

Dispositivo para la medición de variables de flexión de la técnica de carrera y cálculo de parámetros para la cuantificación del entrenamiento

A. Lavalle¹, P. S. Luna^{1*}

¹ Facultad de Instrumentación Electrónica, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México.

*paluna@uv.mx

Resumen

La medición de variables biomecánicas para la técnica de carrera y la cuantificación del entrenamiento son parámetros que permiten a los corredores y a sus entrenadores conocer de manera más profunda la respuesta física del cuerpo a la carga de trabajo. Hoy en día existen diversos dispositivos de alto costo en el mercado que permiten observar estas variables de manera separada. En este trabajo se describe un dispositivo para medir los ángulos máximos de flexión de las articulaciones de cadera y codos de la técnica de carrera, por medio de sensores resistivos de flexión. Además, se integra una banda electrónica para medir, simultáneamente, la frecuencia cardíaca y calcular parámetros para la cuantificación de la carga de trabajo a través de dos técnicas basadas en la frecuencia cardíaca. Se encontró que el dispositivo funciona de manera efectiva para la medición de ángulos de flexión en cadera y codos y es posible realizar una evaluación de la técnica de carrera, también se halló que, a través de la medición de la frecuencia cardíaca es posible calcular parámetros que ayuden a la cuantificación del entrenamiento.

Palabras clave: Cuantificación del entrenamiento, Karvonen, Técnica de carrera, Trimp.

1. Introducción

Correr es una actividad física popular debido a que se puede realizar en casi cualquier lugar, de manera aficionada y profesional. En el campo profesional o semiprofesional, es necesario monitorear algunas variables biomecánicas y planificar adecuadamente el entrenamiento para observar, analizar y evaluar la evolución de los corredores respecto a la carga de trabajo.

La técnica de carrera es la manera idónea de ejecutar los movimientos que intervienen al correr, tales como extensión, flexión, abducción, aducción, retroversión, retroposición, anteversión, anteposición, supinación y pronación.

La cuantificación del entrenamiento es una serie de métodos para examinar la condición con la que el cuerpo reacciona a distintas cargas de trabajo y sirve para planificar los entrenamientos de una manera más efectiva y eficiente para lograr el objetivo del corredor. Al ser datos que se pueden medir de manera no invasiva, se pueden registrar sobre el cuerpo y enviar a dispositivos digitales para su interpretación.

Para conocer los parámetros de la técnica de carrera, es necesario saber los componentes que actúan en dichos movimientos. Para el plano transversal son la flexión y extensión de brazos y piernas. Diversos autores [1] indican que los ángulos que se deben mantener en constante monitoreo son los de la cadera y el codo, durante la flexión y extensión, para lograr un movimiento adecuado. Idealmente, la flexión de estos ángulos debe ser de 90° para las piernas en la fase de propulsión y vuelo dentro del ciclo de carrera, en el caso de los codos dentro de todas las fases del ciclo de carrera deben mantenerse en 90°, aunque los ángulos pueden tener una variación dependiendo el tipo de carrera que realicen [2].

En la actualidad, el análisis de la técnica de carrera se realiza, principalmente, en laboratorios de biomecánica [3].

Para cuantificar el entrenamiento se utilizan diversas pruebas de resistencia basadas en frecuencia cardíaca y oxigenación [4] [5]. Un ejemplo son las pruebas de ergometría, donde los corredores son expuestos a un trabajo físico sobre una caminadora con un aumento progresivo del ejercicio. En estas pruebas se monitorea la frecuencia cardíaca y el nivel de oxigenación de la sangre con un oxímetro de pulso. Con los resultados se puede cuantificar el entrenamiento ya que se tiene una respuesta del cuerpo respecto a una carga de trabajo [6].

