

Sistema de entrenamiento para la práctica de técnicas de golpe en artes marciales

Training system for the improvement of striking techniques in martial arts

Melisa Kuzman^{†1}, Juan Manuel López^{†2} and Martín Igartúa^{†3}

[†]*Departamento de Electrónica y Computación, Universidad Nacional de Mar del Plata
 Juan B. Justo 4302, Mar del Plata, Argentina*

¹*melisakuzman@fi.mdp.edu.ar*

²*juanml@fi.mdp.edu.ar* ³*migartua@fi.mdp.edu.ar*

Recibido: 25/02/22; Aceptado: 06/06/22

Abstract—This article shows the principles for the development of a training system, aimed to combat sports practitioners and martial artists. This system provides a tool for the refinement of different striking techniques and let the user gain confidence before attempting breaking wooden boards. Also, it provides a tool that allows the improvement of the time that takes to execute a technique. This time is directly related to the reaction time of the practitioner. In this article are covered aspects related to the design of the embedded acquisition circuit, data processing and the final presentation to the user, but also shows the construction and use of the Charpy impact tester as a tool for the calibration of the system.

Keywords: Charpy; strike; punching-shield; FSR; training.

Resumen— En este artículo se presentan las bases para el desarrollo de un sistema de entrenamiento para deportes de combate y artes marciales, cuya finalidad es brindarles a los practicantes una herramienta para perfeccionar diferentes técnicas de golpe y adquirir la práctica necesaria previa a la rotura de tablas de madera. Además, permite mejorar el tiempo de ejecución de dichas técnicas, directamente relacionado con el tiempo de reacción del deportista. En el trabajo se abarcan aspectos del diseño del sistema embebido como la adquisición, el procesamiento de datos y su presentación al usuario, pero también se muestra la construcción y el uso de un péndulo de Charpy como instrumento de calibración para la rotura de maderas.

Palabras clave: Charpy; impacto; escudo; FSR; entrenamiento.

I. INTRODUCCIÓN

El deporte es una actividad que impulsa el desarrollo tecnológico en las diversas disciplinas que lo componen. Se pueden encontrar aplicaciones orientadas al análisis estadístico de las estrategias de equipos de fútbol [1], la incorporación de sensores en la vestimenta de practicantes de patineta [2], y hasta sistemas para el análisis biométrico de la performance de un deportista de combate [3].

Los artes marciales se encuentran dentro de los deportes que mantienen las costumbres tradicionales, tanto para entrenar como para evaluar a sus practicantes. Existen algunos trabajos orientados a analizar y mejorar la técnica de los deportistas de combate, como en [4] que provee un sistema de instrumentación virtual utilizando acelerómetros para estimar la cantidad y velocidad de los golpes realizados, o [5] que presenta un equipo de entrenamiento para medir la fuerza y velocidad de un impacto. En el mercado también

se pueden encontrar algunos productos, aunque su desarrollo se dirige a deportistas de boxeo o *kick-boxing*. Tal es el caso de [6] que proporciona un sistema de entrenamiento sofisticado pero su costo es a partir de los 2600 dólares, y solamente realizan envíos a Europa, Asia, Australia y Estados Unidos.

En este trabajo se desarrolla una herramienta que se focaliza en el entrenamiento de atletas que deseen mejorar la técnica de cada impacto, de modo de alcanzar la capacidad necesaria para realizar una rotura en una tabla de madera. Esta actividad es habitual en las artes marciales tanto en competencias como para promover a nuevas graduaciones. Cabe destacar que los sistemas previamente mencionados son de gran utilidad para entrenar diferentes golpes, pero no brindan información cuantitativa que asegure la rotura de una tabla de madera.

Por otra parte, este equipo permite disminuir lesiones debido al material que conforma al escudo de práctica, y además intenta evitar frustraciones en pruebas de rotura fallidas con maderas, sobre todo en deportistas que inicien la disciplina. Otro aspecto de interés en este trabajo es medir el tiempo de ejecución de la técnica de golpe del atleta para ejercitar su respuesta ante un estímulo auditivo, este parámetro es muy relevante ya que en una situación de enfrentamiento con otro deportista es fundamental la velocidad de la respuesta para evitar o frenar un ataque.

Con los objetivos mencionados, el equipo presentado se compone por un escudo de entrenamiento inalámbrico que contiene la electrónica embebida dentro de su estructura, y una aplicación (App) nativa desarrollada con [7] para Sistemas Operativos Android, donde el usuario puede visualizar el resultado de su entrenamiento: intensidad del golpe lanzado, el tiempo de reacción ante un estímulo auditivo y la duración del impacto. Por su parte, la comunicación entre el sistema de adquisición y el dispositivo móvil se realiza a través de un enlace Bluetooth. Por último, para lograr el correcto funcionamiento del sistema se construye un péndulo de Charpy [8] que permite validar los ensayos destructivos de madera y calibrar al equipo adecuadamente.

