

Aspectos dinámicos del movimiento lento del dedo índice

J.A. Peralta

*Departamento de Física de la Escuela Superior de Física y Matemáticas del I.P.N.,
U.P. Adolfo López Mateos, Lindavista, 07738, D.F. México,
e-mail: peralta@esfm.ipn.mx*

P. Reyes López y R. Delgado Lezama

*Departamento de Fisiología, Biofísica y Neurociencias del CINVESTAV, I.P.N.,
Av. IPN 2508, Apartado Postal No. 14-740, 07000.*

E. Yépez

*Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México,
04510 Méico, D.F.*

Recibido el 17 de octubre de 2007; aceptado el 15 de enero de 2008

En este trabajo presentamos el diseño y construcción de un medidor de alta precisión para el movimiento del dedo índice en condiciones que requieren de movimientos lentos y precisos bajo diferentes cargas. El aparato de medición utiliza un dispositivo mecánico acoplado a una bobina de inducción cuyas señales eléctricas son amplificadas, filtradas y capturadas por una computadora personal para luego ser procesadas. Los desplazamientos, velocidades y aceleraciones que producen los músculos involucrados pueden conocerse con gran precisión. El dispositivo fue probado en una muestra de 15 individuos, obteniendo de manera consistente que los movimientos precisos de la mano están compuestos de una fuerza constante que contrarresta la carga y de impulsos pequeños produciendo pulsos de velocidad muy lenta. Esta observación de movimientos pulsados y su cuantificación constituye un resultado novedoso. Nuestro sistema fue capaz de detectar una patología neuromotora basándonos solamente en el patrón de velocidades. Las ventajas de este medidor son su bajo costo, su facilidad de operación y la precisión con la que pueden ser medidos los movimientos finos del dedo índice.

Descriptores: Medición de fuerzas; sensor de movimiento; adquisición de datos.

In this work we present the design and construction of a high precision meter for the movement of the index finger under conditions that require slow and precise movements. The apparatus uses a mechanical device coupled to an induction coil, the signals are amplified, filtered and captured by a personal computer for their further processing. The displacements, speeds and accelerations that produce the involved muscles can be known with great precision. The device was proven in a sample of 15 individuals, obtaining that the precise movements of the finger are made up of a constant force that balances the load and of small impulses producing pulses of very slow speed. This observation of pulsed movements and its quantification constitutes a novel result. The apparatus is able to detect neuro-motor pathologies. The advantages of this meter are: their low cost, their operation easiness and the precision with which the subtle movements of the index finger can be measured.

Keywords: Force measurement; movement sensor; data acquisition.

PACS: 07.10.Pz; 07.07.Df; 07.05.Hd

1. Introducción

Una de las características de la mano es la versatilidad de posiciones, de velocidades y de las fuerzas que los dedos pueden realizar, las cuales le permiten desarrollar multiplicidad de operaciones, que son las que justamente le confieren a este órgano su importancia esencial en las tareas de la vida cotidiana y laboral, ya manipulando herramientas, modelando materia, tomando objetos o aplicando toda una gama de fuerzas. Una pregunta que se plantea es: si para cada una de estas operaciones el sistema neuromuscular que gobierna la operación de la mano pone en acción diferentes tipos de mecanismos de control. Para responder a esto los estudiosos de este órgano han aplicado diferentes tipos de técnicas. Así, a nivel neurofisiológico, han aislado del cuerpo vivo los “cuantos” de la acción muscular, es decir, las llamadas unidades motoras, y han estudiado la correlación entre su excitación mediante señales nerviosas y su respuesta en acortamiento o en fuerza [1]. Han analizado las áreas de la corteza cerebral

excitadas durante la ejecución de movimientos oscilatorios de los dedos [2], la excitación cerebral en la fase de planeación previa a la ejecución de una acción voluntaria manual [3], la forma de la excitación cortical cuando solamente se planea una acción manual pero no se ejecuta [4]. En cuanto al comportamiento mecánico de la mano, se han desarrollado estudios muy detallados de las acciones de prensión de objetos y se han analizado las fases de que se compone esta acción, encontrando que hay una fase que dirige la mano al objeto, y otra que simultáneamente adecua la posición de los dedos a la forma del objeto [5]. En lo referente al comportamiento del dedo índice en sí, se ha estudiado la forma como el sistema neuromuscular en sujetos íntegros contrarresta la fuerza cuando se somete al dedo a una fuerza creciente en el plano de la mano y perpendicular a éste [6]; también se han analizado las máximas fuerzas que este dedo puede soportar cuando se le aplican fuerzas en diferentes ángulos sobre un plano perpendicular al eje del dedo [7].

Al contrario de estos dos últimos trabajos que analizan el comportamiento del dedo índice bajo situaciones estáticas, en este trabajo presentamos el diseño y la construcción de un dispositivo experimental que nos permite el análisis fino de un movimiento específico que hasta ahora no ha sido estudiado, como es la rotación del dedo índice contra carga, a la velocidad más lenta posible en un plano perpendicular a la palma de la mano. Dicho dispositivo utiliza el voltaje generado en una bobina al desplazar un imán en su interior; el voltaje inducido se digitaliza y almacena en una computadora para su análisis. La velocidad tangencial del dedo índice es proporcional al voltaje inducido en la bobina, de tal forma que podemos conocer la posición, la velocidad y la aceleración instantánea de este movimiento. La carga puede ser variada en amplios márgenes de operación. La sensibilidad del dispositivo es tal que permite distinguir velocidades muy pequeñas y fuerzas menores a 1 mN. Mostramos los resultados obtenidos en una serie de mediciones de voltaje para una muestra de quince individuos jóvenes de ambos sexos, y hacemos notar que nuestro estudio se acerca al uso real de los dedos de la mano en muchos casos de la vida cotidiana y laboral en que se requiere de la aplicación de fuerzas muy pequeñas.

