

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS

PROFESIONALES IZTACALA

U N A M

ANALISIS DE LOS POTENCIALES EVOCADOS VISUALES

CON EL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO  
EN LA MAESTRIA EN CIENCIAS  
CON OPCION EN NEUROCIENCIAS

P R E S E N T A :  
E D U A R D O C R U Z .

A B R I L 1992



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADESCO A LA

**DRA. THALIA HARMONY B**

SU INSUSTITUIBLE

APOYO Y DIRECCION EN LA

REALIZACION DE ESTE TRABAJO .

A M I S T U T O R E S

V I C T O R I A Z A R A T E V.

Y

H E C T O R O C H O A  
E N S U M E M O R I A

A MI FAMILIA

Y EN PARTICULAR A:

MI ESPOSA-SILVIA FRAGA M.

MI HIJO-CARLOS EDUARDO CRUZ F.

MI HIJA-SANDY PENELOPE CRUZ F.

A LA:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA

DE MEXICO

EN PARTICULAR A LA:

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS

PROFESIONALES IZTACALA

## INDICE

INTRODUCCION.-----	1
I.- ORIGEN DE LA ACTIVIDAD ELECTRICA CEREBRAL.-----	4
1.-LA ACTIVIDAD ELECTRICA CEREBRAL.	
2.-MODELO FUENTE-SUMIDERO.	
II.-LOS POTENCIALES EVOCADOS VISUALES.-----	12
1.-GENERALIDADES.	
2.-POTENCIALES EVOCADOS VISUALES.	
III.-HIPOTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS.-----	19
1.-HIPOTESIS.	
2.-OBJETIVOS.	
3.-VENTAJAS QUE REPORTA EL USO DEL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO.	
IV.-METODOLOGIA.-----	22
V.-RESULTADOS.-----	34
VI.-DISCUSION.-----	58
VII.-APENDICES.-----	66
1.-ORIGEN DEL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO.	
2.-SIGNIFICADO FISICO DEL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO Y SU RELACION CON EL POTENCIAL ELECTRICO.	
VIII.-REFERENCIAS.-----	84

## INTRODUCCION

Uno de los objetivos principales de este trabajo de tesis es el de comprobar la validez del resultado establecido por Blumhardt et al [2, 3 y 4]. Este resultado establece que al estimular sólo medio campo retiniano se produce una respuesta de mayor amplitud en el lóbulo contralateral occipital, que la respuesta en el lóbulo occipital ipsilateral. Resultado que al contradecir la descripción anatomofuncional de la vía visual, se le llamó respuesta paradójica. La comprobación de este resultado se realizó aplicando dos técnicas de registro. EL SISTEMA INTERNACIONAL 10-20 y LA GEOMETRIA DE DENSIDAD DE FUENTES (lapaciano). Otra de las finalidades fue la de comprobar las ventajas que reportaba el uso DEL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO en el análisis de la actividad evocada visual. Para lo cual se diseñó un experimento que consistió en usar un estímulo en forma de damero reversible (blanco-negro), para estimular: a) primero, la retina temporal izquierda, con el ojo derecho totalmente tapado, registrando en forma simultanea los PEVs tradicionales ( $O_1$  y  $O_2$ ) y las respuestas laplacianas ( $\nabla^2 O_1$  y  $\nabla^2 O_2$ ) ipsilaterales y contralaterales respectivamente. b) segundo, la retina temporal derecha, con el ojo izquierdo totalmente tapado y registrando en forma simultanea los PEVs ( $O_1$  y  $O_2$ ), así como los laplacianos ( $\nabla^2 O_1$  y  $\nabla^2 O_2$ ), contralaterales e ipsilaterales respectivamente.

La aplicación del operador diferencial laplaciano al análisis de la actividad evocada visual presenta ventajas muy significativas, sobre otros sistemas de registro, por ejemplo sobre el SISTEMA TRADICIONAL 10-20 y sobre el sistema usado por Blumhardt et al, ya que el operador diferencial laplaciano es un sistema libre de referencia, además es insensible a las configuraciones complejas de los elementos corticales generadores de la actividad eléctrica cerebral, ya que sólo registra aquellos

campos eléctricos orientados normalmente a la superficie de la corteza cerebral. Lo anterior quedó ilustrado con los registros y análisis de las respuestas tradicionales y laplacianas de ocho sujetos sanos sin problemas de visión. Concluyendo que: La representación gráfica de la respuesta laplaciana es una medida de la curvatura del potencial eléctrico registrado sobre el cuero cabelludo, representando el valor real del voltaje de la corriente eléctrica. Así, como el valor real del voltaje generado en la zona de registro, que indica con precisión el lugar de la fuente generadora o sumidero de voltaje.

El presente trabajo tiene como una de sus finalidades el de dar a conocer una nueva metodología de registro y análisis de la actividad evocada visual, que presenta ventajas muy significativas sobre los métodos de registro ya conocidos.

Con el objetivo de revisar ampliamente todo lo relacionado con estos potenciales evocados y con los métodos de análisis empleados, la tesis se ha organizado en los siguientes capítulos:

#### CAPITULO I.-ORIGEN DE LA ACTIVIDAD ELECTRICA CEREBRAL.

Se describen los mecanismos que generan la actividad eléctrica cerebral. El modelo del dipolo generador y el modelo fuente-sumidero, que nos facilitan la descripción del fenómeno eléctrico cerebral.

#### CAPITULO II.-LOS POTENCIALES EVOCADOS VISUALES. Se

realiza una descripción de las características del potencial evocado visual. De la estimulación del campo visual de un ojo, con el otro totalmente tapado y de la estimulación para medio campo visual retiniano (retina temporal).

CAPITULO III.- HIPOTESIS Y OBJETIVOS. Se plantean la hipótesis de trabajo y los objetivos que se pretenden alcanzar en la presente tesis.

CAPITULO IV.-METODOLOGIA. Se describe el desarrollo experimental, la forma en que se estimuló el medio campo retiniano, como se registró y calculó la actividad evocada visual con la geometría de registro del SISTEMA INTERNACIONAL 10-20, comparada con la nueva geometría de registro del LAPLACIANO.

CAPITULO V.RESULTADOS. Se presentan las gráficas de la actividad evocada visual obtenidas con los dos sistemas de registro empleados, se hace una valoración de las diferencias observadas entre el potencial evocado tradicional y la respuesta evocada laplaciana.

CAPITULO VI.-DISCUSION. Se presenta un examen minucioso de los resultados que dan fundamento a los objetivos alcanzados en el presente trabajo.

CAPITULO VII.-APENDICES. Se da la demostración matemática de la ECUACION DE LAPLACE, del LAPLACIANO, de su relación con el potencial eléctrico y de las ventajas que reporta el uso del operador diferencial laplaciano.

CAPITULO VIII.- REFERENCIAS. Se presentan los trabajos, libros y reportes de investigación que fueron consultados, para la realización del presente trabajo de tesis.

## I.- ORIGEN DE LA ACTIVIDAD ELECTRICA CEREBRAL.

### I.1.- LA ACTIVIDAD ELECTRICA CEREBRAL.-

El electroencefalograma (EEG) y los potenciales evocados (PE), son los métodos más comunes para el estudio de la actividad eléctrica cerebral en el hombre. Los experimentos en donde se registra la actividad eléctrica cerebral, se miden los cambios de voltaje en relación al tiempo. Fundamentalmente los registros que se obtienen son trazos del cambio en la amplitud del voltaje al transcurrir el tiempo.

Existen evidencias de una organización citoarquitectónica elemental de la corteza cerebral. Esta organización se basa en columnas de neuronas orientadas perpendicularmente a la superficie de la corteza cerebral. Cada área cortical está formada por muchos cilindros celulares verticales que constituyen complejos circuitos neurales con una definición fisiológica muy bien definida. Dada esta configuración cerebral, los cambios de voltaje registrados sobre el cuero cabelludo con macroelectrodos y representados en el EEG y en los PE, se deben al flujo de corriente de los dipolos fluctuantes formados por las dendritas apicales (que ascienden desde el soma celular a través de las capas suprayacentes y con frecuencia llegan hasta la capa más externa ramificándose en ella) y los cuerpos celulares de las células piramidales (los somas suelen ser triangulares o trapezoides, con la base hacia abajo y el ápex en dirección de la superficie cortical) de la corteza cerebral.

Las células piramidales (y en general todas las neuronas) generan básicamente dos clases de actividad eléctrica:

- a) Los potenciales de acción (fenómeno todo o nada), tienen su origen en el cono axónico, son de actividad rápida y de corta duración, que se

propagan en forma constante a lo largo del axón

- b) Los potenciales postsinápticos (PPS): inhibitorios (PPSI) y excitatorios (PPSE). Que tienen su origen en la membrana somato-dendrítica, son de actividad lenta y se propagan con decremento.

La influencia de un PPS dado sobre el registro en la superficie de la corteza cerebral es función de su signo (polaridad), orientación y localización. Puede considerarse que cada potencial crea un dipolo orientado radialmente. Así, una entrada sináptica continua genera una serie de dipolos con las siguientes características:

- 1) Los PPSE (despolarizantes) que son generados en los elementos neurales situados cerca de la superficie de la corteza cerebral (dendritas) inducen un cambio negativo en el registro efectuado con macroelectrodos en la superficie del cuero cabelludo.
- 2) Cuando los PPSE son generados en los elementos neurales profundos de la corteza cerebral (soma) inducen un cambio positivo en el registro efectuado con un macroelectrodo en la superficie del craneo.
- 3) Los PPSI (polarizantes) producen efectos opuestos en el registro superficial.

En estos registros los cambios obtenidos en el voltaje durante la actividad espontánea o evocada, son generados por grandes grupos de células que reflejan fundamentalmente la actividad eléctrica de la corteza cerebral y tiene las siguientes características:

- A) Son graduales y diferentes del fenómeno todo o nada.
- B) Son el resultado de un gran número de configuraciones de flujos de corriente eléctrica que obedecen el modelo físico de conducción de volumen.
- C) Representan el cambio de voltaje entre dos puntos, el macroelectrodo de registro y el macroelectrodo de referencia.
- D) La forma de la respuesta está en función de la colocación de los macroelectrodos de registro.

I.2.- MODELO FUENTE-SUMIDERO.- Cuando se efectúan registros de las diferencias de potencial eléctrico entre un macroelectrodo activo ( $V \neq 0$ ) colocado sobre la superficie cortical y otro macroelectrodo considerado convencionalmente como pasivo ( $V = 0$ ) colocado a una cierta distancia considerable del primero, se presenta una modalidad especial de registro en la frontera de un medio altamente conductor que contiene además elementos activos. Las fluctuaciones en el potencial eléctrico que se registran así, representan la medida del producto neto  $V = IR$  ( $I$  es la corriente eléctrica y  $R$  es la resistencia eléctrica del medio), entre los dos macroelectrodos de registro y son dependientes de los flujos extracelulares de corrientes eléctricas asociadas a la producción de PPS locales. La influencia de estos PPS sobre el registro superficial está en función de su polaridad (+ o -), orientación y localización. Un dipolo eléctrico es un par de cargas eléctricas de igual magnitud y de polaridad contraria, separadas por una pequeña distancia  $d$ . El dipolo eléctrico genera un campo eléctrico  $E$  en sus alrededores, la magnitud de este campo eléctrico disminuye al aumentar la distancia como  $d^{-3}$ .

Estudiar el potencial eléctrico  $V$  es una forma de conocer el campo eléctrico  $E$ . El campo eléctrico es un campo vectorial, en virtud de esto, podemos representarlo por medio de líneas de campo (también llamadas líneas de fuerza). Con el fin de visualizar el campo eléctrico dibujamos una serie de líneas, estas líneas de fuerza se dibujan de manera que indiquen la dirección del campo eléctrico. Las líneas de fuerza producidas por una sola carga de polaridad positiva se ilustran en la fig. (1.2.a) y para una sola carga de polaridad negativa en la fig. (1.2.b). En la primera, las líneas apuntan radialmente hacia afuera de la carga, en la carga negativa las líneas de fuerza se orientan radialmente hacia la carga. En estas figuras se muestran sólo unas cuantas líneas representativas, de igual modo se pueden dibujar líneas de fuerza entre las ya mostradas porque el campo eléctrico existe también en esos puntos. A pesar de ello, se dibujan las líneas de fuerza de manera que el número de ellas que salga de una carga positiva, o que terminen en una carga negativa, sean proporcionales a la magnitud de la carga (nótese que cerca de la carga en donde el campo eléctrico es más intenso, las líneas están más juntas), lo que indica la dependencia de la magnitud del campo eléctrico con la distancia.

La figura (1.2.c) muestra las líneas del campo eléctrico alrededor de dos cargas de signo contrario que forman un dipolo. Observamos que las líneas de fuerza se dirigen desde la carga positiva hasta la carga negativa. Un dipolo fluctuante, además de poseer un campo eléctrico  $E$ , genera corrientes eléctricas y como consecuencia un campo magnético  $B$ , la fluctuación del dipolo hace que la fuerza eléctrica oscile a una frecuencia  $f$  (Hz), esta fuerza oscilatoria del dipolo hace que la fuerza del campo eléctrico oscile a la misma frecuencia  $f$  que se suma a la oscilación del campo magnético. La oscilación electromagnética es generada en los alrededores del dipolo eléctrico. Esta oscilación genera una emisión de energía que viaja como una perturbación electromagnética a la velocidad de las ondas electromagnéticas ( $c = 3 \times 10^8$  cm/s). Lo anterior nos hace considerar dos regiones

espaciales alrededor del dipolo fluctuante:

- a) Región cerca del dipolo.- donde la distancia  $d$ , es mucho menor que la longitud de la onda ( $\lambda$ ) de la perturbación electromagnética ( $\lambda = c f^{-1}$ ).
- b) Región lejana al dipolo.- Donde la distancia  $d$  es mucho mayor a  $\lambda$ .

Cuando la frecuencia de oscilación es muy pequeña el campo magnético en la región lejana se disipa enteramente y en la región cercana al dipolo es de muy baja intensidad (del orden de  $10^{-15}$  gauss = 1 fgauss), en estas condiciones sólo queda el campo eléctrico en la región cercana al dipolo fluctuante y es el que se registra en el EEG y PE.

La figura (1.2.d) representa el dipolo eléctrico formado por el cuerpo de la célula piramidal y sus dendritas apicales. Las líneas de fuerza o líneas de campo eléctrico de este dipolo cumplen con las siguientes propiedades:

- 1.- Se originan en una carga puntual que es una fuente del campo eléctrico  $E$ .
- 2.- Terminan en una carga puntual que es un sumidero del campo eléctrico  $E$ .
- 3.- Es una línea orientada que posee en cualquier posición a lo largo de ella la dirección y sentido del campo eléctrico  $E$ .
- 4.- El número total de líneas que se originan en una carga puntual es proporcional al valor de la carga eléctrica.

- 5.- El número de líneas de campo eléctrico por unidad de área que atraviesan una superficie imaginaria normal a la dirección de la línea en cualquier punto es proporcional a la intensidad del campo eléctrico en el punto.

Es común en las fluctuaciones de potencial eléctrico localizar regiones activas (potenciales de polaridad positiva) que identificaremos con las fuentes de corriente eléctrica a través de la membrana que se establece hacia afuera de ella, y regiones pasivas (potenciales de polaridad negativa), que llamaremos sumideros de corriente eléctrica, ya que la dirección del flujo de esta corriente a través de la membrana se establece hacia adentro de ella. La localización de estas fuente-sumidero determinan la configuración del cambio del potencial eléctrico, así como el flujo de corriente determina la amplitud del voltaje. La densidad de corriente y la amplitud del voltaje son máximas en donde se localiza la fuente-sumidero y su valor va decayendo exponencialmente con la distancia  $d$ .

Poisson [18, 20 y 21] demostró que para la distribución de un campo de potencial, la densidad de las fuentes de potencial es directamente proporcional al laplaciano del voltaje ( $\nabla^2 V$ ). Descripción que se detallará en el apéndice dedicado al operador diferencial laplaciano.

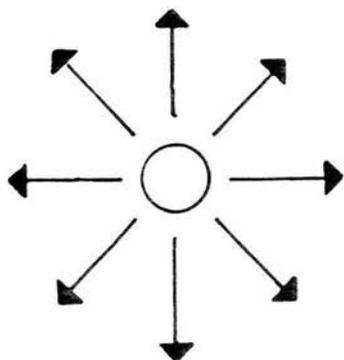


Fig. 1.2.a. LINEAS DE FUERZA PARA UNA CARGA FUENTE DE UN CAMPO-ELECTRICO.

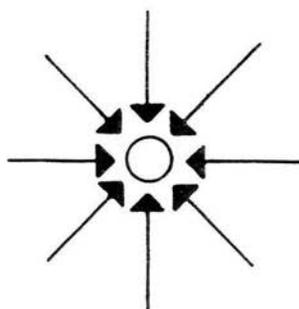


Fig. 1.2.b. LINEAS DE FUERZA PARA UNA CARGA -SUMIDERO DE UN -CAMPO ELECTRICO.

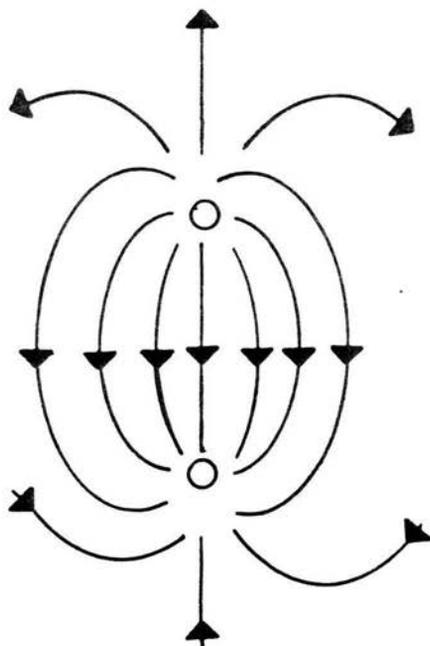


Fig. 1.2.c.- LINEAS DE FUERZA PARA DIPOLO ELECTRICO.

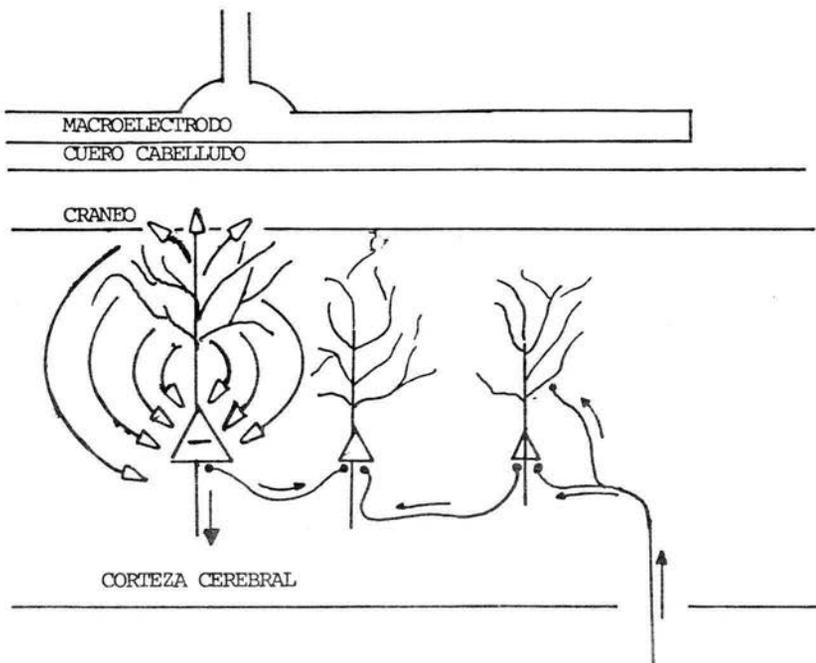


Fig. 1.2.d. REPRESENTACION DE UNA FUENTE DE VOLTAJE GENERADA POR EL DIPOLO FORMADO POR EL CUERPO DE LA CELULA PIRAMIDAL Y SUS DENDRITAS APICALES.

## II.- LOS POTENCIALES EVOCADOS VISUALES.

II. 1.- GENERALIDADES.- La actividad eléctrica resultante del gran número (miles de millones) de neuronas cerebrales que se registran a través del EEG no nos revelan gran cosa sobre los mecanismos sensoriales perceptuales, porque no están relacionadas con estímulos específicos. Existe un método alternativo experimental que pone de manifiesto la actividad eléctrica sincrónica de un conjunto de neuronas localizadas en el cerebro, que consiste en el registro de dicha actividad eléctrica a partir de que se produce un estímulo sensorial intenso. Esta actividad neuronal genera corrientes eléctricas que atraviesan el cráneo y originan mínimos cambios en el potencial. Este método alternativo consiste en el registro de los potenciales evocados (PE) y el término potencial evocado describe el cambio de potencial eléctrico que puede registrarse en alguna región del cerebro, como respuesta a la estimulación experimental de los órganos sensoriales específicos, de las fibras aferentes de algunos nervios periféricos, o de algún punto de la vía sensorial. En la actualidad es común usar el término potencial evocado para identificar las respuestas a estímulos sensoriales.

Para la presencia de estas respuestas evocadas influyen múltiples factores, de hecho la diferencia entre la actividad espontánea de fondo (electroencefálica) y la respuesta evocada por cambios medio ambientales se hace de una manera arbitraria ya que muchas componentes de la actividad intrínseca son respuestas en si mismas, respuestas muy difíciles de identificar, porque no hay señal de los eventos que las inician. Por lo que desde un punto de vista práctico sólo las respuestas que pueden ser claramente relacionadas con el tiempo para un evento conocido se consideran respuestas evocadas.

