

# Características y técnicas de registro de los movimientos oculares

LOUIS F. DELL'OSSO y ROBERT B. DAROFF

Los movimientos oculares tienen como misión conducir los estímulos visuales del campo periférico de visión (retina periférica) al campo visual central (fóvea) y mantener la fijación foveal del objeto en movimiento. Esta captación y afianzamiento de las imágenes por la fóvea y su estabilización en ella durante los movimientos de la cabeza constituyen las funciones básicas de la motilidad ocular.

## ORGANIZACION FISIOLÓGICA

El sistema motor ocular puede concebirse a efectos prácticos como dos diferentes subsistemas, las versiones y las vergencias, que actúan de modo sinérgico (fig. 9-1) (1). El subsistema de las versiones, influenciado por las aferencias vestibulooculares, controla todos los movimientos oculares conjugados, mientras que el subsistema de las vergencias hace lo propio con los movimientos disconjugados. Cualesquiera que sean las entradas, existen sólo tres categorías principales de salidas oculomotoras: los movimientos oculares rápidos (MOR o sacádicos) y los movimientos oculares lentos (MOL) en el subsistema de las versiones, y las vergencias oculares (MOV) que constituyen de por sí un subsistema. Estas tres salidas se transmiten por una vía común desde las neuronas motoras oculares hasta los músculos extrínsecos del ojo (fig. 9-2). De la modalidad rápida del subsistema de las versiones dependen todos los movimientos sacádicos conjugados (MOR) y de la modalidad lenta, todos los MOL, que comprenden, aunque no de modo exclusivo, los movimientos de seguimiento ocular. Los diferentes términos descriptivos de los movimientos oculares hacen,

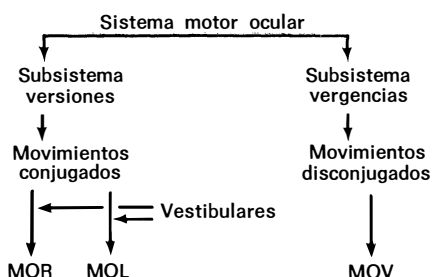
en general, referencia al tipo de entrada inductora o a las circunstancias de su acaecimiento, y todos ellos pueden categorizarse en una o más de las tres salidas (MOR, MOL, MOV) del sistema motor ocular (tabla 9-1).

Existen abundantes razones fisiológicas, anatómicas y clínicas, para considerar que los tres subsistemas mencionados son autónomos. Sin embargo, y en contradicción con teorías precedentes, las neuronas pertenecientes a los núcleos de los músculos motor ocular común, patético y motor ocular externo no son específicas para cada tipo de movimiento ocular. Lo que ocurre en realidad es que son los distintos patrones de descarga de los diferentes grupos neuronales los que determinan, en última instancia, el tipo de movimiento ocular (2, 3).

## MOVIMIENTOS OCULARES RÁPIDOS (SACÁDICOS)

Los movimientos de versión (conjugados) rápidos del ojo se hallan sometidos a un control tanto voluntario como reflejo. Son ejemplos de movimientos sacádicos voluntarios las refijaciones intencionadas y aquellas que responden a órdenes, por ejemplo: «Mire a la derecha... Mire arriba.» La aparición súbita de un objeto en la periferia visual o de un sonido inesperado puede provocar un movimiento sacádico reflejo en dirección al estímulo. En condiciones normales estos

Algunos de los términos y conceptos empleados en este capítulo se definirán y clarificarán de forma más amplia en el «Léxico» que sigue al capítulo 11.

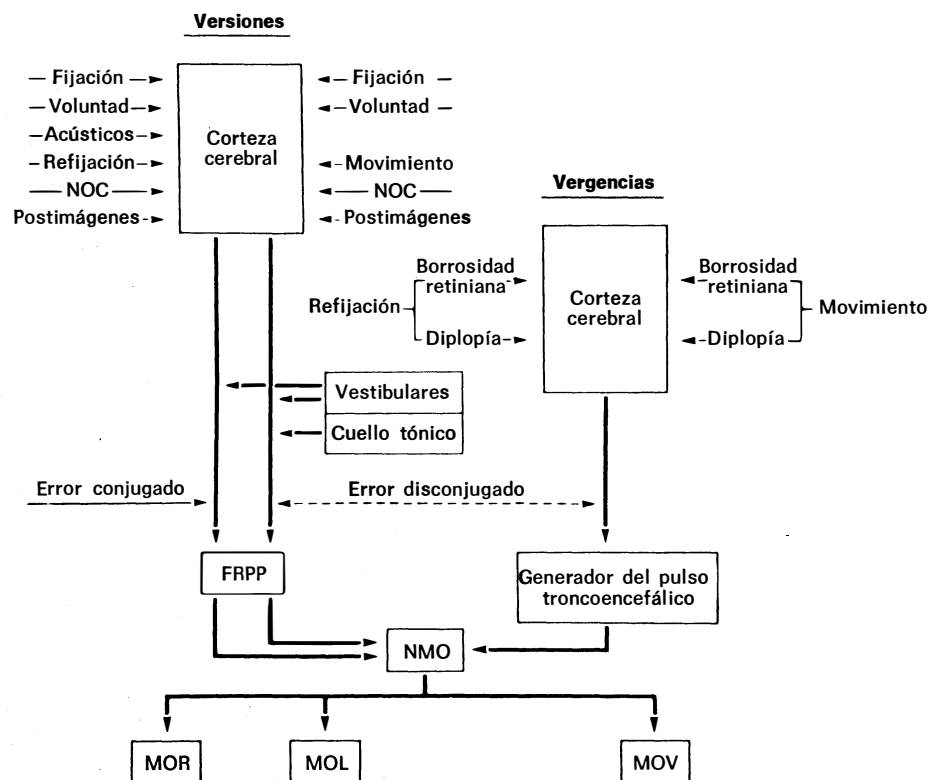


**Fig. 9-1.** Organización básica del sistema motor ocular en la que se recalca la división existente entre el subsistema de las vergencias y el subsistema de las versiones en su doble modalidad. Las tres salidas motoras fundamentales son: los movimientos oculares rápidos (MOR), los movimientos oculares lentos (MOL) y las vergencias oculares (MOV).

movimientos suelen asociarse con movimientos de la cabeza en la misma dirección, en contraste con las exploraciones clínicas y la mayor parte de los experimentos fisiológicos que se realizan con la cabeza fija.

El estímulo visual adecuado para provocar los MOR es el desplazamiento de un objeto. Después de un cambio instantáneo de la posición de aquél, el sistema motor ocular responde con un MOR tras una latencia (retraso) de 200 a 250 mseg. Tanto la velocidad máxima como la duración del MOR dependen de la extensión (amplitud) del movimiento ocular, con una variación de 30° a 700°/seg para la primera, y de 20 a 100 mseg para la segunda en movimientos comprendidos entre los 0,5° y los 40° de amplitud. Los MOR son conjugados y balísticos, y el sistema de control responsable de su generación es discreto (es decir, en distintos instantes, las órdenes controladoras se llevan a cabo de acuerdo con la continua llegada de información visual procedente de la retina; estas decisiones son, en esencia, irrevocables, de modo que una vez los ojos se han puesto en movimiento no es posible alterar su trayectoria). La señal de control es el error retiniano, que queda reducido a cero, ya que la naturaleza del subsistema es de retroacción negativa.

Transcurrida la latencia necesaria, la respuesta del



**Fig. 9-2.** Esquema del sistema de control de los movimientos oculares, constituido por los subsistemas de las versiones, en su doble modalidad, y de las vergencias. La salida procedente de la formación reticular protuberancial paramediana (FRPP) se suma a la del generador del pulso nervioso a nivel de los núcleos motores oculares (NMO) para producir tres tipos principales de movimientos oculares: rápidos (MOR), lentos (MOL) y vergencias (MOV). (Tomado de Dell'Osso LF, Daroff RB: Functional organization of the ocular motor system. Aerospace Med 45:873, 1974.)