Hemos seleccionado el dedo índice, dado que es uno de los dedos que junto con el pulgar muestra mayor independencia en sus movimientos con respecto a los demás dedos [8]. Por otra parte, al estudiar la rotación de este dedo es relativamente sencillo repetir tantas veces como sea necesario el experimento en el mismo individuo o en una muestra de individuos para verificar que los resultados obtenidos son consistentes, cosa que cuando se estudian otro tipo de movimientos del cuerpo humano es difícil de hacer, dado el gran número de grados de libertad que presenta éste. Nuestros resultados nos muestran la extraordinaria capacidad del dedo para generar velocidades y aceleraciones sumamente pequeñas, lo cual supone la capacidad de agregar pequeñísimos incrementos de fuerza sobre un fondo dado de fuerza constante. Estos resultados apuntan a que en este caso el modo en que se generan las fuerzas del dedo índice difieren de los casos anteriores. Finalmente queremos señalar que en el estudio de los sistemas regulados mediante vías de retroalimentación, tal como es el sistema neuromuscular que genera los movimientos voluntarios del dedo, la obtención de la función de transferencia entre la entrada y la salida exige de manera ineludible el conocimiento de la función de salida y que es la función de salida la que analizamos en el presente trabajo.

2. Dispositivo experimental

El dispositivo experimental, que hemos utilizado para el estudio del movimiento de los dedos, ha sido diseñado y construido por nosotros, y se basa en la inducción producida por el movimiento relativo de un imán sobre una bobina. El dispositivo consta de una polea con un brazo de palanca de longitud seleccionable, que al rotar desplaza verticalmente un portapesas que soporta un peso que puede ser variado; en la base del

portapesas se coloca un imán cilíndrico de sección circular y luego una barra cilíndrica de hierro. La barra magnetizada está alineada en el interior de una bobina de 12.2cm de longitud con núcleo de aire y un diámetro interior de 1cm con 2000 espiras de alambre magneto. Cuando la barra magnetizada se mueve en su interior, de acuerdo a la ley de inducción de Faraday, genera una señal de voltaje a la salida de la bobina (un esquema de este dispositivo se muestra en la Fig. 1). La barra magnetizada tiene una longitud de 5cm y un diámetro de 0.8cm y por ello, una vez alineada, se desplaza en el interior de la bobina sin fricción. Para evitar en lo posible las inhomogeneidades del campo magnético, el extremo de la barra tiene una posición original muy próxima a la mitad de la bobina, y como la polea es de un radio pequeño en relación a la longitud del brazo de palanca, durante las mediciones los desplazamientos de la barra son tan pequeños que su extremo no se aleja mucho del centro de la bobina. Un análisis de Fourier del ruido de fondo en la salida de la bobina, cuando la barra magnetizada está en reposo, indica que la señal, una vez amplificada por un factor de 100, tiene componentes de frecuencia apreciables por encima de los 40 Hz debido al ruido electromagnético ambiental; por lo tanto, la señal se pasa por un filtro pasa baja con frecuencia de corte de 30 Hz. Las señales generadas por el movimiento del dedo son almacenadas en una computadora mediante una tarjeta de adquisición de datos National PCLPM-16/PnP. Al anterior dispositivo le hemos agregado un potenciómetro lineal de precisión de una sola vuelta polarizado con 5 volts y alineado con el eje de la polea; el voltaje de salida del potenciómetro es una medida de la rotación o el desplazamiento del dedo y de esta manera disponemos de un sensor adicional que corrobora los datos obtenidos con la bobina.

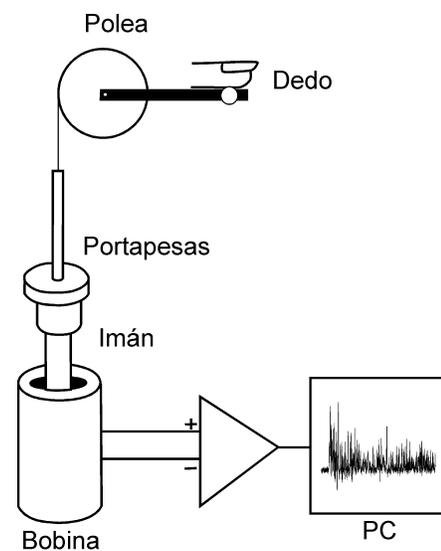


FIGURA 1. Esquema del dispositivo utilizado para medir el movimiento lento del dedo índice. Se ha agregado a este dispositivo un potenciómetro polarizado cuyo eje está alineado con el eje de la polea.