El principal problema que presenta el registro de los PE es el de su detección. Por su baja amplitud los PE quedan completamente enmascarados por la actividad eléctrica espontánea del cerebro. La señal eléctrica registrada en el EEG en condiciones normales, alcanza una amplitud comprendida entre los 50 y 100  $\mu\text{v}$ . Los PE suelen tener magnitudes en su amplitud inferiores a estos valores, ya que alcanzan amplitudes que oscilan entre 0.5 y 5.0  $\mu\text{v}$ . Entonces para el registro de la actividad evocada las señales espontáneas resultan un indeseable ruido de fondo.

El método que se empleó en este trabajo para intensificar la actividad evocada sobre la actividad de fondo, consistió en promediar las señales individuales (también llamadas puntuales o transitorias). Ciertos estímulos se repiten muchas veces a intervalos largos de tiempo, para que el cerebro restablezca su estado de reposo entre estímulos sucesivos, generándose lo que se conoce como respuesta de estado transitorio. Cuando se han almacenado un gran número de estos potenciales evocados individuales, el ordenador calcula la amplitud promedio de cada punto y dibuja el PE promedio. Bajo estas condiciones se supone que todos los PE individuales son idénticos en amplitud y latencia, la actividad de fondo no se correlaciona con el estímulo, sino que varía aleatoriamente en función del mismo. La suma de los ruidos de fondo tiende a disminuir, mientras que la suma de los PE tiende a incrementarse, de tal manera que aunque en una respuesta el PE quede completamente enmascarado por el ruido de fondo, en el promedio surge con nitidez.

II.2.- POTENCIALES EVOCADOS VISUALES (PEVs).- En la obtención de los potenciales evocados visuales se pueden usar diferentes tipos de luz como estímulo sensorial. En sus inicios la luz difusa del estroboscopio fué ampliamente usada. Sin embargo, a partir de los estudios realizados por Hubel, D. H. and Wiesel, T. N. entre

1960 y 1974, demostraron con la experimentación en animales que la mayoría de las células visuales corticales responden más vigorosamente a los estímulos con contornos que a uno sin ellos. A partir de los trabajos de Halliday, Blumhardt y Barret [2, 3 y 4] en humanos, se reemplazó el estroboscopio por el estímulo del damero reversible blanco - negro; este estímulo consiste en un cuadrilátero con cuadros negros y blancos que puede aplicarse con un destello luminoso tipo flasheado, o como un estímulo más largo en el cual los cuadros negros se tornan blancos y los blancos en negros, alternativamente. Esta forma de estimulación hace que la luminosidad sea constante y que el estímulo sensorial se deba a los bordes de la cuadrícula estimulando sólo el sistema visual que corresponde a los conos. El sistema visual correspondiente a los bastones se estimula con el destello. Este damero blanco negro reversible es proyectado a través de una pantalla de televisión, así cuando la retina se estimula por el tablero de ajedrez, las señales pasan de las neuronas retinianas hasta las áreas visuales de la corteza cerebral. En estas áreas visuales se activan neuronas que procesan la información del tablero de ajedrez, estas neuronas generan a su vez, potenciales evocados que pueden ser captados por macroelectrodos activos de registro colocados en las regiones occipitales O<sub>1</sub> y O<sub>2</sub> sobre el cuero cabelludo.

**ESTIMULACION DEL CAMPO VISUAL PARA AMBOS OJOS.-** Estimulando ambos ojos en todo su campo visual, por medio del damero reversible en condiciones normales con una frecuencia de 1.8 Hz se obtiene un potencial evocado visual relativamente simple, caracterizado por una onda prominente de polaridad positiva cuya latencia oscila entre los 100 ms (razón por la cual muchos investigadores la denominan onda P<sub>100</sub>). Previa a esta onda se detecta una pequeña onda de polaridad negativa que denominaremos N<sub>1</sub>. Posterior a P<sub>100</sub> aparece otra pequeña onda de polaridad negativa, a la cual denominaremos N<sub>2</sub>. La magnitud de las amplitudes de estas ondas negativas es mucho menor a la magnitud

de la amplitud que presenta la onda positiva. Este complejo  $N_1P_{100}N_2$  se registra en ambos lóbulos occipitales ( $O_1$  y  $O_2$ ). La magnitud de la amplitud de estos componentes se relacionan, por un lado, con la agudeza visual del sujeto y por otro con el tamaño de los cuadros del damero. También es común relacionarlos con las propiedades del estímulo como son su frecuencia e intensidad.

ESTIMULACION DEL CAMPO VISUAL PARA UN SOLO OJO.- Para la estimulación de todo el campo visual del ojo izquierdo, con el ojo derecho totalmente tapado fig.(4.1.e) se obtuvo el potencial evocado que se muestra en la fig. 2.2.a. Este PEV presenta una onda positiva dada por un complejo  $N_1P_{125}N_2$ .

ESTIMULACION DE MEDIO CAMPO VISUAL.- Es interesante observar lo que sucede al estimular sólo medio campo visual retiniano (nasal o temporal) de cada uno de los ojos. Si se estimula el campo temporal retiniano del ojo izquierdo la vía que sigue hasta la corteza occipital no es cruzada y la activación llega a las áreas visuales del hemisferio izquierdo (fig. 2.2.b). Dichas áreas en el hombre se localizan fundamentalmente sobre la cara interna del lóbulo occipital. De igual forma, si se estimula la retina temporal del ojo derecho la activación llega hasta la corteza visual derecha. Estos hechos anatómicos llevarían a pensar por lo tanto, que la respuesta evocada visual a la estimulación de un hemicampo retiniano temporal se registrara óptimamente sobre el lóbulo occipital correspondiente. Sin embargo, Blumhardt et al [2, 3 y 4], demostraron que la máxima respuesta ( $P_{100}$ ) se obtiene en el hemisferio contralateral.

Tomando como referencia estos resultados, y con el propósito de verificar su validez se realizó la presente tesis, aplicando dos técnicas de registro. EL SISTEMA INTERNACIONAL 10-20 [1, 23 y 24] fig. (4.1.a) y la GEOMETRIA DE DENSIDAD DE

FUENTES [5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 23, 24 y 25] (respuesta laplaciana) fig. (4.1.b y 4.1.c). La aplicación del operador diferencial laplaciano en el análisis de la actividad evocada visual se explica en el CAPITULO IV y el desarrollo matemático para la obtención del operador diferencial laplaciano y su relación con el campo eléctrico se analizan en el APENDICE A.

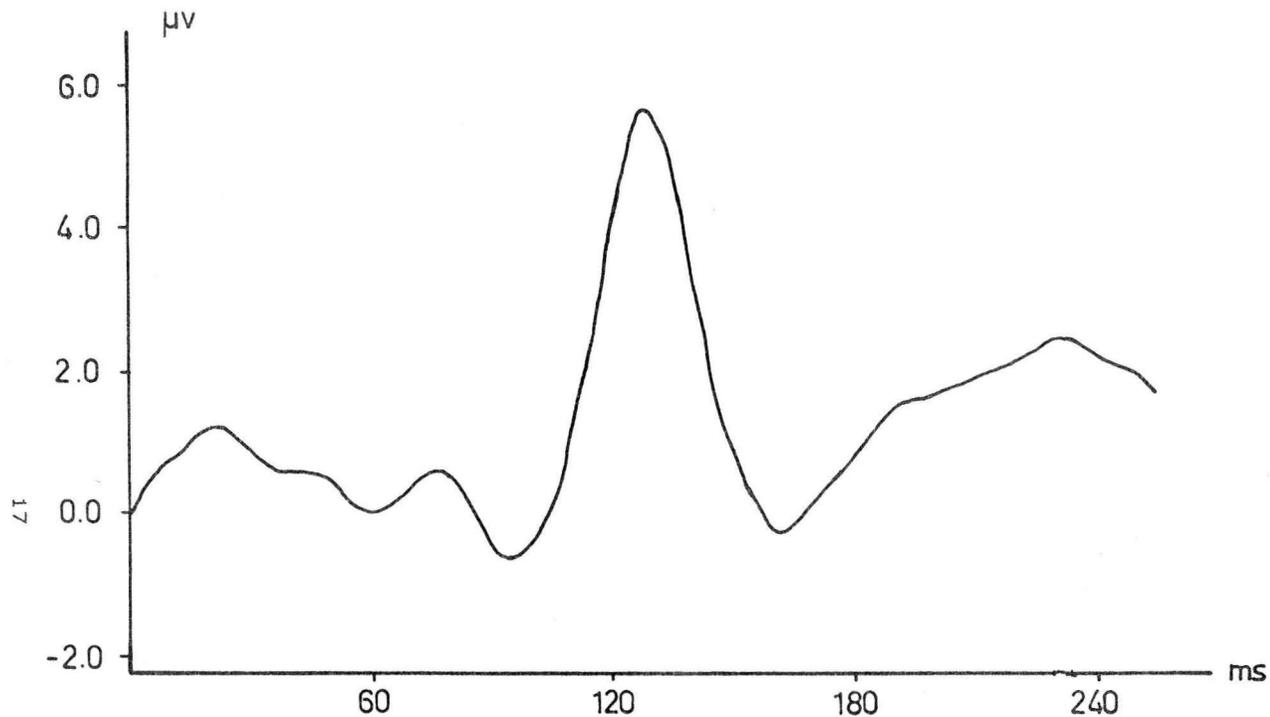


Fig. 2.2.a.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN PEV OBTENIDO EN CONDICIONES NORMALES DE ESTIMULACION Y REGISTRO PARA EL OJO IZQUIERDO, CON EL OJO DERECHO-TOTALMENTE TAPADO. SE OBTIENE UN COMPLEJO  $N_1P_{125}N_2$ .



### III.- HIPOTESIS DE TRABAJO Y OBJETIVOS.

III.1.- HIPOTESIS.- Cuando se estimula medio campo retiniano (temporal) los registros de los PEVs realizados con la geometría de registro, en donde el macroelectrodo pasivo de referencia esta localizado sobre la línea media del lóbulo frontal y los macroelectrodos activos O<sub>1</sub> y O<sub>2</sub>, localizados en los lóbulos occipitales (bajo el SISTEMA INTERNACIONAL 10-20). La respuesta que se obtiene ipsilateralmente es de polaridad negativa y de menor amplitud que la respuesta que se obtiene contralateralmente, que presenta una polaridad positiva.

Lo anterior fue establecido por Blumhardt et al. [2, 3 y 4]. Esto nos indica que al estimular un ojo con medio campo retiniano (retina temporal) se tendrá que producir una respuesta mayor en amplitud en el hemisferio cerebral contralateral. Así por ejemplo: Al estimular solo la retina temporal del ojo derecho, se obtendrá una respuesta mayor en el hemisferio cerebral izquierdo (región occipital O<sub>1</sub>) que la respuesta obtenida en el hemisferio cerebral derecho (región occipital O<sub>2</sub>).

III.2.- OBJETIVOS.- Para comprobar la validez de este resultado se formulan los siguientes objetivos:

1.- Comprobar el resultado establecido por Blumhardt et al. con dos técnicas de registro:

- a) Sistema Internacional 10-20.
- b) Laplaciano (densidad de fuentes).

- 2.- Comprobación de una técnica matemática confiable para el análisis e interpretación de los registros eléctricos generados de la actividad evocada visual, usando un arreglo especial de macroelectrodos de registro.
- 3.- Aplicación de la respuesta evocada laplaciana en la identificación de las diferentes componentes que conforman la actividad evocada visual y que se registran en la corteza cerebral visual.
- 4.- Comprobar las ventajas que reporta el uso del operador diferencial laplaciano en el análisis de la actividad evocada, a través de la comparación de la respuesta evocada visual, realizada con el SISTEMA INTERNACIONAL 10-20 y la respuesta evocada laplaciana.

### III.3.-VENTAJAS QUE REPORTA EL USO DEL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO.

Dadas las características del OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO (APENDICE A), resulta que las ventajas que reporta su uso en el análisis de la actividad evocada visual son:

- A.- ES UN SISTEMA DE REFERENCIA LIBRE. Esto se debe al hecho de que  $\nabla f$ ,  $\nabla \times f$  y  $\nabla \cdot f$ , tienen un sentido geométrico. Son invariantes con respecto a la transformación del sistema de coordenadas. Esto también se cumple para el operador diferencial laplaciano, que involucra en su desarrollo sólo expresiones invariantes. Por consiguiente la forma del laplaciano no sufre cambios al pasar a otro sistema de referencia.
- B.- ES INSENSIBLE A CONFIGURACIONES DE FUENTE-SUMIDERO QUE ESTEN ORIENTADOS TANGENCIALMENTE A LA SUPERFICIE DE LA CORTEZA CEREBRAL.- En virtud de que la ECUACION DE

POISSON es la LEY DE GAUSS en forma de ecuación diferencial, que comprende la derivada del potencial eléctrico (o del campo eléctrico) evaluado en un punto, en lugar de una integral calculada sobre una superficie, usando como condición a la frontera el requisito de que las componentes tangentes a la superficie se anulen en cada punto de ellas. De esta manera sólo se involucra en la solución las componentes normales del campo eléctrico a la superficie en cuestión.

C.- SU SENSIBILIDAD ESPACIAL CARACTERISTICA ES LA DE UN FILTRO SELECTOR DE BANDA. Por lo expuesto en los puntos A y B y al considerar los campos eléctricos, la función del potencial eléctrico en un medio dieléctrico debe de satisfacer la ECUACION DE LAPLACE dependiendo del número de dimensiones que intervengan, y puesto que no hay dependencia con respecto al tiempo, no hay condiciones iniciales que deban de ser cumplidas por la ECUACION DE LAPLACE.

#### IV.- METODOLOGIA.

**SUJETOS.**- Se seleccionó una muestra de nueve sujetos adultos (entre 20 y 25 años) de los dos sexos, sin problemas de visión.

**MACROELECTRODOS.**- Para el registro de los PEVs se usaron macroelectrodos ubicados en  $O_1$  y  $O_2$ , cuya localización fue bajo la geometría de registro del SISTEMA INTERNACIONAL 10-20. fig. (4.1.a). Los macroelectrodos fueron unidos al cuero cabelludo con pasta de bentonita, cuidando de que su impedancia fuera menor a los 10 K $\Omega$ . Para evaluar la respuesta evocada laplaciana de:

a)  $O_1$  ( $\nabla^2 O_1$ ) se usaron cinco macroelectrodos activos,  $O_1$  como central y cuatro alrededor 1, 2, 3 y 4 equidistantes 2 cm del central, dispuestos en forma de cruz. fig. (4.1.b).

b)  $O_2$  ( $\nabla^2 O_2$ ) se usaron cinco macroelectrodos activos,  $O_2$  como central y cuatro alrededor 5, 6, 7 y 8 equidistantes 2 cm del central, dispuestos en forma de cruz. fig. (4.1.c).

**ESTIMULO.**- Para la obtención de los PEVs se usó un damero reversible blanco-negro, en un monitor de televisión. Las dimensiones de cada cuadro fueron de 0.8 cm X 0.8 cm y el ángulo que formaron fue de 10°. La reversión de los cuadros blanco-negro se hizo con una frecuencia de 1.6 Hz, indicándole al sujeto que fijara su vista en el centro de la pantalla y no parpadeara.

## REGISTROS.-

- A.- Con el objetivo de probar y calibrar el equipo de registro, así como la verificación de que los registros realizados correspondían a un comportamiento evocado. La primera parte del experimento consistió en estimular todo el campo visual del ojo izquierdo, con el ojo derecho totalmente tapado. fig. (4.1.d).
- B.- La segunda parte del experimento consistió en estimular sólo la retina temporal del ojo izquierdo, manteniendo el ojo derecho totalmente tapado. Se efectuó un registro ipsilateral del PEV  $O_1$ , y con los macroelectrodos de registro  $O_1$ , 1, 2, 3 y 4 se registró la respuesta evocada laplaciana de  $O_1$  ( $\nabla^2 O_1$ ). Simultáneamente se registró el PEV  $O_2$  para un registro contralateral. fig. (4.1.e). Con los macroelectrodos de registro  $O_2$ , 5, 6, 7 y 8, se efectuó un registro contralateral de la respuesta laplaciana de  $O_2$  ( $\nabla^2 O_2$ ) fig. (4.1.f).
- C.- En la tercera y última parte del experimento, se tapó totalmente el ojo izquierdo y se estimuló sólo la retina temporal del ojo derecho. Se realizó un registro ipsilateral del PEV  $O_2$  y con los macroelectrodos de registro  $O_2$ , 5, 6, 7 y 8 se registró la respuesta evocada laplaciana ipsilateral de  $O_2$  ( $\nabla^2 O_2$ ). Simultáneamente se registró el PEV contralateral  $O_1$ . fig. (4.1.g). Finalmente con los macroelectrodos de registro  $O_1$ , 1, 2, 3 y 4 se realizó un registro contralateral de la respuesta evocada laplaciana de  $O_1$  ( $\nabla^2 O_1$ ). fig. (4.1.h).

La organización de los registros queda representada en la siguiente tabla.

ojo izquierdo	ojo derecho	O <sub>1</sub>	O <sub>2</sub>	$\nabla^2 O_1$	$\nabla^2 O_2$
retina temporal estimulada	totalmente tapado	IPS	CONT	IPS	CONT
totalmente tapado	retina temporal estimulada	CONT	IPS	CONT	IPS

En la obtención de los potenciales evocados visuales se utilizó una computadora promediadora de nueve canales MEDICID 03M que genera estímulos luminosos en forma de un damero reversible blanco-negro (inversión de patrones), en un monitor de televisión (25 cm X 20 cm). Para cada potencial evocado visual se promediaron 100 respuestas.

Existe un gran número de reportes del análisis de la actividad eléctrica cerebral, de los más importantes y que nos sirvieron de base para la presente tesis son: SISTEMA INTERNACIONAL 10-20 [1, 23 y 24]. RESPUESTA PARADOJAL [2, 3 Y 4]. ANALISIS DE LOS PEVs CON LA DERIVACION DE LAS FUENTES [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16]. LOCALIZACION DE LAS FUENTES DE VOLTAJE [5, 6, 7, 8, 13, y 25]. ACTIVIDAD EVOCADA VISUAL [17, 19, 22, 23 y 24]. ASPECTOS FISICOS Y MATEMATICOS DEL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO [18, 20, 21, 23 y 24].

No existiendo ninguna solución general a la ECUACION DE LAPLACE, el método que desarrollamos en el presente trabajo consiste en suponer que no existe variación en el potencial eléctrico en una cierta dirección, la que tomamos como dirección Z, fig (4.1 i). En estas condiciones el potencial electrostático es sólo función de las coordenadas X e Y, y la ECUACION DE LAPLACE

se reduce a:

$$\delta^2 V / \delta X^2 + \delta^2 V / \delta Y^2 = 0 \quad (4.1.1)$$

La geometría de registro para evaluar la respuesta evocada laplaciana es diferente a la geometría de registro usada en el SISTEMA INTERNACIONAL 10-20 [1, 23 y 24] fig. (4.1.b). La respuesta evocada laplaciana puede ser convenientemente evaluada a partir de cinco macroelectrodos activos de registro, uno central y cuatro alrededor equidistantes dispuestos en forma de cruz [7, 9, 10, 11 12, 13, 23 y 24], figs (4.1.c y 4.1.d).

Aplicando la ECUACION DE LAPLACE a la derivación representada en la fig (4.1.c) tenemos que la suma ortogonal de las segundas derivadas parciales igualadas a cero están dadas en forma aproximada por:

$$\frac{\delta^2 V}{\delta X^2} = \frac{\frac{V_1 - V_0}{S_{01}} - \frac{V_0 - V_3}{S_{03}}}{1/2 S_{13}}$$

$$\frac{\delta^2 V}{\delta Y^2} = \frac{\frac{V_2 - V_0}{S_{02}} - \frac{V_0 - V_4}{S_{04}}}{1/2 S_{24}}$$

En virtud de que las distancias  $S_{01}$ ,  $S_{02}$ ,  $S_{03}$  y  $S_{04}$ , así como  $S_{13}$  y  $S_{24}$  son iguales, el laplaciano se reduce simplemente a:

$$\nabla^2 V_0 = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - 4 V_0$$

en donde:

$V_0$  representa el potencial eléctrico del macroelectrodo central.

$V_1$  y  $V_3$  representan los potenciales eléctricos de los macroelectrodos exteriores a lo largo del eje sagital.

$V_2$  y  $V_4$  representan los potenciales eléctricos de los macroelectrodos exteriores a lo largo del eje coronal.

