



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ciencias y Sistemas

**PROPUESTA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE
ELECTROENCEFALOGRAFÍA COMPUTARIZADA Y AUTODIAGNÓSTICO
BASADO EN RECONOCIMIENTO DE PATRONES**

EDGAR ROBERTO PINILLOS MONTENEGRO
ASESORADO POR: ING. JORGE ARMÍN MAZARIEGOS RABANALES

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2003

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	2
GLOSARIO	10
RESUMEN	18
OBJETIVOS	20
General	20
Específicos	20
INTRODUCCIÓN	22
1 EL CEREBRO: UN SISTEMA	24
1.1. Antecedentes del estudio del cerebro	24
1.1.1 Primeros estudios sobre el funcionamiento del cerebro	24
1.1.2 Primeros registros de la actividad cerebral	25
1.2 Los principios y avance de la EEG	26
1.3 La EEG en nuestros días	29
1.4 Últimos avances en la investigación de la EEG	30
2 ANATOMÍA DEL SISTEMA NERVIOSO Y NEUROFISIOLOGÍA:	
ENTENDIENDO AL CEREBRO	32
2.1 Anatomía del encéfalo	32
2.1.1 Cerebelo	33
2.1.2 Cerebro	33
2.1.3 Las neuronas	33
2.1.4 La corteza cerebral o córtex	34
1.2. Neurofisiología. Funcionamiento del sistema	36
2.1.5 Electro génesis cerebral	37
2.2.1.1 Potencial transmembrana	39
2.2.1.2 Electro génesis cortical	42
2.2.1.3 Sincronización de la actividad celular	43

2.2.1.4	Ondas cerebrales	44
1.3.	Desperfectos en el sistema.....	46
2.1.6	Alteraciones difusas y bilaterales.....	48
2.2.1.5	Aspectos electroencefalográficos	48
3.	BIOINGENIERÍA: EL VÍNCULO CON LA TECNOLOGÍA	54
3.1	Electroencefalografía común	54
3.2	Captación del EEG	56
3.3	Propiedades de los electrodos.....	57
3.3.1	Potencial del electrodo	57
3.3.2	Electrodos impolarizables.....	58
3.4	Tipos de electrodos.....	58
3.4.1	Electrodos de superficie	59
3.2.1.1	Electrodos adheridos.....	59
3.2.1.2	Electrodos de contacto	60
3.4.2	Electrodos especiales (Basales).....	60
3.4.2.1	Electrodo faríngeo	61
3.4.2.2	Electrodo timpánico	61
3.4.2.3	Electrodo esfenoideal	61
3.4.3	Electrodos neuroquirúrgicos	62
3.4.3.1	Electrodos duros	62
3.4.3.2	Electrodos corticales.....	62
3.4.3.3	Electrodos profundos (intracerebrales).....	63
3.5	Sistemas de posicionamiento de electrodos	63
3.5.1	El método internacional de posicionamiento “10 – 20”	64
3.6	Montajes de un EEG.....	68
3.6.1	Registros monopolares o referenciales	69
3.6.2	Registros bipolares	71
3.6.3	Recomendaciones para el diseño de montajes	73
3.7	El electroencefalógrafo	74

3.7.1	El canal electroencefalográfico.....	74
4	DISEÑO DEL MODELO: GESTIÓN DEL HARDWARE	78
4.1	Modelo global del sistema. El viaje de un electrón	80
4.1.1	Señales biomédicas	84
4.1.2	Transductores de entrada	86
4.1.3	El canal electroencefalográfico.....	86
4.1.3.1	Pre-amplificación, amplificación y amplificadores	87
4.1.3.2	Arquitectura de la amplificación en el canal electroencefalográfico	92
4.1.3.3	Sensibilidad y sus controles	93
4.1.3.4	Impedancia de entrada.....	94
4.1.3.5	Respuesta de frecuencia y controles de filtrado de señal	95
4.1.4	Procesamiento digital de señales.....	97
4.1.4.1	Convertidor analógico a digital	101
4.1.4.2	Procesadores DSP.....	108
4.1.4.3	Procesamiento de la señales en una PC	110
4.1.5	Análisis de señales en hardware	111
5	DISEÑO DEL MODELO: GESTIÓN DE SOFTWARE	114
5.1	Diseño de la hoja de trabajo para EEG	114
5.1.1	Estudios.....	115
5.1.2	Examen	116
5.1.3	Herramientas disponibles	117
5.1.4	La barra de herramientas de montajes.....	119
5.1.5	Región de trazado o de examen	121
5.2	Estructuras de almacenamiento temporal	122
5.3	La utilización de árboles para acceso a datos en memoria	123
5.4	Estructuras de almacenamiento permanente	125
5.4.1	Diseño de las estructuras	125
5.5	Procesos.....	127

5.5.1	Herramientas de análisis y adaptación de componentes genéricos	127
5.5.2	Controladores para los dispositivos	128
5.1.1.1	Interfaz del controlador	129
5.1.1.2	Comunicación con el dispositivo.....	129
5.6	Diagnóstico y reconocimiento de patrones	132
5.6.1	Reconocimiento de patrones	132
5.1.1.3	Relación con redes neuronales	133
5.6.2	Conceptos principales del reconocimiento de patrones.....	134
5.6.3	Otras aplicaciones médicas	137
5.6.3.1	Reconocimiento de patrones por medio de la transformada de Fourier	138
6	IMPACTO DEL PROYECTO	140
6.1	Impacto social	140
6.2	Impacto tecnológico	143
6.3	Impacto educativo	144
6.4	Impacto financiero de apoyo	146
7	CONCLUSIONES.....	149
8	RECOMENDACIONES	151
9	BIBLIOGRAFÍA.....	153

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Diagnóstico por medio de imágenes.	28
2	Empresa latinoamericana que ofrece productos de alta tecnología para el diagnóstico médico.	30
3	El encéfalo, un sistema.	32
4	Diagrama de la anatomía de una neurona y sus partes.	33
5	Constitución de las capas celulares de la neocorteza.	39
6	Ondas cerebrales alfa.	44
7	Ondas cerebrales beta.	45
8	Ondas cerebrales teta.	45
9	Ondas cerebrales delta.	46
10	Ondas cerebrales mu.	46
11	EEG, gráfico de voltaje vrs tiempo.	55
12	Punto frontal polar (Fp), punto occipital (O)	64
13	Fz, punto frontal, Cz, punto central, Pz, punto parietal.	65
14	Medición coronal lateral. Electrodo T3 y T4.	66
15	Electrodos C3, C4	67
16	Electrodos F3, F4	67
17	Ubicación de los electrodos P3, P4.	67
18	Ubicación de los electrodos, F7, F8, T5, T6, FP1, FP2, O1, O2.	67
19	Situación de los electrodos A1 y A2.	68
20	Montaje para un registro monopolar.	69
21	Esquema del sistema Wilson en el registro de EEG.	70

22	Montaje para registro bipolar.	71
23	Montaje longitudinal bipolar y transversal bipolar.	72
24	El canal electroencefalográfico y sus partes.	75
25	Disposición de las entradas del canal electroencefalográfico.	76
26	Esquema de nivel 0 del sistema EEG.	80
27	Diagrama de bloques que representa las etapas básicas de un modelo de EEG.	83
28	Arquitectura del canal electroencefalográfico.	87
29	Amplificación.	88
30	Esquema de un Diodo.	89
31	Esquema de un Triodo.	90
32	Un Amplificador básico.	91
33	Un Amplificador construido con transistores.	92
34	Amplificador utilizado en el canal electroencefalográfico.	93
35	Introducción de ruido en una señal captada por un micrófono.	96
36	Ejemplo de captura de una señal del mundo real.	99
37	Sistema de DSP genérico.	100
38	Conversión analógico digital.	101
39	Convertidor analógico digital y sus partes.	102
40	Muestreo.	105
41	Casos de cuantización.	106
42	Diagrama de un procesador DSP genérico.	109
43	Multiplicación en paralelo.	110
44	Diseño de la pantalla de la hoja de trabajo.	115
45	Relación entre clases base del sistema.	116
46	Captura de una seña RS232 para análisis.	121

47	Árbol binario.	123
48	Estructuras de almacenamiento permanente.	126
49	Diagrama de composición de un controlador genérico.	128

TABLAS

TABLAS

I	Materia y potencial de electrodos	57
II	Montajes recomendados para el EEG. LB, montaje longitudinal; TB, montaje transversal bipolar, R, montaje referencial.	73
III	Etapas del modelo del sistema y dispositivos asociados a cada etapa.	84
IV	Tipos de señales biomédicas.	84
V	Aplicaciones del DSP.	100

GLOSARIO

Active X

Es toda una tecnología desarrollada por Microsoft, pero es mas conocida por su implementación en controles *ActiveX*, que son objetos y controles, desarrollados específicamente para una aplicación o provistos por terceros, que se pueden insertar en una página Web o una aplicación para Windows, utilizando todas sus capacidades.

Actividad sináptica

Actividad generada en la región que rodea el punto de contacto entre dos neuronas o entre una neurona y un órgano efector, a través de la cual son transmitidos los impulsos nerviosos por la acción de un neurotransmisor, como la acetilcolina o la noradrenalina. Las sinapsis están polarizadas de forma que, normalmente, los impulsos nerviosos solamente viajan en una dirección; también están sometidos a la fatiga, y son sensibles al déficit de oxígeno, los anestésicos y otros agentes químicos. Algunos tipos de sinapsis son: sinapsis axonoaxónica, sinapsis axonodendrítica, sinapsis axonodendrosomática, sinapsis axonosomática y sinapsis dendrodendrítica.

Amplificador

Aparato o conjunto de ellos, mediante el cual, utilizando energía externa, se aumenta la amplitud o intensidad de un fenómeno físico. Es un elemento

activo con una alta razón de ganancia diseñado para emplearse con otros elementos de circuitos electrónicos para efectuar una operación de procesamientos de señales específica.

Análisis multivariable Es una serie de modelos estadístico-matemáticos en su concepto muy parecidos a la regresión lineal. El análisis multivariable comprende varios modelos entre los cuales tenemos, el análisis de componentes principales, el análisis discriminante, el análisis factorial, el análisis de correlación canónica y el de conglomerados. Todos estos análisis son variaciones de un mismo tema en el que el objetivo principal es presentar diferentes desgloses de las variancias de un conjunto de datos y someterlos a una serie de pruebas estadísticas para determinar el grado de asociación entre esas variancias y, por tanto, entre las variables.

Área de asociación Cualquier parte de la corteza cerebral que participa en la integración de la información sensorial.

CMOS Abreviatura de *complementary metal oxide semiconductor*. CMOS es un tipo de semiconductor ampliamente utilizado. Para su fabricación se utilizan ambas tecnologías de transistores NMOS (polaridad negativa) y PMOS (polaridad positiva). Solo uno de los tipos de circuito esta activo a la vez, los chips CMOS requieren menos energía que los chips

que utilizan un solo tipo de transistor. Esto los hace atractivos para utilizar en dispositivos que son alimentados con baterías, como computadoras portátiles. Las computadoras personales también contienen una memoria CMOS alimentada con batería utilizada para guardar la fecha, hora, y parámetros de configuración del sistema.

COM *Common object model*, Modelo de Objetos Distribuidos.

Corrientes parásitas Relativo a las corrientes eléctricas que van conjuntamente con una señal eléctrica pero que no pertenecen a ella. A menudo generadas por el ruido externo al que están sujetos los dispositivos.

Despolarización Acción y efecto de despolarizar o de impedir la polarización.

DLL *Dynamic Link Library*, Librería de enlace dinámico.

Dx Abreviatura de diagnóstico.

Electrocardiografía Inscripción de los movimientos del corazón con auxilio de un galvanómetro de alambre muy sensible. Dichas inscripciones indican por

sus variaciones, si es o no normal el funcionamiento del corazón.

ENIAC

Fue la primera computadora fabricada con componentes electrónicos digitales, utilizada para la segunda guerra mundial para estudios de balística.

Etiología

Parte de la medicina que tiene por objeto estudiar las causas de las enfermedades.

Excitabilidad

Propiedad de una célula que le permite reaccionar ante una irritación o estímulo, como la reacción de un nervio o de las células miocárdicas al estímulo adecuado.

Filtro pasabajas

Filtro que idealmente dejara pasar todas las frecuencias hasta la frecuencia de corte y rechazara perfectamente las que estén por encima de esta.

Interrupción

Señal eléctrica aplicada a la entrada de un microprocesador para generar un requerimiento de atención originado por la necesidad de procesamiento de un dispositivo periférico o proceso residente en memoria.

Iones

Átomo o grupo de átomos que, por haber cedido o ganado electrones, presentan carga eléctrica.

JAVA BEAN

Es un componente de software reutilizable que trabaja con *Java*. Mas específicamente, un *java bean* es un componente de software reutilizable que puede ser visualizado y manipulado en herramientas de desarrollo de software.

Nemónicos

Sistema de entrenamiento de la memoria mediante la vinculación de un concepto o imagen nueva con una establecida previamente en la memoria, como la asociación de los números de la combinación de una cerradura con un cumpleaños o con un número de teléfono.

Nervios motores

Nervio formado exclusivamente por fibras motoras.

Nervios sensitivos

Nervio aferente o centrípeto, trasmisor de sensaciones.

Osciloscopio

Aparato que muestra una representación visual de las variaciones eléctricas en la pantalla fluorescente de un tubo de rayos catódicos. La representación gráfica se produce por un rayo de electrones centrados o dirigidos por un campo magnético que está influido de forma cíclica por una fuente, como una corriente amplificada producida por las contracciones cardíacas.

Patología

Estudio de las características, causas y efectos de las enfermedades, tal y como se observan en la estructura y función del cuerpo. La

patología celular es el estudio de los cambios celulares de la enfermedad. La patología clínica es el estudio de la enfermedad mediante la utilización de pruebas y métodos de laboratorio.

Polarización

Voltaje aplicado a un dispositivo electrónico, como un tubo de vacío o un transistor, para controlar los límites operantes.

Polarización dinámica de las neuronas

Esta ley indica que las corrientes, que conducen información bioeléctrica, en las células nerviosas (neuronas) fluyen desde las ramificaciones dendríticas hacia el cuerpo de la neurona, donde se procesa dicha información, y de éste hacia las ramificaciones terminales o axones, para contactar (sinapsis) con otra u otras neuronas.

Reflejos motores

Respuesta a un estímulo que provoca movimiento, respecto al aparato corporal implicado en el movimiento o a las funciones cerebrales que dirigen las actividades voluntarias. reflejo relativo o perteneciente al músculo, nervio o centro cerebral que produce o facilita el movimiento.

Rostal

Sección imaginaria ubicada sobre la región craneana para localizar algunas secciones del sistema nervioso, cercanas al hipotálamo.

Ruido blanco

Técnicamente un ruido es una combinación de múltiples tonos puros de distintas frecuencias y en distintas fases, elegidas unas y otras al azar. Generalmente se seleccionan los tonos de un ruido entre una frecuencia mínima y una máxima, con lo que éstas definen la "banda de frecuencias" del ruido. El ruido tiene además una frecuencia media. Un ruido blanco es un ruido con la misma energía (amplitud de onda) en todos los tonos que lo componen. Los ruidos blancos utilizados en la experimentación psicológica.

Sagital anterior

Relativo a una línea imaginaria que se extiende de delante atrás en la línea media del cuerpo o de una parte del cuerpo.

Semiología

Termino propuesto por el filólogo suizo Fernando de Saussure para designar la ciencia que estudiase la vida y el uso de los signos en el seno de la vida social. Esta ciencia formaría parte de la psicología social y comprendería la lingüística, ciencia de los signos constitutivos del lenguaje.

Somático

Dicese del síntoma material, físico o químico, que depende de una alteración de los sólidos o líquidos del organismo, para diferenciarlo del

síntoma funcional.

Somatotopico(a)

Perteneiente o relativo a regiones particulares del cuerpo; que describe la organización del área motora del cerebro, con el control del movimiento de las diferentes partes del cuerpo centrado en regiones específicas de la corteza.

Thread

Hebra o hilo de procesamiento de información que en conjunto forma parte de un proceso principal que tiene presencia en la memoria principal y el procesador de un computador. Sub-proceso.

Transistor

Dispositivo electrónico de usos similares al tubo o válvula electrónica. Dispositivo semiconductor activo con tres o más terminales.

Tubo al vacío o tubo de vacío

Tubo electrónico evacuado de forma que sus características eléctricas no se afectan por la presencia de gas o vapor residuales

RESUMEN

Todo el análisis y aspectos fundamentales del diseño que se presentan en este proyecto, están plasmados en los seis capítulos que posee la investigación, y que a continuación se describen.

El capítulo uno trata de los inicios y la evolución de los estudios del cerebro y el sistema nervioso en general. Expone una serie de eventos a lo largo del tiempo en donde se fueron presentando oportunidades para realizar pruebas sobre el funcionamiento del cerebro humano y posibles formas de diagnosticar sus desperfectos. Todo esto con el fin de presentar al cerebro humano y su funcionamiento desde sus inicios como un modelo natural de un sistema.

El dos, trata específicamente del funcionamiento del cerebro y el sistema nervioso en general. Presenta una serie de conceptos y postulados que serán de mucha utilidad en los capítulos siguientes así como una descripción medianamente completa de la anatomía y fisiología del sistema.

Con base en lo expuesto en el capítulo anterior, se realiza el vínculo con la tecnología, aplicándola al diagnóstico de desperfectos en el sistema. Esto se logra mostrando la forma en que han evolucionado los métodos de diagnóstico desde la encefalografía común hacia la encefalografía computarizada presentado brevemente aspectos técnicos de cada una de las dos etapas, para continuar en el capítulo siguiente en la formulación de las especificaciones del modelo de hardware y en el capítulo cinco con la formulación del modelo de software.

Esta parte de la investigación, aborda todos los aspectos técnicos y científicos que desde nuestro punto de vista deben ser tomados en cuenta a la hora de implementar un sistema de electroencefalografía computarizado y con características de hardware no solo para el procesamiento de la señal digital sino también para el análisis de la misma, punto que también se trata al final del capítulo siguiente.

En el penúltimo capítulo, presenta la especificación del modelo de software indicando los pasos básicos a seguir y los lineamientos generales para un análisis y diseño formal de la interfaz de software que se necesita para presentar la información captada al implementar lo expuesto en el capítulo anterior.

El último capítulo muestra el impacto de un proyecto de esta magnitud en las áreas que se consideran importantes para nuestro país, es decir el aspecto social, tecnológico y educativo de la investigación y un área que trata del posible financiamiento del proyecto.

Cada uno de los capítulos es vinculado y orientado al área sistémica logrando un “balance” entre cada uno de ellos y dando auge al enfoque sistémico.

Una de las intenciones del presente trabajo es demostrar que la evolución de la tecnología puede ser aplicada en cualquier área de la vida cotidiana y que debe orientarse más a la preservación de la vida que a la destrucción de la misma, simplemente apoyando a los sistemas educativos superiores a crear una cultura de preservación y no de destrucción.

OBJETIVOS

General

Constituirse como documento clave para la investigación sobre biotecnología, aportando un diseño sencillo pero funcional y de bajo costo, con innovaciones tecnológicas, con toda la especificación técnica necesaria para desarrollarlo y a la vez mostrando el impacto que el mismo puede llegar a tener en nuestra sociedad.

Específicos

1. Mostrar el impacto en la sociedad Guatemalteca de la existencia y la no-existencia de un método eficiente de diagnóstico y tratamiento de enfermedades neurológicas.
2. Introducir cambios al nivel de “Educación Superior” que mejoren el diagnóstico de enfermedades en general y específicamente las enfermedades que alterna el funcionamiento del sistema nervioso.
3. Cubrir la necesidad latente del uso del enfoque sistémico y la tecnología en el campo del diagnóstico médico, introduciendo automatización a los sistemas ya existentes relacionados con la salud.
4. Extraer la mayor cantidad de información posible de una señal bioeléctrica emitida por el cerebro humano.
5. Crear un modelo, que igualmente pueda ser desarrollado por completo o

utilizando productos genéricos adquiridos en el mercado, adaptándolos al mismo.

6. Realizar el tratamiento de las señales en tiempo real.
7. Proveer a los sistemas diagnósticos existentes las facilidades que ofrecen los sistemas computacionales, en cuanto a escalabilidad, integridad, seguridad, eficiencia en procesos de análisis.
8. Introducir al mundo del diagnóstico médico, las bondades de la inteligencia artificial, al plantear un modelo que no solo provea de automatización de aspectos técnicos sino también en un nivel profesional o experto donde el mismo sistema sea capaz de sugerir un diagnóstico mediante la técnica específica del enfoque clásico o tradicional del reconocimiento de patrones.

INTRODUCCIÓN

En estos días la necesidad de detección de enfermedades ha dado un paso importante en la evolución de la tecnología, hemos llegado a lo que se ha llamado “la era de la información”, lo cual indica que en nuestros días cualquier innovación está relacionada con la tecnología de información. Esta es la razón por la que hemos dicho que se ha dado un paso importante en el diagnóstico y detección de enfermedades, pues el presente proyecto pretende realizar el vínculo entre la tecnología y la medicina, diseñando un sistema capaz de realizar diagnóstico médico, esta vez con un prototipo en la electroencefalografía pero aplicable a muchos más exámenes diagnósticos que se pretende que a partir de este proyecto sean impulsados.

En pocas palabras, todo lo que se ha presentado en esta investigación pretende ser el inicio del desarrollo de la bioingeniería en muchos aspectos de nuestro medio, es así como al final se trata de orientar el trabajo hacia líneas específicas de impacto que presentan una estimación de los resultados que se obtendrían al lograr incursionar a la sociedad guatemalteca (en sus áreas de educación, salud y desarrollo) en esta etapa de la era de la información, como un país pionero en el desarrollo de tecnología aplicable a los problemas sociales que existen actualmente.

Para mostrar de forma más específica las dimensiones del proyecto podemos realizar un ejercicio sencillo. Tal y como sucede en cualquier sistema actualmente conocido que interactúa con el medio externo, digamos un micrófono y una consola de sonido donde se puede tratar la voz para mejorarla, utiliza exactamente los mismos principios de tecnología que hoy utilizamos en esta investigación para realizar el tratamiento de señales del mundo

real que proveen información importante y de mucha aplicación. Es así como se ha ideado un sistema capaz, no solo de producir un gran número de exámenes de una misma fuente y en una herramienta tan conveniente como el computador, sino esta vez, gracias a los avances de la ciencia informática es posible utilizar las técnicas de inteligencia artificial “Reconocimiento de Patrones” para realizar autodiagnósticos sobre los estudios realizados por expertos. El presente diseño, pretende tomar una señal bioeléctrica (del cerebro) presentarla como un electroencefalograma en una pantalla de computador y además generar un conjunto de resultados sugeridos, basados en las patologías que un sistema informático es capaz de aprender con técnicas modernas de inteligencia artificial.