II. ELEMENTOS DEL SISTEMA

Con el propósito de romper una tabla de madera con un golpe, los deportistas llevan a cabo un entrenamiento gradual. Primero practican la técnica sobre sacos y escudos

de boxeo, y es el entrenador a través de la observación quien decide si el alumno está preparado para intentar una rotura. En este sentido, este proyecto brinda un instrumento para realizar un seguimiento sobre la evolución del atleta y cuantificar con datos la capacidad obtenida en cada estilo de golpe. Además, resulta intuitivo incorporarlo en la práctica puesto que el sistema mantiene la metodología del entrenamiento al tratarse de un escudo.

En la Figura 1 se observa una foto de un taekwondista ensayando una patada circular en el dispositivo desarrollado. Dentro del escudo que sostiene el instructor se encuentra alojado el sensor, el circuito acondicionador y la etapa de adquisición y procesamiento.



Fig. 1: Deportista entrenando sobre el escudo

Por su parte, la visualización de los resultados del impacto se hace gracias al uso de un dispositivo móvil (Fig. 2), que en su pantalla brinda al usuario la información procesada: tiempo de reacción, duración del impacto y una gráfica adquirida del golpe efectuado con una línea horizontal de color anaranjada que indica el umbral de ruptura.

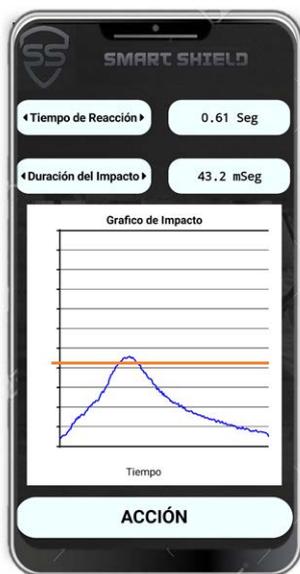


Fig. 2: Captura de pantalla de un impacto

Desglosando al sistema en detalle, su funcionamiento puede representarse en un diagrama compuesto por cuatro bloques funcionales (Fig. 3). En la primera instancia se

presenta el sensado y amplificación, en el cual se utiliza un transductor de fuerza del tipo piezorresistivo o FSR (*Force Sensing Resistor*) para capturar el golpe. El mismo se usa como una resistencia variable con la intensidad de la fuerza aplicada, que forma parte de la red resistiva de un amplificador operacional en configuración inversora, cuya representación circuital se encuentra en la Figura 4. A la salida de esta etapa se produce un voltaje proporcional a la fuerza aplicada sobre el sensor, amplificando la tensión de referencia negativa presente en su entrada. La resistencia de realimentación R_f se implementa con un potenciómetro que permite ajustar el factor de amplificación y por lo tanto la sensibilidad del circuito.

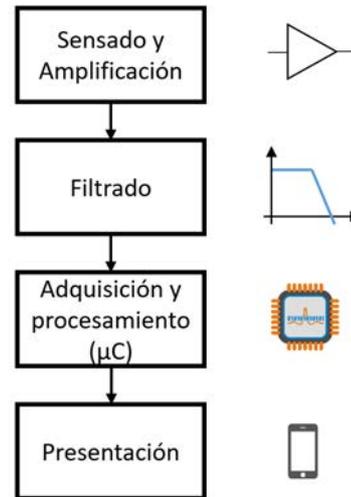


Fig. 3: Esquema en bloques del sistema

En la segunda etapa se aplica un filtrado pasa bajos activo Sallen Key [9] de segundo orden con una frecuencia de corte de 250Hz, cuya implementación se justifica en la sección IV.

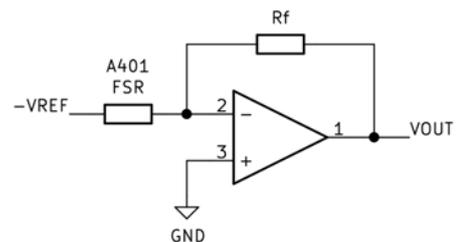


Fig. 4: Amplificador operacional en configuración inversora

El bloque de adquisición y procesamiento hace referencia a la digitalización de la señal, donde se utiliza el Conversor Analógico Digital (ADC) de 10 bits embebido en un microcontrolador (μC) de bajo costo y 8 bits. Este último además se encarga de procesar los datos y enviarlos a través de un enlace Bluetooth al dispositivo de presentación.

En la última etapa, la información es recibida por el dispositivo Android donde se presenta al usuario final. Además de la información de la intensidad del golpe, el sistema provee datos del tiempo de ejecución de una técnica, y la duración del impacto.