El impulso de entrenamiento, TRIMP [7] [8], es un parámetro que determina la intensidad alcanzada durante el entrenamiento. Se calcula con la ecuación mostrada en (1).

$$TRIMP = t * \left(\frac{FcEx - FcReposo}{FcMax - FcReposo} \right) K1 * e^{K2} \left(\frac{FcEx - FcReposo}{FcMax - FcReposo} \right) \quad (1)$$

donde

t es el tiempo de duración de la actividad física,

$FcEx$ es la frecuencia cardíaca promedio durante la actividad física,

$FcMax$ es la frecuencia cardíaca máxima durante la actividad física,

$FcReposo$ es la frecuencia cardíaca durante una actividad física mínima, y

$K1$, $K2$ son factores por sexo de aumento de lactato durante la actividad física (para mujeres, $K1 = 0.86$ y $K2 = 1.67$, y para hombres, 0.64 y 1.92 respectivamente).

El TRIMP, para una sesión de 60 minutos, puede oscilar entre 70 y 130 entre mayor sea el valor, el entrenamiento es más intenso. Existen pocos equipos que lo calculan, un ejemplo de estos equipos son algunos modelos de relojes deportivos inteligentes [8].

Por otro lado, la fórmula de Karvonen [5] ayuda a saber la frecuencia cardíaca promedio durante la actividad física en cierta intensidad, que es en la que debe trabajar durante todo el entrenamiento un deportista para obtener resultados. Se calcula con la ecuación mostrada en (2).

$$FKarvonen = FcReposo + [(\%intensidad)(FcReserva)] \quad (2)$$

donde,

$FcReposo$ es la frecuencia cardíaca durante una actividad física mínima,

$\%intensidad$ es el porcentaje de intensidad del entrenamiento que exija el entrenador, y

$$FcReserva = FcMaxT - FcReposo \quad (3)$$

donde,

$$FcMaxT = 220 - edad \quad (4)$$

En cuanto a la técnica de carrera, puede estimarse cercanamente al medir los ángulos de flexión en cadera y codos. Si se desea conocer la evolución de un corredor, es necesario que los entrenadores puedan monitorear de manera práctica y sencilla la técnica de carrera y la respuesta a la carga de trabajo durante los entrenamientos cotidianos.

En este trabajo se propone estimar la técnica de carrera, mediante la medición de los ángulos máximos de flexión de los codos y la cadera por zancada durante la carrera y muestrear la frecuencia cardíaca de manera simultánea para cuantificar el entrenamiento con las ecuaciones de Karvonen y TRIMP. Los datos medidos se enviarán de forma inalámbrica a un dispositivo móvil. El objetivo es contribuir a medir ambas variables de manera sincrónica para comodidad de los corredores.

2. Metodología

2.1 Obtención de ángulos

Para medir los ángulos de la técnica de carrera se utilizaron cuatro sensores resistivos de flexión. Los sensores de flexión tienen una longitud de 11.43 cm, 0.43 mm de ancho y menos de 1 mm de espesor.

Los sensores aumentan la resistencia de forma lineal conforme se flexionan. Se conectaron a un circuito acondicionador formado por un divisor de tensión con una resistencia de 10 k Ω . Los circuitos acondicionadores se conectaron a las entradas analógicas, configuradas con alta impedancia, de un sistema microcontrolador (plataforma Arduino nano) para su registro. En la Fig. 1 se muestra el diagrama eléctrico mencionado.

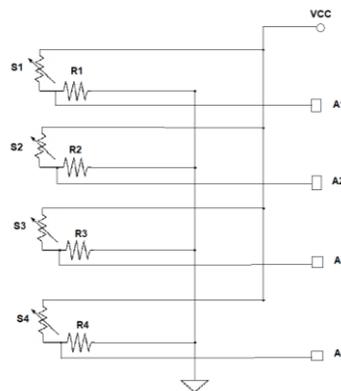


Fig. 1. Diagrama eléctrico del circuito acondicionador. Las entradas analógicas del microcontrolador se configuraron con alta impedancia de entrada.

2.2 Delimitación de los sensores de flexión

Para verificar el funcionamiento del sensor se realizó una prueba doblando el sensor en su rango de flexión de 10° a 180° y se registraron sus valores para poder mapear en Arduino conforme al grado de flexión. La Fig. 2 muestra los valores obtenidos en el microcontrolador respecto al ángulo de flexión del sensor.