Tabla 9-1. Clasificación de los movimientos oculares

Versiones		Vergencias
Movimientos oculares rápidos (MOR)	Movimientos oculares lentos (MOL)	Movimientos oculares de vergencia (MOV)
Sacádicos: Refijación	Seguimiento (rastreo)	Refijación
Reflejos		
Voluntarios	Voluntarios	Rastreo (seguimiento)
Microsacudidas ( <i>flick</i> )	Microdesviaciones ( <i>drift</i> )	Microdesviaciones ( <i>drift</i> )
Sacudidas correctoras	Deslizamientos correctores (?)	Deslizamientos correctores (?)
Seguimiento sacádico (rueda dentada)	Compensadores	Voluntarios
Fase rápida del nistagmo (en resorte)	Fase lenta del nistagmo	
Sacudidas cuadrangulares (Gegenrücke)	Nistagmo pendular	
Inducidos por postimágenes	Inducidos por postimágenes	
REM	Desviaciones ( <i>drifts</i> ) lentas en el sueño	
Sacudidas frenadoras	Rastreo imaginario	Rastreo imaginario
	Rastreo propioceptivo	Rastreo propioceptivo

Tomado de Dell'Osso LF, Daroff RB: Functional organization of the ocular motor system. Aerospace Med 45: 873, 1974.

MOR al desplazamiento del objeto (fig. 9-3) consiste en un período de aceleración hasta una velocidad máxima, y una desaceleración de los ojos rumbo a la nueva posición del objeto. La actividad del par de músculos agonista-antagonista se caracteriza durante el movimiento por una descarga de máxima activación del agonista y una inhibición total del antagonista (fig. 9-4) (4). Los registros electromiográficos (EMG) demuestran que la desaceleración de los MOR no es consecutiva a un frenado activo del músculo antagonista, sino que consiste meramente en que los dos músculos adquieren las tensiones relativas necesarias para mantenerse en la posición requerida por el objeto. Esto es suficiente para llevar a cabo una desaceleración rápida, dado el efecto frenador (amortiguador) del aparato oculomotor (es decir, el globo, los músculos, las aletas tendinosas y el tejido graso orbitario de sostén) (5).

Debido a la gran capacidad amortiguadora del aparato oculomotor, la señal nerviosa necesaria para llevar a cabo la rápida aceleración del MOR ha de consistir en una descarga de salvas de alta frecuencia seguida de una frecuencia de salvas tónicas adecuada para detener el movimiento y mantener los ojos en la nueva posición. Esta combinación de patrones de descarga estáticos y tónicos es conocida como el «pulso-

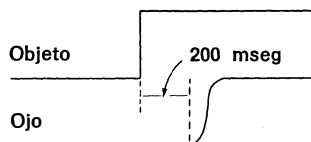


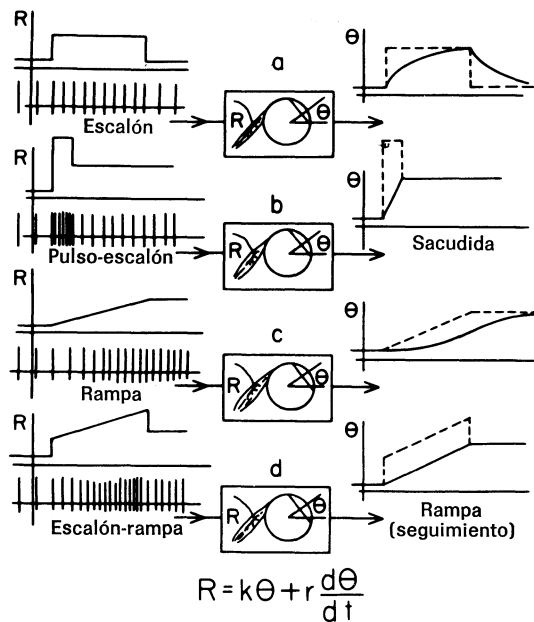
Fig. 9-3. Representación de un movimiento ocular rápido (MOR) en respuesta a un desplazamiento del objeto hacia la derecha, en la que se ilustran la latencia (200 mseg) y la trayectoria del MOR (sacudida).



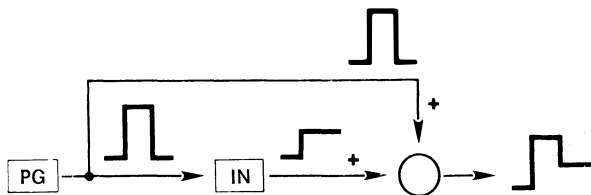
Fig. 9-4. Actividad muscular del recto lateral izquierdo (RLI) (agonista) y del recto medial izquierdo (RMI) (antagonista) durante un movimiento ocular rápido (MOR) hacia la izquierda. Obsérvese la descarga de actividad del RLI y la total inhibición del RMI durante el MOR y la ausencia de actividad frenadora en el RMI.

escalón» de la innervación neural (2, 6, 7, 8). En la figura 9-5 se ilustra la relación existente entre las diferentes señales nerviosas y los movimientos oculares resultantes. El movimiento del ojo en la figura 9-5a es el resultado de un cambio en escalón de la frecuencia de descarga y, a causa de la amortiguación dinámica del aparato oculomotor, es de una lentitud considerable comparado con un MOR normal. La trayectoria normal de un MOR sólo se produce cuando el escalón está precedido por un pulso (fig. 9-5b), y para la producción del pulso-escalón de innervación necesario se combinan un generador y un integrador del pulso nervioso (fig. 9-6), localizados ambos a nivel de la formación reticular protuberancial paramediana (FRPP) en la vecindad del núcleo del motor ocular externo (9). No se conoce la localización del lugar en que se lleva a cabo la sumación del pulso con el escalón, pero tiene que ser prenuclear, puesto que la información nerviosa que vehiculizan los axones de la cintilla longitudinal posterior está ya sumada (10).

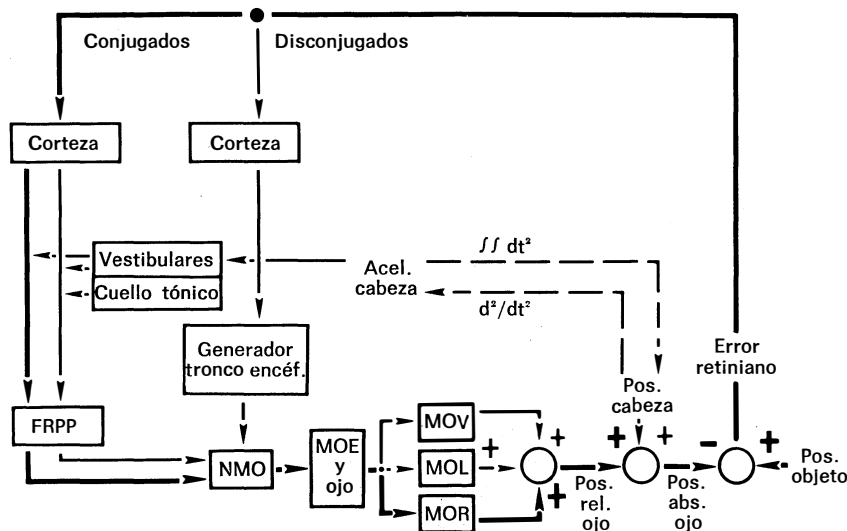
La naturaleza en cadena cerrada de los MOR del subsistema de las versiones puede ser representada en un cuadro diagramático (fig. 9-7). La señal del error retiniano, que significa la discrepancia entre las posi-



**Fig. 9-5.** Representación de los movimientos oculares rápidos (MOR) (a y b) y de los movimientos oculares lentos (MOL) (c y d) que se producirían como resultado de los patrones de inervación ilustrados. Las curvas superiores de la izquierda y las curvas de guiones de la derecha son un trazado de la cantidad instantánea de descargas en relación al tiempo. La ecuación relaciona la frecuencia de descarga nerviosa (R) con la posición del ojo ( $\theta$ ) y la velocidad  $\frac{d\theta}{dt}$ . Nótase que el carácter hiperamortiguado de la dinámica del aparato muscular y ocular da como resultado la producción de respuestas perezosas a un simple cambio de la frecuencia de descargas en escalón (a) o en rampa (c). Para generar un MOR (sacádico) adecuado se requiere un pulso-escalón (b) y para generar un MOL (de seguimiento) adecuado se precisa un escalón-rampa (d). (Tomado de Robinson DA: Oculomotor control signals. En Lennerstrand G, Bach-y-Rita P (eds.): Basic Mechanisms of Ocular Motility and Their Clinical Implications. New York: Pergamon Press, 1975.)