El diseño pretende presentar toda la especificación técnica y científica necesaria para la implementación del proyecto, aportando características importantes como, controles de un canal electroencefalográfico vía software, todas las características que presentan los sistemas computacionales para el manejo de información (escalabilidad, seguridad, disponibilidad, etc.), además de lo que se ha considerado como el aporte más grande, el autodiagnóstico, tema explicado anteriormente.

1 EL CEREBRO: UN SISTEMA

Tal y como sucede en los sistemas artificiales, creados por el hombre, el cerebro está totalmente orientado a lo que se conoce como un sistema. Al parecer al ser diseñado fue planeado tal como si fuera a funcionar como el modelo de todos los sistemas que el hombre trataría de construir en el futuro. A continuación se presenta información que nos proporcionará un marco teórico de lo que será esta investigación.

Antecedentes del estudio del cerebro

Como una reseña histórica a la electroencefalografía (de aquí en adelante se abreviará EEG) se procederá a exponer en forma breve la manera en que se venían desarrollando los sistemas de instrumentación biomédica.

1.1.1 Primeros estudios sobre el funcionamiento del cerebro

Todo inició durante una guerra que brindó la oportunidad de explorar por primera vez el cerebro humano. En 1870 dos médicos militares del ejército de Prusia apellidados Fritsch y Hitzig, observaron que al estimular, a través de corriente galvànica, determinadas regiones laterales de cerebros descubiertos (de algunas bajas de la guerra de Sedán) se producían movimientos en el lado opuesto del cuerpo. Cinco años después el fisiólogo británico Richard Caton confirmó que el cerebro es capaz de producir corrientes microelectrónicas con las que se comunica con los demás sistemas a través de los nervios. Otro científico apellidado Ferrier, siguiendo la misma línea de investigación,

experimentó con la corriente generada por inducción o corriente faràdica. Como conclusión de estas investigaciones a finales del siglo XIX en Europa ya se tenía la certeza de que el cerebro de los animales poseía propiedades eléctricas comparables a las encontradas en los nervios y en los músculos.

1.1.2 Primeros registros de la actividad cerebral

En 1913 Prawdziej-Neminski registró lo que llamó electrocerebrograma de un perro, siendo el primero en intentar clasificar semejantes observaciones. Hasta este punto los experimentos se realizaban solamente sobre cerebros descubiertos, debido a que al ser los impulsos eléctricos muy pequeños y sin procedimientos de amplificación, era imposible registrar dichos impulsos en la región craneana exterior aunque se sospechara su existencia. Fue en 1928 cuando Hans Berger inventó un método que prometía una investigación de la actividad eléctrica cerebral, descubriendo lo que se conoció como “Ritmo de Berger”. Sin embargo debido a su falta de conocimiento técnico sus estudios fueron tomados en cuenta unos años después. Mientras tanto en el laboratorio central de Patología del Hospital Maudsley de Londres, en 1929, se discutían las posibilidades de la electroencefalografía clínica por primera vez. A pesar de que estos investigadores intentaron obtener registro del Ritmo de Berger con amplificadores y un galvanómetro seguía sin tomarse en cuenta el estudio del cerebro y los estudios de Berger. Fue hasta el año 1934 cuando a raíz de una demostración pública en Gran Bretaña en una Sociedad de Fisiología, en Cambridge, que Adrian y Matthews verificaron por primera vez el Ritmo de Berger. Berger, utilizando las mejoras introducidas por Adrian, siguió avanzando hasta donde le permitía su técnica defectuosa, observando por ejemplo que cuando el sujeto abría los ojos o resolvía algún problema mentalmente se alteraba el ritmo amplio y regular. Esto fue posteriormente

verificado por Adrian y Matthews quienes al tener mejores fundamentos científicos y mejores técnicas avanzaron incluso mucho más, demostrando que el ritmo regular y amplio de diez ciclos por segundo surgía de las áreas visuales de asociación y no de todo el cerebro.

1.2 Los principios y avance de la EEG

Posteriormente la electropatología del cerebro creció en importancia, confirmándose las predicciones de Golla sobre las alteraciones de las oscilaciones rítmicas de las señales emitidas por el cerebro en las enfermedades. Se avanzó mucho en este campo, comenzando a interesar, entre los investigadores del EEG, el estudio de la epilepsia y otras enfermedades mentales, poniéndose en relieve la complejidad del tema y la imposibilidad de aislamiento de funciones simples, siendo necesario estudiar al cerebro como un órgano total. A partir de estos antecedentes y estudios preliminares se fue perfeccionando la técnica y la ciencia, poco a poco puliendo los prototipos hasta llegar a conocer otros aspectos del EEG tal como lo conocemos hoy.

Sin embargo, estos avances no se detuvieron cuando se consolidó el modelo de EEG común. En períodos contemporáneos se ha seguido avanzando en estos estudios y poco a poco mientras la tecnología, en especial los sistemas electrónicos, proveen a las demás ciencias las herramientas necesarias para seguir adelante en la perfección de sus aplicaciones, los sistemas de diagnóstico como la EEG no son la excepción. Con el advenimiento de los primeros componentes electrónicos analógicos como los tubos al vacío y transistores, las ciencias médicas se han visto beneficiadas al facilitar el tratamiento y manejo de señales que producen métricas y parámetros que se

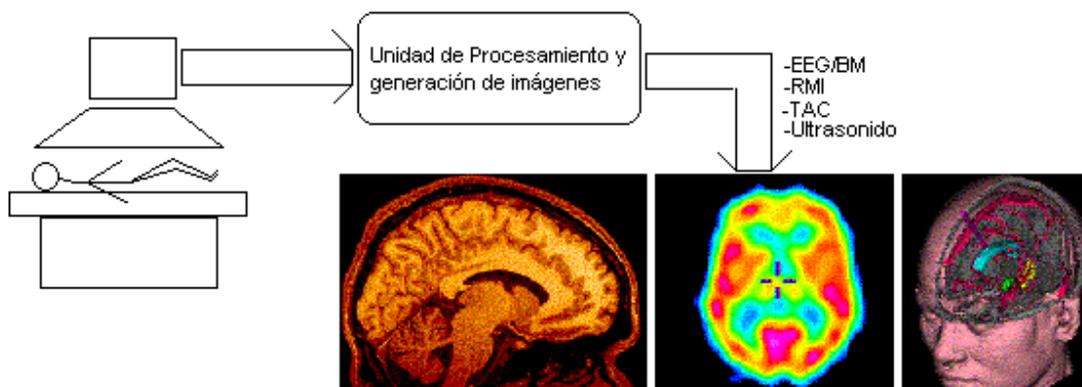
pueden utilizar como referencias para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades que de otra forma serían muy difíciles de tratar.

Como se mencionó anteriormente en las ciencias y en la investigación, las métricas tienen un gran peso, debido a que con base en ellas se hacen comparaciones y se observan el comportamiento de los sistemas. En la actualidad todos los sistemas que poseen variables controlables tienen su fundamento en la posibilidad de estimar sus salidas al hacer variar las entradas basando su comportamiento en funciones o relaciones con resultados que se pueden medir. Esto ha obligado a las ciencias a apearse a un mas a la tecnología llevando a cabo investigaciones que conducen al mundo hacia una metodología que aunque no es de ultima generación sigue teniendo auge debido a su simplicidad de modelado y a la experiencia que se ha tenido, con esto me refiero a la metodología de sistemas.

Ya en nuestros días, con la evolución de los componentes electrónicos de tubos al vacío y transistores hacia componentes mas complejos, como integración de circuitos a gran escala, junto con lo desarrollado a través de la teoría de sistemas y la integración y tratamiento de la información se ha conformado lo que en la actualidad se conoce como la tecnología de la información (de ahora en adelante TI). Desde los primeros avances en este campo en 1946 con la aparición de la ENIAC (primera computadora electrónica digital) se ha buscado aplicar esta tecnología a toda ciencia que requiera de grandes cantidades de cálculos complejos e inclusive hasta cierto tipo de análisis muy minucioso delegando estas funciones a los computadores. Es en este punto que debemos de aprovechar las bondades de la tecnología de información para algo mejor que el fabricar equipos u objetos útiles, el diagnóstico de enfermedades es algo que puede dar resultados espectaculares al combinarlo con la TI.

Recientemente, pocos años atrás ya se han conocido aplicaciones de la TI en la medicina, específicamente en el diagnóstico de enfermedades. En realidad el diagnóstico médico es el arte de identificar una enfermedad por sus signos y síntomas, es por esto que el diagnóstico es el más controvertido de los sectores de aplicación de los computadores en la medicina, pues a través de las tecnologías que nos proveen los sistemas de computo se logra observar el comportamiento de los sistemas biológicos (sistema digestivo, nervioso, etc.), a través de instrumentos de amplificación de imágenes o de captura de imágenes que no se pueden percibir a simple vista, no precisamente por ser microscópicas sino por encontrarse dentro de los organismos superiores. El diagnóstico ha tomado un rumbo en el cual es posible proveer a los expertos tanta información de las áreas que se suponen afectadas por enfermedades como sea posible, esto se ha denominado diagnóstico por imágenes (Para profundizar véase http://members.xoom.com/_XMCM/sano/index.html). En otras palabras el diagnóstico por imágenes (ver figura 1) no es más que la conjunción entre los sistemas (electrónicos y de computo) con los conocimientos médicos, para producir imágenes que muestran las áreas del cuerpo humano que se ven afectadas o se sospecha su afectación por enfermedades.

Figura 1. Diagnóstico por medio de imágenes



Como ejemplos de estos sistemas podemos mencionar la Tomografía axial computarizada que fue casi concebida ya bajo los nuevos esquemas tecnológicos de la TI, la resonancia magnética y todos aquellos equipos de diagnóstico que basan su trabajo en microprocesadores que proveen gran escala de procesamiento de datos y gran capacidad de análisis de señales.

1.3 La EEG en nuestros días

En el caso de la EEG, luego de haber demostrado su efectividad para el diagnóstico y control de enfermedades cerebrales en sus modalidades analógicas, puedo mencionar que aproximadamente en el año de 1,990 las empresas empezaron a desarrollar sistemas de EEG computarizado fundamentadas más en el análisis de las señales vía software y no vía hardware, como anteriormente se venía trabajando. Se empezaron a desarrollar sistemas capaces de capturar la señales provenientes del cerebro y conducirlas, como señales bioeléctricas, hasta los procesadores de un computador, para poder presentarlas como imágenes o como mapas de la actividad cerebral, tal es el caso de la EEG, fundado específicamente en software con pequeñas interfaces de hardware que agrupaban dispositivos como transductores, filtros de frecuencia, amplificadores y circuitos de adquisición de datos, que pueden llevar la información recogida del cerebro hasta los lugares en los cuales dicha información puede ser tratada.

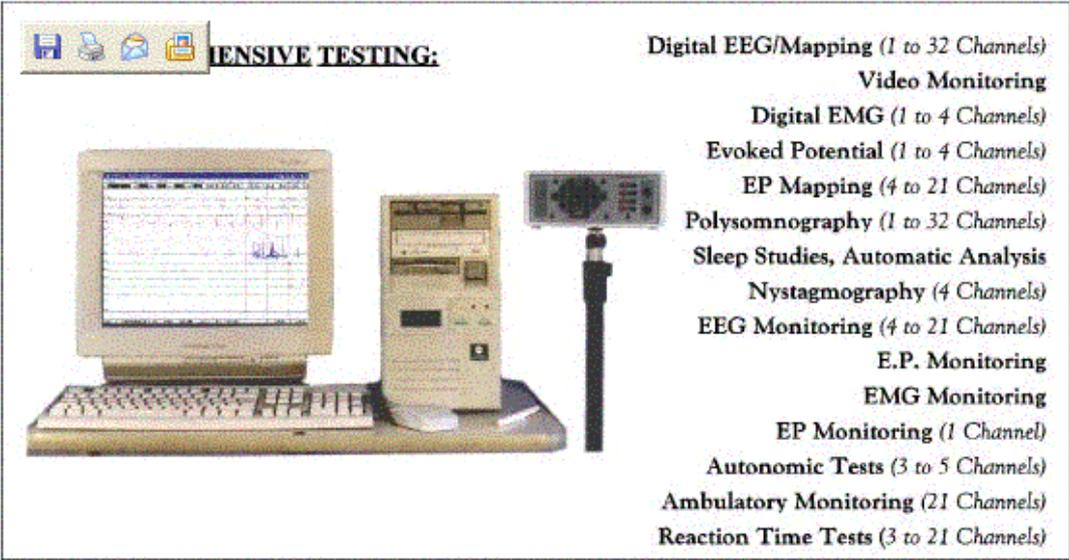
En Latinoamérica por ejemplo podemos mencionar a la empresa Argentina Akonic (www.akonic.com, Agosto de 2000) quien provee sistemas de EEG y un sin número más de sistemas de diagnóstico de enfermedades cerebrales basados en el análisis de las señales emitidas por el cerebro y el sistema nervioso en general (ver figura 2). Estos sistemas se distinguen por la

gran conveniencia de tener integrados en un solo dispositivo una gran cantidad de exámenes que de otra forma sería necesario tener un dispositivo por cada tipo de examen. La integración de los exámenes en un solo dispositivo hace único el método de trabajo implementado por Akonic, pues la base de todo es el distinto tratamiento en software, que se le da a las señales capturadas.

Figura 2. Empresa latinoamericana que ofrece productos de alta tecnología para el diagnóstico médico

AKONIC, Sistema BIO-PC

En Neurofisiología, la gran opción para el diagnóstico



INTENSIVE TESTING:

- Digital EEG/Mapping (1 to 32 Channels)
- Video Monitoring
- Digital EMG (1 to 4 Channels)
- Evoked Potential (1 to 4 Channels)
- EP Mapping (4 to 21 Channels)
- Polysomnography (1 to 32 Channels)
- Sleep Studies, Automatic Analysis
- Nystagmography (4 Channels)
- EEG Monitoring (4 to 21 Channels)
- E.P. Monitoring
- EMG Monitoring
- EP Monitoring (1 Channel)
- Autonomic Tests (3 to 5 Channels)
- Ambulatory Monitoring (21 Channels)
- Reaction Time Tests (3 to 21 Channels)

Fuente. www.akonic.com

1.4 Últimos avances en la investigación de la EEG

Para disminuir un poco el campo de los sistemas de diagnóstico, he tratado de orientar mi investigación a la EEG con esta breve reseña

histórica haciendo constar que lo que busco con la investigación es realizar el diseño de un sistema que tenga la capacidad de agregar valor a los sistemas ya existentes, a través de la aplicación de técnicas avanzadas de software y conceptos físicos y matemáticos (para profundizar ver capítulo 5).

Las técnicas avanzadas de software que he mencionado no son mas que aplicaciones de nuevos conceptos informáticos que se han difundido mucho por las utilidades tan impactantes que se han encontrado. La rama de la informática que se ha encargado de estos sistemas es la inteligencia artificial, autora de varios conceptos como las redes neuronales y el reconocimiento de patrones.

Para esta investigación lo que mas ha llamado mi atención, ha sido el reconocimiento de patrones, pues es a través de este que podemos llegar a aplicar técnicas de reconocimiento de señales e identificación de patrones presentados en un examen de EEG para llegar al objetivo final de este análisis, el autodiagnóstico de enfermedades cerebrales basado en el reconocimiento de patologías comunes.

Para terminar esta pequeña etapa de antecedentes solo me resta mencionar que al observar la existencia de todas estas áreas de investigación y sus componentes, una nueva Ciencia, ha adoptado todo este conjunto de tecnologías, biología y medicina, conformando lo que actualmente se conoce como “Bioingeniería” o “Ingeniería Bio-Médica” (que no es mas que la fusión entre la Medicina y la ingeniería) Ciencia que ampara los capítulos subsiguientes.

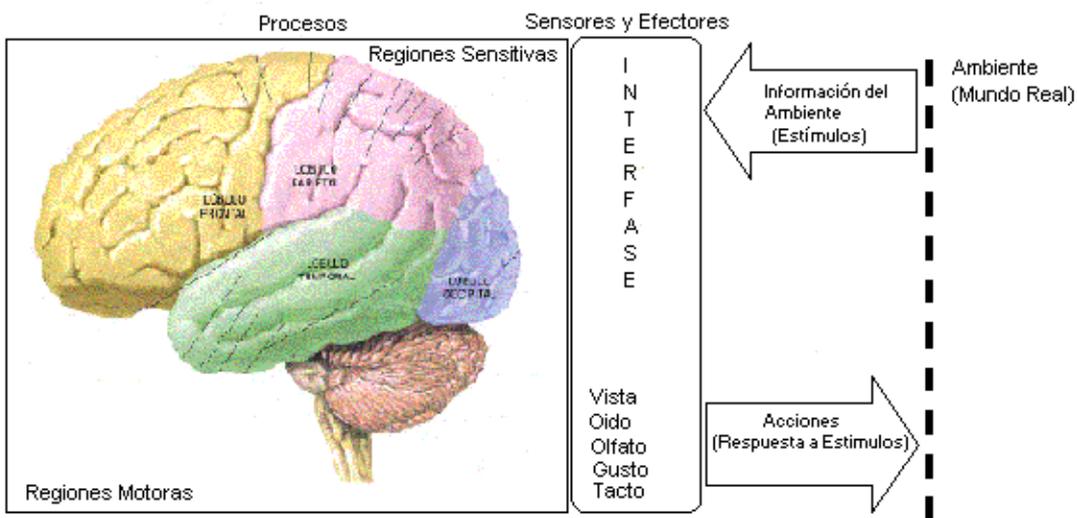
2 ANATOMÍA DEL SISTEMA NERVIOSO Y NEUROFISIOLOGÍA: ENTENDIENDO AL CEREBRO

2.1 Anatomía del encéfalo

El encéfalo es la parte más amplia del sistema nervioso central (abreviado SNC), que continúa en la médula espinal, contenida dentro de la columna vertebral, y en los nervios sensitivos y motores que llevan, respectivamente información sensorial al encéfalo y a la musculatura del esqueleto.

El encéfalo está dividido en tallo cerebral, cerebelo y cerebro. El tallo cerebral conecta entre si el córtex cerebral la médula espinal y el cerebelo. Controla a su vez el ritmo cardíaco y respiratorio y es el centro de varios reflejos motores. En la figura 3 podemos observar una representación del encéfalo como un modelo apegado al enfoque sistémico.

Figura 3. El encéfalo, un sistema



2.1.1 Cerebelo

El cerebelo es el coordinador de los movimientos voluntarios y mantiene el equilibrio del cuerpo. Además de lo anterior, el cerebelo tiene una función derivada precisamente a la naturaleza bioeléctrica del sistema, esta función consiste en simular un “filtro pasa bajas”, que de no existir, las altas frecuencias de los impulsos cerebrales mantendrían el sistema muscular en un estado espasmódico.

2.1.2 Cerebro

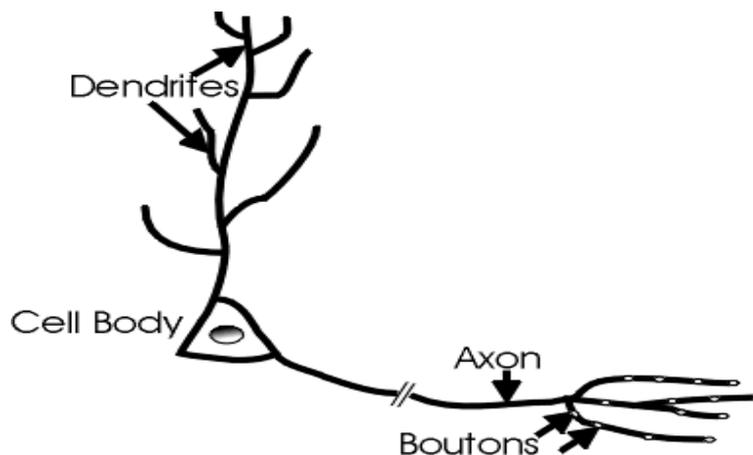
El cerebro es la parte mas evolucionada del encéfalo, en el se localizan las funciones concientes del sistema nervioso. Posee dos segmentos llamados hemisferios que se relacionan con las partes opuestas del cuerpo, es decir, el hemisferio derecho se relaciona con el lado izquierdo del cuerpo y el hemisferio izquierdo con el lado derecho del cuerpo. La parte exterior de cada hemisferio se denomina córtex o corteza cerebral, y funciona como el centro sensorial del sistema. En su interior está formado por neuronas.

2.1.3 Las neuronas

Para aclarar un poco el concepto anterior planteo a continuación la anatomía y morfología de una neurona (figura 4). El sistema nervioso está formado por células que son llamadas neuronas, las cuales a su vez están formadas por otros componentes tales como el axón, las dendritas y el cuerpo celular. El axón es una extensión celular que se proyecta y hace se conecta o empalma con las dendritas de otras neuronas. Las dendritas se extienden del cuerpo celular y reciben las señales o entradas de otras neuronas. El cuerpo

celular es un compartimento globular que contiene una variedad de organelos incluyendo el núcleo y es la base de las dendritas y el axón. Una neurona puede tener muchas dendritas pero un solo axón. La Sinapsis es la conexión o empalme del axón con las dendritas lo cual permite que una neurona se conecte con otra u otras a través de las ramificaciones terminales del axón (*boutons* en inglés).

Figura 4. Diagrama de la anatomía de una neurona y sus partes, cuerpo celular (*Cell Body*), axón, Dendritas y Ramificaciones Terminales del Axón (*Boutons*)



2.1.4 La corteza cerebral o córtex

La subdivisión más importante del encéfalo es la corteza cerebral que posee unos 9 de los 12 billones de células (neuronas) que hay en el cerebro humano. La corteza es una capa fina de neuronas situada en la periferia del cerebro que contiene muchas fisuras o pliegues entrantes para dar una mayor área superficial. Algunas de las fisuras más profundas se denominan surcos y se utilizan para dividir la corteza en varios lóbulos, llamados según su

ubicación, “lóbulo parietal”, “lóbulo frontal”, “lóbulo occipital” y “lóbulo temporal”.

Todas las entradas sensoriales alcanzan con el tiempo la corteza cerebral donde ciertas regiones parecen estar relacionadas específicamente, con ciertas modalidades de información sensitiva. Otras regiones del córtex parecen estar relacionadas específicamente con las funciones motoras. Por ejemplo, todas las entradas sensoriales somáticas (calor, frío, presión, tacto, etc.) llegan a una región de la superficie del córtex justo por detrás del surco central, abarcando la parte delantera del “lóbulo parietal”. Las entradas sensoriales somáticas de cada punto del organismo llevan a una parte específica de esta región, estando las entradas procedentes de las piernas y los pies más cerca de la parte superior, a continuación el torso, seguido de brazos, manos, dedos, cara, lengua, faringe y finalmente las regiones intra abdominales en la parte inferior. Véase el córtex como un supermercado organizado en departamentos donde cada departamento se dedica a ofrecer cierta clase de productos, de la misma forma en que el córtex está organizado en lóbulos que se dedican a realizar tareas específicas en el sistema.