El funcionamiento del sistema se puede resumir de la siguiente manera: el usuario presiona el botón con la leyenda "ACCIÓN" en la App, el escudo recibe el comando y luego

de decodificarlo emite una señal sonora y activa un timer. El módulo temporizador del μC lleva la cuenta del tiempo que le toma al practicante hacer contacto con el objetivo y lo registra. Este dato es muy importante ya que incluye su tiempo de reacción, es decir el lapso que transcurre entre el estímulo de un órgano sensorial y el inicio de una reacción. A diferencia de los reflejos, que son involuntarios y sirven para proteger el cuerpo, la reacción conlleva un proceso más complejo pero puede ser entrenado. La señal que registra el ADC es presentada en un gráfico en la pantalla del dispositivo Android para proporcionar información acerca de la calidad de la técnica, no solo por su valor pico, sino también por su duración.

A. Elección del transductor

La elección del transductor de fuerza es uno de los ejes centrales de este proyecto, para el cual se analizaron tres tecnologías: celdas de carga, galgas extensiométricas y sensores de fuerza resistivos. Comparando dispositivos que trabajan en el rango de fuerza de interés, y luego del estudio de sus especificaciones técnicas, se determinó que los parámetros que limitan la elección son la dificultad en la integración del sensor en el escudo y su tiempo de respuesta.

Para analizar la integración mecánica del sensor dentro del escudo, se debe mencionar que las tres tecnologías sufren un cambio de sus propiedades eléctricas con la aplicación de una fuerza mecánica, pero su principio de funcionamiento difiere; en el caso de las celdas y las galgas la variación proviene de una deformación elástica que se produce en las mismas, mientras que los sensores FSR son una lámina delgada que mide la presión aplicada entre sus dos superficies, siendo la deformación física imperceptible.

El otro aspecto a analizar es el tiempo de respuesta del dispositivo. Considerando que un atleta de alto rendimiento tiene un tiempo de reacción de alrededor de los 220mseg y la duración de un golpe bien ejecutado es de 20mseg, la celda de carga resulta insuficiente para la medición, ya que su tiempo de respuesta es del orden de los milisegundos. Además, esta tecnología necesita un tiempo de establecimiento para volver a su estado original, previo a la deformación. En el caso de las galgas y los sensores FSR tienen un tiempo de respuesta del orden de los microsegundos, lo cual es suficiente para la aplicación analizada.

Entre las últimas dos tecnologías mencionadas, se decide trabajar con el sensor FSR [11] (Fig. 5) de Tekscan, puesto que su integración dentro del escudo de prácticas es más sencilla y su tiempo de respuesta es suficiente para el proyecto.



Fig. 5: Sensor FSR A401

B. Integración mecánica

Para usar adecuadamente el transductor, el fabricante recomienda que el impacto se concentre dentro del área de detección del dispositivo, que para el modelo FSR elegido es un área de 25.5mm de diámetro (prácticamente el tamaño de la moneda de un euro). Con esta finalidad se sugiere el uso de un concentrador de carga denominado puck, como se ilustra en la Fig. 6. Allí se observa que la fuerza distribuida sobre la placa de mayor dimensión se transfiere al sensor a través del puck.

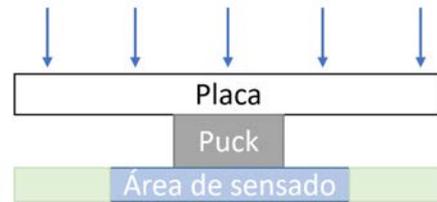


Fig. 6: Concentrador de la fuerza distribuida

Su funcionamiento es totalmente compatible con el objetivo perseguido. Como el área de incidencia del impacto sobre el escudo es más grande que el de detección, en el caso que la herramienta de ataque no impacte exactamente en el centro (donde se encuentra el puck) se produce una pérdida de carga. Este efecto es comparable a la situación de la rotura de madera, es decir, para efectuar una ejecución exitosa, la exactitud del golpe al centro de la tabla es fundamental. Se debe destacar que en la práctica de artes marciales se entrena para disminuir el área de contacto de la herramienta del cuerpo utilizada al momento del impacto, para aplicar una presión mayor sobre el objetivo. Es por eso que la herramienta de ataque varía de acuerdo a la extremidad utilizada (ver Fig. 7) y la zona objetivo del golpe en el contrincante, siempre minimizando el área de contacto al momento del impacto. Por estos motivos la ubicación del sensor y la característica de su integración mecánica hacen que el diseño planteado sea fielmente representativo de la situación real.