2.3 Obtención de la frecuencia cardíaca

Para obtener la frecuencia cardíaca durante el ejercicio se utilizó una banda electrónica [9] (Max Health Band de Maxim Integrated) colocada en la muñeca izquierda. La banda cuenta con una aplicación que permite guardar y ver los valores de frecuencia cardíaca durante el entrenamiento.

Se desarrolló un algoritmo en Matlab para identificar los valores máximos de la frecuencia cardíaca continua, la frecuencia cardíaca durante la actividad física, la frecuencia cardíaca promedio y la frecuencia cardíaca en reposo, registradas por la banda. Posterior a esto el código se complementó con las fórmulas de Karvonen y Trimp, mostradas en (1) y (2) respectivamente. En (1), el porcentaje de intensidad se definió en 80% ya que es un parámetro utilizado por los entrenadores para un trabajo efectivo en atletas [4].

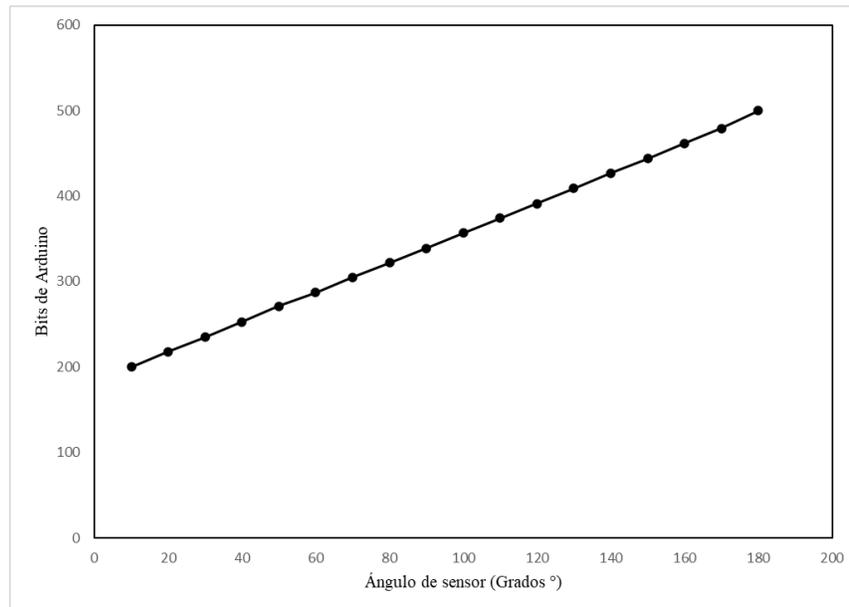


Fig. 2. Mapeo de Valores, conversión de bits en Arduino a grados de flexión.

3. Resultados y Discusión

3.1 Protocolo de medida

Se realizaron dos experimentos con la participación de cuatro atletas de diversas pruebas en pista y con características físicas diferentes, descritas en la Tabla 1. Los cuatro sensores de flexión se colocaron sobre las caras posteriores de las articulaciones de los codos y en la parte anterior de la articulación de cadera, esto para comodidad de los atletas. Las características del sensor no implican mayor dificultad en los corredores durante el ejercicio.

Tabla 1: Características físicas de los corredores.

Sujetos	Edad	Peso	Estatura	Sexo	Tipo de corredor	Pruebas de competencia
Sujeto 1	21	52.3	1.62	Femenino	Corredor de fondo	1500 m y 5000 m
Sujeto 2	12	53	1.60	Femenino	Corredor de velocidad	150 m y salto de longitud
Sujeto 3	20	68.5	1.76	Masculino	Corredor de velocidad	400 m c/v
Sujeto 4	19	69.8	1.78	Masculino	Corredor de velocidad	400 m

El primer experimento consistió en una carrera, a cadencia libre durante un minuto. En el segundo experimento, los sujetos 1 y 3 se sometieron a una segunda carrera de cadencia libre de 5 minutos con los sensores de flexión y con la integración de la banda electrónica. En ambos experimentos se muestrearon los ángulos de flexión máxima por zancada y se grabaron videos para su posterior análisis por un especialista.