Justo delante del surco central está el “lóbulo frontal”, donde se encuentran las principales neuronas motoras que van a los distintos músculos del cuerpo. Las neuronas motoras también están distribuidas en la superficie de la corteza de una forma similar a las neuronas sensitivas. El “lóbulo occipital” está muy hacia atrás de la cabeza, sobre el cerebelo. El lóbulo occipital contiene la corteza visual donde se proyectan en una representación geográfica las formas obtenidas en la retina. La entrada sensitiva auditiva se puede seguir hasta los “lóbulos temporales” de la corteza, situados justo por encima de los oídos. Las neuronas que responden a las distintas frecuencias de la entrada de sonido se encuentran dispersas por toda la región, estando situadas las

frecuencias más altas hacia la parte delantera y las más bajas hacia la parte trasera.

El olfato y el gusto no tienen situaciones específicas sobre la corteza cerebral, aunque en la percepción del olor interviene un bulbo cercano al centro del cerebro.

La corteza cerebral tiene muchas áreas que no son ni sensitivas ni motoras. En el hombre, esto sucede en la mayor parte de la corteza. Muchos científicos creen que estas áreas, denominadas “áreas de asociación” están involucradas en la integración o asociación de las distintas entradas para producir las respuestas de salida apropiadas y transmitir las a las neuronas motoras para controlar el organismo.

Neurofisiología. Funcionamiento del sistema

La Neurofisiología por la etimología de la palabra, se dice que es la ciencia que estudia (logos) el funcionamiento (fisis) del sistema nervioso (neuro). Es una ciencia que se fundamenta en los conocimientos de las neurociencias básicas, tiene como objetivo la exploración funcional del Sistema Nervioso Central (encéfalo y médula Espinal), Periférico (Nervios y Órganos de los Sentidos) y Autónomo (Simpático y Parasimpático).

Bajo esta misma línea existe la Neurofisiología Clínica que no es más que una especialidad médica que toma ventaja de la tecnología para realizar estudios, utilizando sistemas altamente especializados con fines diagnósticos, pronósticos y orientación terapéutica.

La Neurofisiología se fundamenta en los estudios del Premio Nóbel español, Santiago Ramón y Cajal, quien en 1891 postuló la ley de la

polarización dinámica de las neuronas. Esta ley indica que las corrientes que conducen información bioeléctrica en las células nerviosas (neuronas) fluyen desde las ramificaciones dendríticas hacia el cuerpo de la neurona, donde se procesa dicha información, y de este hacia las ramificaciones terminales o axón para empalmar (sinapsis) con otra u otras neuronas. Además Ramón y Cajal fundamentó que el sistema nervioso no es una enredadera de neuronas sino una red neuronal exquisitamente interconectada entre si con la observación de que dichas neuronas no pierden su individualidad.

Como se puede observar con referencia en la fecha de los estudios de Ramón y Cajal, pocos años después de la postulación de la ley de polarización dinámica de las neuronas, se iniciaron los primeros estudios que originaron la Bioingeniería y fue pocos años mas adelante que la Bioingeniería tomó los como su herramienta principal a los sistemas electrónicos, al descubrir la capacidad que estos tenían, de procesar enormes cantidades de datos y enormes cantidades de señales provenientes de cualquier fuente incluso de los mismos sistemas biológicos.

La neurofisiología trata el estudio de varios conceptos muy importantes para esta investigación, conceptos que se desprenden de la generación de las señales cerebrales o electro génesis, de la cual hablaremos a continuación.

2.1.5 Electro génesis cerebral

Los tejidos están formados por células, en nuestro caso específicamente neuronas. El tejido nervioso presenta como una de sus funciones básicas la capacidad de generar potenciales eléctricos, estos son la base de la

excitabilidad¹ del cuerpo. A continuación vamos a detallar como se generan estos potenciales restringiendo la investigación solamente a la generación de los potenciales en la corteza cerebral (un enfoque más completo se sale del contexto de la investigación).

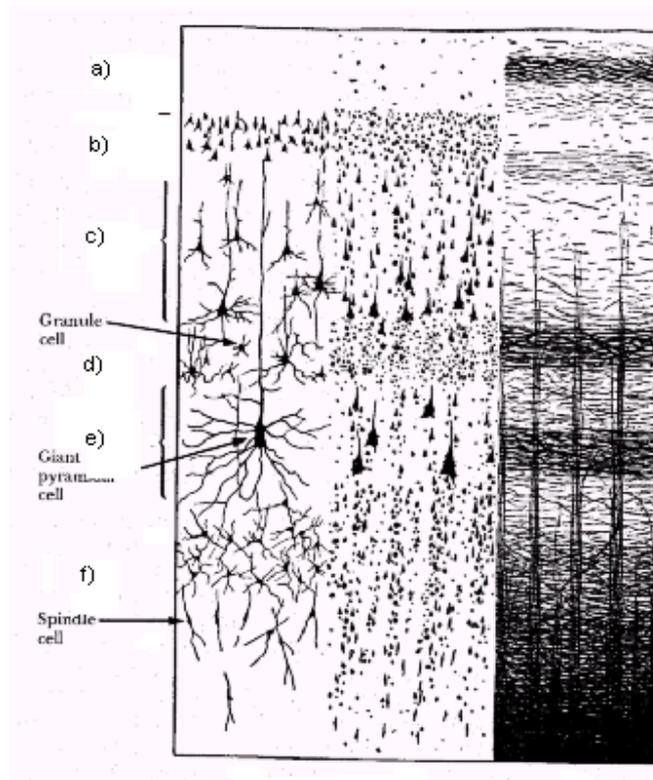
Histológicamente la neocortèza está constituida por seis capas celulares (ver figura 5):

- a. Capa superficial plexiforme de pequeñas células.
- b. Capa de células granulares.
- c. Capa de células piramidales.
- d. Capa de células granulares.
- e. Capa de células piramidales.
- f. Capa profunda polimorfa.

Las células de las capas c) y e) son efectoras, las células de las capas b) y d) son receptoras.

¹ Al decir excitabilidad del cuerpo me refiero a la propiedad acción reacción (a un estímulo) a través de la conducción de los potenciales por medio de los nervios del organismo o simplemente a las actividades motoras autónomas que el cuerpo ya tiene planificadas.

Figura 5. Constitución de las capas celulares de la neocorteza



Todas las células involucradas en la electrogénesis poseen un potencial cuantificable llamado potencial transmembrana del cual vamos a hablar en la siguiente sección.

2.2.1.1 Potencial transmembrana

La fuente de la electrogénesis cerebral es el potencial transmembrana, el cual ante ciertas condiciones puede variar para generar un potencial de acción. Para realizar mediciones sobre las señales producidas por la electrogénesis se utilizan varios tipos de electrodos como transductores.

En mediciones sobre células aisladas, donde se utilizan micro electrodos como transductores, el potencial de acción es en si mismo la señal bioeléctrica. En mediciones sobre grandes grupos celulares, donde, por ejemplo, se utilizan electrodos de superficie como transductores, el campo eléctrico generado por la acción de muchas células distribuidas en las vecindades de los electrodos constituye la señal que representa el potencial.

Básicamente la electro génesis cerebral se genera con los potenciales transmembrana que no son mas que la diferencia de potencial entre el exterior y el interior de la célula, a través de las membranas que envuelven las células existen diferencias de potencial eléctrico. Muchas células poseen la capacidad de propagar cambios en dichos potenciales. Los nervios, músculos y células glandulares, como así también muchas células vegetales, exhiben este fenómeno. Cuando tales células responden a un estímulo, el potencial eléctrico a través de su membrana exhibe una serie de cambios reversibles, llamado potencial de acción. Los potenciales de acción pueden ser registrados mediante electrodos apropiados, amplificación y una adecuada representación. A causa de que cada célula exhibe una actividad eléctrica característica, la medición de la misma ofrece importante información acerca del funcionamiento celular. A partir de este hecho, se desarrolló el estudio clínico de las señales producidas por la electro génesis de todo el sistema biológico, el cual se basa en la medición de la actividad eléctrica de grandes grupos celulares. Como las disfunciones usualmente se revelan en la señal bioeléctrica, se puede obtener mucha información a partir de estos registros.

Aunque las señales bioeléctricas provenientes de las distintas células varían considerablemente en amplitud y forma, todas tienen un origen común en el potencial transmembrana. El límite funcional de las células biológicas es una delgada estructura (aprox. 10nm) formada por lípidos o grasa y

proteínas, llamada membrana celular. Las fuerzas electroquímicas a través de esta membrana regulan el intercambio químico celular. El medio dentro de la célula (plasma) y fuera de ella (líquido intersticial) está compuesto principalmente por agua conteniendo varios iones. La diferencia de concentración de iones dentro y fuera de la célula produce una fuerza de origen electroquímico sobre la membrana.

La membrana es un dieléctrico semipermeable que permite el intercambio selectivo de iones. Bajo condiciones de equilibrio electroquímico (no existe fuerza neta en ninguna dirección), existirá el potencial transmembrana dado por la ecuación de Nerst:

$$V_m = \frac{RT}{FZ} \ln \left(\frac{[S]_o}{[S]_i} \right)$$

Donde $[S]_i$ y $[S]_o$ representan las concentraciones de la sustancia iónica S dentro y fuera de la célula, R es la constante universal de los gases, T la temperatura absoluta, F la constante de Faraday (Coulombios por Mol de carga) y Z es la valencia de la sustancia S. Utilizando los valores $R=8.31 \text{ J/mol.K}$, $T=310 \text{ K}$, $F=96500 \text{ C/mol}$ y $Z = +1$ (catión monovalente), convirtiendo a logaritmo de base 10 y expresando V_m en milivolts, se obtiene:

$$V_m = 61 \text{Log} \frac{[S]_o}{[S]_i}$$

En estado de reposo, las células musculares y nerviosas mantienen un potencial de membrana de alrededor -60 a -90 mV , con el interior negativo respecto del exterior. Con estos potenciales transmembrana y considerando el pequeño espesor de la membrana (aprox. 10nm) se observa que el campo eléctrico a través del mismo es enorme. La membrana es semipermeable; es

decir, es un dieléctrico con pérdidas que permite el pasaje de ciertos iones.

La permeabilidad iónica varía según la especie iónica. Los canales iónicos en la membrana excitable variarán su permeabilidad en respuesta al potencial transmembrana; esta propiedad distingue la membrana excitable de la membrana celular común, proveyendo el soporte para la propagación de los impulsos nerviosos. En respuesta a estímulos de adecuada intensidad se produce un fenómeno llamado “despolarización” en el que varía la diferencia de potencial transmembrana debido al pasaje selectivo de cargas (iones) a través de la misma. Este fenómeno es la base de la transmisión ecléctica en los seres vivos y el origen de las señales bioeléctricas que se registran y analizan clínicamente.

2.2.1.2 Electro génesis cortical

Un fragmento de tejido cortical aislado es asiento de actividad eléctrica espontánea. Esta actividad se caracteriza por salvas² de ondas lentas sobre las que se superponen ritmos rápidos. Entre una salva y otra aparecen períodos de silencio eléctrico. Esta actividad es producida por la actividad *sináptica* general de regiones discretas de tejido: los PPSE (potenciales postsinápticos excitadores) y los PPSI (potenciales postsinápticos inhibidores) se suman entre si y dan origen a potenciales lentos, que son las ondas registradas. Estas porciones de tejido que son capaces de producir actividad eléctrica se llaman “Generadores”.

Se conocen tres generadores corticales:

² Salva es un sinónimo de una serie de cosas.

Generador A: Situado a unas 500 micras de la superficie cortical está producido por la despolarización de las dendritas apicales de las células piramidales. Su actividad produce ondas negativas en la superficie de la corteza. No tiene relación con la descarga de potenciales de acción de las células.

Generador B: Situado a 900 micras de profundidad está formado por las despolarizaciones de los somas de las células piramidales. Produce ondas positivas en la superficie cortical y su actividad coincide con la aparición de potenciales de acción en β las células.

Generador C: Está situado también a 900 micras, pero su actividad determina ondas negativas en la superficie cortical y es el resultado de la hiperpolarización de las células. Su actividad coincide con una interrupción de la descarga de potenciales de acción en las células piramidales.

De forma general, una tensión positiva en la superficie cortical traduce una despolarización en las capas más profundas de la corteza. En cambio, una tensión negativa puede ser resultado, bien de una despolarización superficial, o de una hiperpolarización profunda.

2.2.1.3 Sincronización de la actividad celular

De lo dicho anteriormente, las señales corticales son consecuencia de la actividad neuronal. Sin embargo, dado que en un registro normal se recoge la actividad de muchos miles de neuronas, para poder conseguir una actividad global mínima es preciso que las neuronas vecinas se encuentren sincronizadas. Cuando así ocurre, se pueden observar ondas tanto mayores y

tanto más lentas, cuanto mayor sea la sincronía de los generadores. La sincronización se encuentra bajo control de estructuras subcorticales, fundamentalmente ciertos núcleos talámicos que actúan como los marcapasos sincronizadores de las actividades rítmicas corticales. Por el contrario, otras regiones más caudales que van desde el hipotálamo hasta la porción rostral del bulbo constituyen estructuras desincronizadoras.

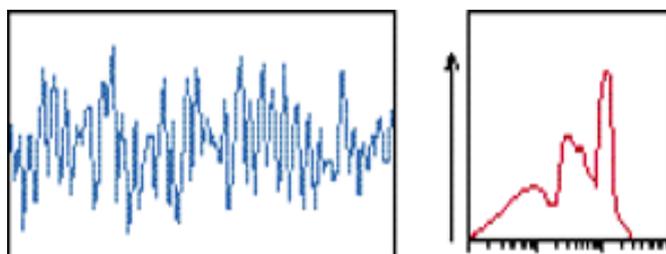
2.2.1.4 Ondas cerebrales

Todo este sistema bioeléctrico de potenciales transmembranales, electrogénesis, generadores corticales, etc., producen, en los grandes grupos celulares, ondas electromagnéticas, específicamente percibidas en el córtex, que tienen cierta nomenclatura dependiendo de la frecuencia y la diferencia de potencial que se percibe en dichas oscilaciones (Amplitud).

Las ondas cerebrales son conocidas como:

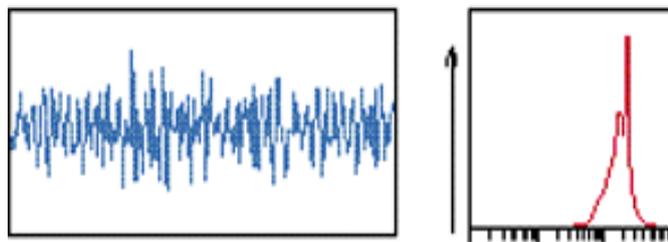
- a) *Ondas Alfa* (α): Causadas por estados de relajación del sistema, generalmente poseen gran amplitud y frecuencias moderadas (figura 6). 8-13 Hz de frecuencia y de alrededor de 50 mV de amplitud.

Figura 6. Ondas alfa



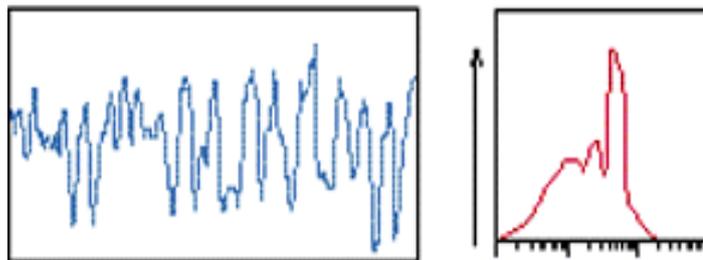
- b) *Ondas Beta* (β): Son el resultado de alta actividad mental, normalmente muestran oscilaciones rápidas con frecuencia corta (figura 7). 14-30 Hz y de amplitud muy baja.

Figura 7. Ondas beta



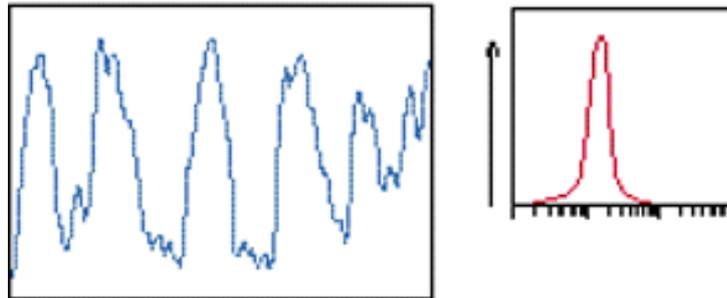
- c) *Ondas Teta* (θ): Pueden ir acompañadas de estrés producido por sentimientos y emociones. Son caracterizadas por tener una frecuencia moderadamente baja (figura 8).

Figura 8. Ondas teta



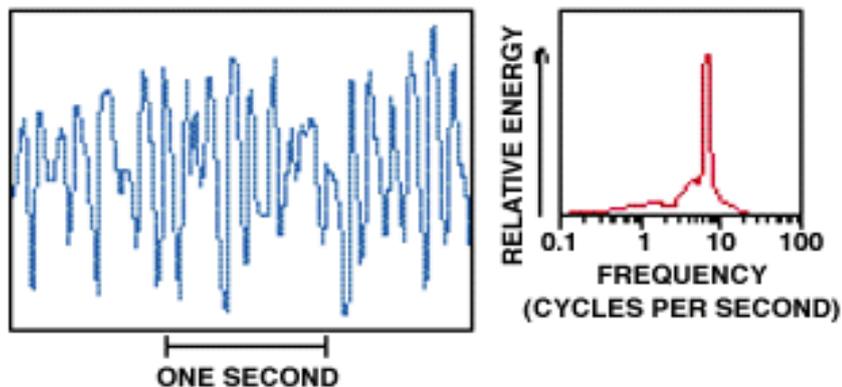
- d) *Ondas Delta* (δ): Resultado de oscilaciones de frecuencia extremadamente baja, que suele ocurrir durante períodos de sueño profundo (figura 9). 4-8 Hz y de amplitud muy baja.

Figura 9. Ondas delta



e) *Ondas Mu*(μ): Con una forma semejante a los arcos de Croquet, se les asocia con movimientos o intentos de movimientos físicos (figura 10).

Figura 10. Ondas mu



Estas ondas son percibidas durante los registros de EEG por lo que su nomenclatura es algo un poco más técnico que fisiológico.

Desperfectos en el sistema

Las innumerables maneras en que pueden alterarse el electroencefalograma dificultan mucho su sistematización. Pese a ello, con fines

didácticos, trataremos de sistematizar las anormalidades del EEG que están asociadas la mayoría de veces a desperfectos en el sistema nervioso humano, dejando establecido que en ciertos casos particulares dicha sistematización puede no ser aplicable.

Las anormalidades del EEG tratadas en esta sección corresponden a innumerables alteraciones, tanto provenientes del sistema nervioso propiamente dicho como de la repercusión en este de una alteración clínica general, por ejemplo, metabólica³ o endocrina⁴. Cada enfermedad del sistema nervioso, cada síndrome o cada alteración clínica general con compromiso del SNC puede presentar una, varias o ninguna de las anomalías bioeléctricas que aquí enumeraremos. Para empezar tomaremos la descripción electroencefalográfica y la semiología elemental.

Hans Berger, a quien nunca se puede dejar de citar en electroencefalografía, había observado en 1931 (citado por Ashworth y Emery, 1963), a raíz de su estudio sobre esclerosis múltiple, que se pueden extraer dos conclusiones con respecto a un EEG anormal:

1. que dicho trazado indica una perturbación de la función cerebral (disfunción) que puede responder a diferentes etiologías⁵, y
2. que en una lesión cortical focal, el registro se normaliza cuando pasa el periodo agudo.

Esto es de fundamental importancia con respecto a la interpretación y la correlación electro clínica en electroencefalografía, y constituye la explicación a

³ Metabólico relativo a la suma total de todos los procesos químicos desarrollados en todo organismo viviente.

⁴ Endocrina, relativo al funcionamiento de las glándulas de secreción interna.

⁵ Etiología, estudio de las causas de las enfermedades.

la cual muchas veces deberá recurrirse cuando los hallazgos bioeléctricos y los síntomas neurológicos no concuerden.

La electroencefalografía es dinámica y los hallazgos dependen del momento evolutivo de la enfermedad en estudio. Por tanto, el análisis del EEG debe ser muy cuidadoso y su informe valorado por neurólogos expertos, puesto que, así como muchas veces puede ser un aporte valioso en la evaluación y diagnóstico de una enfermedad, en otras, considerado ligeramente, puede dificultar o impedir un diagnóstico.

Aunque ya se ha dicho muchas veces, y los neurólogos lo conocen bien, es necesario repetir una vez más que las alteraciones electroencefalográficas no permiten establecer etiologías. Así, la misma alteración del electroencefalograma puede ser producida por una encefalitis, por un traumatismo encefalocraneano o por un tumor cerebral. Es que en estos casos las neuronas cerebrales reaccionan eléctricamente de igual manera, dando como resultado, por consiguiente, una misma forma de alteración electroencefalográfica.

Ahora trataremos de sistematizar las anomalías del electroencefalograma comenzando por las alteraciones bilaterales y las asimetrías.

2.1.6 Alteraciones difusas y bilaterales

2.2.1.5 Aspectos electroencefalográficos

Aquí consideraremos las alteraciones que abarcan ambos hemisferios por igual, o parte de ellos en forma simétrica y que se presentan de

modo constante o casi constante durante el registro.

A. Ligera desorganización difusa. La ligera desorganización, difusa y bilateral, de los ritmos corticales es la alteración más común y trivial del EEG. Se produce por la interposición de ondas lentas (de 4 a 7 Hz) de baja amplitud en la actividad de fondo de ambos hemisferios. Esta actividad lenta se halla en escasa proporción en el registro. Se la puede encontrar en aproximadamente el 10% de la población sana.

Esta alteración, considerada como la mínima anomalía del electroencefalograma, es completamente inespecífica y suele ser, muchas veces, asintomático. Puede encontrarse tanto en sujetos sanos como en epilépticos, en las fases iniciales de las encefalopatías y en innumerables trastornos neurológicos. Por tanto, su valor como elemento aislado es prácticamente nulo. Solo los restantes datos de la anamnesis y del examen clínico pueden hacer que una desorganización ligera difusa y bilateral de los ritmos corticales posterior evaluación electroencefalográfica podrá aportar, o no, mayores datos. Debe hacerse notar que las etapas iniciales del sueño suelen caracterizarse por la presencia de ondas de 4 a 7 Hz, de voltaje irregular, en ambos hemisferios. Esto no debe confundirse con la ligera desorganización difusa, la cual solo corresponde al EEG de vigilia.

B. Moderada desorganización difusa. Cuando la actividad theta, de mediana amplitud, deja de ser solamente la actividad de fondo para adquirir cierta prominencia y constancia, el EEG pasa de la categoría de ligeramente desorganizado moderada, por tanto, adquiere distinto significado que la ligera, aunque también es inespecífica. Sin embargo, a diferencia de la anterior, se asocia con signos de disfunción cerebral aunque no indica necesariamente una alteración estructural orgánica.