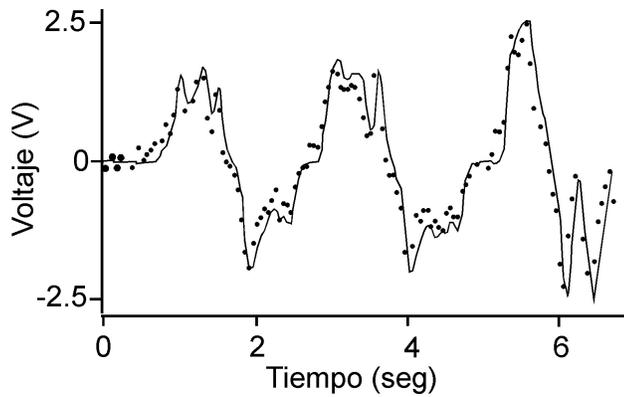


FIGURA 2. Velocidades tangenciales medidas derivando la señal del potenciómetro (puntos) y con las señales de la bobina (línea). La correlación entre estos dos conjuntos de datos es de 0.92.

Para capturar las señales de voltaje hemos diseñado un programa en lenguaje G de LabVIEW para dos canales, éste permite seleccionar el número de muestras, la velocidad de muestreo y exhibe en modo osciloscopio a la señal capturada. Permite también visualizar en la pantalla la evolución temporal de la integral de la señal de la bobina con un factor multiplicador para variar su amplitud, igualmente exhibe la derivada de la señal del potenciómetro con opción para variar su magnitud. Con estas herramientas comprobamos que la velocidad tangencial de la polea, con muy buena aproximación, es proporcional al voltaje inducido en la bobina, ya que al derivar la señal del potenciómetro ambas señales se superponen con un coeficiente de correlación de 0.92, como se observa en la Fig. 2.

3. Calibración

De acuerdo al resultado mostrado en la Fig. 2, y debido a que la rapidez relativa entre la bobina y la barra magnetizada es la misma que la velocidad tangencial de la polea, resulta que

$$v_t = KV_b; \quad (1)$$

v_t es la velocidad tangencial de la polea y V_b es el voltaje inducido en la bobina, la constante K depende de la configuración del campo magnético generado por la barra de metal, así como de la geometría y propiedades de la bobina. Para encontrar el valor de K basta con desplazar la polea una distancia d ; este desplazamiento será igual a la integral de v_t en el tiempo que ocupe este desplazamiento:

$$d = \int_0^T v_t dt. \quad (2)$$

Después de calibrar el instrumento obtenemos que la bobina está caracterizada por el valor de $K=2.81 \text{ mm/V}\cdot\text{s}$, con un error menor al 1%. Una vez hecho esto podemos calcular la velocidad de desplazamiento del dedo v_d , la cual será igual a

$$v_d = \frac{R}{r} v_t. \quad (3)$$

Con r el radio de la polea (en este caso lo escogimos de 17.7 mm), R la longitud del brazo de palanca (en este experimento fue de 75.8 mm); sustituyendo estos valores obtenemos que

$$v_d = 12.04 V_b \frac{\text{mm}}{\text{V}\cdot\text{s}}. \quad (4)$$

De esta manera el voltaje en cada instante del tiempo nos proporciona la velocidad instantánea con la que el extremo del dedo se mueve. El voltaje de la bobina se almacena en la memoria de la computadora por medio de la tarjeta de adquisición de datos. La razón de muestreo puede variarse a voluntad, para este experimento escogimos 100 muestras por segundo, cada muestra cubre un intervalo de tiempo de $\Delta T=1/100 \text{ s}$, el tiempo total de muestreo también es optativo y para este experimento fue $T=20 \text{ s}$. En estas condiciones el dedo rota dentro de un intervalo de 20 a 40 grados, manteniendo el extremo de la barra magnetizada siempre muy cerca de la mitad de la bobina. Las cargas en el portapesas (incluyendo la carga del portapesas mismo) que cada individuo desplazó fueron: 369, 569, 769, 969 y 1169 gr.

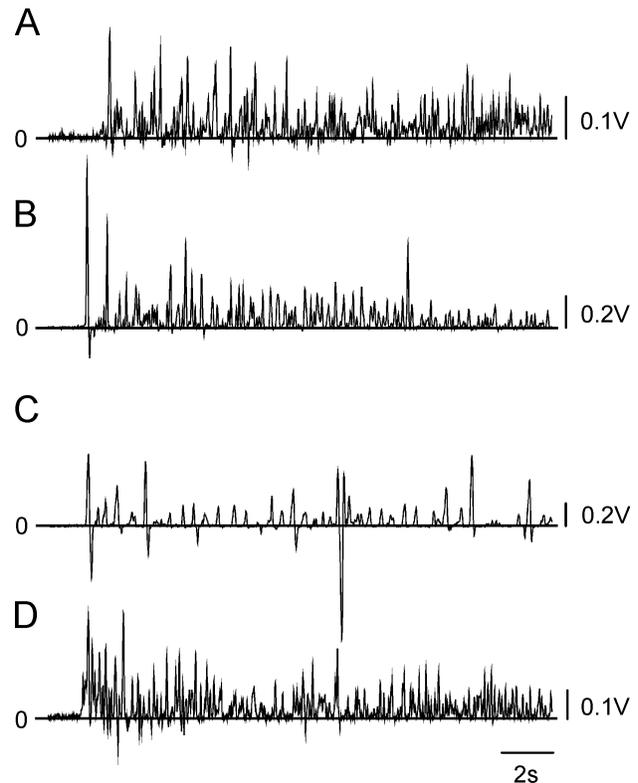


FIGURA 3. Cuatro ejemplos de pulsos de voltaje registrados durante 20 segundos con una velocidad de muestreo de 100 muestras/segundo, y con un factor de amplificación de 100. Como se observa en la figura predominan en general los pulso positivos, y los negativos solamente aparecen de manera esporádica.

