



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**SIMULACION DE PROPIEDADES TERMICAS Y  
ELECTRICAS EN LA MEMBRANA  
DEL ALGA CHARA**

**TESIS PROFESIONAL**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
P R E S E N T A**

**ENRIQUE MEDINA MORAN**

**MEXICO, D. F.**

**1983**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

¡A tí Señor, que eres el camino, la verdad y la vida...!

Con afecto y agradecimiento

A mis padres y hermanos

por sus consejos.

A mis amigos Celso y Stefanie,  
con estimación.

A mis maestros

Al Ingeniero Francisco D. Soria Villegas  
por su constante apoyo y valiosa cooperación  
en éste trabajo.

## P R O L O G O.

La Biofísica, es una joven disciplina científica, la cual, en sus inicios, no fue estudiada según las técnicas y postulados de la Ingeniería, sino siguiendo las pautas de la bioquímica y la fisiología, de tal manera que muchos trabajos e investigaciones se orientan hacia terrenos aparentemente diferentes de la Ingeniería.

Con esta aseveración, puede parecerle extraño a cualquier persona que un Ingeniero mecánico-electricista, pueda relacionarse con un tema tan poco habitual para él como lo es la Biología, sin embargo, aceptar la separación y diferencia absoluta entre las ciencias químico-biológicas y las físico-matemáticas es negar por principio la universalidad de la ciencia.

Al estudiar las células vegetales y no enfocar el interés principal de ésta tesis sobre aspectos concretos de la fisiología animal se puede pensar que ésta tesis, no tiene una aplicación práctica e inmediata aún cuando se utilice y compruebe la utilidad de la Ingeniería así como su relación con las ciencias químico-biológicas; - empero, puede demostrarse su utilidad tomando en cuenta los trabajos sobresalientes de autores notables como Sparrowick (16), Ferson (14), etc.; ya que sus (brillantes) conclusiones sobre la fisiología vegetal, posiblemente no hubieran sido descubiertas y demostradas, de no haber existido observaciones realizadas en animales, -- por autores anteriores a ellos.

Un ejemplo sobre la relación indirecta entre la Biología vegetal y la Biología animal dentro de la Biofísica, (Bioingeniería), lo constituye la bomba electrogénica, la cual en sus orígenes fue analizada en los Batracios, y otras especies animales (14), y posteriormente en los vegetales (16). De la misma forma, puede decirse entonces que una posible teoría sobre el mecanismo térmico (o cualquier otro mecanismo), en la célula vegetal, conduce al establecimiento de una base teórica para la realización de un estudio equivalente en la célula animal, dentro de sus limitaciones físicas, químicas y biológicas.

Hablando sobre la metodología aplicable a la biofísica, algunos científicos en la actualidad, intentan analizar y comprender las leyes, procesos y sistemas que componen los seres vivos observándolos como una sutil máquina creada por el hombre, es decir dando un punto de vista cibernético, como por ejemplo el cerebro humano visto como una central telefónica.

El punto de vista cibernético, en mi opinión, constituye a pesar de sus grandes avances y logros lo que un grano de arena en una playa por las enormes limitaciones que tienen las herramientas de investigación científica comparadas con la enorme complejidad de un sistema biológico, todo ello, sin considerar los aspectos filosóficos inherentes en la existencia de los seres vivos.

De cualquier forma, el punto de vista cibernético o cualquier otro es un buen principio precedido de una gran intención para comprender mejor a la naturaleza.

# I N D I C E

	Página
Introducción	
Capítulo I Conceptos Generales de Biofísica	
I-1).- La Ingeniería y su relación con la biología.	9
I-2).- Sistemas Biológicos abiertos y cerrados.	33
I-3).- Los Fundamentos de la teoría de Control en la Biofísica vegetal.	38
I-4).- Aspectos Químicos Elementales del Sistema de difusión Biológica vegetal	59
Capítulo II Conceptos Biológicos básicos del vegetal.	
II-1).- Introducción al estudio de la Célula vegetal.	69
II-2).- Descripción de un vegetal superior y sus limitaciones biofísicas.	84
II-3).- Principales sustancias Orgánicas que intervienen en la difusión.	91
II-4).- Influencia de la luz en el vegetal	95



II-5).- Tres consideraciones ecológicas en las algas verdes	105
II-6).- Descripción general de las algas verdes.	107

Capítulo III Difusión en la Membrana Vegetal.

III-1).- Propiedades Electroquímicas de la Membrana Celular	118
III-2).- Tres aspectos importantes en la difusión neutra.	134
III-3).- Dos modelos biológicos de la Membrana Celular	147
III-4).- Influencia de la Permeabilidad y la cápsula de secreción en la difusión.	156
III-5).- Descripción Simplificada de las Biotecnologías temoquímicas.	168

Capítulo IV. Propiedades Electromecánicas de la membrana del vegetal inferior.

IV-1).- Influencia de las características mecánicas en el comportamiento eléctrico de la membrana.	174
IV-2).- Conducción de la electricidad a través de la membrana biológica.	204

	Pág.
Capítulo V. Comportamiento y Simulación de la Membrana del Alga Chara.	
V.1).- Modelado y Simulación de la Membrana del Alga Chara	236
V.2).- Identificación de variables biológicas y eléctricas para la excitación en la membrana del Alga Chara	247
V.3).- Determinación de los Flujos iónicos -- externo e interno en el circuito analógico	294
Conclusiones y Aportaciones.	306
Bibliografía	311

"Nada tiene valor excepto el movimiento; nada dura, excepto el cambio.

La acción es el bien, la inacción, es pues, el mal..."

A. H.

"No prometas imposibles porque irás hacia la nulidad, promete poco hurgando un punto y entrarás al sagrado lecho de la naturaleza."

Victor Frankenstein.

I N T R O D U C C I O N

## I N T R O D U C C I O N

Esta tesis, no trata de hallar la relación más profusa entre las disciplinas químico-biológicas y la Ingeniería, pero en cambio -- muestra, informa y analiza los procedimientos más usuales utilizados para la aplicación de la Ingeniería al terreno biológico, tomando en cuenta los fundamentos y relaciones que existen entre la Ingeniería y la Biología vegetal (capítulo I), a partir de un análisis independiente entre una y otra ciencia (capítulos II y III), con el objeto de dar al lector las bases de la Biología vegetal y la Ingeniería Mecánica y Eléctrica (capítulo IV), para el estudio de las características eléctricas de la membrana del alga chara - sometida a cambios de potencial y temperatura (capítulo V).

La Ingeniería Mecánica y Eléctrica, aún sin mencionar la Ingeniería Electrónica, tiene un campo muy extenso con aplicaciones en -- cualquier área de la Biofísica vegetal o animal, y dentro de las -- cuales puede hablarse de temas específicos relacionados con la mecánica de fluidos, y termodinámica, tal y como se ha demostrado -- recientemente en Japón (35), U.S.A. (13) y algunos países de Europa como Rusia y Alemania (43).

A nivel micro o macrocóptico, un organismo biológico es un sistema complejo difícil de describir y analizar, ya que requiere de la -- aplicación de un conjunto de diversas técnicas para poder ser -- estudiado adecuadamente por diversos especialistas. Por tal moti-

vo, la investigación de solo una función de la membrana significa un trabajo extenso y profundo.

Por lo anterior, el enfoque particular tanto de la Biofísica, como de la Bioingeniería en el estudio de un organismo animal o vegetal se concentra por lo general solo en uno de sus componentes.

El motivo fundamental de éste trabajo, está basado en el estudio de la difusión y de las propiedades eléctricas en los vegetales unicelulares macroscópicos, cuestión muy poco estudiada en México.

El escaso desarrollo e interés que se ha manifestado en la Biofísica vegetal en nuestro país puede explicarse debido a la falta de -- planeación (subdesarrollo) y visualización sobre los propósitos y -- tendencias, de algunas ramas de la biología; aunque por supuesto -- no puede generalizarse ésta situación, ya que existe cierto interés en la UNAM, y en otras instituciones del país, por el desarrollo de la Biofísica, en forma limitada y dentro de áreas específicas como el Instituto de Física en la Facultad de ciencias, el Instituto de Ciencias del mar y Limnología, y el Depto. de Control de la Facultad de Ingeniería, en la UNAM; así como los Deptos. de Biofísica, - Botánica y Física Molecular del IPN.

Considerando la dificultad que representa comprobar, investigar y -- cuantificar el papel que juega la Ingeniería Mecánica y Eléctrica -- en la Biofísica vegetal, un Ingeniero, requiere necesariamente -- entrar a un área específica de la Biología y un Biólogo, deberá de

estudiar los principios de la Ingeniería; por lo que ambos científicos como puede comprobarse, se alejan de sus campos específicos de trabajo; pero, sin embargo, al conocer o tener una idea de las técnicas, y fundamentos de los sistemas biológicos en Ingeniería y Biología, permitirán al Ingeniero o Biólogo, no sólo brindarse una ayuda mutua, sino además, obtener las ventajas de tener otros puntos de vista para resolver problemas tradicionales de sus áreas específicas teniendo con ello caminos diferentes, de soluciones más prácticas y mayor acervo cultural.

Para finalizar con esta sencilla exposición sobre las generalidades de esta tésis, se anexa a continuación una cronología simplificada sobre la historia de la Biofísica vegetal que, como se verá, se inicia como tal a principios de este siglo, pues los años anteriores son más bien antecedentes históricos.

1674).- El optometrista alemán Anton Van Leven, observa por primera vez las características físicas de los organismos unicelulares, como algas bacterias, etc.

1737).- Caroleus Linneaus, establece en Suecia las bases y principios de la clasificación vegetal general.

1772).- Bonaventura Corti, realiza en Italia el primer reconocimiento formal del protoplasma y la membrana (nara).

1870).- Es construido en Alemania la primera membrana artificial de celulosa por el químico alemán Hermann Traube.

1878).- El biólogo Alemán Karl Bohm postula la teoría de cohesión-tensión, para el ascenso y distribución de agua y elementos nutritivos ideando el posible mecanismo y el modelo hidráulico para los vegetales superiores (árboles).

1881).- El físico-químico holandés Jakobus Van't Hoff, funda la teoría de la Estereoquímica y realiza importantes investigaciones sobre la termodinámica vegetal y animal.

1913).- El fisiólogo y químico alemán Albert Bethe, establece las bases para el estudio del desplazamiento y disociación de los iones a través de la membrana biológica aplicando un campo eléctrico.

1914).- Los bioquímicos alemanes Fritz Haber y Reinhard Beutner -- simulan una función de la membrana vegetal por primera vez mediante el uso de hidrocarburos, resultando una membrana sintética capaz de utilizarse en dos tipos de procesos.

1915).- El bioquímico Alemán Walther Hermann Nernst, al establecer la teoría de la pila voltaica y analizar la velocidad de reacción en medios acuosos establece un modelo matemático con el cual pueden conocerse los potenciales de reposo iónicos.

1934).- Los científicos americanos Blinks y Osterhout ( ), inician el estudio sobre la bomba electrogénica y los potenciales eléctricos en los vegetales inferiores.



1952).- Aparece en U.S.A. el modelo neuronal de Hodgkin, y Huxley, basado en el axon gigante del calamar Loligo Forbesi.

1960).- En U.S.A., el investigador Harry P. Gregor, estudia en la membrana biológica, el proceso de filtración para obtener un modelo cibernético capaz de seguir la secuencia seguida por la célula biológica durante la filtración.

1970).- Se inician en Japón un conjunto de experimentos basados -- en el modelo de Hodgkin y Huxley, pero adaptados a las membranas - de las algas Chara y Nitella.

1975).- Se generaliza la experimentación de la biofísica vegetal, basada en algas como: Chara, Nitella, Chlorella, Acetabularia, - - etc. en Japón, U.S.A. Canadá, Alemania e Inglaterra.

En cuanto a vegetales superiores, debido a su complejidad se restringe a especies sin flores ni frutos, y exclusivamente a tejidos especializados como el Xylema y el Floema.

El presente trabajo, se enfocará, como se mencionó al estudio de - vegetales unicelulares, ya que como se verá en el capítulo (II) el estudio de los vegetales superiores es más complicado, y de forma concreta, de acuerdo a las consideraciones anteriores, se estudiará el modelo analógico que representa las variaciones eléctricas de la membrana del Alga Chara con la temperatura porque considero que los estudios sobre el comportamiento de una célula viva some-

tida a ciertas variaciones térmicas podrían servir de base para - explicar el comportamiento de los organismos superiores, sometidos a cambios diversos de temperatura; y en éste sentido el conocimiento que se tiene al ser escaso tiene mucho campo por conocerse."

## CAPITULO I

### CONCEPTOS GENERALES DE BIOFISICA

- I-1).- La Ingeniería y su relación con la Biología
  - a).- Biofísica y Bioingeniería
  - b).- La simulación en la Bioingeniería
  - c).- Sistemas Lineales y no Lineales en Biología
  - d).- Balance de Masas
  - e).- Reacciones Químicas
  - f).- Sistemas Electromecánicos
  - g).- Secuencia de estudio aplicable a un sistema componente de la célula vegetal.
  - h).- Limitaciones en el estudio de un sistema componente de la célula vegetal
  - i).- Clases fundamentales de modelos en la célula vegetal inferior
  
- I-2).- Sistemas Biológicos abiertos y cerrados
  - a).- El sistema biológico aislado y estático (cerrado)
  - b).- El sistema abierto biológico
  - c).- Principales diferencias entre los sistemas biológicos abiertos y cerrados
  
- I-3).- Los Fundamentos de la Teoría de Control en la Biofísica Vegetal.
  - a).- Condiciones Generales de la Célula Vegetal.
  - b).- Mecanismos Moduladores en la Célula Vegetal
  - c).- Descripción de un sistema de control en la membrana vegetal
  - d).- Condiciones de estudio en la Membrana del Vegetal Inferior

I-4).- Aspectos Químicos Elementales del Sistema de difusión  
Biológica Vegetal

- a).- Elementos químicos fundamentales en el vegetal
- b).- Generalidades de la ionización en la membrana  
biológica.

## I-1).- La Ingeniería y su relación con la Biología.

Objetivo.- Presentar las características más relevantes de la Biofísica y su relación con la bioingeniería, enfocándolas al terreno de la membrana del vegetal inferior.

Introducción.- La Ingeniería, definida como la ciencia que encausa las diferentes fuentes de energía existentes en la naturaleza, materiales, conocimientos, experiencias, recursos humanos de diversas ciencias físico-químico-matemáticas, y económico-administrativas implica necesariamente que también puede aplicarse al terreno biológico para el servicio, conveniencia y distribución óptima y justa del hombre (1).

### El Problema Fundamental de la Ingeniería.

En la Ingeniería, el problema fundamental es la clara y concisa -- identificación de un problema a tratar cuya naturaleza puede encontrarse en cualquier ciencia físico-matemática, y a partir de esto, investigar, obtener información, concentrar la esencia de ésta información, plantear las diversas soluciones posibles, examinar los modelos teóricos y/o experimentales encontrados y exponerlos.

### El Análisis de la Ingeniería aplicado a la - Biología.

Para el desarrollo de cualquier análisis Ingenieril aplicado a cualquier campo de la naturaleza es necesario plantear claramente el --

problema general que se trate es decir, ser específico. En el problema en cuestión, es importante considerar las simplificaciones -- adecuadas y simular el proceso que se deseé, ésto se puede desarrollar de acuerdo a los siguientes puntos:

Información, selección de Información, modelo teórico simplificado del sistema, simulacro del modelo y comparación de resultados, con lo cual el modelo teórico se modifica.

(A).- Biofísica y Bioingeniería.

La Ingeniería no está de modo alguno limitada a una ciencia o grupo de ciencias sino que por su carácter de universalidad, puede tratar problemas propios de campos como la Biología y Medicina (Biomedicina), siendo éste término donde surge una diferencia de -- concepto con algunos investigadores. La unión de la Ingeniería con el terreno de la Biomedicina recibe el nombre de Bioingeniería, y -- según otros Biofísica, en un caso probablemente por el uso de las -- técnicas y conocimientos ingenieriles y en el otro por la estrecha -- relación con la física y sus ramas.

El problema no se delimita al concepto de Biofísica y Bioingeniería, sino también a la relación que exista entre Biofísica y Bioingeniería. ¿Es la Bioingeniería una parte de la Biofísica? o ¿Es la Bioingeniería una rama específica de la Biología o de la Ingeniería? -- Como no conviene discutir los argumentos que exponen diversos investigadores para definir a la Biofísica y a la Bioingeniería, ni tampoco la relación entre ellas, para los fines de ésta investigación, al ser la física el punto común, se considerará la clasificación --

de el prof. R. Plonsey utilizada en un artículo del Ing. R. Lara (2), con la diferencia de considerar como parte de la Biofísica, - la Bioingeniería, Ingeniería Médica e Ingeniería Clínica cuyas características, se definen a partir de éste concepto y siendo el estudio de la Biofísica una aplicación de la Ingeniería en una parte de la fisiología vegetal el enfoque definitivo se sitúa ~~en~~ en la Bioingeniería.

Biofísica.- La Biofísica se define como la ciencia que estudia los procesos biológicos según los principales métodos de la física.

En la actualidad, la investigación se dirige preferentemente al campo de la Biofísica de las radiaciones y la Biofísica Fisiológica.

Al ser la Bioingeniería una parte de la Biofísica, tiene la misma exclusividad y especialización que las otras dos ramas de la Biofísica y solo requiere ya de una sencilla convención de términos adecuadamente adaptados.

#### Convención entre Biofísica y Bioingeniería.

El término Biofísica se aplicará al contexto general físico-matemático en algún o algunos procesos fisiológicos, y el término Bioingeniería, se aplicará exclusivamente cuando en el proceso fisiológico se apliquen técnicas y puntos de vista de la Ingeniería.

(P).- La Simulación en la Bioingeniería.

La simulación es un proceso análogo al sistema real, pero con elementos diferentes, tal que un proceso cualquiera puede ser simulado en varios sistemas diferentes teniéndose el mismo tipo de respuesta (s) debido a uno o varios estímulos (entradas). Para ello se deberán de considerar las condiciones o fluctuaciones del ambiente y simplificaciones adecuadas como ciertas escalas de proporcionalidad hasta llegar a un modelo matemático.

Un ejemplo de Simulación Biológica es la construcción de un modelo de la Bomba de Sodio y Potasio ( $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) en las células animales o vegetales sometiéndola a un conjunto de condiciones en donde se llevará a cabo una rigurosa aplicación de la metodología científica. Este modelo de Bomba de Sodio y Potasio tendrá un efecto igual o semejante a la variable de respuesta del sistema original.

Esta simulación puede hacerse en computadoras analógicas o digitales, con modelos eléctricos, electrónicos, mecánicos, etc.

#### (C).- Sistemas Lineales o No Lineales en Biología.

Ningún sistema biológico es en realidad lineal e invariante, pero en principio y dentro de un rango determinado, puede aplicarse la teoría de los sistemas Lineales e invariantes, la teoría general de análisis de sistemas biológicos, esto permite modelar matemáticamente muchos de los mecanismos observados en diversos organismos en cuanto a su comportamiento.

Los modelos matemáticos pueden clasificarse en Lineales o no Lineales\*;

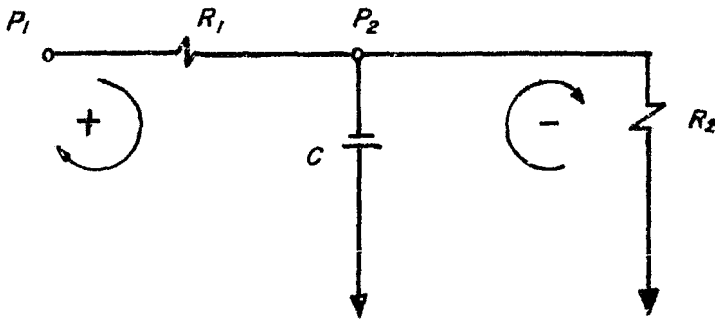
\* Existen sistemas variantes e invariantes con el tiempo.





**FIG. I 1**  
FLUJO VOLUMETRICO (1)      FLUJO VOLUMETRICO (2)

UN SISTEMA (X) Y EL PRINCIPIO DE CONSERVACION



**FIG. I 2**

SENCILLO SISTEMA DE SIMULACION ANALOGICA ELECTRICA  
APLICADO AL CASO DEL SISTEMA CARDIOVASCULAR EN EL  
CUERPO HUMANO

cuando se presenta el caso no lineal se pueden implementar técnicas de linealización, estudios de aproximación, etc. De donde en muchos casos los Sistemas no Lineales se pueden aproximar a sistemas lineales e invariantes con el tiempo.

Los Sistemas Lineales se identifican por su sencillez y simplificación de análisis en el campo de la investigación considerando un rango de error para poder ser simulados en comparación con los sistemas no lineales que representan al sistema real.

Por razones de metodología, resulta ventajoso establecer una secuencia adecuada de estudio de la Biofísica con el propósito de obtener un modelo analógico cuyos pasos son los siguientes:

- 1).- Elección de un área específica de la Biofísica, por ejemplo: La Biofísica del vegetal inferior.
- 2).- Elección de una subdivisión de índole biológica en la Bioingeniería, es decir una componente del sistema celular, por ejemplo: la membrana de un alga.
- 3).- Dentro de la subdivisión elegida considerar un tema específico sobre una función que desempeñe y se encuentre en relación con ella. Por ejemplo: La Difusión.
- 4).- Establecimiento de fundamentos generales de Ingeniería que relacionen argumentos de índole físico, biológico, químico, etc. De ésta forma se obtiene un modelo matemático.

5).- Simulación Analógica del modelo matemático, electromecánico, electrónico, etc.

6).- Cuantificación del error entre el proceso real y la simulación.

Los sistemas biológicos de cualquier naturaleza requieren de un conocimiento básico sobre las funciones específicas de manera cuantitativa y cualitativa, en tanto que los sistemas físico-matemáticos no pueden limitarse a un somero conocimiento cuando se trata de aplicarlos al terreno biológico, puesto que las herramientas físico-matemáticas son todavía limitadas. Para dar una clara idea de lo anterior puede darse el siguiente ejemplo:

La membrana biológica vegetal o animal tiene entre sus funciones o facultades principales, la ósmosis, selectividad por difusión, promoción de reacciones químicas por enzimas y disociación del agua. Como a su vez cada una de las funciones mencionadas pueden tener variantes o relaciones que deberán ser definidas y delimitadas de acuerdo a los alcances y recursos disponibles, no será posible desarrollar un verdadero modelo generalizado que represente al menos un conjunto completo de funciones y procesos de una sola parte de una célula vegetal, pero en cambio, puede obtenerse buena información de una o dos funciones analizadas y estudiadas a fondo.

En el análisis de un sistema biológico, al hacerse uso de las leyes generales de la física, química e ingeniería, métodos y técnicas propios de éstas ciencias, las ecuaciones obtenidas a partir del sistema podrán representar y ser utilizadas para experimentar y estudiar una-

parte o varias del sistema biológico en cuestión.

Existen tres tipos de modelos que engloban las tres ciencias con sus respectivas relaciones utilizadas para la simulación y experimentación, éstas son: Balance de Masas, Reacciones Químicas, Sistemas y Circuitos Electromecánicos (10).

(D).- Balance de Masas.

El transporte de masas consiste en la acumulación variable de cierta cantidad de materia y es igual a la diferencia entre la variación de la entrada menos la variación de la salida. El proceso de transporte está representado por el principio de la conservación de la energía, y se aplica a cualquier sistema. Según sea el sistema el principio de la conservación de la energía recibe su nombre en particular, en circuitos; Ley de Kirchhoff, en mecánica, principio de D'alambert, etc.

Véase la fig. (I-1)

Para demostrar la aplicación general de la Ley de Conservación de la energía, supóngase que el flujo volumétrico (1) se refiere a una solución cualquiera con las siguientes características:

$c$  = concentración en (gr/ml)

$v$  = flujo volumétrico en (ml/min)

$cm$  = transporte de masa en (gr/min)

En el sistema 'x' mostrado en la fig. (I-1) se sustituyen los términos conceptuales de flujo por su representación matemática y se obtiene:

$$v_1 = \frac{dV_1}{dt} \quad \text{--- (I-1)}$$

$$v_2 = \frac{dV_2}{dt} \quad \text{--- (I-2)}$$

Conocidos los flujos volumétricos si se multiplican por las - concentraciones se obtiene el transporte de (Cm).

$$C_m = \frac{dV_1}{dt} \quad \text{--- (I-3)}$$

$$C_{m_2} = C_2 \frac{dV_2}{dt} \quad \text{--- (I-4)}$$

en donde:

C1 = concentración de entrada

C2 = concentración de salida.

Aplicando la definición de transporte de masa se obtiene:

$$\frac{dC_m(t)}{dt} = C_2 \frac{dV_2}{dt} - C_1 \frac{dV_1}{dt} \quad \text{--- (I-5)}$$

Por último se verifican las unidades:

$$C_m = \frac{\text{gr.}}{\text{ml}} \cdot \frac{\text{ml}}{\text{min}} = \frac{\text{gr.}}{\text{min}}$$

(concent) flujo volumétrico.

La ecuación (I-5), representa el balance de Masas en el sistema 'x', y es un modelo que al estar basado en la Ley de la conservación de la energía, se aplica en sistemas biológicos tales como:

- a).- La concentración de sales en la célula vegetal, cuando se habla de soluto y solvente.
- b).- La concentración e intercambio de gases. Como por ejemplo en el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{O}_2$  en los alveolos pulmonares y en los estomas vegetales.
- c).- En el balance de diferentes elementos metabólicos en la sangre o en las células vegetales.

(E).- Reacciones Químicas.

La reacción química es la transformación o cambio que sufren los compuestos o elementos al ponerse en contacto entre sí y al tener una estructura electrónica afín, para dar lugar a otras sustancias diferentes (10).

Las reacciones químicas son representadas por ecuaciones, y el balance de éstas puede simular teóricamente diversos fenómenos tales como:

- a).- La utilización de oxígeno en algunos tejidos vivos, y sus futuras reacciones.

- b).- El conjunto de reacciones y sus efectos en algunos aspectos del metabolismo orgánico.
- c).- Síntesis de proteínas, enzimas o cualquier otra substancia.

Las reacciones químicas pueden dividirse de dos maneras:

- A).- Por el desplazamiento de la energía térmica.
- B).- Por los productos (con o sin la presencia de catalizadores).

A su vez, las reacciones determinadas por el desplazamiento de energía térmica pueden ser: exo o endotérmicas, y las reacciones determinadas por los productos pueden subdividirse en 4 clases:

- a).- Reacciones sin catalizadores.
- b).- Reacciones de dos substancias (A) y (B) formando un producto (P)
- c).- Reacciones de tipo reversible.
- d).- Reacciones catalizadas orgánicas e inorgánicas.

Las reacciones exo y endotérmicas pueden o no relacionarse con estas 4 clases de reacciones ya que pueden desprender o absorber calor. Pero por referirse al aspecto térmico, su análisis corresponde a la bioenergética biológica que está fuera del alcance de este estudio, y se limita en los aspectos químicos a una somera explica-

ción.

(E-i)- Reacciones sin Catalizador(es).

Las reacciones sin catalizador(es), se efectúan cuando una sustancia (A) se convierte irreversiblemente en otra (B) en el tiempo, es decir:



siendo:

- k = Constante de reacción química.
- A = Concentración de la sust. (A)
- B = Concentración de la sust. (B)

Se sabe que de acuerdo a la Ley de Balance de Masas, se establece que la variación de la formación de la sust (B) es directamente proporcional a la concentración del reactivo (A), por lo que:

$$-\frac{da}{dt} = \frac{dB}{dt} = K \quad \text{--- (2)}$$

siendo:

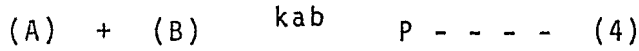
$$-\frac{dA}{dt} \text{ y } \frac{dB}{dt} \quad \text{Variaciones de concentración y formación de masas.}$$

Por lo tanto:

$$\frac{dB}{dt} = K = -\frac{dA}{dt} \quad \text{--- (3)}$$



(L-2).- Reacciones de 2 sustancias (A) y (B) que forman un producto (P).



A esta ecuación se le aplica la Ley de la conservación de la energía y se obtiene:

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dB}{dt} = - \frac{dP}{dt} = K_{ab} \text{ - - - - - (5)}$$

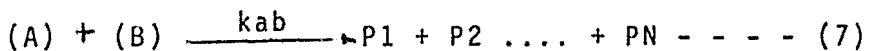
Siendo  $K_{ab}$  la cte. de reacción en éste caso.

Si:

$$- \frac{dA}{dt} = - \frac{dB}{dt} \quad \text{entonces} \quad - \frac{dB}{dt} = K_{ab} \text{ - - - - - (6)}$$

Nota: El signo (+) o (-) en los reactivos depende de la consideración que se tenga sobre la entrada y la salida.

(E-3).- Reacciones de dos sustancias (A) y (B) que forman dos o más productos.

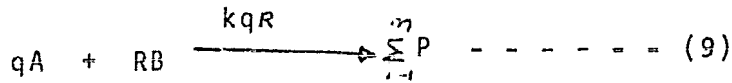


Aplicando para este caso la Ley de la conservación de la energía se obtiene:

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dB}{dt} = - \sum_{i=1}^n \frac{dP_n}{dt} = - K_{ab} \text{ - - - - - (8)}$$

Esta 2a. ecuación se cumple siempre y cuando el número de moléculas A y B sean el mismo.

Pero si el número de moléculas es diferente se tendrá:



en donde 'q' y 'R' son coeficientes que representan dos cantidades diferentes de moléculas, presentes en las sustancias A y B.

La cte de reacción será:

$$\frac{dP}{dt} = K_A^q B^R \quad \text{--- (10)}$$

y de manera idéntica:

$$\frac{dqA}{dt} = -\frac{de}{dt} \quad ; \quad q\frac{dA}{dt} = -\frac{qdp}{dt} \quad \text{--- (11)}$$

Por lo tanto:

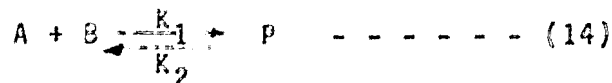
$$\frac{dRB}{dt} = -R \frac{dP}{dt} \quad \text{--- (12)}$$

Sumando las ecs (11) y (12), y sustituyendo términos según la (8), se obtiene la expresión diferencial de balance de masas para 2 sustancias (A) y (B) con diferente número de moléculas (Ec(7)).

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dRB}{dt} = -\left[ q\frac{dP}{dt} + R \frac{dP}{dt} \right] \quad \text{--- (13)}$$

(E-4) Reacciones de Tipo Reversible.

Señalamos reacciones en donde los compuestos A y B forman el producto P con una constante de reacción  $K_1$ ; pero el producto P se disocia en A y B con una constante de reacción  $K_2$ , ésto es:

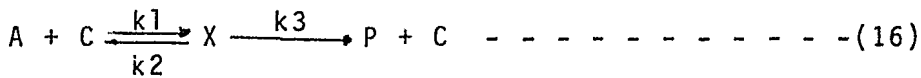


Para esta reacción las ecs. de balance son:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dB}{dt} = - \frac{dP}{dt} = K_1AB - K_2P \quad \text{--- (15)}$$

Reacciones Catalizadas (en general)

En este tipo de reacciones, además del reactivo existe la presencia de un catalizador que forma un producto intermedio 'X' pero que finalmente es recuperado en su forma original 'C' con el producto 'P' y tiene la siguiente configuración:



La reacción catalizada (16) tiene 3 ctes de reacción: k1, k2 y k3,- por ello se obtendrán 3 ecuaciones de balance que son:

$$\frac{dA}{dt} = -K_1AC + k_2 X \quad \text{--- (17)}$$

$$\frac{dX}{dt} = K_1AC - (K_2 + K_3) X \quad \text{--- (18)}$$

$$\frac{dP}{dt} = K_3 \quad \text{--- (19)}$$

En donde  $-(K_2 + K_3)$  en la Ec (I-18) es cte y  $\frac{dP}{dt}$  de la ecuación (I-19) es llamado: término de formación del producto inicial.

El análisis completo de las reacciones anteriores conduce a la fórmula de Briggs & Haldane que se indica a continuación:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{K_3 (C + )A}{\left[ \frac{K_2 + K_3}{K_1} \right] + A} \quad \text{--- (20)}$$

(F).- Sistemas Electromecánicos.