**Fig. 9-6.** Demostración esquemática del modo en que se podría derivar el pulso-escalón de la inervación, mediante la sumación de las salidas de un generador del pulso nervioso (PG) y de un integrador nervioso (IN).



**Fig. 9-7.** Diagrama básico en cadena cerrada del subsistema de las versiones en su modalidad de los movimientos oculares rápidos (MOR) (líneas gruesas) superpuesto al diagrama del control de los movimientos oculares en su conjunto. La señal de control consistente en el error retiniano conjugado es enviada a la corteza, y la decisión de restablecer la posición de los ojos es expedida a la formación reticular protuberancial paramediana (FRPP), donde se generan las órdenes motoras y se transmiten a los núcleos motores oculares (NMO). Este impulso inervacional hace que los músculos oculares extrínsecos (MOE) desplacen los ojos con un MOR y modifiquen así su posición relativa. Considerando que la posición de la cabeza no varía, dicha posición relativa corresponde a la posición ocular relativa, que se suma a la posición del objeto en la retina a fin de reducir el error retiniano a cero.

ciones del objeto y del ojo, es captada por la corteza cerebral, y las señales procesadas a partir de esta información son utilizadas a nivel del tronco del encéfalo para generar las órdenes nerviosas. Estas van destinadas a las neuronas motoras oculares necesarias para la producción del MOR, que desplazará el ojo a su nueva posición, con lo que el error retiniano quedará reducido a cero (fijación foveal).

El subsistema de los MOR puede ser diseñado como un sistema discontinuo o, más específicamente, de control de datos muestreados, en el cual la información visual es utilizada por intervalos (muestreo intermitente). Entre una y otra muestra no es posible utilizar informaciones adicionales para modificar cualquier decisión sobre los movimientos oculares. La exposición detallada sobre el análisis del sistema de control de los diversos tipos de movimientos oculares (11) se sale del propósito del presente tratado.

Los movimientos oculares rápidos (MOR) del sueño paradójico y las fases rápidas del nistagmo evocado (vestibular, optocinético) o patológico constituyen también ejemplos de movimientos oculares sacádicos, y poseen características fisiológicas comunes a las sacudidas de refijación.

Durante una sacudida, el umbral visual aumenta en unas 0,5 U logarítmicas (supresión sacádica), fenómeno que es objeto de controversia, ya que mientras algunos autores lo atribuyen a un proceso inhibitorio central activo (12), otros consideran que se debe a un mecanismo de *enturbiamiento* de la imagen retiniana (13). En cualquier caso, la elevación relativamente pequeña del umbral visual no explica del todo la sensación subjetiva de estabilidad ambiental existente durante los movimientos sacádicos. Es probable que exista un mecanismo, denominado *descarga corolaria* o *transcripción de la eferencia*, gracias al cual el sistema visual sea «avisado» a nivel central (a través de las conexiones frontooccipitales) por el movimiento subsiguiente de la imagen retiniana, y que sirva para suprimir la percepción consciente del movimiento ambiental en el movimiento sacádico (14).

## MOVIMIENTOS OCULARES LENTOS

### Seguimiento

El principal estímulo para los MOL es un objeto fijado que se desplaza, y que provoca un movimiento de seguimiento tras una latencia de 125 mseg. Las velocidades máximas de seguimiento son sólo de 30° a 50°/seg, aunque los MOL del reflejo vestibuloocular y del nistagmo optocinético o congénito pueden alcanzar velocidades considerablemente mayores. Los MOL son conjugados, suaves y se hallan bajo el control de un sistema capaz de modificar de forma *conti-*

*nua* la salida motora en respuesta a la entrada visual (al contrario del control discreto de los MOR). La señal de entrada es la velocidad del error (fuga) retiniano (que queda reducida a cero cuando la velocidad del ojo se equipara a la del objeto). El trabajo de Yasui y Young (15) sugiere que la velocidad de fuga en la retina se utiliza junto a la descarga corolaria con el fin de reproducir una señal de la velocidad del objeto, y es precisamente esta *velocidad percibida del objeto* la que estimula al sistema de los MOL. Esto aportaría una explicación para muchas de las respuestas de *seguimiento* en relación con objetos que no se mueven (p. ej., postimágenes). El seguimiento verdadero es un MOL provocado por un objeto *móvil*, aunque existen muchos otros medios capaces de inducir un MOL (tabla 9-1) y se requieren futuras investigaciones adicionales para descubrir otros mecanismos. No obstante, en condiciones normales es necesario un objeto móvil para que se produzca un MOL de seguimiento, y los intentos de efectuar un movimiento suave de los ojos en ausencia del movimiento de un objeto se traducen por una sucesión de pequeñas sacudidas (16).

Si un objeto fijado en la fovea (foveolizado) se desplaza de repente a una velocidad constante, la respuesta de seguimiento se inicia tras una latencia de 125 mseg (fig. 9-8). El movimiento inicial es de velocidad igual a la del objeto, pero en razón de la latencia, los ojos están retrasados con respecto a él y precisan una sacudida de captura para efectuar la refoveolización antes de proseguir el rastreo con un MOL de seguimiento. La sacudida de captura es posterior a la iniciación del movimiento de seguimiento, dado que el subsistema del MOR tiene una latencia más prolongada. Por otro lado, las características dinámicas del aparato oculomotor no permiten un simple aumento lineal (rampa) de la frecuencia de descarga nerviosa para acelerar los ojos con rapidez hasta alcanzar la velocidad del objeto móvil (fig. 9-5c), por lo que se precisa un *escalón-rampa* de intervención (fig. 9-5 d). Así, se produce un salto instantáneo en la frecuencia de descarga (escalón) seguido de un aumento lineal de la frecuencia (rampa). No se sabe con exactitud si el escalón-rampa de los MOL utiliza el mismo integrador nervioso responsable de la producción de los MOR, y al igual que el subsistema de los MOR, los MOL

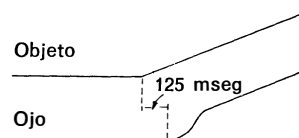
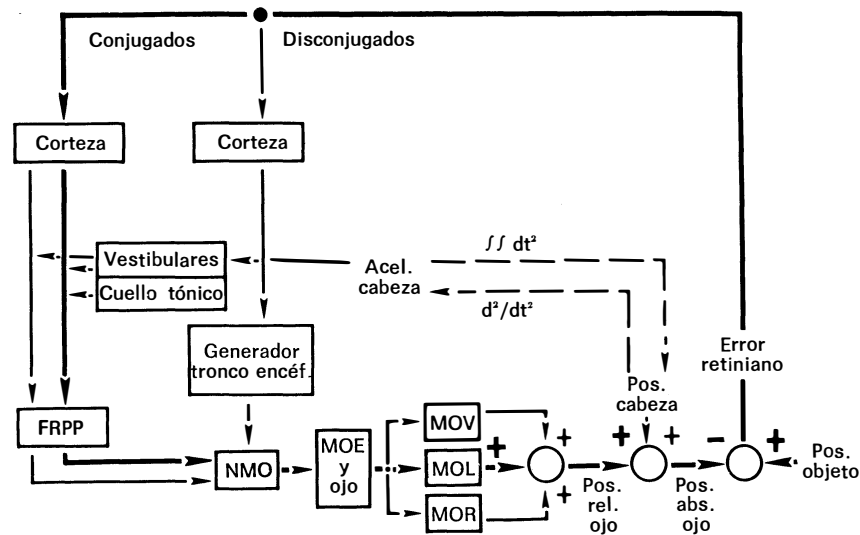
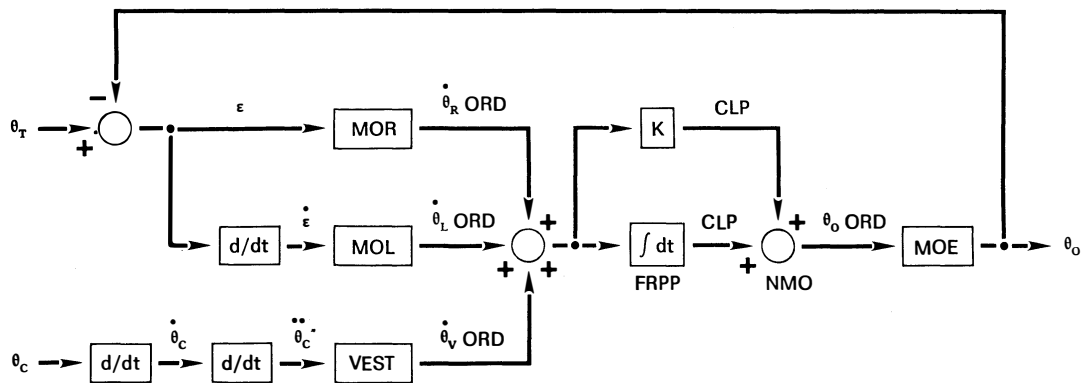


Fig. 9-8. Representación de un movimiento ocular lento (MOL) en respuesta a un movimiento del objeto de velocidad constante hacia la derecha, en la que se ilustra la latencia (125 mseg) del MOL, así como el MOR de captura.