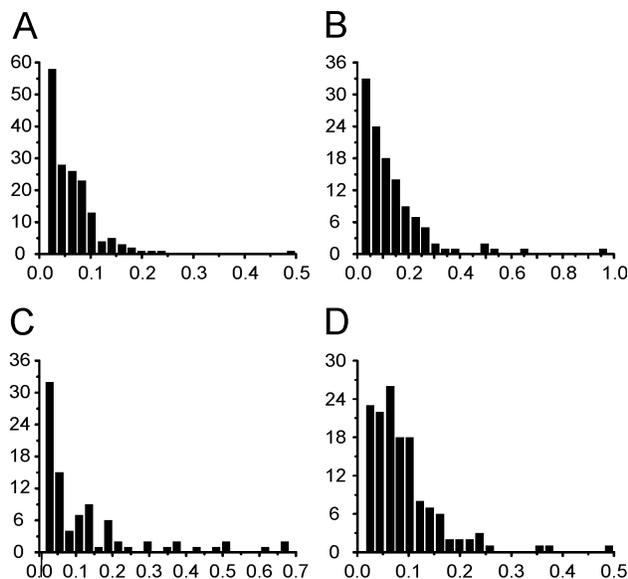


FIGURA 4. Histogramas para los pulsos de voltaje de las muestras correspondientes a la Fig. 3; en la escala horizontal aparecen las amplitudes de los pulsos y en la vertical sus frecuencias, se observa claramente que predominan los pulsos de baja amplitud.

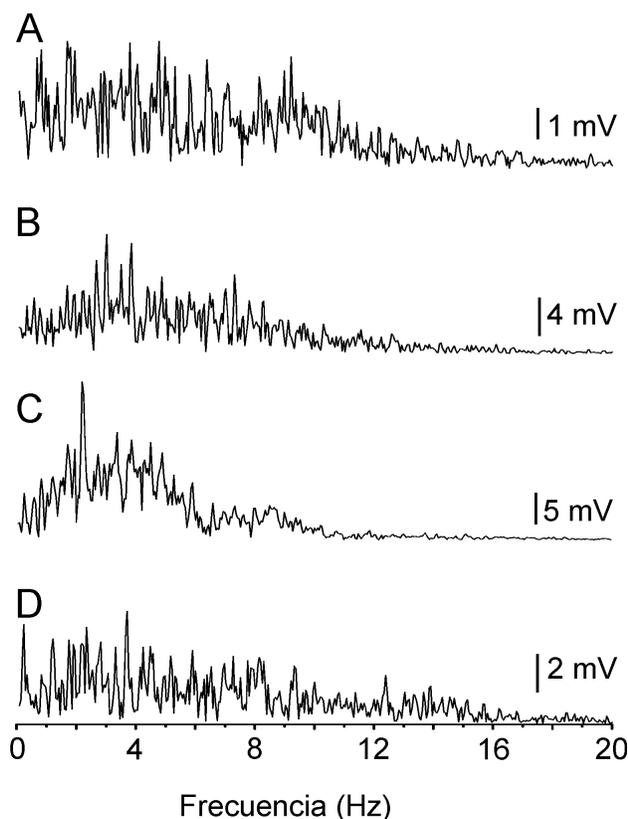


FIGURA 5. Espectro de Fourier para las muestras de la figura 3, se observa que la distribución de frecuencias es muy dispersa y que no hay una frecuencia dominante; solamente en el caso C una frecuencia parece destacarse débilmente.

4. Resultados

Velocidades. Analizamos la rotación del dedo índice de la mano derecha de una muestra de 15 individuos de ambos sexos, todos ellos menores a los 30 años, diestros, y en principio ninguno declaró padecer alguna afección en su control motor; la rotación del dedo índice se hizo bajo la instrucción que fuera de la manera más lenta y regular posible y sin flexionarlo para evitar ese grado de libertad en el experimento. Para ello los individuos se mantuvieron sentados, colocando la palma de la mano totalmente pegada a una plataforma horizontal, y manteniendo rígido todo el cuerpo en la posición más cómoda con el objeto de que pudieran observar claramente el movimiento de su dedo.

En la Fig. 3 mostramos la variación del voltaje como función del tiempo para cuatro casos representativos, correspondiendo a la carga más pequeña de 369 gr. De entre los 15 casos muestreados, sólo uno de ellos mostró un patrón de movimiento irregular, al cual nos referiremos posteriormente. Al observar las señales de voltaje generadas en la bobina, proporcionales a la velocidad, concluimos que los patrones de movimiento presentan las siguientes características:

- a) La rotación del dedo no se efectúa de manera continua, sino mediante una serie de pulsos de velocidad que llevan al dedo de una posición a la siguiente.
- b) Los pulsos son predominantemente en un solo sentido, en algunos casos se presentan de manera esporádica pulsos negativos, la frecuencia con que aparecen pulsos negativos varía de individuo a individuo.
- c) Los pulsos se presentan en una amplia variedad de amplitudes tal como se observa en los histogramas de amplitudes de la Fig. 4. En éstos se observa que predominan los pulsos de baja amplitud.
- d) Los intervalos de tiempo entre pulso y pulso se distribuyen también en un amplio rango, lo cual se observa en el espectro de Fourier para las señales de voltaje mostradas en la Fig. 5, donde se observa una amplia dispersión en las componentes de frecuencia.