Usando la teoría de los sistemas lineales o no lineales es posible representar en forma equivalente los sistemas biológicos - con circuitos eléctricos, mecánicos, hidráulicos, térmicos, etc., los cuales se deben de comportar de la misma forma dinámica que los sistemas, biológicos y las características de la simulación del sistema, deberán cumplir con el comportamiento esperado de simulación, el cual puede expresarse a su vez matemáticamente con ecuaciones diferenciales o de cualquier otra índole.

Recordando que las simulaciones con sistemas lineales son una simplificación de sistemas que en la realidad, son no lineales, sólo serán válidas dentro de cierto rango para poder considerarse como -- sistemas lineales e invariantes en el tiempo, por ésta razón es preciso y conveniente efectuar una comparación muy específica de las -- funciones biológicas en determinadas áreas y dentro de ciertos límites para llegar a un resultado con aplicaciones de utilidad práctica. (10).

Por ejemplo, un caso sencillo es la simulación de una parte del sistema cardiovascular que conduce a una representación con el siguiente circuito eléctrico (10):

En donde la nomenclatura es la siguiente considerando su equivalencia:

- P=v= Voltaje
- $R_1, R_2$  = resistencia.
- c = capacitancia.

El volúmen en una vena o una arteria se define como:

$$V = cP \text{ - - - - - (I-6)}$$

siendo a su vez:

- v = volumen.
- d = distensibilidad
- P = presión.

Derivando la ec (1) con respecto a T se tiene:

$$\frac{dv}{dt} = c \frac{dP}{dt} \Rightarrow \frac{dv}{dt} = v = c \frac{dP}{dt} \text{ - - - (I-7)}$$

De la ley de corrientes de Kirchoff:

$$i_1 + i_2 - i_t = 0 \text{ - - - - - (I-8)}$$

Luego:

$$i_1 = \frac{P_1 - P_2}{R_1} - c \frac{dP}{dt} \text{ - - - - (I-9)}$$

$$i_2 = \frac{P_2}{R_2} \text{ - - - - - (I-10)}$$

Sustituyendo a las ecs (1-9) y (1-10) en (1-8) se obtiene que:

$$\frac{P_1 - P_2}{R_1} - c \frac{dP}{dt} + \frac{(-P_2)}{R_2} = 0 \text{ - - - - (I-11)}$$

lineales es la exactitud de el comportamiento real del sistema con respecto a las consideraciones que se tomaron en cuenta al simular dicho sistema.

#### Concepto del Sistema Componente Biológico.

El sistema componente biológico es aquel que formando parte de una célula, biológica, realiza un conjunto de funciones exclusivas, y relaciona sus características físico-químicas con los demás elementos que forman parte de esa célula, por ejemplo: la membrana celular vegetal o animal tiene asignadas un conjunto de funciones y propiedades que solo ella puede tener y llevar a cabo como la difusión, ósmosis, promoción de enzimas, etc. relacionándolas de alguna forma con el protoplasma y el núcleo.

Por sí solos, el núcleo, el protoplasma y la membrana son sistemas especializados con subelementos particulares que reciben diferentes nombres y dependen principalmente de la clase de célula.\*

#### (G).- Secuencia de Estudio aplicable a un Sistema Componente de las Células Vegetales.

El uso de los conceptos y definiciones biológicas y matemáticas (biomatemáticas) conduce a una secuencia de estudio, que se aplica al análisis de una función del sistema componente seleccionado.

Para estudiar por ejemplo, la membrana vegetal y una de sus funciones se pueden considerar 4 aspectos importantes:

(\*) Una discusión y análisis más detallados se darán en el capítulo (II).

de importancia, que se deberán de tomar en cuenta, estas son las siguientes:

- 1).- Limitaciones Experimentales.
- 2).- Limitaciones Económicas.
- 3).- Limitaciones de Tiempo.

#### Limitaciones Experimentales.

Este primer tipo, de limitación implica una severa restricción, ya que al no poderse definir en términos matemáticos, todo el conjunto de relaciones existentes entre cada una de las funciones de un sistema componente por existir un enorme número de variables de distinta naturaleza (heterogéneas), se llegaría a ecuaciones muy complicadas, haciendo que recursos y herramientas físico-matemáticas con que se cuentan, puedan conducir a errores de consideración.

El análisis de una o dos, de todas las funciones que realiza un sistema, biológico, disminuye la posibilidad de error, independientemente de que se utilice o no la teoría de sistemas lineales. Desde otros puntos de vista en los que se debe de considerar a la Bioquímica, la naturaleza de cualquier componente celular implicaría fenómenos biológicos poco conocidos y además, los aspectos matemáticos al ser desarrollados y plantear sus soluciones, no explicarían claramente el comportamiento de algunas funciones del sistema componente.

### Limitaciones Económicas.

Este segundo tipo de limitaciones, dependen de las características propias del tema a desarrollar, así como de los intereses personales y colectivos. Un tema de Biofísica, en general, es un tema de gran versatilidad que aumenta en gasto económico, a medida que la profundidad y el interés de la investigación se desarrollan.

### Limitaciones de Tiempo.

Esta tercera limitación, es tal vez la más importante, ya que para poder evaluar una investigación o proyecto de cualquier magnitud y de cualquier ciencia se deberá de efectuar un balance que equilibre todos los parámetros y variables relacionados directa e indirectamente con el aspecto matemático de un sistema. Este balance que conjuga armoniosamente todos los parámetros con respecto al tiempo, recibe el nombre de optimización.

### (I).- Clases Fundamentales de Modelos en la Célula Vegetal -- Inferior.

La Célula como unidad fundamental biológica en los vegetales tiene una estructura general en lo que respecta a sus componentes principales como son: núcleo, protoplasma y membrana. Sus mecanismos y características pueden ser planteadas por la observación; y el conjunto de observaciones en las experimentaciones dan como resultado un modelo, existiendo en la Biofísica Vegetal esencialmente éstos 3 modelos que se mencionan a continuación (11):



- 1.- Modelo Unitario
- 2.- Modelo Hipotético.
- 3.- Modelo Generalizado.

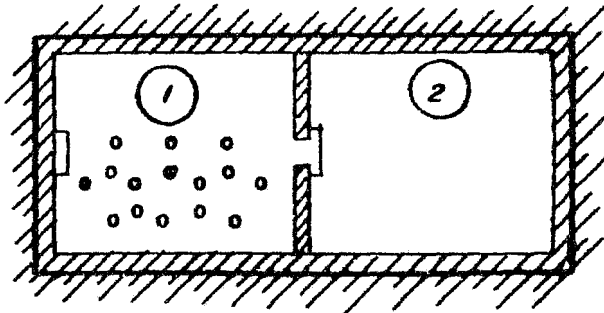
1).- Modelo Unitario.- Es aquél que se establece por medio de la experimentación en vivo o en vitro \* con el fin de analizar el comportamiento de una o varias funciones de un sistema componente. Por ejemplo: la difusión de algunas sustancias en la membrana vegetal.

2).- Modelo Hipotético.- Es aquél que se basa en posibles mecanismos internos de un sistema componente desarrollados o propuestos con la finalidad de explicar una o varias funciones de el sistema componente en cuestión (1).

3).- Modelo Generalizado.- Es conocido también como híbrido y puede ser simple ó compuesto, en ambos casos, es el resultado de la unión de un modelo unitario con un hipotético.

Se tiene un modelo generalizado simple cuando existe un determinado número de variables en una o varias funciones de igual naturaleza (homogéneas) y pueden conducir a sistemas lineales o no lineales (1).

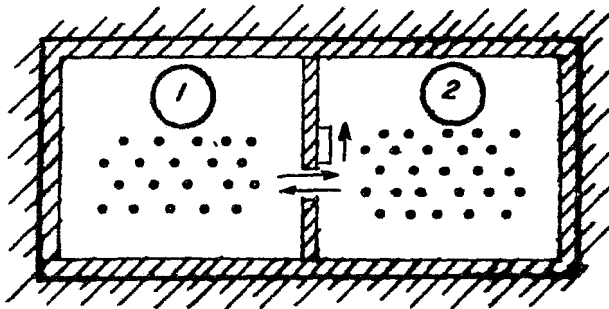
El sistema será compuesto cuando existe una gran cantidad de variables en varias funciones de distinta naturaleza (heterogéneas) y conducen necesariamente a un sistema no lineal.



o Moléculas con diferente nivel energético

**FIG. I 3a**

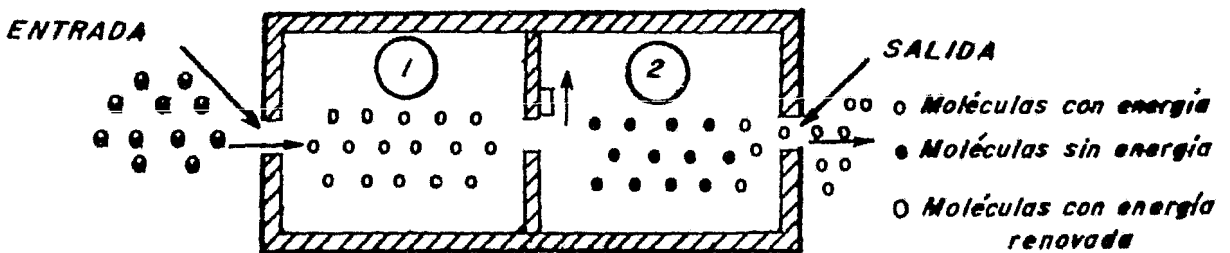
**SISTEMA AISLADO Y ESTÁTICO EN EL ESTADO (1)**



● Moléculas con energía  
○ Moléculas sin energía

**FIG. I 3b**

**SISTEMA AISLADO Y ESTÁTICO EN EL ESTADO (2)**



o Moléculas con energía  
● Moléculas sin energía  
○ Moléculas con energía renovada

**FIG. I 3c.**

**SISTEMA ABIERTO (REGIMEN PERMANENTE)**

(I-2).- Sistemas Biológicos Abiertos y Cerrados.

Un hecho común y esencial en cualquier organismo es la de tener un flujo continuo de materia y energía procedentes del medio ambiente que son transformadas en una gran cantidad de sustancias utilizadas en el metabolismo y devueltas a su origen por otros medios, proceso gracias al cual se mantienen vivos y ayudan a otras especies a crecer y reproducirse (2).

Para un sistema Biológico o no Biológico existe siempre la posibilidad de empezarlo a estudiar idealmente, es decir con un mínimo de variables y considerando que el sistema en cuestión es cerrado y estático. También se observa la aplicación de idealización en cualquier enfoque con el fin de obtener algu(os) model(os) analógico(s). Estas consideraciones pueden aplicarse por lo tanto al estudio de la membrana biológica, con lo que se logrará una primera aproximación - al verdadero modelo biológico.

(A).- El sistema Biológico Aislado y Estático (ó Estado 1)

Sea un volúmen como el de la fig. (I-3a) del que no sale ni entra materia o energía y además está perfectamente inmóvil, es decir el sistema es aislado y estático (2).

El volúmen está dividido en dos compartimentos. En el compartimento (I), existe un número 'N' de moléculas energizadas con diferente distribución de energía, y en el compartimento (II) no existe molécula alguna; ambos compartimentos se comunican entre sí por una sola ventana intermedia que se encuentra en un tabique de separa-

ción entre los dos compartimentos. A éste conjunto de condiciones iniciales se les denomina estado (1).

En el mismo volúmen, en determinado momento ( $t = 0$ ), se abre la ventana intermedia del tabique de separación, y entonces todas las partículas se precipitan a través de la abertura al entrar al compartimento (II), pero, como las partículas tienen diferentes niveles de energía, las de menor cantidad de energía, tenderán a regresar a través de la misma abertura, estableciéndose entonces dos flujos  $f(I)$  y  $f(II)$  de entrada y salida respectivamente (fig. I-3b). ( $\rightleftarrows$ )

En un principio, el flujo  $f(II)$  es muy pequeño ya que el número de moléculas entrante  $f(I)$  es mayor que el número de moléculas saliente  $f(II)$ , éstas últimas difícilmente pueden salir al tener una presión mayor en contra, pero, al variar el tiempo, el número de moléculas saliente aumenta, hasta que teóricamente se tiene el mismo número de moléculas de ambos lados, en ese instante se alcanza el equilibrio, a este nuevo conjunto de condiciones se le denomina estado (2).

En un sistema cerrado, se produce una transformación química reversible, en el vegetal, las moléculas orgánicas, ricas en energía entran al 2º compartimento, y reaccionan transformando ésta energía en diferentes compuestos y finalmente se libera según el ciclo que tenga la función en la que se utilizó.

Pero en este caso específico, por el hecho de tratarse de un sistema cerrado, la energía liberada no puede nunca renovarse ni in-

crementarse, de tal forma que la energía del flujo molecular  $f(1)$  -- que al principio es mucha, se va amortiguando hasta estabilizarse, -- cuando las moléculas dejan de entrar.(2)

Se deduce entonces que la suma alcanzada de energía nunca -- puede ser superior a la cantidad total que poseían las moléculas antes de abrirse la ventana, y que además en el sistema cerrado, sólo sustancias o elementos presentes reaccionan conjuntamente y además -- el equilibrio sólo existe cuando la velocidad de reacción en el sen tido (1) es igual a la de la reacción en sentido inverso  $v(2)$ .

#### (B).- El Sistema Abierto Biológico.

Para que un sistema como el presentado en el modelo -- anterior, se transforme en un sistema abierto, es suficiente con -- hacer una ventana en la cara anterior del compartimiento (I) y otra más en la cara posterior del compartimento (II), así, la reacción -- que se va a establecer conducirá a un régimen permanente. (Véase la fig. I-3c)).

En este segundo sistema, el medio ambiente estará considerado y con él se deberán de considerar diversas reacciones que permitan a la energía liberada reintegrarse al sistema. Por ejemplo, si esa energía está representada por sustancias de desecho, éstas podrán -- utilizarse nuevamente en el sistema original gracias a un ciclo bio lógico-ecológico.

La renovación interna de la energía en un sistema biológico

es la interacción o balance energético - material que corresponde - siempre a un estado estable biológico.

Estado Estable Biológico.- Se define como estado estable biológico al conjunto de condiciones físico - químico - biológicas para las - cuales la respuesta de todo organismo y de cada uno de los sistemas componentes oscilará dentro de un rango de valores que hagan operar al sistema óptimamente.

Esto quiere decir que si una función de un sistema componen- te es expresada en términos matemáticos, existirá(n) algu(os) va-- lor(es) que conduzcan a oscilaciones persistentes o de gran ampli-- tud. Al cumplirse ésto, el sistema abierto biológico tendrá conti-- nuidad en sus funciones vitales tales como: nutrición, respiración, etc. (3).

Autoconservación.- Un sistema abierto biológico es autocon-- servativo, cuando es capaz de cumplir con las siguientes condicio-- nes (3).

- 1.- Mantener un régimen permanente.
- 2.- El balance de energía de cada uno de sus sistemas componentes es estable.
- 3.- Hay continuidad en todas las funciones vitales.

En los sistemas abiertos más primitivos, ya característicos de la vida, la entrada de sustancias ricas en energía procedentes-

del exterior y la expulsión a éste mismo medio de compuestos formados en el interior crea un flujo continuo, el cual es compensado en términos de energía "renovada", al desechar la energía "usada" en el sistema (3).

(C).- Principales Diferencias entre los Sistemas Biológicos Abiertos y Cerrados.

Con el propósito de señalar las ventajas y desventajas que implicaría el considerar un sistema biológico abierto o cerrado, así como la utilidad posterior e influencia en otros sistemas en la resolución de un determinado problema biológico es conveniente elaborar una comparación adecuada entre ambas clases de sistemas.

Tres comparaciones de un Sistema Biológico Abierto y uno cerrado.

Sistema Abierto.	Sistema Cerrado.
Condiciones iniciales variables	Condiciones iniciales constantes.
Discriminación Múltiple (selección variable)	Discriminación Única (selección única)
Automantenimiento ó Autoconservación Es- tructural	Sin Automantenimiento.

Esta comparación como se observa, se limita a sistemas biológicos abiertos y cerrados. Si tal comparación tuviera que realizarse exhaustivamente, tendrían que incluirse todas las diferencias ó al menos las más significativas en cada ciencia, por ejemplo en el ámbito de la termodinámica, la química, etc.

(I-3).- Los Fundamentos de la Teoría de Control en la Biofísica Vegetal.

Introducción.

Un vegetal cualquiera, superior o inferior vive y se desarrolla en un ambiente determinado independientemente de que sea uni o pluricelular obedeciendo a las condiciones de ese ambiente. Cualquier condición o conjunto de condiciones externas o internas ambientales que tienden a transformar o a producir cambios en la secuencia fisiológica normal del vegetal se le(s) denomina aberraciones, y en una célula, las aberraciones son muchas en todas sus componentes, actuando simultáneamente, con diversas y diferentes naturalezas como pueden ser: químicas, mecánicas, térmicas, etc. (3).

Una componente celular es a su vez un sistema complejo que por pertenecer a un organismo se le denomina sistema componente, y a una aberración del sistema componente se le denomina tensión, la cual puede alterar el metabolismo normal del organismo vegetal en determinado momento.



El vegetal como organismo, reacciona a una 'X' tensión, lo que implica una entrada y una salida en un sistema, pero por ser un refinado y complejo mecanismo, sería prácticamente imposible llegar al pleno conocimiento de su fisiología, no obstante, es factible -- comprender una parte del sistema componente.

Aún en un sistema componente, el mecanismo que rige a las funciones que pueda desarrollar solo puede ser descrito en términos de cada una de esas mismas funciones que representan a su vez otro sistema al que por conveniencia se le denominará subsistema.

Un subsistema celular cualquiera, realiza una labor con procedimientos que obedecen a leyes y procesos cíclicos naturales, representados por ecuaciones en donde existe un conjunto de variables y factores constantes que acoplados a un proceso específico, tratan de conseguir la descripción del comportamiento de ese proceso para diferentes condiciones externas (ambientales) e internas (de la célula) (7).

(A).- Condiciones Generales de la Célula Vegetal.

Las condiciones biológicas naturales de una célula vegetal son diferentes a las que existen en esa misma célula sometida a un conjunto de condiciones experimentales, por éste motivo, existirán dos clases de tensiones: las biológicas naturales y las de origen -- experimental que implica experimentos en vitro y en vivo

### Tensiones Biológicas Naturales.

Las tensiones biológicas naturales se definen como aquellas determinadas por el medio ambiente original en el que se encuentra - el organismo vegetal, éstas tensiones actúan en todas y cada una de las células existentes, así como en cada sistema componente que por sí solo es un sistema abierto biológico.

### Tensiones de origen Experimental.

A diferencia de las anteriores, son un conjunto de tensiones que actúan en el organismo vegetal, de manera particular, y aplicadas a una función del subsistema a tratar para posteriormente analizar otras funciones del sistema componente. Esta clase de tensiones pueden aplicarse de ésta forma:

- (I).- Identificación lo más completa posible de un sistema componente. Por ejemplo: la membrana de un alga.
- (II).- Estudio y descripción de sus funciones. Las funciones determinan por si mismas un subsistema especializado para cada una - de ellas, por ejemplo la difusión.
- (III).- A partir de una función en particular se requiere por razones de experimentación (in vitro o en vivo) de ciertas condiciones artificiales. En el caso de la difusión, sería el análisis con diferentes substancias, pero con las condiciones - siguientes:

- a).- Control de una o varias funciones específicas de un subsistema en tiempo real y hasta donde sea posible.
  
- b).- Uso de sustancias químicas tolerables al organismo en estudio y capaces de simplificar la experimentación a fin de obtener la mayor información posible del sistema componente de interés.

#### Tensiones Externas e Internas en el Vegetal.

Tanto las tensiones biológicas naturales como las de origen experimental pueden ser externas o internas.

**Tensión Externa.**- Todo agente de origen físico, químico o biológico que afecte al vegetal en su totalidad o a alguno de sus sistemas componentes en el ámbito que le rodea se denomina tensión externa.

Ejemplos de tensiones externas que no afectan la naturaleza íntima del vegetal son: el cambio de intensidad luminosa, la variación normal de sales minerales y la cantidad mínima de agua disponible para su supervivencia. (3)

**Tensión Interna.**- De igual manera, cualquier agente que afecte la naturaleza íntima del vegetal en sus funciones vitales, o en funciones propias de un sistema componente a nivel fisiológico se denomina tensión interna. Ejemplos de tensiones internas que afectan la naturaleza íntima del vegetal o a sus funciones en su totali

dad o parcialmente son: el uso de inhibidores en la(s) célula(s), la introducción de elementos y/o artefactos mecánicos de microcirujía - en el protoplasma o en la membrana, etc.

#### El Régimen Permanente.

Se define como Régimen Permanente a un conjunto de condiciones físico-bio-químicas particulares para cada vegetal, que obedecen a un ciclo determinado y en donde cada fase del ciclo tiene determinadas características de diferente naturaleza. Es decir cada fase -- del ciclo de un régimen permanente, se aplica a un conjunto combinado armoniosamente de variables físicas, químicas y biológicas para -- determinar desde una función particular de un sistema componente has ta una de sus funciones vitales (2).

En este estudio, el régimen permanente, para mantenerse den tro de su ciclo natural, deberá contrarrestar de algún modo a toda -- tensión que exceda a las condiciones normales, o incrementar a la -- tensión o tensiones que se encuentren por debajo de dichas condiciones, es decir, deberá regular las tensiones existentes en un momento dado, en su debida proporción, lo que depende a su vez de la clase -- de vegetal.

#### Diagramas de Bloque en la función de una componente del -- Sistema Célula Vegetal.

El diagrama de malla abierta, representa a un sistema in-- capaz de elegir la mejor respuesta a las condiciones variables del

ambiente en que se encuentre. fig. (I-4), en tanto que el diagrama de malla cerrada si puede dar una respuesta adecuada al cambio de condiciones del ambiente. fig. (I-5).

Si se recuerda lo que quiere decir sistema biológico cerrado y sistema biológico abierto, es fácil observar que el diagrama de bloques de malla abierta corresponde al sistema biológico cerrado, por tener éstas dos características:

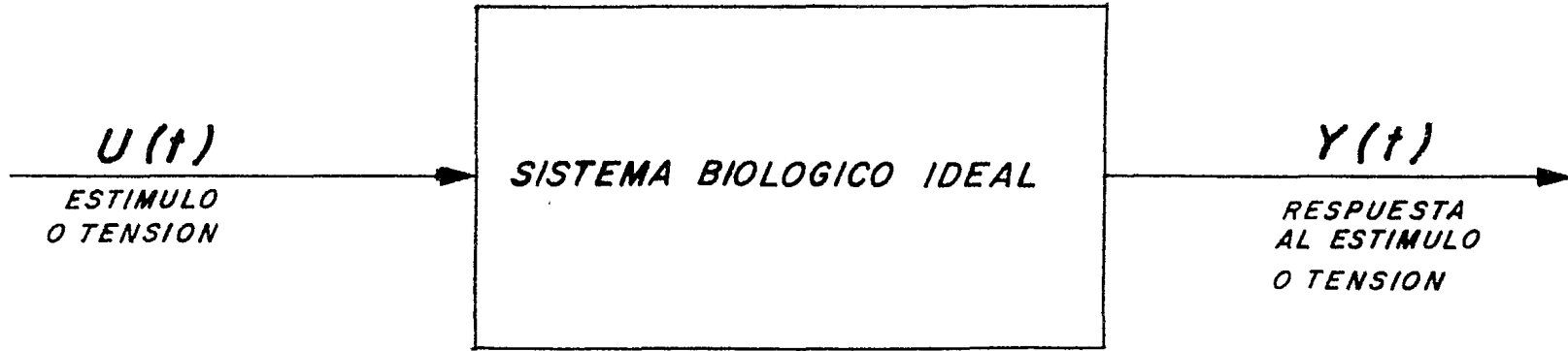
- 1).- No es capaz de reaccionar adecuadamente a un cambio de condiciones ambientales.
- 2).- No tiene régimen permanente.

El sistema abierto biológico, por el contrario al no tener éstas dos características, le corresponde un diagrama de bloques de malla cerrada. Es decir es capaz de reaccionar adecuadamente a cualquier cambio de condiciones ambientales y tiene régimen permanente.

#### (B).- Mecanismos Modulares en la Célula Vegetal.

Según el investigador Norbert Wimer, una realimentación, es un método de controlar un sistema insertando en él los resultados de comportamiento anterior. Al dispositivo capaz de lograr la realimentación se le denomina sensor (modulador) por tener la cualidad de modificar las condiciones de entrada y las de salida (respuesta) del sistema (5).

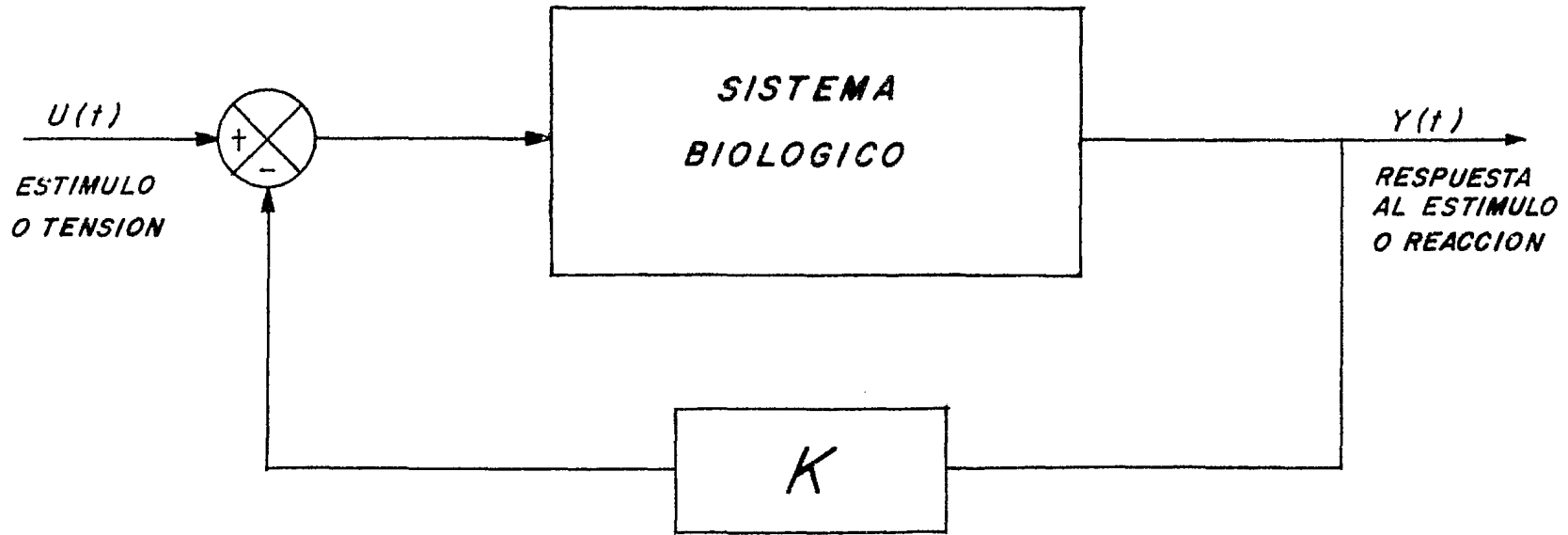
*FIG. (1-4)*



*DIAGRAMA DE MALLA*

*ABIERTA QUE REPRESENTA AL SISTEMA  
BIOLÓGICO CERRADO*

*FIG. (I-5)*

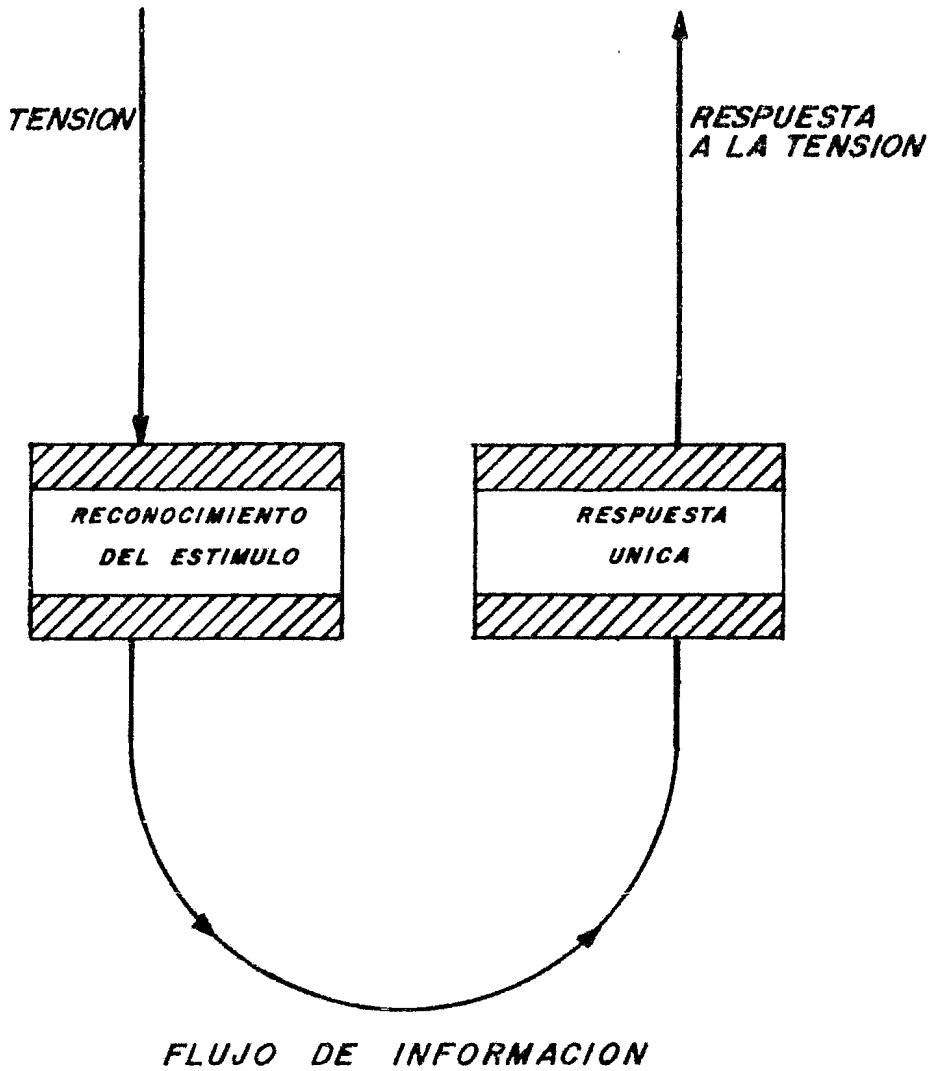


**DIAGRAMA DE MALLA**

*GERRADA QUE REPRESENTA AL SISTEMA BIOLÓGICO ABIERTO*

- 45 -

FIG. I-6



EN ESTA FIGURA SE MUESTRA LA RESPUESTA A UNA TENSION EN DONDE LA SALIDA DEL SISTEMA SIEMPRE ES LA MISMA.



Descripción de un Sistema de Malla cerrada aplicado a la Célula Vegetal.

Para tener una idea de cómo es obtenido un Régimen permanente para un sistema componente en células vegetales, es preciso describir a cada uno de los elementos de un sistema de malla cerrado a partir de un diagrama de bloques generalizado, describiendo cada uno de los elementos que lo componen (3).

Considerando un sistema de control elemental como el mostrado en la fig. (I-5), se observa que siempre existirá una excitación de magnitud variable que el sistema componente vegetal, (en este caso) puede reconocerse plenamente.

Una vez clasificada la excitación, el sistema componente da una respuesta a esa tensión o a otras, siempre eligiendo la más adecuada de entre varias posibles, en un tiempo óptimo coordinando sus relaciones con las demás funciones celulares, y las propias de cada subsistema.

El sistema componente, es entonces capaz de responder a un estímulo en más de una forma, y realiza discriminaciones de estímulos simultáneamente a diferencia del Sistema Biológico cerrado que dará la misma respuesta al no tener sensor discriminante alguno. fig (I-6).

Un sistema componente biológico (como por ejemplo la membrana), al igual que toda una célula, es un sistema multivariable, -

(fig I-7A), pero un subsistema biológico puede considerarse univariable.

