posible obtener los resultados en un tiempo real, pues se requiere analizar y convertir el color en una medida numérica que correlacione con la fuerza, no lo hacen apto para los propósitos de informar al músico, en tiempo real, de la fuerza que está ejerciendo. Otros inconvenientes de este sistema son el elevado precio del software requerido para la conversión de las medidas y el también elevado coste de la silicona o el PVC, sobre todo si hay que cubrir zonas extensas del instrumento. Además, el material es de un solo uso, una vez realizada una medición debe renovarse el papel. Aún así, para estudios donde la medida no deba ser en tiempo real y sea suficiente la toma de un único momento de fuerza, planteamos este sistema como una opción a tener en cuenta.

Por tanto, el minisensor circular ForcePlux cubierto con látex ultrafino es el sistema de medición que hemos hallado más adecuado para el músico. Informa, en tiempo real y de forma continua, de cómo está trabajando la mano a nivel de fuerza muscular sobre el instrumento. Aún así, tiene importantes limitaciones que será preciso corregir o mejorar. Sería conveniente implantar el sensor en el mismo látex, de esta forma no estaría directamente sobre la piel del músico y probablemente disminuiría un poco más la sensación de interferencia. Además esto posibilitaría que en posiciones extremas o en pasajes de alta velocidad se asegurase el registro de la señal, sin riesgo a que se moviera el minisensor. Por otro lado, cada persona tiene su forma particular de interaccionar con el instrumento y podría ocurrir que la zona de contacto con el instrumento no coincidiese con la zona donde está implantado el sensor en el guante. Para subsanar este hecho, del mismo modo que se preparan unas plantillas específicas para los pies de un corredor, sería óptimo que el proceso de implantación del sensor se personalizara. Pensamos que esto sería posible cubriendo las yemas de los dedos del guante con el material plástico sensible a la presión que comentamos anteriormente. Después de que el músico tocara varias piezas de diversa índole, se recogería la información y se implantaría el sensor en la zona donde aquella persona en particular hubiese tenido más contacto.

Si bien los sensores más pequeños se ajustan a los dedos y crean poca interferencia, para obtener el detalle de las cargas de fuerza que aplica el músico, es imprescindible aumentar el rango de medida de los valores de fuerza superiores, sin que ello signifique en ningún caso aumentar el grosor del sensor ni su superficie. Tal y como veíamos en los resultados la interferencia del sensor miniaturizado existe, aunque al ser tan reducido de diámetro, la sensación de tacto con el resto del pulpejo es suficiente para sentir la cuerda o la tecla (blanca o negra). Como se ha expuesto en el apartado de materiales, la misma empresa Plux ofrece sensores de diámetro mayor, $\pm 1\text{cm}^2$ de área, capaces de captar cargas de hasta 10 kg. Éstos resultarían ser ideales para la recogida de la fuerza sin ningún riesgo de saturación, sin embargo hemos visto que la superficie cubre la mayor parte del pulpejo; el músico tolera el grosor del guante de látex en todo su dedo, sin embargo el grosor de 0,2 mm del sensor en $\pm 1\text{cm}^2$ de área, resulta excesivo y no permite sentir a través de él.

Otra mejora importante sería añadir un sistema inalámbrico, capaz de emitir la señal del sensor al procesador, pues observamos que aunque los cables estén sujetos, siempre son un factor de interferencia añadido para el músico. Por último, todavía es un método caro y es preciso simplificarlo

al máximo para que pueda ser utilizado en el lugar de trabajo sin necesidad de desplazarse a un centro especializado. Ello significa que además de eliminar los cables, es necesario que sea de fácil colocación, con un sistema y *software* de captura y análisis de los datos de dimensiones reducidas que permita al usuario definir alarmas o niveles de alerta útiles. En cuanto a sus prestaciones se comprobó que el mismo sensor, era capaz de medir, en instrumentos con características diferentes, como el piano, en el que el sonido varía mucho en función de la fuerza de impacto, que a su vez depende de la fuerza que se ejerce, y los instrumentos de cuerda, en los cuales a partir de una cierta fuerza el sonido no se modifica, sea cual sea la fuerza ejercida con la mano apoyada en el traste o cuerda. Una de sus prestaciones más destacadas es su capacidad de registrar la medida continua, para lo cual es preciso captar los diferentes momentos de fuerza, desde que se pulsa la tecla o cuerda hasta que se deja de presionar. En el instante en el que pulsa, el músico realiza una acción muscular de fuerza concéntrica. Cuando ya entra en contacto con el instrumento y mantiene la presión de forma continuada está realizando una acción de fuerza isométrica. De modo que obteniendo la medida continua se cubre la recogida de datos de todo este periodo de tiempo.