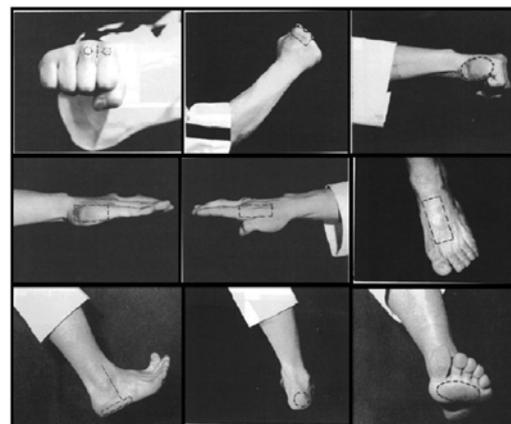


Fig. 7: Herramienta de ataque según la extremidad [10]

En la Fig. 8 se observa una vista explosionada del escudo donde se presenta el orden de ensamblaje de sus componentes. De izquierda a derecha se presenta una capa de espuma de poliéster para prevenir lesiones en la herramienta de impacto. A continuación se utilizan dos tablas

rectangulares de polipropileno reforzadas que se encuentran vinculadas en sus vértices por tornillos y separadas por tacos de goma que delimitan una separación fija. El taco central es el puck (ver mayor detalle de su implementación en la Fig. 9), y no tiene contacto con el sensor en ausencia de impactos ya que tiene una longitud menor que los dispuestos en los vértices. Luego se observa una segunda capa de espuma que trabaja en conjunto con las manijas de PVC que se muestran horizontalmente, conectadas entre sí a través de una correa que es perpendicular a la dirección del impacto. Esta disposición se utiliza para disminuir la penetración del impacto en la tercera división de espuma socavada que contiene en su interior al sistema embebido y a la batería. La cuarta capa de espuma ayuda a inmovilizar la electrónica, y a su vez amortigua el golpe sobre la persona que sujeta el escudo.

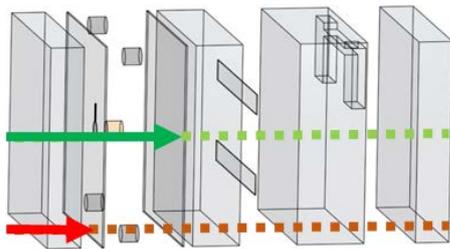


Fig. 8: Vista explosionada del escudo implementado

Sobre la imagen antes descrita se observan dos flechas que caracterizan dos impactos: en color verde se representa un golpe al centro cuya transferencia de fuerza es adecuada, justo en la ubicación del sensor, siendo este el objetivo perseguido. Por otra parte, en color rojo se muestra un impacto desviado con gran pérdida de carga, que resultaría en un golpe no apto para lograr la rotura deseada.

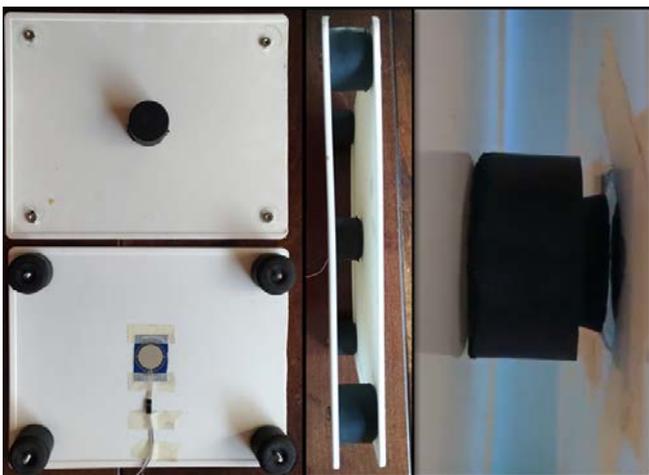


Fig. 9: Integración del sensor FSR y uso del Puck

III. CALIBRACIÓN

Otro punto importante en el implementación del sistema es realizar una calibración apropiada: ajustar el rango dinámico del sistema de manera de adquirir correctamente el impacto para romper una tabla y fijar en la aplicación el umbral en el que esto ocurre. Para llevar a cabo este procedimiento se opta por construir un péndulo de Charpy,

originalmente ideado por el ingeniero francés Augustin Georges Albert Charpy. Este experimento se basa en el principio de la conservación de la energía entre dos puntos y permite determinar la tenacidad de un material cuando se emplean cargas dinámicas. Esta propiedad se define como la capacidad que tiene un material para absorber energía mecánica durante su deformación antes de alcanzar el punto de rotura. En la Fig. 10 se presenta la curva de un material dúctil y uno quebradizo, que relaciona el estrés (σ) con la tensión (ϵ) aplicada. En el primer caso se observan dos zonas bien delimitadas en la misma curva, en naranja el material se encuentra en la región elástica, mientras que en verde está en la región plástica. Como se observa, estos elementos ofrecen una gran tensión de fractura antes de quebrarse. Por su parte, los materiales quebradizos poseen una región plástica prácticamente nula, como el caso de la madera. Las tablas utilizadas trabajan principalmente en la región elástica, es decir, al aplicarse una fuerza sobre ellas sufren una deformación pero si la tensión aplicada no es suficiente para quebrarlas, al retirar la misma la madera vuelve a su estado inicial.