Al reaccionar la célula y todos sus sistemas componentes a varias perturbaciones dan varias salidas o respuestas, pero un subsistema considera una sola perturbación y una sola salida (Véanse las - figs. (I-7A) y (I-8A)).

#### Tensiones (Excitaciones) en el Vegetal.

Un vegetal viviente está sometido a diferentes tensiones - todo el tiempo, gracias a que existe un conjunto de balances físico-químicos biológicos precisos y exactos que permiten una respuesta -- adecuada. Este conjunto de balances denominado "gobierno interno del organismo", no es todavía bien conocido en detalle, pero su existencia es evidente, ya que el vegetal puede permanecer cierto tiempo intacto y funcionando a pesar de los estímulos (o tensiones) que de -- otra manera trastornarían su coordinación interna, lo que se traduciría en una o varias respuestas inapropiadas que conducen a regímenes no permanentes.(3)

Modulador Vegetal.- El mecanismo modulador en el campo biológico tiene el mismo objetivo que indica el concepto de realimentación y difiere de todos los demás en que es esencialmente enzimático, por ello, el gobierno de la célula tiene un gobierno de información y selección por medios exclusivamente químicos, que implican -- mensajes o señales de alguna clase tales como las de índole iónica, transporte y disociación de compuestos orgánicos, etc.

Si se compara a un sistema componente de la célula como la membrana, con un sistema de correo y la trayectoria de una molécula-cargada en la difusión (por ejem.) con el camino que recorre una -- carta, resulta que éste ión es clasificado y seleccionado como esa -- carta, el viaje, completo del ión es análogo al de la carta puesto -- que implica también su reconocimiento, transporte, recepción, reac-- ción y aplicación.

(C).- Descripción de un Sistema de Control en la Membrana Vegetal.

Una vez descritas las ideas básicas sobre el posible mecanismo interno de la célula vegetal es preciso traducirlas a su -- lenguaje equivalente en la teoría de control, susceptibles de ser -- analizados desde el punto de vista ingenieril, de acuerdo a la fun-- ción que desempeña cada una de las componentes, muy especialmente la membrana.

En la membrana celular vegetal se identifican los elemen-- tos: receptor, actuador, discriminante y modulador, (Ver fig. I-8), con ellos, se mantiene el régimen permanente. En el caso de la mem-- brana de un vegetal inferior unicelular, todo el sistema de control y comunicaciones está integrado por una sola célula, que opera sobre una base común de principios físico-biológicos. Por éste motivo la -- única forma posible de identificar los elementos de control de la -- membrana en un vegetal unicelular (ó de una célula aislada) es uti-- lizando una teoría biológica descriptiva del funcionamiento indivi-- dual de la membrana.

La razón por la cual se hace uso de una teoría Biológica - de la membrana es que no se conocen todos los aspectos de su funcionamiento. En otras palabras, es como no saber en forma precisa de -- qué manera está constituido un aparato y entonces idear una teoría - sobre las posibles componentes del aparato y sus relaciones, partiendo de la teoría establecida al respecto, sobre el aparato.

La teoría biológica implica una suposición o hipótesis -- lógica acorde a las funciones del sistema componente, y requiere - además de una identificación de elementos que realizan o ayudan a - realizar una función. El mecanismo que sigue la membrana o cual--- quier otro componente de la célula vegetal, no difiere de otro sistema de cualquier otra índole en cuanto a elementos básicos equivalentes, pero sí en cuanto a propiedades.

Descripción de un Mecanismo Básico de Control en la Mem-- brana Vegetal Unicelular.

Al analizar la membrana biológica considerando sus funciones y su complejidad, sería muy difícil relacionar y estudiar en -- detalle a todas ellas, pero en cambio, si es analizada una sola a - partir de una sencilla relación entrada - salida, puede establecerse la hipótesis de la que se habló anteriormente. Esta hipótesis es simplemente una identificación de las cualidades principales inhe-- rentes en la membrana, las cuales son: excitabilidad y selectividad.

Al responder la membrana a estímulos físicos y químicos - del ambiente, se observa la excitabilidad, y por tomar una determi-

nada cantidad de elementos y compuestos es también selectiva.

La membrana posee en su irregular estructura mivrovellosidades que en conjunto reaccionan a cualquier tensión y son además - auxiliares en la selectividad de elementos y/o sustancias necesarias para mantener el equilibrio fisiológico del organismo celular.

Para que tal equilibrio fisiológico se cumpla hay una regulación cuantitativa de materias a través de la membrana de naturaleza químico - enzimática, causante del transporte pasivo y activo de sustancias y elementos, requeridos por la célula. (Véase la fig. -- (I-7A)).

El transporte pasivo, como el activo dependen de una característica propia de la membrana que permite el intercambio de productos metabólicos, denominada permeabilidad (1) de la cual se hablará en detalle posteriormente.

El paso de sustancias pasivo según la hipótesis sostenida por muchos investigadores se realiza a través de los poros de una - membrana a una velocidad proporcional al gradiente de concentración utilizando energía metabólica en diversas sustancias.

En cuanto al transporte activo, el aspecto de más importancia radica en el flujo de iones simples y complejos\*, fundamental - para mantener la presión osmótica celular y la concentración necesi-

\* Iones mono y Polivalentes.

ria de aniones y cationes que se utilizan para regular el intercambio de moléculas de agua entre la célula y el medio ambiente.

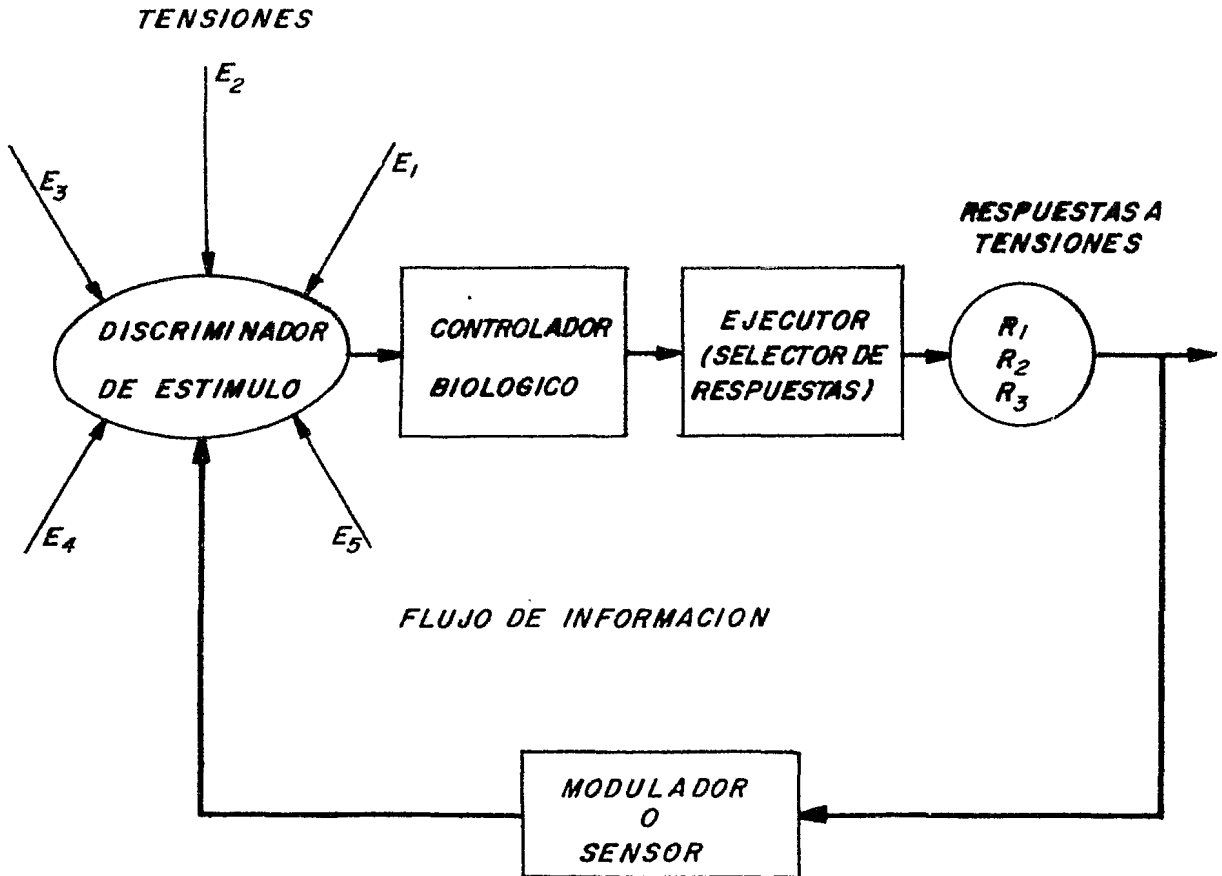
#### Intercambio Biológico.

En un sistema electromecánico, la unidad que capta la excitación o receptora, así como la selectora con su respectivo mecanismo de regulación, no son por lo general intercambiables, un receptor es un receptor y un selector es un selector, al igual que en la mayoría de los sistemas hidráulicos y térmicos, pero en los sistemas componentes biológicos como la membrana, un selector puede ser un receptor y un receptor un selector. Todo el sistema es de naturaleza Bioquímica (3).

#### Mecanismo de designación Biológica.

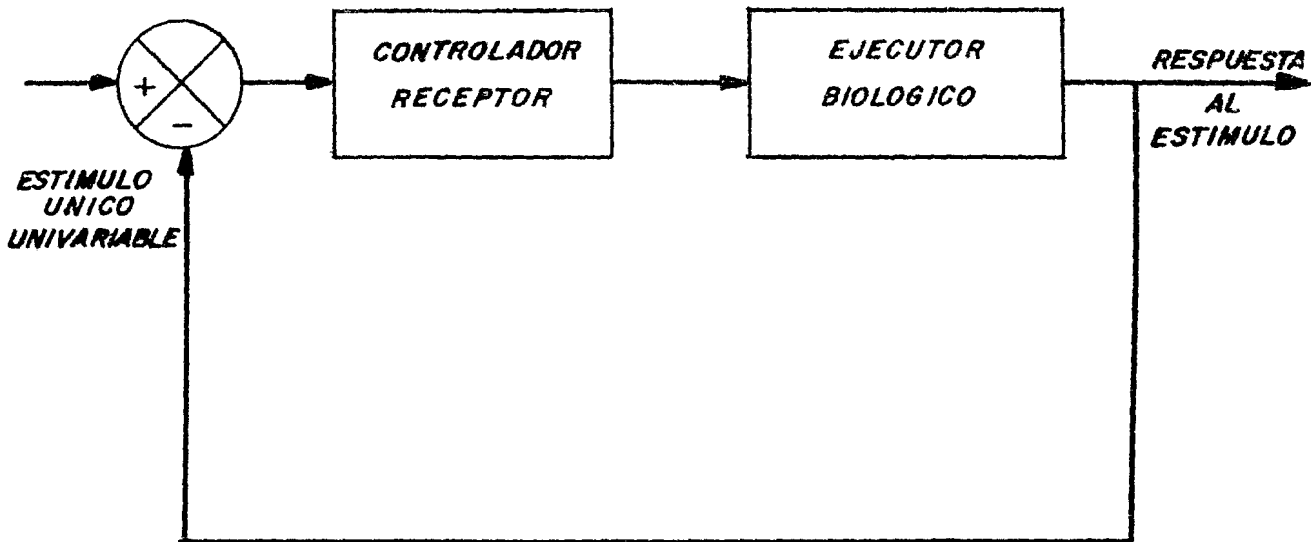
Cuando se habla de un sistema electro-mecánico no es difícil identificar cada uno de los elementos del sistema de control, - pero en un organismo celular o en alguno de sus sistemas componentes, no es tan sencillo lograrlo ya que todas las componentes están perfectamente integradas, por ésta razón, sólo es posible identificarlas por equivalencia de acuerdo a los efectos (o reacciones) que causa un elemento o sustancia con respecto a otra. Por ejemplo, una sustancia orgánica 'A' procedente de una reacción natural puede -- ser receptora, otra denominada 'B' en la membrana, sería la selectora; las sustancias 'C' y 'D' son respectivamente ejecutora y sensor-moduladora que envían la información ya corregida al actuador, el cual puede ser otra sustancia integrada a la región donde se encuentra la receptora 'A'. Véase figs. (I-8A)

FIG. I-7



**LAS FIGURAS I-7 Y I-8 MUESTRAN RESPECTIVAMENTE UN SISTEMA DE CONTROL MULTIVARIABLE Y UN SISTEMA DE CONTROL UNIVARIABLE EN UN SUBSISTEMA DE LA MEMBRANA**

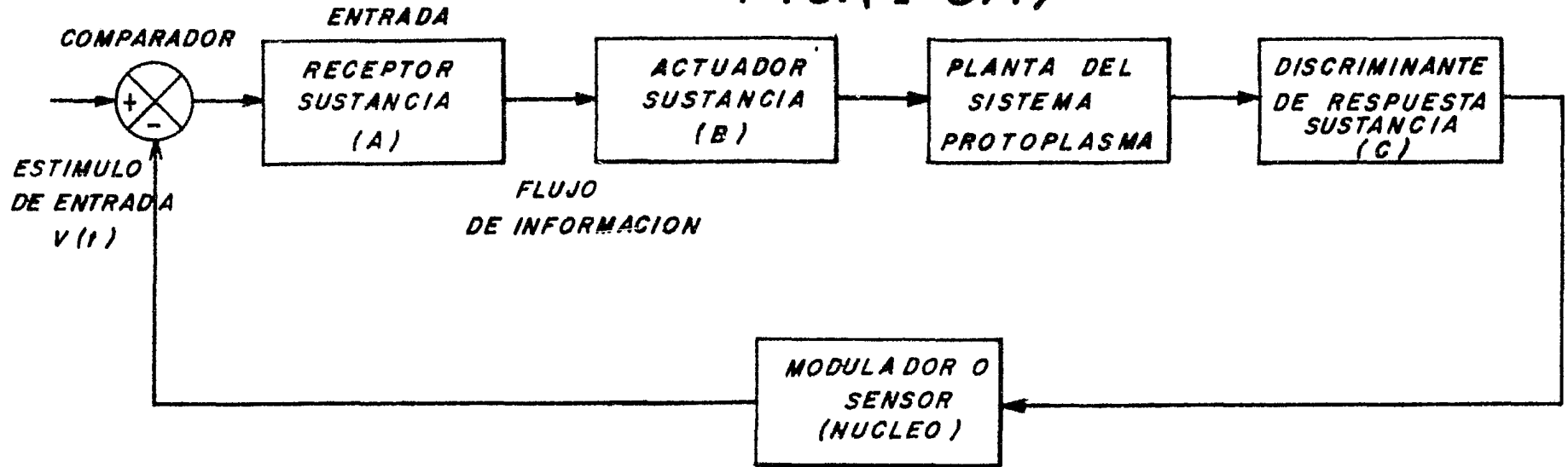
FIG. I-8



LAS FIGURAS I-7 Y I-8 MUESTRAN RESPECTIVAMENTE UN SISTEMA DE CONTROL MULTIVARIABLE Y UN SISTEMA DE CONTROL UNIVARIABLE EN UN SUBSISTEMA DE LA MEMBRANA



**FIG. (I-8A)**



**SISTEMA DE CONTROL GENERAL DE UNA CELULA UNIVARIABLE SIN SEÑAL DE  
PERTURBACION EXTRA**

El sistema equivalente a un servomecanismo en el sistema de control aplicado al sistema componente vegetal, es el único componente que no tiene la propiedad de intercambio biológico, ya que por su complejo carácter enzimático, sus funciones parecen estar programadas y sólo puede ser sustituido por otro grupo enzimático de la misma naturaleza, ello implica otro mecanismo selector dentro del servomecanismo original.

#### Convención utilizada en el intercambio biológico.

Debido a la gran versatilidad que existe en un sistema componente biológico, no sería posible establecer ningún modelo para definir alguna de sus funciones, si las propiedades y condiciones cambian, por ésta importante razón, es recomendable utilizar una sola especie de organismo unicelular que tenga determinadas características fisiológicas en determinado momento.

#### (D).- Condiciones de Estudio en La Membrana del Vegetal Inferior.

A partir de una clasificación general parcial de las componentes de una célula, se establece un plan expresado únicamente para la membrana del vegetal inferior unicelular, en tanto que el vegetal pluricelular superior solo es estudiado en aspectos generales.

La membrana biológica de cualquier célula tiene algunas funciones que difícilmente pueden ser analizadas desde el punto de -

vista ingenieril si no se satisfacen las siguientes condiciones de estudio:

- a).- Conocimiento Fundamental de los Sistemas Biológicos vegetales.
- b).- Conocimientos específicos de la parte del vegetal en estudio.
- c).- Comprensión clara del problema por analizar.
- d).- Conocimiento del sistema equivalente al cual se quiere aproximar. Por ejem: Sistemas Electromecánicos.
- e).- Identificación, precisa de variables y constantes equivalentes con su respectiva relación.
- f).- Planteamiento del Modelo.

(a).- Conocimiento Fundamental de los Sistemas Biológicos Vegetales y los Electromecánicos.

El aspecto de aplicación práctica corresponde a la Ingeniería, siempre y cuando se consideren en su debida magnitud la fisiología de la membrana biológica en el vegetal inferior y las condiciones ambientales que influyen determinadamente, expresando su importancia en términos objetivos y especializados.

(b).- Conocimientos específicos de la parte del Vegetal en estudio.

Por ser la membrana el punto principal a estudiar, y existir en ella cualidades y características de gran trascendencia aplicables a muchas áreas científicas, se requiere del conocimiento-descriptivo y detallado de cada uno de sus subsistemas, funciones y

posibles limitaciones, los cuales se tratarán separadamente en su oportunidad.

(c).- Comprensión del Problema por analizar.

El sistema componente membrana, desempeña varias funciones de importancia; describirlas a todas biológicamente es laborioso, pero, no ocurre lo mismo cuando se requiere aportar la descripción cuantitativa en forma físico - matemática de una de esas funciones, pues tal labor implica diferentes dificultades al coordinar los distintos campos de relación y aplicación que pueden surgir, por ejemplo, relacionar y analizar la ósmosis y la síntesis de enzimas conduciría al establecimiento de un conjunto de términos biológicos, químicos, físicos, matemáticos, etc., poco manipulables en teoría. Por éstas razones cuando se quieran comprender correctamente las funciones de un sistema componente, es muy recomendable iniciar el estudio particular de cada función sin considerar en ese momento las relaciones entre ellas o con los demás sistemas componentes, y en cuanto al análisis físico - matemático, representaría tan solo una o dos de las funciones del sistema componente en el mejor de los casos.

(d).- Conocimiento del Sistema Equivalente.

Un sistema equivalente electromecánico o meramente electrónico realiza una función similar y aproximada a la del sistema biológico original; tiene limitaciones y ventajas, pero sobre todo permite un enfoque accesible dentro de la Ingeniería. Por éstas razones se precisa de un conocimiento adecuado del sistema destinado a realizar la simulación.

### Alcances y Limitaciones.

Como el objetivo es la reproducción de una función del sistema componente y no de varias funciones, la causa principal obedece a que el sistema es muy complejo, y ningún modelo podría realizar todas sus propiedades al no poder relacionar todas las variables cuyo número es considerable. Pero como está visto, si puede servir el hecho de conocer biológicamente y describir físico - matemáticamente a una de ellas.

#### (I-4).- Aspectos Químicos Elementales de un Sistema de Difusión Biológica Vegetal.

Objeto.- Con el propósito de comprender y establecer las condiciones necesarias para describir el fenómeno de Difusión y su relación con el medio ambiente en términos de un sistema eléctrico y/o mecánico, es necesario mencionar los fundamentos químicos necesarios que intervienen en la fisiología del vegetal inferior.

Introducción.- Al existir intercambio de energía entre elementos químicos estableciéndose reacciones de diferente magnitud y para una gran cantidad de aplicaciones en las funciones vitales y en los procesos fisiológicos particulares de cada sistema componente, es imprescindible considerar cuando menos algunos aspectos fundamentales de la química y sus generalidades.

#### Consideraciones:

En el aspecto químico, inicialmente solo serán válidas las sustancias y elementos no iónicos que se encuentren formando mezclas líquidas.

das homogéneas o heterogéneas. Posteriormente, el análisis aplicado a la membrana vegetal, tomará en cuenta a los elementos iónicos de más trascendencia en el vegetal inferior, pero exclusivamente de la química inorgánica.

Como no es posible trascender profundamente en la química orgánica ni en la inorgánica, de ésta última se tomarán los principales conceptos y características de los elementos químicos de mayor aplicación en el enfoque propuesto para la difusión.

(A).- Elementos Químicos fundamentales en el vegetal.

Independientemente de que el vegetal sea superior o inferior, siempre existirán los mismos elementos químicos, pero en diferente composición, determinando además distintas cualidades (6).

Los elementos como se sabe, se agrupan en metales y no metales, pero en la Biología Vegetal (Botánica), los elementos son clasificados por el papel que desempeñan en la nutrición, denominándose nutrientes.

Los nutrientes se subdividen en orgánicos e inorgánicos, a los primeros corresponden los 4 elementos vitales de la química orgánica, éstos son: carbono, (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O) y nitrógeno (N), que al unirse forman una infinidad de sustancias de vital importancia para cualquier organismo, tales como: Carbohidratos, proteínas, vitaminas, etc. (Estos compuestos y sus complejas reacciones tienen un campo especializado fuera de este estudio). (Véase la tabla

(I-1)).

Los nutrientes inorgánicos, subdivididos en micro y macronutrientes, son elementos complementarios de los nutrientes orgánicos, pero necesarios para el equilibrio metabólico del organismo vegetal.

Micronutrientes.- Son aquellos elementos requeridos en cantidades muy pequeñas conocidos también como vestigiales. Aunque normalmente los elementos vestigiales mostrados en la Tabla (I-2) se encuentran en una proporción similar en la mayoría de los vegetales, en otros, como ocurre con algunas algas marinas, un elemento como el Yodo (I); ya no es vestigial, por utilizarlo en cantidades apreciables (6).

En este estudio, un micronutriente será siempre un micronutriente y el macronutriente un macronutriente, salvo aclaración(es) previas.

Macronutrientes.- Son considerados como los elementos fundamentales que se necesitan en cantidades relativamente grandes para utilizarse en diversas funciones del organismo vegetal. Estos elementos utilizados intensivamente por el vegetal son "la materia-prima" con que se continúan las funciones principales de cada sistema componente de la célula vegetal. (Véase la tabla (I-2).

Importancia del peso y número atómico.

Elemento	Símbolo	Número Atom.	Peso Atom.	Valencia más común.
Carbono	C	6	12	+4
Hidrógeno	H	1	1	+1
Oxígeno	O	8	16	-2
Nitrógeno	N	7	14	-3

Tabla (I-1) Nutrientes Orgánicos y sus características (7)



Elemento	Símbolo	Núm. Atómico	Peso Atómico	Tipo de elemento	Ión más común
Sodio	Na	11	23	Macronutriente	+1
Cloro	Cl	17	35.5	Macronutriente	-1
Potasio	K	19	55.85	Macronutriente	+1
Magnesio	Mg	12	24.30	Macronutriente	+2
Calcio	Ca	20	40	Macronutriente	+2
Hierro	Fe	26	55.85	Micronutriente	+3
Manganeso	Mn	25	55	Micronutriente	+2
Cobre	Cu	29	63.54	Micronutriente	+1
Cinc	Zn	30	65.37	Micronutriente	+2

Tabla 1-2.- Elementos Macro y Micronutrientes.  
(Nutrientes Inorgánicos)

El peso atómico, indicado también en las tablas (I-1) y (I-2) tiene una utilidad práctica, al aplicarse a cálculos y estimaciones sobre las características de la selectividad de la membrana biológica. Es un hecho experimentalmente comprobado que una membrana biológica regula su selectividad en base a diferentes factores - entre los que se encuentra el peso atómico, por ello, se relaciona con la permeabilidad y finalmente con el fenómeno de Difusión (8).

El número atómico al ser el número de cargas estables positivas y negativas en un átomo, sufre una modificación importante cuando algunos elementos, pierden, ganan o comparten sus electrones debido a la existencia de una afinidad electrónica con otro(s) elemento(s), ésta modificación denominada ionización interviene como se sabe en los procesos fisiológicos del vegetal donde la membrana interviene directamente. Véanse las tablas (I-1) y (I-2).

(B).- Generalidades de la Ionización en la Membrana Biológica.

El fenómeno de la conductividad eléctrica en ciertas soluciones es común en los sistemas biológicos y se conoce como la teoría de la disociación electrolítica. Esta teoría supone que cuando ciertos compuestos se disuelven en el agua, sus moléculas se rompen en dos o más partes o iones, así ocurre con el Cloruro de Sodio NaCl, el ácido nítrico, etc. (7).

Cargas Eléctricas Iguales.- Cuando se disocia una molécula da lugar a dos clases de iones: unos eléctricamente positivos y otros eléctri

amente negativos. La suma de las cargas eléctricas positivas es igual a la suma de cargas eléctricas negativas; porque las moléculas de donde proceden dichos iones, como las soluciones que forman son eléctricamente neutras. (7).

La ionización se expresa por medio de una ecuación química; el primer miembro; representa la fórmula de una sustancia antes de ionizarse y el 2º los iones en que se rompe la molécula; los iones se expresan por el símbolo del átomo o por el radical, los cuales llevan el signo (+) o el (-) colocado en la parte superior derecha. El número de signos indicará el número de cargas positivas o negativas. La siguiente ecuación indica la ionización del NaCl:



Al existir un flujo iónico, habrá una corriente eléctrica a través de un medio acuoso y aún cuando no exista una diferencia de potencial (E) los iones positivos y negativos continúan moviéndose.

#### Potencial Eléctrico en una Membrana Biológica.

cuando en el sistema iónico existe una membrana capaz de retardar en ella la velocidad y la cantidad de iones, se establece un campo eléctrico, el cual variable según la clase y características de la célula. (8)

El potencial de la membrana biológica establece un pro-

ralmente por diferentes macronutrientes es de un valor negativo muy pequeño en su interior del orden de  $-5$  mv (milivolts), referido a una diferencia de potencial normal o de equilibrio.

Las características electroquímicas de la membrana animal o vegetal intrínsecamente son las mismas y solo dependen de la fisiología del organismo en particular, habiendo por ejemplo células con un potencial eléctrico prácticamente nulo y otras con un potencial eléctrico significativo.

En cuanto a los factores externos que más influye en la respuesta eléctrica de un vegetal inferior se encuentran los siguientes:

- a).- Cantidad de luz.
- b).- Variación en el PH.
- c).- Cantidad de Concentración de Micro y/o Macronutrientes.
- d).- Mezclas de sustancias inhibidoras de algunas sustancias celulares.

El estudio de estas relaciones será de utilidad en su oportunidad para el conocimiento de la fisiología vegetal.

## CAPITULO (II)

### CONCEPTOS BIOLÓGICOS, BÁSICOS DEL VEGETAL

(II-1).- Introducción al Estudio de la Célula Vegetal.

A).- Definición y Características de la Célula Biológica.

B).- La Membrana Citoplásmica.

C).- Otros Aspectos Biológicos Relacionados con la Membrana.

(II-2).- Descripción de un Vegetal Superior y sus Limitaciones -- Biofísicas.

A).- Descripción General.

B).- Breve Descripción interna de la hoja vegetal.

C).- Principales Limitaciones del Vegetal Superior en la Biofísica.

(II-3).- Principales Substancias Orgánicas que intervienen en la Difusión.

A).- Lípidos, Proteínas y Carbohidratos.

(II-4).- Influencia de la luz en el vegetal.

A).- El Efecto Fotoquímico

B).- Efectos de la Membrana Plasmática y del Citoplasma

C).- Efectos de la luz en el vegetal superior

(II-6).- Descripción General de las Algas Verdes.

A).- Generalidades de las Algas.

B).- Introducción al estudio de las Algas Chlorofitas.

C).- Algas Chlorophytas de importancia en Biofísica.

II-1).- Introducción al estudio de la Célula Vegetal.

Objeto.- Comprender y evaluar el comportamiento de la membrana en el vegetal inferior, a partir de la descripción fundamental de la célula.

Introducción.- La importancia de la célula es un factor primordial en el estudio de la Biofísica del organismo vegetal, sus características generales están determinadas por el lugar donde reside dentro de la estructura del vegetal superior o bien por la fisiología propia de una especie en el caso del vegetal inferior (algas).

(A).- Definición y características de la célula biológica.

La célula se define como la unidad fundamental de los seres vivos y por sí sola puede constituir un organismo; cuando esa unidad fundamental se especializa y reproduce, forma en los vegetales superiores la diversificación de tejidos. fig. (II-1) y (II-2).

Las características de una célula pueden considerarse en dos grupos: estructurales y genéticas. Las características estructurales son básicamente de índole físico-química, en tanto que las genéticas se refieren a la variación y herencia biológica de las especies

### Estructura Celular.

La estructura celular vegetal tiene fundamentalmente las siguientes componentes:

#### Núcleo Celular.

El núcleo celular es el centro director de toda célula en el que se observan los elementos siguientes (12):

- (1).- La membrana nuclear que rodea al núcleo y que encierra el jugo nuclear.
- (2).- La Cromatina. Sustancia muy sencilla de colorear, la cual se presenta en forma de gránulos o de red.
- (3).- Una o varios corpúsculos refringentes llamados nucleolos.

El núcleo desempeña funciones muy importantes en la vida de la célula, es factor esencial de reproducción y caracteres genéticos, si desaparece la célula muere.

El núcleo regula las características de la membrana y del protoplasma, existiendo relaciones tan estrechas entre las funciones nucleares, las de la membrana y del protoplasma que aún no han sido todavía totalmente precisadas biológicamente. (Obsérvese al Núcleo Celular y sus componentes en la fig. (II-1)

#### Protoplasma y Citoplasma.

Existe una ligera diferencia entre los términos protoplasma y citoplasma, que es necesario tener en cuenta antes de estudiarlos.



Según A. Nason (1), el protoplasma es la configuración de materia de la célula que incluye al núcleo, en tanto que el citoplasma difiere del protoplasma y no incluye al núcleo. En el caso de este estudio, se utiliza el término generalizado de membrana -- protoplasmática (llamada también plasmalemma), para dar a entender que fenómenos como la difusión influyen en todo el conjunto celular (12).

Subcomponentes Celulares (u organelas).

Al conjunto de corpúsculos que se encuentran dentro del - protoplasma celular y realizan labores secundarias o complementarias en la célula se denominan componentes celulares\*.

Los subcomponentes más comunes de encontrar en el protoplasma son: las mitocondrias, los cloroplastos (en los vegetales) y los centriolos.

Estructura Citoplásmica.

El citoplasma o materia viviente en una célula, aparece - como una estructura granular bajo el microscopio y se encuentra en un medio acuoso que contiene miles de pequeños gránulos formados - de proteínas, en las que se encuentran ciertas estructuras subce--

\* Por razones de simplificación y enfoque, aunque todos los subcomponentes son importantes sólo se hará referencia a los cloroplastos.

lulares o subcomponentes claramente delimitadas.(1).

Según investigaciones recientes, la materia viviente o protoplasma contiene una fina estructura de proteínas submicroscópicas arregladas en forma de estructuras paralelas con doble membrana denominadas retículos endoplásmicos; a ésta estructura interna se le atribuyen las propiedades mecánicas tales como: elasticidad, contractilidad y rigidez, todas ellas relacionadas con la membrana protoplásmica.

El medio acuoso del citoplasma, se encarga también del balance iónico (potencial) en la nutrición del vegetal, regulándolo según las influencias del medio ambiente, entre las que se encuentran principalmente: la cantidad de luz, concentración de sales en un medio, presión, temperatura, etc.

#### Cloroplastos.

Son estructuras citoplásmicas únicas que se encuentran en las células de las plantas superiores e inferiores, pero nunca en animales. Aunque su tamaño, forma y color pueden variar en forma considerable, según el tejido de que se trate, del organismo y de las condiciones de desarrollo, a menudo se presentan en forma de cuerpos elipsoidales que se encuentran libremente en el citoplasma. Los plastos están agrupados generalmente en dos clases: los leucoplastos o leucoplastos y los pigmentados o cromoplastos. Los primeros se encuentran en las plantas que no están expuestas a la luz e intervienen en la fabricación y almacenamiento de grán-

nulos de almidón y gotas de grasa. Los plastos más importantes son los llamados cloroplastos, los cuales contienen un pigmento verde - que da el color característico a las plantas. (12). Los cloroplastos como la mayoría de los otros plastos, son arrastrados por las - corrientes celulares del interior de la célula, su tamaño varía de - 3 a 7  $\mu$ m. (6).