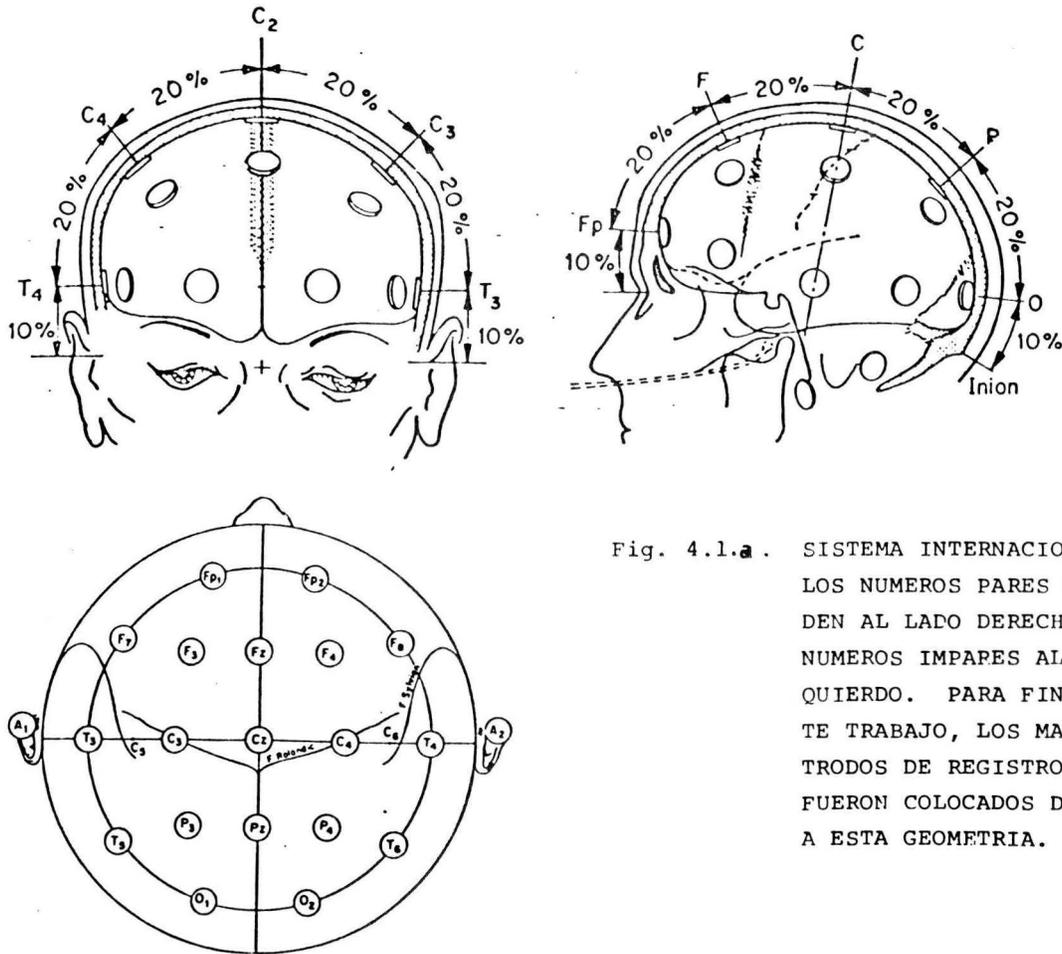


Fig. 4.1.a . SISTEMA INTERNACIONAL 10-20  
 LOS NUMEROS PARES CORRESPONDEN AL LADO DERECHO Y LOS -  
 NUMEROS IMPARES AL LADO IZ-  
 QUIERDO. PARA FINES DE ES-  
 TE TRABAJO, LOS MACROELEC-  
 TRODOS DE REGISTRO  $O_1$  Y  $O_2$ -  
 FUERON COLOCADOS DE ACUERDO  
 A ESTA GEOMETRIA.

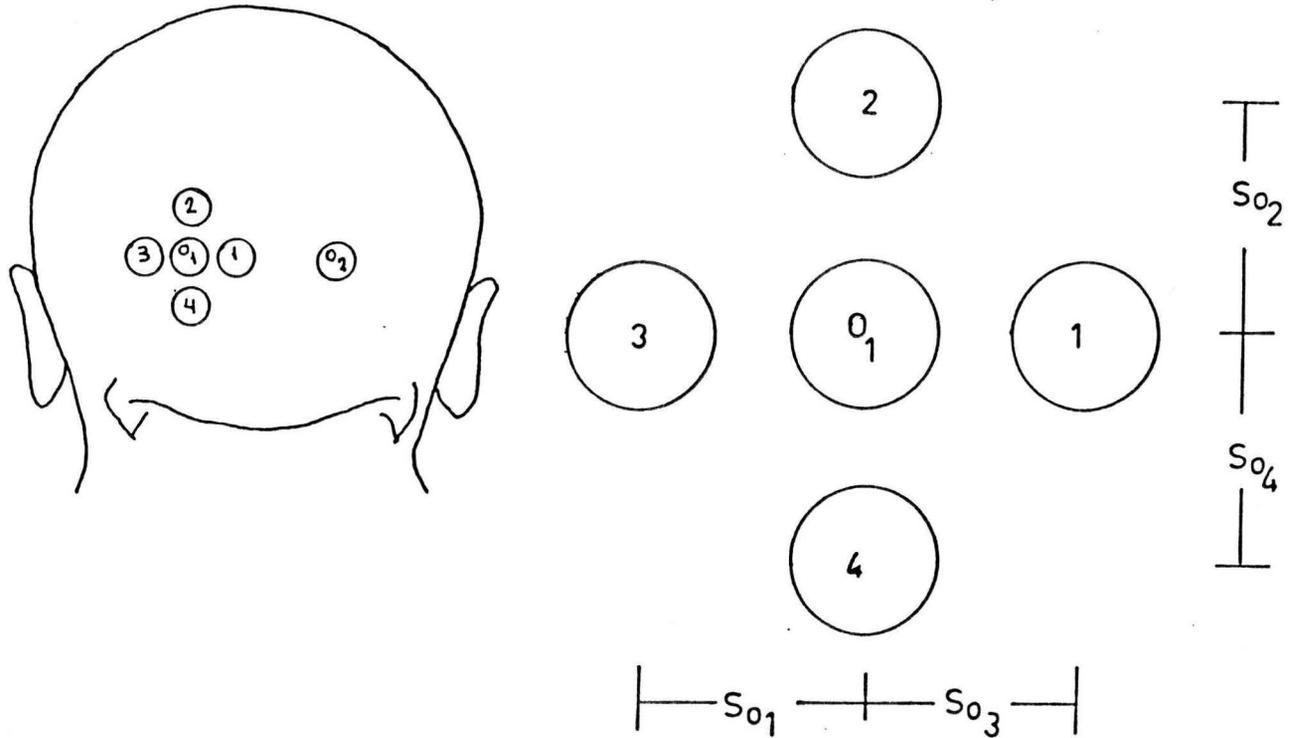


Fig. 4.1.b. GEOMETRÍA DE REGISTRO PARA LA OBTENCIÓN EN FORMA SIMULTÁNEA DE LOS PEVs  $0_1$  y  $0_2$  Y DE LA RESPUESTA LAPLACIANA  $\nabla^2 0_1$ . ESTE ARREGLO NOS PERMITE EVALUAR EL LAPLACIANO DEL MACROELECTRODO CENTRAL  $0_1$  CON LA RELACION  $\nabla^2 0_1 = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - 40_1$ .

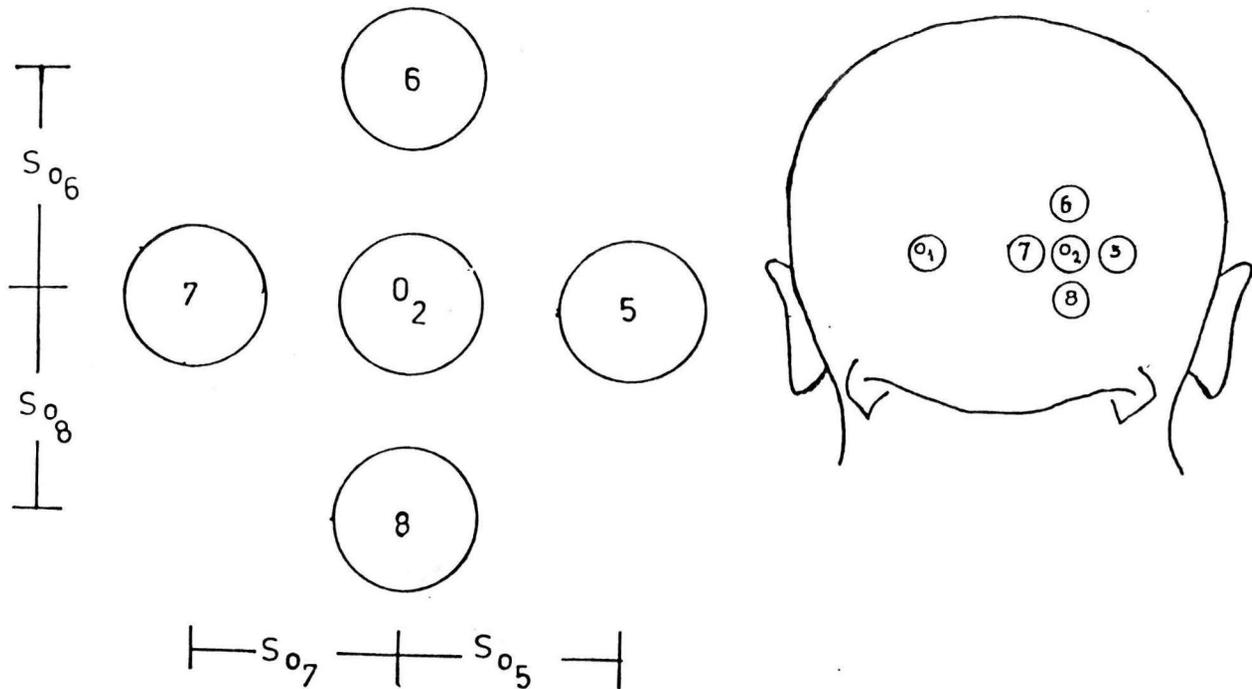


Fig. 4.1.c.- GEOMETRIA DE REGISTRO PARA LA OBTENCION EN FORMA SIMULTANEA DE LOS PEVs  $0_1$  Y  $0_2$  Y DE LA RESPUESTA EVOCADA LAPLACIANA  $\nabla^2 0_2$ . ESTE ARRREGLO NOS PERMITE EVALUAR EL LAPLACIANO DEL MACROELECTRODO CENTRAL  $0_2$  CON LA RELACION  $\nabla^2 0_2 = V_5 + V_6 + V_7 + V_8 - 40_2$ .

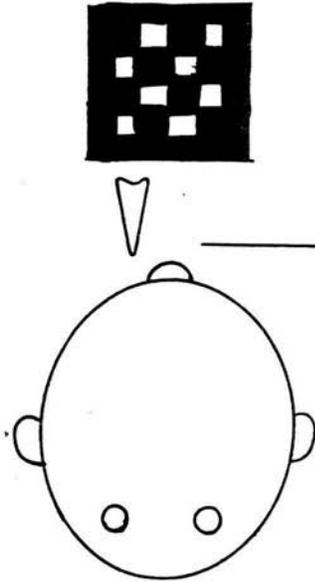


Fig. 4.1.d.-CON EL OBJETO DE CALIBRAR EL APARATO DE REGISTRO, Y -  
-OBTENER REGISTROS QUE CORRESPONDAN A UN COMPORTAMIENTO  
EVOCADO SE MONTO LA SIGUIENTE GEOMETRIA DE REGISTRO CON  
SISTE EN LA ESTIMULACION DE TODO EL CAMPO VISUAL DEL -  
OJO IZQUIERDO, MANTENIENDO EL OJO DERECHO TOTALMENTE -  
TAPADO. LA POSICION DE LOS MACROELECTRODOS  $O_1$  Y  $O_2$  ES-  
BAJO LA GEOMETRIA DE REGISTRO DEL SISTEMA 10-20.

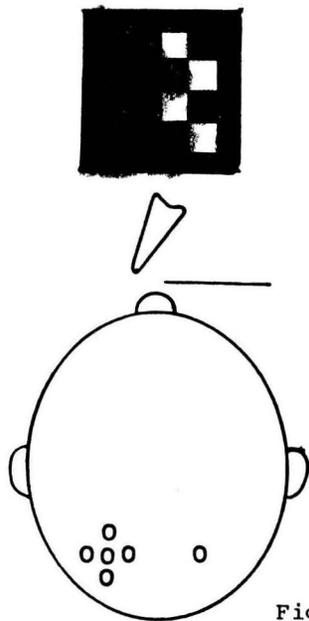


Fig. 4.1.e.

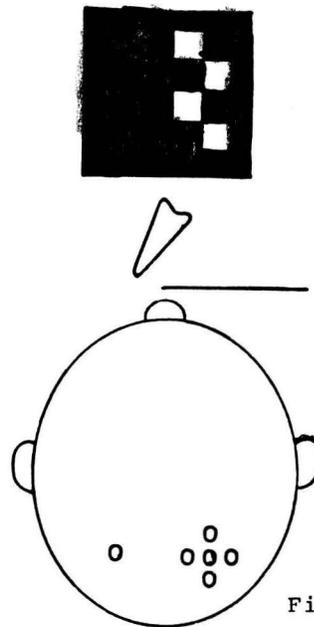


Fig.4.1.f.

Figs. (4.1.e y 4.1.f.) ARREGLO EXPERIMENTAL PARA ESTIMULAR SOLO LA RETINA TEMPORAL DEL OJO IZQUIERDO, MANTENIENDO EL OJO DERECHO TOTALMENTE TAPADO. EN ESTAS CONDICIONES LOS REGISTROS REALIZADOS EN EL HEMISFERIO IZQUIERDO CORRESPONDEN A REGISTROS IPSI LATERALES ( $0_1$  y  $\nabla^2 0_1$ ) MIENTRAS QUE LOS HECHOS EN EL HEMISFERIO DERECHO SON REGIS TROS CONTRALATERALES ( $0_2$  y  $\nabla^2 0_2$ ).

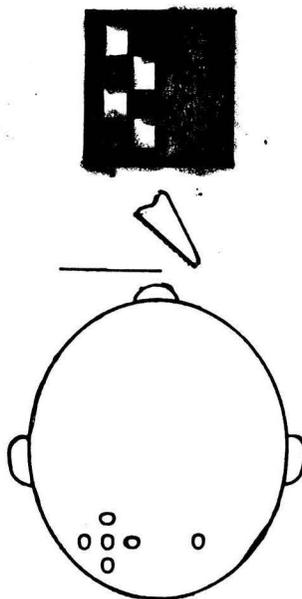


Fig. 4.1.g.

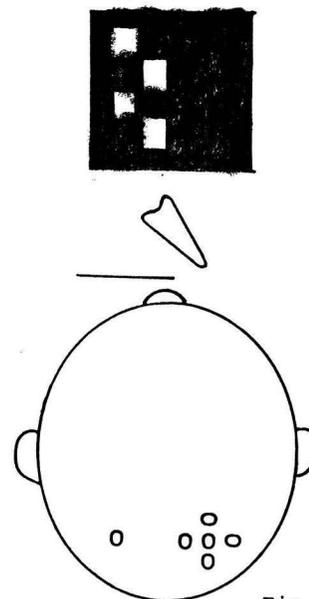


Fig. 4.1.h.

Figs. (4.1.g. y 4.1.h). ARREGLO EXPERIMENTAL PARA ESTIMULAR SOLO LA RETINA TEMPORAL OJO DERECHO, MANTENIENDO EL OJO IZQUIERDO TOTALMENTE TAPADO. EN ESTAS CONDICIONES LOS REGISTROS HECHOS TOTALMENTE TAPADO. EN ESTAS CONDICIONES LOS REGISTROS HECHOS EN EL HEMISFERIO DERECHO CORRESPONDEN A REGISTROS IPSILATERALES  $o_2$  Y  $\nabla^2 o_2$ . MIENTRAS QUE LOS REALIZADOS EN EL HEMISFERIO IZQUIERDO SON REGISTROS CONTRALATERALES ( $o_1$  Y  $\nabla^2 o_2$ ).

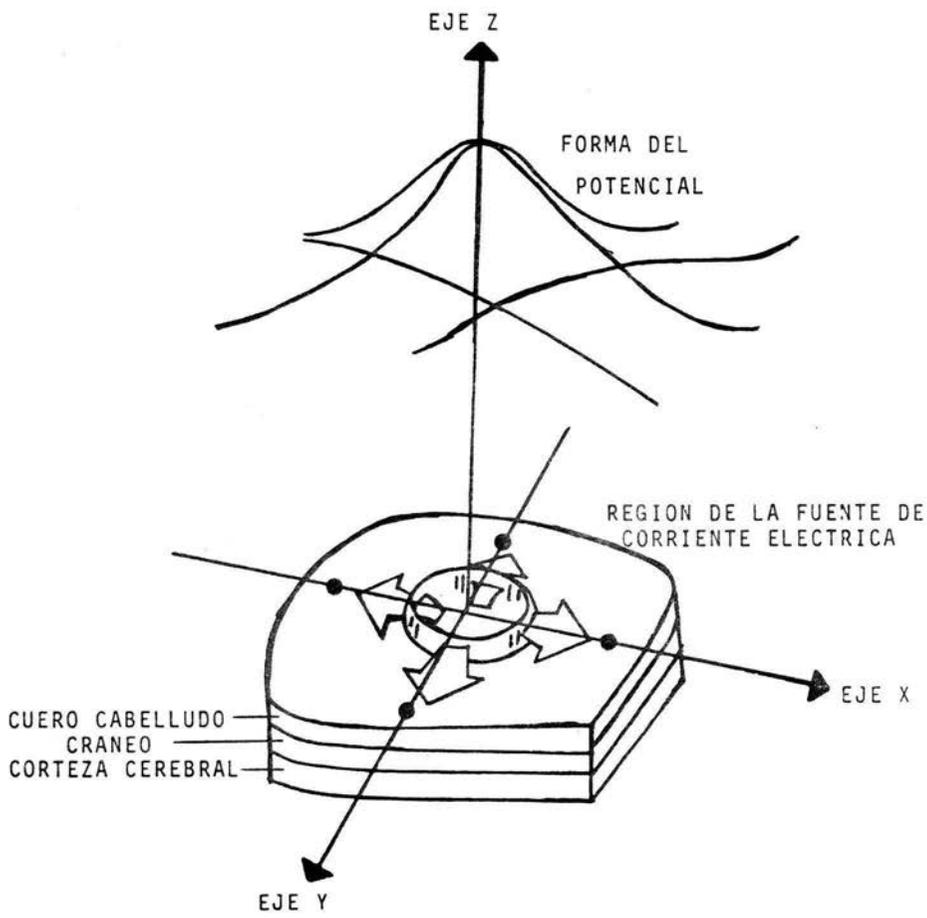


Fig. 4.1.i. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA REGION CEREBRAL EN DONDE SE LOCALIZA UNA FUENTE DE POTENCIAL ELECTRICO Y LA FORMA-TRIDIMENSIONAL DE ESTE POTENCIAL, SE PUEDE APRECIAR EL DECAI - MIENTO EXPONENCIAL DE LA MAGNITUD CON LA DISTANCIA.

## V.- RESULTADOS.

En este capítulo presentamos las gráficas de los PEVs  $O_1$  y  $O_2$  para los registros con el SISTEMA INTERNACIONAL 10-20, y los registros de las respuestas evocadas laplacianas  $\nabla^2 O_1$  y  $\nabla^2 O_2$  obtenidos con un nuevo arreglo en la colocación de los macroelectrodos de registro. Una de las finalidades de este trabajo fue comprobar la veracidad del resultado establecido por Blumhardt et al [2, 3 y 4] (hipótesis de trabajo). Para cumplir con este objetivo, realizamos comparaciones entre los PEVs obtenidos con la geometría de registro del sistema 10-20 y los PEVs efectuados con la geometría de registro del laplaciano. La presentación de estos resultados se expone mediante la descripción de estos PEVs, y que para fines de análisis consideraremos las siguientes propiedades de los PEVs.

- a) LATENCIA.- Representada en el eje horizontal de los registros de PEVs, sus unidades de medición están dadas en ms (milisegundos).
- b) AMPLITUD.- Representada en el eje vertical de los registros de PEVs, con unidades de medición en  $\mu v$  (microvolts).
- c) POLARIDAD.- La onda positiva la identificaremos por P (fuente de potencial o de corriente). Y a las ondas negativas por N.

En la figura (2.2.a) presentamos la morfología de un PEV en condiciones normales de estimulación (para todo el campo receptor visual del ojo izquierdo, con el ojo derecho totalmente tapado) y registro. En esta figura podemos observar un complejo  $N_1PN_2$ . En donde la onda P aparece como la componente principal con una

latencia cercana a los 100 ms, y  $N_1$  y  $N_2$  como componentes secundarias, ya que las magnitudes de sus amplitudes fueron de menor valor que la magnitud de la amplitud de la onda P. El análisis de los resultados se hizo en base a este complejo. Todos los PEVs que se registraron en este trabajo fueron suavizados cada cinco puntos, lo que trajo como consecuencia que la latencia de la onda P sufriera un corrimiento hacia valores mayores. En virtud de la diversidad en los comportamientos evocados sólo mostramos las gráficas más sobresalientes.

La base para iniciar el análisis de los resultados fue: El resultado establecido por Blumhardt et al, y su aparente contradicción con el esquema anatómico funcional de la vía visual. Retomando la fig. (2.2.b) y de acuerdo con ella, tendríamos que si estimulabamos la retina temporal del ojo derecho obtendríamos una respuesta de mayor amplitud en el lóbulo occipital derecho (la respuesta es ipsilateral), que la respuesta que se obtendría en el lóbulo occipital izquierdo (respuesta contralateral). Blumhardt et al, observaron que contrariamente a ello la respuesta principal es contralateral.

#### NOMENCLATURA.-

- 1.-  $O_1$  y  $O_2$  representan los PEVs obtenidos bajo la geometría del SISTEMA INTERNACIONAL 10-20.
- 2.-  $\nabla^2 O_1$  y  $\nabla^2 O_2$  representan las respuestas evocadas laplacianas de los PEVs  $O_1$  y  $O_2$ , obtenidos bajo la geometría de registro del laplaciano.