Para calcular los pulsos de velocidad, construimos un programa en lenguaje G de LabVIEW que exhibe los pulsos de voltaje y los convierte en pulsos de velocidad. Para hacer el cálculo de los promedios de los pulsos de velocidad, mediante un cursor se tomó en cuenta solamente los pulsos que estuviesen 3 veces por encima del ruido basal (5 mV), ya que de otra manera la inclusión de los pulsos de ruido habrían generado promedios muy bajos. La estadística para los pulsos de velocidad se muestra en la Tabla I. En ésta también se muestran las desviaciones estándar, así como los errores porcentuales.

Fuerzas. Observando el comportamiento general de los patrones de velocidad en los que predominan los pulsos positivos, y los negativos solamente aparecen de manera intermi-

tente, observamos que la fuerza muscular tiene dos componentes: una componente constante F_c usada para contrarrestar la carga manteniendo al portapesas fijo, y otra variable F_v encargada de acelerar en intervalos muy pequeños a la polea y la carga; tomando en cuenta el diseño del instrumento se escogió la masa y radio de la polea de tal forma que la inercia rotacional de la polea fuese despreciable, entonces se puede considerar que la fuerza variable solamente acelera la carga, tal como se observa en la Fig. 6, donde se ve que los pulsos de velocidad hacen avanzar la carga de forma escalonada; en los intervalos donde la distancia permanece constante la velocidad es nula. Bajo estas condiciones la fuerza que ejerce el dedo sobre la carga se puede escribir así:

$$F = F_c + F_v. \tag{5}$$

De acuerdo al arreglo experimental mediante el cual el dedo

mueve a la masa total del portapesas estas fuerzas resultan ser

$$F_c = \frac{r}{R} M g, \tag{6}$$

$$F_v = \frac{r}{R} M a, \tag{7}$$

donde M es la masa total del portapesas, g la aceleración de la gravedad y a es aceleración de la carga. En la Tabla II mostramos los valores promedio de F_v . También en este caso hemos eliminado de los cálculos del promedio los pulsos producidos por el ruido.

Trabajo desarrollado por unidad de distancia y de masa. Todo movimiento muscular requiere cuando menos de la intervención de 2 tipos de músculos, unos que permiten el

TABLE I. Promedios de los pulsos de velocidad, en mm/s, para cada muestra como función de la carga. La columna 7 muestra el promedio de la velocidad para diversas cargas de cada muestra y la columna 8 muestra su desviación estadística. La última columna es el error porcentual para cada muestra. Nótese la anomalía en el renglón 7 para las cargas pequeñas y su gran desviación estadística, si suprimimos de esta tabla la muestra 7 los valores promedio de la muestra global disminuirían sensiblemente.

	0.369kg	0.569kg	0.769kg	0.969kg	1.169kg	$\langle v \rangle$	σ	$\frac{\sigma}{\langle v \rangle} 100$
1	0.78	0.83	0.91	1.09	0.96	0.91	0.12	13.1
2	0.9	0.84	0.93	1.11	1.27	1.01	0.17	17.5
3	0.95	1.03	1.12	0.93	0.92	0.99	0.08	8.5
4	0.72	0.65	0.72	0.8	0.8	0.74	0.06	8.6
5	0.91	1.02	1.15	0.81	0.73	0.92	0.16	18.0
6	0.96	0.85	1.24	0.98	0.95	0.99	0.14	14.6
7	1.97	1.59	1.32	0.9	0.72	1.3	0.50	39.0
8	0.78	0.54	0.63	0.75	0.78	0.69	0.10	15.3
9	0.66	0.75	0.71	0.74	0.76	0.72	0.04	5.6
10	0.95	1.01	0.85	0.83	0.63	0.85	0.14	17.0
11	0.95	0.83	0.99	0.92	1.07	0.95	0.08	9.3
12	1.38	1.03	1.2	1.12	0.98	1.14	0.15	13.8
13	1.1	0.95	0.88	1.1	1.17	1.04	0.12	11.5
14	1.26	1.48	1.7	1.56	1.63	1.52	0.17	11.1
15	0.94	0.86	1.06	1.04	0.97	0.97	0.08	8.2
						0.98	0.22	

TABLE II. Valores promedio de la componente variable de la fuerza en función de la fuerza constante para las 15 muestras, todos los valores están dados en mN. Nótese que la fuerza variable es una muy pequeña fracción de la fuerza constante en todos los casos.

F_c	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
832	0.38	0.36	0.41	0.32	0.52	0.38	1.78	0.25	0.31	0.32	0.35	0.56	0.45	0.51	0.37
1281	0.65	0.52	0.60	0.53	1.06	0.53	2.17	0.31	0.53	0.43	0.43	0.63	0.55	0.81	0.50
1728	0.94	0.77	0.97	0.74	1.51	0.93	2.32	0.46	0.71	0.64	0.69	1.03	0.85	1.40	0.89
2185	1.41	1.06	1.20	1.24	1.28	1.06	1.69	0.66	0.92	0.70	0.85	1.09	1.41	1.40	1.11
2636	1.37	1.53	1.45	1.58	1.37	1.21	1.45	0.72	1.12	0.73	1.14	1.22	1.61	2.00	1.72