La desorganización moderada, difusa y bilateral de los ritmos corticales se aprecia comúnmente en niños con trastornos de conducta, hipercinesia, trastornos de aprendizaje etc. En adultos suele observarse en epilépticos.

C. Marcada desorganización difusa. Es el tercer grado de desorganización difusa. Además de una abundante actividad theta se observan algunas ondas delta, de bajo a mediano voltaje, en la actividad de fondo de ambos hemisferios. Indica una perturbación cortical severa y suele observarse en pacientes epilépticos. Tanto en la desorganización moderada, como en la marcada, es común que haya otras anomalías electroencefalográficas. Puede ser tanto de causa cerebral como extra cerebral (alteraciones del metabolismo, endocrinas, del medio interno, etc.)

D. Actividad theta pre-frontal, bilateral. La actividad theta, en secuencia relativamente prolongadas (hasta 10 segundos), en áreas pre-frontales, constituye una alteración poco frecuente del electroencefalograma. Suele observarse en pacientes epilépticos.

E. La actividad lenta (theta y delta) difusa y bilateral. La actividad delta difusa y bilateral casi siempre se acompaña de perturbaciones francas de la conciencia, ya sea confusión, estupor⁶ o coma. Es común en las alteraciones metabólicas o en estado toxico. Asimismo, se observa en meningoencefalitis o encefalopatías de diversas etiologías, y en hipoxias⁷ cerebrales. Puede aparecer después de un traumatismo encéfalo craneano, cuando este produce edema cerebral. Inmediatamente después de una crisis de gran mal sigue un periodo de duración variable en el cual solo se observa una actividad delta difusa y bilateral, generalmente de baja amplitud, en el extremo mas lento de la

⁶ Estupor es la disminución o suspensión de las funciones intelectuales.

⁷ Hipoxias, estado de un organismo viviente con déficit de oxígeno.

banda. En ocasiones puede apreciarse, durante este periodo de actividad lentas recurrentes con intervalos de cierta periodicidad. Esto no debe confundirse con los paroxismos⁸ periódicos, que tienen otra significación.

En algunos niños con sarampión sin complicaciones neurológicas, como asimismo en otras enfermedades exantemáticas, el EEG registrado durante el periodo agudo puede mostrar una actividad lenta difusa que en estos casos no se acompaña de perturbaciones de la conciencia.

Con excepción de la actividad lenta observada en la fase aguda de una enfermedad exantemática, o en el periodo inmediatamente posterior a una crisis tonico-clónica generalizada, este tipo de anomalía del EEG generalmente indica una alteración cerebral grave, pero no necesariamente irreversible.

Cuando la actividad delta se observa en las mitades anteriores de ambos hemisferios, especialmente en las zonas frontales y pre-frontales, suele indicar una alteración estructural orgánica de la línea media, ya sea superficial o profunda. Esto puede observarse en los tumores frontales parasagiales y en alteraciones vasculares. La actividad lenta, delta, de alto voltaje en áreas pre-frontales, de las trombosis del seno longitudinal superior puede acompañarse, como secuela, de descargas punta-ondas a 2 Hz si se instala una encefalopatía crónica.

Ondas delta rítmicas, apareciendo por brotes de duración variable, con máximo voltaje en áreas frontales, constituyen la anomalía del EEG más característica de los tumores de la fosa posterior. Dicha alteración "a distancia" fue inicialmente señalada por Cobb en 1945. Estas ondas delta, debido a su configuración sinusoidal, sin otras frecuencias superpuestas, y a su periodicidad constante, también se denominan "monomorfas". Cuando estos brotes se presentan suelen no ser reactivos a estímulos sensoriales. Pueden aumentar en voltaje y duración durante la hiperpnea. En el hipotiroidismo se observa actividad lenta bilateral.

⁸ Paroxismo, es la pérdida del sentido y la acción por largo tiempo.

F. Actividad rápida, bilateral. Frecuencias rápidas, generalmente en secuencia de 2-3 segundos de duración y de aspecto fusiforme⁹, se observan ocasionalmente en sujetos que niegan estar tomando medicamentos. Esto es importante, pues se sabe que los barbitúricos y los psicofármacos inducen frecuencias rápidas, fusiformes, en el EEG. En ausencia de efecto medicamentoso, una actividad rápida de 20 a 30 Hz. O aun mayor es considerada anormal por numerosos autores de diagnóstico con EEG. Su localización suele ser frontal o pre-frontal (lo que hace muy sospechoso que obedezcan a medicamento negados por el paciente). La amplitud no suele exceder de 15 a 25 μ V. Pueden aparecer en cualquier edad. Suele observarse actividad rápida en las neurosis, los trastornos de conducta y en alteraciones neurológicas variadas. Es ciertamente inespecífica con respecto a la etiología y su origen se desconoce. En estos casos, generalmente la actividad rápida es difusa y bilateral.

⁹ Fusiforme, con figura elíptica.

3. BIOINGENIERÍA: EL VÍNCULO CON LA TECNOLOGÍA

En esta sección se tratará de exponer la forma en que la biología, las ciencias médicas y los sistemas electrónicos e informáticos (TI) quedaron ligados para producir los avances que han dado auge a la tecnología médica y el diagnóstico en nuestros días. Así como también se presenta la evolución de los sistemas de diagnóstico.

3.1 Electroencefalografía común

La electroencefalografía es el registro y evaluación de los potenciales eléctricos producidos por los generadores, de los cuales se habló en el capítulo anterior, obtenidos por medio de electrodos situados sobre la superficie del cuero cabelludo. En realidad los potenciales registrados mediante esta técnica representan la actividad de numerosas neuronas en las que se produce una fluctuación en el potencial transmembrana. Aunque el cerebro consiste de aproximadamente 10^{14} neuronas, el EEG refleja la actividad de la capa más externa, es decir, la corteza. El tipo de actividad eléctrica depende de la ubicación de los electrodos y el estado de alerta. De tal forma que la frecuencia y la amplitud de las señales muestreadas están profundamente afectadas por el nivel de alerta y la presencia de algún tipo de desperfecto en el sistema. Técnicamente el registro electroencefalográfico es un gráfico complejo obtenido por electrodos reversibles aplicados sobre el cuero cabelludo, que muestra la diferencia de potencial entre dichos electrodos sobre un papel en movimiento, por medio de un oscilógrafo de inscripción a tinta y en función del tiempo. De esta manera el gráfico del electroencefalograma es bidimensional, donde la abscisa representa el tiempo y la ordenada el voltaje. (figura 11)

El electroencefalógrafo consiste en un número variable de amplificadores balanceados, de alta sensibilidad y alta impedancia de entrada, con respuesta de frecuencia variable desde Corriente Directa (DC), en algunos equipos, hasta 150 Hz.

Figura 11. El EEG es un gráfico de voltaje en función del tiempo



El electroencefalógrafo no es un aparato automático que registra la actividad eléctrica del cerebro en sus variados detalles por el simple accionar de un botón que lo pone en marcha. Los datos contenidos en el registro electroencefalográfico, para permitir una evaluación adecuada y llegar a conclusiones valideras, serán necesarias la habilidad, el entrenamiento y la experiencia de la persona cargo de realizarlo. Aunque esto parezca obvio, como lo dijo Grass (1949), "Es muchas veces pasado por alto y sus consecuencias, si bien pueden o no ser inmediatamente peligrosas como ocurre en radiología, en ocasiones son desastrosas, llevando a errores diagnósticos o no contribuyendo en la forma que correspondería a resolver el problema clínico".

La habilidad para obtener un trazado técnicamente aceptable para su interpretación se adquiere por el estudio y la práctica. La obtención del electroencefalograma es un proceso dinámico y el encargado de realizarlo debe estar atento a los detalles que van surgiendo del mismo, para variar el

registro cuando corresponda y lograr así el máximo de datos que luego permitan la interpretación definitiva. De no ser así, se pierde un tiempo valioso y, muchas veces la oportunidad de un diagnóstico.

Se requiere una destreza especial de parte del personal a cargo de obtenerlo, pues el trazado de rutina, con sus pocas variaciones de controles, solo es útil en los casos normales, mientras que los trazados anormales requieren de la combinación de ciertos parámetros tales como, filtros, coeficientes de amplificación, constantes de tiempo, velocidad del papel, etc. de acuerdo con las alteraciones o variaciones que se presenten.

3.2 Captación del EEG

Técnicamente la actividad bioeléctrica cerebral es captada a nivel del cuero cabelludo, como ya se mencionó, por los *electrodos*, luego es amplificada en las diferentes etapas del electroencefalógrafo y, finalmente, registrada por los oscilógrafos sobre el papel en movimiento.

Los electrodos deben ser diseñados y construidos de tal manera que permitan registrar la actividad eléctrica en forma eficiente y con el mínimo de distorsión. En fisiología, las características de lo que se va a registrar y su situación anatómica determinan el tipo de electrodos a utilizar y éstos, a su vez, el tipo de circuito amplificador que se necesita.

Aunque los electrodos pueden ser de tamaño, forma y materiales distintos, y aplicados sobre el cuero cabelludo por diferentes medios, deben tenerse en cuenta algunos principios generales en su diseño y uso. Lo importante de resaltar es que de nada sirve tener dispositivos de amplificación avanzados y de gran potencia, si de todos modos ya la señal va a llegar con distorsión desde los electrodos, es decir antes de llegar a los amplificadores.

3.3 Propiedades de los electrodos

3.3.1 Potencial del electrodo

Cuando se introduce un metal en una solución se produce una diferencia de potencial entre el metal y la solución. En esta etapa se realizan dos procesos electroquímicos de descarga de iones del metal hacia la solución. Cuando los iones que se separan del metal del electrodo superan a los que retornan, se produce un exceso de electrones en el metal. A consecuencia de esto, los cationes se acumulan en la solución formando una doble capa eléctrica. Dicha capa dificulta el movimiento de aniones hacia la solución, a la vez que facilita el movimiento de los cationes hacia el metal. En este proceso se alcanza un equilibrio y es entonces cuando el electrodo muestra su potencial, que puede definirse como la diferencia de potencial entre el metal y el volumen de la solución. Para efectos de estándares el potencial del electrodo es valorado con respecto a la diferencia de potencial existente entre ese electrodo y el electrodo de hidrógeno reversible en condiciones estándar. Cualquier tipo de electrodo, tendrá su propio potencial que depende del metal con el que se halla construido. (ver tabla I)

Tabla I. Material y potencial de electrodos

Material del electrodo	Potencial del electrodo (Volts)
Aluminio ⁺⁺⁺ /Aluminio	-1,66
Titanio ⁺⁺ /Titanio	-1,63
Cromio ⁺⁺⁺ /Cromio	-0,7
Hierro ⁺⁺⁺ /Hierro	-0,44
Niquel ⁺⁺ /Niquel	-0,14
Plomo ⁺⁺ /Plomo	-0,13
Hidrógeno ⁺ /hidrógeno	0
Cobre ⁺⁺ /Cobre	+0,34
Cobre ⁺ /Cobre	+0,52
Plata ⁺ /Plata	+0,80
Platino ⁺⁺ /Platino	+1,2

Oro+/Oro	+1,7
----------	------

3.3.2 Electroodos impolarizables

Con los dispositivos modernos se ha reducido en gran parte el efecto de la polarización de los electroodos, factor de suma importancia en los comienzos de la EEG. Los electroodos impolarizables continúan siendo necesarios, sin embargo.

Cuando se interrumpe el equilibrio de iones del electrodo se produce la polarización electrolítica y se dice que el electrodo se ha polarizado. Los electroodos reversibles, tienen la característica de que no se producen cambios químicos si se aplica un voltaje igual y opuesto al potencial del electrodo. La polarización de un electrodo se reduce utilizando un metal recubierto por uno de sus propios componentes. La combinación mas común es Ag(Plata)/Cl(Cloro) Ag. Lo que se busca con todo esto es que los electroodos sean estables y uniformes en su registro.

3.4 Tipos de electroodos

Existen varios tipos de electroodos según la forma en que se obtiene el registro. (a) Superficiales, de aplicación sobre el cuero cabelludo. (b) Especiales (Basales), aplicables en la base del cráneo sin necesitar procedimiento quirúrgico, y (c) neuroquirúrgicos, porque necesitan este medio para su aplicación, pudiendo ser corticales o intracerebrales. Estas tres formas de capturar la señal bioeléctrica hacen que el registro tenga diferente nombre: si se utilizan electroodos de superficie o basales, el gráfico resultante se llama electroencefalograma; cuando se usan electroodos quirúrgicos,

electrocorticograma; y cuando se emplean electrodos profundos se llama estéreo electroencefalograma.

3.4.1 Electroodos de superficie

En electroencefalografía se utilizan electrodos que además de las características mencionadas, deben poseer las siguientes características: fácil y de rápida colocación y remoción, indoloros y permanecer por un tiempo prolongado en la misma posición sin dificultades. Para tales fines se han diseñado varios tipos de electrodos, que en términos generales se pueden dividir en tres clases: adhesivos, de contacto y de aguja. La resistencia de cualquiera de estos ya aplicado sobre el cuero cabelludo no debe ser mayor a 10 K Ω y no debe de producir interferencia durante el registro.

3.2.1.1 Electroodos adheridos

Con este tipo de electrodos de superficie es fácil conseguir registros libres de distorsión. Estos consisten en pequeños discos metálicos, de unos 5mm de diámetro que se adhieren al cuero cabelludo por medio de una pasta a base de bentonita¹⁰. Esta pasta conductora se utiliza para fijar al electrodo por varias horas, sin mayores problemas. Su resistencia cuando son correctamente aplicados suele ser entre unos 1 y 2K Ω , es decir poseen resistencia baja. Un tipo especial de electrodo adherido es el modelo introducido por Cooper y Walter (1957), que consiste en un capuchón de goma con un electrodo de plata clorada en el interior. Este tipo especial de electrodo no necesita pasta para adherirse.

¹⁰ Bentonita es un material mineral (arcilla) que posee gran poder decolorante y absorbente.

3.2.1.2 Electroodos de contacto

Son electroodos que deben ser sujetados sobre el cráneo por medio de bandas elásticas para sostenerse, consisten en un tubo de plata enroscado a través de un soporte de plástico, el cual se coloca debajo de la banda elástica. El extremo superior queda libre y sobre él se aplica una pinza tipo cocodrilo, u otro sistema, que lo conecta a la caja de electroodos. Este tipo de electroodos tiene el inconveniente de que los movimientos de cabeza, al desplazarlos, originan abundantes y molestas alteraciones o artificios en el registro. Además el casco de goma que los sujeta, al cabo de algunos minutos, ejerce una presión sobre el cráneo que molesta al paciente. Si el paciente está acostado no permite colocar los electroodos occipitales. Por lo anterior esto no es recomendable para estudios de trazados de sueño.

3.4.2 Electroodos especiales (Basales)

Los anteriores tipos de electroodos mencionados, de los cuales el más adecuado posiblemente es el adherible con pasta de bentonita, registran la actividad eléctrica del cerebro sólo a nivel de la convexidad del cráneo. Sin embargo, queda por explorar la cara interna del hemisferio cerebral y su base. Para solucionar este inconveniente se han creado electroodos para solucionar este inconveniente. La cara interna del cerebro es imposible de explorar sin embargo, la parte basal tiene vías de acceso que permiten su exploración con electroodos especialmente diseñados para ello. De esta manera se han introducido electroodos especiales, como el faringeo, el esfenoidal y el timpánico, que se denominan genéricamente “electroodos basales” porque exploran la base de los lóbulos frontales y temporales del cerebro.

3.4.2.1 Electrodo faríngeo

Algunos son dobles y son introducidos a través de las fosas nasales, registran la actividad eléctrica de la base del cerebro; tienen una doble curvatura, primero hacia arriba y luego hacia fuera y fueron diseñados por Roubicek y Hill (1948), por Gastaut (1948) y por Mac Lean (1949). Consisten en un tubo de plata de unos 12.5 Cms de largo x 2.5 mm de grosor, contorneado y aislado excepto en el extremo. Entre los inconvenientes que presenta tenemos que no siempre es posible obtener registros adecuados debido a que la mucosa faríngea no permite lograr una resistencia baja. Es útil solo en casos muy especiales.

3.4.2.2 Electrodo timpánico

Electrodo basal diseñado por Arellano (1949). Consiste en un tubo de plata de 6 cm de largo x 2.5 mm de espesor, contorneado en forma de S para adaptarlo a la curvatura del conducto auditivo externo. El electrodo se pone así en contacto con el tímpano y registra la actividad eléctrica de la base del lóbulo temporal. Igual que en el anterior surgen problemas cuando no se logran obtener resistencias adecuadas en el electrodo.

3.4.2.3 Electrodo esfenoideal

Es también llamado "Ala magna", fue construido especialmente para explorar la cara basal de la parte anterior lóbulo temporal, y es posiblemente el electrodo de elección entre los basales. Fue diseñado por Kristensen y Reyes y experimentado por Jasper (1949). Este electrodo consisten en una aguja hipodérmica de acero de 5cm de largo y 0.6 mm de diámetro, aislada,

excepto en su punta, por un baño de baquelita, en cambio, utiliza un fino alambre-electrodo con su punta aislada. Este electrodo es de los más recomendables.

3.4.3 Electroodos neuroquirúrgicos

Pueden ser duros, corticales o intracerebrales, y son utilizados a la hora de las intervenciones quirúrgicas.

3.4.3.1 Electroodos duros

Introducidos por un investigador llamado Herbert Jasper en 1941, los electroodos duros se usan muy poco en la actualidad . Registran la actividad eléctrica del cerebro a través de la duramadre. Fueron superados por los electroodos corticales.

3.4.3.2 Electroodos corticales

Registran la actividad eléctrica del cerebro al ponerse en contacto directo con éste, en la craniotomía. Al principio se aplicaban directamente sobre el cerebro expuesto, pero posteriormente se mejoró la técnica al diseñar un platillo de lucita que contiene de 10 a 16 electroodos colocados en una bisagra universal que permite orientarlos en cualquier dirección. El platillo debe ser afirmado al hueso del cráneo. El contacto con la corteza cerebral se hace con unas bolitas de plata sujetadas por un resorte liviano, esto ayuda para que el cerebro expuesto no sufra presión ni se produzcan daños en la corteza cerebral.

3.4.3.3 Electrodoos profundos (intracerebrales)

Es la expresión mas moderna y promisoría para el estudio de los epilépticos. Existen dos tipos de electrodoos para registrar la actividad eléctrica subcortical del cerebro. Unos son de implantación temporal, esto quiere decir que se introducen mientras se realiza el registro y luego se retiran en una sola intervención. Los otros son conocidos como de implantación crónica debido a que se insertan y deben permanecer en el lugar durante tiempo prolongado. El registro intracerebral recibió el nombre de estéreo encefalografía por los científicos Bancaud y Dell.

Los electrodoos intracerebrales fueron modificados y mejorados a lo largo de los años, y se aprovechó su diseño para registrar otras variables además de la bioeléctrica. Así, por ejemplo se han diseñado electrodoos capaces de medir la concentración de CO₂ y O₂ cerebral, la impedancia tisular¹¹, la temperatura tisular, etc.

3.5 Sistemas de posicionamiento de electrodoos

En el primer congreso internacional de Electroencefalografía celebrado en Londres en 1947 se comisionó a Herbert Jasper para establecer una norma internacional sobre el posicionamiento de los electrodoos de superficie en la EEG. Jasper presento los resultados de sus estudios en el segundo congreso de Electroencefalografía en 1949. Para estas alturas ya había estudiado y comparado los sistemas de colocación de varios centros de investigación de todo el mundo. Aprovechó las ventajas de cada uno y fijó los principios que lo llevaron a establecer el método conocido como "10-20". Este es el sistema al

¹¹ Tisular referente a tejidos.

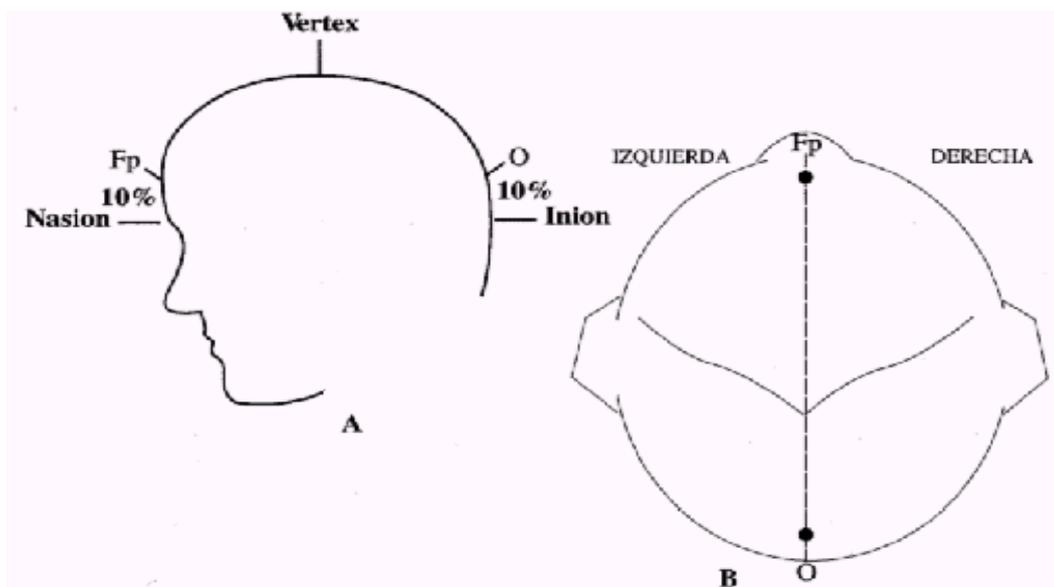
que prestaremos atención a lo largo de la investigación por ser el más difundido en la actualidad.

3.5.1 El método internacional de posicionamiento “10 – 20”

El procedimiento a seguir con este método es el siguiente:

- a) Se mide la distancia entre el nasion y el inion pasando por el vertex. El 10% de esta distancia sobre el nasion señala el punto Fp (Frontal Polar). El 10% de esta distancia sobre el inion señala el punto O (Occipital) (figura 12)
- b) Entre los puntos Fp y O se sitúan otros tres puntos espaciados a intervalos iguales (entre cada dos el 20/o de la distancia nasion-inion). Estos tres puntos son, de delante hacia atrás, el Fz (Frontal) el Cz (Central o Vertex) y el Pz (Parietal) (figura 13).

Figura 12. Punto frontal polar (Fp), punto occipital (O)



- c) Se mide la distancia entre los puntos preauriculares (situados delante del pabellón de la oreja) pasando por el vertex(Cz). El 10% de esta distancia marca la posición de los puntos temporales mediales, T3 (izquierdo) y T4 (derecho) (figura 14).