Los ángulos medidos se compararon con la opinión del presidente de la asociación Veracruzana de atletismo, entrenador certificado y con más de 20 años de experiencia.

Todos los voluntarios firmaron un consentimiento informado para realizar las pruebas. La ejecución de los experimentos dependió de la disponibilidad de los voluntarios por el confinamiento provocado por la pandemia COVID-19.

3.2 Medición de los ángulos de flexión.

Para la visualización en el dispositivo móvil, se diseñó una aplicación en la plataforma App Inventor que recibía los datos de los ángulos de flexión leídos por el microcontrolador. Se utilizó un módulo Bluetooth HC-05 en configuración esclavo para la comunicación del Arduino con el dispositivo móvil. La Fig. 3 muestra una captura de la aplicación diseñada.

Una vez obtenidos los ángulos de flexión durante la carrera, por medio de Matlab se calcularon los valores promedio, máximo y mínimo de cada corredor. La Tabla 2 muestra los ángulos promedio de flexión de las articulaciones de cadera y codos, también muestra la desviación estándar entre corredores en los promedios de flexión.

Se observa en la Tabla 2 que los ángulos promedio de flexión se encontraban entre los 87° y 148°, en el caso de la articulación de la cadera, se aproximan entre 80° y 95° en los codos. La desviación estándar indica que la dispersión de los promedios angulares lo cual puede deberse a la prueba que realizan y a la adaptación que cada corredor tiene para realizar una carrera eficiente.

En las Tablas 3, 4 y 5 se muestran los ángulos de flexión máximos y mínimos de cada sujeto en cada articulación registrados durante el experimento. Se observa que los cuatro sujetos muestran asimetría en los movimientos de flexión ya que cada lado tiene diferencias en sus extremidades, con esto y la promediación de cada ángulo de flexión un entrenador puede utilizar esta información para fortalecer los ejercicios de técnica de carrera en sus atletas, así mismo los valores máximos y mínimos sirven para que el entrenador monitoree el rango de flexibilidad en las articulaciones medidas. Un ejemplo de esto es una mayor planeación en la técnica de sujeto 2 que es el que más se aleja de los 90°.



Fig. 3. Captura de celular de la aplicación.

3.3 Evaluación de la técnica de carrera y cuantificación del entrenamiento.

La Tabla 6 muestra el promedio de los ángulos que se midieron durante el segundo experimento en cada corredor. Se observa que, en ambos corredores, los ángulos de flexión promedio de la cadera se

encontraron entre los 94° y los 105°, los codos se flexionaron entre 85° y los 95°, los sujetos al ser corredores de distintas pruebas reaccionan distinto a la distancia que deben recorrer, pero trataron de mantener la flexión lo más acercado a los 90° para así correr de una manera efectiva.

Tabla 2: Ángulo promedio de cada corredor en cada articulación durante el experimento 1.

Sujeto	Articulación cadera derecha (grados)	Articulación cadera izquierda (grados)	Codo derecho en braceo al frente (grados)	Codo izquierdo en braceo al frente (grados)	Codo derecho en braceo hacia atrás (grados)	Codo izquierdo en braceo hacia atrás (grados)
Sujeto 1	108.36°	91.08°	88.64°	96.13°	87.05°	94.78°
Sujeto 2	102.06°	99.92°	109.74°	140.44°	110.02°	140.29°
Sujeto 3	87.12°	90.26°	93.54°	90.89°	95.34°	97.39°
Sujeto 4	86.96°	88.96°	92.13°	95.67°	94.67°	92.08°
Desviación estándar	10.80	4.98	9.38	23.22	9.60	22.87

Tabla 3: Ángulos máximos y mínimos en cadera.