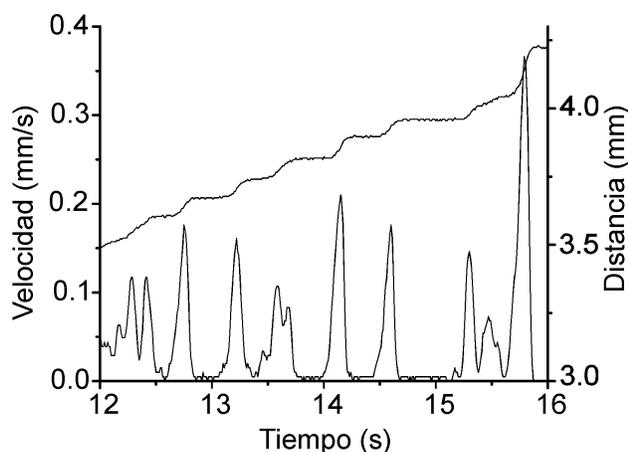


FIGURA 6. En la parte inferior de la gráfica se muestran los pulsos de velocidad, mientras que en la parte superior se muestra la distancia; se observa claramente que el avance es escalonado y que hay intervalos de tiempo en los cuales la fuerza del dedo se limita a conservar la posición alcanzada contrarrestando la fuerza de la carga, mientras que el avance se da mediante pulsos de velocidad que implican una fase de aceleración y otra de frenado.

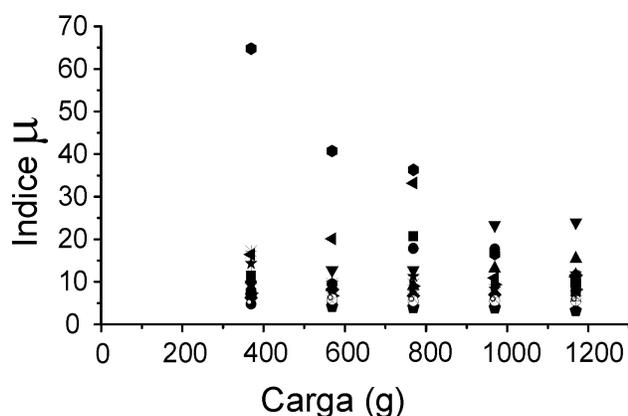


FIGURA 7. Valores de μ en función de las masas del portapesas para las quince muestras consideradas; μ está medido en unidades arbitrarias; nótese que hay una muestra de comportamiento sumamente irregular.

movimiento en un sentido, y otros que lo hacen en sentido contrario; esto es, para el caso del dedo, músculos flexores y extensores, respectivamente. Para los intervalos del patrón de velocidades, en que el movimiento consta de sólo pulsos positivos, a la fase de aceleración positiva correspondería la acción de un músculo o músculos flexores, y a la fase de desaceleración, la acción de un músculo o músculos extensores, y en ambas fases se haría trabajo del individuo sobre la masa externa; pero en los casos en que en los patrones aparecen pulsos negativos de velocidad, una parte del trabajo de desaceleración es producida por los músculos del individuo, y otra por la fuerza de gravedad que vence a la fuerza muscular del dedo y que de hecho lo hace retroceder perdiendo en parte la posición alcanzada. Por ello, para no caer en ambigüedades, hemos decidido provisionalmente, mientras no dispongamos de un método para separar ambas contribucio-

nes, calcular solamente el trabajo realizado durante la acción de los músculos flexores, esto es, durante las fases de aceleración positiva. En los intervalos de tiempo entre t y $t + \Delta t$ en los que actúan solamente los músculos flexores, el trabajo hecho sobre la masa del portapesas es igual a

$$W = \int_0^d F dx, \quad (8)$$

substituyendo el valor de $F=Ma$, y escribiendo que $a=dv_t/dt$ y que $dx=v_t dt$,

$$W = \int_t^{t+\Delta t} Mv_t dv_t, \quad (9)$$

o equivalentemente

$$\frac{W}{MK^2} = \int_t^{t+\Delta t} V dV. \quad (10)$$

Por otra parte, la distancia total recorrida por el portapesas en el tiempo T que dure la medición será proporcional a

$$\int_0^T V dT. \quad (11)$$

Si ahora sumamos todos los trabajos hechos en los N intervalos de aceleración positiva y los dividimos entre la expresión (11), tendremos un índice μ proporcional al trabajo realizado por los músculos agonistas por unidad de masa y por unidad de distancia:

$$\mu = \frac{\sum_{n=1}^N \int_{t_n}^{t_n+\Delta t_n} V dV}{\int_0^T V dT}. \quad (12)$$

Este parámetro permite distinguir cuantitativamente la eficiencia con la que un individuo realiza labores manuales finas; a su vez puede servir como base de futuros estudios que profundicen en la mecánica y termodinámica de estos procesos. El comportamiento de μ para las diferentes cargas se muestra en la Fig. 7, en la cual aparece un caso claramente anómalo.

5. Discusión

Resultan notables los valores promedio tan pequeños de los pulsos de velocidad que puede imprimir el dedo durante pequeñas fracciones de tiempo cuando rota contra carga (ver Tabla I) que son del orden de 1 mm/seg. Además, es notable que a pesar de que las fuerzas que tiene que vencer el dedo van desde los 0.83 N hasta 2.63 N, las velocidades promedio para cada individuo se mantienen aproximadamente constantes, mostrando fluctuaciones relativamente pequeñas que van desde desde 5.6 % hasta 18.0 %.