Como ya se menciona el objetivo de la primera parte del experimento fue la de calibrar el aparato de estimulación, registro y cálculo de los PEVs. Esto nos sirvió para eliminar al sujeto B del experimento, ya que en las condiciones normales de registro y estimulación ya descritas, no se logró la obtención de un PEV de morfología propia fig.(2.2.a).

ESTIMULACION DE LA RETINA TEMPORAL IZQUIERDA .- Con las gráficas correspondientes a la estimulación de la retina temporal del ojo izquierdo, con el ojo derecho totalmente tapado se hicieron tres tipos de comparaciones. Bajo estas condiciones experimentales, los registros realizados en el hemisferio cerebral izquierdo  $O_1$  y  $\nabla^2 O_1$  representaron registros ipsilaterales, y los registros efectuados en el hemisferio cerebral derecho  $O_2$  y  $\nabla^2 O_2$  representaron registros contralaterales.

- 1) Comparación de los PEV tradicionales registrados en  $O_1$  y  $O_2$ .
- 2) Comparación del registro tradicional en  $O_1$ , con el laplaciano  $\nabla^2 O_1$ .
- 3) Comparación de ambos laplacianos.

DE LA PRIMERA COMPARACION .- Observamos:

La morfología de las ondas PEV  $O_1$  y PEV  $O_2$  fueron casi idénticas en cuanto a polaridad y latencia, como podemos ver en las figuras (5.1.a y 5.1.b).  $O_1$  presenta un comportamiento positivo al igual que  $O_2$ , ambos picos positivos tuvieron valores muy aproximados en sus latencias, lo mismo sucede con las ondas  $N_1$  y  $N_2$ . Lo que nos indicó que las regiones de registro  $O_1$  y  $O_2$  funcionaron primero como pequeños sumideros de corriente ( $N_1$ ) para después transformarse en una fuente de potencial ( $P_{125}$ ) y completar finalmente el complejo sumidero-fuente-sumidero ( $N_1 P_{125} N_2$ ). Este comportamiento se observó en todos los sujetos.

Con referencia a las magnitudes de las amplitudes, estas presentaron valores ligeramente diferentes para cada sujeto. Fijando nuestra atención en el complejo  $N_1 P_{125} N_2$  y atendiendo al hecho de que si la magnitud del PEV  $O_1$  fue mayor, igual o menor a la magnitud de la amplitud del PEV  $O_2$ , medidas de pico a pico y tomando sus valores absolutos, logramos identificar dos tipos

de sujetos. Los que corroboran el resultado establecido por Blumhardt et al (sujetos 1, 2, 3 y 9) y los que lo contradicen (sujetos 4, 5, 6 y 7), (ver tabla 5.A). Para ejemplificar presentamos los PEVs de los sujetos 3 y 6.

De la fig. (5.1.a) que corresponde al sujeto 3, podemos observar que la magnitud de la amplitud del PEV  $O_1$  es menor que la magnitud de la amplitud del PEV  $O_2$ , hecho que corrobora el resultado establecido por Blumhardt et al.

De la fig. (5.1.b) que corresponde al sujeto 6 observamos un resultado contradictorio a lo establecido por Blumhardt et al. Ya que la magnitud de la amplitud del PEV  $O_1$  es mayor que la magnitud de la amplitud del PEV  $O_2$ , hecho que concuerda con la descripción anatomofuncional de la vía visual.

#### DE LA SEGUNDA COMPARACION .- Observamos:

La respuesta evocada laplaciana  $\nabla^2 O_1$  presenta una inversión de polaridad, esto es, mientras el PEV  $O_1$  tuvo un complejo  $N_1 P_{125} N_2$ , la respuesta evocada laplaciana presentó un complejo  $P_1 N P_2$ . Ambos complejos tuvieron valores aproximados en sus latencias ( $P_{120}$ ). La inversión de polaridad en el laplaciano apareció en todos los sujetos. Para ilustrar tal situación presentamos las figs. (5.1.c y 5.1.d) que corresponden a los sujetos 3 y 6 respectivamente. En estas gráficas observamos que los PEVs  $O_1$  presentaron un potencial de polaridad  $N_1 P N_2$ , y que al cambiar de geometría de registro se obtiene un  $\nabla^2 O_1$  de polaridad  $P_1 N P_2$ . En virtud de que la respuesta evocada laplaciana es independiente del sistema de referencia, resultó que la actividad eléctrica en la región de registro  $O_1$  correspondió a un complejo  $P_1 N P_2$ , esto es a un complejo fuente-sumidero-fuente de corriente eléctrica.

#### DE LA COMPARACION DE LOS LAPLACIANOS.- Observamos:

Al analizar ambos laplacianos, se observó que en todos los sujetos  $\nabla^2 O_2$  apareció con un número mayor de componentes, que hicieron que se perdiera el comportamiento evocado característico fig. (2.2.a). Esto nos indicó que no existió respuesta evocada laplaciana en  $O_2$  ya que  $\nabla^2 O_2$  tuvo la apariencia de actividad de base (fig. 5.1.e).

En conclusión, estimulando la retina temporal izquierda, los registros tradicionales del sistema 10-20 no fueron concluyentes en cuanto a que la amplitud de la onda  $P_{100}$  ipsilateral fue menor, a la amplitud de la onda contralateral, ya que esto sólo se cumplió en la mitad de los sujetos (tabla 5.A). En cambio, al usar el laplaciano, todos los sujetos mostraron un cambio de polaridad en  $\nabla^2 O_1$ , mientras que  $\nabla^2 O_2$  asemejó actividad de base. Esto fue indicativo de que la región de registro ipsilatera en  $O_1$  funcionó como un complejo fuente-sumidero-fuente de voltaje, mientras que en la región contralateral  $O_2$  no apareció actividad evocada visual.

ESTIMULACION DE LA RETINA TEMPORAL DERECHA. En este caso los registros realizados en el hemisferio cerebral derecho en  $O_2$  y  $\nabla^2 O_2$  fueron ipsilaterales, mientras que los del hemisferio cerebral izquierdo en  $O_1$  y  $\nabla^2 O_1$  representaron la actividad evocada contralateral. Realizandose los mismos tipos de comparaciones que para la estimulación de la retina temporal izquierda.

#### AL COMPARAR LOS PEVs TRADICIONALES.- Observamos:

- a) Que la morfología de los PEVs  $O_1$  y  $O_2$  fue casi idéntica ya que el comportamiento de polaridad positiva como componente principal para ambas respuestas coincide con sus latencias, lo mismo sucede con sus comportamientos de polaridad negativa para las componentes secundarias. Ambos potenciales presentaron el complejo  $N_1PN_2$ ,

situación que queda de manifiesto en las figs. (5.2.a y 5.2.b). En estos potenciales se vio, que los complejos  $N_1P_1z_0N_2$  tuvieron la misma latencia. Este comportamiento se cumplió para todos los sujetos. Coincidiendo con estos resultados podemos afirmar que las regiones de registro en  $O_1$  y en  $O_2$  funcionaron como fuentes de corriente eléctrica para la misma latencia.

- b) En forma análoga a la construcción de la tabla 5.A, formamos la tabla 5.B, ya que las magnitudes de las amplitudes de los PEVs  $O_1$  y  $O_2$  fueron diferentes para sujeto, logrando así identificar dos tipos de sujetos. Los que corroboran el resultado establecido por Blumhardt et al, (sujetos 1, 4, 5 y 9) y los que lo contradicen (sujetos 2, 3, 6 y 7). Para ejemplificar estas situaciones, presentamos los PEVs de los sujetos 1 y 2.

De la fig. (5.2.a) que correspondió al sujeto 1, observamos que la magnitud de la amplitud del PEV en  $O_1$  fue mayor que la magnitud de la amplitud que presentó el PEV en  $O_2$ . Este resultado coincidió con lo establecido por Blumhardt et al.

De la fig. (5.2.b) que correspondió al sujeto 2, vimos que la magnitud de la amplitud que presenta el PEV en  $O_1$  fue menor que la magnitud de la amplitud del PEV en  $O_2$ . Este hecho reforzó la descripción anatomofuncional de la vía visual.

#### COMPARACION DE LA RESPUESTA LAPLACIANA CON EL PEV EN $O_2$ .-

Al comparar la respuesta evocada laplaciana  $\nabla^2 O_2$  con el PEV  $O_2$ , el laplaciano presentó una inversión de polaridad. Es decir, el PEV tuvo un complejo  $N_1PN_2$  mientras que el complejo de  $\nabla^2 O_2$  fue  $P_1NP_2$ . Este comportamiento fue el mismo para todos los sujetos.

Situación que queda patente en las figs. (5.2.c y 5.2.d), que correspondieron a los sujetos 3 y 7 respectivamente. Lo anterior indicó que la actividad eléctrica en la región de registro O<sub>2</sub>, estuvo funcionando como una fuente - sumidero - fuente de corriente eléctrica.

#### COMPARACION DE LAS RESPUESTAS LAPLACIANAS.-

Al comparar  $\nabla^2 O_1$  y  $\nabla^2 O_2$  observamos que en cuatro sujetos la amplitud de  $\nabla^2 O_1$  fue muy pequeña y careció de las características propias de un potencial evocado visual como puede observarse en la fig.(5.2.e) que correspondió al sujeto 2. En los restantes cuatro sujetos,  $\nabla^2 O_1$  tuvo una configuración muy diferente a la de un PEV por lo que podría corresponder, a una actividad de base. De acuerdo con estos resultados podemos afirmar: Para la estimulación de la retina derecha, con el ojo izquierdo totalmente tapado, la región de registro contralateral no presentó respuesta evocada.

#### COMPARACION DE LAS RESPUESTAS PARA AMBAS RETINAS.

Comparando los resultados representados en las tablas A y B observamos que: Sólo dos sujetos (1 y 9) corroboraron con ambas retinas temporales, y dos sujetos (6 y 7) contradijeron con ambas retinas temporales el resultado establecido por Blumhardt et al.

Con el objetivo de comprobar cual era la conducta promedio de O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub>,  $\nabla^2 O_1$  y  $\nabla^2 O_2$  en el grupo de sujetos, se calculó el PEV y los laplacianos  $\nabla^2 O_1$ ,  $\nabla^2 O_2$  promedio para el caso de la estimulación de la retina temporal izquierda cuyas respuestas promedio se mostrarán a continuación.

FIGURA 5.3.a.- PEV en O<sub>1</sub> Presentó un complejo

perfectamente bien definido  $N_1PN_2$ , el pico positivo presentó una latencia de 120 ms y una amplitud aproximada de 3.5  $\mu v$ .

FIGURA 5.3.b.- PEV en  $O_2$  Apareció un complejo  $N_1PN_2$  bien definido, este comportamiento de polaridad positiva aparece con una latencia aproximada de 120 ms y una amplitud de pico a pico con valor absoluto superior a los 3.5  $\mu v$ .

FIGURA 5.3.c.- En  $\nabla^2O_1$  se tuvo un comportamiento bien definido por el complejo  $P_1NP_2$  y una amplitud aproximada de pico a pico con valor absoluto de 4  $\mu v$ . La onda negativa tuvo una latencia de aproximadamente 120 ms.

FIGURA 5.3.d.- Esta respuesta laplaciana  $\nabla^2O_2$  tuvo una extraña configuración ya que presentó una onda de mayor latencia y duración, observándose un gran componente positivo.

De este grupo de gráficas resultó que para los registros con el SISTEMA INTERNACIONAL 10-20 el comportamiento evocado visual presentó un complejo  $N_1PN_2$  que coincidió en latencia. La magnitud de la amplitud para el PEV en  $O_1$  (ipsilateral) presentó un valor ligeramente inferior a la magnitud de la amplitud del PEV en  $O_2$  (contralateral). Al comparar las respuestas laplacianas resultó que  $\nabla^2O_1$  para el registro ipsilateral se presentó una inversión de polaridad, esto es un complejo  $P_1NP_2$ . En el registro contralateral  $\nabla^2O_2$  la polaridad positiva se conservó, aunque con una morfología no característica del PEV. Dado que el LAPLACIANO tiene la propiedad de ser independiente de cualquier sistema de referencia. Lo anterior sería indicativo de: Para la estimulación sólo de la retina temporal derecha, la zona de registro ipsilateral en  $O_2$  estuvo actuando como una fuente-sumidero-fuente de voltaje, mientras que en la región de registro contralateral en  $O_1$  no se apreció respuesta evocada visual.

TABLA 5.A.- COMPARACION DE LAS MAGNITUDES DE LOS PEV<sub>s</sub> PARA UN ESTIMULO SOBRE LA RETINA TEMPORAL DEL OJO IZQUIERDO, CON EL OJO DERECHO TOTALMENTE TAPADO. O<sub>1</sub> REPRESENTO UN REGISTRO IPSILATERAL Y O<sub>2</sub> UN REGISTRO CONTRALATERAL.

SUJETO	RELACION DE AMPLITUDES	CORROBORACION DEL RESULTADO DE BLUMHARDT
1	O <sub>1</sub> < O <sub>2</sub>	SI
2	O <sub>1</sub> < O <sub>2</sub>	SI
3	O <sub>1</sub> < O <sub>2</sub>	SI
4	O <sub>1</sub> > O <sub>2</sub>	NO
5	O <sub>1</sub> > O <sub>2</sub>	NO
6	O <sub>1</sub> > O <sub>2</sub>	NO
7	O <sub>1</sub> > O <sub>2</sub>	NO
9	O <sub>1</sub> < O <sub>2</sub>	SI

TABLA 5.B.- COMPARACION DE LAS MAGNITUDES DE LOS PEVS PARA UN ESTIMULO SOBRE LA RETINA TEMPORAL DEL OJO DERECHO, CON EL OJO IZQUIERDO TOTALMENTE TAPADO.  $O_1$  REPRESENTO EL REGISTRO CONTRALATERAL Y  $O_2$  EL REGISTRO IPSILATERAL.

SUJETOS	RELACION DE AMPLITUDES	CORROBORACION DEL RESULTADO DE BLUMHARDT
1	$O_1 > O_2$	SI
2	$O_1 < O_2$	NO
3	$O_1 < O_2$	NO
4	$O_1 > O_2$	SI
5	$O_1 > O_2$	SI
6	$O_1 < O_2$	NO
7	$O_1 < O_2$	NO
9	$O_1 > O_2$	SI

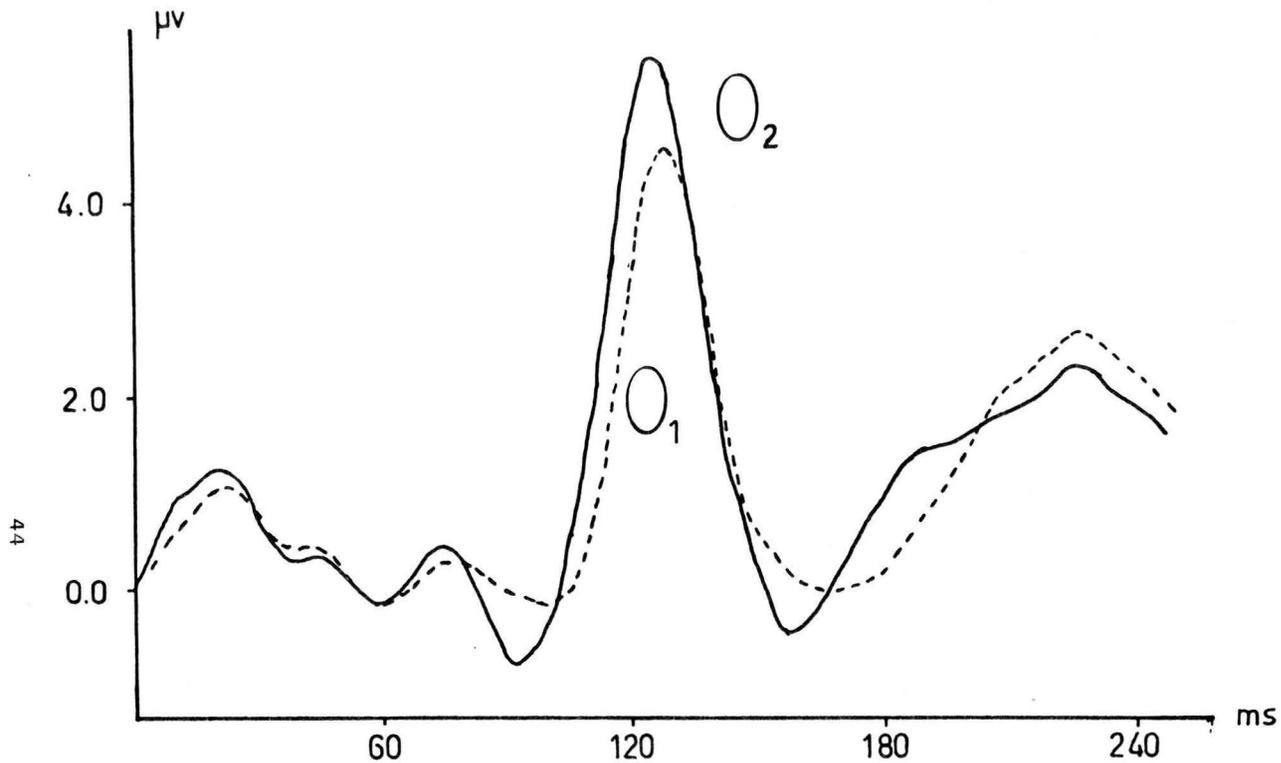


Fig. 5.1.a. PEVs  $O_1$  y  $O_2$  QUE CORRESPONDEN AL SUJETO 3. SE ESTIMULO SOLO LA RETINA TEMPORAL DEL OJO IZQUIERDO EL OJO DERECHO PERMANECIÓ TOTALMENTE TAPADO. OBSERVAMOS QUE LA AMPLITUD DE  $O_1$  ES MENOR QUE LA DE  $O_2$  AMBOS PEVs PRESENTAN UN COMPLEJO  $N_1 P_{120} N_2$ .

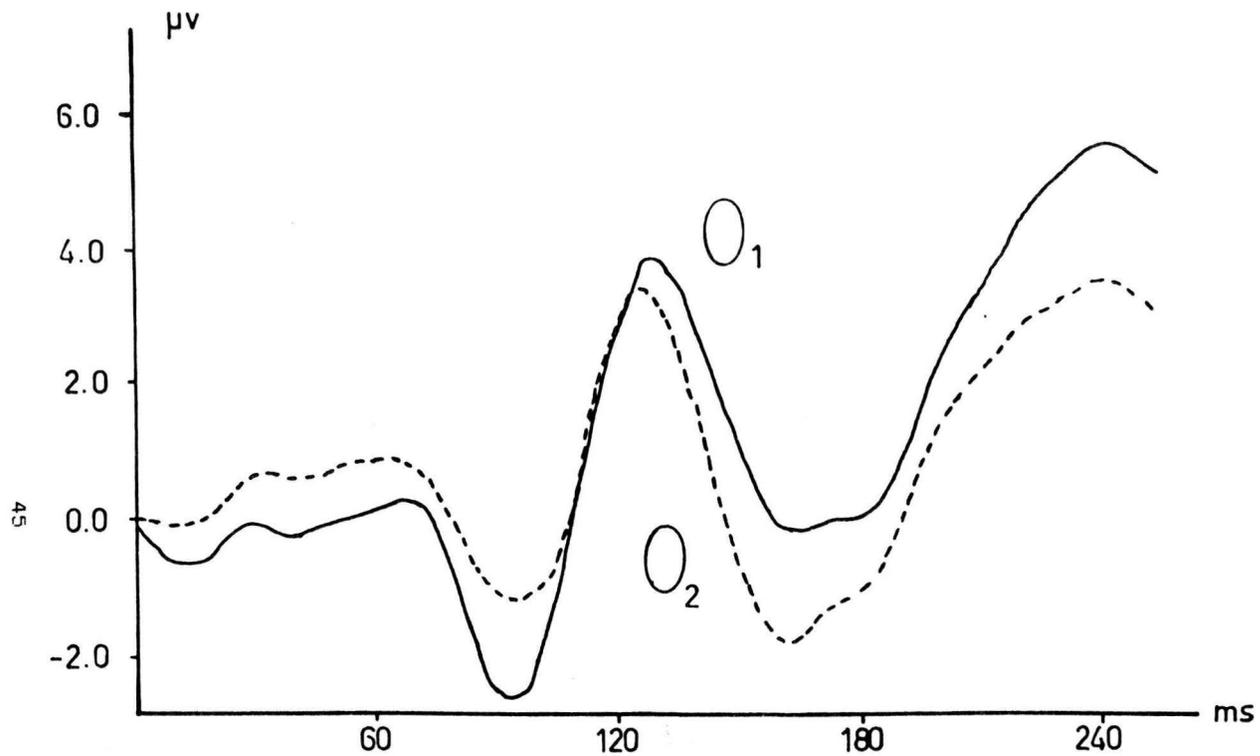


Fig. 5.1.b. PEVS  $O_1$  y  $O_2$  QUE CORRESPONDEN AL SUJETO 6. SE ESTIMULO SOLO LA RETINA TEMPORAL OJO IZQUIERDO, EL OJO DERECHO PERMANECIO TOTALMENTE TAPADO. OBSERVAMOS QUE LA AMPLITUD DE  $O_1$  ES MAYOR QUE LA DE  $O_2$  AMBOS PEVS PRESENTAN UN COMPLEJO  $N_1P_{120}N_2$ .