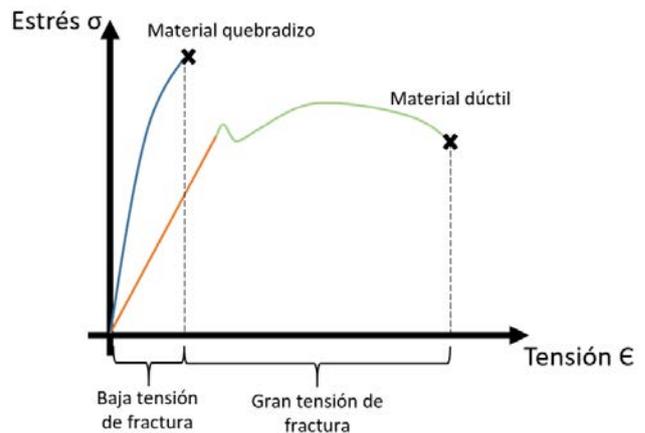


Fig. 10: Curva de tenacidad de materiales

Con este concepto en mente, el péndulo construido [14] permite realizar una serie de ensayos destructivos, en este caso sobre tablas cuadradas de madera de pino (2,54cm de espesor y 30cm de lado), similares a las utilizadas en la práctica de artes marciales.

En primera instancia se realizan los ensayos sobre las tablas de pino, colocándolas sobre el soporte que provee dos vínculos estáticos. La masa del péndulo se deja caer a partir de alturas conocidas y crecientes, gracias a la implementación de una escala reglada en el péndulo (Fig. 11), e impacta sobre el centro de la tabla hasta que esta se quiebra [12]. Al conocer la variación de altura entre el punto inicial y el final del péndulo luego de la rotura (Δh), la masa (m) que impacta sobre la tabla (2,5kg) y la aceleración de la gravedad (g) es posible calcular la energía de acuerdo a la ecuación 1.

$$E = m \cdot g \cdot \Delta h [J] \quad (1)$$

Repitiendo el experimento en cada una de las tablas disponibles, se calcula la energía necesaria que se debe aplicar para romper las mismas, cuyo análisis se presenta



Fig. 11: Escala reglada en el péndulo de Charpy

en la sección IV. Con el valor de la escala obtenido, se reemplazan las tablas por el sistema como se muestra en la Fig. 12, que se ubica de manera similar en el soporte provisto por el péndulo de Charpy [13]. De este experimento surge el valor del umbral de rotura que se traza en la gráfica presentada en el dispositivo móvil.



Fig. 12: Ensayo con el péndulo sobre el escudo

Para lograr mayor precisión en la calibración, se conecta un osciloscopio a la salida del circuito amplificador para visualizar la forma de onda obtenida luego de un impacto. Primero se desea ajustar el fondo de escala del circuito para garantizar un rango dinámico adecuado. Para esto se ubica el péndulo en su escala más alta, considerando que esta será la fuerza máxima que se puede medir con el sistema. A continuación se deja caer la pesa de manera iterativa, ajustando la resistencia de realimentación de la etapa de amplificación mostrada en la Fig. 4. Este proceso se repite hasta que el máximo de la señal medida con el osciloscopio sea del 90% del fondo de escala del ADC. De esta manera se asegura un rango dinámico adecuado y se evitan saturaciones no deseadas sobre la medición. A continuación se ubica la pesa en la escala correspondiente al umbral de rotura y se realiza la medición con el osciloscopio, cuyo valor pico registrado se utiliza como referencia en la aplicación.

IV. RESULTADOS

A. Análisis de las formas de onda

Para conocer mejor las características de la señal a medir (como su forma de onda, duración en el tiempo y contenido espectral) se realizan una serie de mediciones de golpes ejecutados por practicantes avanzados de artes marciales. Este análisis permite dimensionar de manera correcta el filtro pasa bajos del circuito de acondicionamiento y obtener las características de un golpe ejecutado de manera correcta e incorrecta. Con el uso de un osciloscopio digital se adquieren las muestras de distintos tipos de golpes a la salida

del circuito amplificador, que luego son procesados en una PC que realiza la transformada rápida de Fourier o FFT (*Fast Fourier Transform*) y grafica los resultados.

En la Fig. 13 se presenta la forma de onda de 4 golpes. En color magenta un golpe ejecutado de manera incorrecta, ya que su duración es de alrededor de los 200ms y no se distingue un máximo de fuerza definido. Esto quiere decir que la fuerza del impacto está distribuida en un intervalo grande de tiempo y la herramienta de ataque no se retira del objetivo inmediatamente luego de hacer contacto. Sobre el lado izquierdo de la imagen se encuentran concentrados 3 golpes de menor duración, que se aprecian en mayor detalle en la Fig. 14.