#### Importancia de los Plastos en la Biofísica.

Dentro del campo de la Biofísica vegetal el cloroplasto - de las algas verdes tiene un interés muy especial por ser el "orgánulo" que realiza la fotosíntesis si dispone de una intensidad adecuada de luz ( $\lambda = 400 - 750 \text{ A}$ ). Este hecho influye como se verá - más adelante y en detalle en las variaciones electrofisiológicas a - la membrana, siendo posible obtener un conocimiento más profundo -- del mecanismo interno del vegetal.

#### (B).- La Membrana Citoplásmica.

Todas las células están rodeadas en su superficie - externa por una capa citoplásmica especializada llamada membrana celular la cual es tan exageradamente delgada y fina que no es visible con microscopios ópticos convencionales. De hecho en un tiempo - su existencia fué negada por numerosos biólogos.

Se ha demostrado de varias maneras que la membrana celular es una entidad discreta definida y esencial en la célula, primeramente porque es un hecho que sólo determinadas sustancias -

y elementos pueden salir o entrar libremente de la célula, capacidad selectiva que es conocida como semipermeabilidad o permeabilidad diferencial.

Una membrana semipermeable es aquella que se muestra permeable a ciertas sustancias. La permeabilidad diferencial ha sido demostrada por experiencias en microcirujía, a base de sustancias colorantes especiales, como el rojo de fenol.(12)

Un experimento simple consiste en introducir directamente en el citoplasma por medio de microinyectores rojo de fenol, éste se distribuye rápidamente en el citoplasma, pero, no pasa hacia afuera de la célula, muy probablemente por ser retenido por la membrana celular.

Si en un momento hay pequeñas lesiones en la membrana, éstas leves lesiones son reparadas rápidamente, pero, en caso de existir una lesión muy grande la célula termina por desintegrarse.

La capacidad elástica de la membrana es demostrada por la capacidad de retornar a su primera posición después de haber sido presionada o estirada por un microinstrumento, su existencia y las propiedades ya comentadas son confirmadas también con el uso del microscopio electrónico.

Naturaleza y configuración de la Membrana Biológica.

La verdadera constitución de la membrana y sus complejos mecanismos de selectividad son todavía desconocidos, sin embargo, a partir de un conjunto de experimentaciones y observaciones diversas se han establecido teorías y modelos que traten de explicar el funcionamiento de la membrana biológica.

La configuración de la membrana, es casi siempre muy - - irregular, formando ondulaciones que muestran numerosos repliegues denominados microvellosidades.(6), su utilidad puede ser muy importante por dos razones:

a).- En organismos inferiores, las microvellosidades de la membrana se encargan de regular el paso de diversos fluídos al proto--plasma, así como la disolución o transformación selectiva de subs--tancias o elementos de nutrición.

b).- En organismos superiores, permiten la adhesión de células simulando un ensamble que forma un área de superficie mayor entre - células facilitando el intercambio de elementos y materias necesa--rias para la nutrición.

Algunos biólogos consideran a la membrana celular como una capa singular y alterada del citoplasma, algunas veces más densa y menos fluída que la mayor parte del citoplasma, o bien es considerada por otros como la superficie formada entre dos estados de la ma--teria.

La membrana nuclear, como otras membranas protoplásmicas de estructuras subcelulares (p. ej. la membrana de mitocondrias y - plastos), podrían considerarse como manifestaciones similares de -- capas protoplásmicas modificadas físicamente con propiedades especí- ficas pero similares a las que presenta la membrana celular.

#### Composición Química de la Membrana.

La composición química celular de la membrana es de grasas y proteínas, posiblemente intercaladas unas con otras, recientes estudios muestran que el grosor de la membrana varía entre 80 y -- 200 A, en el vegetal las moléculas de las grasas son básicamente --- lípidicas (13). En el capítulo III se discutirán más ampliamente las características de funcionamiento de la membrana biológica.

#### Cápsula de Secreción.

La cápsula de secreción es una membrana que forma otra - envoltura sobre la célula y está constituida por productos segregados por el protoplasma que han atravesado la membrana fundamental o citoplásmica, dichos productos pueden ser los siguientes: celulosas, hemicelulosas, compuestos pécticos o quitina. (12).

La substancia más frecuente es la celulosa cuya fórmula química es: (C<sub>6</sub> H<sub>10</sub> O<sub>5</sub>).

Como la secreción de éstos productos, no es siempre uniforme, la cápsula de secreción presenta irregularidades observándose

unas partes más gruesas y otras más delgadas, constituyendo las llamadas puntuaciones de pared celular que afectan la forma original de la célula rompiendo algunas veces las partes más delgadas de la cápsula de secreción. (fig. II-2).

#### Funciones de la Cápsula de Secreción.

Como la cápsula de secreción es una membrana secundaria, sus objetivos, aunque no indispensables son útiles al vegetal, éstos son:

- a).- Defensa de la membrana citoplásmica.
- b) Auxiliar en la selectividad de sustancias y elementos necesarios para la célula.

#### La Difusión en la Pared Celular (ó Cápsula de Secreción).

La cápsula de secreción de la célula vegetal influye de manera secundaria actuando como barrera, predifusiva al regular el paso de diversas sustancias hacia la membrana citoplásmica con poca o ninguna transformación química. (fig. II-3B).

La difusión en la cápsula de secreción aparentemente no tiene la misma importancia que la membrana citoplásmica, pero sin embargo, experimentalmente es utilizada como base de comparación para establecer las características y relaciones entre las fases pasiva y activa del intercambio molecular de la membrana citoplásmica al interior de la célula y del interior de ésta al exterior.

La cápsula de secreción y su comportamiento varía de una especie vegetal a otra por engrosar o cambiar su composición química (12). Las posibles modificaciones químicas son:

- 1).- Gelificación
- 2).- Cutinización
- 3).- Suberificación
- 4).- Lignificación
- 5).- Mineralización y
- 6).- Cerificación.

1).- Gelificación.- Cuando la célula presenta ablandamiento gelatinoso externo generalmente en vegetales inferiores.

2).- Cutinización.- Es una impermeabilización parcial o total observada en ciertos vegetales superiores.

3).- Suberificación.- En otros vegetales, superiores, se forma -- corcho.

4).- Lignificación.- Es la intercalación de laminillas lignificadas que engruesan al vegetal formando una coraza como en el caso de los árboles.

5).- Mineralización.- A través de la incorporación de moléculas - de  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Si}$ ,  $\text{P}_4$ , etc., algunos vegetales superiores e inferiores fortalecen la estructura celular.



6).- Cerificación.- Al formarse una cantidad apreciable de cera o celulosa se dice que el vegetal está cerificado.

c).- Otros aspectos biológicos relacionados con la membrana.

Para complementar lo expresado hasta el momento en lo que respecta a la membrana, es necesario considerar dos clases de aspectos no mencionados (13).

a).- La nomenclatura utilizada por algunos autores extranjeros para designar un elemento, o un conjunto de ellos.

b).- Los factores que influyen o limitan sus características y propiedades de la membrana celular.

(a).- Las nomenclaturas que dan algunos autores principalmente americanos, ingleses y canadienses puede conducir a algunas leves confusiones ya que sólo algunos textos y autores nacionales las utilizan, por ello, se han colocado en la tabla (II-1) los términos equivalentes más comunes, y la fig. (II-3) muestra la situación de los elementos con sus términos respectivos.

Término Biológico no usual.	Término Biológico usual equiv.
Plasmalemma.	Membrana Plasmática ó Citoplásmica
Tonoplast o Tonoplasto	Vacuola central
Pared Celular (wall-cell)	Cápsula de Secreción
Organela (Organel)	Corpúsculos internos.

TABLA (II-1).- TERMINOS BIOLOGICOS EQUIVALENTES MAS COMUNES.

Nombre del factor.	Tipo de parámetro.	Rango de Valores límite
Temperatura Amb.	Variable .	de 15 a 25°C.
Presión Amb.	Variable.	de 0.70 a 1.033 (kg/cm <sup>2</sup> )
Long. de onda luminosa (L)	Variable	de 254 mm a 1400 n m (ultravioleta a Infra-rojo).

TABLA (II-2) FACTORES AMBIENTALES Y SU RANGO DE VALORES PROMEDIO.(13)

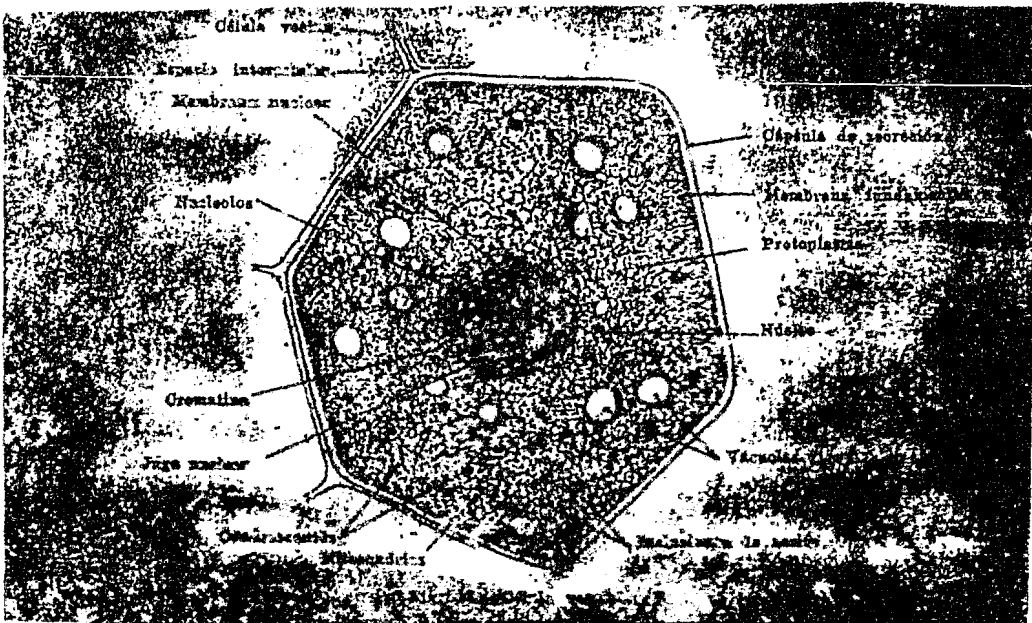
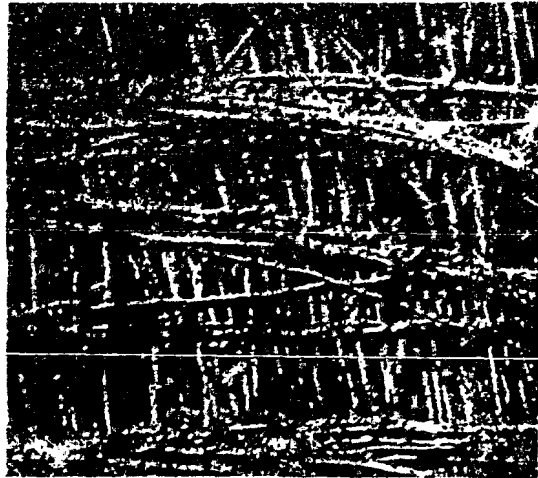
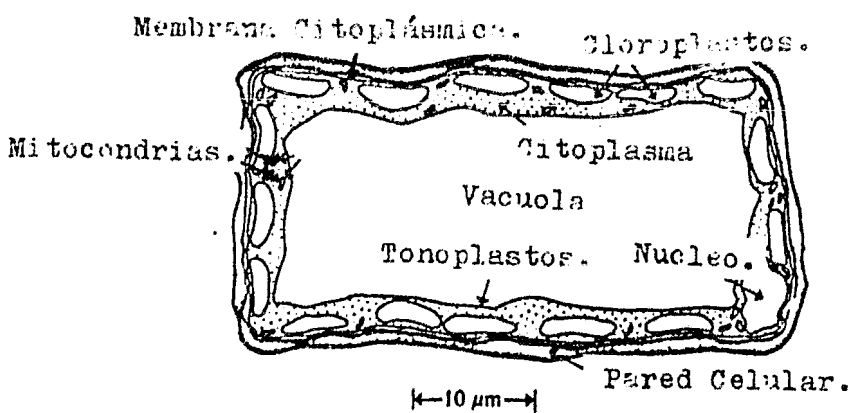


Fig (II.1) Típica Célula Vegetal mostrando sus componentes. (13)



Fig(II.2) Microfotografía Electrónica que revela las numerosas fibras celulósicas que componen la pared celular de una célula vegetal. (6)



Fig(II.3) Representación de una célula de la hoja vegetal, mostrando los términos equivalentes. (Vease la tabla II.1) (13).

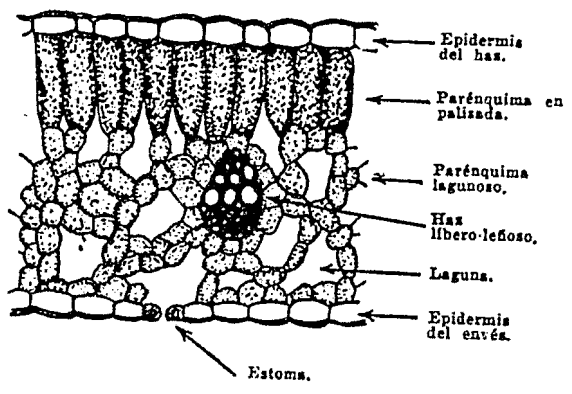
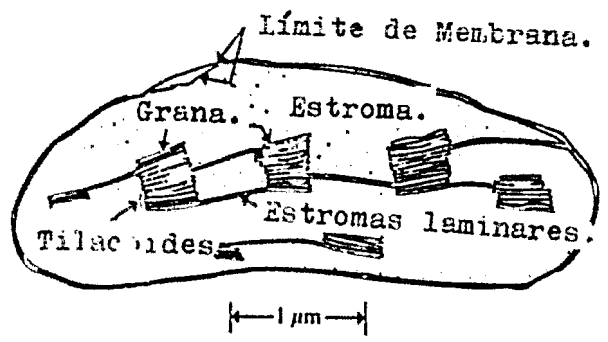


Fig.(II.4).—Corte transversal del limbo de una hoja. (Esquema). ( )



Fig(II.5) Cloroplasto del mesofilo de una hoja. ( )

Observaciones sobre la equivalencia de términos biológicos comunes.

El tonoplasto o vacuola central es una vacuola de un tamaño significativo que rodea al núcleo, y que en algunas células llega a ocupar hasta el 90% del área total cuando llegan a su edad madura. Pequeñas vesículas citoplásmicas se adhieren por lo general al tonoplasto y posiblemente establecen un intercambio de sustancias nutritivas dentro de la vacuola central, dentro de ella, se encuentran iones inorgánicos principales como:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Mn}^{++}$ . También contiene ácidos orgánicos y cantidades considerables de azúcares y aminoácidos (4).

El agua que se encuentra en la vacuola toma parte en las reacciones químicas, así como en el crecimiento y reproducción de la célula, su importancia será tratada posteriormente.

Organelas.

Los organelas han sido comentadas en su oportunidad como corpúsculos internos o subelementos citoplásmicos que tienen alguna función específica. Tal es el caso de las mitocondrias, el aparato de Golgi, etc. Pero se excluyen de éste término a las inclusiones simples de grasa o cualquier partícula extraña.

(b).- Los factores que influyen o limitan las características y propiedades de la membrana celular son muchas, pero también una parte de ellas están limitadas o son constantes. Naturalmente que toda influen-

cia o limitación depende del tipo de vegetal, más nuevamente es posible considerar, en lo que respecta a condiciones ambiente un rango de valores promedio, véase la tabla (II-2).

Fuera de los rangos promedio, puede decirse que cualquier organismo animal o vegetal no reacciona adecuadamente y sus funciones vitales tienden a inhibirse; si ese rango excede en mucho, el organismo muere.

## II-2 Descripción de un vegetal superior y sus limitaciones biofísicas.

Objeto.- Comprender las partes más importantes de los complejos mecanismos de respiración, fotosíntesis y nutrición, las relaciones entre ellos, y la función de cada sistema componente celular, para aplicar los mismos principios físico-biológicos al vegetal inferior.

Introducción.- No es todavía posible realizar a ningún nivel, dentro de la Biofísica o la Bioingeniería un análisis completo del vegetal superior debido a una gran cantidad de razones de diversa naturaleza. Sin embargo si es posible señalar las características más sobresalientes y relacionarlas al caso concreto del vegetal inferior.

Desarrollo.- Un vegetal superior sin frutos ni flores como el ilustrado en la fig. (II-5) en la que se indican los elementos componentes es todavía casi una incógnita total en la biofísica, pues solo han sido analizados desde el punto de vista físico-matemático, un número muy limitado de subsistemas que lo componen. De cualquier manera,

la breve discusión de éste tema se inicia por la descripción biológica del vegetal superior.

(A).- Descripción General.- A grandes rasgos, la descripción de un vegetal superior se compone de 2 partes (12).

1).- La raíz - tallo.

2) - La hoja.

(1).- La raíz y el tallo.

La raíz joven, se compone de epidermis, corteza y cilindro central.

La epidermis tiene como principal objetivo el proveer al vegetal de agua y sales minerales por medio de pelos absorbentes.

La corteza protege a la raíz y contiene substancia de reserva (almidón).

El cilindro central es el ducto que conduce por medio de dos subductos la savia bruta y la savia elaborada (12). En el cilindro se encuentra un conjunto de haces leñosos y vasos cribosos que forman la médula.

Alrededor de la médula está la estructura denominada Xylema -- seguida de otras dos que son el cambium y el floema, éstas tres estructuras celulares forman el tejido conductor. Véase fig. (II-5A).

### Tejido conductor - (tallo - raíces)

Habiendo definido al tejido conductor se analizarán individualmente al Xilema y al floema.

Xilema.- El Xilema es una estructura celular que funciona principalmente como mecanismo de ascenso, distribución de agua y nutrientes - utilizados por el vegetal, éste tejido se compone de 2 clases de células formando una estructura diseñada para ayudar a la circulación y conducción de agua. Conviene mencionar que las paredes del Xilema presentan anillos helicoidales de celulosa lignificada y pequeñas áreas perforadas que conectan con otras células; por la resistencia de la lignina puede considerarse que también sirve como tejido de -- sostén (6).

Floema.- Las células que componen el floema tienen como objetivo el distribuir la mayoría de los compuestos de nutrición orgánicos. El floema se compone de una sola clase de células que forman el llamado tubo criboso, pues su aspecto interno contiene perforaciones o cri-- bas, y nuevamente el aspecto de su estructura obedece al propósito - al cual se le destina (6).

Un ejemplo del funcionamiento del floema es el transporte de algunos productos fotosintéticos elaborados en las células mesofílicas de la hoja en donde intervienen procesos de difusión y transporte activo - (intercambio iónico).



Los tubos cribosos constituyen además una conexión -- vertical continua citoplásmica que ayuda al transporte del alimento hacia diversas partes del vegetal (6).

Tallo.- El tallo según muchos biólogos es la continuación de la raíz, por ésta razón casi viene siendo una parte complementaria de ella. - De cualquier forma, una parte depende de la otra.

El tallo comienza en una zona llamada cuello o nudo vital, y a par-- tir de él comienza el eje vegetal donde se insertan las hojas (12).

Como la raíz y el tallo están muy relacionados al mismo tiempo, se - recomendarían las siguientes consideraciones independientemente del tipo de estudio por realizar:

- a).- La influencia de la luz
- b).- La cantidad de humedad
- c).- Presión y temperatura
- d).- Variaciones del aire ambiental.

En un estudio a fondo Biofísico o Biológico influye también la forma del tallo y su tamaño, no discutidos aquí pero sí mencionados.

La forma puede ser: cónica, cilíndrica, acutángula, trigónica o te-- tragónica.

El tamaño va desde unos milímetros hasta 120 (m).

(B).- Breve descripción interna de la hoja vegetal.

Los mecanismos internos de la fisiología de la hoja -- vegetal, es una de las partes más importantes dentro de la Biofísica vegetal. En la hoja vegetal se encuentran contenidas, por así decirlo, las leyes naturales a las que obedece su intrincado metabolismo.

Estructura.- La hoja exteriormente es un elemento plano, delgado y -- de color verde por lo general. Si es efectuado un corte transversal -- en la hoja vegetal en posición horizontal, se observan en el microscopio un gran conjunto de sistemas celulares heterogéneos, fig. ---- (II-7); si éstos son estudiados desde el plano superior o limbo y -- las nervaduras se pueden observar:

- a).- Zona epidérmica superior e inferior.(12)
- b).- Zona de parénquimas (12)

véase la fig. (II-4)

a).- Zona Epidérmica.

La zona epidérmica es la que recubre la hoja vegetal, se subdivide en dos partes: superior e inferior, mejor conocidas como HAZ y envés.

El HAZ constituye toda la superficie superior del vegetal, expuesta -- directamente a la radiación solar.

El envés constituye toda la superficie inferior del vegetal expuesta -- parcialmente a la radiación solar.

b).- Zona de Parénquimas.

La zona de parénquimas o zona intermedia de una hoja vegetal, - es un tejido especializado, compuesto de dos arreglos celulares parecidos en constitución celular pero con funciones fisiológicas particulares, éstos arreglos son: parénquima en empalizada y parénquima - esponjoso.

Parénquima en Empalizada.- Este es un tejido especializado que constituye la masa del cuerpo de plantas superiores y tiene sus células formando una barrera que asemeja un muro, (fig. II-4); su función es la de servir como tejido de reserva y cooperar en la función clorofílica (12).

Parénquima Esponjoso.- El parénquima esponjoso está formado por un tejido muy similar al de parénquima empalizada, pero con un ordenamiento celular diferente. Su función consiste en almacenar y distribuir aire, formando para ello unas cámaras pequeñas denominadas mentos aéreos. (12).

Aportaciones útiles del vegetal superior a la -  
Biofísica Vegetal.

Puede decirse de antemano que el desarrollo de la biofísica aplicada al vegetal superior es muy escaso, además de presentar temas altamente especializados según la zona estructural a la que se -  
refiere

## Teoría del transporte de la savia

El tallo, como en la mayoría de plantas, es un eje de crecimiento y transporte de la savia. El tallo, como en la mayoría de plantas, es un eje de crecimiento y transporte de la savia. El tallo, como en la mayoría de plantas, es un eje de crecimiento y transporte de la savia.

Los diversos estudios realizados sobre el xilema y el floema son enfocados a describir sistemáticamente el movimiento de los fluidos desde el tallo, mediante los siguientes puntos de interés:

1. Mecanismo(s) de absorción de diversos nutrientes en el vegetal (agua, savia verde, etc.).

2. Relaciones entre la absorción de fluidos y la difusión.

3. Características de la circulación de fluidos en el vegetal respecto a la temperatura y la intensidad de luz.

### 1. Estructura de la hoja.

La estructura de la hoja del vegetal está constituida en el envés superior por un conjunto de células, distribuidas estratégicamente de modo que permitan la entrada de agua y nutrientes a través de una abertura denominada ostiolo.

El ostiolo está formado por dos células.

Las células estomáticas o estomas, desde el punto de vista biofísico tienen un interés muy especial, por ser ellas las responsables del intercambio gaseoso del O<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub>, o en términos biológicos de la transpiración y respiración vegetal, a esto debe de añadirse que el trabajo de éstas células depende también de la cantidad de luz, la humedad ambiental y la temperatura.

El análisis del mecanismo del estoma es probablemente más viable de ser analizado por la Ingeniería debido a estas dos razones:

a).- Existencia de un sensor de humedad. El estoma se abre si hay mucha humedad y se cierra si hay poca.

b).- Existencia de un sensor de luz. Los estomas varían la abertura del ostiolo dependiendo de la longitud de onda luminosa.

Es evidente que las características específicas de los estomas dependen del tipo de vegetal, y al menos en parte puede ser estudiado por analogías electromecánicas y experimentación directa.

c).- Principales limitaciones del vegetal superior en la Biofísica.

Objeto.- Demostrar las razones fundamentales por las que no es posible llevar a cabo todavía una descripción físico-matemática ni una simulación analógica de una parte o todas las funciones del vegetal superior.

Existen dos tipos de razones por las cuales resulta difícil el estudio del vegetal superior en la biofísica: biológicas y experimentales.

#### Razones de naturaleza biológica.

A nivel exclusivamente biológico, pueden citarse las siguientes:

- a).- Existencia de un número considerable de tejidos (células) especializados internamente.
- b).- Cambios fisiológicos significativos en el tiempo.
- c).- Diversidad y complejidad de funciones aún en elementos aislados de un tejido.

#### Razones experimentales.

Entre las principales están:

- a).- El tamaño de las células.
- b).- Mayor dificultad de inhibición. \*

\* Inhibición es un proceso mediante el cual se anulan o retardan las condiciones fisiológicas que impiden o dificultan el estudio de una función determinada.

c).- Interacciones de índole bioquímica entre tallo, hojas y raíces verdaderas.

d).- Falta de dispositivos e instrumentos capaces de efectuar o intervenir plenamente en el terreno de la biofísica o con un valor económico elevado.

### II-3.- Principales sustancias orgánicas que intervienen en la difusión.

Objeto.- Tener un conocimiento básico sobre los tres constituyentes orgánicos más utilizados en la difusión a través de la membrana biológica, que son: grasas, proteínas y carbohidratos.

Introducción.- Sin entrar en detalles innecesarios de índole química, y en discusiones complicadas sobre los procesos fisiológicos en los que intervienen, se hará un resumen generalizado de cada una de esas sustancias.

#### (A).- Lípidos, proteínas y carbohidratos.

Grasas.- Los lípidos o grasas son un grupo heterogéneo de sustancias orgánicas originadas en la célula viva. Son insolubles o escasamente solubles en el agua, pero más o menos solubles en solventes orgánicos no polares, se clasifican en varias subdivisiones teniendo como base sus propiedades físicas y químicas. Entre las que sirven al enfoque que se pretende se incluyen los fosfolípidos (6).

Fosfolípidos.- El término fosfolípido se aplica a una gran variedad de lípidos naturales, muy comunes en los vegetales, que además de -

carbono, hidrógeno y oxígeno, también fósforo, y en muchos casos -- nitrógeno (4).

En el caso de las plantas y vegetales los fosfolípidos más comunes -- son las lecitinas, los cuales tienen una estructura química a otros fosfolípidos conocidos como: cefalinas (6).

Proteínas.- El término proteína se deriva de la palabra griega "proteios" que quiere decir "de primer orden", debido a que ocupan una -- posición medular en las características estructurales y funcionales -- de los seres vivos.

No sólo constituyen una parte significativa del protoplasma, sino -- que desempeñan un papel clave en los procesos vitales, físicos y quí -- micos de la célula, encontrándose también en todas las componentes -- esenciales de la célula misma. En la membrana citoplásmica contri -- buye a darle sus características estructurales y químicas, además -- de constituir una gran cantidad de enzimas que influyen en la fisio -- logía (6).

Las proteínas son moléculas gigantes altamente complejas, y de acuer -- do a lo estudiado por muchos investigadores se componen, en su mayo -- ría de moléculas de hidrógeno, carbono, oxígeno y nitrógeno; pueden -- además unir a su estructura moléculas de carbohidratos, ácidos nu -- cleicos, etc.

Carbohidratos.- Estas sustancias desempeñan un papel clave en las -- relaciones energéticas de todos los organismos. En los vegetales, -- son los productos principales que se originan en la captura de la -- energía solar durante el proceso de la fotosíntesis, esto es, que -- la luz solar es utilizada para convertir la poca energía de las liga



duras del CO<sub>2</sub> y del agua hasta ligaduras de más energía de los carbohidratos. El carbohidrato se caracteriza por contener (en la mayoría de los casos) átomos de hidrógeno y oxígeno en igual proporción que el agua.

Uno de los compuestos derivados de la sacarosa de mayor importancia en los vegetales es un polisacárido denominado celulosa. La celulosa es el resultado de un largo proceso bioquímico realizado por el vegetal, y presenta dos clases de compuestos: hemicelulosas y celulosas compuestos. Ambas clases se encuentran en los vegetales, variando en cantidad, según la especie.

La función de la celulosa en el vegetal (inferior o superior) es la de dar consistencia estructural para la(s) célula(s), formando la cápsula de secreción o pared celular.

#### II-4).- Influencia de la luz en el vegetal.

Objeto.- Identificar sin entrar en detalle los cambios fisiológicos más notables en el vegetal durante la fase luminosa de la fotosíntesis.

Introducción.- La fotosíntesis o efecto de la luz sobre la célula vegetal constituye una variable importante, que por sí sola constituye un tema aparte, siendo necesario limitarla a efectos externos-descriptivos adaptados a los propósitos de este estudio.

Fotosíntesis.- La fotosíntesis es la transformación de elementos orgánicos e inorgánicos (micro y macronutrientes), en sustancias altamente complejas, utilizando la luz como fuente de energía, la

anal se aplicó en una gran gama de procesos metabólicos (6), pudiéndose afirmar que sin la fotosíntesis, serían imposibles los procesos electroquímicos de la célula.

El análisis completo de la fotosíntesis consta de una gran cantidad de pasos bioquímicos, distribuidos en diversas reacciones, arduas de describir, que trabajan con gran eficiencia durante la fase luminosa y la fase oscura, (6).

Las fases luminosa y oscura, implican cambios termoeléctricos en la membrana vegetal, de tal forma que, podría hablarse de un comportamiento eléctrico diurno, y otro nocturno, pero como solo es posible discutir el diurno se darán a continuación las generalidades de la fase luminosa.

#### Fase luminosa de la fotosíntesis.

Cuando la luz es captada por los cloroplastos, es transformada de una forma de energía química a otra. La conversión de energía se inicia con la rotura de moléculas de agua (3), éste proceso, es de naturaleza iónica, y ocurre cuando el ión  $H^+$ , es tomado por un ión de clorofila (ok) oxidándose al mismo tiempo, 2 iones ( $OH^-$ ), el oxígeno sobrante de éstas reacciones se desecha al ambiente, en ésta fase, el vegetal inicia el proceso con energía de la luz roja. Posteriormente, con la clorofila (S<sup>1</sup>), se almacena energía en forma de ATP.

La fase luminosa consta de una 2a. parte, donde interviene una sustancia tan importante como el ATP, denominada: Nicotinamida - Adenosin - Difosfato - hidrógeno, la cual transporta el hidrógeno

de las células viva(s) y además interviene en la fase oscura.

El ATP y el NADPH<sub>2</sub> equivalen a un motor genergético utilizado por el vegetal para regular los procesos fisiológicos más importantes del vegetal.

Substancias principales fabricadas por los vegetales.

Durante la fase obscura una vez formadas las moléculas de glucosa en los vegetales, las células, utilizan la energía química de que disponen, almacenada en ATP, para formar otros compuestos como hidratos de carbono.

Otras substancias orgánicas que fabrican las plantas verdes de importancia para el estudio de la membrana son los lípidos y las grasas, las cuales provienen de azúcares y carbohidratos. (Véase la Sec. (II-3) en este capítulo.

En cuanto a las proteínas o próticos, son substancias más complejas que construyen los vegetales como reguladores de los procesos metabólicos.

#### (B).- Variaciones de la Membrana durante la fotosíntesis.

Según el investigador Engelmann (3), al existir siempre una velocidad de transformación en cualquier reacción química del vegetal, habrá también una velocidad fotosintética, por ser la fotosíntesis un conjunto de reacciones químicas promovidas principalmente por la energía luminosa.

Color	Rango aproximado de Long. de onda. (nm)	Típica Longitud de onda. (nm)(L)	Frecuencia (ciclos/seg) (HERTZ)x10 <sup>14</sup>
Ultravioleta	400	254	11.8
Violeta	400 - 424	410	7.31 x
Azul	424 - 491	460	6.52
Verde	491 - 550	520	5.77
Amarillo	550 - 585	580	5.17
Naranja	585 - 647	620	4.84
Rojo	647 - 740	680	4.41
Infra-rojo.	740	1400	2.14

Tabla (II-3).- Características promedio de los principales colores. Las magnitudes de Long. de onda son valores en un vacío (13).

TRES ALGAS IMPORTANTES  
EN LA BIOPISICA  
VEGETAL.