Sujetos	Ángulo máximo articulación cadera derecha (grados)	Ángulo mínimo articulación cadera derecha (grados)	Ángulo máximo articulación cadera izquierda (grados)	Ángulo mínimo articulación cadera izquierda (grados)
Sujeto 1	89°	120°	84°	122°
Sujeto 2	87°	116°	84°	119°
Sujeto 3	74°	106°	71°	114°
Sujeto 4	72°	115°	74°	116°

Tabla 4: Ángulos máximos y mínimos en codo derecho.

Sujetos	Ángulo máximo codo derecho braceo al frente (grados, °)	Ángulo mínimo codo derecho braceo al frente (grados, °)	Ángulo máximo codo derecho braceo hacia atrás (grados, °)	Ángulo mínimo codo derecho braceo hacia atrás (grados, °)
Sujeto 1	85°	90°	84°	92°
Sujeto 2	101°	140°	101°	141°
Sujeto 3	88°	95°	90°	95°
Sujeto 4	86°	97°	84°	96°

Tabla 5: Ángulos máximos y mínimos en codo izquierdo.

Sujetos	Ángulo máximo codo izquierdo braceo al frente (grados, °)	Ángulo mínimo codo izquierdo braceo al frente (grados, °)	Ángulo máximo codo izquierdo braceo hacia atrás (grados, °)	Ángulo mínimo codo izquierdo braceo hacia atrás (grados, °)
Sujeto 1	89°	98°	85°	93°
Sujeto 2	127°	149°	104°	120°
Sujeto 3	88°	91°	92°	100°
Sujeto 4	90°	97°	87°	94°

La Tabla 7 muestra la frecuencia cardíaca en reposo, máxima, promedio y teórica de acuerdo con la fórmula de Karvonen, el trimp encontrado y el resultado de la fórmula de Karvonen. La frecuencia cardíaca máxima teórica cambia debido a la edad. En cuanto a los datos obtenidos con la fórmula de Karvonen comparados con la frecuencia cardíaca promedio se nota una diferencia ya que los datos de la fórmula de Karvonen es la frecuencia en la que deberían de trabajar estos atletas, pero estos se encuentran por debajo de dicho parámetro, esto puede deberse a la duración de la prueba, con dicha información los entrenadores pueden observar la respuesta a una carga de trabajo y así planificar la intensidad de los entrenamientos.

Tabla 6: Ángulos promedio de flexión de dos corredores de distintas pruebas.

Sujeto	Articulación cadera lado derecho (grados, °)	Articulación cadera lado izquierdo (grados, °)	Codo derecho frontal (grados, °)	Codo izquierdo frontal (grados, °)	Codo derecho posterior (grados, °)	Codo izquierdo posterior (grados, °)
Sujeto 1	105.60°	98.56°	86.07°	85.20°	88.3°	86.14°
Sujeto 3	93.82°	96.78°	91.8°	94.63°	93.45°	96.34°

Tabla 7: Frecuencias cardíacas medidas en cada sujeto y los parámetros para cuantificar el entrenamiento.

Sujeto	Frecuencia cardíaca en reposo (lpm)	Frecuencia cardíaca máxima durante el experimento (lpm)	Frecuencia promedio durante el experimento (lpm)	Frecuencia cardíaca teórica para fórmula de Karvonen (lpm)	Trimp	Fórmula de Karvonen (lpm)
Sujeto 1	48	160	126	199	11.0780	168 lpm
Sujeto 3	52	162	130	201	10.9749	171 lpm

En el TRIMP se observa que está muy lejos de un valor de 100, indica que los valores de esfuerzo son mínimos y que no se aproxima a un grado de esfuerzo intenso para los dos corredores, esto debido al tiempo de la actividad y la respuesta cardíaca de cada sujeto. En un caso hipotético, si se incrementa el tiempo de la actividad física a 60 minutos manteniendo los valores de la frecuencia cardíaca, el valor del TRIMP cambiaría de la siguiente manera; el sujeto 1 tendría un TRIMP de 132.84, y el sujeto 3 tendría un valor de 131.68, lo que significa que ambos sujetos estarían sometidos a un entrenamiento muy intenso.