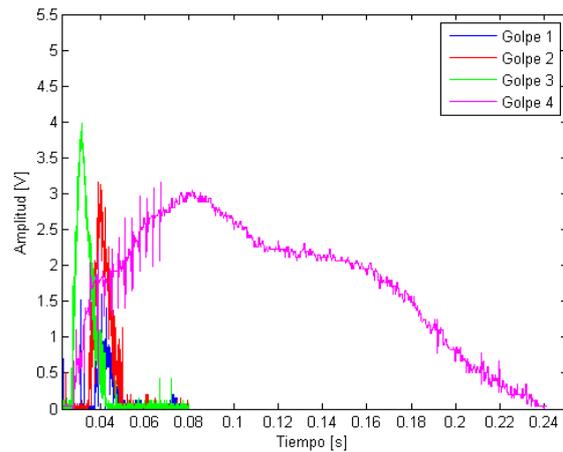


Fig. 13: Señales de cuatro golpes antes del filtrado

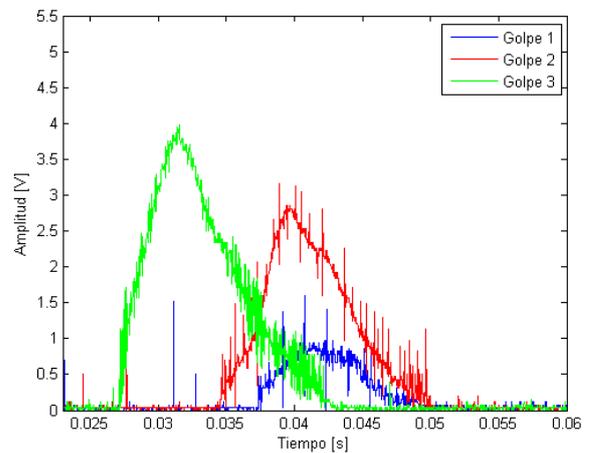


Fig. 14: Señales de tres golpes antes del filtrado

En este caso se presentan en color verde y rojo golpes de corta duración (en el orden de los 15 ms) y un pico de amplitud alto y bien definido, lo que corresponde a una correcta concentración de fuerza al momento de aplicar la técnica. Mientras que en color azul no es posible distinguir un máximo, y si bien la duración del impacto es corta, su amplitud es baja, indicando que se trata de una técnica poco efectiva. Luego de este análisis temporal se aplica el algoritmo de FFT a los cuatro golpes, cuyos resultados se presentan en la Fig. 15.

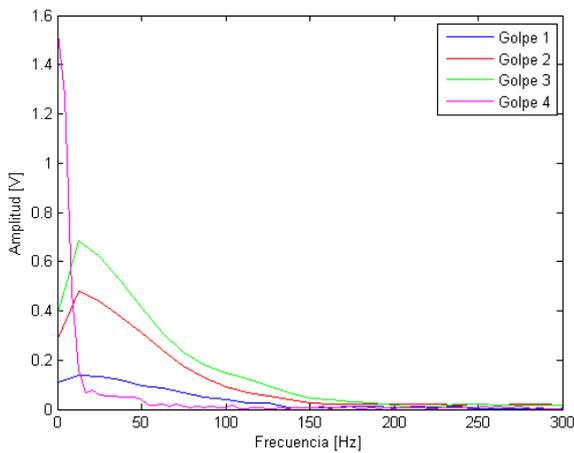


Fig. 15: FFT de las señales presentadas

Se puede apreciar que el golpe incorrecto de gran duración (magenta) posee un contenido espectral muy bajo en relación a los golpes técnicamente correctos (verde y rojo). En todos los casos la amplitud no presenta valores significativos luego de los 100 Hz. Es por esto que se utiliza una frecuencia de corte de 250 Hz para el filtro pasa bajos activo.

En la Fig. 16 se muestra el resultado del filtrado pasa bajos sobre la señal del impacto. En color celeste se observa la señal ruidosa y en color amarillo la señal filtrada. Puede apreciarse que esta última es más adecuada para su posterior adquisición.

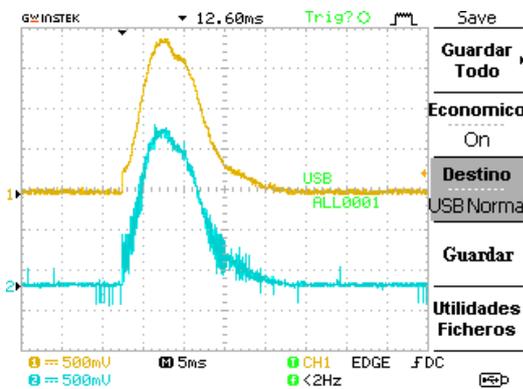


Fig. 16: Señal antes y después del filtro

Al caracterizar las formas de onda que producen los golpes, se puede seleccionar una frecuencia de muestreo del ADC que permita adquirir de manera correcta. En este caso se utiliza una frecuencia de 30kHz que resulta más que suficiente para muestrear las señales producidas por los distintos tipos de impactos estudiados. Además, el módulo Timer integrado en el μC da la posibilidad de establecer una frecuencia de adquisición constante, de modo de evitar errores relacionados al muestreo.