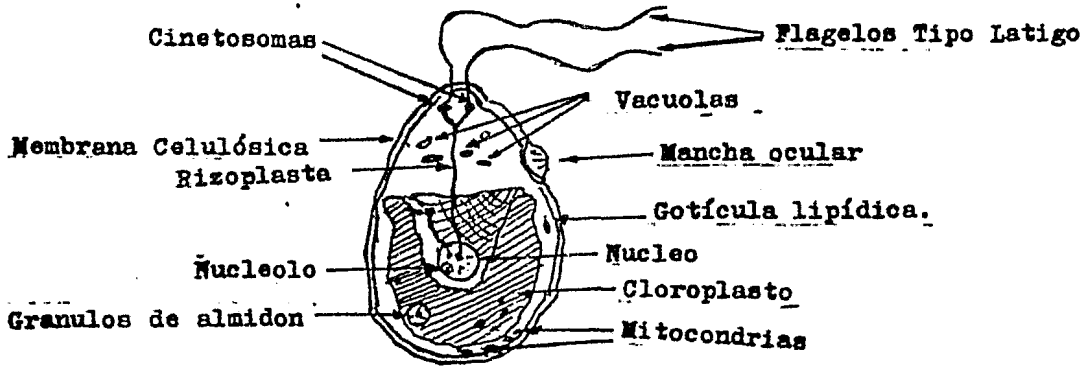
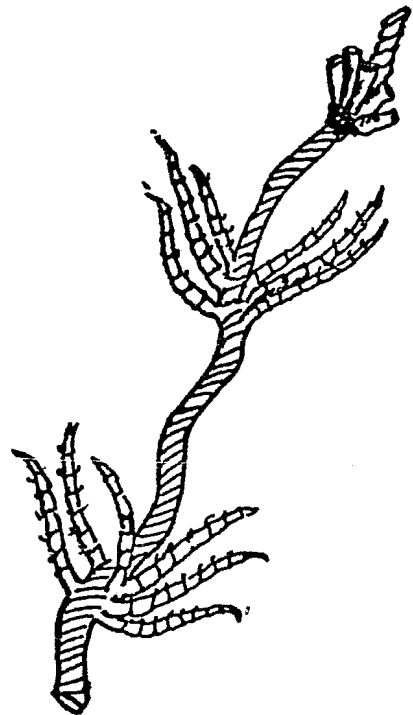


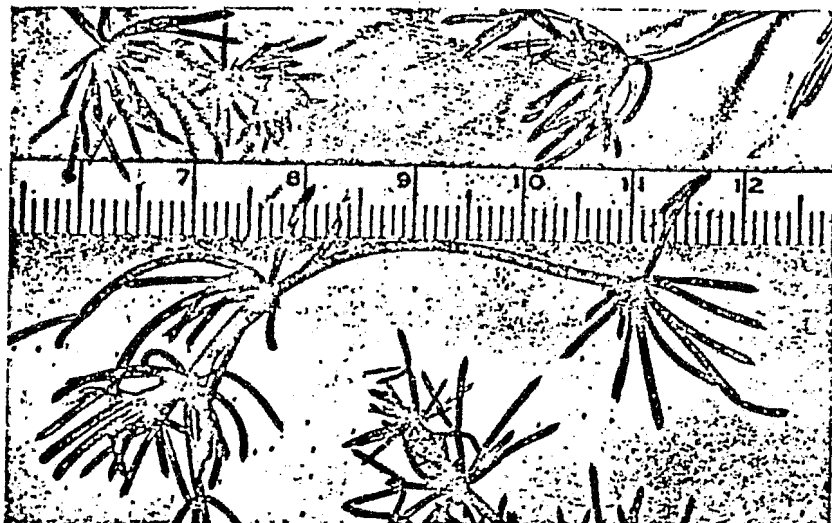
Fig (x6) Alga Clamydomona (15)



Fig (II.7) Alga Chara  
Fragilis (15)



Fig(II.8) Alga Chara  
Globularis (15)



Nathan W. Cohen

Fig (II.9) Esta fotografía de Nitella muestra que muchas de sus células-tienen más de dos centímetros de largo. Estas grandes células permiten a los científicos calcular la concentración de sustancias dentro de una sola célula. (3)

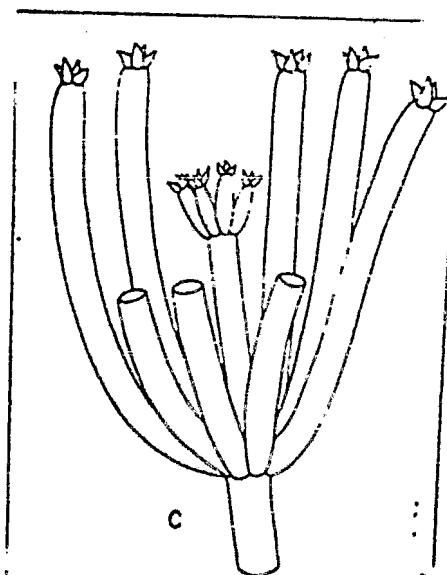
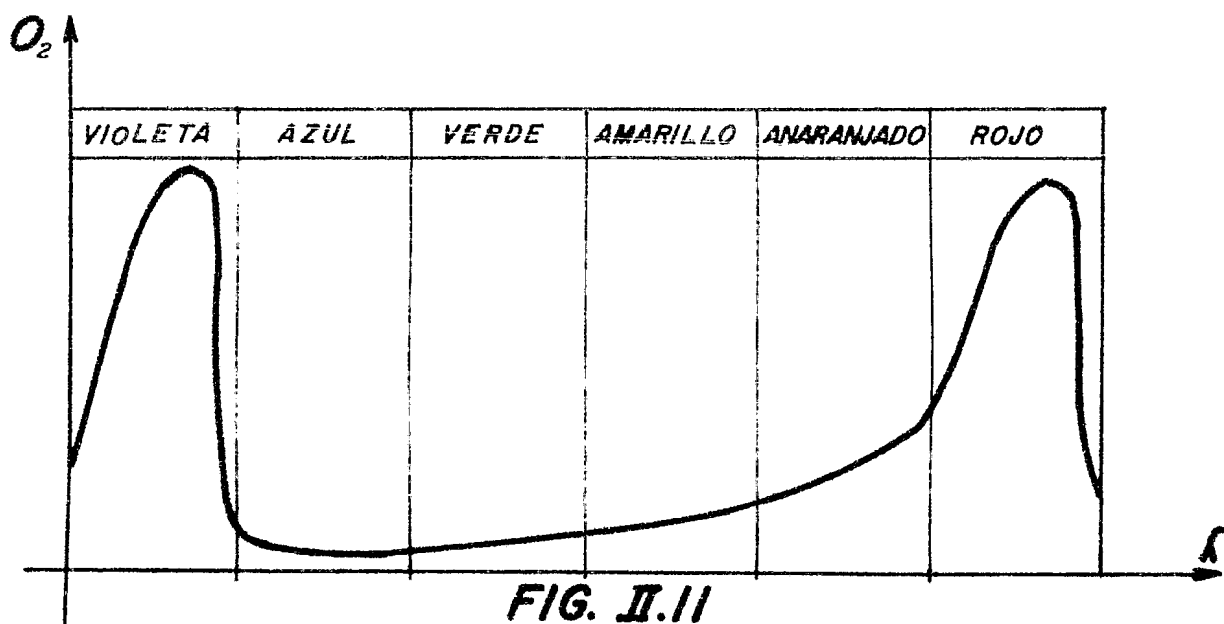
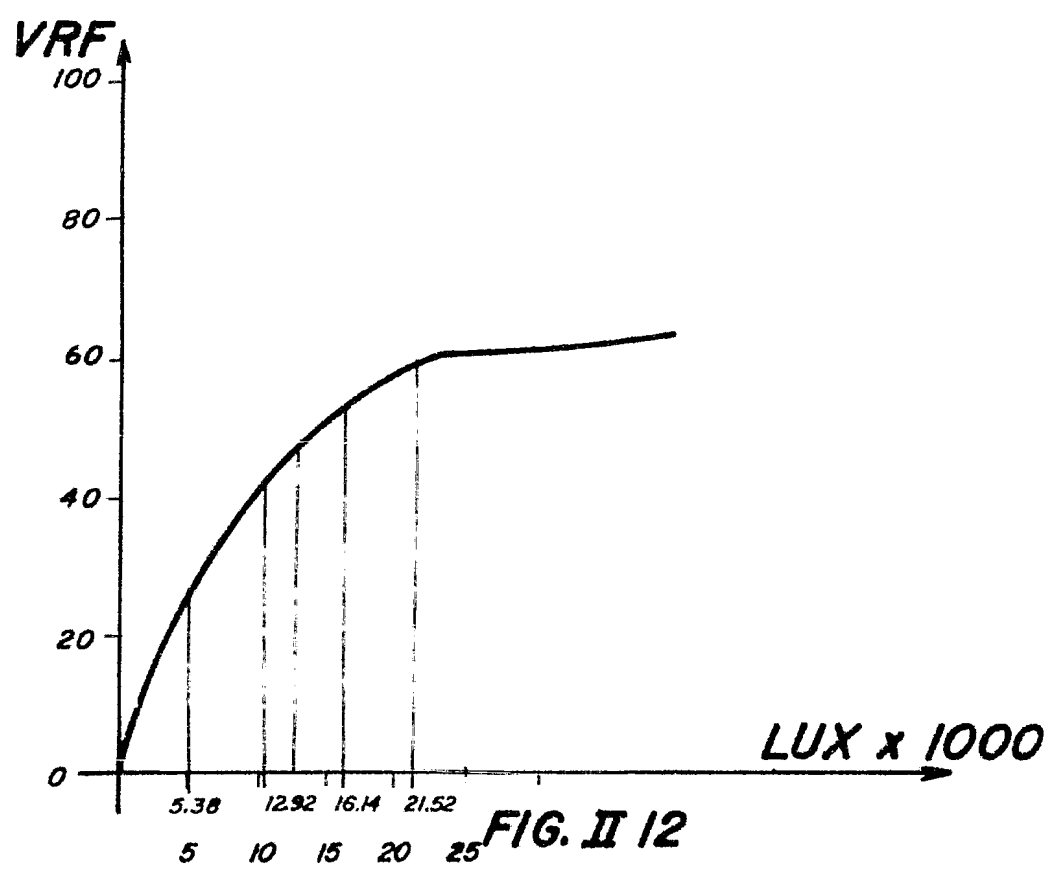


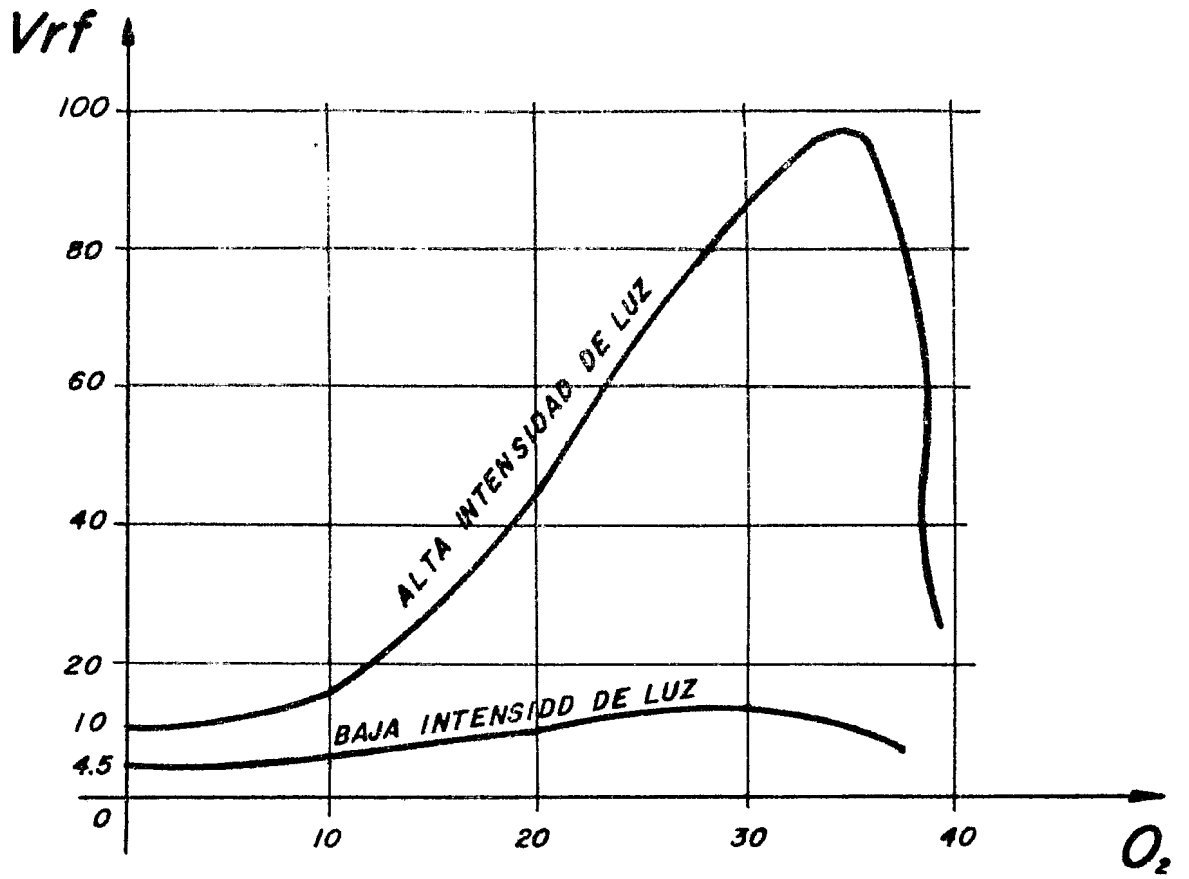
Fig (II.10) Fragmento del Seudotallo de un alga Nitella Acuminata. (15)



**FIG. II.11**  
ESPECTRO DE ABSORCION DE CLOROFILA  $O_2$  Vs  $\lambda$



**FIG. II.12**  
GRAFICA DE LA VELOCIDAD RELATIVA DE FOTOSINTESIS ( $V_{rF}$ ) Vs ILUMINACION  
NOTESE QUE MAS ALLA DE 12.92 LUXES EL INCREMENTO DE INTENSIDAD LUMINOSA NO AUMENTA LA ( $V_{rF}$ )



**FIG. II 13**

**GRAFICA DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD RELATIVA DE FOTOSINTESIS (VRF) Vs. TEMPERATURA CONSIDERANDO DIFERENTES INTENSIDADES DE LUZ**



El proceso fotosintético, de acuerdo a las teorías de Engelmann, -- es más activo durante la luz roja y violeta que en cualquier, dependiendo directamente de la luz absorbida por los cloroplastos, obsérvense las gráficas de las figs. (II.11) y (II.12). Tabla (II.3)

Durante la fotosíntesis, al haber 2 fases una iluminada y otra oscura, hay un intercambio gaseoso de  $O_2$  y  $CO_2$ , el  $O_2$  es expulsado del vegetal en la fase luminosa, y el  $CO_2$  es tomado durante la fase oscura, formándose así un ciclo con una gran cantidad de pasos intermedios.

El proceso completo, tiene una velocidad que depende no solo de la luz, sino también de las variaciones de temperatura. La velocidad de fotosíntesis ( $V_f$ ) es entonces un parámetro importante susceptible de ser medido experimentalmente.

Medición de la Velocidad de Fotosíntesis. ( $V_f$ ).

Resumidamente, se explicarán los dos métodos más comunes: Por medios químicos y por sistemas electromecánicos.

Por Medios Químicos.- Utilizando las velocidades de reacción a partir de las principales reacciones químicas de las fases luminosa y oscura de la fotosíntesis (3).

Por Sistemas Electromecánicos.- Mediante el conocimiento de la fotosíntesis en sus principios físicos y químicos, es posible elaborar diversos dispositivos electromecánicos o exclusivamente electrónicos capaces de efectuar mediciones sobre la velocidad de fotosíntesis o de cualquier otra función biológica

### Influencia de la Temperatura en la fotosíntesis.

Después de las investigaciones de Engelmann, el botánico -- Blackman (3) demostró que la disminución o aumento de temperatura -- tienen efecto sobre la fotosíntesis.

El efecto de la temperatura a diferentes intensidades de luz condujo a establecer que cuando aumenta la intensidad de luz, los cambios de temperatura ascendentes, no mayores a 40°C dan como resultado una mayor velocidad de fotosíntesis ( $V_f$ ), pero si en cambio, la intensidad luminosa es baja, un aumento de temperatura no afecta la velocidad de fotosíntesis ( $V_f$ ). Véase la gráfica de la fig. (II-13).

### Velocidad Relativa de Fotosíntesis.

Como el manejar las velocidades de fotosíntesis ( $V_f$ ) en unidades químicas (Lt/mol-seg.) o en unidades físicas (m/s) es un poco laborioso, se utilizan por conveniencia, magnitudes adimensionales -- como los coefs. de equilibrio químico (K), o bien, en el caso de -- un sistema físico, utilizando la relación entre las velocidades de la fase luminosa y fase oscura ( $V_{fL}/V_{fosc.}$ )

Estas magnitudes adimensionales reciben el nombre de velocidad relativa de fotosíntesis.

Al ser afectadas por la energía luminosa y la temperatura las funciones vitales de la célula vegetal; la membrana por ser parte de ella sufre 3 tipos de variaciones de índole eléctrica; éstas son:

- a).- En los potenciales.
- b).- En la permeabilidad. (Resistencia)
- c).- En el flujo de corriente.

Actualmente, éste hecho se ha confirmado gracias a experimentos -- realizados por Spanswick (14), Nobel (13), Dainty (16) y otros con notados científicos en la especialidad.

Las variaciones electroquímicas observadas en el vegetal son referidas a las fases luminosas, pero sus detalles dependen de la clase de vegetal, así, por ejemplo, para Engelmann las características de sus experimentos se derivan de la actividad bacteriana, -- tanto que para el análisis realizado por los demás científicos, -- sus deducciones provienen por lo general de algas verdes u otras -- especies.

La fotosíntesis en resúmen influye de una manera determinante en -- el comportamiento de la membrana vegetal, al incluir en el proceso la transformación del agua (H<sub>2</sub>O) por la energía solar y la utilización progresiva de sus electrones (con nivel energético superior) para la transferencia del CO<sub>2</sub> y otros compuestos.

#### II-5).- Tres Consideraciones Ecológicas en las Algas Verdes.

Objetivo.- Establecer las diferencias entre el sistema ecológico -- natural y un sistema ambiental artificial, así como las razones -- por las cuales es conveniente mantener algunas características ambientales constantes o casi constantes.

Introducción.- Al intervenir en el sistema ecológico de las algas verdes, los ciclos biológicos más importantes (el  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , etc.), así como una biota\* muy grande y compleja, dan como resultado un conjunto de condiciones externas e internas difíciles de analizar en conjunto, pero susceptibles de describir para un instante determinado. Esta es la base para efectuar cualquier enfoque de cualquier propósito.

Consideraciones sobre el Sistema Ecológico de las algas verdes. -

El sistema ecológico de un vegetal inferior es la relación que -- guarda éste con el medio ambiente en sus aspectos físicos y biológicos.

Aspectos físicos ecológicos.- Son aquellos que influyen exclusivamente en el vegetal, modificando su estado físico original o manteniéndolo sin alterar su naturaleza, éstos son: temperatura, cantidad de luz, y presión.

Aspectos biológicos.- Son aquellos que influyen en el vegetal ambientalmente, es decir son un conjunto de interrelaciones del vegetal inferior con respecto a los demás organismos vivos.

Sistema biológico artificial.

El sistema biológico artificial, está determinado por contener un

(\*), biota es la comunidad de seres vivos en un sistema biológico.

número mínimo de variables ecológico - biológicas y un número determinado de variables físicas con un mínimo de variaciones.

De estos sencillos conceptos pueden hallarse tres consideraciones ecológicas adecuadas para la investigación o el estudio en biofísica, las cuales son :

- 1).- Las variables físicas deberán de corresponder al sistema biológico artificial.
- 2).- Serán nulos o constantes la mayoría de los aspectos ecológico - biológicos.
- 3).- Cualquier sistema componente se analizará limitando el número de funciones, simplificando el estudio general y profundizándolo en un solo subtema.

## II.6 Descripción General de las Algas Verdes.

Objeto.- Describir el funcionamiento general, cualidades y limitaciones biológicas de las algas verdes, enfocando el estudio a tres especies en particular.

Introducción.- Las algas verdes o "chlorophytas" son una especie de la enorme cantidad de algas que existen, pero, en la biofísica vegetal, tienen gran importancia debido a sus excelentes cualidades físicas, respecto a la mayoría de las demás, siendo posible describir diferentes aspectos de la fisiología del vegetal inferior y además una visualización físico-matemática, que incluya aspectos de la simulación en la Ingeniería.

(A).- Generalidades de las algas.

Las algas están clasificadas en la Botánica general dentro de la rama Thallophyta (talófitas) y son consideradas como un grupo Polilitético, es decir, un grupo de individuos divididos en varios "taxa" (o categorías biológicas), que se originaron de ancestros vegetales hace millones de años, la categoría tallophyta se retiene en la actualidad como entidad práctica, porque algunos subgrupos tienen algunas características que todavía están en entredicho.

Características comunes a todas las algas.

Las algas, a diferencia de los vegetales superiores, presentan las siguientes características ambientales y anatómicas :

- 1).- Carencia de órganos típicamente complejos, raíces, tallos y hojas verdaderos.
- 2).- Tienen tejidos relativamente poco diferenciados, tales como son: Xylema, floema, cambium, fibras, células cribosas, epidérmicas, etc.
- 3).- Son micro o macroscópicas, considerando aquellas que son relativamente pequeñas, o algunas otras de ambiente marino, están caracterizadas por alcanzar hasta 30 (m) de longitud.
- 4).- En su mayoría son organismos acuáticos o autótrofos, o terrestres de ambiente húmedo y heterótrofos, pero con algunas excepciones (3).

Divisiones Biológicas de las Algas.

Las algas comprenden alrededor de 7 phylum o divisiones biológicas agrupadas según su coloración y sus características fisiológicas, - éstas son:

- 1.- Cyanophytas (algas azul - verdes)
- 2.- Eugilenophyta (eugilenos)
- 3.- Chlorophyta (algas verdes)
- 4.- Chrysophyta (algas amarillo - verdes, pardo-doradas y diatomeas).
- 5.- Pyrrophyta (algas dinoflageladas)
- 6.- Phaephyta (algas pardas).
- 7.- Rodophyta (algas rojas).

Todas las algas poseen clorofila y efectúan la fotosíntesis independientemente de que sean uni o pluricelulares, éstos últimos están compuestos de tejidos relativamente indiferenciados, los cuales nunca forman raíces tallos u hojas. Las algas son predominantemente acuáticas estando ampliamente distribuídas en todos los tipos - de aguas dulces, (lagos, ríos, estanques, pantanos, etc.), así como en los océanos.

Las siete phylum de algas abarcan alrededor de 20,000 especies, pero de las 7 phylum sólo hay algunas cuantas especies aptas para ser estudiadas por la Biofísica. En su mayoría éstas especies son del phylum chlorophyta, y tienen las siguientes cualidades:

- 1).- Existencia de macroorganismos unicelulares.
- 2).- Características biológicas simplificadas con respecto a cualquier otro vegetal.
- 3).- Gran versatilidad y flexibilidad para la experimentación.

De entre las pocas especies Chlorophyta utilizadas en la investigación destacan dos:

a).- La Nitella.

b).- La Chara.

En todos los demás casi siempre existen diversas dificultades en el estudio teórico experimental de la fisiología vegetal a nivel celular y una cantidad apreciable de variables heterogéneas (de diferentes sistemas físico-químicos), que no permiten obtener fácilmente resultados prácticos.

(B).- Introducción al estudio de las Algas Chlorofitas.

Siendo ciertas algas chlorofitas el centro de interés en muchos de los estudios de la biofísica vegetal se realizará una descripción específica y concreta de su fisiología, y sus características biológicas más destacadas, las cuales se han dividido en tres partes:

a).- Caracteres generales de las Chlorophytas.

b).- Componentes internos más importantes.

c).- Importancia Experimental de las algas Chara y Nitella.

a).- Caracteres generales de las Chlorophytas.

Este capítulo muestra ciertas tendencias evolutivas que sugieren que las algas más avanzadas superiores más especializadas evolucionaron de antiguas "algas verdes", (teoría no confirmada todavía). Es de las unicelulares, coloniales o pluricelulares, de células organizadas en filamentos o láminas que tienen un grosor de 2-3 micras.



Las Chlorophytas contienen clorofilas alfa (A) y Beta (B), y pigmentos carotenoides asociados dentro de los cloroplastos de diversas formas y tamaños, dependiendo de la especie.

Sus células poseen núcleo definido, paredes (ó cápsulas de secreción), compuestas de celulosa, y reserva alimenticia en forma de almidón con una reproducción de índole sexual o asexual según la especie.

Los miembros más primitivos de las algas verdes son unicelulares, monoflagelados y móviles en la mayor parte o durante su ciclo vital (17).

El alga más común *Chlamydomonas*, fig. (II-6) como ejemplo del tipo primitivo, es una célula semiesférica, con pared celulósica definida, posee un solo cloroplasto en forma de copa conteniendo una pequeña estructura oriteica llamada "pirenoide", asociada a la formación de almidón, un corpúsculo sensible a la luz, denominado "mancha ocular roja, un núcleo localizado centralmente y dos vacuolas contráctiles situadas en el extremo anterior junto al sitio donde se originan los flagelos que son su medio de locomoción.

Entre las algas verdes más útiles en la investigación sobre las tendencias evolutivas están las algas: *Volvox*, *Chlorella* y *Scenedesmus* las cuales pueden encontrarse en aguas dulces contaminadas o no contaminadas biológicamente, (es decir con desperdicios biológicos).

(C).- Algas Chlorophytas de importancia en Biofísica.

Solo existen dos variedades de chlorophytas de agua dulce que presentan las cualidades necesarias para la experimentación: La *Chara*

y la ditella.

Los investigadores utilizan diversas variedades tanto de Nitella -- como de la Chara para el estudio de la Difusión, el transporte activo y diversos procesos metabólicos del vegetal, existiendo por lo tanto mayor cantidad de información en ellos que en cualquier otro vegetal inferior o superior.

Por estas razones se analizarán en detalle las características físicas y biológicas de éstos vegetales considerando algunos aspectos ecológicos.

Para una mejor comprensión de la importancia de las algas, su estudio se ha subdividido en 4 partes:

- 1).- Identificación y descripción.
- 2).- Habitats y Distribución
- 3).- Aspectos Ecológicos
- 4).- Importancia en Biofísica.

#### El Alga Chara.

El alga Chara \* mostrada en la fig. (II-7) y (II-8) tiene las siguientes características:

- 1).- Identificación y descripción.

Tiene el aspecto externo de un vegetal superior, ya que presenta ramificaciones similares al tallo y las hojas (que bien pueden denominarse pseudo tallo y pseudo hojas), éstas ramificaciones son verticiladas, presentando nudos y entrenudos a lo largo de su pseudotallo. Al llegar a la base se encuentra un órgano comparti-

ble a la raíz de los vegetales superiores cuya misión es la fijación del vegetal al piso.

2).- Habitats y Distribución.- Se le encuentra en lagos y riachuelos, ya que por razones morfológicas, se le encuentra a baja profundidad en aguas dulces con temperaturas no mayores a 25°C, ni menores a 15°C, y una presión igual o ligeramente menor a la del nivel del mar.

3).- Ecología.- Su existencia depende de la interacción energética entre ella y otros vegetales como algas, lirios acuáticos y -- animales inferiores.

4).- Importancia en Biofísica.- Existen varios géneros del alga - Chara muy utilizados en la experimentación, éstos son:

a).- Chara Corallina.

b).- Chara Fragilis.

c).- Chara Australis.

La Chara Corallina es una variedad muy utilizada en el análisis - del transporte activo vegetal y de la bomba electrogénica.

En otros campos de interés exclusivamente biológico, al conside-- rarse algunos miembros de ésta especie como elementos de transi--- ción, son utilizados para explicar aspectos de evolución orgánica.

(\*) El alga Chara, para algunos autores no tiene una clasificación auténtica ya que es clasificada entre Chlorofitas y Feoficeas - Ro-- doficeas.

### El Alga Nitella.

El alga Nitella (figs (II-9) y (II-10) es un vegetal inferior, -- diferente en varios aspectos a las demás y es, probablemente la -- más conocida e importante en la Biofísica vegetal.

#### 1).- Descripción e Identificación.

El cuerpo de la planta es completamente filamentosos como ocurre con la chara y presenta también el aspecto de un vegetal superior, al tener un conjunto de ramificaciones que son en realidad células individuales de gran tamaño, pero sin nudos o formas complicadas.

Las células de un alga Nitella, llegan a medir hasta 3 cms. de -- longitud, su forma es cuasi cilíndrica y su clorofila, a diferencia de otras algas no está disimulada (17).

2).- Habitats y Distribución.- Es un alga de agua dulce, se fija al fondo del estanque y a veces se le encuentra conteniendo ciertas cantidades de  $\text{CaCO}_3$ , lo cual explica la presencia de estas -- plantas en depósitos con  $\text{CaCO}_3$ , su población tiene un aspecto más o menos brillante cuando el agua no está contaminada, su temperatura óptima varía entre 24 y 28°C, (experimentalmente se utilizan 25°C), es además, un vegetal de baja profundidad y se encuentra - en zonas luminosas (17).

3).- Ecología.- Debido a que puede encontrarse en aguas no contaminadas o de escasa contaminación, se encuentra en un medio apto para otras especies tanto vegetales como animales con una flora y fauna animales y los de la tierra.

4).- Importancia en Biofísica.- Al igual que la Chara, hay 3 géneros muy usuales de Nitella (15) utilizados en la experimentación, éstos son:

- a).- Nitella translucens
- b).- Nitella pulchella
- c).- Nitella hotchkissii.

Entre los estudios más comunes en donde se utiliza la Nitella están los siguientes:

- a).- Bomba Electrogénica.
- b).- Variaciones eléctricas de la membrana durante la fotosíntesis.
- c).- Transporte Activo.
- d).- Influencia de las enzimas en el metabolismo del vegetal inferior.

La Chara y La Nitella al ocupar un lugar preponderante han sido sometidas a un sinnúmero de investigaciones en diversos países -- del mundo; pero, sin embargo existen todavía muchos aspectos teóricos y experimentales por estudiar y considerar.

### CAPITULO III

#### DIFUSION EN LA MEMBRANA VEGETAL

- III-1).- Propiedades Electroquímicas de la Membrana Celular.
- a).- Descripción de las funciones trascendentes de la membrana biológica.
  - b).- Las Leyes de Fick en la difusión
- III-2).- Tres Aspectos Químicos importantes en la difusión Neutra.
- a).- Las soluciones químicas elementales.
  - b).- Influencia del agua en la membrana del vegetal inferior.
  - c).- Cinética de las reacciones químicas simples.
- III-3).- Dos Modelos Biológicos de la Membrana Celular.
- a).- Modelo de Danielli & Dawson.
  - b).- Modelo de Lucy & Sjöstrand.
- III-4).- Influencia de la Permeabilidad y la cápsula de secreción en la difusión.
- a).- La Permeabilidad de la Membrana Celular.
  - b).- Difusión en la cápsula de secreción.

III-5).- Descripción Simplificada de las Biotecnologías Termoquímicas.

a).- Bioenergética vegetal.

b).- Dos aspectos térmicos importantes en la difusión.

III-1).- Propiedades Electroquímicas de la Membrana Celular.

Objeto.- Conocer y describir la estructura y características de la difusión neutra en la membrana biológica del vegetal inferior con sus limitaciones y aspectos prácticos.

Introducción.- En el capítulo anterior fueron analizadas brevemente las componentes de una célula mencionando especialmente la membrana y algunas de sus funciones. Con estos antecedentes se procederá a analizar en la membrana vegetal las características generales de la difusión analizando inicialmente los aspectos no iónicos y posteriormente los iónicos.

A).- Descripción de las funciones trascendentes en la membrana vegetal.

La membrana como entidad biológica en cualquier ser vivo - tiene no menos de siete biotecnologías industriales identificadas hasta la fecha, todas igualmente complejas, y no todas estudiadas profundamente. Estas biotecnologías de la membrana se agrupan en dos grandes grupos:

I.- Electroquímicas.