**Fig. 9-9.** Diagrama básico en cadena cerrada del subsistema de las versiones en su modalidad de los movimientos oculares lentos (MOL) (*líneas gruesas*) superpuesto al diagrama del control de los movimientos oculares en su conjunto. La señal de control consistente en el error de velocidad conjugado en la retina es enviada a la corteza, y la decisión de desplazar los ojos es expedida a la formación reticular protuberancial paramediana (FRPP), donde se generan las órdenes motoras y se transmiten a los núcleos motores oculares (NMO). Este impulso inervacional hace que los músculos oculares extrínsecos (MOE) desplacen los ojos con un MOL y modifiquen la velocidad relativa del ojo. Considerando que la posición de la cabeza no varía, esta nueva velocidad ocular absoluta se suma a la velocidad del objeto en la retina a fin de reducir a cero el error de velocidad en la retina.



**Fig. 9-10.** Diagrama del subsistema de las versiones en su doble modalidad con la entrada vestibular, que es ilustrativo de la diferencia existente entre los mecanismos en cadena cerrada de los movimientos oculares rápidos (MOR) y lentos (MOL) y el mecanismo en cadena abierta del aparato vestibuloocular (VEST). Con el fin de simplificar, las órdenes de velocidad de los MOR ( $\dot{\theta}_R$  ORD), MOL ( $\dot{\theta}_L$  ORD), y movimientos vestibulooculares ( $\dot{\theta}_v$  ORD), en esta representación se suman y utilizan un integrador final común ( $\int dt$ ) localizado en la FRPP. La salida del mismo y las salidas de velocidad son conducidas a los núcleos motores oculares (NMO) por vía de la cintilla longitudinal posterior (CLP). La orden para la posición de los ojos ( $\theta_o$  ORD) es transmitida a los músculos oculares extrínsecos (MOE) a fin de obtener la posición requerida de los ojos ( $\theta_o$ ).  $\theta_T$  es la posición del objeto. De este modo, tanto el error de posición,  $\epsilon = \theta_T - \theta_o$  como el error de velocidad,  $\dot{\epsilon} = \frac{d}{dt} (\theta_T - \theta_o)$  son reducidos a cero. El sistema vestibular carece de retroacción y responde a la aceleración de la cabeza ( $\ddot{\theta}_C$ ). También están representadas la posición ( $\theta_C$ ) y la velocidad ( $\dot{\theta}_C$ ) de la cabeza, así como su relación con la  $\dot{\theta}_C$ .

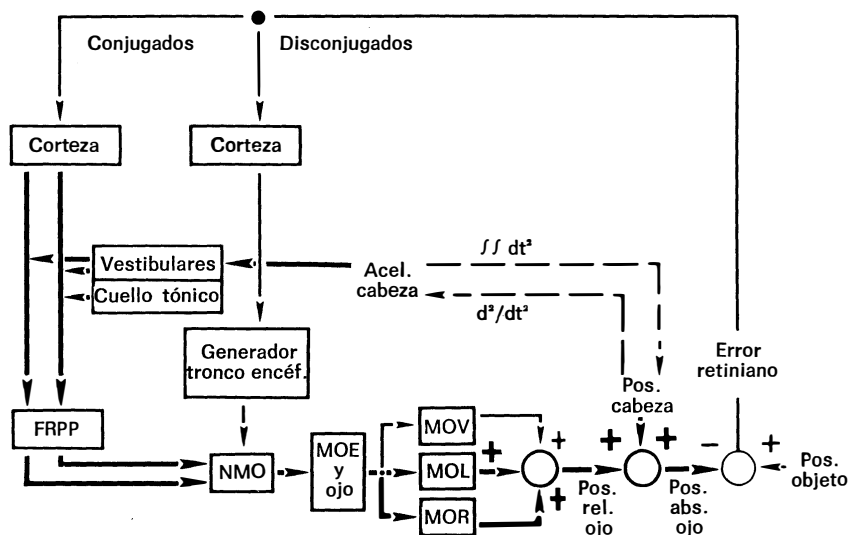
constituyen un subsistema en cadena cerrada con retroacción negativa (fig. 9-9). La señal del error retiniano (velocidad de fuga) es captada por la corteza cerebral, y esta información se utiliza en el tronco del encéfalo para la generación del MOL de seguimiento requerido a fin de reducir a cero la velocidad de dicho error. Se ha señalado la relación que la posición y velocidad del objeto, así como la velocidad de fuga retiniana, tienen con la generación de los movimientos de seguimiento lento, pero ninguno de estos factores por sí solo da cuenta adecuada de las características observadas en los MOL de seguimiento. Es probable que, además de los estímulos citados, se utilicen la posición eferente del ojo o la información concerniente a la velocidad.

Si los MOR se producen en respuesta a los errores en la posición del objeto y los MOL, en respuesta a los errores (verdaderos o percibidos) de la velocidad del objeto, ¿cuál sería la respuesta a la instauración súbita de los dos tipos de error? Los experimentos realizados con el uso de objetos de estimulación en escalón-rampa (es decir, un objeto que a la vez salta a una nueva posición y adquiere una velocidad constante en sentido opuesto a su desplazamiento en escalón) han demostrado que la modalidad MOL es independiente,

aunque sinérgica con respecto a la forma MOR del subsistema de doble modalidad de las versiones oculares (17).

### Vestibulooculares

El estímulo para los MOL vestibulooculares lo constituyen los movimientos de la cabeza, y la latencia transcurrida desde el inicio del movimiento cefálico hasta el MOL resultante varía entre 10 y 100 mseg, según las descripciones. Las velocidades punta de los MOL vestibulooculares son también variables y pueden alcanzar los 300° a 400°/seg. Los movimientos son conjugados y suaves y el sistema de control es continuo, pero a diferencia de la naturaleza en cadena cerrada de las funciones sacádica y de seguimiento, el sistema vestibuloocular es en cadena abierta (figura 9-10 y 9-11). La señal de control es, en este caso, la aceleración de la cabeza, traducida por los canales semicirculares a una señal nerviosa proporcional a la velocidad del movimiento cefálico, y, de este modo, los canales llevan a cabo la integración del escalón, necesaria para convertir la aceleración en velocidad (18). La información de la velocidad llega a los núcleos vestibulares, que la proyectan hacia la forma-



**Fig. 9-11.** Diagrama básico en cadena abierta del mecanismo vestibuloocular (*líneas gruesas*) superpuesto al diagrama del control de los movimientos oculares en su conjunto. La entrada está constituida por la aceleración de la cabeza que es convertida por los canales semicirculares en una señal nerviosa proporcional a la velocidad de la cabeza, y es enviada a la formación reticular protuberancial paramediana (FRPP) por vía de los núcleos vestibulares. A este nivel se generan las órdenes motoras y se transmiten a los núcleos motores oculares (NMO). Este impulso inervacional hace que los músculos oculares extrínsecos (MOE) desplacen los ojos con un MOL en un intento de equipararse con la velocidad de la cabeza y con un MOR, si la posición ocular precisa de modificación a consecuencia de un mecanismo centrador interno. La posición absoluta del ojo es igual a la suma de la posición relativa del ojo con la posición de la cabeza, que en este caso no es igual a cero. Las líneas de guiones muestran la relación matemática existente entre posición y aceleración de la cabeza y no corresponden, por tanto, a trayectos de señales.

ción reticular protuberancial paramediana (FRPP), donde un escalón final de integración transforma los datos de la velocidad en la señal de posición requerida por las neuronas motoras oculares (fig. 9-10). En la figura 9-11 se presenta un diagrama de la función vestibuloocular en cadena abierta, del modo como se produciría en la oscuridad y en ausencia de entradas visuales.