B. Ensayos destructivos con tablas de madera

Con el objetivo de hallar el umbral de rotura se realiza el experimento de Charpy con 13 tablas de pino, cortadas y cepilladas a partir de un mismo tablón. Para garantizar que las diferencias de alturas sean constantes durante todo

el ensayo, el péndulo cuenta con la escala reglada mencionada previamente y un mecanismo de accionamiento que posibilita la estandarización al momento de liberar la masa. En la Fig. 17 se muestra la tabla de madera ubicada en el péndulo durante uno de los ensayos.



Fig. 17: Ensayo con el péndulo sobre maderas

De este análisis surgen una serie de datos importantes relacionados a la naturaleza de la rotura de tablas de madera. Primero se observó que la presencia de nudos constituyen nodos de tenacidad y que luego de quebrar la madera se conservan. Esto quiere decir que el nudo no se quiebra y permanece completo en una de las mitades resultantes de la rotura de la tabla, fenómeno observado en tres de las tablas utilizadas. Otra consideración es que la elección de la veta se debe hacer de tal forma que la herramienta de ataque pueda atravesar el objetivo. Para el caso del péndulo de Charpy siempre fueron paralelas a la barra oscilante, mientras que en la práctica de Artes Marciales se ubican de acuerdo a la técnica a emplear. El siguiente dato de gran importancia que surge del experimento se explica a través de las maderas 6 y 9 presentadas en la Fig. 18. Ambas tablas se disponen siguiendo las consideraciones anteriores, sin embargo, la tabla 6 se rompe con una energía de 3,8J, mientras que la tabla 9 se quiebra con una energía de 11,16J. Analizando en detalle se observa que la tabla 6 presenta una veta convexa respecto a la incidencia del golpe, mientras que la tabla 9 presenta una veta cóncava (lo mismo sucede en la tabla 11).

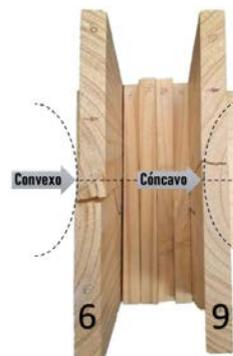


Fig. 18: Maderas colocadas con la veta en forma convexa y cóncava

Los datos recolectados se presentan en la Fig. 19, que corresponde al gráfico de diferencia de altura respecto de la escala reglada del péndulo de Charpy. El tamaño de los círculos corresponde a la cantidad de tablas que se rompieron en cada escala, mientras que el número en su interior es la energía en Joules que produce la rotura. Se observa que los valores de energía 11,16J y 13,37J se corresponden con las tablas 9 y 11 respectivamente. Como consecuencia de la disposición cóncava de las vetas, se aprecia una separación respecto del resto de las tablas de

madera ensayadas. Es por este motivo que se toma como valor modal una energía de 8,34J, criterio con el cual se establece el umbral de rotura en la aplicación. Esta cota resulta razonable ya que se estaría en condiciones de romper el 100% del ensamble asumiendo una disposición de vetas convexa.

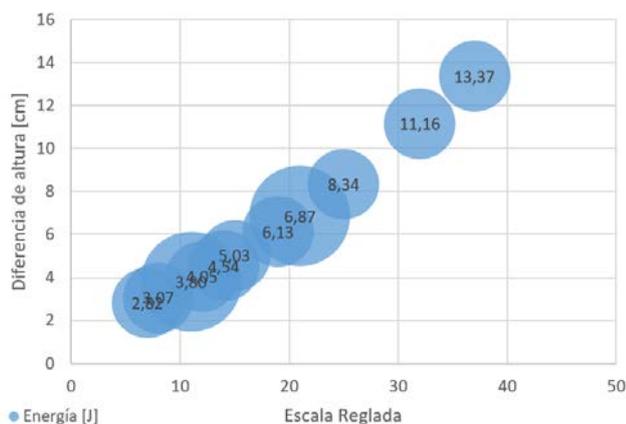


Fig. 19: Resultado de la rotura de las maderas

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que es posible utilizar un transductor de tecnología FSR para medir golpes lanzados por deportistas de combate. Adicionalmente se implementó un filtro pasa bajos activo para disminuir el ruido presente en la salida del amplificador, y así se obtuvo una señal más adecuada para su procesamiento.

Por su parte, la calibración del equipo utilizando el péndulo de Charpy conforma uno de los puntos clave para generar un umbral de rotura real. Sin embargo, se debe mencionar que el experimento solo es válido para el tipo de madera ensayada (una tabla de pino cepillada de una pulgada), y debe repetirse para distintos materiales o cantidad de tablas que se desean utilizar en la rotura. Asimismo, en los ensayos se observó que si las vetas se disponen de forma cóncava a la incidencia del impacto, la tenacidad de la madera incrementa considerablemente. Esta información es de gran importancia para el practicante de roturas de tablas que deben ser tenidas en cuenta a la hora de disponer las maderas ya que la orientación de la mismas influye directamente en su tenacidad.