Figura 13. Fz Punto frontal, Cz punto central, Pz punto parietal

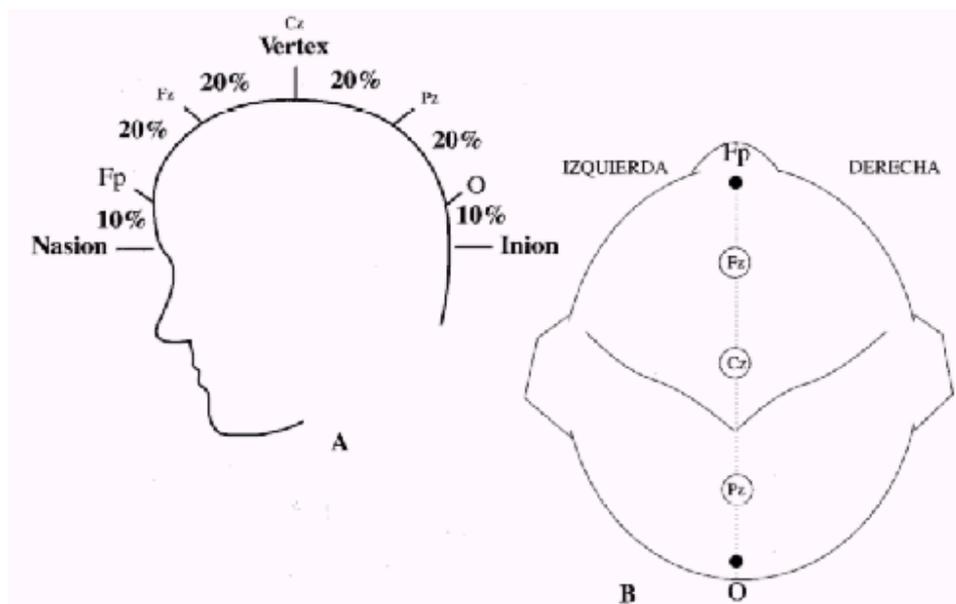
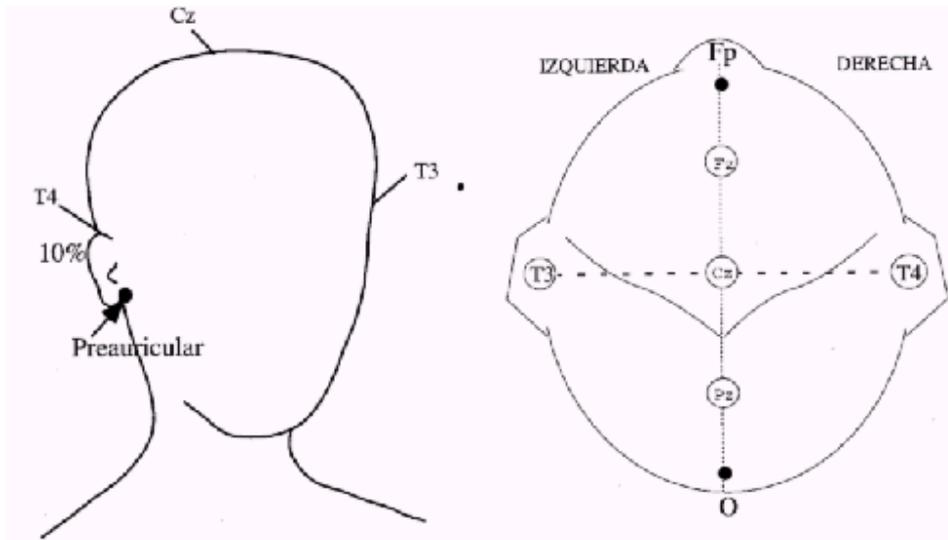


Figura 14. Medición coronal lateral. Electrodo T3 y T4



- d) Un 20% de la medida por encima de los puntos temporales medios se colocan los electrodos C3 (izquierda) y C4 (derecha). El vertex es ahora el punto de intersección entre la línea antero posterior y la línea coronal lateral (figura 15).
- e) Los electrodos F3 y F4 (izquierda y derecha respectivamente) están situados de forma equidistante entre el punto frontal medio (Fz) y la línea de electrodos temporales (figura 16).
- f) Los electrodos P3 y P4 (izquierda y derecha respectivamente) equidistan entre el punto P medio y la línea de los electrodos temporales (figura 17).
- g) Se mide la distancia entre el punto medio Fp y el punto medio O a través de T3. el 10% de esta distancia a través de Fp corresponde a los electrodos FP1 y FP2. El 10% de esta distancia a través de O corresponde a los electrodos O1 y O2.
- h) El electrodo F7 y F8 se sitúan en el punto medio entre Fp1 y T3, y Fp2 y T4.

Figura 15. Electrodo C3 y C4

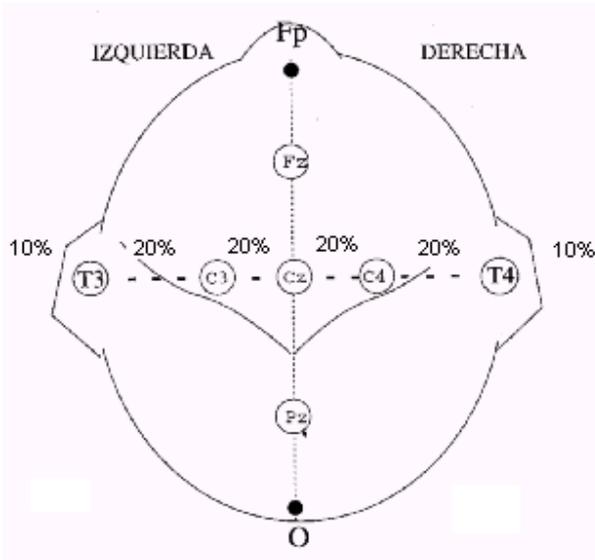
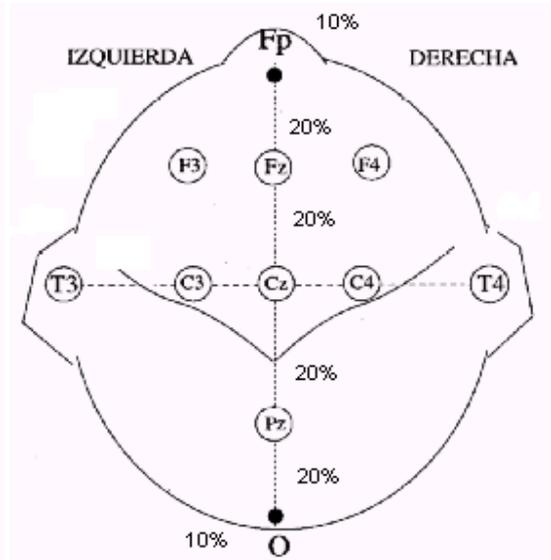


Figura 16. Electrodo F3 y F4



- i) El electrodo T5 y T6 se sitúan en la línea media entre T3 y O1, y T4 y O2. (figura 18).
- j) A un 10% de los temporales T3 y T4 se sitúan los electrodos auriculares A1 y A2 respectivamente (figura 19).

Figura 17. Ubicación de los electrodos P3, P4

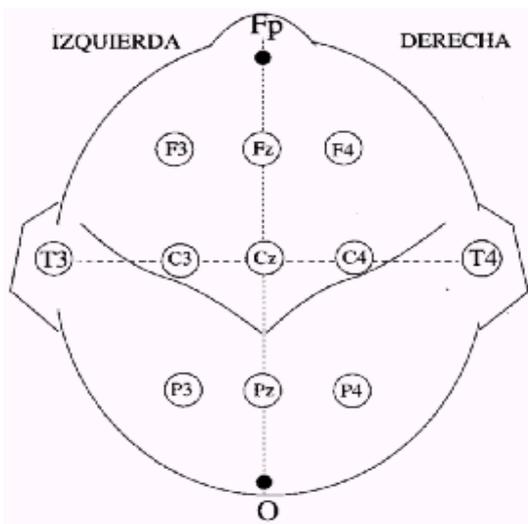
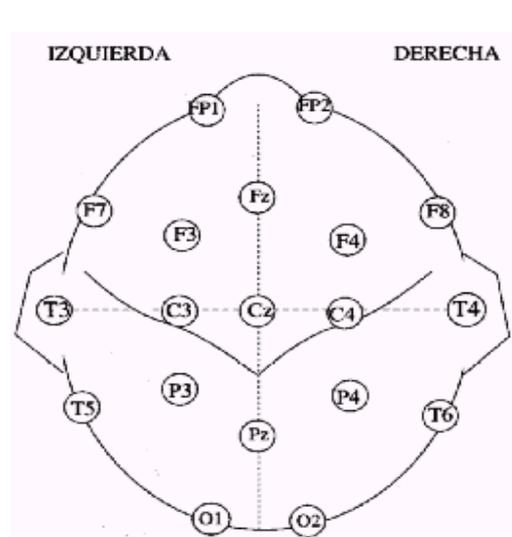
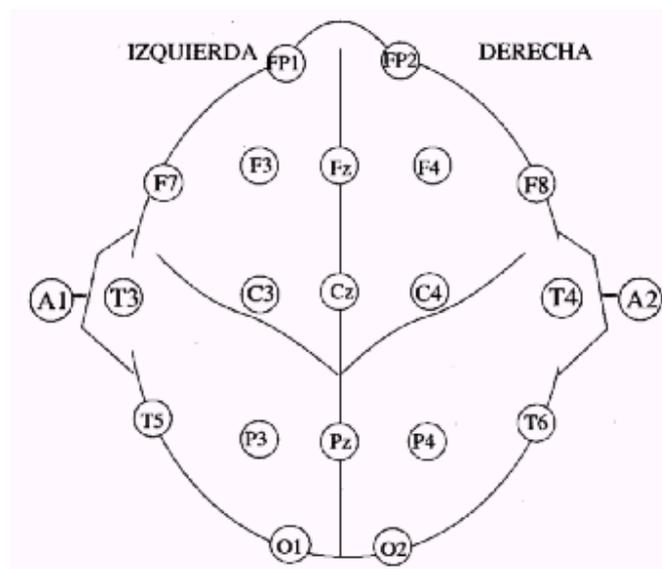


Figura 18. Ubicación de los electrodos F7, F8, T5, T6, FP1, FP2, O1, O2



Como regla general los electrodos del lado izquierdo llevan numeración impar y los de lado derecho llevan par. Además como se ya se dijo, los electrodos de la línea media reciben el subíndice z (por zero en inglés).

Figura 19. Situación de los electrodos A1 y A2



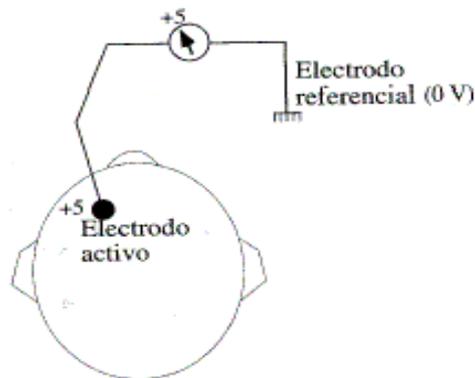
3.6 Montajes de un EEG

Como se mencionaba en la sección anterior para realizar el registro electroencefalográfico se procede a colocar los electrodos en posiciones específicas en el cráneo (según sistema diez-veinte en este caso), sin embargo esto no es suficiente. Cada electrodo es un punto de registro y para poder generar una diferencia de potencial necesita de dos terminales, una de registro y otra de referencia. Es en este momento donde toca elegir entre dos tipos de registros, el Monopolar y el Bipolar. Esta decisión se toma dependiendo de la cantidad de canales disponibles y de las necesidades de quien realiza el estudio para efectuar un diagnóstico.

3.6.1 Registros monopolares o referenciales

Se considera la señal de cada uno de los electrodos independientemente de la señal de los demás, en esta situación el electrodo que registra se llama “electrodo activo” y la otra línea de entrada al equipo proviene de un electrodo llamado “electrodo de referencia”. (ver figura 20)

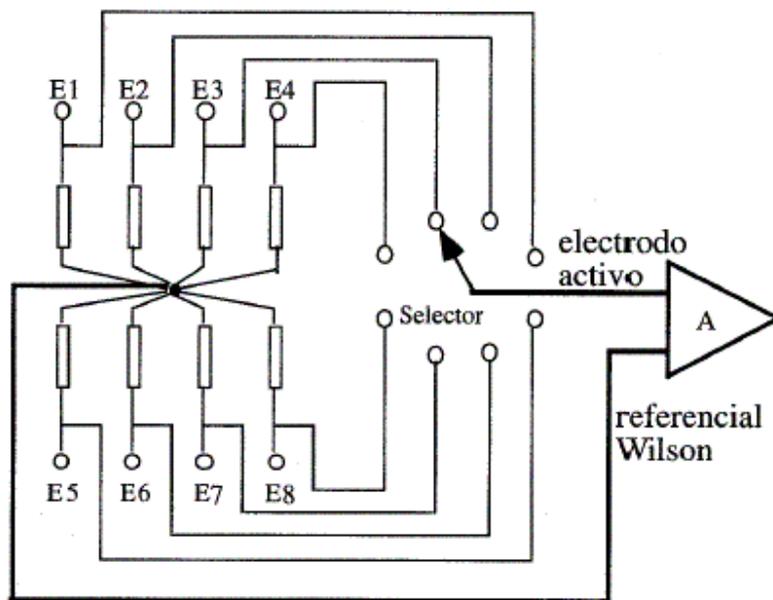
Figura 20. Esquema que representa el montaje para un registro monopolar



Teóricamente el electrodo de referencia debe estar a cero, sin embargo en la práctica generalmente se encuentran valores aproximados a este, al colocar el electrodo en el lóbulo de la oreja, en el mentón o en el mastoides. Otra forma de obtener un electrodo referencial es reunir todos los demás electrodos entre sí, cuyo resultado será un punto con un potencial igual a la suma de los potenciales de cada uno de los demás electrodos. Posiblemente esta suma será cero con lo que obtendrá ya el punto que buscamos. Sin embargo podemos observar que esto solo nos permitiría registrar el potencial de un electrodo a la vez, ya que todos los demás estarían cortocircuitados entre sí. Para evitar este problema se introdujo un sistema llamado “Wilson”, el cual indica que la interconexión entre todos debe realizarse a través de resistencias de valor moderadamente bajo (entre 1 y 1.5 MOhms) (ver figura 21). De esta

forma podemos obtener tantos pares activo-referencial como se desee, siempre limitados por el número de canales del equipo. Existen otras formas de referencia diferentes que tienen como principal objetivo atenuar señales que no se desean en el registro de EEG. Por ejemplo en los registros referenciales es muy común que se introduzcan interferencias por la señal electrocardiográfica y para atenuarla se colocan dos o mas electrodos en áreas próximas al corazón y se unen entre sí. De esta forma se cortocircuita la señal electrocardiográfica con lo que esta se atenúa en gran manera.

Figura 21. Esquema del sistema Wilson en el registro de EEG. (E1-E8 electrodos, A Amplificador)

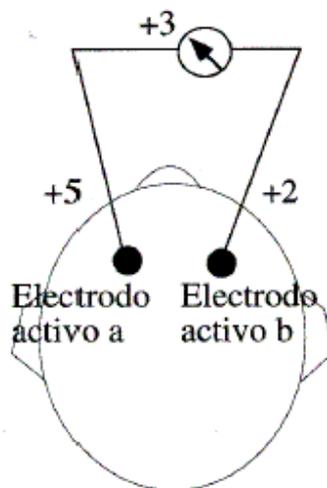


3.6.2 Registros bipolares

En los "Registros Bipolares" se toman parejas de electrodos, dos a dos y se registra la diferencia de potencial entre cada par de puntos como se muestra en la figura 22 siendo los dos electrodos de cada pareja activos.

De acuerdo con lo anterior es posible realizar una gran cantidad registros bipolares diferentes, tantos como parejas diferentes de electrodo puedan formarse en 8, 12, 16, etc. canales de registro simultaneo existan en el equipo. Con lo anterior podemos observar que existe una gran cantidad de combinaciones de las cuales no todas rinden información importante para un diagnóstico, por lo anterior es necesario seleccionar de todas las combinaciones, las mas interesantes. Cada una de las combinaciones seleccionadas es un "Montaje".

Figura 22. Montaje para registro bipolar. Electrodo (a) a un potencial de +5 volts y (b) a +2 Volts, registrándose así $(+5) - (+2) = 3$ volts

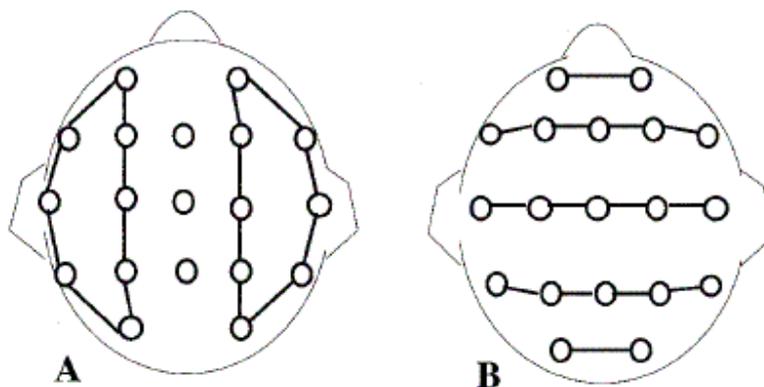


Hablando de montajes podemos realizar montajes a larga distancia y montajes a corta distancia, los primeros tienen lugar cuando el registro se realiza entre electrodos no contiguos, el montaje de corta distancia se realiza sobre electrodos vecinos.

Por otro lado también la Federación Internacional de EEG y Neurofisiología los ha clasificado en Longitudinales y Transversales.

En los Montajes Longitudinales se registra la actividad de pares de electrodos dispuestos en sentido anteroposterior (de adelante para atrás) de cada mitad del cráneo. En los Montajes Transversales se realizan registros de electrodos situados transversalmente según los planos sagital, anterior, medio o posterior. En la figura 23 se muestra un diagrama que explica estos planos junto con la disposición de los dos tipos de montaje.

Figura 23. Montaje A, longitudinal, bipolar; B transversal bipolar



Se debe tener en cuenta que los anteriores no son los únicos montajes existentes, también existen otros muy utilizados como las Z del estándar cero o las triangulaciones, sin embargo no están regulados por la Federación Internacional. (para mayor información consultar la referencia <http://www.aan.com/>).

3.6.3 Recomendaciones para el diseño de montajes

Para el diseñar montajes se deben considerar los aspectos siguientes:

- Registrar como mínimo 8 caracteres.
- Utilizar el sistema 10-20 para la colocación de electrodos.
- Cada sesión rutinaria de registro de EEG debe incluir como mínimo un montaje de cada uno de los tipos principales: referencial, longitudinal bipolar y transversal bipolar.

Además se incluye la tabla II como referencia para observar los montajes utilizados para adultos con los 16 canales recomendados con por la "*American Electroencephalography Society*". Los canales restantes a los utilizados en la tabla pueden ser utilizados para registrar otro tipo de señales como electrocardiografía, movimientos oculares, respiración, o electromiografía.

Tabla II. Montajes recomendados para el eeg. Lb, montaje longitudinal; tb, montaje transversal bipolar, r, montaje referencial

Canales	LB	TB	R
1	FP1-F3	FP1FP2	FP1-A1
2	F3-C3	F7-F3	FP2-A2
3	C1-P3	F3-Fz	F3-A1
4	P3-O1	Fz-F4	F4-A2
5	FP2-F4	F4-F8	C3-A1
6	F41-C4	A1-T3	C4-A2
7	C4-P4	T3-C3	P3-A1
8	P4-O2	C3-Cz	P4-A2
9	FP1-F7	Cz-C4	O1-A1
10	F7-T3	C4-T4	O2-A2
11	T3-T5	T4-A2	F7-A1
12	T5-O1	T5-P3	F8-A2
13	FP2-F8	P3-Fz	T3-A1
14	F8-T4	Pz-P4	T4-A2
15	T4-T6	P4-T6	T5-A1
16	T4-O2	O1-O2	T6-A2

3.7 El electroencefalógrafo

La actividad eléctrica del cerebro, captada por los electrodos, es amplificada y registrada en forma permanente por el electroencefalógrafo. Este consiste en un número variable de canales amplificadores. Lo anterior es debido a que los registros de la actividad cerebral son del orden de los micro voltios y es necesario amplificarles considerablemente.

De lo anterior se puede identificar que el módulo principal del aparato es el canal amplificador. El número de canales de un equipo varía entre 8 y 16. Para la práctica la Sociedad Internacional de Electroencefalografía y Neurofisiología Clínica recomienda un número mínimo de 8 canales. Además del módulo de amplificación el electroencefalógrafo contiene una fuente de energía, un sistema de calibración y controles que permiten manejar todos los canales del aparato de una forma centralizada y práctica.

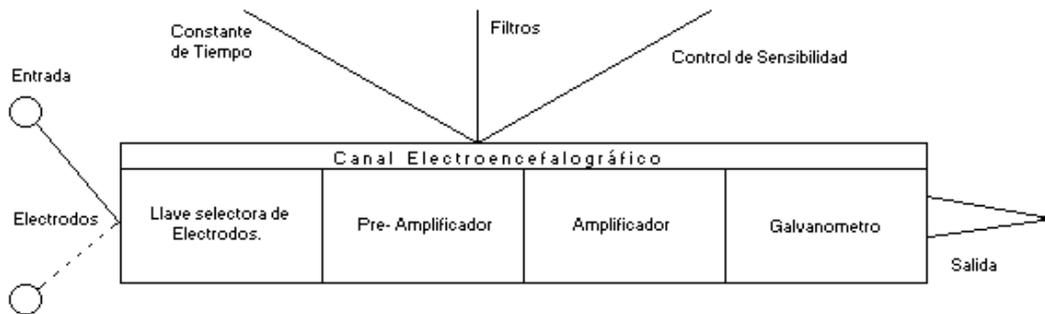
3.7.1 El canal electroencefalográfico

Las partes de un canal electroencefalográfico son:

- a) Las llaves selectoras de electrodos.
- b) Un módulo de preamplificación.
- c) Un módulo de Amplificación.
- d) Un galvanómetro e inscriptor.

La figura 24 esquematiza el canal electroencefalográfico y sus distintos controles.