La elección de los instrumentos para realizar este estudio se basó en que son los más tocados y presentan retos muy diferentes entre sí. Recogen los principales problemas de exceso de fuerza al tocar, e imponen exigencias muy diversas a la adaptación del sistema de medición a la actividad musical. Por una parte, las cuerdas pueden deteriorar fácilmente el sensor, y el piano, al tener teclas diferentes y poder ser utilizado un mismo dedo en posiciones y orientaciones distintas con respecto a la tecla durante la interpretación, nos permite analizar la efectividad del sensor en función de cómo resulte el vector de la fuerza en cada momento. En definitiva, un sistema que diese buen resultado para estos dos instrumentos, permitiría extrapolarlo para aquellos instrumentos con ciertas similitudes. Otra cuestión a resolver en este estudio era determinar en qué dedos sería mejor aplicar los sensores. De entrada por la posición que ocupan en la mano y su longitud, se consideró como más adecuado experimentar con el pulgar, el índice y el anular. Durante las pruebas se observó que tanto en la guitarra como en el piano, el sensor aplicado en el anular o pulgar creaba más sensación de molestia y que por tanto el índice era el más indicado para realizar las mediciones. Si bien el pulgar, al no tocar ninguna cuerda interfiere menos, los sujetos no siempre lo colocan de la misma forma sobre el mástil, con lo que la señal recibida puede variar. Por otro lado, los datos recibidos con el sensor en el pulgar no resultan interesantes para estudiar la fuerza



Fig. 3. Los datos recibidos con el sensor en el pulgar no son interesantes para estudiar la fuerza isométrica, pues solo obtenemos medidas discontinuas que coinciden con los momentos de contacto.

isométrica, pues sólo obtenemos medidas discontinuas que coinciden con los momentos de contacto (Figura 3).

Conclusiones

Consideramos que con los sensores miniaturizados Plux es factible medir la fuerza concéntrica e isométrica aplicada por la mano del músico sobre el instrumento y, con las modificaciones oportunas, esta herramienta puede ser útil en prevención y pedagogía. Además, puede ayudar en el desarrollo de sistemas similares en otras actividades laborales en las que la optimización de la fuerza utilizada también representa un factor preventivo relevante. El hecho de superar 9,8 N (1 kg) de fuerza de forma constante, tanto en el momento del impacto como al mantener la presión sobre el instrumento, nos indica que el músico ejerce habitualmente niveles elevados de actividad muscular, aspecto que da soporte a nuestra hipótesis de que ofrecer una herramienta para controlar esta fuerza ayudaría en la prevención de patologías derivadas de este sobreesfuerzo. Otra conclusión es que, para mantener el mayor grado de sensibilidad al utilizar estos sensores es imprescindible cubrir la mínima zona del dedo o bien reducir el grosor del sensor al nivel del guante de látex. En tal caso cabría la posibilidad de aumentar el tamaño de su superficie. Ésta última sería la opción idónea en todos los sentidos pues, además de disminuir altamente la interferencia, se podría ampliar sin problema la zona sensitiva del guante. Con ello se aseguraría que el músico siempre contactara con el sensor independientemente de la zona del dedo con la que interaccionara. Por último, aunque se observó que el pico máximo de fuerza en la gui-

tarra se situaba en 9,14 N (0,93 Kg), sabemos que este es un hecho puntual de un caso piloto, siendo necesario experimentar con otros tipos de cuerdas, repertorio y músicos para determinar este aspecto con precisión. Es muy probable que el pico de fuerza sea mucho más alto si, en vez de analizar escalas, como hemos hecho en este estudio, se analizara al músico tocando una obra de su repertorio habitual, al ser esto más exigente. Vistos los resultados, se pueden descartar el resto de sistemas valorados, aunque algunos de ellos (como el Chronopic, que además cuenta con un *software* de muy bajo coste) resultan ser de extraordinario interés para futuras investigaciones (en músicos y otras poblaciones) relacionadas con la medición de frecuencias de impacto y fatiga muscular. ■