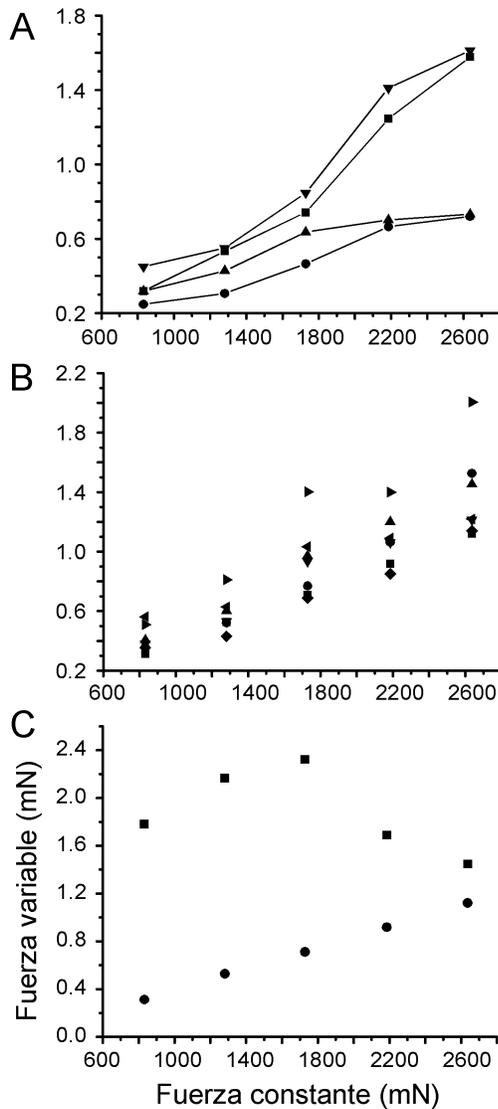


FIGURA 8. Gráficas de F_v en función de F_c . En la parte C de la figura hemos graficado el caso anómalo junto con un caso de notable linealidad para resaltar su irregularidad.

En la Tabla II mostramos las magnitudes de las componentes de la fuerza, obtenidas de las Ecs. (6) y (7). En esta tabla observamos que la fuerza constante es mucho mayor que el promedio de los pulsos de fuerza variable: varias centenas de mN para la F_c y una fracción de mN para F_v , esto significa una extraordinaria capacidad de modulación de las fuerzas aplicadas por el dedo, que es capaz de agregar pequeñísimos incrementos sobre un fondo dado de fuerza.

Al graficar los valores de la Tabla II de F_v en función de F_c , observamos que los resultados se dividen en 3 categorías:

- un comportamiento sigmoideal (en forma de s),
- un comportamiento aproximadamente lineal, y
- un comportamiento anómalo, tal como se observa en la Fig. 8c.

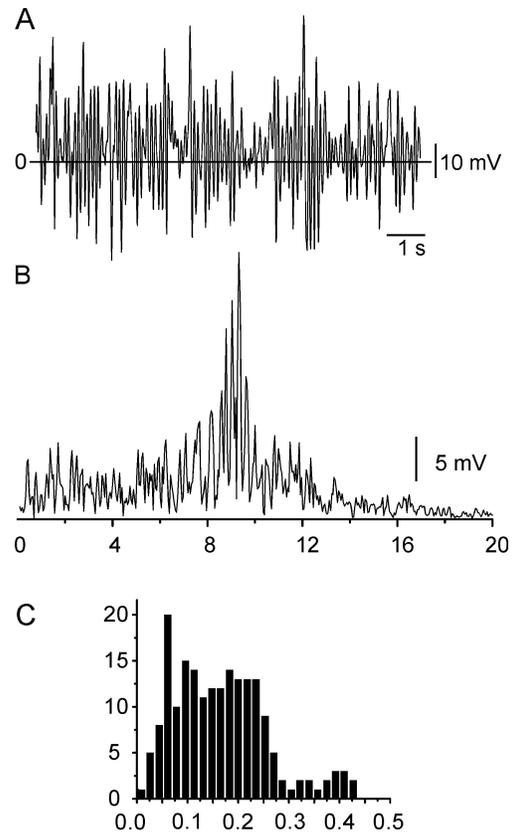


FIGURA 9. Patrón de velocidades (A), análisis espectral (B) e histograma de amplitudes de pulsos de velocidad (C) para el caso anómalo.

El caso anómalo de la Fig. 8C, que para fines de comparación hemos presentado junto con un caso de extrema regularidad, corresponde al caso anómalo en el comportamiento de μ de la Fig. 7 y también a un patrón de velocidades muy anómalo; en este caso el patrón de velocidades para las cargas más bajas consiste no de una serie de pulsos sino en oscilaciones de la velocidad alrededor de cero, y los valores negativos no aparecen de manera esporádica sino que invariablemente a un valor positivo le sigue un valor negativo. Por otra parte, los máximos de la oscilación aparecen espaciados con gran regularidad, fenómeno que se comprueba en su espectro de Fourier, en el cual aparece muy claramente un pico de frecuencia a 9.17 Hz; finalmente, su distribución de amplitudes de velocidad presenta pocos pulsos de baja amplitud y una gran concentración de pulsos de tamaño intermedio y alto. Todas estas características se presentan en la Fig. 9. Luego de hecho este análisis nos hemos entrevistado con este individuo y ha declarado padecer una afección de tipo neurológico (obsesivo-compulsivo), pero no hemos podido obtener más especificaciones. Las anomalías en su patrón de velocidades, en su análisis espectral, su índice de trabajo por unidad de masa y carga y en su relación de fuerza variable en función de fuerza constante, solamente aparecen para las cargas iniciales correspondientes a 369, 569 y 769 gr y se normalizan para las cargas de 969 y 1169 gr. Dada la complejidad de los mecanismos neuromotores que generan el movimiento de