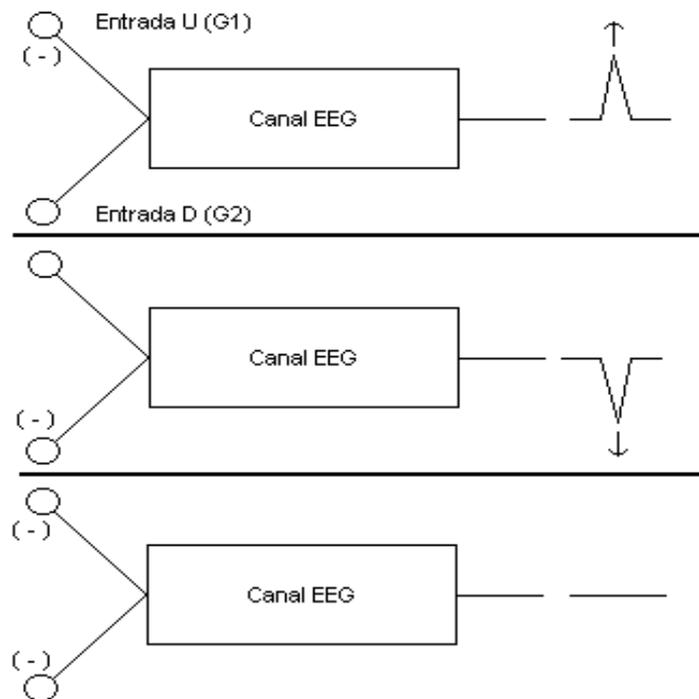
Figura 24. El canal electroencefalográfico y sus partes



Cada canal recibe dos entradas y tiene una sola salida. La doble entrada a los amplificadores balanceados requiere que los voltajes de dos electrodos sean comparados en cada canal. Estas dos entradas son denominadas U y D (por Marshall, 1961), que representan la entrada en la que cuando es más negativa que D ocasiona un desplazamiento hacia arriba del inscriptor de salida; por otro lado cuando la entrada D es más negativa, la inscripción se hace hacia abajo. Cuando ambas entradas reciben el mismo voltaje y polaridad no hay inscripción. Ver figura 25.

Las entradas U y D son mejor conocidas como “G1” y “G2” respectivamente, además por convención, en representaciones gráficas la entrada U se dibuja con una línea continua y la entrada D se representa con una línea punteada. Se debe tener cuidado al manejar los términos de deflexión e inflexión debido a que dichas acciones son relativas, esto quiere decir que cuando se maneja el amplificador balanceado se puede obtener inflexiones hacia arriba o hacia abajo y ambas pueden ser a causa de una polaridad negativa. Estos principios son fundamentales y forman parte esencial de la presentación del diseño del modelo de hardware en el siguiente capítulo. Así mismo estos conceptos también son útiles para el diseño de montajes (tema tratado anteriormente).

Figura 25. Cada canal electroencefalográfico tiene dos entradas y una sola salida. Cuando la entrada en U es más negativa que la de D, la deflexión del inscriptor es hacia arriba (primer caso). Cuando la entrada D es más negativa, la deflexión es hacia abajo (segundo caso). Cuando ambas entradas reciben el mismo voltaje y polaridad, no hay deflexión del inscriptor (último caso)



Con lo expuesto hasta el momento y recordando un poco de lo mencionado en el segundo capítulo, sobre métricas, podemos puntualizar en que todo registro de EEG tiene como base la captura de una diferencia de potencial que es precisamente lo que se puede medir al hablar de actividad cerebral.

De esta forma, al haber tratado los puntos clave en el diseño y operación de sistemas electroencefalográficos podemos comenzar a presentar las partes innovadoras de esta investigación que introducen conceptos de migración

del sistema analógico que se acaba de mostrar, hacia un nuevo mundo que induce tecnología de punta a los viejos sistemas. Es bajo esta visión que en la segunda mitad del siglo XX con el auge de la tecnología digital y de información industrias alrededor del mundo iniciaron sus investigaciones sobre la adhesión de tecnología a los sistemas mecánicos que se habían desarrollado desde la revolución industrial, las ciencias biomédicas no fueron la excepción, igualmente se comenzó a estudiar la forma en la que se podía sumar tecnología digital a los sistemas médicos, al mismo tiempo que surgía la ingeniería biomédica. Es así como nuestra investigación inicia a dirigirse al desarrollo de tecnología digital y de información aplicado a los sistemas de EEG, que acabamos de tratar en este capítulo. De aquí en adelante nos dedicaremos al desarrollo de un modelo de Hardware y Software aplicando conceptos avanzados y aprovechando al máximo las ventajas que nos presentan los sistemas digitales y de información. En el capítulo siguiente realizaremos el diseño de la interfaz de hardware que nos permitirá interconectar un sistema de EEG con un computador, así como dar valor agregado a este diseño al plantear la inclusión, de características especiales que actualmente pueden encontrarse sin mucha dificultad en el mercado de tecnología digital. Por otro lado en el capítulo cinco se presentará el modelo de software que pretende al igual que en el hardware implementar conceptos innovadores de la ingeniería para realizar una mejora considerable a los sistemas de diagnóstico que actualmente se conocen.

4 DISEÑO DEL MODELO: GESTIÓN DEL HARDWARE

El relativamente reciente desarrollo de los registros neurofisiológicos con la necesaria amplificación y filtrado de las señales resulta en un vasto incremento de la cantidad de datos que se pueden adquirir en un estudio neurofisiológico. Un análisis sencillo muestra que para aprovechar la cantidad de datos que nos es posible recolectar, es necesaria una técnica de automatización. Citando la forma en que procederíamos a realizar los estudios sin la ayuda de la tecnología tenemos que al capturar las señales biológicas procederemos a registrarlas a con la ayuda de la pantalla de un osciloscopio y luego con una regla tendremos que medir las magnitudes de interés en la imagen capturada. La inhabilidad de tratar estas grandes cantidades de datos y la necesidad de cuantificarlas nos conducen a la rápida aceptación y el uso de computadores en la neurofisiología.

Sin embargo también debemos estar conscientes de la situación económica del país, y de la realidad de la cual dependemos al pensar que estamos amarrados a la cantidad de dinero disponible para adquirir tecnología. De todas formas existen mas consideraciones que se deben tener a la hora de decidir ampliar nuestros horizontes hacia la nueva tecnología: (1) la razón de datos que vamos a manejar en los diagnósticos; (2) El conocimiento que posean los usuarios sobre la tecnología digital; (3) El tamaño de los programas que se utilizan para analizar los datos; (4) experiencia y disponibilidad de computadores; (5) soporte local para mantenimiento de los equipos, disponibilidad de repuestos, periféricos y actualizaciones. (6) por ultimo el tipo de tecnología que están usando los otros investigadores para realizar sus estudios. Cada uno de estos puntos tiene un impacto directo en la implementación de tecnología en los equipos de diagnóstico actuales.

Pero antes de considerar el rol de las computadoras, debemos cual es el objetivo de las neurociencias. En el estudio del sistema nervioso central, nosotros podemos nosotros podemos contemplar su operación como en un nivel micro electrónico, que es de interés particular en esta investigación, fisicoquímico, anatómico o fisiológico, todos relacionados entre sí. La exploración del cerebro o el sistema nervioso debe ser guiada por algunos principios importantes (Szentagothai & Arabib, 1975); (1) La teoría debe estar orientada a la acción, que es la que trata de explicar la interacción con el ambiente en el que el sistema se desarrolla; (2) se debe tener claro que las señales que luego se convierten en percepciones no es importante solo el “que” porque este esta relacionado con el ambiente en el que actúa este es el “donde”; (3) un sistema adaptativo como el cerebro debe ser capaz de relacionar datos sensoriales de manera que facilita la evolución de un modelo de estudio. (4) la organización del sistema debe ser jerárquica, con los adecuados ciclos de retro alimentación para coordinar los muchos subsistemas. (5) el cerebro puede ser visto como computadora de procesamiento en capas (capas corticales) somatotópicamente organizadas.

Por ultimo antes de iniciar con la presentación del modelo de hardware podemos mencionar como un aporte de este proyecto que es muy importante a la hora de construir hardware para este tipo de sistemas que, con base en experiencia de instituciones y personas desarrolladas en el área se dice que cualquier dispositivo que existe en el mercado y puede ser comprado no debe ser construido, esto nos conduce a mostrar un nuevo enfoque de la construcción de sistemas como este que consisten en utilizar la mayor parte de componentes que ya existen creados en el mercado, para dedicar menos esfuerzo a la construcción de dispositivos y mas al análisis de la información adquirida para resolver y dar mayores aportes en el diagnóstico a los usuarios expertos del área.

4.1 Modelo global del sistema. El viaje de un electrón

Se quiere dar a conocer de una forma general el modelo propuesto para solucionar el problema planteado con la nueva visión de la neurofisiología, la necesidad de proveer automatización a la investigación neurofisiológica.

Iniciaremos mostrando un esquema global del modelo y su descripción, en las secciones siguientes vamos a entrar en detalle sobre cada una de las fases del modelo, para describir el proceder de las señales bioeléctricas se presenta lo que se ha llamado “el viaje de un electrón” de forma metafórica para comprender todo el viaje de la señal que se analiza.

En un modelo de sistemas de este tipo es necesario considerar que el nivel mas bajo del modelo es la clásica descripción de una caja negra donde no sabemos que pasa dentro sino solamente conocemos las entradas (variables endógenas) y el resultado de dichas entradas (variables exógenas) figura 26.

Figura 26. Esquema de nivel 0 del sistema de EEG



Es dentro de esta caja negra que se desarrollan todos estos procesos de interés en la investigación. Sin embargo vale la pena dedicar un poco de espacio en esta investigación para describir las clases de entradas al sistema,

en las que estaremos profundizando en la sección 4.1.1, como ya habíamos mencionado antes el sistema de EEG es alimentado por las señales bioeléctricas que provienen de los generadores del cerebro. Como es de todos sabido en cualquier lugar donde existe campo eléctrico existen ciertos componentes atómicos que intervienen en la formación de las líneas de campo, dichos componentes son los electrones. En palabras más sencillas una señal no es más que una gran afluencia de electrones que se trasladan de un lugar a otro bajo los efectos del campo eléctrico y otras variables situacionales. De lo anterior hemos extraído el nombre de esta sección “El viaje de un electrón” para describir todo el camino por el cual pasa la señal hasta llegar a un PC donde puede ser procesada y analizada.

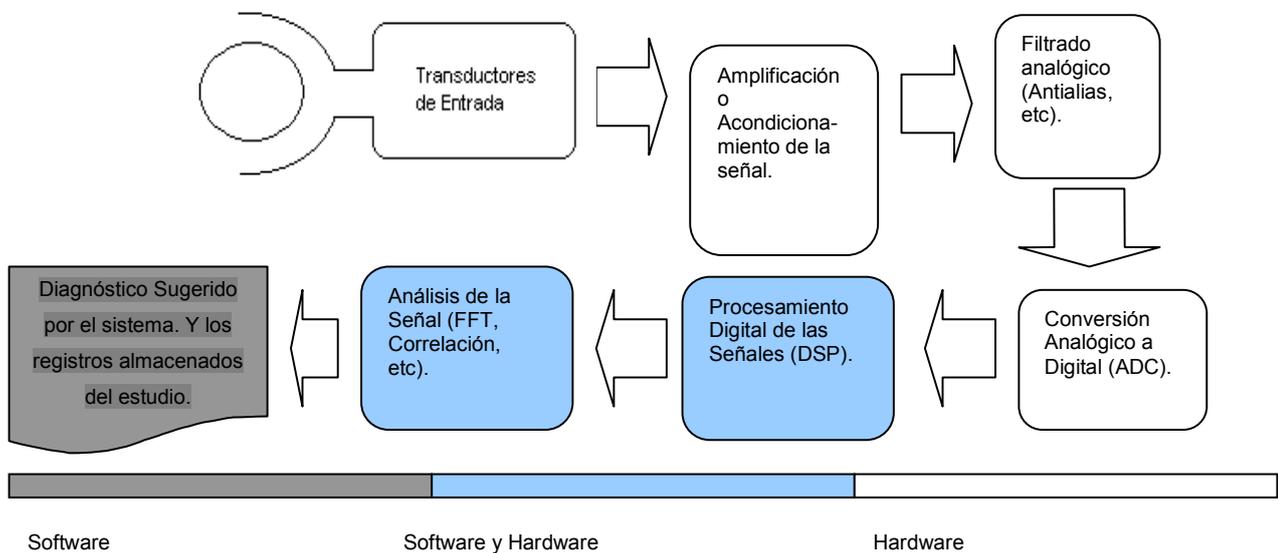
Todo el proceso inicia al capturar las señales que provienen del cerebro (capítulo 3 sección 3.2) a través de los transductores que hemos llamado electrodos, es conveniente que de ahora en adelante se considere a una señal como un tren de electrones que viaja por muchas vías con el fin de llevar a los electrones a sus diferentes destinos (las terminales nerviosas). Luego la señal capturada es amplificada y registrada como se mencionó en la sección 3.7 capítulo 3. En esta etapa la señal es tratada en el canal electroencefalográfico donde se realiza la amplificación, como se mostrará mas adelante. En condiciones de un esquema clásico, la señal amplificada a través de sucesivas etapas activa el oscilógrafo que a su vez hace mover el inscriptor. En el caso de esta investigación no existe un inscriptor ni existe un sub-sistema de calibración del mismo debido a que el objetivo de este es enviar toda la información que el inscriptor es capaz de graficar en papel, hacia una pantalla de computadora. En otras palabras, es en este punto donde se marca la diferencia entre lo que he llamado la “era analógica” de la EEG y la “era digital” de la EEG, nuestro objetivo es lograr registrar lo que anteriormente se guardaba en un papel, en un computador, aprovechando todas las facultades que este nos provee, de las

cuales las mas importantes son (1) El almacenamiento masivo, que da la capacidad de almacenar gran cantidad de estudios clasificados por varias dimensiones o perfiles de pacientes. (2) La portabilidad de los estudios, que permite tomar un estudio y llevarlo en un disquete, CD o zip drive. (3) El escalabilidad, que permite ir incrementando las capacidades y características de nuestros sistemas de EEG al complementarlo con otros estudios. (4) No podemos dejar por un lado la mayor de las conveniencias que presenta la realización de estos estudios en una PC, el hecho de la gran cantidad de cálculo y/o procesamiento que se le puede dar a una señal para presentar resultados de mayor precisión y poder realizar otro tipo de análisis de mayor complejidad tal como el análisis de patrones para determinar una patología de forma casi automática.

El hecho de hablar de una “era digital” implica varios cambios en los modelos clásicos de la EEG. El termino digital implica que luego de realizar la amplificación de las señales en manos de los canales amplificadores se procede a conducir los electrones a través de un viaje que les muestra otra forma de llegar a su destino. En primer plano una vez la señal amplificada y limpia es tomada por sistemas de conversión de Análogo a Digital (de aquí en adelante llamados solo ADC), los cuales realizan un trabajo espectacular con la ayuda de la matemática y la estadística al muestrear estas señales y dejarlas en un idioma en que las entradas de la PC (I/O de Input/Output) puedan entender. Todo el trabajo de la conversión, se sugiere se realice por medio de tarjetas que ya se venden fabricadas en el mercado, llamadas tarjetas de adquisición de datos, las cuales presentan varias características de configuración que nos pueden ayudar a controlar otros aspectos de los estudios, no solo procesamiento de señales digitales sino también análisis. De este dispositivo se alimenta la entrada de la PC que de aquí en adelante es controlada y administrada vía software lo que indica que puede manejar

varios otros dispositivos de propósito general (comunicaciones utilizando *DMA*, etc.) dentro de la PC para proveer un rendimiento aceptable al sistema. Para dar una descripción un poco mas detallada del modelo se presenta un esquema en la figura 27.

Figura 27. Diagrama de bloques que representa las etapas básicas del modelo de electroencefalografía



De cada una de estas etapas se hablará a continuación o en el caso de los dispositivos que ya se han tratado (electrodos, etc.) solo se hará referencia. Lo que vale la pena aclarar es que este capítulo solo se dedicará a todo lo que es hardware y algunos conceptos importantes de Procesamiento Digital de Señales, mientras que en el capítulo 5 se expondrá el modelo de software para el sistema.

La tabla III presenta a continuación una relación de correspondencia entre las etapas que hemos definido para nuestro sistema y los dispositivos que son necesarios para realizar las tareas específicas de cada etapa.

Tabla III. Etapas del modelo del sistema y dispositivos asociados a cada etapa

Etapas del Modelo.	Dispositivo asociado.
Transductores de entrada.	Electrodos.
Amplificación o Acondicionamiento de la Señal.	Canal Electroencefalográfico, a través de amplificadores balanceados. (Sección 3.7.1)
Filtrado analógico (Antialias, etc.).	Canal Electroencefalográfico, Filtros Analógicos.
Conversión de Analógico a Digital.	Convertidores analógico-Digitales (ADC) a menudo integrados en las Tarjetas de Adquisición de Datos.
Procesamiento Digital de las señales (DSP de sus siglas en ingles.).	Procesadores dedicados a esta tarea o el propio procesador de la PC con software que realiza el proceso. También es común encontrarlos inmersos en los dispositivos de adquisición.

4.1.1 Señales biomédicas

Debemos tener claro que aunque en esta investigación se ha hecho énfasis en las señales eléctricas, estas no son los únicos tipos de señales que existen pues al describir una señal como “fenómeno que transporta información” nos podemos dar cuenta que al pensar de esta manera estaríamos cometiendo un error. De esta forma tenemos que una señal es cualquier evento que transporta información. A continuación, en la tabla IV, se presenta una breve descripción de los casos de señales biomédicas más comunes y estandarizados.

Tabla IV. Tipos de señales biomédicas

Tipo de Señal	Fuente	Descripción
Señal de Bioimpedancia.	Estas señales se generan artificialmente al inyectar carga a los tejidos.	La impedancia eléctrica en los tejidos muestra información importante a cerca de los tejidos. Información tal como, presión sanguínea, composición, volumen, actividad endocrina, actividad del sistema nervioso autónomo y otras

Señales Bioacústicas.	Fenómenos que generan ruido bioacústico como flujo de sangre del corazón y válvulas, flujo de aire, etc.	Muchos fenómenos biomédicos generan ruido acústico, lo cual produce señales de la misma clase, que al analizarlas proveen información a cerca del fenómeno que produce el ruido. Para la captura de estas señales se utilizan transductores acústicos como micrófonos, acelerómetros, etc.
Señales Biomagnéticas.	Órganos como el Corazón y el Cerebro.	Varios órganos como el cerebro y el corazón generan campos magnéticos extremadamente débiles. La medición de tales campos provee información que no está incluida en otras bioseñales.
Señales Biomecánicas	Áreas del cuerpo humano donde se genera alguna actividad mecánica.	Son difíciles de captar y se necesitan transductores especiales debido a que se deben de registrar en el punto exacto donde se originan y no se manejan como el sonido, la electricidad o el magnetismo.
Señales Bioquímicas	Producidas al realizar mediciones químicas sobre tejido vivo o en laboratorio clínico.	Estas señales son generadas por los procesos bioquímicos de los cuales se puede recoger información que se puede medir y comparar. Señales de este tipo son: La medición de la concentración de iones dentro y en las vecindades de una célula, presión parcial de oxígeno y dióxido de carbono en la sangre, etc.
Señales Bioópticas.	Son resultado de funciones ópticas de los sistemas biológicos que ocurren naturalmente o inducidas para la medición.	A través de estas señales se puede obtener, por ejemplo, el estado de un feto midiendo la fluorescencia del líquido amniótico, y otros estudios que actualmente se pueden realizar al aprovechar las características de la fibra óptica.

Señales Bioeléctricas.	El potencial transmembrana (ver cap 2 sección 2.2.1.1.)	Probablemente las señales bioeléctricas sean las señales más importantes y mas fáciles de aprovechar por la tecnología. El hecho que los sistemas mas importantes poseen células excitables hace posible el uso de estas señales para estudiar y monitorear las principales funciones de estos sistemas.
------------------------	---	--

4.1.2 Transductores de entrada

Lo que en esta sección hemos denominado transductor de entrada, es simplemente el nombre genérico que se utiliza para denominar todos aquellos dispositivos que convierten energía o información del mundo real de una forma a otra. Estos se utilizan ampliamente en el campo de las mediciones porque no todas las cantidades que se desean medir se pueden observar tan fácilmente como otras (Señales bioeléctricas). Los transductores eléctricos son los más utilizados actualmente, debido a que las señales eléctricas poseen muchas cualidades que son convenientes, sobre todo, en el campo de las mediciones que es principalmente el primer paso en los sistemas de control. De lo expuesto en el párrafo anterior caemos en la cuenta de que al decir transductores de entrada nos referimos específicamente a los electrodos de los cuales ya hemos estado hablando en el capítulo 3.

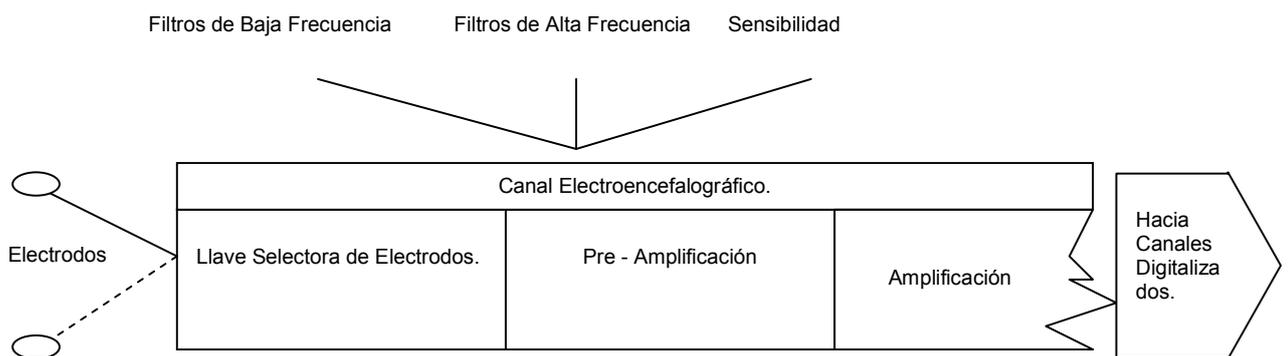
4.1.3 El canal electroencefalográfico

Esta sección no es una repetición de la sección 7 del capítulo 3, sino la razón por la cual hemos regresado ha este punto es únicamente para mostrar

las partes específicas del canal electroencefalográfico que por motivos del orden del contenido en la investigación no era pertinente presentar en ese momento. Sin embargo actualmente hablando ya del modelo de hardware propuesto podemos proceder a presentar los componentes básicos de un canal electroencefalográfico con un poco más de detalle.

Recordando un poco la arquitectura de un canal EEG (ver figura 28), podemos centrar nuestra atención en la etapa de Pre-Amplificación y Amplificación.