II.- Termoquímicas.

La importancia y aplicación de éste estudio se comprende - cuando se definen las relaciones entre los dos grupos mencionados.

Biotecnologías Electroquímicas.

Las Biotecnologías Electroquímicas están fundamentadas en las propiedades eléctricas de la membrana, y en las reacciones químicas -



orgánicas teniendo asignadas las siguientes dos funciones trascendentes:

- a).- Promoción de reacciones químicas por medio de enzimas.
- b).- Selectividad Electrónica.

La selectividad electrónica se subdivide a su vez en: Sistemas -- Electrogénicos (neutros y iónicos), osmosis y electroforesis.

En el presente estudio se considerarán únicamente las funciones -- trascendentes que corresponden a la selectividad electrónica en -- procesos electrogénicos, por ser éstos los más susceptibles de ana-- lizar desde el punto de vista de la ingeniería.

#### Sistemas Electrogénicos.

La disociación de iones (sists. electrogénicos) en la membrana fue observada por vez primera en 1913 por el científico alemán Albrecht Bethe (18), donde por medio de una membrana animal colocada entre dos soluciones acuosas hizo pasar una corriente eléctrica. En éste sistema observó que tanto el movimiento como el desplazamiento molecular resultante, volvía ligeramente ácido un lado de la membrana y ligeramente básico el otro, de ésta forma, se estableció que el efecto ácido y básico era el resultado de la disociación de las moléculas de agua en iones hidrógeno ( $H^+$ ) y iones hidróxido ( $OH^-$ ).

#### La Bomba Electrogénica y la Difusión Iónica.

El fenómeno descubierto por Bethe no fué estudiado en los vegeta-- les hasta años después gracias a los experimentos de Blinks y ---- Ostermant (19), destinados a comprobar el efecto de la fotosínte--

sis en la disociación del agua en oxígeno ( $O_2$ ) e hidrógeno (H) por medio de reacciones químicas. De acuerdo a éste panorama se ha considerado que las propiedades eléctricas son causadas por gradientes decrecientes de difusión iónica, establecidos por un sistema de regulación de potenciales electroquímicos denominado: "Bomba Iónica" (20).

La bomba iónica varía de un organismo a otro en el transporte de cargas eléctricas positivas y negativas a través de la membrana, por lo que puede ser: Neutra o Electrogénica.

Bomba Neutra.

Cuando una membrana biológica transporta una carga eléctrica neta cercana o igual a cero no hay ningún cambio apreciable en la diferencia de potencial (E), realizándose (si la hay), una difusión neutra.

Es evidente que no es posible explicar las propiedades eléctricas de la membrana celular en términos de una bomba neutra (14), ya que determina aspectos muy parciales de la difusión, que sólo existen pocas veces o bajo condiciones experimentales como ocurre con el calcio  $CA^{2+}$ , ó igualando potenciales internos negativos con una gran cantidad de cationes monovalentes.

Bomba Electrogénica.

La bomba electrogénica transporta una carga neta\* a través de la -

\* Carga neta es toda carga representada por solo tipo de valencia P. ej.: +1, +2 ó -1. -2. etc.

membrana y establece un potencial no solo para el caso de los macronutrientes más conocidos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ), sino que también establece otro potencial eléctrico para el  $\text{H}^+$ , proveniente de la disociación del agua, el cual obedece a otro sistema de regulación - - electrofisiológica denominado: "Bomba Electrogénica de Hidrógeno - (BHI)". La (BHI), es susceptible de variar parte del comportamiento de la membrana dependiendo de las variaciones cuantitativas del Hidrógeno (H).

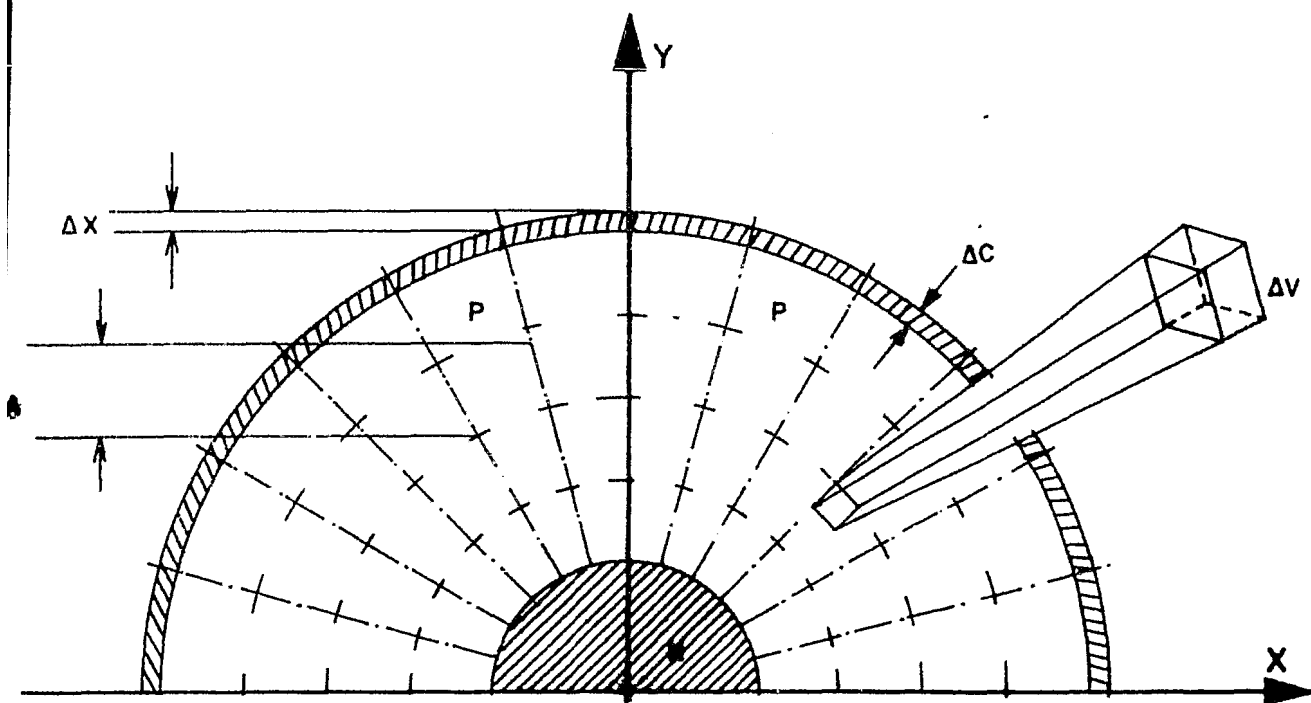
#### Difusión Neutra.

La difusión por ser un fenómeno resultante de un movimiento molecular, de naturaleza físico-química tiene características probabilísticas por ocurrir en un área finita y ante todo por desconocerse en gran parte y con precisión, la razón físico matemática a la que obedece la distribución molecular en la membrana, independientemente de que exista o no ionización.

#### Importancia de la Bomba Neutra.

El estudio del comportamiento iónico en una membrana a cualquier nivel debe comenzar por el análisis de la membrana neutra al ser - el caso más sencillo de la difusión y el más próximo a la idealización (14).

La difusión, a pesar de ser un fenómeno muy común en la naturaleza, es todavía poco conocido especialmente en lo que al mecanismo iónico se refiere, cuando se trata de membranas biológicas.



**FIG. III. 1**

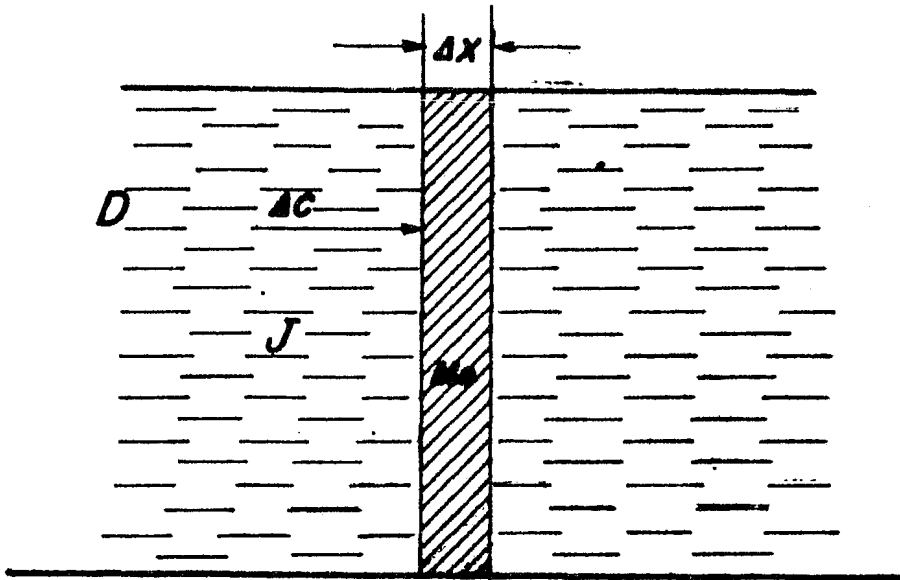
**CELULA IDEAL UTILIZADA PARA DEFINIR LA  
DIFUSION NEUTRA**

**Nomenclatura**

- $\Delta x$  = DIFERENCIAL DE GROSOR  
 A = AREA DE UNA REGION DE LA CELULA  
 $\Delta v$  = DIFERENCIAL DE VOLUMEN  
 $\Delta c$  = DIFERENCIAL DE CONCENTRACION  
 N = NUCLEO  
 P = PROTOPLASMA

**LA CELULA IDEAL TIENE LAS SIGS. CARACTS.**

- 1- ES PERFECTAMENTE ESFERICA
- 2- SU PROTOPLASMA ES HOMOGNEO
- 3- CUMPLE CON LAS LEYES DE FICK
- 4- SU MEMBRANA ES ELECTRICAMENTE NEUTRA
- 5- LA DIFUSION ES HOMOGNEA EN CUALQUIER PUNTO



**FIG. III. 1**

**DIFUSION NEUTRA A TRAVÉS DE UNA SECCION DE MEMBRANA**

**Nomenclatura**

**$J$  = FLUJO DE DIFUSION**

**$\Delta x$  = DIFERENCIAL DE GROSOR**

**$\Delta c$  = DIFERENCIAL DE CONCENTRACION**

**$D$  = COEFICIENTE DE DIFUSION**

El pretender explicar o simular un sistema biológico real con un sistema neutro, sería un error, pero sin embargo la representación físico-matemática de un sistema neutro puede evolucionar hasta una fase que permita obtener una representación práctica.

B).- Las Leyes de Fick en la difusión.

Las Leyes de Fick dan una explicación teórica de la difusión no iónica, desde el punto de vista cuantitativo, dando énfasis a la concentración (C) de una sustancia en un solvente donde hay necesariamente una inmigración atómica o flujo (J) en una región, estableciéndose un gradiente de concentración (C) con respecto a la distancia en que se difunde esa sustancia  $[\frac{\partial c}{\partial x}]$  en la membrana biológica de una célula ideal. Figs. (III-1) y (III-1a).

La 1a Ley de Fick está dada por:

$$J = -DA \frac{\partial c}{\partial x} \quad (III-1)$$

en donde:

El signo (-) de la ec (3.1) indica la dirección decreciente del flujo de difusión siendo:

J = Flujo de difusión  $\frac{\text{Atomos o Mm}}{s \text{ cm}^2}$

D = Coeficiente de difusión  $\frac{\text{cm}^2}{s}$

A = Area  $\text{cm}^2$

$\frac{\partial c}{\partial x}$  = Gradiente de concentración con respecto a la distancia de difusión

$$\frac{\text{Atomos o Mm}}{\text{cm}}$$

### Implicaciones de la 1ª Ley de Fick

La ec (III-1) indica que el agente que causa la difusión es un -- flujo molecular similar al flujo térmico en una lámina o tabique definido matemáticamente por un gradiente de concentración en un medio determinado (20).

La Fig. (III-2) muestra un bosquejo de un sistema de difusión -- ideal con las variables y constantes mostradas en la Ley de Fick, este sistema es unidireccional con un flujo estable laminar y de área unitaria; en estas condiciones la ec (III-1) puede escribirse como:

$$J = -D \left[ \frac{dc}{dx} \right] \quad (III-1a)$$

La ec (III-1a) representa la 1ª Ley de Fick simplificada (13).

El uso de gradientes matemáticos es extremadamente importante -- cuando se tienen parámetros que impliquen la existencia de sistemas dinámicos de cualquier área científica.

### El Coeficiente de Difusión (D)

En la difusión definida por Fick, se ha mencionado el coeficiente de difusión (D), el cual es directamente proporcional al flujo de difusión (J), y por su influencia en otros procesos fisicoquímicos del vegetal requiere de una breve discusión.

El coeficiente de Difusión (D) es un parámetro constante que representa la capacidad que tiene una sustancia o elemento para -- transportar sus moléculas a través de una membrana de una región-

a otra en una unidad de tiempo (13).

Este coeficiente es una cantidad calculada experimentalmente existiendo un valor diferente para cada sustancia o elemento que intervenga en el proceso de la difusión.

En el caso concreto de la membrana del vegetal inferior, se resumen en la tabla (III-1), los elementos y sustancias más comúnmente encontrados en su ambiente.

Substancia o Elemento.	Coefficiente de Difusión $D \times 10^{-5}$
Glucosa	0.67
Sacarosa	0.52
Glicina	1.05
Calcio	1.19
Potasio	1.92
Sodio	2.2
Oxígeno	0.20
Bióxido de C (CO <sub>2</sub> )	0.16
Vapor de Agua (H <sub>2</sub> O)	0.25

Tabla (III-1) Valores Comunes de (D) en las sustancias y elementos más comunes en la difusión de la membrana biológica para T = 25 °C y 10 Mm de concentración (13).

El coeficiente de Difusión (D) es una cantidad trascendente en cualquier proceso biológico entre los que se encuentran: la respi-



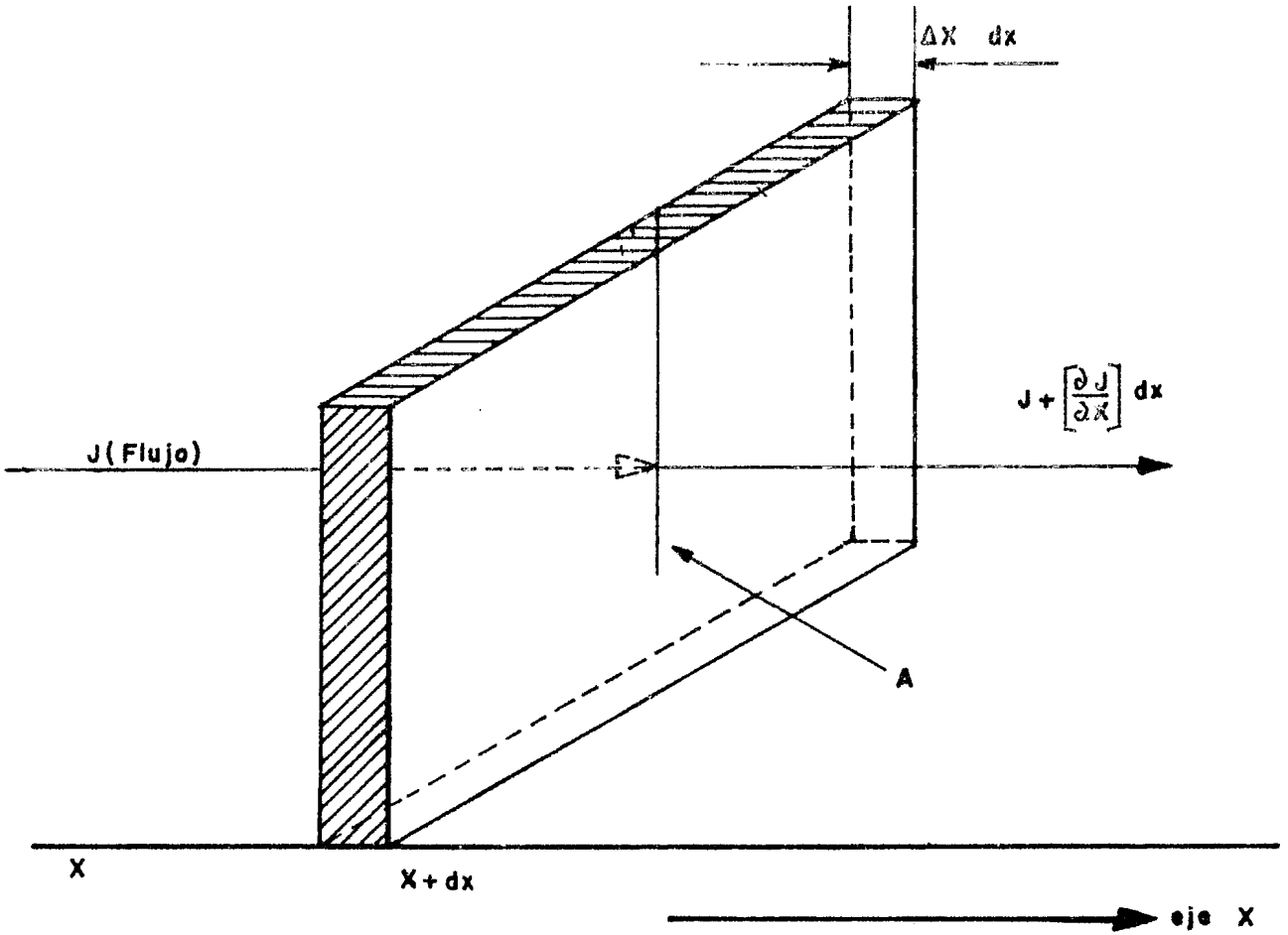


FIG. III. 2

DIAGRAMA QUE MUESTRA LA DIRECCION DEL FLUJO EN UNA SECCION DE MEMBRANA, UTILIZADA COMO BASE PARA LA DEDUCCION DE LA 2ª LEY DE FICK

ación en plantas y animales, la fotosíntesis vegetal, selectividad iónica, etc.

La 2a. Ley de Fick y su importancia en la difusión.

La difusión que se lleva a cabo en una solución y a través de una membrana no está plenamente identificada por la 1a Ley de Fick, - al no describir el comportamiento de las moléculas en el tiempo y en el espacio. Si se relaciona la 1a. Ley de Fick con la ecuación de continuidad (Principio de Lavoisier), se encuentra una muy útil relación a partir de la fig. (III-2) denominada 2a Ley de Fick (13).

El flujo (J) de una sustancia o elemento químico por difundir es también la variación de la cantidad de materia respecto al tiempo que atraviesa un área determinada considerando el área perpendicular ( $\perp$ ) al eje X (obsérvese el lado izq. de la fig. (III-2)).

Según esto:

$$J = \frac{dM}{A dt} = -D \left[ \frac{dc}{dx} \right] \quad (\text{III-2})$$

Si se considera un grosor diferencial elemental  $\Delta X = dx$  en la -- dirección del flujo de difusión (X) existiendo el área constante (A); al sumar la dirección (X) con el grosor (dx) se obtiene la -- dirección interna del flujo ( $x + dx$ ), y la diferencia entre la -- dirección externa (X) y la interna ( $x + dx$ ) da nuevamente el grosor original, al no alterarse, puede escribirse la siguiente ---- igualdad:

$$X = (X + dx) + dx \quad (\text{III-2a})$$

en donde:

$\delta r$  = Grosor total de la Membrana.

El flujo existente será también externo ( $J$ ) e interno ( $J_i$ ), éste último, está determinado por un gradiente de una diferencial parcial de la siguiente forma:

$$J_i = J + \left[ \frac{\partial J}{\partial x} \right] dx \quad \text{(III-2b)}$$

Pero resulta que el flujo actúa sobre un área y por ello se expresará por unidad de área dentro de la membrana, esto es:

$$J_i = JA + \left[ \frac{\partial J}{\partial x} \right] dx \quad A \quad \text{(III-2c)}$$

Según la ecuación (III-2a) al haber un cambio en la dirección del flujo 'X' hay un cambio en el flujo, por lo tanto el flujo a la izquierda es igual al de la derecha, esto es:

$$JA_e = \left[ J + \left[ \frac{\partial J}{\partial x} \right] dx \right] A \quad \text{(III-2d)}$$

flujo a la izq.  
de la Membrana  
(Ext).

Flujo a la derecha de la  
Membrana (Int.)

El flujo total quedaría representado por:

$$J_t = JA - \left[ J + \left[ \frac{\partial J}{\partial x} \right] dx \right] \cdot A \quad \text{(III-2e)}$$

Por otro lado, es posible expresar al flujo total de difusión como la variación de concentración respecto al tiempo.

$$J = - \frac{\partial c}{\partial t} dx \quad \text{(III-2f)}$$

La ecuación (III-2f) es sólo válida, si se apega a la ecuación - - (III-2c), por tratarse de un flujo actuando en un área, quedando como:

$$J_t = \frac{\partial c}{\partial t} \cdot (A dx) \quad (\text{III-2g})$$

Igualando la expresión (III-2g) con (III-2e):

$$JA - \left[ J + \left( \frac{\partial J}{\partial x} \right) dx \right] \cdot A = \frac{\partial c}{\partial t} (A dx) \quad (\text{III-2h})$$

Reduciendo algebraicamente los términos que aparecen a la izquierda y a la derecha de la ecuación se obtendrá:

$$JA - A \left( \frac{\partial J}{\partial x} \right) dx = \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) A dx \quad (\text{III-2i})$$

Esto es:

$$- \left( \frac{\partial J}{\partial x} \right) = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (\text{III-2j})$$

Esta última ecuación (III.2j) equivale a la primera Ley de la Termodinámica bajo otro punto de vista, la cual expresa la misma relación entre materia y energía obedeciendo al principio de Lavoisier. Si se sustituye la Segunda Ley de Fick después de algunas simplificaciones:

$$- \frac{\partial J}{\partial x} \left( - \frac{\partial c}{\partial x} \right) = D \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right] \quad (\text{III-2k})$$

La ecuación (III-2L) puede escribirse como:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left[ \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right] \quad (\text{III.3})$$

La ecuación (III-2L) representa a la Segunda Ley de Fick.

#### Implicaciones de la Segunda Ley de Fick

La Segunda Ley de Fick (ec. III.3) es una ecuación diferencial parcial de segundo orden cuya solución es similar a la de la ecuación de calor en una pared (13), y se define de la forma siguiente;

$$C = \frac{M}{2(\pi Dt)^{1/2}} \exp(-x^2/4Dt)$$

siendo la nomenclatura:

( $\pi$ ) = Número 'Pi' (cte. trigonométrica) IAd

M = Cantidad total de soluto por unidad de área (soluto inicial)  
(Mm)

t = tiempo (siegs)

c = concentración de soluto 'X' en un tiempo 't' (Mm/s)

D = coeficiente de difusión según la sust. o elemento (cm<sup>2</sup>/S)

La solución de la Segunda Ley de Fick determina que la distribución Gaussiana o Normal es la más adecuada en la difusión molecular como puede observarse en las figuras (III.3) y (III.3A) donde se muestra el gráfico de concentración (C) Vs. distancia (X). Si es inspeccionada la función Gaussiana de la ecuación (III.3), la probabilidad máxima de concentración ocurre cuando X = 0 y el valor de esa probabilidad es:

$$C_m = \frac{M}{2(\pi D)^{1/2}} \quad \text{(III.3b)}$$

De la expresión (III.3b) se deduce que para valores pequeños de la desviación Standard (Xe) se producen grandes valores de la probabilidad máxima, tal y como se esperaría en forma intuitiva, la desviación Standard 'e' para la difusión molecular es igual a (1/e), (13) Al valor de (Cm) se le denomina también medida de precisión de datos, ya que tiene un valor grande para valores pequeños de la desviación standard (13).

Variación de la Distribución en el tiempo según la solución de la Segunda Ley de Fick.

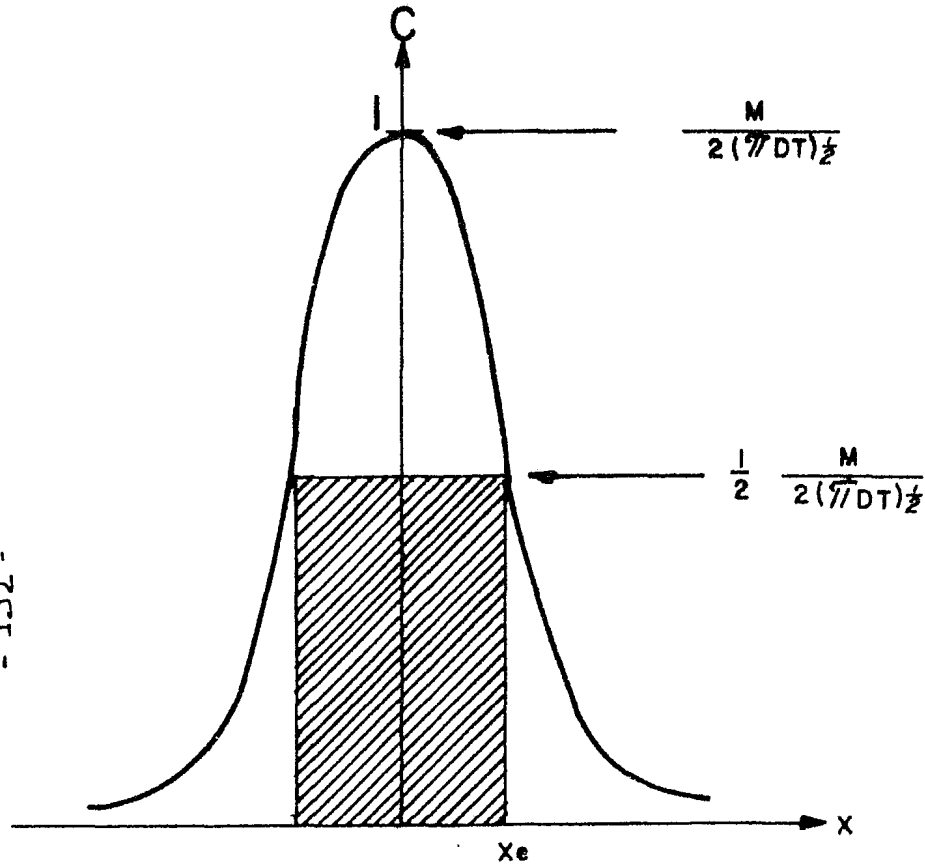


FIG. III. 3

DISTRIBUCION NORMAL EN LA CONCENTRACION MOLECULAR DE UNA MEMBRANA EN UN TIEMPO (T<sub>0</sub>) LA CONCENTRACION (c) ES FUNCION DE LA POSICION (X).

X<sub>e</sub> REPRESENTA A LA DESVIACION STANDARD E LA CONCENTRACION

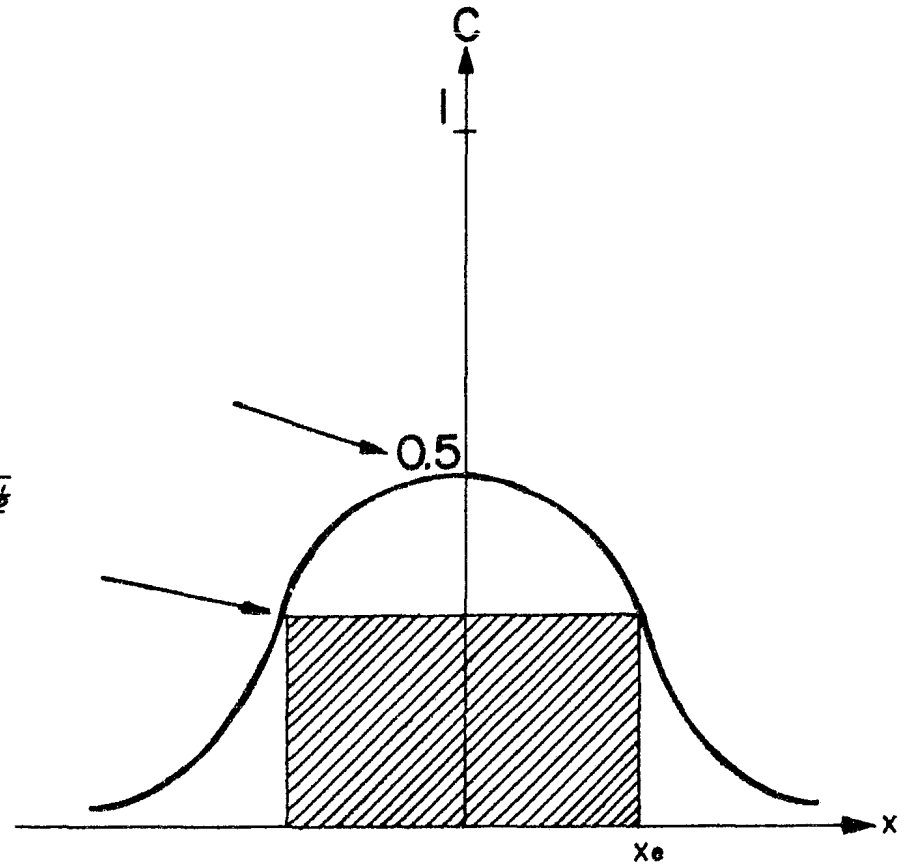
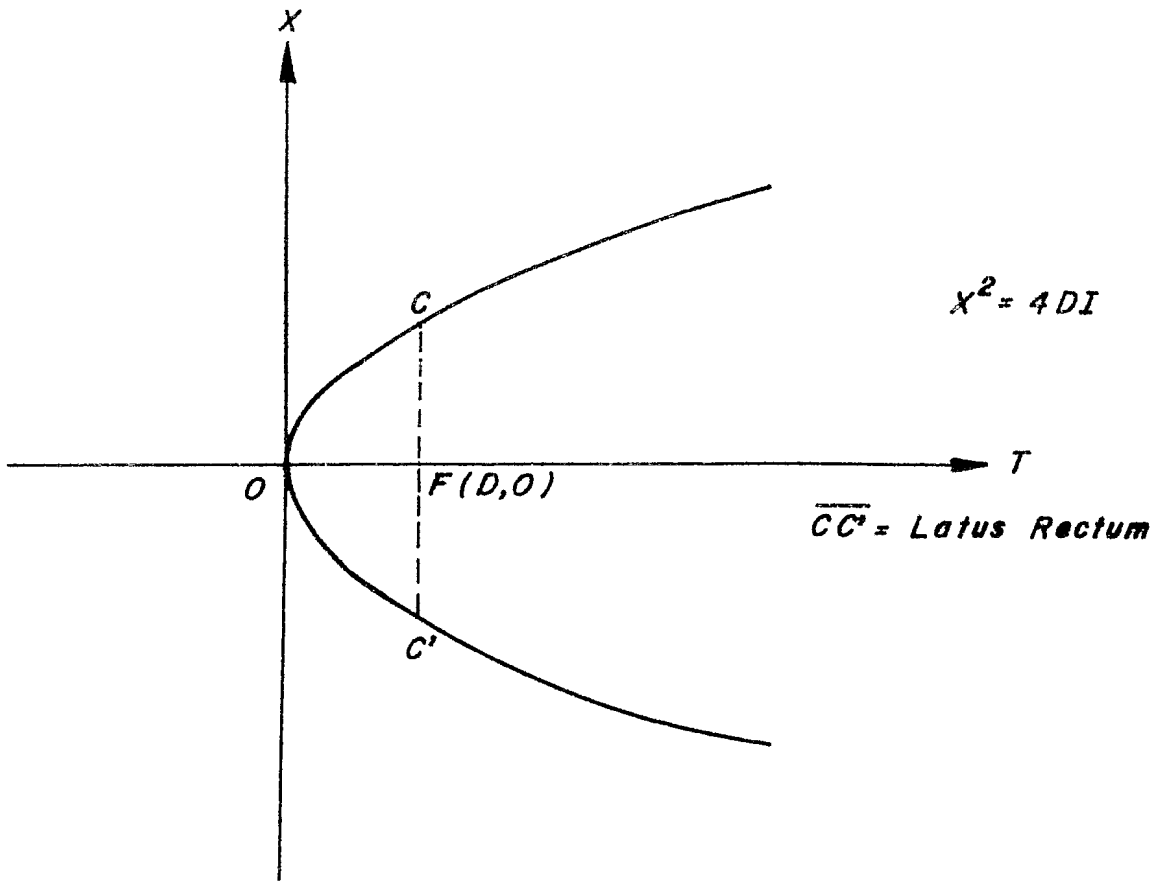


FIG. III. 3A

DISTRIBUCION NORMAL MOLECULAR DESPUES DE UN TIEMPO (1)

FIG. III-4



LA RELACION GRAFICA ENTRE LA DISTANCIA  $X$  DE DIFUSION, LA CONSTANTE DE DIFUSION  $D$  Y EL TIEMPO, CORRESPONDE A UNA PARABOLA CON FOCO SOBRE EL EJE DE LAS ORDENADAS "X"

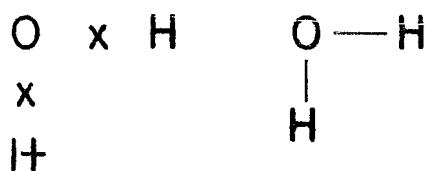


FIG. III.5

*ESTRUCTURA SIMPLIFICADA DEL AGUA SEGUN LEWIS*

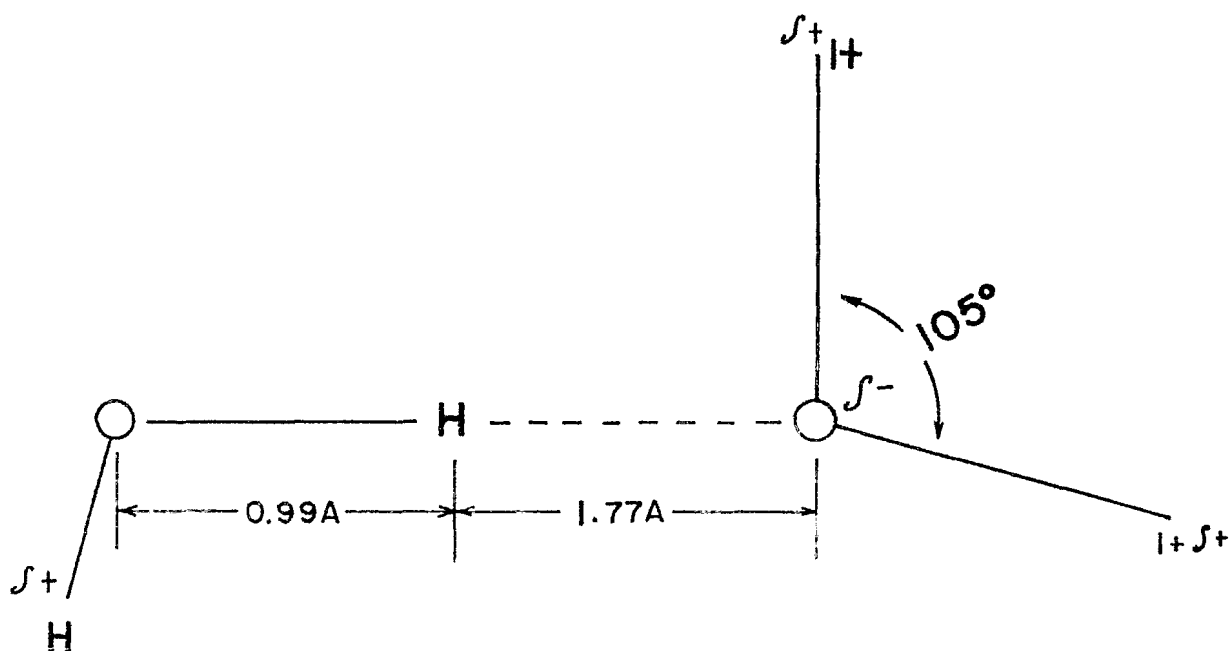


FIG. III 5a

*DISTANCIAS INTERELECTRONICAS EN A DE DOS MOLECULAS DE AGUA Y SUS POLARIDADES*



Aunque la forma funcional de la concentración dada por la ecuación (III.3b) es sólo una solución particular de la Segunda Ley de Fick y está restringida por el coeficiente de Difusión  $D$ , indica la relación que guarda con respecto al tiempo según las observaciones de la tabla (III-2).