los dedos, no podemos por el momento explicar este peculiar comportamiento, y sólo podemos decir que es natural que su índice μ sea muy alto en comparación a los demás, ya que su avance no es regularmente escalonado, tal como el caso de la Fig. 6, sino que a cada avance le sucede un retroceso. Por otra parte, al predominar en su histograma los pulsos de velocidad de valores medios o grandes, esto indica que su capacidad de modulación para fuerzas muy finas es deficiente. Así, para cargas pequeñas, logra hacer la tarea que se le indica, pero de manera tosca y con un gasto de energía relativamente alto. Por otra parte, el comportamiento casi perfectamente lineal de la gráfica inferior en la Fig. 8C corresponde a un patrón de pulsos de velocidad conformado por pulsos muy regulares, muy continuos y de amplitud pequeña, y que en la Tabla I también se corresponde con un valor promedio de velocidad muy pequeño (caso 9) y con la menor dispersión de sus valores para diferentes cargas. Asimismo, para este caso el valor de μ se mantiene muy constante para todas las cargas y casi tiene el menor valor en relación a los demás casos. Estas características podrían ser consideradas como índices de una fina modulación de las fuerzas del dedo índice.

6. Conclusiones

El análisis fenomenológico del movimiento lento del dedo índice contra carga, en los individuos diestros, muestra una serie de regularidades en los individuos sanos, como son:

- a) que el patrón de velocidades es pulsátil;
- b) que en la distribución de amplitudes de los pulsos de velocidad tienden a dominar los de tamaño pequeño;
- c) que el espectro de Fourier muestra gran dispersión en las frecuencias;
- d) que la fuerza aplicada por el dedo tiene 2 componentes, una de los cuales se limita a contrarrestar la carga y la otra produce los pulsos de movimiento,
- e) que la componente variable de la fuerza es mucho más pequeña que la componente constante, lo cual indica un alto grado de modulación; y, finalmente

- f) que un caso patológico presenta claras diferencias cuantitativas y cualitativas con respecto a los comportamientos típicos en todos los parámetros medidos.

A diferencia de otros trabajos desarrollados sobre las fuerzas que puede desarrollar el dedo índice en condiciones estáticas, el tipo de movimiento aquí estudiado se acerca más a los movimientos naturales, ya que los movimientos lentos o la aplicación de fuerzas muy graduadas son casos frecuentes en muchas actividades de la vida cotidiana o del trabajo finamente controlado. Los resultados obtenidos nos dan información cuantitativa de la sorprendente capacidad de modulación de las fuerzas aplicadas por el dedo índice que es capaz de agregar pequeñísimos incrementos de fuerza sobre un fondo de fuerza constante de gran magnitud. Estos resultados apuntan a que para este tipo específico de movimiento las formas de reclutamiento de los “cuantos” de fuerza pueden ser diferentes a las formas presentadas por Kamen [6]. Esto permite establecer un proyecto de estudio en el cual trataremos de probar, usando tanto criterios mecánicos como fisiológicos, que los mecanismos de reclutamiento de unidades motoras para nuestro caso específico son diferentes a los propuestos para el incremento de fuerza bajo condiciones isométricas. En la etapa siguiente de nuestro estudio caracterizaremos más detalladamente la fenomenología del movimiento del dedo índice para casos patológicos, esperando encontrar índices de anomalías en enfermedades del sistema nervioso en lo referente al control muscular, asimismo, desarrollaremos simultáneamente con el análisis del movimiento del dedo índice, mediciones de las señales eléctricas neurofisiológicas de los sistemas neuromotores implicados en este movimiento.

Agradecimientos

J.A. Peralta agradece a la Comisión de Operación y Fomento de las Actividades Académicas del I.P.N. el apoyo otorgado para la realización de este trabajo.

1. *Handbook of Physiology*, Vol. II, Chapter 10 Part I, John M Brckhart and Vernon B. Mountcastle (American Physiology Society, Bethesda, Maryland, 1981).
2. J.P. Buschbeck, C. Mahnkopf, C. Holzknicht, H. Siebner, S. Ulmer y O. Jansen, *Eur. J. Neurosci* **12** (2003), 3375.
3. M. Rodríguez, R. Muñiz, B. González y M. Sabate, *Neuroimage* **4** (2004) 1480.
4. H.H. Ehrsson, S. Geyer y E. Naito, *J. Neurophysiol* **90** (2003) 3304.
5. M. Jeannerod, The neural and behavioral organization of goal-directed movements (Oxford, Oxford University Press, 1988).
6. G. Kamen y D.C.C. Du, *Neuroscience* **88** (1999) 643.
7. R. Yocogawa y K. Hara, *Transactions of the ASME* **124** (2002) 302.
8. C.E. Lang y M.H. Schieber, *J. Neurophysiol* **90** (2003) 1160.