Figura 28. Recordemos la arquitectura del canal electroencefalográfico



4.1.3.1 Pre-amplificación, amplificación y amplificadores

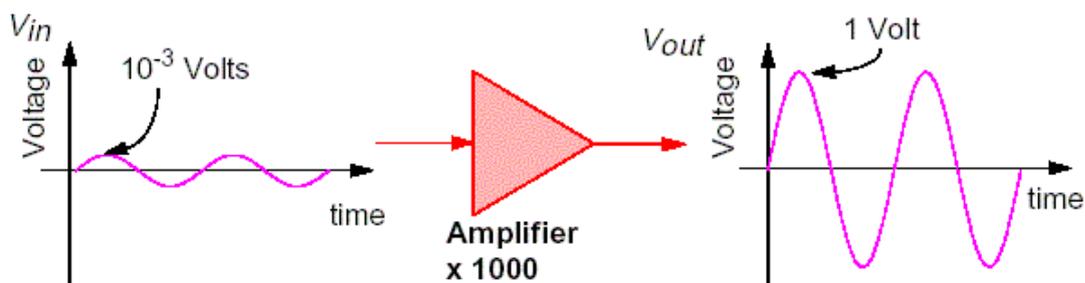
Aunque ya se ha dado bastante detalle de estas fases del sistema, se quiere aclarar un poco la situación de la pre-amplificación, la amplificación y un poco de la teoría de amplificadores. La pre-amplificación es la primera etapa que tiene lugar, luego del registro de las señales capturadas por los electrodos que se controlan con la llave selectora. La pre-amplificación es específicamente la primera etapa de amplificación de los potenciales del cerebro, y además es

la etapa más crítica debido a que las más mínimas señales son después amplificadas aunque sean ruidos y no potenciales cerebrales genuinos por lo que hay que empezar a considerar el uso de filtros para liberar a la señal verdadera de señales de ruido. Posteriormente en las etapas sucesivas, como se puede observar al iniciar este capítulo (Sección 4.1), se llevan a cabo los pasos necesarios para la amplificación final hasta llegar a un nivel de voltaje controlable y aceptable para pasar a la digitalización de la señal.

Por otro lado la base de esta etapa del sistema es la amplificación de las señales por lo cual vale la pena mostrar un poco de conceptos relacionados con amplificadores.

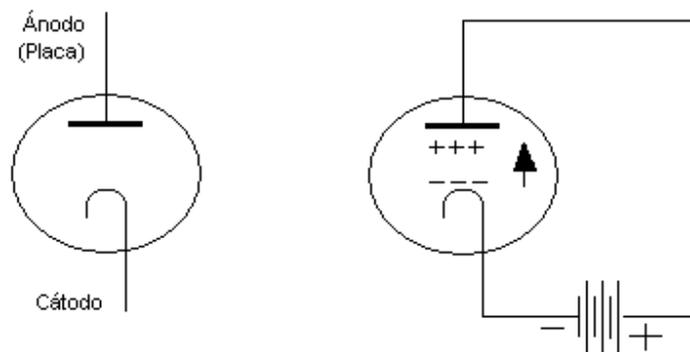
Un amplificador es todo dispositivo, provisto de una entrada y una salida, que admite en su entrada una onda de tensión, de corriente o de potencia y entrega en su salida una onda de tensión, de corriente o de potencia de mayor amplitud que la de entrada (figura 29). En 1883 Thomas Edison descubrió que, en un tubo de vidrio al vacío, la corriente podía pasar desde un filamento incandescente a una placa de metal colocada a cierta distancia, lo cual se conoce como efecto Edison. Luego Fleming descubrió que el flujo de corriente aumentaba si la placa se cargaba positivamente al conectarla al polo positivo de una fuente de poder. Pocos años después Lee de Forest agregó un tercer elemento llamado Grilla, al diodo de Fleming, dando origen a lo que hoy en día se conoce como triodo o válvula amplificadora.

Figura 29. Amplificación



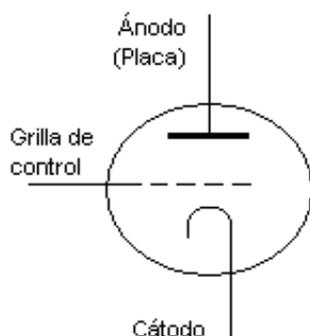
Las válvulas electrónicas. Las válvulas electrónicas cumplen varias funciones, entre ellas las de amplificar, rectificar o regular el voltaje. La válvula mas simple es el “diodo”, que contiene un cátodo y un ánodo o placa (ver figura 30). Cuando se calienta un metal este emite electrones constituyendo lo que se conoce como emisión termoiónica. Así, cuando se calienta el cátodo directa o indirectamente por medio de un filamento, se produce la emisión de electrones, emisión que es controlada aplicando un potencial positivo a el ánodo, de esta forma los electrones son atraídos y la corriente eléctrica pasa en forma continua. Si se invierte la polaridad de la placa, su potencial negativo rechazaría los electrones y rechazaría el paso de corriente en sentido contrario, esto es lo que asocia el nombre de válvula electrónica a un diodo.

Figura 30. Esquema de un diodo



Si a un diodo le agregamos un tercer elemento (grilla o rejilla), ubicado entre el cátodo y el ánodo, obtenemos una válvula triodo (figura 31).

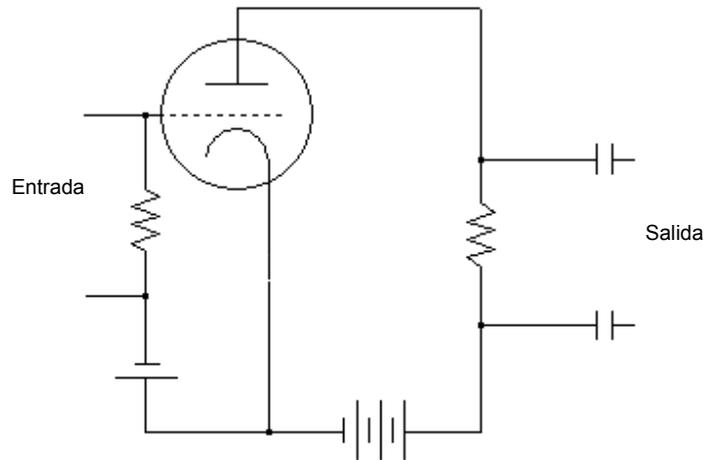
Figura 31. Esquema de un Triodo



En esta las variaciones de tensión de la grilla producen variaciones importantes en la corriente de ánodo. Esto puede funcionar como un filtro de densidad de corriente que se quiere que fluya del ánodo al cátodo.

Lo importante en este punto es la definición básica de un amplificador. Un triodo amplificador es aquel cuya corriente anódica pasa por una *resistencia de carga*, y la diferencia de potencial existente en los extremos de ésta es la que se utiliza (figura 32). Esto se debe al hecho de que lo que nos interesa amplificar es el voltaje, por lo que debemos convertir la corriente del ánodo en cambios de voltaje, y esto se consigue haciendo pasar el flujo de corriente a través de la resistencia de carga.

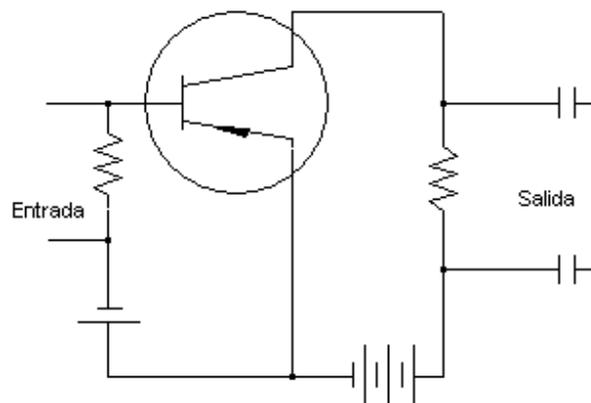
Figura 32. Esquema de un amplificador básico



No obstante, vale la pena aclarar que los amplificadores de construcción reciente están hechos con transistores en vez de válvulas. Los transistores tienen varias ventajas con respecto a las válvulas. Son mucho más pequeños y facilita así la construcción de aparatos de menor tamaño y hasta portátiles. Además son resistentes a vibraciones, proveen mayor exactitud en su operación y mayor duración en cuanto a su vida útil. Sin embargo su forma de operación se basa en la amplificación de corriente más que de voltaje. En los transistores la corriente no fluye al vacío como en las válvulas sino a través de materiales semiconductores como los cristales de germanio o de silicio que se hayan contaminados con vestigios de iridio o arsénico. La contaminación con impurezas hace cambiar sus propiedades eléctricas, dependiendo de esto los semiconductores están tipificados en tipo "n" y tipo "p" indicando que uno tiene exceso de carga negativa y otro de carga positiva, sin embargo ninguno tienen carga propia porque tienen el mismo número de electrones que de protones. Como se puede observar en la figura 33 su conexión a circuitos es equivalente

a la conexión de las válvulas y tienen mucha aplicación en la amplificación de señales.

Figura 33. Un amplificador construido con transistores

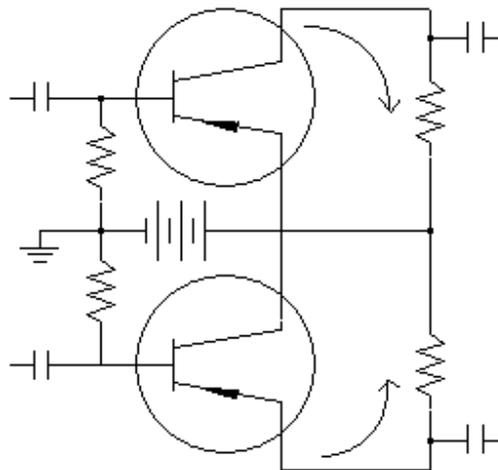


Las dificultades inherentes al registro de potenciales bioeléctricos hace que no todo tipo de amplificadores se adapte a las necesidades de la electroencefalografía. Es por esta razón que para EEG se utilizan amplificadores balanceados.

4.1.3.2 Arquitectura de la amplificación en el canal electroencefalográfico

Los amplificadores balanceados (sistema push-pull o contrafase), de alta sensibilidad, no son mas que la suma de dos amplificadores conectados de espaldas tal como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Amplificadores utilizados en el canal electroencefalográfico



Cuando se asocian dos o más de estos amplificadores se dice que están conectados en cascada, porque la salida amplificada de uno de ellos constituye la entrada del siguiente. Este sistema se utiliza en electroencefalografía. Cada amplificador así conectado se conoce como etapa. El conjunto de etapas, con sus diferentes controles constituye el canal electroencefalográfico.

4.1.3.3 Sensibilidad y sus controles

La sensibilidad o amplificación es la relación entre el voltaje obtenido en la salida de un amplificador y el que estaba aplicado en la entrada y se expresa en microvoltios por milímetro ($\mu\text{V}/\text{mm}$).

Los Controles de sensibilidad, existen en la mayoría de los

aparatos, unos de forma específica para cada canal, otros para todos los canales en general y otros presentan estos controles en ambas especificaciones. Estos controles o llaves suelen llamarse “ganancia” o “amplificación” y modifican la sensibilidad por pasos discretos, en mas o en menos. El sistema más conveniente es el que modifica cada paso por la raíz cuadrada de dos.

Cuando las entradas analógicas a los convertidores se sobrecargan, se debe reducir la amplificación en todos los canales utilizando la llave general. Lo mismo debe hacerse, en condiciones anormales cuando se presenta una descarga comicial de elevado voltaje. Como rutina se suelen utilizar, para el trazado de base, sensibilidades equivalentes a $5\mu\text{V}/\text{mm}$ o $7\mu\text{V}/\text{mm}$. La sensibilidad tiene mucho que ver con lo que trataremos en la sección siguiente. Por el momento seguiremos hablando de los componentes que forman parte del canal electroencefalográfico.

4.1.3.4 Impedancia de entrada

La impedancia de entrada es una condición inherente a todo circuito electrónico. En el caso del equipo electroencefalográfico debe ser alta para no distorsionar la señal capturada. Para un análisis un poco mas comprensible podemos pensar en el sistema paciente-electrodos-amplificador como un circuito que presenta la resistencia del paciente (de salida), la resistencia de los electrodos y la resistencia de los amplificadores (de entrada). De aquí para que el voltaje (o señal captada) que presenta el amplificador en su salida sea similar al que se capta del paciente, la impedancia de entrada ha de ser lo mayor posible (Para más detalle revisar Dorf, seccion 11-7 pag 562).

4.1.3.5 Respuesta de frecuencia y controles de filtrado de señal

No todas las señales de entrada a un amplificador son luego reproducidas sin distorsión, sino que esto ocurre con aquellas que se hallan dentro de la banda, o respuesta de frecuencia, del amplificador utilizado. Así, en electroencefalografía, las frecuencias muy lentas, en un extremo, y las frecuencias muy rápidas, en el otro, serán distorsionadas o incluso anuladas de acuerdo con las características del aparato utilizado. Los extremos de la respuesta de frecuencia tienen controles que permiten variaciones, muy útiles en algunos casos clínicos. Todos estos controles pueden ser manejados vía hardware más que todo en las etapas analógicas del sistema pues en todos los aspectos digitales es más sencillo para el usuario manejar todos los parámetros de configuración desde el software que controla el sistema (Para un estudio más profundo sobre “Respuesta de Frecuencia” consulte Circuitos eléctricos, Dorf sección 13-2, pag 700).

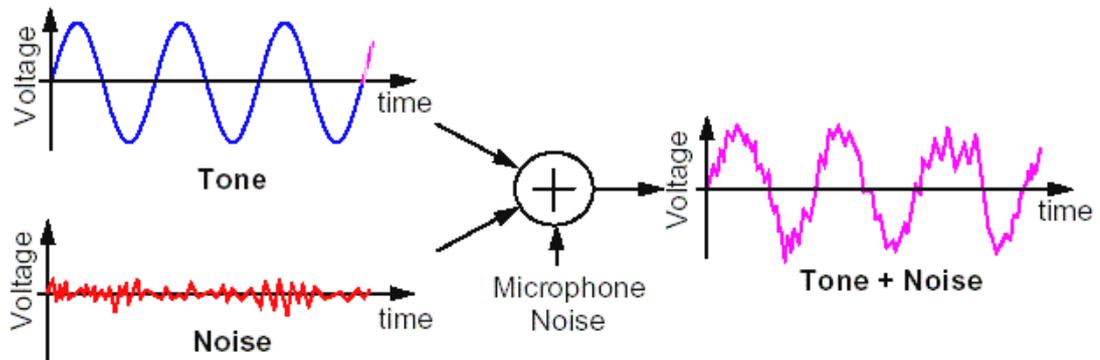
Para reducir las frecuencias bajas se utilizan circuitos filtro llamados filtros pasa-bajas que tiende a dejar pasar señales a frecuencias menores de la frecuencia de corte y rechaza señales a frecuencias por encima de la misma.

Para reducir las frecuencias altas se utilizan circuitos con condensadores o capacitores y/o resistencias conectadas a través de una de las etapas de la amplificación. Generalmente se las designa por la frecuencia hasta la cual no hay reducción significativa de la amplitud. Así F50 significa que no hay cambio de la amplificación hasta 50 Hz. Este filtro es útil para reducir los potenciales

musculares que ocasionalmente pueden enmascarar un trazado. No obstante debe recordarse que no solo las frecuencias rápidas son reducidas, sino también las altas frecuencias cerebrales. Por ello en casos en que la actividad muscular enmascara parte del trazado, debe ponerse mucho empeño en instruir al paciente para que conserve un estado de relajamiento muscular mientras se practica el registro. Es importante que un filtro de frecuencias altas no debe utilizarse para reducir la interferencia por corriente alterna, sino que es necesario eliminar la causa de ella.

Por último, en lo que se refiere a filtros analógicos tenemos los filtros supresores de banda o “Notch” que se utiliza para rechazar todas las frecuencias de un intervalo seleccionado y deja pasar todas las frecuencias fuera de este intervalo. Este elemento completa todo el juego de controles sobre manejo de frecuencias en la banda que el equipo permite y que pueden llegar a ser muy útiles a la hora de realizar estudios clínicos muy específicos. Sin embargo en la realidad las frecuencias muy altas o muy bajas no provienen solamente de la respuesta de frecuencia del circuito, sino a menudo estas señales están contaminadas por ruido que introduce artefactos muy dañinos para la señal (ver figura 35). Existen muchos tipos de señal que pueden realizar interferencia de la señal original y en casos críticos pueden llegar a destruir totalmente la señal original del EEG, este ruido proviene básicamente de 5 fuentes aunque pueden existir más.

Figura 35. Introducción de ruido en una señal de voz captada en un micrófono



El ruido del ambiente en el que se practica el trazado, el ruido producido por la cuantización introducido por los convertidores Analógico a Digita relacionado con la cantidad de bits utilizados para la conversión, para mantener los requerimientos impuestos por algunos estándares es necesario realizar codificación y compresión de datos que también puede introducir ruido al sistema, la modulación y demodulación para transmisiones también puede introducir ruido y por último todas las ondas electromagnéticas presentes en la atmósfera también pueden ser fuentes de ruido que puede perturbar la señal de interés. Es por estas razones que se hace tan importante la utilización de filtros en este diseño pues de otro modo sería tiempo perdido el realizar un estudio de EEG si la señal reflejada esta muy alejada de la realidad del paciente por causa de artefactos externos. (Para consultas sobre el tema consultar Dorf sección 13.6).

4.1.4 Procesamiento digital de señales

Una señal es una cantidad análoga que transporta y representa información de alguna forma. De lo anterior podemos identificar varios tipos de señales como:

- a) Una señal de radio que transporta música y narraciones moduladas.
- b) Una señal de latidos del corazón (Electrocardiografía) que da información del estado de la salud de una persona.
- c) Al hablar también se genera una señal que transporta información de una persona a otra.
- d) Una señal bioeléctrica como las descritas en secciones anteriores, que provee información de la conducción nerviosa, hasta diagnóstico de complejas enfermedades neurológicas.

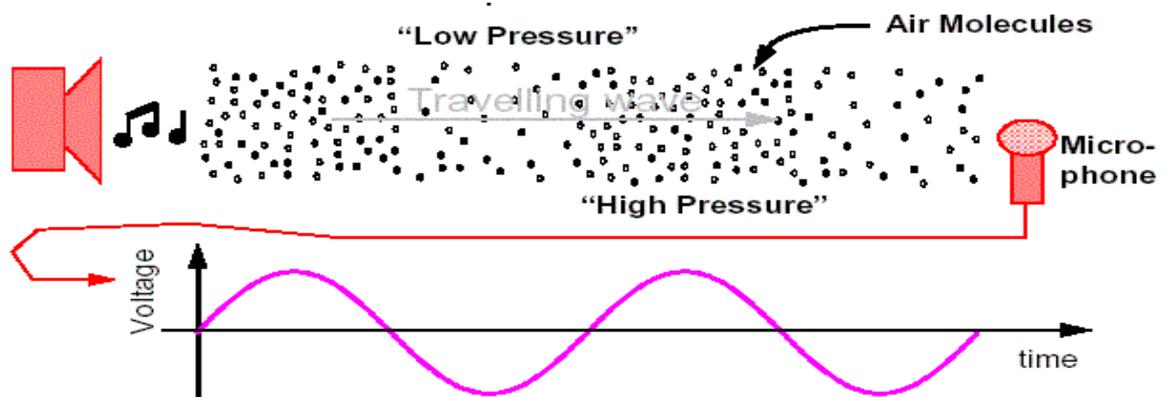
No todas las señales son procesadas automáticamente como sucede con la voz humana, que simplemente al ser emitida por un transmisor (las cuerdas vocales) es captada e interpretada por el oído y el cerebro humano. Es más, la mayoría de señales son de compleja interpretación y captura, al no ser acciones naturales como la comunicación entre los humanos, es necesario crear métodos que permitan realizar estas actividades de forma artificial.

Como ya lo mencionamos una señal transporta información por lo que es necesario captarla e interpretarla para que lleve a cabo su objetivo. Para esto los sistemas electrónicos son de gran ayuda, al proveernos de herramientas y la ingeniería necesaria para realizar el procesamiento de las señales, no importando su origen o naturaleza.

Para procesar señales en manos de un sistema electrónico es necesario convertirlas en un voltaje análogo que representa la información de la señal en cierto modo codificada. Como ejemplo de lo anterior podemos mencionar las ondas cerebrales que pueden ser capturadas por electrodos que toman pequeños voltajes que pueden ser amplificados. Como ejemplo podemos presentar una de las más comunes aplicaciones del tratamiento de señales. En la figura 36 puede observarse como se realiza la captura de una señal del mundo real y se procesa para un fin específico. Vemos que el sonido

es causado por la compresión y rarefacción de las partículas de aire que se encuentran en el medio donde se emite el sonido. Observemos el mecanismo de captura y transducción de la señal. El micrófono tiene un diafragma que está conectado a un pequeño imán que induce corriente, cuando este se mueve hacia adentro y hacia fuera de una bobina, esta corriente posteriormente puede ser utilizada para muchos fines (grabación en cinta magnética, digitalización y tratamiento, amplificación con bocinas, etc.).

Figura 36. Ejemplo de la captura de una señal del mundo real



El procesamiento Digital de Señales (Abreviado en inglés DSP), consiste en el tratamiento que se debe dar a estas señales para permitirles cumplir su misión de una forma óptima y oportuna. En una forma más técnica se puede decir que los algoritmos de DSP que se ejecutan conllevan una cantidad muy grande de cálculos que se realizan con gran velocidad en los microprocesadores DSP gracias a sus características de gran procesamiento aritmético que permiten implementar ecuaciones matemáticas formuladas en tiempo real para el proceso y análisis de las señales. En realidad podemos encontrar la mejor de las características del procesamiento digital de señales en el hecho de que el DSP realiza una aritmética de tiempo real, mientras los métodos anteriores realizan un tratamiento en tiempo no real o en otras

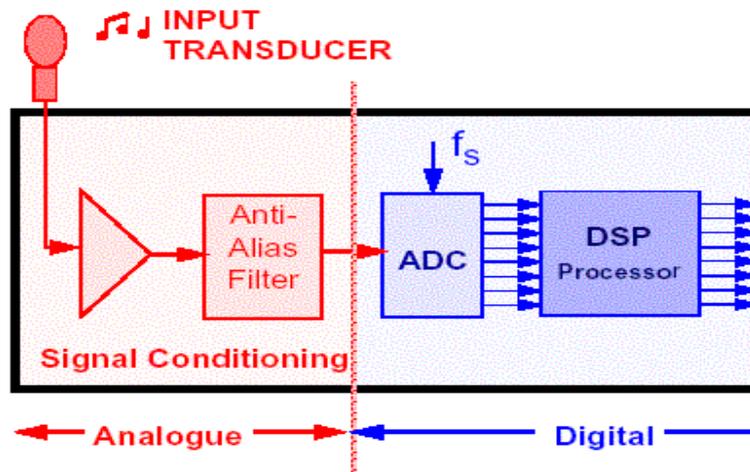
palabras realizan el proceso en lo que se conoce en procesamiento de datos como *background*. Podemos observar las estrategias del DSP utilizadas para sus aplicaciones en la tabla V.