La posición final de los ojos equivale, tal como se muestra, a la suma de la posición ocular relativa y la posición de la cabeza. Si se hace intervenir la visión (fig. 9-12), la función vestibuloocular en cadena abierta queda cerrada por el asa de la retroacción, con lo que la capacidad del sistema motor ocular para adaptar la posición ocular a la posición del objeto, durante los movimientos cefálicos, experimenta un incremento acentuado.

En los movimientos efectuados con la cabeza fija respecto al cuerpo, la entrada procedente de los receptores cervicales se suma a la del órgano vestibular periférico, a fin de producir un movimiento ocular compensador (19). Con la finalidad de simplificar, no ha sido incluida la función «tónica del cuello» en nuestros cuadros diagramáticos.

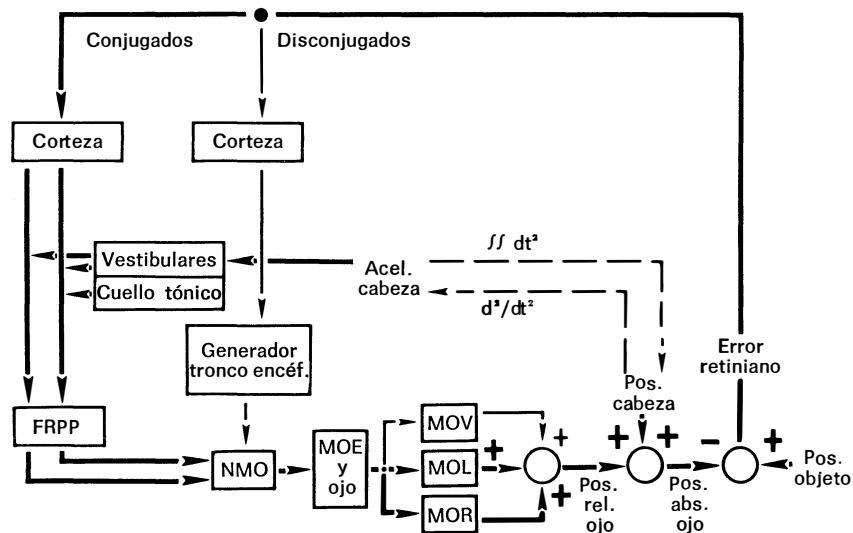
eje visual Z (acercamiento o alejamiento respecto al observador). La latencia de las vergencias es de unos 160 msec, las velocidades máximas son del orden de los 20°/seg, y los movimientos son disconjugados y suaves. El control de los MOV es continuo y sus entradas son la borrosidad en la retina (cadena abierta) o la diplopia (cadena cerrada) (20). El subsistema de los MOV es asimétrico (es decir, los movimientos de convergencia son más rápidos que los de divergencia), y es único en cuanto su capacidad de generar movimientos unioculares. Su transcurso en el tiempo es semejante al que se representa en la figura 9-5a para un cambio en escalón de la posición del objeto y en la figura 9-5c para una velocidad constante del objeto. Así, pues, las salidas de los MOV representan simplemente señales inervacionales sobre la dinámica hiperamortiguada del aparato oculomotor. El subsistema MOV es de cadena cerrada cuando la señal de error es la diplopia (fig. 9-13), y las órdenes procedentes del generador mesencefálico y destinadas a las neuronas oculomotoras ejecutan en este caso el MOV apropiado para reducir la diplopia a cero.

## SINERGISMO DE LOS SUBSISTEMAS

Cuando los movimientos de los ojos son estudiados en el laboratorio o provocados durante las exploraciones clínicas, se separan los distintos tipos de motilidad individuales mediante la fijación de la cabeza, la pro-

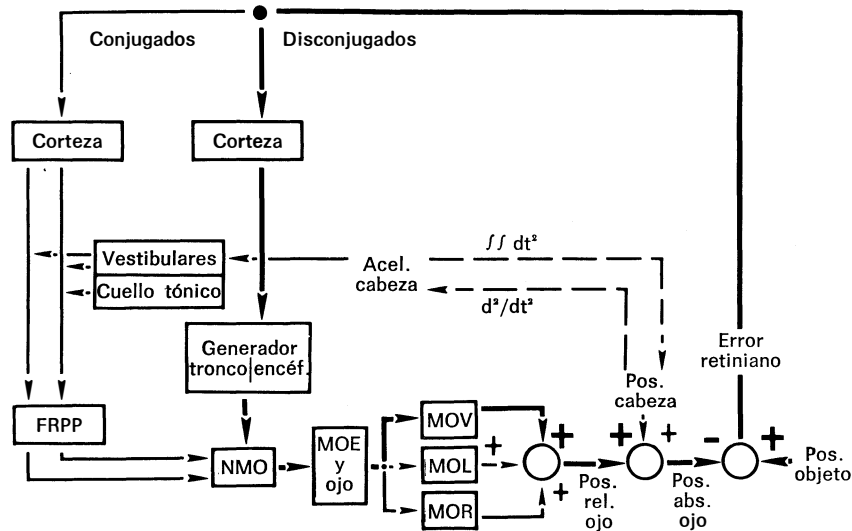
## VERGENCIAS OCULARES

Los estímulos para los MOV son producidos por el desplazamiento o movimiento del objeto a lo largo del



**Fig. 9-12.** Diagrama básico en cadena cerrada del subsistema de las versiones en su doble modalidad (*líneas gruesas*) con las entradas vestibulares en cadena abierta (*líneas gruesas*), superpuesto al diagrama del control de los movimientos oculares en su conjunto. Las entradas del error retiniano se combinan con las entradas de la aceleración y posición de la cabeza a fin de generar todas las salidas de las versiones (MOV, MOL y MOR más MOL). Véanse figuras 9-7, 9-9 y 9-11 para la explicación de cada uno de los componentes del subsistema de las versiones.





**Fig. 9-13.** Diagrama básico del subsistema de las vergencias (*líneas gruesas*) superpuesto al diagrama del control de los movimientos oculares en su conjunto. La señal de control, consistente en el error retiniano disconjugado (diploía estable), el error de velocidad (diploía cambiante) o ambos, es captada por la corteza. La decisión de desplazar los ojos es expedida a un generador mesencefálico, donde se generan las órdenes motoras y se transmiten a los núcleos motores oculares (NMO). Este impulso inervacional hace que los músculos oculares extrínsecos (MOE) desplacen los ojos con un MOV y modifiquen la posición o la velocidad oculares relativas. Considerando que la posición de la cabeza no varía, esta nueva posición o velocidad oculares absolutas se suman a la posición, a la velocidad del objeto o a ambas a fin de reducir a cero el error o los errores retinianos disconjugados.