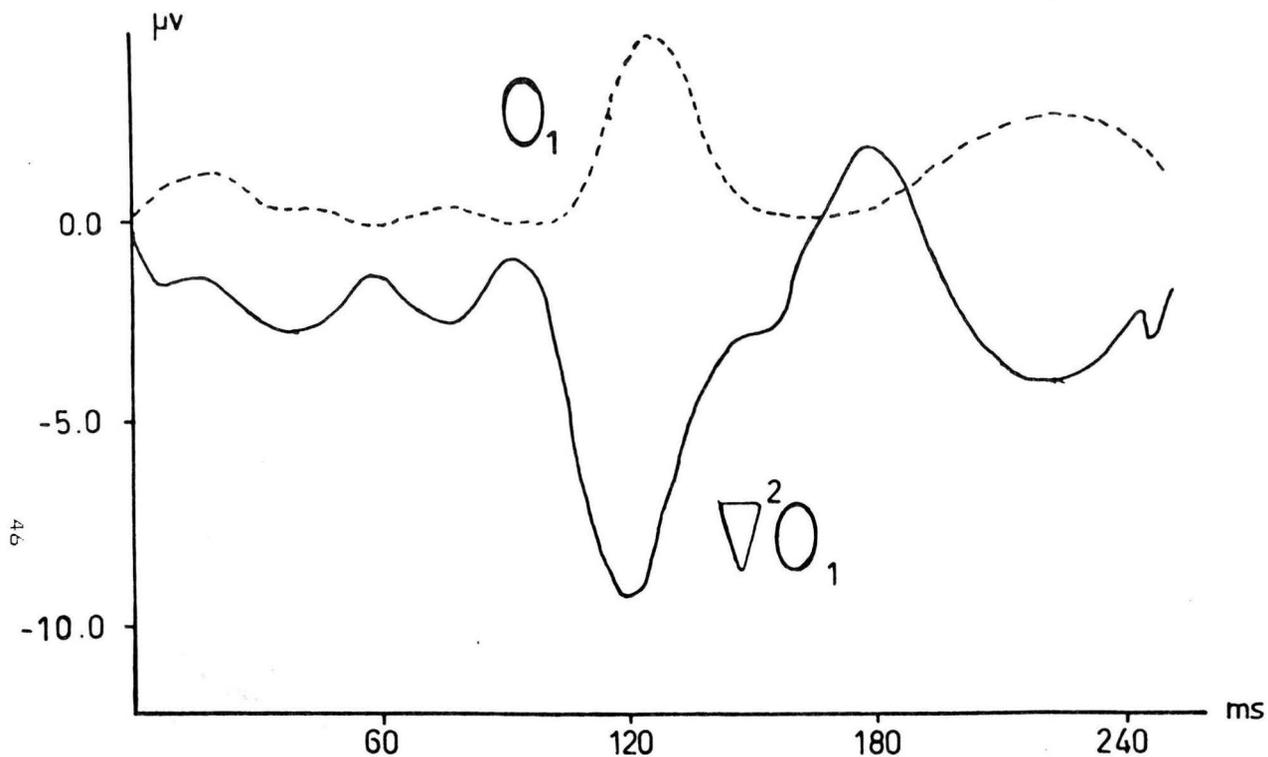


Fig. 5.1.c.- PEV  $O_1$  y  $\nabla^2 O_1$  QUE CORRESPONDE AL SUJETO 3. SE ESTIMULO SOLO LA RETINA TEMPORAL DEL OJO IZQUIERDO. EL OJO DERECHO PERMANECIO TOTALMENTE TAPADO. EL PEV  $O_1$  PRESENTA EL COMPLEJO  $N_1 P_{125} N_2$ , MIENTRAS QUE  $\nabla^2 O_1$  PRESENTA EL COMPLEJO  $P_1 N_{120} P_2$ .

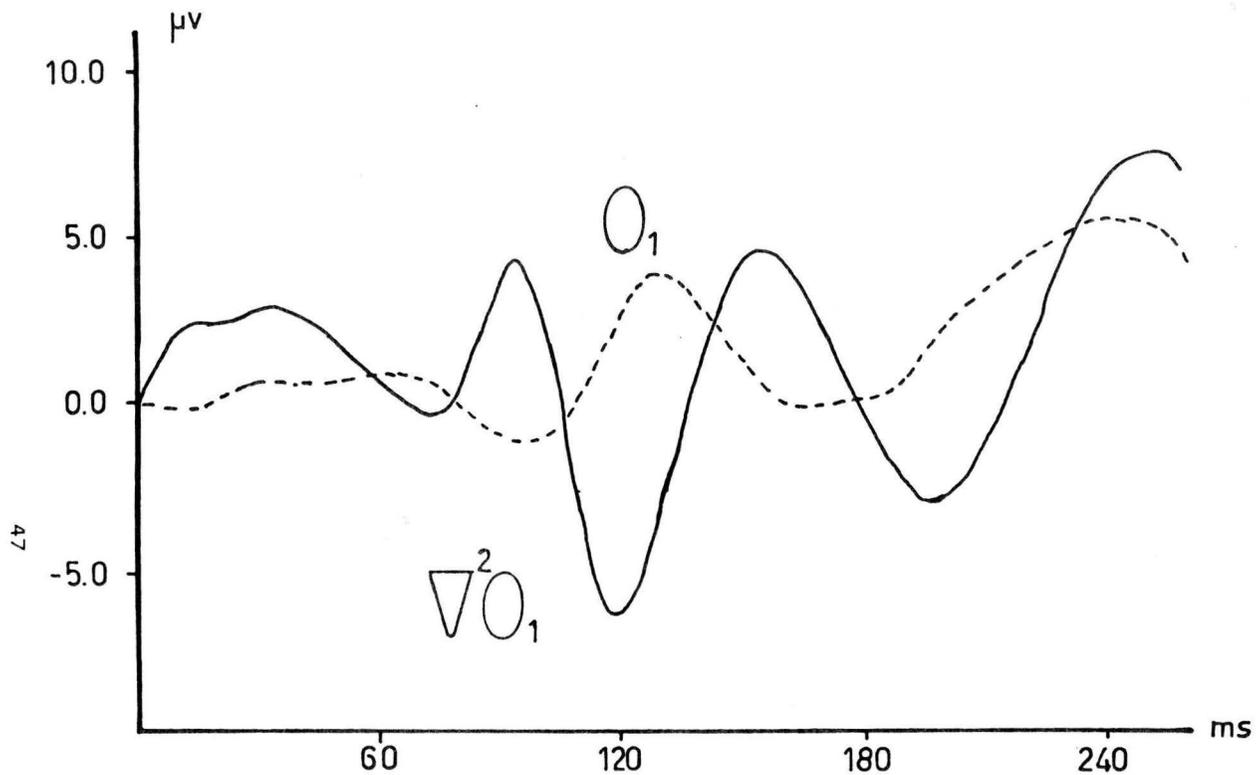


Fig. 5.1 d. PEV  $O_1$  y  $v^2 O_1$  QUE CORRESPONDE AL SUJETO 6. SE ESTIMULO SOLO LA RETINA TEMPORAL DEL OJO IZQUIERDO, EL OJO DERECHO PERMANECIO TOTALMENTE TAPADO. EL PEV  $O_1$  PRESENTA UN COMPLEJO  $N_1 P_{130} N_2$  MIENTRAS QUE EL  $v^2 O_1$  PRESENTA EL COMPLEJO  $P_1 N_{120} P_2$ .

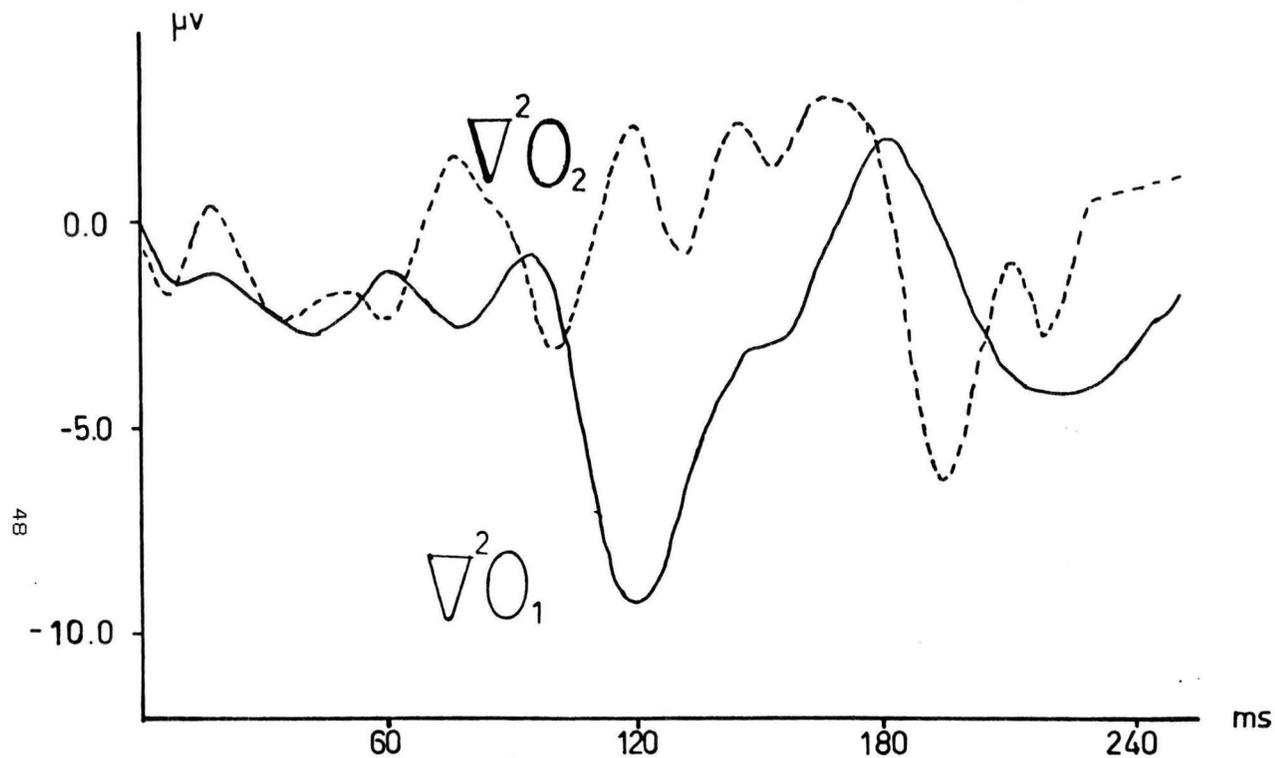


Fig. 5.1.e.  $V^2O_1$  QUE CORRESPONDE AL SUJETO 3 SE ESTIMULO SOLO LA RETINA TEMPORAL DEL OJO IZQUIERDO. EL OJO DERECHO PERMANECIO TOTALMENTE TAPADO  $V^2O_1$  PRESENTA EL COMPLEJO  $P_1N_{120}P_2$  MIENTRAS  $V^2O_2$  TIENE CARACTERISTICAS DE ACTIVIDAD DE BASE.

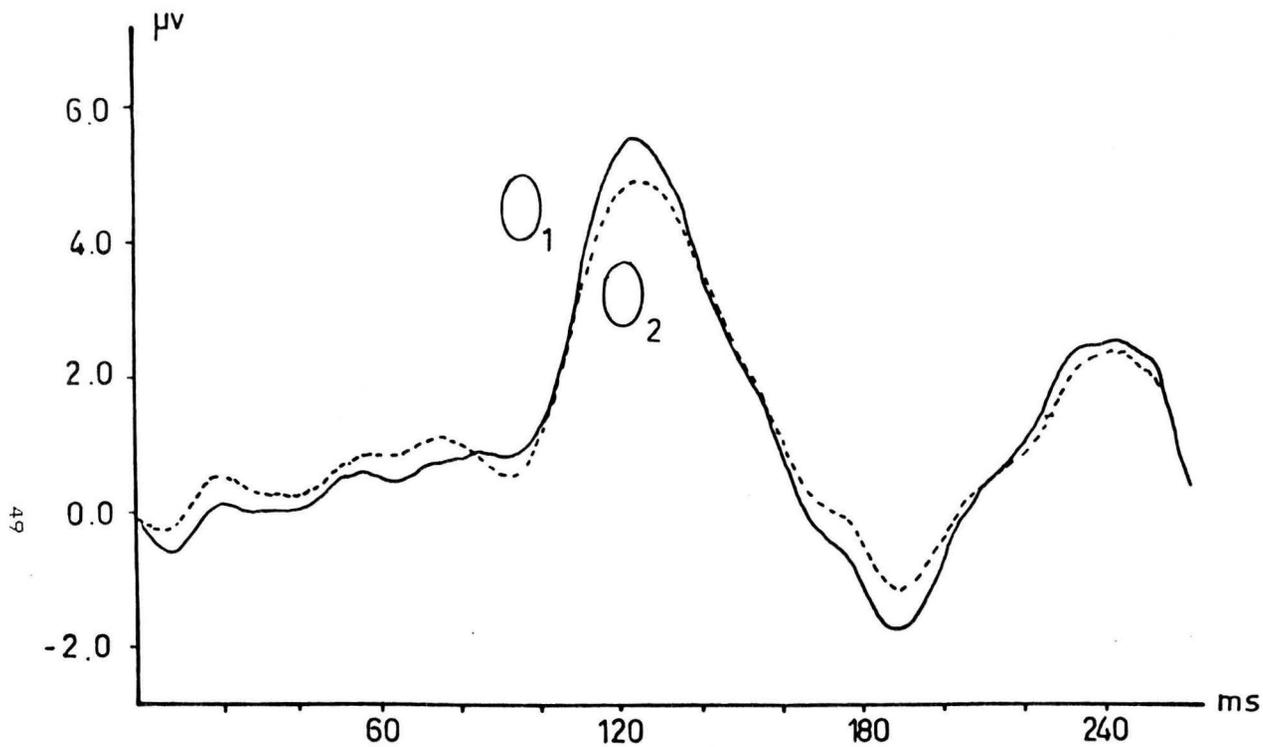


Fig. 5.2.a. PEVs  $O_1$  y  $O_2$  QUE CORRESPONDEN AL SUJETO 1. SE ESTIMULO SOLO LA RETINA TEMPORAL DEL OJO DERECHO. EL OJO IZQUIERDO PERMANECIO TOTALMENTE TAPADO, OBSERVAMOS QUE LA AMPLITUD DE  $O_1$  ES MAYOR LA DE  $O_2$  AMBOS PEVs PRESENTAN UN COMPLEJO  $N_1 P_{120} N_2$ .

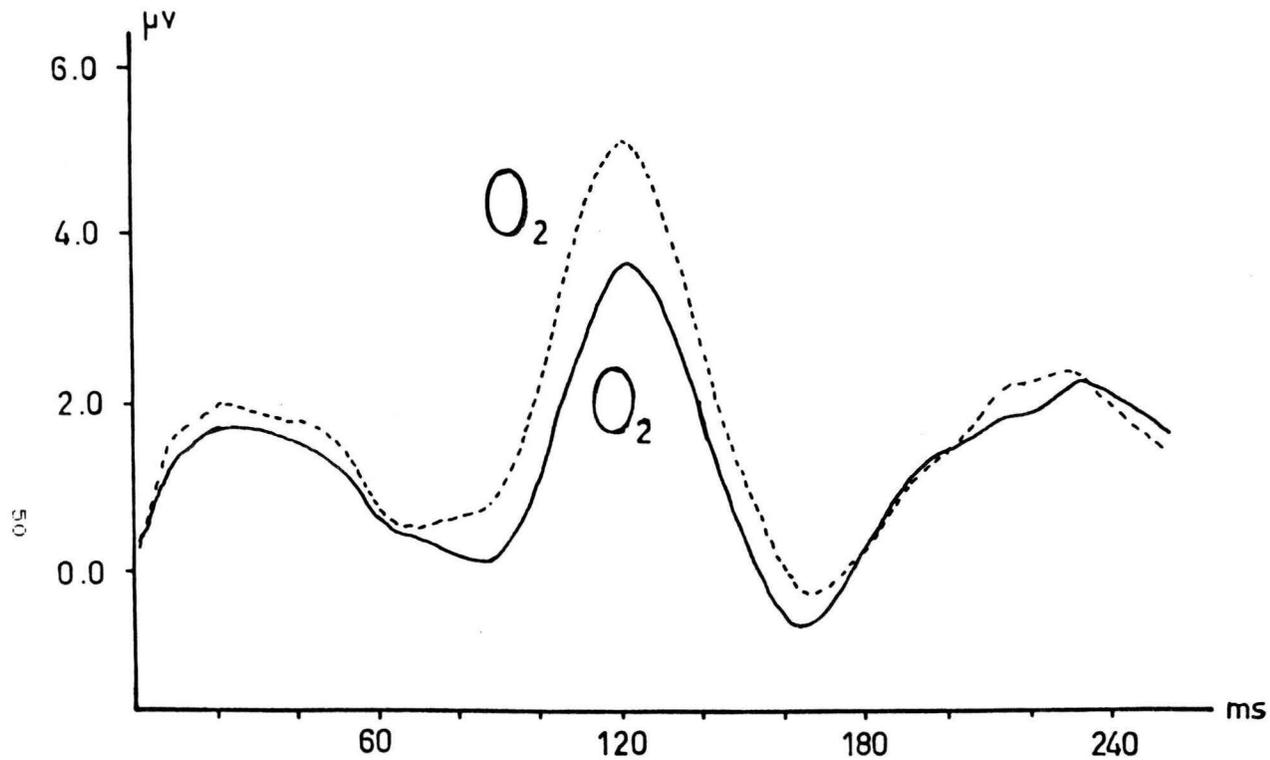


Fig. 5.2.b. PEVs  $O_1$  y  $O_2$  QUE CORRESPONDEN AL SUJETO 2 SE ESTIMULO SOLO LA RETINA TEMPORAL DEL OJO DERECHO, EL OJO IZQUIERDO PERMANECIO TOTALMENTE TAPADO. OBSERVAMOS QUE LA AMPLITUD DE  $O_2$  ES MAYOR QUE LA DE  $O_1$  AMBOS PEVs PRESENTAN UN COMPLEJO  $N_1 P_{120} N_2$ .

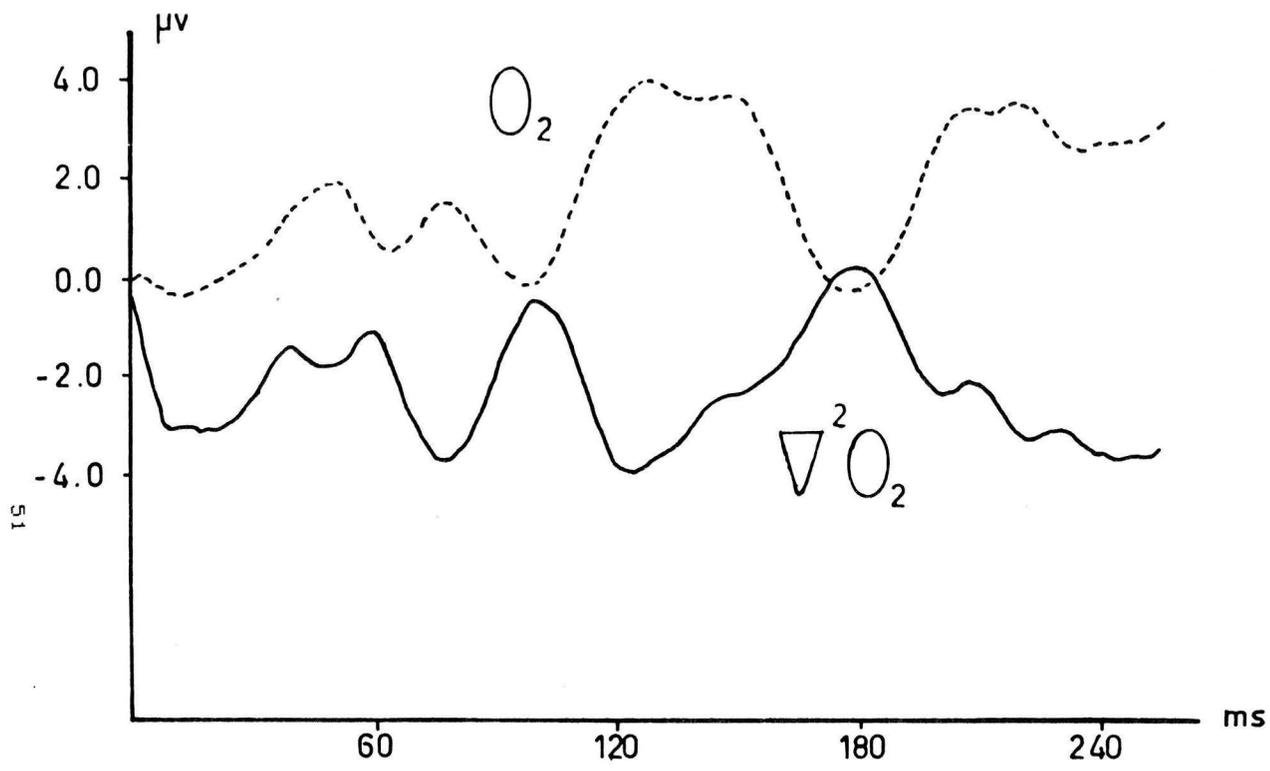


Fig. 5.2.c. PEV  $O_2$  y  $\nabla^2 O_2$  QUE CORRESPONDE AL SUJETO 3. SE ESTIMULO SOLO LA RETINA TEMPORAL DEL OJO DERECHO, EL OJO IZQUIERDO PERMANECIO TOTALMENTE TAPADO OBSERVAMOS QUE PEV  $O_2$  TIENE UN COMPLEJO  $N_1 P_{120} N_2$  MIENTRAS QUE  $\nabla^2 O_2$  PRESENTA EL COMPLEJO  $P_1 N_{120} P_2$ .