VALOR DE TIEMPO	CONCENTRAC.	EFEECTO.
$t=0$	Muy elevada	Todo o la mayor parte del soluto - en el origen.
$t > 0$	Intermedia	El soluto se difunde poco.
$t < 0$	Muy pequeña	El soluto se difunde por completo.

Tabla (III-2) Relación entre la distancia (X), el coeficiente de - difusión (D) y el tiempo en la gráfica.

De la ecuación (III-3a) puede obtenerse la siguiente expresión:

$$x^2 = 4 Dt \quad \text{(III-3c)}$$

La ecuación (III-3c) establece que al incrementarse el tiempo, se incrementa cuadráticamente la distancia de difusión a través de - la membrana, lo cual se interpreta geométricamente según la gráfi- ca de la fig. (III-4), considerando un coeficiente de Difusión cte. y constante. En una membrana real como la mostrada en la fig. (III-1) puede verse la influencia de la concentración respecto al tiempo. (13)

III-2.- Los Aspectos químicos fundamentales en la difusión Neutra.

A).- Soluciones Químicas Fundamentales.

El medio ambiente de la membrana del vegetal está formado por

una mezcla de agua y otros elementos tanto orgánicos como inorgánicos disueltos en diversas cantidades, por éste hecho puede decirse que el vegetal recibe diferentes excitaciones, una de las cuales es la óptima, siendo la excitación óptima aquella que tiene el menor número de interacciones físico-químicas. Para poder realizar cualquier estudio sobre el efecto de un elemento macronutriente o de cualquier otra naturaleza sobre la membrana se requiere de un conocimiento fundamental de las soluciones (19).

#### Solución Química.

Una solución química es una mezcla de composición variable formada de sustancias o elementos sólidos en cantidad mínima dispersos en una o varias sustancias en fase líquida y mayoritaria. El conjunto minoritario (sólidos) se denomina "soluto" y al mayoritario (líquido), se denomina solvente.

La cantidad de un soluto se mide por la concentración en PPM, (partes por millón) M (Mol por Lt) ó Mm (Milimol por LT), de tal forma que la solución dependiendo del tipo de experimentación puede estar:

- a).- Saturada
- b).- No saturada
- c).- Sobresaturada

**Solución Saturada.**- La solución es saturada cuando existe un equilibrio entre soluto y solvente.(19).

**No Saturada.**- Cuando la solución contiene la menor cantidad de soluto disuelta en el solvente que el que corresponde al estado de equilibrio. (19).

Sobrecaturada.- Cuando la solución contiene la mayor cantidad de soluto disuelto en el solvente que el que corresponde al estado de equilibrio.

En la mayor parte de los solutos la solubilidad varía con la temperatura y aunque no existe una proporcionalidad directa, por lo general aumenta o disminuye según el tipo de solución y en función de las componentes que existan.

La solubilidad en la biofísica siempre se refiere a las condiciones de equilibrio de presión y temperatura, y la luz buscando también el menor número posible de variables de cualquier fase del comportamiento fisiológico del vegetal inferior.

Consideraciones a la Solubilidad aplicada a la Biofísica Vegetal.

Solubilidad.- La solubilidad química es la relación de variación de un soluto con respecto a la temperatura. Esto es:

$$\textcircled{S} = \frac{ds_0}{dt} \quad (3.4)$$

siendo:

$ds_0$  = variación del soluto.

$dt$  = variación de temperatura

$s$  = solubilidad.

Pero en la membrana biológica para una determinada función y en determinado momento es cte, es decir:

$$\textcircled{S} = \frac{ds_0}{dt} = \text{cte} \quad (\text{III-4a})$$

La temperatura en el caso del elemento vegetal superior o inferior nunca se considera fuera del rango comprendido entre 15 y 35°C, ya que la fisiología propia del organismo impide que las funciones vitales continúen si existen temperaturas superiores o inferiores a éste límite. Por fines prácticos en la investigación biofísica el rango es todavía más pequeño y comprende sólo valores entre 20° y -- 25°C.

La ec. (III-4a), indica también que teóricamente, no habrá, para -- un sistema biológico de difusión, soluciones no saturadas ni sobresaturadas cuando se habla de las condiciones de equilibrio, aunque en la realidad se dan todos los casos y producen diferentes efectos en el vegetal.

#### Concentración y Contenido.

Como las algas son vegetales acuáticos, el medio en que viven es -- una solución, por lo que es preciso utilizar los conceptos y notaciones químicas, de concentraciones y contenido. Al no existir una sola notación, cada autor expresa las suyas de acuerdo a su conveniencia, las notaciones más comunes en la biofísica vegetal son las conocidas como: partes por millón y Milimol (Mm), las cuales se explican a continuación:

#### Partes por Millar y Por Millón.

Las expresiones partes por Millar y partes por Millón (PPM), para mezclas líquidas y sólidas se consideran en base de peso en peso, -- salvo y se indique lo contrario. Las PPM equivalen a 1 (Mg/Lt) y -- en soluciones acuosas diluidas a soluciones cuya densidad es cercana a 1 (g/ml) (21).

Mol (M) y Milimol (Mm),

Una mol (estrictamente moléculas gmo) de una substancia se define como la cantidad de una substancia o elemento expresado en gramos numéricamente igual al peso del elemento o de la fórmula y se simboliza M (21).

La molécula gramo o átomo gramo de cualquier elemento o compuesto establece que el número de moléculas o átomos es muy elevado, debido a la pequeñez de sus componentes y recibe el nombre de número de Avogadro, pues el número de átomos o moléculas que hay en el átomo o molécula gramo y es igual a:  $6.023 \times 10^{23}$ .

En muchos tipos de análisis, la mol M resulta todavía demasiado grande por lo que se utiliza también la milimol Mm o milésima parte de una Mol. Químicamente, una milimol es la cantidad de substancia expresada en miligramos numéricamente igual al peso de fórmula. Por ejemplo, una mol del compuesto NaCl es igual a:  $23 + 35.45 = 58.45$  (gms), y una milimol Mm de NaCl es igual a 58.44 (mg) ó  $58.44 \times 10^{-3}$  (gms) (21)

Algunos autores limitan el término "Mol" a compuestos empleando el término átomo gramo y ion - gramo para los elementos y iones simples respectivamente, sin embargo éstas diferencias no representan grandes ventajas en el análisis orgánico e inorgánico.

B).- Consideraciones fisiológicas para el agua utilizada en la experimentación de la Membrana del vegetal inferior

Hasta el momento, se ha hablado únicamente de la membrana, sin considerar el medio ambiente que la rodea, tal ambiente, está formado en el vegetal inferior, de agua y sales minerales, su estructura

sión que consta de cuatro partes, ha merecido plantearse aparte -- por tener una naturaleza química relacionada muy íntimamente con -- las propiedades electromecánicas de la membrana biológica. Se advierte que por no tratarse de un trabajo enfocado a la bioquímica, sólo se señalará la forma en que interviene la físicoquímica en una investigación de ingeniería y su importancia.

Las cuatro partes de que consta esta breve discusión sobre la fisicoquímica son las siguientes:

- 1).- Naturaleza Química del Agua.
- 2).- Energía Química y Potencial Químico del agua.
- 3).- El Potencial Hidrógeno.
- 4).- Características Generales del Agua Natural.

1).- Naturaleza Química del Agua.

El agua tiene una estructura formada por dos electrones de -- hidrógeno orientados tetraédricamente alrededor de un oxígeno formando una molécula combarada (8).

El modelo tetraédrico del agua es simplificado, cuando se utiliza la llamada estructura de Lewis fig. (III-5).

El enlace de los dos hidrógenos con el oxígeno es del tipo covalente, siendo su naturaleza del tipo dipolar, en donde las cargas se separan alineándose como se muestra en la fig. (III-5a).

La unión del hidrógeno con el oxígeno, resulta de la atracción -- electrostática entre la carga neta positiva (+) del hidrógeno ( 7 ) sobre un oxígeno ( 8 ) en una molécula de agua circunvecina.

La molécula original del agua es eléctricamente neutra, pero al poner en ella otros elementos o sustancias deja de ser eléctricamente neutra por existir otra clase de interacciones electroquímicas (8).

#### Actividad Química.

La actividad química es una función introducida por el bioquímico-Lewis (8), para el tratamiento termodinámico de las concentraciones reales y viene siendo un factor de corrección definido como

$$a = \gamma c \quad (\text{III.5})$$

Donde:

a = actividad química (Mol ó Mm)

$\gamma$  = coeficiente de actividad (Ad)

c = concentración inicial (Mol ó Mm)

La ec. (III-5) indica la verdadera concentración en una solución, ya que la concentración, siendo en soluciones ideales igual a 1, es decir, la concentración permanece constante.

#### 2).- Energía Química y Potencial Químico del Agua.

En un sistema biológico cualquiera, según los bioquímicos, -- existen diversas clases de energías que al tomar parte en los procesos fisiológicos de un organismo o influir en alguno de sus componentes determinan una respuesta del organismo, cuantificada por la energía libre (o disponible), del ámbito en que se encuentre

Con el agua tiene intrínsecamente su energía libre, y en influen-

ciada por otras en el sistema de difusión, la evaluación de la - - energía total, se determina aplicando el principio de conservación y la Primera Ley de la Termodinámica (13).

#### Potencial Químico.

La energía libre\* del sistema de difusión expresada por unidad de masa recibe el nombre de potencial químico.

El potencial químico es ampliamente utilizado en la biofísica por ser un concepto que permite una mayor simplificación para el análisis de diversos aspectos y enfoques.

A partir de éstas consideraciones, los bioquímicos obtienen el balance de energía necesario en un determinado sistema biológico, de acuerdo a las siguientes 7 energías:

- 1).- Energía Química (julios o Cals/MoL)
- 2).- Energía de Flujo (julios o Cal/MoL)
- 3).- Trabajo realizado en o por el sistema (Julios).
- 4).- Energía Eléctrica\* (Determinada por el potencial (julio/MoL-VOLT)
- 5).- Energía Cinética (julios)
- 6).- Energía Potencial (julios)
- 7).- Energía Calorífica (CaLs/MoL).

\* Energía Libre es la cantidad de energía disponible, para desarrollar un trabajo.

\* La Energía Eléctrica se refiere al potencial eléctrico 'ZE' producido por uno o varios iones de un mismo elemento siendo 'Z' - la carga del ión y 'E' el potencial.



En un sistema biológico cualquiera, intervienen en realidad todas las siete energías mencionadas, y existe necesariamente una relación entrada - salida de energía. En cambio cuando hay limitaciones específicas de energías, el sistema biológico en cuestión es un caso ideal o muy particular.

El balance de energías en el sistema biológico conduce necesariamente a plantear ecuaciones importantes para la biofísica vegetal y/o animal, las cuales son utilizadas generalmente para estudios enfocados al aspecto bioquímico y no necesariamente a la ingeniería, por lo que no se van a discutir en esta tesis.

### 3).- El Potencial Hidrógeno.

El  $H_2$  es un elemento tan importante como los macronutrientes en la biofísica vegetal, ya que puede reaccionar con los elementos llamados 'No metales', formando lo que en química se denomina ácido, pero además, es de vital importancia en la disociación del agua cuando surge el ión  $H^+$ .

Al cambiar las condiciones ambientales por la influencia del hidrógeno, la membrana y todo el resto del vegetal, modifican sus respuestas fisiológicas. En sencillos términos químicos y considerando exclusivamente la membrana, es preciso examinar el pH promedio para saber si se tiene una solución básica, neutra o ácida (8).

Los ácidos y las bases son electrolitos, por lo tanto, se puede determinar la fuerza relativa de los ácidos por mediciones de conductividad eléctrica, en forma experimental, una solución ácida tiene un alto grado de actividad por entrar en reacción con metales, se -

considera a la solución:

ácida cuando:  $PH < 7$

neutra cuando:  $PH = 7$

básica cuando:  $PH > 7$

con un  $cp = 1.0$

y  $T = 25^{\circ}C.$

La importancia del PH en la biofísica radica en la influencia que tiene sobre las propiedades eléctricas y mecánicas del organismo, como la densidad, conductancia, etc.

El Agua Natural y el Agua Artificial en el vegetal inferior.

Con el fin de aportar los conceptos necesarios para comprender la influencia del ambiente sobre la membrana, durante una experimentación con algún espécimen de vegetal inferior, se han incluido - en éste capítulo una breve discusión sobre el Agua Natural y el Agua Artificial utilizadas por y para el vegetal inferior.

Agua Natural.- Se entiende por agua natural, al agua donde se encuentra normalmente el alga chara o nitella, y se compone normalmente de las sustancias mostradas en la tabla (III-3), en la - - cual se incluyen sus características principales.

La tabla (III-3) indica el tipo de agua dulce en la cual, algunas algas clorofitas pueden subsistir, pero no recomendables para la experimentación donde se utiliza una preparación de "agua especial", denominada APW, la cual permite analizar las propiedades electroquímicas de la membrana celular. El APW tiene los mismos elementos básicos que el agua dulce, pero en concentraciones pequeñas; en los capítulos IV y V se discutirá más a fondo la importancia del APW.

Nombre de la Sust.o Elemento	Símbolo	Naturaleza Electro-química	P.A.	N.At	Concent (PPM)	Valencia más común.
Cloro	CL	Aniónica	35.45	17	450 a 500	-1
Sodio	NA	Catrónica	23	11	525	1
Potasio	K	Catiónica	39.10	19	370	1
Carbonato	CO <sub>3</sub>	Aniónica	60	-	0.20	-
Nitrato	NO <sub>3</sub>	Aniónica	62	-	45	-
Sulfato	SC <sub>3</sub>	Aniónica	80	-	150	-

Tabla (III-3).- Características de las sustancias y elementos más comunes en el agua dulce (8).

NOTA: Las características térmicas al no ser estudiadas, se omiten en este caso.

### C).- Cinética de Reacciones Químicas Sencillas.

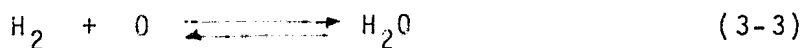
Objeto.- Conocer, por medio de la teoría del equilibrio químico como influye la velocidad de reacción de las sustancias o elementos en un sistema de difusión biológica.

Introducción.- Al hablar del tiempo en que se realiza la difusión - implícitamente se hizo alusión a las reacciones químicas, que determinan muchas de las características electromecánicas de la membrana vegetal, por tal motivo, es conveniente evaluar las consecuencias que surgen al relacionarse las sustancias de una solución con la membrana.

#### Reacción Química Directa Sencilla.

Cuando se forma un compuesto cualquiera como por ejemplo el agua la

ecuación química en forma reversible es:



En una reacción química como la mostrada en la ecuación (3-3) interesaría conocer la velocidad de reacción, y otros parámetros con el fin de obtener datos referentes a las características de esa reacción química bajo diferentes condiciones (19).

Si se observa detenidamente la ecuación (3.3), para que las dos moléculas de H se unan a la de oxígeno, se requiere de cierto tiempo, con una presión y temperatura determinadas. Al existir un tiempo y un desplazamiento, habrá una velocidad denominada velocidad de reacción directa de un compuesto. Esta velocidad, es directamente proporcional a las concentraciones de los elementos, es decir:

$$V_f = K_f [\text{H}_2] [\text{O}] \quad (3-4)$$

siendo:

$V_f$  = Velocidad de reacción directa, expresada como una constante de proporcionalidad. Mol/Lt-seg)

$\text{H}_2$  = Concentración de hidrógeno.

$\text{O}$  = Concentración de oxígeno.

$K_f$  - cte. de proporcionalidad de reacción directa simple.

Al verificarse la ecuación (3-3), se cumplirá la ec (3-4) y la velocidad de reacción  $V_f$  dependerá directamente de la energía que contengan esas moléculas (19).

### Reacción Inversa

Cuando se ha formado un nuevo compuesto, bajo determinadas condiciones, tiende a descomponerse en los componentes originales, que en el caso del Agua son  $H_2$  y  $O$ , pero para ello se requiere de cierto tiempo, lo que implica nuevamente la existencia de otra velocidad -- denominada velocidad de reacción inversa, definida por la siguiente ecuación:

$$V_b = K_b [H_2O]^2 \quad (3-5)$$

en donde:

$V_b$  = Velocidad de reacción inversa. Mol/Lt-seg.

$K_b$  = Cte. de proporcionalidad de reacción inversa.

La concentración de agua ( $H_2O$ ) se encuentra elevada al cuadrado porque para que la reacción se cumpla deben de chocar dos moléculas de  $H_2O$ .

Si de acuerdo al principio de Lavoisier (1a. Ley de la Termodinámica), la velocidad de reacción directa es igual a la velocidad de -- reacción inversa, entonces:

$$V_f = V_b \quad \text{Mol /Lt seg}$$

o bien:

$$K_f [H_2] [O] = K_b [H_2O]^2 \quad (3-6)$$

es decir:

$$\frac{(\text{Vel. de Reac. Directa})}{(\text{Vel. de Reac. Inversa})} = \frac{K_f}{K_b} = \frac{[H_2O]^2}{[H_2][O]} \quad (3-7)$$

De la expresión 3-7 se obtiene el coeficiente de partición o equilibrio (K) dado por:

$$\frac{K_f}{K_b} = K \quad (3-8)$$

Coeficiente de Equilibrio K

El coeficiente de equilibrio, es un parámetro útil en un sistema de difusión cuando se establece una reacción química entre el flujo externo y los fosfolípidos de la membrana (19) (13).

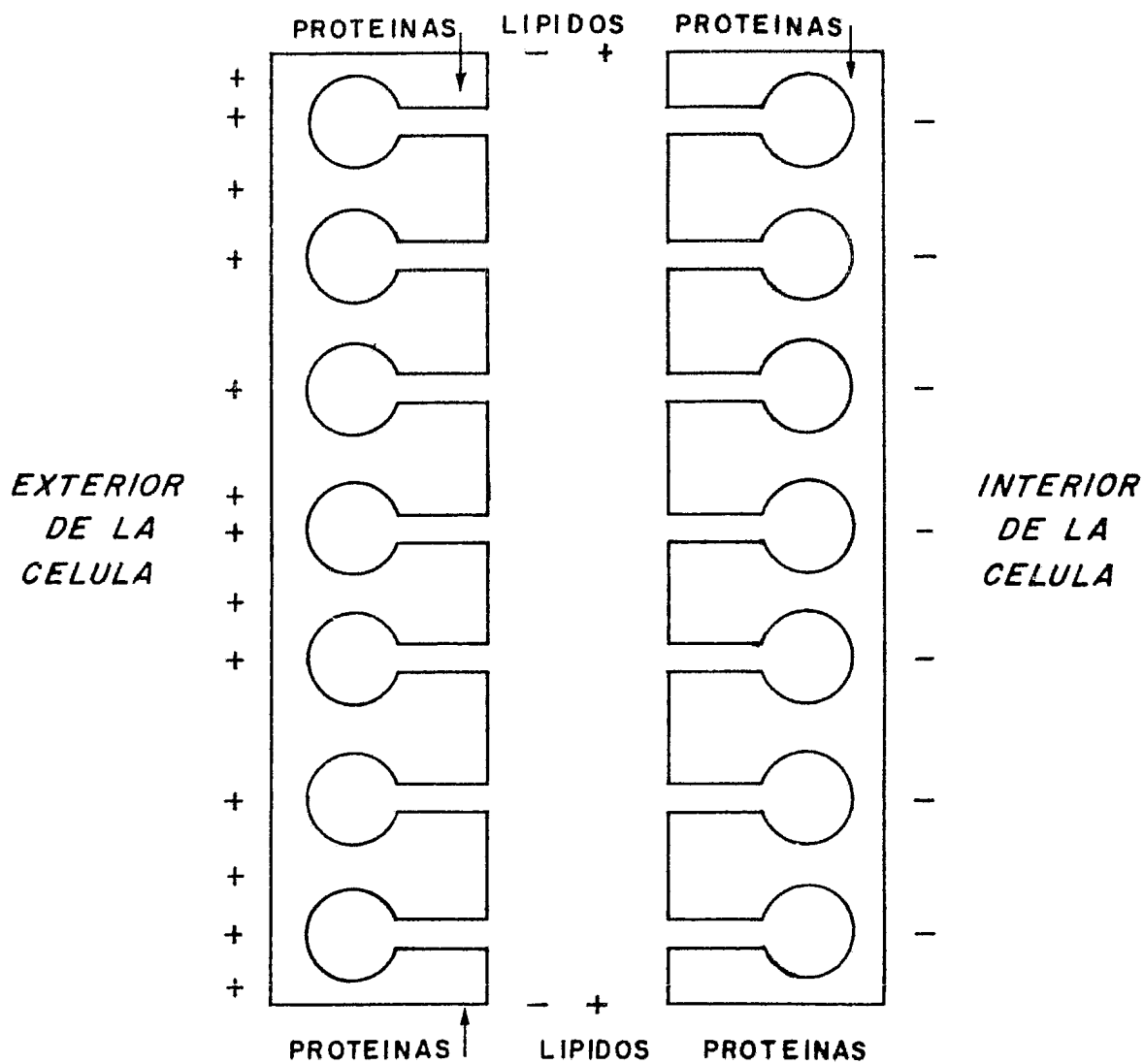
En los vegetales superiores e inferiores, existen diferentes concentraciones de solutos lipídicos en contacto con los fluidos ambientales, lo que implica diferentes reacciones con diversos coeficientes de equilibrio, ya conocidos, experimentalmente.

La escala de valores para los coeficientes de equilibrio K se encuentra entre  $10^{-4}$  y 10; si  $K=1$ , es el caso más próximo a la idealización y corresponde a la difusión de una sustancia no iónica, a través de la cápsula de secreción (13).

III-3).- Modelos Biológicos de la Membrana Celular.

Hasta el presente, no se conocen plenamente los verdaderos mecanismos ni la esencia química de la membrana biológica, pero en cambio, diversos investigadores han planteado ideas de hipótesis con diferentes modelos que describan procesos y características simplificadas de la membrana biológica.

El modelo trata de describir un proceso o varios, auténticamente naturales, e implica un modelo matemático o varios con diversos grados de dificultad. Por ser necesario tomar en cuenta los puntos



*FIG. III 6*

*MODELO MORFOLOGICO DE LA MEMBRANA CITOPLASMICA  
SEGUN DANIELLI DAWSON*

de vista de varios investigadores, se analizarán los dos modelos -- más conocidos en lo que al posible mecanismo de la membrana se re-- fiere, y se hará énfasis en el modelo de Danielli & Dawson.

A).- Modelo de Danielli & Dawson.

El modelo ideado por éstos dos investigadores no es el más - - avanzado, ni el más reciente, pero sí el más práctico, por conside-- rar que la membrana biológica está constituida por una doble capa de moléculas lipídicas (aceites y grasas) con sus polos proteicos ---- orientados hacia adentro (13). El antecedente de éste modelo se - realizó en 1925 con los trabajos de Gorter y Grendel, cuando pensa-- ron que el área cubierta por los lípidos extraídos a los eritrocii-- tos\* era alrededor de dos veces el área total de las células, y - - posteriormente, de forma comparativa, Danielli & Dawson generaliza-- ron el descubrimiento, planteando un modelo teórico (1).

Características del modelo de Danielli & Dawson.

La membrana celular mostrada en la figura (III-6) corresponde al -- modelo planteado por Danielli & Dawson, está constituida por dos re-- giones fundamentales: zona hidrófoba y zona hidrófila. La zona hi-- drófoba se compone de moléculas lipídicas, las cuales a nivel quí-- mico no tienen carga definida, siendo por tanto neutras, se consti-- tuyen de enlaces orgánicos de carbón e hidrógeno, los cuales no son solubles en el agua, la mayoría de las moléculas lipídicas en las - membranas llevan otras moléculas del grupo fosfato y/o aminas. La 2a zona llamada hidrófila por existir una interacción electrostáti--

\* Células rojas sanguíneas.



ga de iones y secciones de polarización de otros elementos bioquímicos tiene, a diferencia, una naturaleza esencialmente proteica, la cual, al aceptar moléculas de agua permite el desarrollo de una serie de reacciones químicas como ocurre con los carbohidratos (3) y las proteínas, las cuales forman otras sustancias proteicas de elevada importancia, para lo cual se requiere la presencia de sustancias y elementos tanto orgánicos como inorgánicos.

Las reacciones inorgánicas, proceden en parte del agua y en parte de sustancias y elementos que hay en ellas. A primera vista, no parece posible que existan reacciones químicas del agua a través de la capa de lípidos en ambos lados, pero la causa radica en el hecho de que existe una elevada selectividad iónica en la membrana, por lo que se habla de una permeabilidad selectiva de la membrana (1).

La permeabilidad selectiva se verificó en 1922 cuando se puso en evidencia que los iones amonio  $\text{NH}_4^+$  podían entrar o salir de la célula embrionaria de un pez, mientras que los iones cloro  $\text{Cl}^-$ , contenidos en el interior tardaban un tiempo considerable para salir, y tampoco entraban fácilmente, si se encontraban en el exterior.

#### Aspectos Geométricos en la Membrana.

En la membrana biológica, puede considerarse para fines prácticos, un pequeño conjunto de características promedio. Estas son las siguientes:

Gresor total: 75 a 100 Å

Gresor de la capa lipídica Intermedia: 40 Å

Gresor de la capa proteica lateral: 17.5 Å

Puede considerarse también que idealmente, la membrana tiene una configuración uniforme y continua, es decir sin irregularidades de superficie.

Estos aspectos geométricos de índole práctica son válidos para muchas células animales o vegetales.

Mecanismo de Selectividad Iónica según el modelo de Danielli & Dawson.

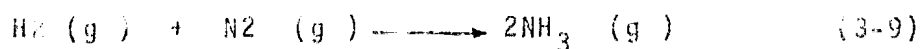
La conversión de los lípidos y la excitabilidad de la membrana depende en gran parte del hidrógeno (H), sin el cual no sería posible la transformación de compuestos complejos a otros menos complejos ni el paso de los iones hacia el interior de la célula, el posible mecanismo (22), es el siguiente:

Las Moléculas de los lípidos forman cadenas las cuales, al no estar saturadas se encuentran hidrogenados pudiendo formar otras -- substancias o estableciendo otras reacciones químicas en donde intervienen enzimas, éstas se forman a su vez de elementos orgánicos e inorgánicos. Con tal panorama puede identificarse un caso concreto de selectividad.

#### Identificación de una reacción Selectiva.

Para tener una idea del funcionamiento de la selectividad en la -- membrana biológica y sus características, se analizará el caso sencillo del Nitrógeno y el agua.

En el medio ambiente acuoso, de un alga, se encuentra además del -- hidrógeno y el oxígeno, el nitrógeno, con éstos tres elementos, se establecen las siguientes reacciones:



El hidrógeno  $\text{H}_2$  (Ec.(3-9)) reacciona con el nitrógeno  $\text{N}_2$ , formando amoníaco. ( $\text{NH}_3$ ) gracias a la presencia de un catalizador. El amoníaco  $\text{NH}_3$  se une al agua en la ec. (3-10) dando como resultado 2 iones:  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{OH}^-$ , éste último reacciona a su vez con otras moléculas.

La ecuación (3-10), es dentro del metabolismo vegetal un importante y útil ejemplo del principio de la selectividad iónica, puesto que el ión  $\text{NH}_4^+$  rompe las uniones lipídicas, y de esa forma, al existir el ión  $\text{OH}^-$ , puede enlazarse a otras moléculas para formar compuestos orgánicos, además, desde el punto de vista de la ingeniería, tales reacciones explican algunas de las características eléctricas de la membrana (19).

El agua no tiene exclusivamente hidrógeno y oxígeno en la naturaleza, sino que además lleva implícitamente elementos minerales como el sodio (Na), el Potasio (K), el Magnesio (Mg), etc. que forman compuestos, y no se encuentran aislados, un ejemplo de éstos es el NaCl, el cual, una vez que se encuentra en una fase acuosa da origen a los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , éstos iones tampoco son los únicos, pero si son de gran importancia.