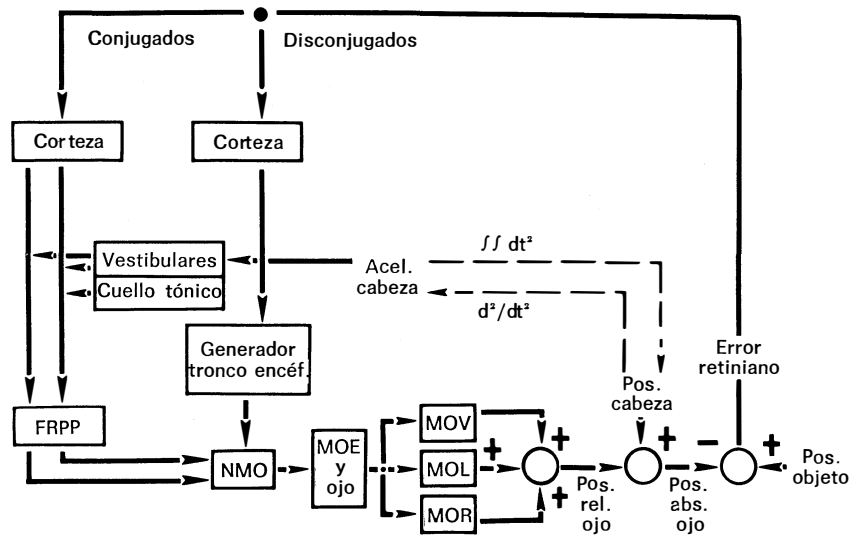
visión del estímulo único adecuado o ambas cosas. Sin embargo, la mayor parte de los movimientos oculares que se producen de forma natural son una combinación de diferentes versiones y vergencias oculares entremezcladas, lo que refleja una actuación sinérgica de todos los subsistemas (fig. 9-14). La hiperactividad o hipoactividad de cualquiera de los subsistemas tienen como consecuencia los trastornos dinámicos de la motilidad ocular (fig. 9-15), que constituyen una serie de oscilaciones patológicas de los ojos, entre las cuales la más frecuente es el nistagmo (v. cap. 11).

El hombre y los demás primates poseen un complicado sinergismo que enlaza la acomodación, convergencia y constricción pupilar, constituyendo una interrelación que se puede designar como respuesta de acercamiento, reflejo de acercamiento, tríada del punto próximo o sincinesia de acercamiento, y que es posible provocar por estimulación eléctrica de la corteza cerebral en la unión de los lóbulos occipital y temporal (área 19 de Brodmann) (21). Aunque la abolición de cualquiera de estas funciones no interfiere con las restantes, existe una indudable relación causal entre los tres fenómenos, y así la constricción pupilar está en dependencia directa del impulso de la convergencia, que a su vez depende del impulso de la acomodación (fig. 9-16) (22).

## MOVIMIENTOS CORRECTORES

Los MOR extensos (mayores de 15°) son con frecuencia imprecisos y requieren movimientos correctores (MC) para conducir los ojos al objeto de forma adecuada. Así, los inexactos (dismétricos) movimientos conjugados sacádicos de refijación son sucedidos tras una latencia de unos 125 mseg, por los MC sacádicos, que son conjugados y se producen incluso en la oscuridad, lo que descarta un papel significativo de la información visual de retroacción (23). No se conoce con exactitud el mecanismo responsable de estos MC sacádicos, pero la retroacción propioceptiva sigue siendo una explicación plausible, a pesar de la creciente controversia acerca de la existencia e importancia de la sensibilidad propioceptiva proveniente de los músculos oculares extrínsecos (24).

Si un ojo se mueve con precisión mientras que el otro se excede o se queda corto, el primero suele mostrar sacudidas dismétricas de refijación disconjugadas, mientras que el segundo es conducido al objeto por un movimiento lento (en general menos de 20°/seg), que se denomina *deslizamiento* (23). Este último fue al principio considerado como un movimiento compensador generado por un monitor interior del tronco del encéfalo, pero los trabajos más recientes sugieren que

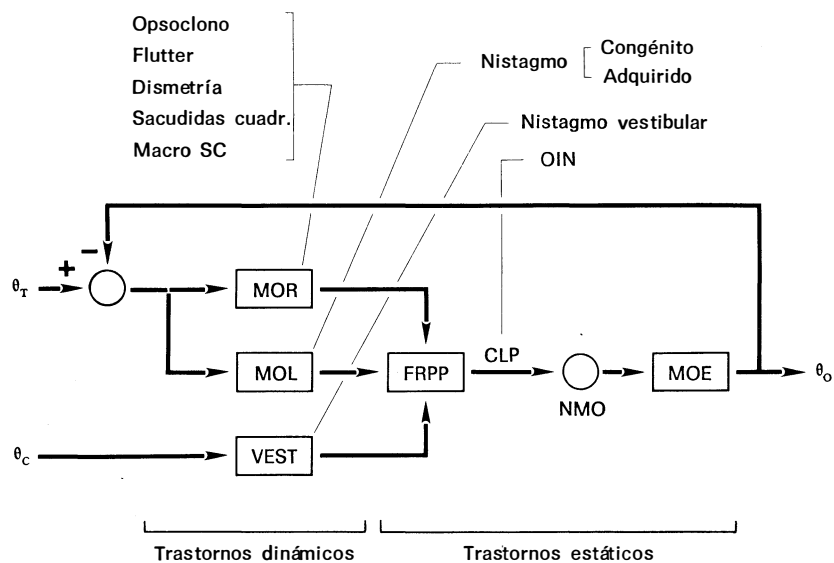


**Fig. 9-14.** Diagrama básico del sistema motor ocular en el que se incluyen el subsistema de las vergencias y el subsistema de las versiones, en su doble modalidad. Las explicaciones sobre los diversos componentes se han presentado en las figuras precedentes.

el deslizamiento es secundario a un desajuste entre el pulso y el escalón del movimiento sacádico inicial (25). Así pues, más que de un movimiento corrector, parece tratarse de un giro (*drift*) pasivo condicionado por las propiedades viscoelásticas del aparato oculomotor (órbita).

## MICROMOVIMIENTOS DEL OJO

Las técnicas sensibles de registro en la fijación de un objeto en reposo revelan tres tipos de movimientos oculares de menos de 1° de amplitud: microsacudidas, micromovimientos lentos y microtemblor (16).



**Fig. 9-15.** Diagrama simplificado sobre el subsistema de las versiones en su doble modalidad y la entrada vestibular, en el que se incluyen diversos trastornos motores oculares relacionados con la afectación de subsistemas específicos. La posición del objeto está representada por  $\theta_T$ ,  $\theta_C$  es la de la cabeza, y  $\theta_o$ , la de los ojos.

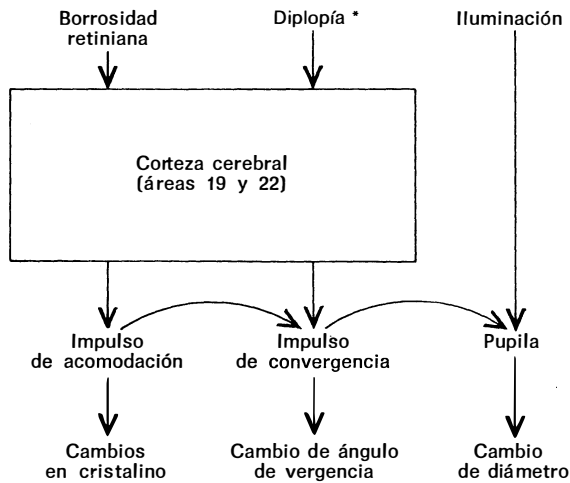


Fig. 9-16. La tríada del acercamiento. (\*No se sabe en la actualidad con certeza si los estímulos fusionales puros son capaces de producir una constricción pupilar.)

Las microsacudidas (*flicks*) son conjugadas, aunque muchas veces de amplitud desigual entre ambos ojos. Su extensión es de 1 a 25 (promedio de 6) min de arco, su proporción entre las amplitudes y las velocidades es análoga a la de las sacudidas de refijación, y su frecuencia es de aproximadamente 1 a 3 Hz. Los micromovimientos lentos (*drifts*) son disconjugados y su velocidad varía 1 a 30 min de arco por segundo. El microtemblor constituye una vibración de los ojos disconjugada y de alta frecuencia, variable entre 50 y 100 Hz, con amplitudes entre 5 y 15 seg de arco.

La significación de estos micromovimientos está por aclarar. Se creyó en un principio que las microsac-

udadas y micromovimientos lentos desempeñaban una función correctora en la fijación (26), pero estudios más recientes indican que las microsacudidas no se producen de forma natural, sino que son inherentes a las circunstancias de registro de la motilidad ocular (27).

Los métodos ópticos que consiguen una estabilización completa de las imágenes retinianas, con lo que suprimen el efecto de los micromovimientos, ocasionan un desvanecimiento completo de las imágenes transcurridos algunos segundos (16). Esto hace suponer que los pequeños movimientos oculares (en especial el temblor), mediante un barrido continuo de imágenes por varios receptores distintos, impiden que se produzca una saturación de los conos de la retina.