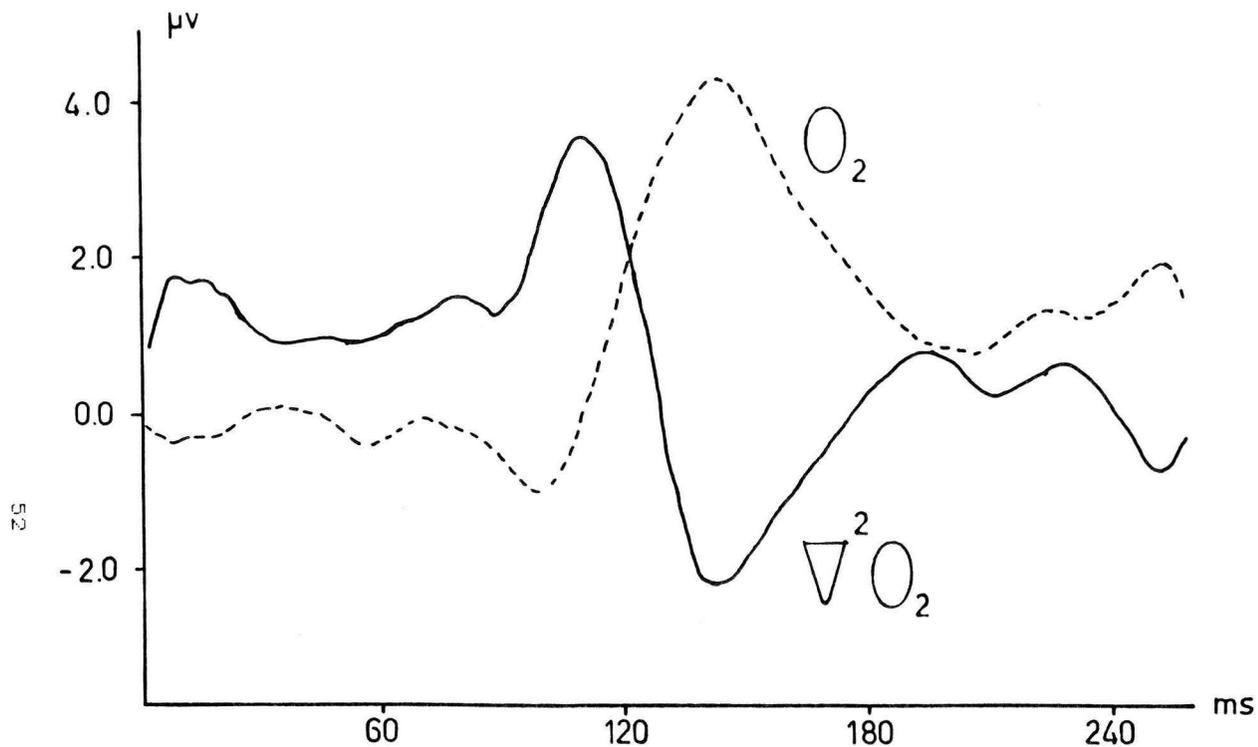


Fig. 5.2.d. PEV  $O_2$  y  $v^2O_2$  QUE CORRESPONDE AL SUJETO 7. SE ESTIMULO SOLO LA RETINA TEMPORAL DEL OJO DERECHO, EL OJO IZQUIERDO PERMANECIO TOTALMENTE TAPADO, OBSERVAMOS PEV  $O_2$  TIENE UN COMPLEJO  $N_1P_{130}N_2$  MIENTRAS QUE  $v^2O_2$  PRESENTA UN COMPORTAMIENTO PRE-DOMINANTE  $P_1N_{130}P_2$ .

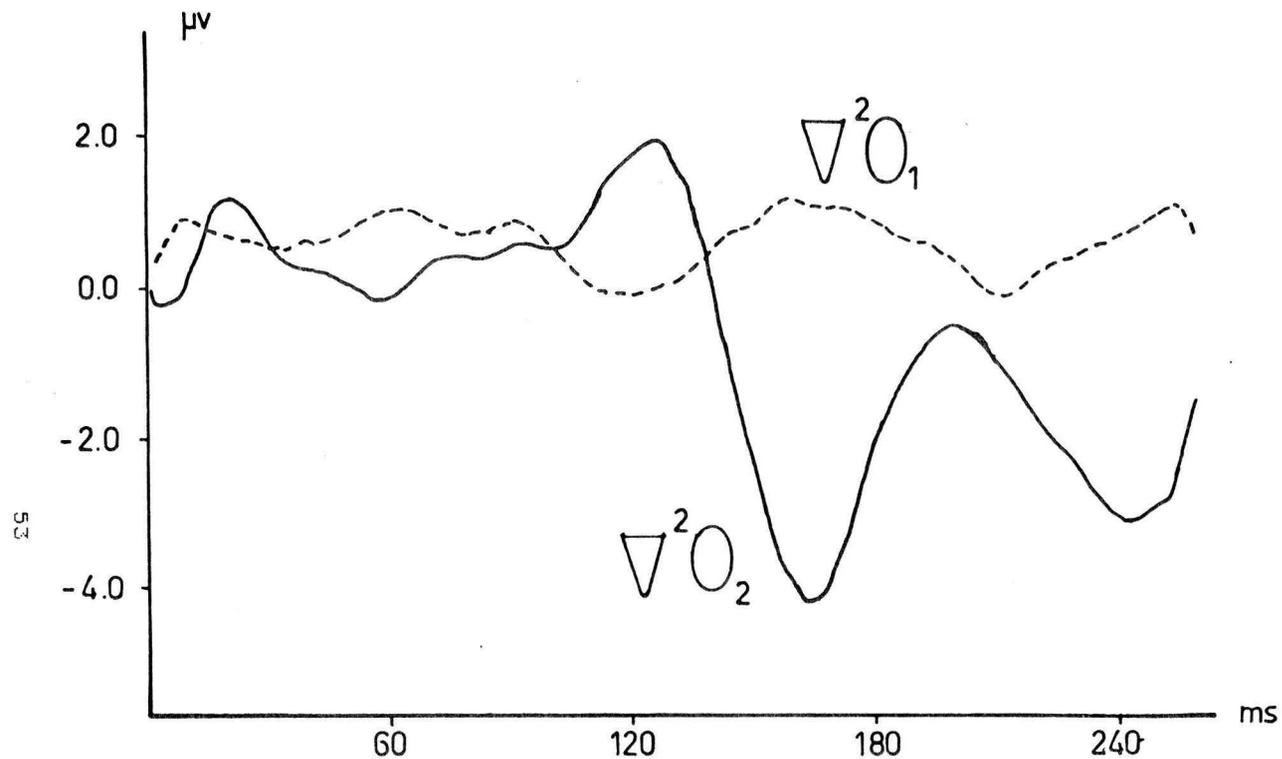


Fig. 5.2.e.-  $\nabla^2 O_2$  y  $\nabla^2 O_1$  QUE CORRESPONDE AL SUJETO 2. SE ESTIMULO SOLO LA RETINA TEMPORAL DEL OJO DEPECHO, EL OJO IZQUIERDO PERMANECIO - TOTALMENTE TAPADO OBSERVAMOS QUE  $\nabla^2 O_2$  TIENE UN COMPLEJO  $P_1 N_{160} P_2$  MIENTRAS QUE  $\nabla^2 O_1$  PRESENTA UN COMPORTAMIENTO CON CARACTERISTICAS DE ACTIVIDAD DE BASE.

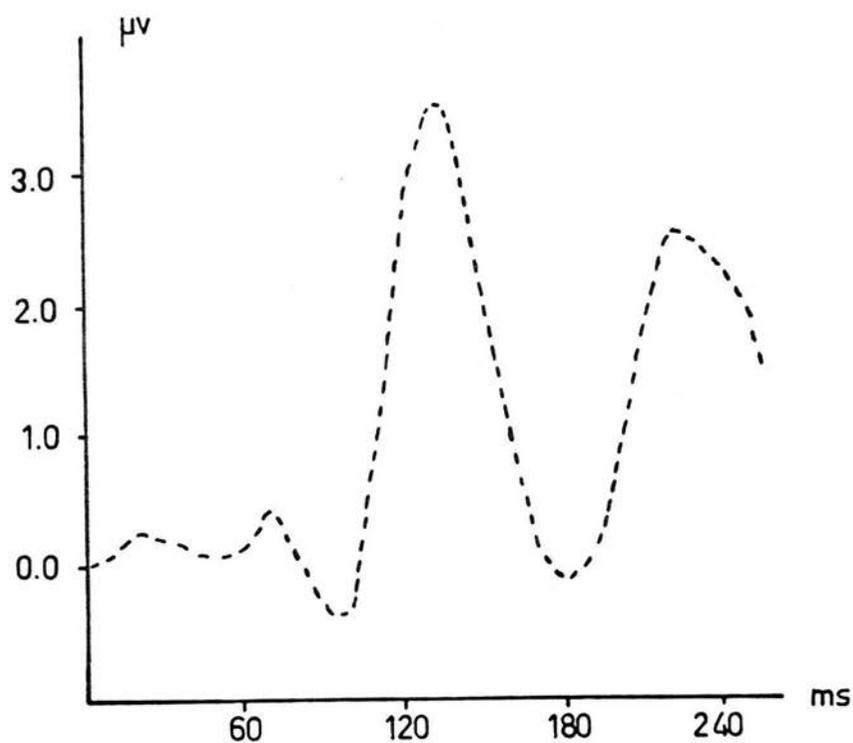


Fig. 5.3.a.- PEV  $0_1$  PROMEDIO DE LOS 8 SUJETOS EXPERIMENTALES SE ESTIMULO LA RETINA TEMPORAL OJO IZQUIERDO CON EL OJO DERECHO TOTALMENTE TAPADO, SE OBSERVA UN COMPORTAMIENTO DE POLARIDAD POSITIVA. DADO POR EL COMPLEJO  $N_1P_{130}P_2$ .

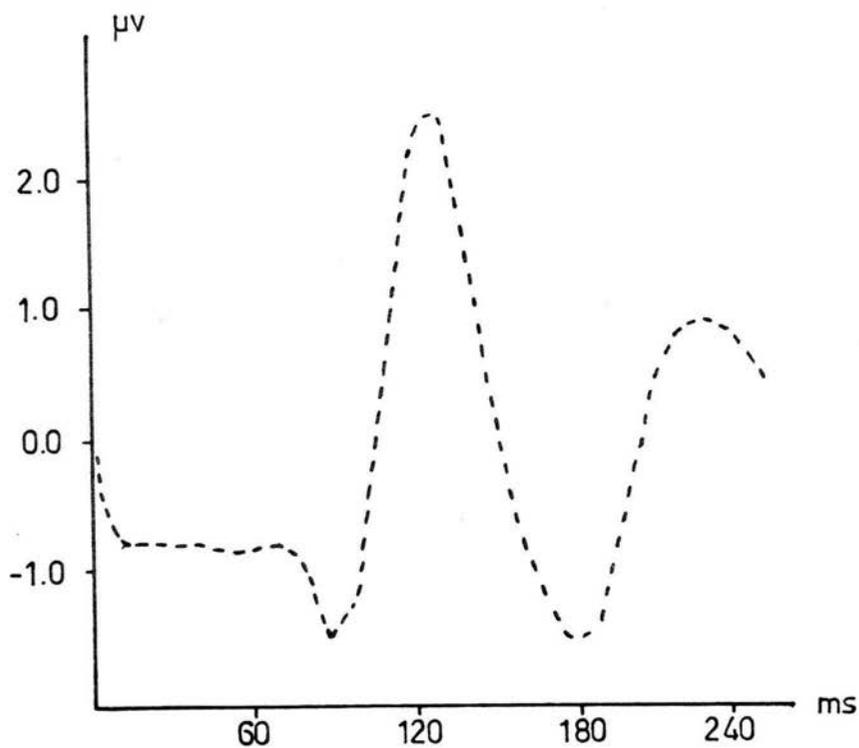


Fig. 5.3.b.- EL PEV  $O_2$  PROMEDIO DE LOS 8 SUJETOS EXPERIMENTALES, SE ESTIMULO LA RETINA TEMPORAL OJO IZQUIERDO CON EL OJO DERECHO TOTALMENTE TAPADO, SE OBSERVA UN COMPORTAMIENTO DE POLARIDAD POSITIVA DADO POR EL COMPLEJO  $N_1P_{125}N_2$ .

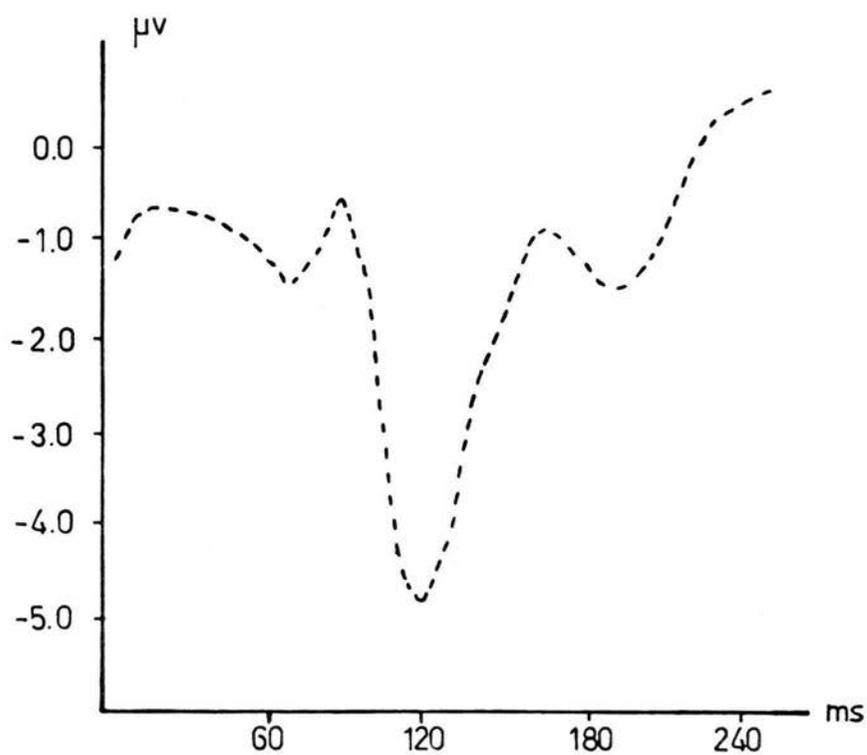


Fig. 5.3.c.-  $V_{0_1}^2$  PROMEDIO DE LOS 8 SUJETOS EXPERIMENTALES SE ESTIMULO LA PETINA TEMPORAL OJO IZQUIERDO, CON EL OJO DERECHO TOTALMENTE TAPADO SE OBSERVA UN COMPORTAMIENTO DE POLARIDAD NEGATIVA DADA POR EL COMPLEJO  $P_1^N P_{120}^P P_2^.$

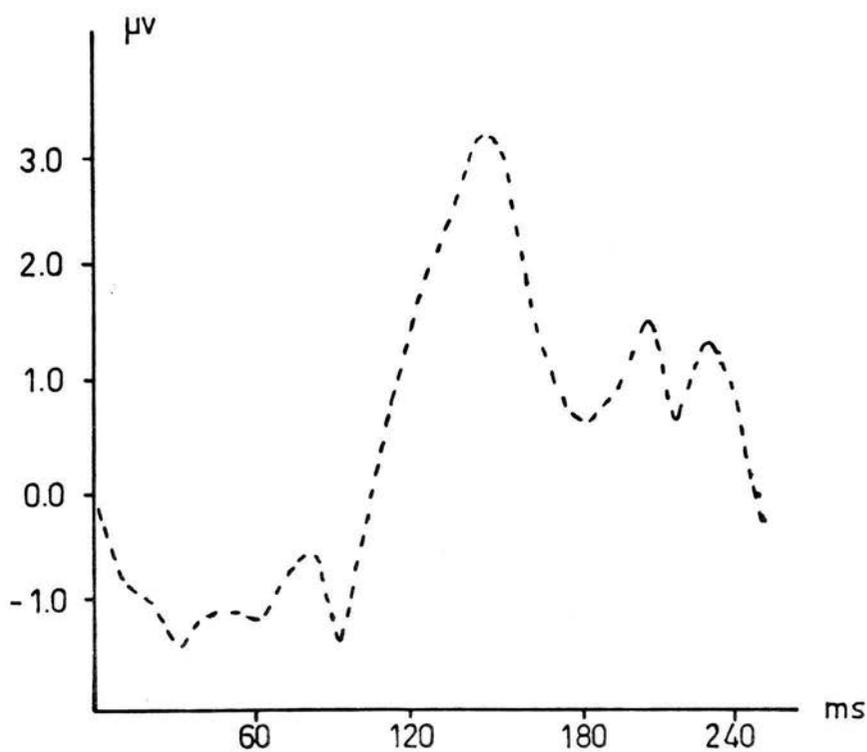


Fig. 5.3.d.-  $\nabla^2 O_2$  PROMEDIO DE LOS SUJETOS EXPERIMENTALES, SE ESTIMULO LA RETINA TEMPORAL OJO IZQUIERDO, CON EL OJO DERECHO TOTALMENTE TAPADO, SE OBSERVA UNA ONDA DE CONFIGURACION EXTRAÑA CON UNA LATENCIA DE GRAN DURACION.

## VI.- DISCUSION.

Varios factores son causa de que los registros superficiales de los PEVs por medio de macroelectrodos colocados sobre el cuero cabelludo arrojen resultados contradictorios. Los más relevantes son:

a)EL MACROELECTRODO DE REFERENCIA.- Sabemos que la representación gráfica de un PEV nos muestra los cambios en la amplitud del voltaje al transcurrir el tiempo. Bajo la geometría de registro del SISTEMA INTERNACIONAL 10-20, estos registros representan el cambio de voltaje entre dos puntos: EL macroelectrodo activo de registro y el macroelectrodo pasivo de referencia. En estas condiciones el cambio en el voltaje obtenido está en función de la asignación arbitraria del punto de referencia y del valor registrado en éste. La región del macroelectrodo de referencia se localizó en una región teóricamente inactiva, los lóbulos auriculares de ambos oídos cortocircuitados. Bajo este sistema de registro es común suponer que la actividad eléctrica generada en la oreja y sus regiones circunvecinas son indiferentes a la actividad evocada del cerebro, lo que es falso, ya que si cerca del oído o del macroelectrodo de referencia se tiene un dipolo generador, el voltaje del macroelectrodo activo de registro se verá alterado y por consiguiente su representación gráfica. [9, 10, 12, 13, 19, 23 y 24]. Además, con este sistema de registro las magnitudes para los cambios en el voltaje representan valores relativos y lo que nos interesa son registros que nos den valores absolutos para los cambios en el voltaje.

b)GRADO DE RESOLUCION ESPACIAL.- Mackay [9, 10 y 11], Srebro [12 y 13], Hjorth's [7], Van Dijk and Spekrijse [25], Graham, Janday and Armstrong [6]. Han demostrado que para los registros superficiales de los PEVs la resolución espacial es de aproximadamente 2.5 cm referidos a la corteza cerebral. Esto nos

sugiere que los macroelectrodos de registro deben de ser colocados con una distancia máxima de 2.5 cm entre ellos; esto se debe a que la intensidad del campo eléctrico generada por los dipolos fluctuantes disminuye en forma exponencial con la distancia. En el sistema de registro tradicional las distancias entre los macroelectrodos son mayores a los 2.5 cm, lo que hace difícil la localización más probable del complejo fuente-sumidero-fuente o sumidero-fuente-sumidero (esto es donde existe una mayor actividad eléctrica cerebral).

c) LOCALIZACION DE LAS FUENTES SUMIDERO DE CORRIENTE.- En virtud de que la organización citoarquitectónica de la corteza cerebral se basa en columnas de neuronas orientadas normalmente a la superficie de ella, la disposición de los cuerpos celulares y las dendritas apicales de las células piramidales hacen que la dirección dominante de las manifestaciones eléctricas sea perpendicular a su superficie, pero la superficie de la corteza cerebral no es completamente lisa, por el contrario, está plegada de surcos y circunvoluciones, esto trae como consecuencia que los elementos corticales generadores de la actividad eléctrica estén orientados en todas direcciones con referencia al cuero cabelludo y por consiguiente, se generen corrientes eléctricas y variaciones de potencial eléctrico en direcciones, normales, tangenciales y paralelas a las regiones de registro. Son estas variaciones del potencial eléctrico las que se registran superficialmente por medio de los macroelectrodos de registro y quedan representados en la gráfica del PEV. En virtud de lo anterior y sabiendo que el macroelectrodo de registro recoge las manifestaciones de la actividad eléctrica de un gran número de estos elementos corticales, es muy difícil localizar a partir de estos potenciales superficiales su origen en la corteza cerebral.