Para ambos experimentos el experto comentó que el sujeto 1, al ser corredor de pruebas de fondo, tiende a flexionar menos las piernas y más los brazos que los corredores de velocidad. También indicó que la pierna derecha flexiona menos que la izquierda y que esto puede indicar alguna deficiencia en la técnica del sujeto. Para el sujeto 2 sugirió que, al ser mucho menor en edad, en comparación de los otros, puede tener una adaptación diferente a los atletas mayores. Indicó que dicho sujeto debe madurar su técnica de carrera en piernas y brazos. En el caso de los sujetos 3 y 4, al ser corredores de velocidad, tienen mayor flexión en las piernas, y tratan de mantener los codos flexionados a 90° en la mayor parte de su ciclo de carrera.

La valoración del experto coincide con los valores observados en las Tablas 2 a 7.

En cuanto a los parámetros de la cuantificación del entrenamiento, el entrenador indicó que pueden ser de gran utilidad y, que, al ser medidos de manera simultánea, pueden ayudar a realizar pruebas a los atletas de una manera eficiente para una carga de entrenamiento más precisa en la temporada.

4. Conclusiones

En este trabajo se midieron variables de la técnica de carrera en cuatro puntos corporales y se calcularon los parámetros de TRIMP y Karvonen para la cuantificación de la carrera de manera simultánea. El dispositivo funciona como medio de monitoreo para el entrenamiento que identifica los ángulos de flexión de cadera y codos, en el cual se puede analizar el levantamiento de pierna máximo (ángulos cadera) en cada zancada y la apertura de braceo (ángulos codos). Se puede integrar de manera adecuada una banda electrónica para el monitoreo de frecuencia cardíaca y así calcular parámetros para la cuantificación del entrenamiento. Se encontró que los diversos valores de la frecuencia cardíaca varían por sujeto, la monitorización de la frecuencia cardíaca de manera paralela no impide la medición de la técnica de carrera.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en la elaboración de este trabajo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los atletas voluntarios por su cooperación y a los entrenadores por sus aportaciones y participación en la elaboración de este trabajo.

Referencias

- [1] R. Schmidt, “4 Errores técnicos más comunes al correr”, [Online] 2020. Available at: https://www.fmaa.mx/post/4-errores-técnicos-más-comunes-al-correr?fbclid=IwAR2KOCR8rtGIEiskS2YnqL1fzhpojTsJuND3npmER2LX_UfmcAuuPFnRaEg. Accessed on: Oct 13, 2020
- [2] J. Cifuentes Guzmán, *Comparación de la pisada entre atletas fondistas y velocistas durante la carrera*, M. S. Thesis, Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain, 2015.
- [3] A. Casas, “Estudio biomecánico 3D para corredores”, [Online] 2019. Available at: <https://cllinikpodologia.com/estudio-biomecanico-3d-para-corredores/>. Accessed on: Oct 13, 2020
- [4] J.M García Manso, *Aplicación de la variabilidad de la frecuencia cardíaca al control del entrenamiento deportivo: análisis en modo frecuencia*, [Online] 2012. Available at: http://femedes/documentos/REV_02_Variabilidad_153.pdf. Accessed on: Oct 13, 2020
- [5] J. López Chicharro, D. Vicente Campos y J. Cancino López, Panamericana, Barcelona, Spain, *Fisiología del Entrenamiento Aeróbico*, 2013.
- [6] A. Valle Muñoz, *Prueba de ergometría*, Fundación Española del corazón, [Online] 2018. Available at: <https://fundaciondelcorazon.com/informacion-para-pacientes/metodos-diagnosticos/ergometria.html>. Accessed on Oct 13, 2020.
- [7] P. R. Hayes y M. D. Quinn, “A mathematical model for quantifying training”, *Eur J Appl Physiol*, vol. 106, pp. 839–847, 2009.
- [8] Polar, Kempele, Finland, *Polar Training Load Pro white paper*, 2019.
- [9] Maxim Integrated, California, USA, *MAX-HEALTH-BAND (hBAND) User Guide*, 2018.