Finalmente, el uso de un dispositivo móvil con sistema operativo Android permite reducir costos de presentación al usuario, ya que no es necesario diseñar e implementar un dispositivo dedicado a tal fin, sino que es suficiente con desarrollar la aplicación. De esta forma, se logró desarrollar una herramienta dedicada al entrenamiento de rotura de tablas de madera, obteniendo un equipo portátil, de bajo costo y con una interfaz amigable con el usuario.

REFERENCIAS

[1] M. A. Ikram, M. D. Alshehri and F. K. Hussain, "Architecture of an IoT-based system for football supervision (IoT Football)," 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2015, pp. 69-74, doi:10.1109/WF-IoT.2015.7389029.

[2] K. Ishida, "IoT Application in Sports to Support Skill Acquisition and Improvement," 2019 IEEE 12th Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA), 2019, pp. 184-189, doi:10.1109/SOCA.2019.00034.

[3] S. Saponara, "Biometric performance measurements in combat sports," 2016 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/MeMeA.2016.7533725.

[4] K. S. Urbinati, E. Scheeren and P. Nohama, "A new virtual instrument for estimating punch velocity in combat sports," 2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2013, pp. 571-574, doi: 10.1109/EMBC.2013.6609564.

[5] L. Yugang, Y. Faben, B. Kaixiang, Y. Xiangdong and Z. Jun, "Develop the System of BJ-2 Combat Items Training and Monitoring," 2011 International Conference on Future Computer Science and Education, 2011, pp. 182-185, doi: 10.1109/ICFCSE.2011.53.

[6] Rotura de madera con péndulo de Charpy. <https://www.punchsensor.com/>

[7] Anywhere Softwre, B4A, <https://www.b4x.com/b4a.html/>

[8] N. Saba, M. Jawaid, M.T.H. Sultan, Capítulo "An overview of mechanical and physical testing of composite materials", Libro "Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites", Woodhead Publishing, 2019, Pages 1-12, ISBN 9780081022924, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1>.

[9] R. P. Sallen and E. L. Key, "A practical method of designing RC active filters", IRE Transactions on Circuit Theory, vol. 2, n^o 1, pp. 74-85, 1955.

[10] Gral. Choi Hong Hi, "Enciclopedia del Taekwon-Do". 1983.

[11] Tekscan, Hoja de datos del sensor A401, <https://www.tekscan.com/resources/product/flexiforce-a401-datasheet/>

[12] (2021) Rotura de madera con péndulo de Charpy. <https://www.youtube.com/watch?v=yaZBKRIxOfw/>

[13] (2021) Calibración equipo con péndulo de Charpy. <https://n9.cl/fsiyd/>

[14] (2021) Martín Igartua, Péndulo de Charpy como herramienta de calibración, <https://github.com/juanml/smart-shield/>

[15] S. M. Metev and V. P. Veiko, *Laser Assisted Microtechnology*, 2nd ed., R. M. Osgood, Jr., Ed. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1998.

[16] J. Breckling, Ed., *The Analysis of Directional Time Series: Applications to Wind Speed and Direction*, ser. Lecture Notes in Statistics. Berlin, Germany: Springer, 1989, vol. 61.

[17] S. Zhang, C. Zhu, J. K. O. Sin, and P. K. T. Mok, "A novel ultrathin elevated channel low-temperature poly-Si TFT," vol. 20, pp. 569-571, Nov. 1999.

[18] M. Wegmuller, J. P. von der Weid, P. Oberson, and N. Gisin, "High resolution fiber distributed measurements with coherent OFDR," in *Proc. ECOC'00*, 2000, paper 11.3.4, p. 109.

[19] R. E. Sorace, V. S. Reinhardt, and S. A. Vaughn, "High-speed digital-to-RF converter," U.S. Patent 5 668 842, Sep. 16, 1997.

[20] (2007) The IEEE website. [Online]. Available: <http://www.ieee.org/>

[21] M. Shell. (2007) IEEEtran homepage. [Online]. Available: <http://www.michaelsshell.org/tex/ieeetran/>

[22] *FLEXChip Signal Processor (MC68175/D)*, Motorola, 1996.

[23] "PDCA12-70 data sheet," Opto Speed SA, Mezzovico, Switzerland.

[24] A. Karnik, "Performance of TCP congestion control with rate feedback: TCP/ABR and rate adaptive TCP/IP," M. Eng. thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India, Jan. 1999.

[25] J. Padhye, V. Firoiu, and D. Towsley, "A stochastic model of TCP Reno congestion avoidance and control," Univ. of Massachusetts, Amherst, MA, CMPSCI Tech. Rep. 99-02, 1999.

[26] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*, IEEE Std. 802.11, 1997.