d) VARIABILIDAD EN LA ANATOMIA DEL SISTEMA VISUAL HUMANO.- En todos los cerebros humanos pueden identificarse las mismas circunvoluciones, surcos y cisuras pero si se considera cada circunvolución en particular, son tan numerosas las variaciones

individuales (en su longitud, anchura, flexuosidad,... etc), que es probable que no existan dos cerebros que sean exactamente iguales. Además los pliegues del hemisferio izquierdo difieren de los del derecho en un mismo individuo. Otro factor importante de variación lo constituye los pliegues de paso que unen circunvoluciones vecinas y no son constantes ni en número y ubicación. Además, La posición exacta de la corteza estriada (Área visual primaria o Área 17) varía apreciablemente de sujeto a sujeto y por consiguiente, la corteza cerebral que la rodea inmediatamente, el área periestriada (Área 18) y el área paraestriada (Área 19). El Área 17 ocupa los dos labios de la cisura calcarina rebasando el polo posterior y avanza un poco sobre la superficie dorsolateral del hemisferio. Se considera que su límite en la superficie lateral corresponde al surco semilunar y en la superficie medial aproximadamente al sitio en donde se unen los surcos calcarino y el parieto occipital. En virtud de lo anterior y de la asimetría que existe en los hemisferios cerebrales y en el cráneo, hacen que la colocación de los macroelectrodos de registro en áreas análogas registren la actividad de zonas diferentes. Parte de los elementos corticales generadores de la actividad eléctrica del Área 17 tienen una orientación perpendicular a la zona interhemisférica dorsal del cerebro, región que queda fuera del alcance de los macroelectrodos de registro colocados en la región occipital (O<sub>1</sub> y O<sub>2</sub>) sobre el cuero cabelludo.

e) EL CAMPO ELECTRICO FORMADO POR UN DIPOLO.- Las variaciones de la corriente eléctrica y los cambios en el potencial eléctrico se deben principalmente a las corrientes postsinápticas, que para un registro superficial con macroelectrodos es imposible observarlos individualmente; a menudo las células piramidales son excitadas por grupos de manera sincrónica, y es cómodo utilizar un modelo simplificado de la corriente eléctrica que atraviesa la sinapsis: Este modelo recibe el nombre de dipolo generador de corriente y se trata de un pequeño segmento de corriente que describe globalmente las corrientes sinápticas

en una zona reducida del cerebro. Este dipolo generador tiene una orientación normal a la superficie de la corteza cerebral, por lo que el macroelectrodo de registro colocado sobre el cuero cabelludo sólo registrará parte de este potencial eléctrico, el que avanza hacia el cuero cabelludo. Sabemos que una corriente eléctrica transporta cargas eléctricas y para un segmento tan pequeño de corriente se tiende a tomar cargas eléctricas de uno de los extremos del dipolo para acumularse en el otro, lo que no sucede en el cerebro, las cargas eléctricas se reequilibran, ya que la corriente se encierra en múltiples bucles que se despliegan en todo el volumen del cerebro. El voltaje producido por el dipolo equivalente de estas características posee una morfología sencilla dada por la figura (2.2.a) en donde la intensidad del voltaje depende de la intensidad de la corriente eléctrica que genera el dipolo. La caja craneana además de presentar una superficie curva es mala conductora de electricidad y no es muy homogénea, esto hace que la distribución de los cambios en los voltajes sea diferente. El éxito del modelo del dipolo generador de corriente equivalente se debe al hecho de que explica, en forma sencilla las variaciones del potencial al transcurrir el tiempo. De lo anterior se concluye: La teoría de la generación, distribución y registro de la actividad evocada cerebral, está basada en el hecho de que el cerebro y su envoltura tienen forma esférica y que constituyen un medio conductor infinito, entonces la teoría del campo eléctrico y las variaciones en potencial eléctrico no deben aplicarse estrictamente al estudio de la actividad eléctrica cerebral por la gran complejidad de este y por el hecho de hallarse en un medio no homogéneo.

Estos problemas demandan, que para el estudio y análisis de la actividad evocada se genere un sistema de registro que en esencia cumpla con:

- 1) Independencia del macroelectrodo de referencia.

- 2) Que se encuentre dentro de los límites de resolución espacial.

CON REFERENCIA AL RESULTADO ESTABLECIDO POR BLUMHARDT et al.- Los registros realizados por Blumhardt et al fueron obtenidos bajo una geometría de registro, en donde el macroelectrodo de referencia estaba localizado sobre la línea media del lóbulo frontal. Para la estimulación de las retinas temporales, el comportamiento eléctrico cerebral presentó para ambos ojos resultados semejantes, ya que en la representación gráfica promedio de 50 sujetos experimentales se observa un comportamiento de polaridad negativa dado por un complejo  $P_1N_1OO_1P_2$  para los registros ipsilaterales. Para los registros contralaterales se observa, un comportamiento de polaridad positiva dado por el complejo  $N_1P_1OO_1N_2$ , en donde la magnitud de la amplitud, medida pico a pico y tomando valores absolutos, es mayor para el registro contralateral [2, 3 y 4]. Esto lo interpretaron de la forma siguiente: El dipolo generador de la actividad eléctrica localizado en el hemisferio estimulado tiene una orientación con el polo positivo dirigido hacia la zona interhemisférica dorsal del cerebro. Las líneas de fuerza eléctrica originadas en este polo viajan a través de esta zona y ejercen su influencia sobre el hemisferio contralateral, entonces el macroelectrodo de registro colocado en el polo occipital contralateral registrará la actividad que proviene de la región ipsilateral, más la actividad de base de la región contralateral, razón por la cual la magnitud de la amplitud del registro contralateral es mayor y de polaridad positiva. El polo negativo, al tener una orientación hacia la convexidad del polo occipital ipsilateral generará un registro de menor amplitud y de polaridad negativa.

Lowitsch y Bauer [31] hicieron una réplica del experimento de Blumhardt et al y obtuvieron resultados semejantes en cuanto a la polaridad, ya que en el registro contralateral observaron un

componente de polaridad positiva dado por el complejo  $N_1P_{100}N_2$ , y en el registro ipsilateral se obtuvo un complejo  $P_1N_{100}P_2$ . Con referencia a las magnitudes de las amplitudes para mediciones de pico a pico y tomando valores absolutos se observó que la magnitud de la amplitud del registro ipsilateral fue mayor que la magnitud del registro contralateral.

En virtud de las características del operador diferencial laplaciano que se hicieron patentes en nuestros registros observamos:

Sabemos que el laplaciano es independiente del macroelectrodo de referencia y que con esta geometría de registro sólo se registra la actividad que es normal a la superficie de registro sobre el cuero cabelludo. Razón por la cual sólo se tiene actividad evocada en la región estimulada, reforzando así la descripción anatomofuncional de la vía visual. Además para las geometrías de registro que son función del macroelectrodo de referencia la polaridad y la magnitud de la amplitud son función del sitio de colocación y del valor de base que se le asignan al macroelectrodo. Esto nos sugiere que la polaridad de una onda no es indicativa de que la región de registro funcione como una fuente o como un sumidero de voltaje. La complejidad de la vía visual y la anatomía del área 17 nos dictan que debemos de ser muy cautos al interpretar nuestros resultados al identificar la región de registro como una fuente o bien como un sumidero de corriente eléctrica. Coincidiendo en este aspecto con Blumhardt et al [2, 3 y 4]. Graham, Janday and Armstrong [6]. Srebro [14].

Dadas las características del operador diferencial laplaciano la polaridad y magnitud de la amplitud de la respuesta laplaciana sólo estará en función de la colocación del macroelectrodo central de registro y de la distancia de los macroelectrodos exteriores. Si el macroelectrodo de registro central se coloca sobre la línea media del dipolo generador la magnitud de la amplitud de la respuesta laplaciana será cercana a cero y su

polaridad estará en función de si el macroelectrodo central está colocado hacia la región positiva o negativa del dipolo generador. Si el macroelectrodo central está colocado hacia la región negativa del dipolo generador, entonces el sistema de registro del laplaciano registrará predominantemente la actividad negativa del dipolo generador y la respuesta laplaciana presentará una onda de polaridad negativa. Esto es, debido a que el dipolo generador de la actividad eléctrica tiene su polo negativo dirigido hacia la convexidad del lóbulo occipital y el macroelectrodo de registro capta la negatividad de la convexidad. Es decir, lo que sucedió con nuestros registros, razón por la cual nuestras respuestas laplacianas ipsilaterales presentan un comportamiento de polaridad negativa.

#### COMENTARIOS FINALES.

-La respuesta laplaciana presenta ventajas muy significativas con respecto a los sistemas de registro que están en función del macroelectrodo de referencia ya que:

- a) Es un sistema de registro libre de cualquier referencia.
- b) Es una medida de la curvatura del potencial registrado sobre el cuero cabelludo.
- c) Es una medida de la componente de la corriente eléctrica.
- d) La magnitud del potencial registrado representa el valor real del voltaje generado en la zona de registro.
- e) Nos indica con precisión la localización de la fuente generadora del voltaje o del sumidero de corriente eléctrica.

En virtud de las características del SISTEMA 10-20, del OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO y las que se hacen patentes en nuestros registros, observamos:

f)Nuestros resultados no corroboran la interpretación de Blumhardt et al, cuando usamos el sistema de registro 10-20.

g)Con la geometría de registro del laplaciano nuestros resultados si corroboran la interpretación de Blumhardt et al.

h)Las regiones ipsilaterales al estímulo funcionan como un complejo sumidero-fuente-sumidero.

## VII.- APENDICES.

### A.- EL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO.

#### A.1.- ORIGEN MATEMATICO DEL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO.

A.1.1.- DERIVADA DIRECCIONAL Y EL VECTOR GRADIENTE.- Sabemos que las derivadas parciales  $f_x(x,y,z)$ ,  $f_y(x,y,z)$  y  $f_z(x,y,z)$  dan las razones de cambio de la función  $w = f(x,y,z)$  en un punto arbitrario P con coordenadas  $(x,y,z)$  en las direcciones respectivas. Para aclarar el significado de la razón de cambio de  $w$  en la dirección de un vector unitario  $u$  tomando como referencia la figura (A.1.a), la razón promedio de cambio de  $w$  con respecto a la distancia entre los puntos P y Q es:

$$\frac{f(Q) - f(P)}{|PQ|} = \frac{\Delta w}{PQ} \quad (A.1.1)$$

Para la razón de cambio instantánea de  $w$  en la dirección del vector unitario  $u$  en el punto P; tomamos el límite de esta razón de cambio cuando Q se aproxima a P.

$$\lim_{P \rightarrow Q} = \frac{f(Q) - f(P)}{|PQ|}$$

Este valor límite recibe el nombre de derivada direccional de la función  $f$  en el punto  $P(x,y,z)$  en la dirección del vector unitario  $u$  y se designa por:  $D_u F(x,y,z)$ .

Para facilitar el trabajo de calcular derivadas direccionales, es común usar una forma de la regla de la cadena que comprende al operador diferencial vectorial  $\nabla$ , que para el espacio esta definido por:

$$\nabla = i \delta/\delta x + j \delta/\delta y + k \delta/\delta z \quad (A.1.2)$$

en donde:

$\nabla$  es un operador en el mismo sentido que  $d/dx$  es un operador en el cálculo diferencial.

$\nabla$  es un operador vectorial debido a que sus componentes  $\delta/\delta x$ ,  $\delta/\delta y$ ,  $\delta/\delta z$  tienen dos funciones.

i) la de un vector.

ii) la de un operador diferencial.

$\delta/\delta x$  es la derivada parcial con respecto al eje  $x$ .

$\delta/\delta y$  es la derivada parcial con respecto al eje  $y$ .

$\delta/\delta z$  es la derivada parcial con respecto al eje  $z$ .

$\nabla$  es un operador que obedece a las reglas ordinarias del cálculo vectorial.

$\nabla$  es un operador que no tiene sentido ni utilidad por sí mismo, pero si se aplica a una función escalar  $f(x,y,z)$  produce al vector gradiente ( $\nabla f$ ).

$$\begin{aligned}\nabla f &= \text{grad } f && \text{(A.1.3)} \\ &= i \delta/\delta x + j \delta/\delta y + k \delta/\delta z\end{aligned}$$

en donde:

$\delta f/\delta x$  es la derivada parcial de la función  $f$  con respecto al eje  $x$ .

$\delta f/\delta y$  es la derivada parcial de la función  $f$  con respecto al eje  $y$ .

$\delta f/\delta z$  es la derivada parcial de la función  $f$  con respecto al eje  $z$ .

El vector gradiente tiene una interpretación importante que comprende la derivada direccional máxima de la función  $f$ . Este resultado queda patentado en el siguiente teorema.

**teorema # 1.- SIGNIFICADO DEL VECTOR GRADIENTE.-** El valor máximo de la derivada direccional  $D_u f(P)$  se tiene cuando  $u$  es el vector unitario en dirección del vector gradiente  $\nabla f(P)$ ; esto es, cuando  $u = \nabla f(P) / \|\nabla f(P)\|$ . El valor de esta derivada direccional máxima es  $\|\nabla f(P)\|$ , la magnitud del vector gradiente.

En consecuencia, el vector gradiente  $\nabla f$  apunta en la dirección en donde la función  $f$  aumenta con mayor rapidez y su magnitud es la razón de aumento (con respecto a la distancia), en esa dirección.

**A.1.2.- EL VECTOR GRADIENTE COMO VECTOR NORMAL.-** Consideremos la figura (A.1.b) que representa la gráfica de la ecuación:

$$F(x,y,z) = 0 \quad (\text{A.1.4})$$

La gráfica de esta función concuerda con la gráfica de una ecuación de algunas de las siguientes formas.

$$x = h(y,z); \quad y = g(x,z); \quad z = f(x,y)$$

debido a ésto, se justifica en general referirse a la gráfica de la ecuación fig. (A.1.b) como la superficie en donde el vector gradiente  $\nabla F$  es normal a esta superficie, en el sentido del siguiente teorema.

**TEOREMA # 2.- EL VECTOR GRADIENTE COMO VECTOR NORMAL.-**

Supongase que  $F(x,y,z)$  tiene derivadas parciales de primer orden continuas, y sea  $P(x_0, y_0, z_0)$  un punto de la gráfica de la ecuación  $F(x,y,z) = 0$ . En donde  $\nabla F(P_0) \neq 0$ . Si  $r(t)$  es una curva diferenciable sobre esta superficie con  $r(t_0) = (x_0, y_0, z_0)$  entonces:

$$\nabla F(P_0) * r'(t_0) = 0$$

Por lo tanto  $\nabla F(P_0)$  es perpendicular al vector tangente  $r'(t)$ , como se indica en la fig. (A.1.b). de lo anterior podemos afirmar:

$\nabla F$  queda definido por la ecuación (A.1.3).

$\nabla F$  las derivadas parciales del segundo miembro de esta ecuación se evalúan en el punto  $(x,y,z)$ .

$\nabla F$  es un campo vectorial, es el campo vectorial gradiente.

$\nabla F$  apunta en la dirección en donde se obtiene la derivada direccional máxima de  $F$  en  $(x,y,z)$ .

**A.1.3.- DIVERGENCIA DE UN CAMPO VECTORIAL.-** Suponga ahora la función:

$$F(x,y,z) = i P(x,y,z) + j Q(x,y,z) + k R(x,y,z)$$

con funciones componentes diferenciables  $P$ ,  $Q$  y  $R$ . Entonces la divergencia de  $F$  es la función escalar  $\text{div } F$ . Definida:

$$\begin{aligned} \text{div } F &= \nabla * F \\ &= \langle \delta/\delta x + \delta/\delta y + \delta/\delta z \rangle * \langle P, Q, R \rangle \\ &= \delta P/\delta x + \delta Q/\delta y + \delta R/\delta z \end{aligned} \tag{A.1.5}$$

$\nabla * F$  es el producto punto (o producto escalar) del operador diferencial dado por la ecuación (A.1.2). y el vector  $F$ .

$\nabla * F$  representa una magnitud escalar.

$\delta P/\delta x$  es la derivada parcial de la función P con respecto a x.

$\delta Q/\delta y$  es la derivada parcial de la función Q con respecto a y.

$\delta R/\delta z$  es la derivada parcial de la función R con respecto a z.

A.1.4.- ROTACIONAL DE UN CAMPO VECTORIAL.- El rotacional de un campo vectorial  $F = i P + j Q + k R$  es el rot F de campo vectorial y se define por:

$$\text{rot } F = \nabla \times F$$

que escrito en forma matricial queda representado por:

$$\nabla \times F = \begin{vmatrix} i & j & k \\ \delta/\delta x & \delta/\delta y & \delta/\delta z \\ P & Q & R \end{vmatrix}$$

la evaluación de la expresión formal de este determinante produce:

$$\text{rot } F = \nabla \times F = i (\delta R/\delta y - \delta Q/\delta z) + j (\delta P/\delta z - \delta R/\delta x) + k (\delta Q/\delta x - \delta P/\delta y)$$

$\nabla \times F$  es el producto cruz (o producto vectorial) del operador diferencial dado por la ecuación (A.1.2).

$\nabla \times F$  es una cantidad vectorial cuyas componentes son las cantidades entre parentesis de la ecuación (A.1.6).

A.1.5.- EL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO.- Si aplicamos la divergencia al gradiente de F obtendremos:

$$\begin{aligned}\operatorname{div}(\operatorname{grad} F) &= \nabla * (\nabla F) \\ &= \nabla * (i \delta F / \delta x + j \delta F / \delta y + k \delta F / \delta z) \\ &= (\delta / \delta x + \delta / \delta y + \delta / \delta z) * (i \delta F / \delta x + j \delta F / \delta y + k \delta F / \delta z) \\ &= \delta^2 F / \delta x^2 + \delta^2 F / \delta y^2 + \delta^2 F / \delta z^2\end{aligned}\tag{A.1.7}$$

en donde:

$\delta^2 F / \delta x^2$  es la segunda derivada parcial de la función F con respecto a  $x^2$ .

$\delta^2 F / \delta y^2$  es la segunda derivada parcial de la función F con respecto a  $y^2$ .

$\delta^2 F / \delta z^2$  es la segunda derivada parcial de la función F con respecto a  $z^2$ .

esta relación (A.1.7) se le conoce con el nombre de laplaciano de F, entonces:

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad} F) = \nabla * (\nabla F) = \nabla^2 F\tag{A.1.8}$$

Finalmente el operador diferencial laplaciano es:

$$\nabla^2 = \delta^2 / \delta x^2 + \delta^2 / \delta y^2 + \delta^2 / \delta z^2\tag{A.1.9}$$

La aplicación de este operador sobre una función escalar  $F(x,y,z)$  produce otra función escalar que recibe el nombre de laplaciano de F, quedando definida por (A.1.7).

A.2.- SIGNIFICADO FISICO DEL OPERADOR DIFERENCIAL LAPLACIANO Y SU RELACION CON EL POTENCIAL ELECTRICO. El campo eléctrico puede ser descrito a través de:

- a) Una magnitud vectorial llamada campo eléctrico (E).
- b) Una magnitud escalar que recibe el nombre de potencial eléctrico (V).

estando ambas cantidades intimamente relacionadas.

Para calcular la diferencia de potencial eléctrico ( $\Delta V$ ) entre dos puntos *a* y *b*, en un campo eléctrico E. Fig.(A.2.a). Una carga de prueba  $q_0$  se desplaza desde el punto *a* hasta el punto *b*. El trabajo ( $W_{ab}$ ) que tiene que realizar la fuerza que mueve a la carga a lo largo de la trayectoria que une a los puntos *a* y *b*, esta relacionado con la diferencia de potencial a través de la ecuación :

$$\Delta V_{ab} = V_b - V_a = W_{ab} / q_0 \quad (A.2.1)$$

donde:

$\Delta V_{ab}$  es la diferencia de potencial entre los puntos *a* y *b*.

$V_a$  es el valor del potencial eléctrico en el punto *a*.

$V_b$  es el valor del potencial eléctrico en el punto *b*.

de la ecuación (A.2.1) resulta:

- a)  $W_{ab}$  es positivo si el potencial eléctrico en *b* es mayor que el potencial eléctrico en *a* ( $V_b > V_a$ ).
- b)  $W_{ab}$  es negativo si  $V_a > V_b$ .

c)  $W_{ab}$  es cero si  $V_a = V_b$ .

Por regla general el punto  $a$  se escoge muy alejado (de modo estricto en el infinito) de tal forma que  $V_a$  en estas condiciones es cero, lo que nos permite redefinir a (A.2.1).

$$V = V_b = W / q_0 \quad (\text{A.2.2})$$

El valor de (A.2.2) estará en función de la asignación arbitraria del valor cero a  $V_a$ , en la posición de referencia ( $a \rightarrow \infty$ ). Igualmente podría haberse asignado a este potencial de referencia cualquier otro valor (por ejemplo  $V_a = 100 \text{ v}$ ). De forma semejante se podría haber convenido en utilizar cualquier otro punto como posición de referencia a la tierra, asignándole un valor de potencial cero.

La fuerza que efectúa el trabajo  $W_{ab}$  es una fuerza conservativa (fuerzas para las que la ley de conservación de la energía mecánica se cumple), por lo que el trabajo efectuado por esta fuerza depende única y exclusivamente de la posición inicial del punto  $a$  y de la posición final punto  $b$  de la carga de prueba  $q_0$ , y no de los detalles acerca de como paso la carga  $q_0$  de la posición  $a$  a la posición  $b$ .