Tabla V. Aplicaciones del DSP

Filtrado Lineal.	Por ejemplo para remover el ruido no deseado y componentes no deseadas de una señal.
Filtrado no – lineal.	Por ejemplo para recobrar la calidad perdida en la pista de sonido de una vieja película.
Análisis, Interpretación y Clasificación de las señales.	Por ejemplo, para la clasificación automática de señales de EEG, reconocimiento de voz, análisis de Dominio.
Compresión y codificación.	Por ejemplo para reducir el ancho de banda requerido para transmitir una señal digital para telefonía.
Grabación y Reproducción.	Por ejemplo para producción de Discos compactos, Reproducción de CD's, grabación en discos duros de pc's, etc.

En el DSP, se realizan varias etapas que se muestra en la figura 37, donde podemos observar que varias de las etapas que conlleva el DSP ya ha sido cubiertas en la investigación por las secciones anteriores, por ejemplo la etapa que se refiere a la transducción de la señal ya ha sido considerada desde el capítulo 3. La amplificación ya ha sido cubierta ampliamente en secciones anteriores incluidas en el canal electroencefalográfico (sección 4.1.2).

Figura 37. Sistema de DSP genérico

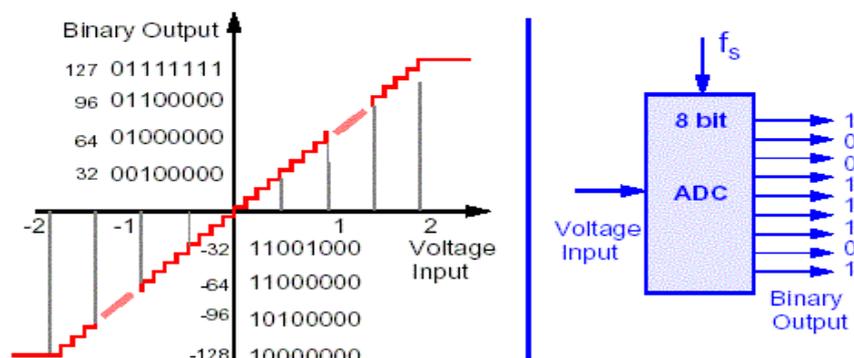


Por último los filtros también han sido ya tomados en cuenta como parte de este capítulo lo cual nos encausa en un ambiente totalmente compatible con los sistemas de DSP. A continuación vamos a tratar las etapas que aun faltan en el tratamiento de señales para concluir el capítulo con el manejo del hardware asociado a una PC.

4.1.4.1 Convertidor analógico a digital

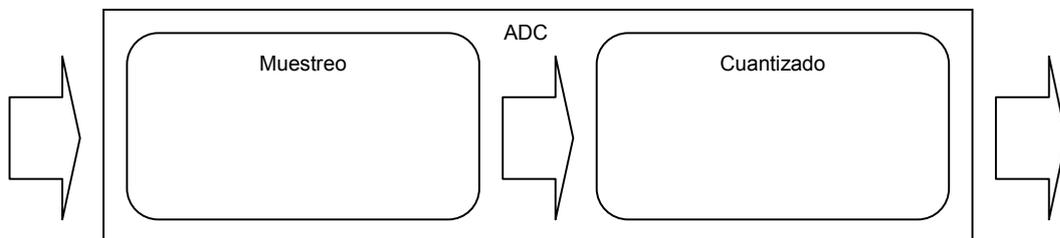
Los convertidores de Analógico a Digital (ADC por sus siglas en inglés), son dispositivos que pueden convertir un voltaje analógico en números binarios, de acuerdo a las características específicas de entrada/salida de cada dispositivo (ver figura 38).

Figura 38. Conversión analógico/digital



La conversión se realiza a través de dos etapas, la primera es la etapa de muestreo y a continuación se procede a la cuantización (ver figura 39).

Figura 39. Convertidor analógico a digital y sus partes



A. Muestreo.

La etapa de muestreo (sampling en inglés) de un ADC, consiste en la parte en la cual un el dispositivo toma muestras discretas del voltaje analógico que se esta tratando. La velocidad a la cual un ADC genera números binarios es llamada tasa de muestreo o frecuencia de muestreo, f_s . El tiempo que transcurre entre una muestra y otra es llamado período de muestreo, t_s :

$$t_s = \frac{1}{f_s}$$

La frecuencia de muestreo está medida en muestras por segundo o simplemente en Hertz (Hz). La frecuencia de muestreo depende de la aplicación que se da al ADC. Así algunas frecuencias sugeridas son:

- Decenas de Hz para sistemas de control.

- Centenas de Hz para aplicaciones biomédicas como es nuestro caso.
- Miles de Hz para aplicaciones de Audio.
- Millones de Hz para interfaces digitales de Radio.

Llamaremos precisión del ADC a la cantidad de dígitos binarios (bits) que salen del dispositivo conteniendo el número binario (8 bit, 10 bit, 16 bit, etc). Si el ADC tiene una precisión finita de n bits como sucede en la realidad, se introduce un pequeño error asociado a cada muestra.

El muestreo se realiza apoyado científicamente en el teorema del muestreo de Shannon 1,949. El teorema establece que una señal temporal (o dependiente de tiempo) continua puede ser recuperada completamente a partir de sus muestras si y solo si la frecuencia del muestreo es igual o mayor a dos veces la componente senoidal de mayor frecuencia del espectro de la señal continua.

Para comprender las suposiciones del teorema, consideraremos una señal $x(t)$ continua, limitada en banda (hasta f_b). El proceso de muestreo puede modelarse como la multiplicación de $x(t)$ con un tren de impulsos $i(t)$:

$$i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_s)$$

Donde $\delta(t)$ es la función delta, k un entero, y T_s es el intervalo con que se toman las muestras (uniformes). Así, la señal muestreada está dada por

$$x_s(t) = x(t) \bullet i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(t) \bullet \delta(t - kT_s)$$

Teniendo en cuenta que la multiplicación en el dominio temporal implica

convolución en el dominio frecuencial, obtenemos

$$X_s(f) = X(f) * I(f) = X(f) * \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(f - kf_s) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(f - kf_s)$$

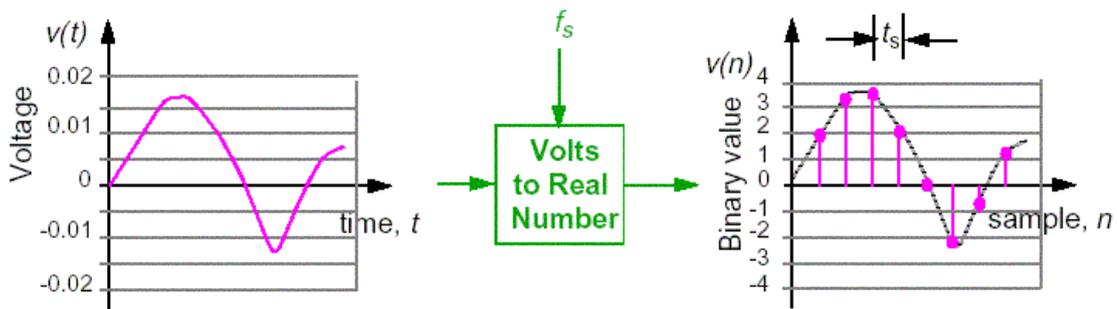
Donde $f_s = 1/T_s$ es la frecuencia del muestreo como ya lo habíamos comentado al principio de esta sección. Así, $X_s(f)$, la transformada de Fourier de la señal muestreada, es periódica y consiste de una serie de repeticiones idénticas de $X(f)$ centradas alrededor de múltiplos de la frecuencia de muestreo.

Es importante notar que las componentes frecuenciales de $X(f)$ por encima de $f_s/2$, cuando $f_s < 2f_b$, aparecen sumadas a las componentes de baja frecuencia. Este fenómeno es conocido como *aliasing* (las componentes de alta frecuencia se ven como un alias de las componentes de baja frecuencia). Cuando se produce *aliasing*, la información original no puede recuperarse porque las componentes frecuenciales de la señal original se encuentran irreversiblemente distorsionadas por el solapamiento de la versión desplazada de $X(f)$. La práctica nos indica que se puede evitar la contaminación frecuencial cuando la señal original se encuentra limitada en banda ($X(f) = 0$ para $f > f_b$) y muestreada a una frecuencia de $f_s > 2f_b$, según el teorema de Nyquist. Para obtener los mejores resultados en el muestreo los diseñadores de ADC ponen mucha atención en los teoremas de Nyquist, que indican que una señal (a bandabase) debe ser muestreada a más de dos veces la frecuencia máxima de la componente presente en la señal, esto es:

$$f_s > 2 \times f_{\max}$$

De la señal muestreada puede entonces ser perfectamente reconstruida la señal analógica original sin ruido y sin distorsión (ver figura 40). (Para mayor detalle puede consultar textos sobre teoría de telecomunicaciones).

Figura 40. Muestreo con posibilidad de reconstruir completamente la señal a partir de la muestra



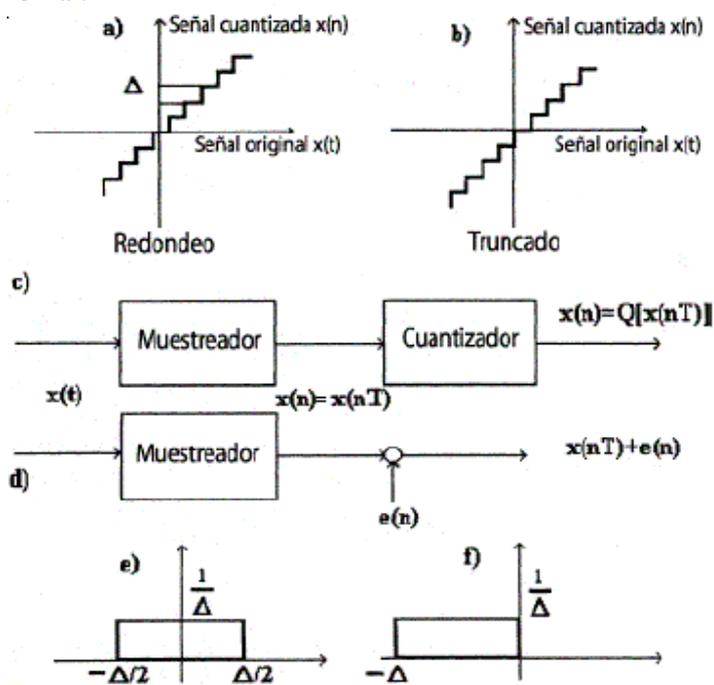
$$v(n) = v(nt_s), \text{ for } n = 0, 1, 2, \dots$$

B. Cuantización

La cuantización es el procedimiento que sigue al muestreo en una convertidor ADC y consiste en tomar los datos muestreados y codificarlos en números binarios según la posición en la que la muestra caiga en un eje de coordenadas en el que el eje horizontal es la magnitud de la muestra tomada de la señal de entrada en voltios y el eje vertical es la equivalencia o codificación en binario que corresponde a dicha muestra o nivel de voltaje analógico. La cuantización produce una señal discreta, cuyas muestras pueden tomar sólo ciertos valores de acuerdo a la manera en que son codificadas.

En la figura 41 se pueden observar algunas funciones típicas para cuantizadores uniformes, donde el intervalo Δ entre dos niveles de cuantización está desarrollado para dos casos: el redondeo y el truncado.

Figura 41. Dos casos de cuantización



La cuantización es un proceso altamente no-lineal, pero afortunadamente, sus efectos pueden ser modelados estadísticamente. Las figuras 4.18 (a) y (d) muestran este proceso. El bloque no lineal de cuantización se sustituye por un modelo estadístico en el que el error introducido por la cuantización es tratado como un ruido $e(n)$ (error de cuantización) que se suma a la señal $x(n)$. Se consideran las siguientes hipótesis para simplificar matemáticamente el problema.

- 1) Se supone $e(n)$ como un ruido blanco con distribución uniforme.
- 2) No existe correlación entre $e(n)$ y $x(n)$.

Ante todo, se debe notar que la densidad de probabilidad en $e(n)$ cambia según el método de codificación. Si decidimos redondear la muestra real al nivel de cuantización mas cercano, tenemos $-\Delta/2 \leq e(n) < \Delta/2$, mientras que si preferimos truncar la amplitud de la muestra, tendremos $-\Delta \leq e(n) < 0$. Las dos densidades de probabilidad se esbozan en las figuras 4.18 (e) y (f).

Las dos formas comentadas de codificación llevan a cabo su función con diferentes propiedades estadísticas. En el primer caso, la media y la varianza de $e(n)$ son

$$m_e = 0 \quad \sigma_e^2 = \frac{\Delta^2}{12}$$

mientras que en el segundo caso $m_e = -\Delta/2$, y la varianza sigue siendo la misma.

Finalmente, es posible evaluar la relación señal-ruido (SNR de sus siglas en inglés) para el proceso de cuantización:

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_x^2}{\sigma_n^2} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_x^2}{2^{-2n} / 12} \right) = 6.02n + 10.79 + 10 \log_{10} (\sigma_x^2)$$

habiendo definido $\Delta = 2^{-2n}$ y donde σ_x^2 es la varianza de la señal y n es el número de bits utilizados en la codificación. A partir de esta ecuación puede observarse que la SNR aumenta casi 6 dB por cada bit agregado en la codificación.

Por último solo resta concluir la etapa de la digitalización con la indicación de diseño que consiste en recomendar el uso de convertidores A/D de la familia CMOS compatibles con procesadores Intel o como una mejor alternativa se puede utilizar un sistema de adquisición de datos (ADQ) el cual ya provee de varias características de las que hemos estado hablando para

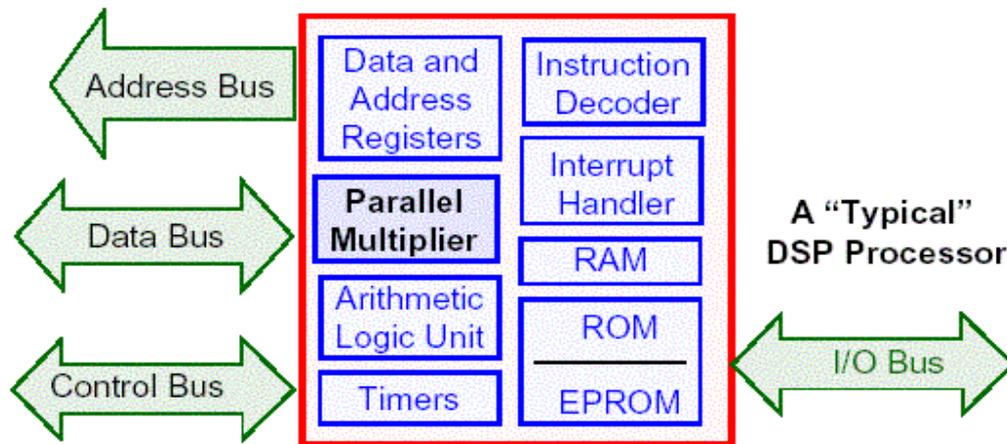
las etapas de amplificación, filtrado, conversión A/D e incluso para el análisis de señales vía hardware (fft, autocorrelación, etc.). Se recomienda visitar el sitio de national-instruments <http://www.national-instruments.com> para tener una visión más clara del hardware de Adquisición de Datos.

4.1.4.2 Procesadores DSP

Un procesador DSP consiste en un dispositivo que finaliza al etapa de tratamiento de señales y deja a las mismas ya dentro de los buses mismos de los computadores de propósito general (como el sistema que estamos planteando) o de propósito específico (como los equipos digitales de EEG que existen en la actualidad).

Las características específicas de un procesador DSP que lo distinguen de un microprocesador de propósito general son rápidos tiempos de respuesta a peticiones de interrupción y la rápida ejecución de operaciones aritméticas específicamente de multiplicaciones binarias. En la figura 42 podemos observar el esquema de bloques de un microprocesador DSP genérico y aquí mismo podemos observar un módulo denominado “Multiplicador paralelo de ciclo sencillo” (Single Cycle Parallel Multiplier) que es la clave que identifica a los micros DSP de los de propósito general.

Figura 42. Diagrama de un procesador DSP genérico

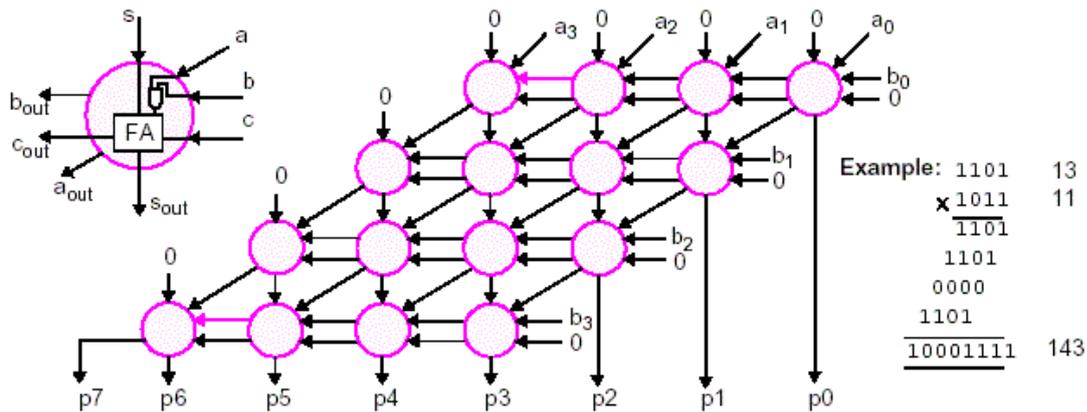


Estos procesadores se encuentran en circuitos impresos, que pueden ser interfazados mediante cualquier estándar en el mercado (ISA, PCI, etc) e inclusive pueden ser dispositivos externos que simplemente pueden ser conectados a los puertos de una PC, tal es el caso de la nueva versión del producto de la empresa Akonic (www.akonic.com) nombre del producto, que puede llegar a ser conectado a un computador con las más nuevas tecnologías en interfaces de I/O tales como USB o *Fireware*.

El “multiplicador paralelo” (*parallel multiplier*) es sin duda la característica de más peso en los microprocesadores DSP. Al profundizar más en el procesamiento que ejecutan los DSP, se podrá dar cuenta de que la multiplicación y la acumulación (o suma) son las operaciones principales en el DSP. Los multiplicadores en paralelo de 16 o 24 bits son los más comunes, pero con precios muy altos, sin embargo el precio se compensa con la velocidad, pues presentan de 10 a 100 veces mejores tiempos que los microprocesadores de propósito general, esto es muy conveniente porque hay que tener en cuenta siempre que el DSP consiste en realizar operación aritmética en tiempo real. En la figura 43 se presenta un ejemplo de una

multiplicación en paralelo de 4 bits.

Figura 43. Multiplicación en paralelo



4.1.4.3 Procesamiento de la señales en una PC

La situación del DSP en una PC son distintas puesto que al tratar señales de tiempo real es necesario obligatoriamente utilizar otro dispositivo que provea de la velocidad de proceso necesaria para poder realizar el análisis en períodos de tiempo pertinentes. Esto se logra a través de las tarjetas de adquisición de datos de las cuales estuvimos hablando hace unos momentos, pues como ya lo mencionamos existen en grandes variedades y son fabricadas para muchas aplicaciones incluso para aplicaciones de bioingeniería para interfaces con electrocardiógrafos, electroencefalógrafos, etc.

Vale la pena notar que el hecho de lograr introducir la señales bioeléctricas en una PC, provee de una gran ventaja sobre cualquier otro equipo puesto que gracias a la ingeniería de software son muy escasas las cosas que no se pueden realizar al desarrollar sistemas de información aunque sean de un área tan particular como esta.

4.1.5 Análisis de señales en hardware

Como veremos en el capítulo siguiente el “Análisis de Señales” es una característica que agrega mucho valor a un estudio clínico de electroencefalografía. Ya hemos visto todas las etapas necesarias para poder tener la señal bioeléctrica dentro de un computador, sin embargo si nos detuviéramos en la investigación en este punto, no tendría sentido nada de lo que hemos presentado. La parte más innovadora de este modelo es la posibilidad de utilizar la bioseñal captada en el proceso de DSP para presentar información o resultados concretos de un estudio electroencefalográfico. Con esto nos referimos a la posibilidad de no solo presentar el estudio electroencefalográfico sino también presentar resultados basados en el análisis de los datos o muestras obtenidas del sistema. En la actualidad esto es posible gracias a la implementación de algoritmos que permiten hacer análisis profundo de datos para predecir un comportamiento futuro de las variables o parámetros de entrada, algoritmos tales como las series discretas de Fourier con el uso de la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés), Análisis de autocorrelación (y autocovarianza) y análisis de correlación cruzada (y covarianza cruzada), estimaciones de espectro de potencia, etc. Muchas de estas técnicas son utilizadas para llevar a cabo reconocimiento de patrones, del cual estaremos hablando en el capítulo siguiente, que al final lo que busca es proveer al experto no solo de un estudio confiable para realizar diagnósticos sino también de un conjunto de resultados basados en la información presentada en el estudio que deben de funcionar como un diagnóstico automático sugerido. Una de las más convenientes técnicas para realizar este tipo de análisis es el método de la transformada rápida de Fourier (FFT) que viene implementado en dispositivos electrónicos de última generación, que soportan el interfazado con sistemas informáticos, y que es muy útil a la hora de querer reconocer un patrón común en una señal, además de este método

pueden surgir muchos otros más métodos numéricos para el análisis de datos a posteriori e inclusive en línea, que sin la utilización de dispositivos de este tipo reportarían tiempos de respuesta exagerados tal y como veremos en el capítulo siguiente al exponer la parte de reconocimiento de patrones.

Para el análisis de datos, específicamente el reconocimiento de patrones a través de FFT es necesario conocer que ésta es una implementación de alto rendimiento de la Transformada Discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés) que presenta tiempos mucho menores durante el tratamiento de las señales. Estos conceptos están muy relacionados con los dispositivos de DSP debido a que algunos dispositivos ya traen incluido un módulo que realiza el análisis con FFT. Debido a esta relación tan estrecha es recomendable la utilización de dispositivos DSP de propósito especial de la familia Motorola: DSP56000, DSP56001 y DSP96002, cuyos procesadores de señal digital llenan las demandas de todos los requerimientos impuestos por problemas en el dominio de la frecuencia. Para proporcionar una implementación rápida de la Transformada de Fourier en cálculos de alta precisión.

La arquitectura paralela e instrucciones fijas del DSP se presentan para el cálculo de la Transformada Rápida de Fourier Discreta, se aplica el algoritmo de la mariposa. En donde se utiliza el teorema de Nyquist (sección 4.1.4.1), se muestrean las señales $x(t)$ a $X(nT)$, donde el periodo de muestreo T_s es tomado tan pequeño como sea posible, para reducir los errores de aproximación. $X^*(f)$. Esto es apropiadamente la transformada discreta de Fourier (DTFT). Como T_s , periodo de muestreo, es infinitamente pequeño la sumatoria previa aproxima la transformada de Fourier original en orden para asignar la precisión de esta aproximación. Esto es suficiente para garantizar que el resultado de la expresión para $X^*(f)$ es una función periódica con frecuencia:

$$X(f) = X\left(f + \frac{1}{T}\right)$$