Agradecimientos

Queremos agradecer la predisposición, asesoramiento, disponibilidad y cesión de material de las diferentes empresas colaboradoras, con especial mención a Plux y su equipo de ingenieros y a la empresa Byomedic System. Agradecemos también la colaboración del Institut de Fisiologia i Medicina de l'Art-Terrassa (centro especializado en la atención de músicos) y del Grup de Recerca en Ciències de l'Esport y Grup d'Investigació Social i Educativa en l'Activitat Física i l'Esport, ambos del Institut Nacional de Educación Física Catalunya-Barcelona.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Fishbein M, Middlestadt SE, Ottati V, Straus S, Ellis A. Medical problems among ICSOM musicians: overview of a national survey. *Med Probl Perform Art* 1988; 3:1-8.
2. Furuya S, Nakahara H, Aoki T, Kinoshita H. Prevalence and Causal Factors of Playing-Related Musculoskeletal Disorders of the Upper Extremity and Trunk among Japanese Pianists and Piano Students. *Med Probl Perform Art* 2006; 21:112-7.
3. Guptill C. Musicians' health: applying the ICF framework in research. *Disabil Rehabil* 2008; 30: 970-7.
4. Roset J, Rosinés D, Saló JM. Identification of risk factors for musicians in Catalonia (Spain). *Med Probl Perform Art* 2000; 15:167-74.
5. Nakada M, Demura S, Yamaji S, Minami M, Kitabayashi T, Nagasawa Y. Relationships between Force Curves and Muscle Oxygenation Kinetics during Repeated Handgrip. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci* 2004; 23:191-6.
6. Thomsen JF, Mikkelsen S, Andersen JH. Risk factors for hand - wrist disorders in repetitive work. *Occup Environ Med* 2007; 64:527-33.

7. Yamaji S, Minami M, Demura S, Nagasawa Y, Nakada M. Relationships between decreasing force and muscle oxygenation kinetics during sustained static gripping. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci* 2004; 23:41-7.
8. Riera J. Habilidades en el deporte. Ed Inde. Barcelona. 2005.
9. Hurst D. Lecciones desde el green: comprenda el management a través del golf. Ed Empresa activa. Argentina. 2005.
10. McGorry R, Dempsey P, Casey J. The effect of force distribution and magnitude at the hand - tool interface on the accuracy of grip force estimates. *Occup Rehabi* 2004; 14:255-66.
11. Nordgren B, Hall J, Andersson A. Development of methods for registration of the force exerted by hand-fingers in industrial work. *Appl Ergon* 1994; 25:393-4.
12. Mascaro ST, Asada HH. Measurement of finger posture and three-axis fingertip touch force using fingernail sensors. *IEEE Trans Robot Automat* 2002.
13. Beebe DJ, Denton DD, Radwin RG, Webster JG. A silicon-based tactile sensor for finger-mounted applications. *IEEE Trans Biomed Eng* 1998; 45:151-9.
14. Bendtsen L, Jensen R, Jensen NK, Olesen J. Muscle palpation with controlled finger pressure: new equipment for the study of tender myofascial tissues. *Pain* 1994; 59:235-9.

Conflicto de intereses

Los autores no hemos recibido ayuda económica alguna para la realización de este trabajo. Tampoco hemos firmado ningún acuerdo por el que vayamos a recibir beneficios u honorarios por parte de alguna entidad comercial. Ninguna entidad comercial ha pagado, ni pagará, a fundaciones, instituciones educativas u otras organizaciones sin ánimo de lucro a las que estamos afiliados.