Las características de los diversos tipos de movimientos oculares están resumidas en la tabla 9-2.

## TECNICAS DE REGISTRO DE LOS MOVIMIENTOS OCULARES

El registro de los movimientos oculares resulta necesario como información cuantitativa y como archivo permanente, tanto en la investigación básica como en orden a la práctica clínica (28, 29).

### Postimágenes

Constituyen un método antiguo por el cual se grababa en la retina una sucesión de imágenes mediante una emisión regular de destellos luminosos. Necesitaba de informes verbales subjetivos, no se obtenían con él registros permanentes y fue sustituido por los aparatos de registro mecánico.

Tabla 9-2. Características de los movimientos oculares

Tipo	Estímulos	Latencia	Velocidad	Amplitud	Conjugación	Sistema de control
MOR (sacádicos)	Voluntarios, reflejos	200 msec	30°-700°/seg	0,5°-90°	Conjugados	Datos de muestreo
MOL						
Seguimiento	Movimiento del objeto	125 msec	≤ 50°/seg	0°-90°	Conjugados	Continuo
Vestibulooculares	Movimientos de la cabeza	≤ 100 msec	≤ 400°/seg	0°-90°	Conjugados	Continuo
Vergencias	Acomodativos, fusionales	160 msec	≤ 20°/seg	Depende de la edad	Disconjugados	Continuo
Sacudidas correctoras	Error de posición	125 msec	≤ 150°/seg	≤ 4°	Conjugados	Refractario
Microsacudidas	Fijación		3°-12°/seg	1-25 min	Conjugados	Refractario
Microdesviaciones	Fijación		0-30 min/seg	≤ 1°	Disconjugados	
Temblor			50-100 Hz	5-30 seg	Disconjugados	Oscilatorio

### Transductores mecánicos

Desde un punto de vista histórico, representaron un avance respecto al método de las postimágenes ya que con ellos se obtenía un registro permanente. Utilizan instrumentos sujetos al ojo que interfieren con los movimientos oculares normales. En la actualidad se emplean técnicas más sofisticadas.

### Fotografía

El registro de la motilidad ocular mediante imágenes en movimiento es un método sencillo y excelente para comparaciones clínicas globales y con fines docentes. Sin embargo, existen numerosas limitaciones impuestas a la utilización de la fotografía para el registro cuantitativo, ya que requiere una gran cantidad de tiempo, un análisis cuidadoso y laborioso, grandes cantidades de película costosa y una rígida inmovilización de la cabeza.

### Reflexión corneal

Es una variante de la fotografía directa y consiste en fotografiar una luz reflectada en la córnea; a este propósito se enfoca el haz luminoso sobre una película fotográfica para obtener registros permanentes. El uso de una película fotográfica no permite una auténtica monitorización de los datos en el tiempo, pero cabe superar este inconveniente mediante el registro televisivo. Para el registro cuantitativo, la cabeza debe ser estabilizada con rigidez, ya que los movimientos cefálicos ligeros se traducen por errores de consideración. Este sistema es lineal y preciso dentro de un estrecho margen de amplitud, y resulta satisfactorio para el registro cuantitativo de los micromovimientos del ojo. Aunque no es recomendable a efectos clínicos, constituye un método excelente para registrar los estudios realizados en individuos que contemplan panorámicas o ilustraciones (30).

### Lente de contacto

Este método, que suele consistir en un haz de luz reflectado desde un espejo montado sobre una lente de contacto corneal, es de una extrema sensibilidad y puede medir movimientos oculares de menos de 10 seg de arco, lo que le hace útil para el registro de los micromovimientos. Una variante de uso común incluye una bobina de alambre enclavada en la lente de contacto, y el sujeto se sitúa en un campo magnético alternante, a la vez que la posición del ojo se registra a partir del voltaje generado en la bobina. Este instrumento escleral aporta una técnica de registro precisa,

tanto para los movimientos amplios como para los movimientos pequeños (31). El método de las lentes de contacto proporciona en la actualidad trazados binoculares, puesto que ya no requiere la oclusión del ojo registrado.

### Electrooculografía

En razón de sus diferentes actividades metabólicas, la córnea es electropositiva en aproximadamente 1 mV con respecto a la retina, circunstancia que crea un campo electrostático que experimenta una rotación con los movimientos del ojo. Por medio de electrodos cutáneos colocados alrededor del ojo es posible, por tanto, registrar la posición del ojo, de modo que se pueden promediar los dos ojos mediante el empleo de electrodos bitemporales, o bien medir cada ojo por separado con el uso de electrodos periorbitarios (fig. 9-17). La electrooculografía (EOG) es una técnica útil e idónea para el registro de los movimientos oculares, entre 1° y 40°, pero precisa de una calibración frecuente en razón de su falta de linealidad.

El EOG acoplado a la corriente alterna constituye un método sencillo para el registro del nistagmo y se utiliza en la electronistagmografía. Sin embargo, con amplificación de este tipo de corriente no es posible registrar ni la posición de los ojos ni el seguimiento lento, por lo que para los estudios cuantitativos es im-

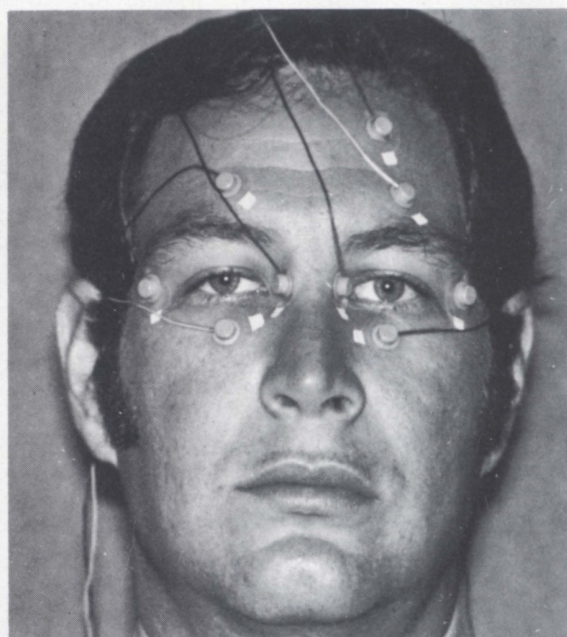


Fig. 9-17. Colocación de los electrodos en el EOG para el registro simultáneo de los dos ojos tanto en dirección vertical como horizontal.



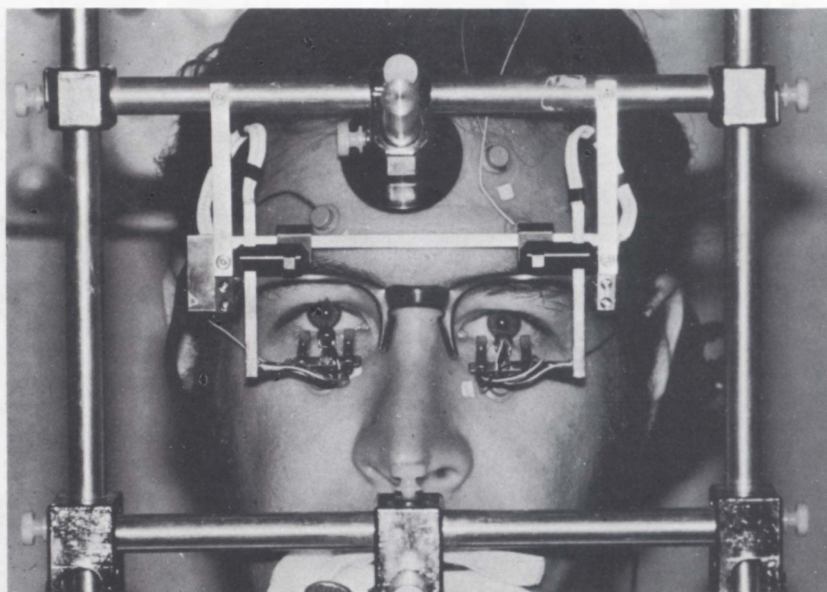


Fig. 9-18. Técnica de la reflexión diferencial de rayos infrarrojos para el registro simultáneo de ambos ojos en dirección horizontal. Los electrodos periorbitarios que se muestran sirven para detectar el parpadeo.

prescindible la oculografía con corriente continua. Esto introduce un problema de deriva o variación de base que se puede superar de forma parcial por la vigilancia estricta del electrodo pertinente y la preparación de la piel, junto con la utilización de los modernos amplificadores de corriente continua de baja variación.