De la definición clásica de trabajo sabemos:

$$W = F * S \cos \theta \quad (\text{A.2.3})$$

como la fuerza  $F$  es paralela a la línea de movimiento de  $q_0$ , el ángulo  $\theta$  es cero ( $\cos 0 = 1$ ) y el trabajo  $W_{ab}$  es simplemente:

$$W = F * S \quad (\text{A.2.4})$$

Entonces el trabajo  $W_{ab}$  para mover la carga eléctrica de prueba  $q_0$  desde el punto  $a$  hasta el punto  $b$  es:

$$W_{ab} = F_e * S \quad (\text{A.2.5})$$

La fuerza eléctrica  $F_e$  escrita en terminos del campo eléctrico  $E$  es:

$$F_e = q_0 E \quad (A.2.6)$$

Combinando las ecuaciones (A.2.1), (A.2.5) y (A.2.6) resulta:

$$\begin{aligned} \Delta V &= V_b - V_a \\ &= W_{ab} / q_0 = F_e * S / q_0 \\ &= q_0 E * S / q_0 \\ &= E * S \end{aligned} \quad (A.2.7)$$

Si se produce un desplazamiento infinitesimal ( $dS$ ) de  $q_0$  sobre la trayectoria  $ab$ , el elemento de trabajo realizado es  $F * dS$ . Para determinar el trabajo total que lleva mover a  $q_0$  desde el punto  $a$  hasta el punto  $b$ , deben de sumarse (integrarse) todas las contribuciones al trabajo de todos los segmentos infinitesimales en los cuales se ha dividido la trayectoria  $ab$ . Entonces:

$$W_{ab} = \int_a^b F dS = - q_0 \int_a^b E dS \quad (A.2.8)$$

Combinando (A.2.1) con (A.2.7) resulta:

$$\Delta V_{ab} = V_b - V_a = - \int_a^b E dS \quad (A.2.9)$$

De acuerdo con esta última ecuación, el potencial eléctrico representa un campo escalar producido en cada punto del espacio. La ecuación (A.2.9) no define el valor absoluto del potencial eléctrico, solo especifica diferencias en el espacio. La utilidad de esta ecuación proviene del hecho de que solo involucra a las cargas que producen el campo eléctrico  $E$ , y no comprende a la carga  $q_0$  sobre la que actúa el campo eléctrico  $E$ . El campo eléctrico  $E$  es un campo vectorial que produce determinada distribución de cargas en todos los puntos del espacio.

La ecuación (A.2.9) recibe el nombre de integral de línea y puede ser tomada como cualquier trayectoria que une a los puntos  $a$  y  $b$

Es evidente que el concepto de diferencia de potencial tiene un sentido simple, ya que nos dicta que la diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico es igual al trabajo (tomado con signo negativo) realizado por las fuerzas del campo eléctrico  $E$  al desplazar a  $q_0$ . La diferencia de potencial entre dos puntos infinitamente próximos está dada por:

$$\lim_{a \rightarrow b} \Delta V = dV = - E dS \quad (A.2.10)$$

Resolviendo para  $E$  obtenemos:

$$- E = dV / dS \quad (A.2.11)$$

Donde,

$dV / dS$  es la derivada del potencial eléctrico según la dirección de  $S$  (del vector  $dS$ ).

Retomando el concepto de gradiente, esta derivada espacial de la cantidad escalar  $V$  coincide con las componentes de su gradiente ( $\nabla V$ ), según la dirección de  $S$ . Por consiguiente:

$$dV / dS = \text{grad } V = - E \quad (A.2.12)$$

Esta igualdad de las proyecciones de los vectores  $E$  y  $\nabla V$ , deben de cumplirse para cualquier dirección escogida de  $S$ , por lo tanto estos vectores deben de ser iguales entre sí. Entonces:

$$E = - \text{grad } V = - \nabla V \quad (A.2.12)$$

Esta ecuación establece la relación entre el potencial de campo eléctrico y el campo eléctrico. De esta ecuación puede obtenerse la correlación entre el potencial eléctrico y la

densidad de carga eléctrica, para esto hay que formar la divergencia ec. (A.1.5) de ambos miembros de la ecuación.

$$\text{div (grad } V) = - \text{div } E \quad (\text{A.2.13})$$

Retomando las ecuaciones (A.1.5) y (A.1.8) obtenemos:

$$\begin{aligned} \text{div (grad } V) &= \delta^2 V / \delta x^2 + \delta^2 V / \delta y^2 + \delta^2 V / \delta z^2 \\ - \text{div } E &= - [ \delta E_x / \delta x + \delta E_y / \delta y + \delta E_z / \delta z ] \end{aligned}$$

Finalmente.

$$\begin{aligned} \delta^2 V / \delta x^2 + \delta^2 V / \delta y^2 + \delta^2 V / \delta z^2 &= \\ &= - [ \delta E_x / \delta x + \delta E_y / \delta y + \delta E_z / \delta z ] \end{aligned} \quad (\text{A.2.14})$$

Concluyendo:

$$\begin{aligned} E_x &= \delta V (x, y, z) / \delta x \\ E_y &= \delta V (x, y, z) / \delta y \\ E_z &= \delta V (x, y, z) / \delta z \end{aligned} \quad (\text{A.2.15})$$

Toda distribución tridimensional continua de carga eléctrica puede caracterizarse mediante una densidad volumétrica de carga  $\rho(x, y, z)$ , que nos representa la cantidad de carga por unidad de volumen en la proximidad de cualquier punto. Para simplificar, solo se tomará en cuenta la distribución de densidad de carga  $\rho(x)$ , que esta en función solo de la coordenada  $x$ . Este tipo de distribución de carga es completamente simétrico con respecto al eje  $x$ , no puede dar lugar a campos eléctricos con componentes en los ejes  $y$  o  $z$ , es decir.  $E_y = \delta V / \delta y = 0$  y  $E_z = \delta V / \delta z = 0$ .

Representando esta situación figura (A.2.b) en una superficie gausiana rectangular de espesor  $dx$  y área frontal  $S_1$ .

De inmediato observamos que sobre las partes de las superficies normales a las direcciones (y,z), el campo E y los vectores normales a estas superficies son mutuamente perpendiculares. En consecuencia no puede haber contribución al flujo eléctrico por parte de estas superficies ya que ahí  $E_y * n = 0$  y  $E_z * n = 0$ .

En las dos superficies normales a la dirección del eje x, a las distancias X y X + dX, el campo eléctrico tiene las intensidades  $i_x E_x (X)$  e  $i_x E_x (X + dX)$  respectivamente. El vector unitario dirigido hacia afuera y normal a la superficie E(X) es  $n = -i_x$ , en tanto que en la superficie E(X + dX) es  $n = i_x$ . Entonces por la Ley de Gauss.

$$\begin{aligned} \oint_S E * n da &= \int_{S1} E_x (X + dX) da - \int_{S2} E_x (X) da \\ &= q_0 / \epsilon_0 \end{aligned} \quad (A.2.16)$$

En virtud de que  $E_x$  es independiente de las coordenadas (Y,Z) solo está en función del eje X, su valor es el mismo en todos los puntos de las superficies E (X) y E (X + dX) respectivamente, de manera que  $E_x (X)$  y  $E_x (X + dX)$  se pueden escribir fuera de las integrales de la ecuación (A.2.16)

$$\begin{aligned} \oint_S E * n da &= [ E_x (X + dX) - E_x (X) ] \\ &= q_0 / \epsilon_0 \end{aligned} \quad (A.2.17)$$

Ahora es posible expresar la carga eléctrica  $q_0$  en el interior de la superficie gaussiana, como el producto de la densidad de carga  $\rho(x)$  y el volumen A dX.

$$[ E_x (X + dX) - E_x (X) ] A = \rho(x) A dX / \epsilon_0$$

Dividiendo ambos miembros por dX resulta:

$$[ E_x (X + dX) - E_x (X) ] / dX = \rho(x) / \epsilon_0 \quad (A.2.18)$$

y de la definición de derivada.

$$d E_x / dX = \rho(x) / \epsilon_0 \quad (A.2.19)$$

Combinando (A.2.15) y (A.2.19) obtenemos.

$$d^2V / dX^2 = - \rho(x) / \epsilon_0 \quad (A.2.20)$$

donde.

$\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica del vacío, su valor es  $8.85418 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N m}^2$ .

A las ecuaciones (A.2.19) y (A.2.20) se les conoce como formas unidimensionales de la ECUACION DE POISSON.

La extensión de la ECUACION DE POISSON al espacio en los que el potencial eléctrico y la densidad de carga eléctrica dependen de las tres coordenadas cartesianas, tiene la forma:

$$\delta E_x / \delta x + \delta E_y / \delta y + \delta E_z / \delta z = \rho(x,y,z) / \epsilon_0 \quad (A.2.21)$$

$$\delta^2 V / \delta x^2 + \delta^2 V / \delta y^2 + \delta^2 V / \delta z^2 = - \rho(x,y,z) / \epsilon_0 \quad (A.2.22)$$

La importancia de esta ecuación radica en el hecho de que nos relaciona la densidad de carga en cualquier punto del espacio con el potencial electrostático en el mismo punto. Además son ecuaciones diferenciables que pueden resolverse siempre que se conozca la densidad de carga  $\rho(x,y,z)$ , para obtener el potencial eléctrico y la intensidad del campo eléctrico. Desde luego si de otro modo, se conoce el campo eléctrico  $E(E_x, E_y, E_z)$  ó  $V(x,y,z)$  se obtiene de inmediato la densidad de carga en un punto,  $\rho(x,y,z)$ .

La ECUACION DE POISSON de ninguna manera está limitada a sistemas en que hay una densidad de carga distribuida

continuamente en el espacio. Por ejemplo, cuando las distribuciones de carga están sobre la superficie conductora, la densidad volumétrica de carga  $\rho(x,y,z)$  es cero. En estas condiciones podemos reescribir la ecuación (A.2.22) de la siguiente forma:

$$\delta^2 V / \delta x^2 + \delta^2 V / \delta y^2 + \delta^2 V / \delta z^2 = 0 \quad (\text{A.2.23})$$

donde:

$\delta^2 V / \delta x^2$  es la segunda derivada parcial del potencial eléctrico con respecto al eje  $x^2$ .

$\delta^2 V / \delta y^2$  es la segunda derivada parcial del potencial eléctrico con respecto al eje  $y^2$ .

$\delta^2 V / \delta z^2$  es la segunda derivada parcial del potencial eléctrico con respecto al eje  $z^2$ .

Esta ecuación recibe el nombre de ECUACION DE LAPLACE, es una forma particular de la ECUACION DE POISSON. Para la solución de esta ecuación se utiliza como condición a la frontera el requisito de que la componente del campo eléctrico  $E$  tangente a la superficie se anule en cada punto de ella. En la solución que se obtiene, la componente del campo eléctrico  $E$  normal a la superficie conductora indica la densidad superficial de carga en cada punto. Esta es una forma sencilla de evaluar el campo eléctrico y la distribución de densidad de carga eléctrica.

Poisson demostró que para la distribución de un campo de potencial, la densidad de las fuentes es directamente proporcional al laplaciano del potencial eléctrico  $\nabla^2 V$ , donde  $V$  es el potencial eléctrico en un punto del campo y  $\nabla^2$  es el operador diferencial laplaciano. La ECUACION DE LAPLACE que es un caso particular de la ECUACION DE POISSON, nos describe el comportamiento del potencial eléctrico en una región del espacio libre de cargas. La descripción de esta ecuación posee una

interpretación geométrica basada en el hecho de que la segunda derivada de cualquier función respecto a una de las variables independientes determina la curvatura del gráfico de la función con respecto a dicha variable. En el presente trabajo el potencial eléctrico es función sólo de dos variables  $V = V(x,y)$ , sabemos que en estas condiciones la ECUACION DE LAPLACE esta dada por:

$$\delta^2 V / \delta x^2 + \delta^2 V / \delta y^2 = 0 \quad (A.2.24)$$

Considerando un punto  $(x,y)$  en la región del macroelectrodo activo en donde (A.2.24) es válida, sólo existen dos formas de que  $V(x,y)$  cumpla con la ECUACION DE LAPLACE en ese punto:

La primera es que las dos derivadas sean cero.

La segunda es que una derivada posea un valor positivo y la otra un valor negativo de igual valor absoluto.

Para esta última situación la solución a la ECUACION DE LAPLACE en el punto en cuestión, la superficie  $V(x,y)$  localmente es como una silla de montar. Puede ser cóncava hacia abajo (polaridad positiva, fuente de potencial eléctrico) en la dirección del eje  $(x)$  y cóncava hacia arriba (polaridad negativa, sumidero de potencial eléctrico) en la dirección del eje  $(y)$  o viceversa.

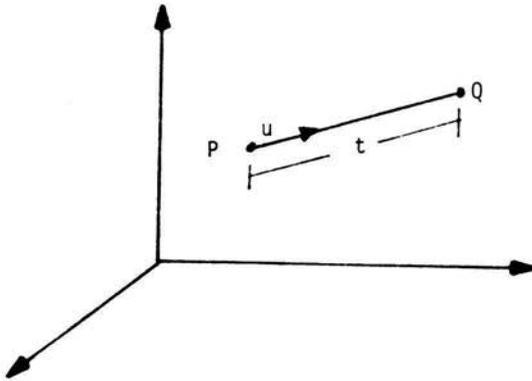


Fig. A.1.a. PRIMER PASO PARA EL CALCULO DE LA RAZON DE CAMBIO DE  $f(x, y, z)$  EN LA DIRECCION DEL VECTOR UNITARIO  $u$

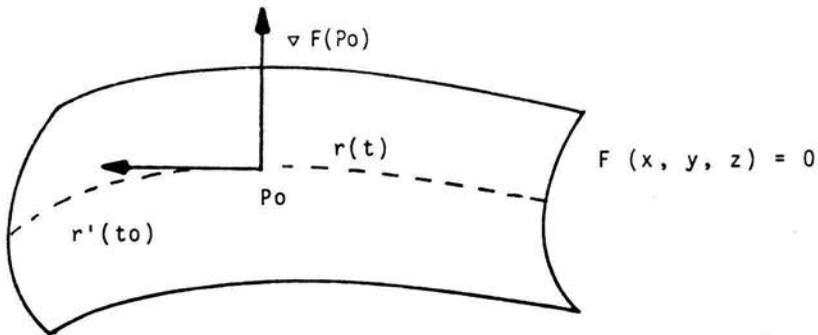


Fig. A.1.b. EL VECTOR GRADIENTE  $\nabla F$  ES NORMAL A TODA CURVA DE LA SUPERFICIE  $F(x, y, z) = 0$  -

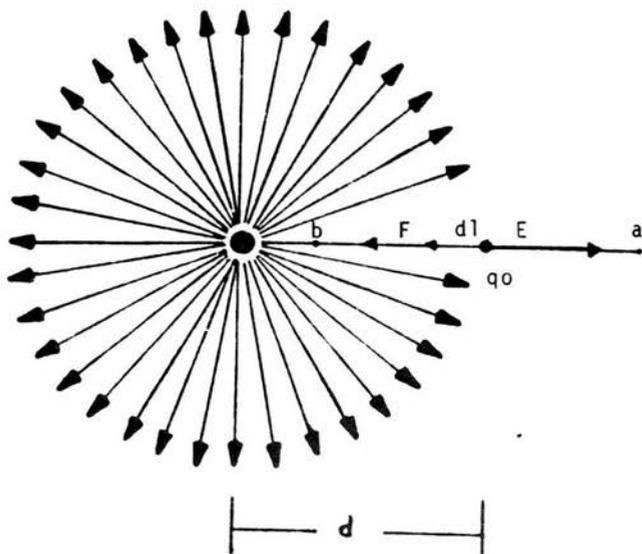


Fig. A.2.a. DEBIDO A LA ACCION DE LA FUERZA F LA CARGA DE PRUEBA  $q_0$  SE MUEVE DESDE EL PUNTO a HASTA EL PUNTO b, SE OBSERVA QUE  $F = -QE$

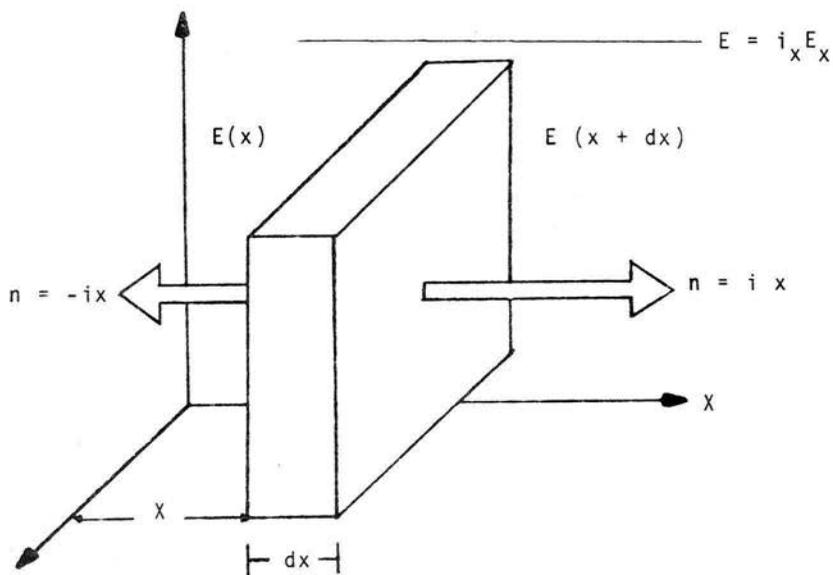


Fig. A.2.b. LA DISTRIBUCION DE DENSIDAD CARGA  $f(x)$  QUE ESTA EN FUNCION SOLO DE LA COORDENADA  $x$ . ESTE TIPO DE DISTRIBUCION DE CARGA ES COMPLETAMENTE SIMETRICO CON RESPECTO AL EJE  $x$ , NO PUEDE DAR LUGAR A CAMPOS ELECTRICOS CON COMPONENTES  $z$  o  $y$  ( $E_y = E_z = 0$ ).

## REFERENCIAS. (ARTICULOS)

- 1.- American Electroencephalographic Society.  
Guidelines for Clinical Evoked Potential Studies.  
J. of Clin. Neurophysio. 1(1):3-53. (1984)
- 2.- Blumhardt, L. D., Barret, G., Halliday, A. M.  
The asymmetrical visual evoked potential to pattern reversal in one half field and its significance for the analysis of visual field defects.  
British. J. Ophtal. 61:454-461.(1977)
- 3.- Blumhardt, L. D., Barret, G., Halliday, A .M. and Kriss, A.  
The effects of experimental scotomata on the ipsilateral and contralateral responses to patten-reversal in one half-field.  
Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 45:376-392. (1978).
- 4.- Blumhardt, L. D. and Halliday, A. M.  
Hemisphere contributions to the composition of the Pattern-evoked potentials waveform.  
Exp.Brain Research, 36:53-69. (1979).
- 5.- Clement, R. A., Flanagan, J. G., and Harding, G. F.  
Source derivation of the visual evoked response to pattern reversal stimulation.  
Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 62:74-76. (1985).
- 6.- Graham, F. A., Harding, B. J. and Armstrong, R. A.  
Topographic mapping and source localization of the pattern reversal visual evoked magnetic response.  
Brain topography, vol. 4 Number 1, (1991).

- 7.- Hjorth's, B.  
An on-line transformation of EEG scalp potentials into orthogonal source derivation.  
Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 39:526-530. (1975).
- 8.- Kavanagh, R. N., Et al.  
Evaluation of methods for the three dimensional localization of electrical sources in the human brain.  
IEEE Transaction in Biomedical Engineering. BME-25: 421-429. (1978).
- 9.- MacKay, D. M.  
Source density analysis of scalp potentials during evaluated action.  
I. Coronal distribution.  
Exp. Brain Res. 54:73-85. (1984).
- 10.- MacKay., D. M.  
Source density analysis of scalp potentials during evaluated action.  
II. Lateral distribution.  
Exp. Brain Res. 54:86-94. (1984).
- 11.- MacKay, D. M.  
Source-density mapping of human visual receptive fields using scalp electrodes.  
Exp. Brain Res. 54:579-581. (1984).
- 12.- Srebro, R.  
Localization of visually evoked cortical activity in humans.  
J. Physiol. 360:233-246. (1985).

- 13.- Srebro, R.  
Localization of cortical activity associated with  
visual recognition in humans.  
J. Physiol. 360:24-259. (1985).
- 14.- Srebro, R.  
Realistic modeling of VEP topography.  
Vision Res. vol. 30: 1001-1009. (1989).
- 15.- Thickbroom, G. W., Mastaglia, F. L., Carroll, W. N.  
and Davies, H. D.  
Source derivation: Application to topographic  
mapping of visual evoked.  
Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 59:279-285.  
(1984).
- 16.- Wallin, S. and Stalberg, E.  
Source derivation in clinical routine EEG.  
Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 50:282-292.  
(1980).

**REFERENCIAS. (LIBROS).**

- 17.- Callaway, E., Tueting, P. and Koslow, S. M. (Eds).  
Event-related brain potentials in man.  
Academic Press. N. Y. (1978).
- 18.- Feynman, R. P.  
Lectures on physics, vol 2.  
Addison-Wesley. (1963).

- 19.- Harmony, T.  
Functional Neuroscience, vol 3.  
Hillsdale, N.J.: Lawrence Erlbaum Associated.  
(1984).
- 20.- Jackson, J. D.  
Classical Electrodynamics.  
John Wiley and Sons. N. Y. (1975).
- 21.- Lass, H.  
Vector and tensor analysis.  
McGraw-Hill. (1969).
- 22.- Maurer, K., Lowitzsch, K. and Stöhr, M.  
Evoked Potentials.  
Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart; Germany (1988).
- 23.- Nuñez, P. L.  
Electric fields of the brain.  
Oxford University Press. (1981).
- 24.- Regan, D.  
Human Brain Electrophysiology.  
Elsevier.(1987).
- 25.- Van Dijk, B. W and Henk, Spekrijse.  
localization of electric and magnetic sources of  
brain.  
Visual Evoked Potentials. Elsevier Science  
Publishers B. V. (Biomedical Division). (1990).