Aconsejamos el EOG acoplado a la corriente alterna para los clínicos que quieren obtener un registro objetivo del nistagmo espontáneo y calórico y no están interesados en el análisis cuantitativo.

Resulta difícil llevar a cabo registros satisfactorios de los movimientos oculares verticales con el EOG, debido a los artefactos introducidos por los movimientos de los párpados (32).

### Oculografía fotoeléctrica

Se incluyen aquí varias técnicas diferentes, que se realizan por medio de la proyección de una luz sobre la córnea y un aparato fotosensible que responde a la luz reflejada a partir del ojo (fig. 9-18), y en las que la salida de voltaje a partir de los fotosensores está en función del ángulo de mirada. Las técnicas con infrarrojos, que son las de uso más común, producen una salida lineal comprendida en los  $\pm 20^\circ$ . Ambos ojos pueden, al igual que con la EOG, ser registrados simultáneamente en dirección horizontal, mientras que los movimientos oculares verticales no pueden ser medidos de forma precisa en razón de las interferencias de la motilidad palpebral. Comparado con la EOG, este método está relativamente libre de artefactos

sonoros y su respuesta dinámica rápida es ventajosa para el registro de los movimientos sacádicos. Es, además, útil para medir los movimientos oculares durante la lectura, y constituye una técnica de elección para la investigación de los movimientos de los ojos dentro de un margen de  $20^\circ$  a partir de la posición primaria. La oculografía fotoeléctrica infrarroja es, en muchos aspectos, preferible a la EOG para el registro cuantitativo, pero como técnica clínica de uso corriente consideramos más apropiada la EOG.

### Electromiografía ocular

Los métodos hasta ahora descritos están destinados a medir la posición de los ojos. En cambio la electromiografía, que utiliza como electrodos agujas concéntricas insertadas en los músculos oculares extrínsecos, registra potenciales de acción muscular. Esta técnica es de ejecución difícil y proporciona una escasa información útil al clínico práctico; sin embargo, constituye un valioso método en orden a la investigación y ha aportado numerosos datos acerca de la neurofisiología de la motilidad ocular, así como explicaciones concernientes a los fenómenos clínicos (33).

### BIBLIOGRAFIA

1. Dell'Osso LF, Daroff RB: Functional organization of the ocular motor system. *Aerospace Med* 45:873, 1974.
2. Fuchs AF, Luschei ES: Firing patterns of abducens neurons of alert monkeys in relationship to horizontal eye movement. *J Neurophysiol* 33:382, 1970.
3. Keller EL, Robinson DA: Abducens unit behavior in the

- monkey during vergence movements. *Vision Res* 12:369, 1972.
4. Tamler E, Marg E, Jampolsky A, et al: Electromyography of human saccadic movement. *Arch Ophthalmol* 62:657, 1959.
  5. Robinson DA: The mechanics of human saccadic eye movement. *J Physiol* 174:245, 1964.
  6. Robinson DA: Oculomotor unit behavior in the monkey. *J Neurophys* 33:393, 1970.
  7. Robinson DA: Oculomotor control signals. In Lennestrand G, Bach-y-Rita P (eds): *Basic Mechanisms of Ocular Motility and Their Clinical Implications*. New York: Pergamon Press, 1975.
  8. Robinson DA, Keller EL: The behavior of eye movement motoneurons in the alert monkey. *Bibl Ophthalmol* 82:7, 1972.
  9. Keller EL: Participation of medial pontine reticular formation in eye movement generation in monkey. *J Neurophysiol* 37:316, 1974.
  10. Pola J, Robinson DA: An explanation of eye movements seen in internuclear ophthalmoplegia. *Arch Neurol* 33:447, 1976.
  11. Bach-y-Rita P, Collins CC: *The Control of Eye Movements*. New York: Academic Press, 1971.
  12. Chase R, Kalil RE: Suppression of visual evoked responses to flashes and pattern shift during voluntary saccades. *Vision Res* 12:215, 1972.
  13. Mitrani L, Mateef ST, Yakimoff N: Is saccadic suppression really saccadic? *Vision Res* 11:1157, 1971.
  14. Koerner F, Schiller PH: The optokinetic response under open and closed loop conditions in the monkey. *Exp Brain Res* 14:318, 1972.
  15. Yasui S, Young LR: Perceived visual motion as effective stimulus to pursuit eye movement system. *Science* 190:906, 1975.
  16. Yarbus AL: *Eye Movements and Vision*. New York: Plenum Press, 1967.
  17. Rashbass C: The relationship between saccadic and smooth tracking eye movements. *J Physiol* 159:326, 1961.
  18. Robinson DA: Eye movement control in primates. *Science* 161:1219, 1968.
  19. Rubin AM, Young JH, Milne AC, et al: Vestibularneck integration in the vestibular nuclei. *Brain Res* 96:99, 1975.
  20. Zuber BL: Control of vergence eye movements. In Bach-y-Rita P, Collins CC, Hyde JE (eds): *The Control of Eye Movements*. New York: Academic Press, 1971, p 447.
  21. Jampel RS: Representation of the near-response on the cerebral cortex of the macaque. *Am J Ophthalmol* 48:573, 1959.
  22. Kestenbaum A: *Clinical Methods of Neuro-Ophthalmologic Examination*. New York: Grune & Stratton, 1961, p 424.
  23. Weber RB, Daroff RB: Corrective movements following refixation saccades: Type and control system analysis. *Vision Res* 12:467, 1972.
  24. Skavenski AA: Inflow as a source of extraretinal eye position information. *Vision Res* 12:221, 1972.
  25. Bahill AT, Clark MR, Stark L: Glissades: Eye movements generated by mismatched components of the saccadic motoneuronal control signal. *Math Biosci* 26:303, 1975.
  26. St. Cyr GJ, Fender DH: The interplay of drifts and flicks in binocular fixation. *Vision Res* 9:245, 1969.
  27. Steinman RM, Haddad GM, Skavenski AA, et al: Miniature eye movements. *Science* 181:810, 1973.
  28. Young LR: Measuring eye movements. *Am J Med Electr* 2:300, 1963.
  29. Young LR: Recording eye position. In Clynes M, Milsum JH (eds): *Biomedical Engineering Systems*. New York: McGraw-Hill, 1970, p 1.
  30. Thomas EL: Movements of the eye. *Sci Am* 219:88, 1968.
  31. Robinson DA: A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field. *IEEE Trans Biomed Electr* 10:137, 1963.
  32. Barry W, Jones GM: Influence of eyelid movement upon electrooculographic recording of vertical eye movements. *Aerosp Med* 36:855, 1965.
  33. Jampolsky A: What can electromyography do for the ophthalmologist? *Invest Ophthalmol* 9:570, 1970.

# Neurooftalmología

## **Joel S. Glaser, M.D.**

Associate Professor of Ophthalmology and  
Neurological Surgery, Bascom Palmer Eye  
Institute, University of Miami School of  
Medicine;  
Consultant in Neurology, V A Hospital,  
Miami, Florida

Con la colaboración de

## **Robert B. Daroff, M.D.**

Professor of Neurology, University of Miami;  
Director, Ocular Motor Neuro-physiology Laboratory,  
V A Hospital, Miami, Florida

## **Louis F. Dell'Osso, Ph.D.**

Associate Professor of Neurology, University of Miami;  
Co-Director, Ocular Motor Neuro-physiology Laboratory,  
V A Hospital, Miami, Florida

## **B. Todd Troost, M.D.**

Associate Professor of Neurology,  
University of Pittsburgh School of Medicine;  
Chief, Neurology Service, Oakland V A Hospital,  
Pittsburgh, Pennsylvania



**SALVAT EDITORES, S. A.**

Barcelona - Madrid - Buenos Aires - Bogotá - Caracas - México - Quito  
Rio de Janeiro - San Juan de Puerto Rico - Santiago de Chile