Cabe mencionar, la existencia de iones bivalentes y trivalentes -- como el  $\text{Mg}^{++}$  y el  $\text{Fe}^{3+}$ , menos estudiados, por ser de menos interés y conducir a sistemas poco linealizables y muy complejos. (5)

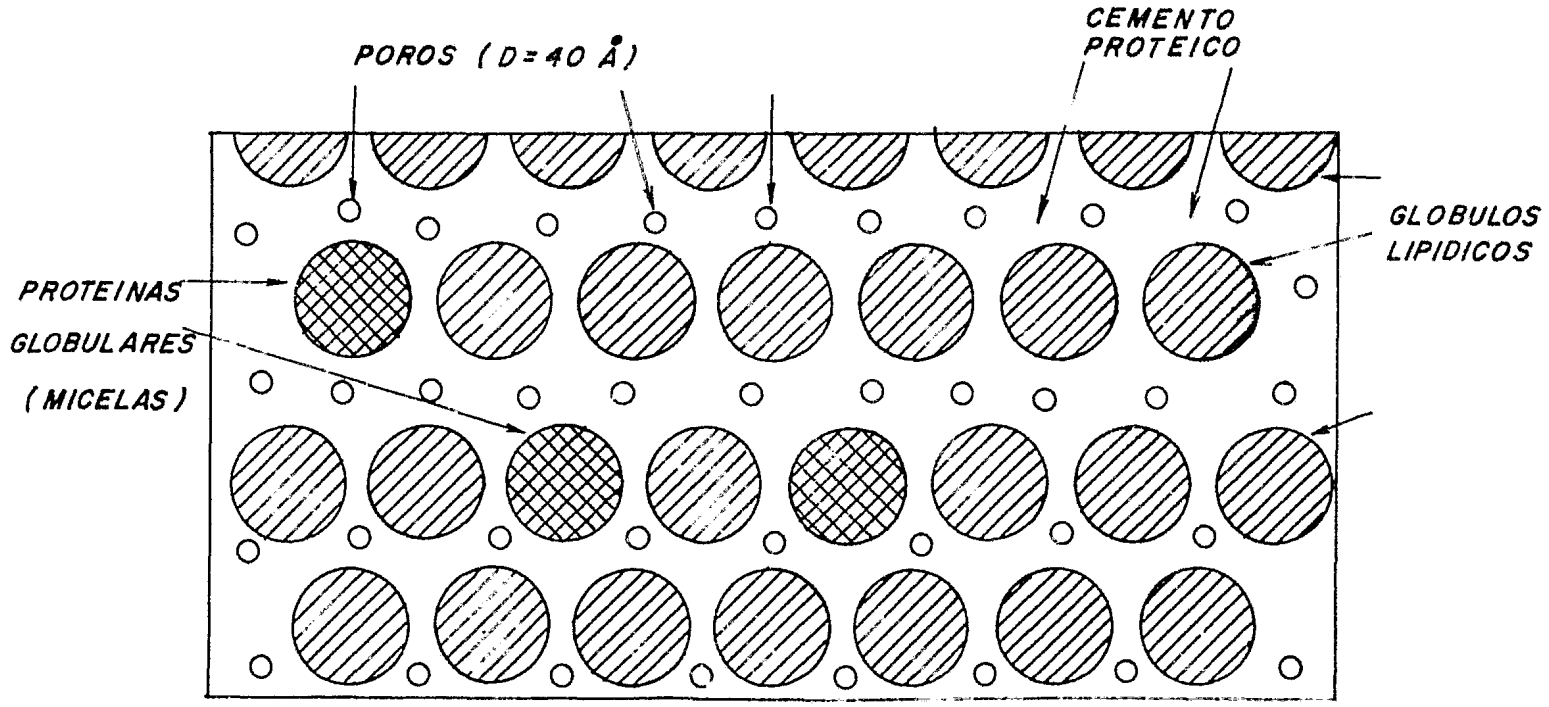
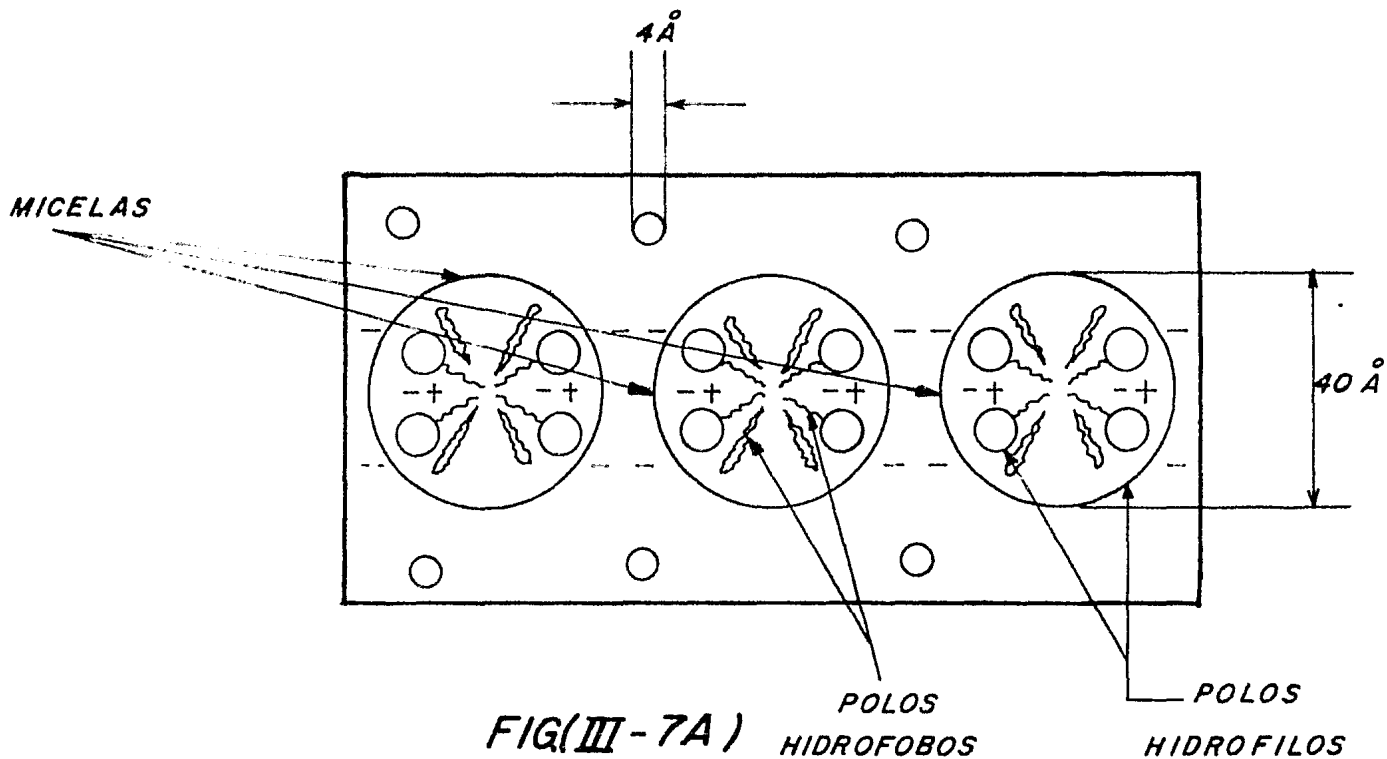


FIG. III. 7

MODELO MORFOLOGICO DE LA MEMBRANA CITOPLASMICA SEGUN

LUCY SJÖSTRAND



**FIG(III-7A)**

ASPECTO INTERNO DE LAS MICELAS MOSTRANDO  
 SUS DIMENSIONES, LOS POLOS HIDROFOBOS Y  
 LOS HIDROFILOS (1)

B).- Modelo de Lucy & Sjostrand

Estos investigadores conservan la idea de una membrana lipoproteica y consideran diversas disposiciones nucleares posibles para explicar el aspecto granular observado en el microscopio electrónico, lo cual no es plenamente explicado con el modelo de Danielli & Dawson, aunque parte también de considerar dos submembranas separadas por una zona intermedia. La membrana no es una estructura fija sino una organización dinámica cuya arquitectura se modifica en función de los imperativos (tensiones) del medio y la vida de la célula en general (1).

La Membrana biológica, se encuentra compuesta de subunidades globulares lipídicas, encerradas en círculos llamados micelas (figs. -- (III-7) y (III-7a) inmersas en un cemento proteico. En el interior de las micelas, las moléculas lipídicas tienen sus extremos o polos hidrófobos orientados hacia el centro y los polos o extremos hidrófilos hacia el exterior unidos al hidrófobo radialmente, por esa razón forman una estructura circular.

Durante las investigaciones realizadas por Sjostrand (1), se postularon dos posibles variaciones al mismo modelo planteado originalmente:

- 1).- Existencia de una región polar y otra no polar en una misma molécula de la membrana.
- 2).- Las micelas pueden ser lipoproteicas y no sólo lipídicas, es decir formadas tanto de aceites y grasas como de elementos proteicos.

Las micelas siempre son consideradas en éste modelo como esférulas - de 40 Å de diámetro, en tanto que el cemento proteico estaría atravesado por poros de 4 Å de diámetro, las micelas lipídicas podrían ser substituídas por proteínas globulares cuyo papel sería enzimático, - apreciándose 2 características más:

- a).- En las micelas lipoproteicas, las proteínas son más importantes.
- b).- Las regiones hidrófobas de éstas lipoproteínas y el agua desempeñan un papel capital en las propiedades de la membrana refiriéndose obviamente al intercambio iónico de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mn}^{++}$  etc.

Existen modelos avanzados de la membrana citoplásmica como el de Singer (1) y otros muy simplificados como el de Robertson (1), pero no serán tratados por no aplicarse en el enfoque propuesto.

III-4).- Influencia de la Permeabilidad y la Cápsula de Secreción - en la Difusión.

A).- La Permeabilidad de la Membrana Celular.

La permeabilidad es una propiedad de la membrana gracias a la - cual es posible el intercambio de productos metabólicos o materias - básicas, necesarias para la subsistencia de la célula manteniendo - las condiciones fisiológicas normales y en especial, la presión osmótica en el interior de la célula (23).

La impermeabilidad, podría definirse según lo anterior como la capacidad de rechazo por parte de la membrana celular de ciertas sustancias o elementos, aunque tal rechazo es totalmente relativo y depen-

derá de la clase de membrana en cuestión.

Fase Pasiva de la Membrana.

Se denomina fase pasiva, al transporte de substancias por medio de la difusión sin considerar la influencia de otros procesos como el transporte activo, ósmosis, etc.

La diferencia de concentraciones expresada según la 1ª Ley de Fick es como se advirtió un caso ideal, en donde la influencia de la membrana es muy pequeña por estas cinco razones:

- 1).- La Membrana es eléctricamente neutra
- 2).- La difusión molecular es invariante en el tiempo.
- 3).- El grosor  $\Delta x$  es cte.
- 4).- Las reacciones químicas tienen un coeficiente de equilibrio unitario y siempre son simples.\*
- 5).- Temperatura y Presión ctes.

Pero si ahora, el punto (2) y el (4) no se cumplen, y se supone que el coeficiente de difusión afecta la capacidad selectiva de la membrana, el sistema de difusión puede plantearse nuevamente según la fig. (III-8), sugerida por el investigador J. Dainty ( ) para el estudio de las condiciones iniciales de la Difusión y la Permeabilidad.

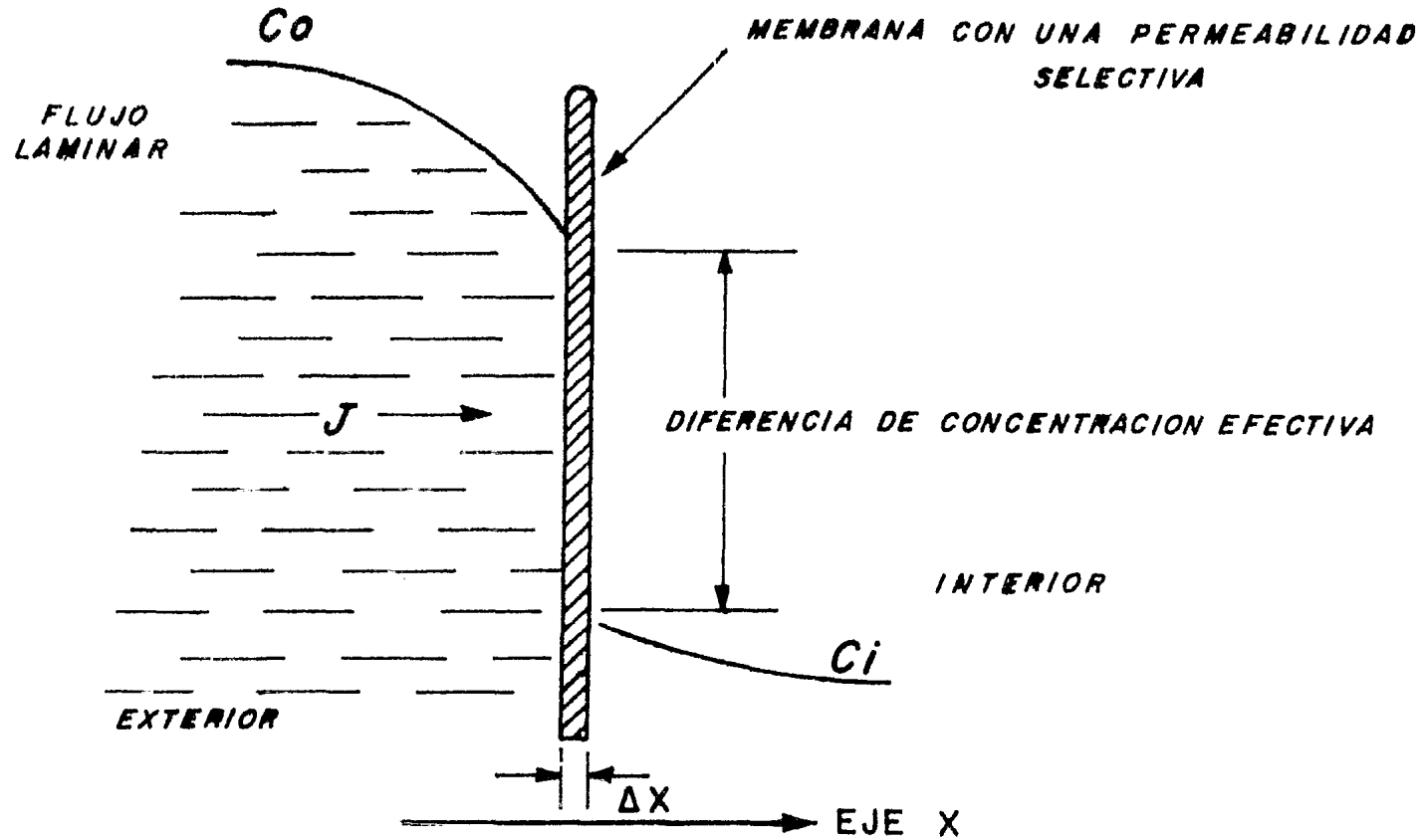
De acuerdo a la figura (III-1a) y recordando los fundamentos de la 1ª Ley de Fick:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad \text{(III-1a)}$$

\* simples por no dar origen a nuevas reacciones, ni tener reveses.



FIG. III.8



EFFECTO DEL FLUJO LAMINAR DE UN SOLUTO SOBRE LA PERMEABILIDAD DE LA MEMBRANA (13)

derá de la clase de membrana en cuestión.

Fase Pasiva de la Membrana.

Se denomina fase pasiva, al transporte de sustancias por medio de la difusión sin considerar la influencia de otros procesos como el transporte activo, ósmosis, etc.

La diferencia de concentraciones expresada según la 1ª Ley de Fick es como se advirtió un caso ideal, en donde la influencia de la membrana es muy pequeña por estas cinco razones:

- 1).- La Membrana es eléctricamente neutra
- 2).- La difusión molecular es invariante en el tiempo.
- 3).- El grosor  $\Delta x$  es cte.
- 4).- Las reacciones químicas tienen un coeficiente de equilibrio unitario y siempre son simples.\*
- 5).- Temperatura y Presión ctes.

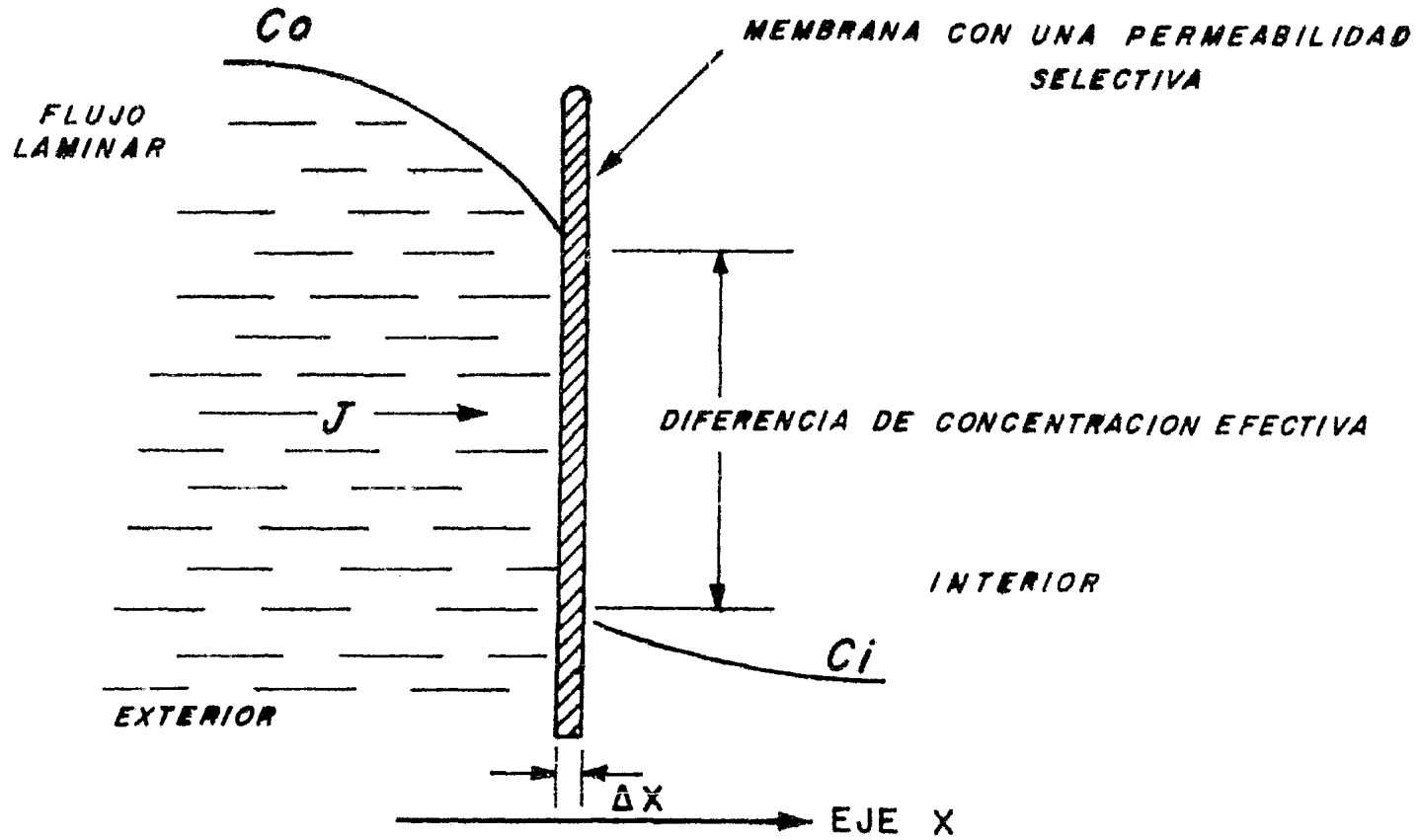
Pero si ahora, el punto (2) y el (4) no se cumplen, y se supone que el coeficiente de difusión afecta la capacidad selectiva de la membrana, el sistema de difusión puede plantearse nuevamente según la fig. (III-8), sugerida por el investigador J. Dainty ( ) para el estudio de las condiciones iniciales de la Difusión y la Permeabilidad.

De acuerdo a la figura (III-1a) y recordando los fundamentos de la 1ª Ley de Fick:

$$J = -D \frac{dc}{dx} \quad (III-1a)$$

\* Simples por no dar origen a nuevas reacciones, ni tener iones.

FIG. III.8



- 158 -

EFFECTO DEL FLUJO LAMINAR DE UN SOLUTO SOBRE LA PERMEABILIDAD DE LA MEMBRANA (13)

Puede decirse que:

$$\frac{c}{x} = \frac{dc}{dx} = \frac{\Delta c}{\Delta x} = \frac{C_i - C_o}{\Delta X} \quad (\text{III-1b})$$

es decir:

$$j = - D \left( \frac{C_i - C_o}{\Delta X} \right) \quad (\text{III-1c})$$

en donde:

$C_o$  = Concentración externa de una sustancia o elemento Mm

$C_i$  = Concentración interna del citoplasma Mm

$\Delta X$  = Grosor diferencial cm

$D$  = Coef. de Difusión  $\text{cm}^2/\text{s}$

El funcionamiento de la membrana depende para éste caso de dos factores:

- a).- El grosor  $\Delta X$
- b).- Su naturaleza de lípidos "sencillos".

El soluto según J. Dainty es perfectamente neutro, su flujo es laminar y considera que el grosor de las subcapas de la membrana son:

- a).- Capa externa = 300  $\mu\text{m}$
- b).- Capa interna = 200  $\mu\text{m}$

Es un hecho también que la difusión es más rápida en las soluciones con gran cantidad de agua (o acuosas) que las escasamente acuosas (o muy densas), pero si en el sistema de difusión de la fig. (III-1) existieran los poros distintos similares pero no iguales entonces, las expresiones III-1b y III-1c no se aplicarían a la realidad aún supo-

niendo que la membrana sea neutra, el flujo laminar y la solución no iónica.

Sin embargo, según la cinética de las reacciones químicas simples y la teoría del equilibrio químico en la Sección (III-2c), se deberán considerar la velocidad de reacción directa e inversa, y por lo tanto, la constante de equilibrio  $K$ , será el factor de corrección en las ecs (III-1a) y (III-1c), quedando de esta forma:

$$J = - DK \frac{dc}{dx} = - DK \frac{(C^o - C^i)}{\Delta X} \quad \text{(III-1d)}$$

Coefficiente de Permeabilidad.

Para poder aplicar la 1a. Ley de Fick a la difusión de las moléculas del soluto se necesita expresar de una forma más simplificada la ec. (III-1d) considerando que 'J' es positivo cuando el flujo neto\* se encuentra dentro de la célula y que además:

$$J = \frac{1}{A} \frac{dM}{dt} \quad \left( \frac{Mm \text{ o PPM}}{\text{seg}} \right) \quad \text{(III-1e)}$$

siendo:

$\frac{1}{A} \frac{dM}{dt}$  = Cantidad de Materia por V. de tiempo, en un área A

La ecuación (3.1d) quedaría como:

$$J = DK \frac{(C^o - C^i)}{\Delta X} \quad \text{(III-1f)}$$

la ec. (III-1f) puede simplificarse más, ya que el factor  $DK / \Delta X$  es una cantidad denominada coeficiente de Permeabilidad (P) esto es:

\* El flujo neto, es el valor absoluto del flujo.

$$P = \frac{DK}{\Delta X} \frac{cm}{s} \quad (III-1g)$$

Consecuencias del Coeficiente de Permeabilidad 'P'.

En términos biológicos, el coeficiente de permeabilidad 'P' reemplaza a cantidades distintas: D (coef de Dif), K (Coef. de equilibrio) y  $\Delta X$  (grosor de membrana). Su valor se calcula experimentalmente y depende principalmente de los siguientes 3 factores:

- 1).- La clase de Célula
- 2).- La sustancia o elemento a difundirse
- 3).- Las cualidades mecánicas de la membrana

La ventaja principal del Coef. de Permeabilidad 'P' radica en el -- hecho de simplificar el cálculo de las características generales de la difusión en la cápsula de secreción y en la membrana citoplásmica de forma general.

La relación entre la 1a. Ley de Fick y el Coeficiente de Permeabilidad se encuentra por medio de unas sencillas substituciones algebraicas.

Cuando la ecuación (III-1e) se substituye en la (III-1f) se obtiene:

$$\frac{dM}{dt} = PK \frac{(C_1 - C_2)}{\Delta X} \quad (III-1h)$$

Substituyendo la eq. (III-1g) en la (III-1h) se encontrará la relación entre el coeficiente de permeabilidad y la 1a. Ley de Fick, es te sea:

$$\frac{dM}{dt} = P (C_1 - C_2) \quad (III-1i)$$

La ecuación (III-2) es utilizada para la investigación experimental de la difusión de solutos dentro y fuera de las células vegetales.

Difusión y Concentración Celular.

Para describir el cambio de concentración de un soluto dentro de -- una célula con respecto al tiempo debido a la difusión a través de la membrana se debe expresar la ecuación (III-2) de modo más sencillo, para obtener una expresión no diferencial mediante una integración adecuada (13).

En la ec (III-2) se observan éstos dos hechos importantes:

$$\frac{1}{A} \frac{dM}{dt} = (+) \text{ Si el material entra en la célula y } C_i < C_o$$

$$\frac{1}{A} \frac{dM}{dt} = (-) \text{ Cuando la célula pierde su concentración interna y entonces } C_o < C_i. \text{ (Caso menos frecuente).}$$

Si además ocurre que el volumen celular no cambia en un tiempo de interés y la cápsula de secreción no sufre modificaciones apreciables, entonces:

$$V = K \text{ (constante) a la entrada y la salida.}$$

El volumen (V), representa la cantidad total de substancias que hay dentro de la célula.

Con éstas observaciones, puede decirse que el producto de concentración interna  $C_i$  de una especie es igual a la cantidad de soluto  $M$  en un volumen celular V, es decir:

$$C_i = \frac{M}{V} \quad \text{(III-3)}$$

Despejando de la ec. (III-2a) la variable 'M' se obtiene:

$$M = C_i V \quad (\text{III-2b})$$

Pero, tanto la concentración interna  $C_i$  como la cantidad de soluto (M) varían con el tiempo con lo que se obtiene que:

$$\frac{dM}{dt} = V \left( \frac{dC_i}{dt} \right) \quad (\text{III-2c})$$

En la ecuación (III-2) se sabe que:

$$\frac{dM}{dt} = PA (C_o - C_i)$$

Igualando la ec (III-2) con la ec (III-2c) se obtiene:

$$V \left( \frac{dC_i}{dt} \right) = PA (C_o - C_i) \quad (\text{III-2d})$$

o bien:

$$V dC_i = PA (C_o - C_i) dt \quad (\text{III-2e})$$

Arreglando términos en la ec. (III-2e) se obtiene:

$$\frac{dC_i}{(C_o - C_i)} = \frac{PA}{V} dt \quad (\text{III-2f})$$

La ecuación (III-ef) será integrada con respecto a límites de concentración y tiempo de la forma siguiente:

$$\int_{C_i(t)}^{C_i(0)} \frac{dC_i}{(C_o - C_i)} = \int_0^t \frac{PA}{V} dt \quad (\text{III-2g})$$

Nótese que los límites de concentración son internos, es decir, el primero representa la concentración inicial en un tiempo  $t=0$ , y el 2º, representa la misma concentración al final de un tiempo  $t$ .



Resolviendo la integral (III-2g) se llega finalmente a:

$$P = \frac{V}{At} \quad \text{Ln} \quad \left[ \frac{C_o - C_i(t)}{C_o - C_i(o)} \right] \quad (\text{III-2h})$$

Esta expresión se denomina ecuación del coeficiente de Permeabilidad, siendo:

P = Coef. de Permeabilidad      cm/s

$C_i(t)$  = Concentración interna para un tiempo final (t)      Mm  
o PPM/seg

$C_i(o)$  = Concentración interna para un tiempo inicial (t)      Mm  
o PPM/seg

$C_o$  = Concentración externa      Mm o PPM/s

V = Volumen celular      (cm<sup>3</sup>)

El caso más simplificado de la ec. (III-2h) (de Permeabilidad) lo constituye la concentración externa nula  $C_o = 0$ , determinada para estudios experimentales y en condiciones especiales, a fin de poder conocer los cambios internos de las concentraciones en el tiempo (13).

Si  $C_o = 0$  entonces; la ec. (III-2h) se reduce a:

$$P = \frac{V}{At} \quad \text{Ln} \quad \frac{C_i(t)}{C_i(o)} \quad (\text{III-2i})$$

El coef. de Permeabilidad 'P' podrá siempre conocerse experimental o aproximadamente. Aun cuando 'V', 'A' y 't' sean desconocidos.

Entre los aspectos prácticos de las ecuaciones (III-2h) y (III-2i) se encuentra la descripción de la difusión de un producto sintético en el exterior del cloroplasto y la posibilidad de que se puede pasar alguna sustancia a través de la membrana.

La tabla (III-5) muestra un grupo de coeficientes de permeabilidad aplicables a casos generales:

Coeficiente de Permeabilidad	Nombre de la Sust. o elemento	Naturaleza de la Sust. o elemento
$10^{-4}$	Tetrabutyl-alcohol	neutra
$5 \times 10^{-3}$	$CO_2$	Gas no iónico
$10^{-7}$	$Na^+$ o $K^+$	Pequeños electrolitos
$10^{-6}$	$CL^-$	Pequeño electrolito

Tabla (III-5). Coeficientes de Permeabilidad más comunes (13)

#### B).- Difusión en la Cápsula de Secreción.

Uno de los factores que determinan la forma y el tamaño de una célula vegetal es la cápsula de secreción o pared celular de la cual se habló en el capítulo II. Según recientes investigaciones, la célula tiene un diseño estructural orgánico que determina su compleja geometría y se relaciona en gran parte con la presión-hidrostática y la presión de turgencia\* del vegetal, las cuales son la causa de una distensión en las paredes celulares, es decir, causan la aparente deformación externa de la célula (13).

La difusión en la cápsula de secreción es un caso muy sencillo, ya que a diferencia de la membrana citoplásmica tiene las siguientes ventajas:

- a).- Menos número de tensiones (ó excitaciones ambientales)
- b).- Efectos eléctricos poco trascendentes.
- c).- Menor tiempo de difusión, lo que implica menor selectividad.

Comparativamente, los coeficientes de Difusión  $D$  de ciertas moléculas pequeñas con bajo peso molecular, son de solo 10 a 100 veces más pequeños en la pared celular que en las soluciones acuosas. Si son analizados otros casos, el coeficiente  $D$  tiene un valor de  $10^{-6}$   $\text{cm}^2/\text{s}$ , tal valor relativamente elevado se debe a que los intersticios de la cápsula de secreción, son más grandes que en la membrana plasmática, éstos intersticios, pueden ser parcialmente llenos si se agrega al agua pequeñas partículas sólidas y de ésta forma, cuando se introduzca el agua dentro de la cápsula de secreción, habrá una leve variación en la concentración externa que no alterará significativamente la difusión interna citoplásmica ( ).

Ejemplo:

Supóngase una cápsula de secreción, que tenga los intersticios con agua pura (no electrolítica), en donde experimentalmente el coeficiente de equilibrio  $K$  es unitario

$$K = 1$$

Como la cápsula de secreción cambia con el tiempo, es más adecuado considerar un grosor en una célula joven con  $\Delta X = 2 \text{ Mm}$  o bien

$$\Delta X = 20 \text{ \AA}$$

El coeficiente D vendría siendo:

$$D = 10^{-6} \text{ (cm/s)}$$

En estas condiciones y aplicando la ecuación (III-1g) se obtiene:

$$P = \frac{DK}{AX} = \frac{10^{-6} (1)}{2 \times 10^{-4}} = 5 \times 10^{-3} \text{ (cm/s)}$$

El rango de permeabilidad de pequeños solutos a través de la membrana plasmática tiene un rango comprendido entre  $10^{-8}$  y  $10^{-4}$  -- cm/s, por lo que la pared celular tiene un mayor coeficiente de permeabilidad que el de la membrana plasmática.

Para tener una idea más clara sobre la difusión en la membrana plasmática y en la cápsula de secreción se han resumido en la tabla --- (III-6) los principales parámetros, considerando valores promedio-identificados por diversos investigadores (13).

Valores promedio de los principales parámetros en la cápsula de secreción.

Valores promedio de los principales parámetros en la membrana plasmática.

AX	DK	P	AX	DK	P
A	cm <sup>2</sup> /s	cm/s	A	cm <sup>2</sup> /s	cm/s
20	10 <sup>-6</sup>	5x10 <sup>-3</sup>	75-100	10 <sup>-14</sup> - 10 <sup>-10</sup>	11 x 10 <sup>-7</sup>

Tabla (III-6) Comparación de Parámetros de Difusión (13).

Según ésta tabulación, las moléculas tienen menos capacidad de difusión en la membrana citoplásmica que en la cápsula de secreción, lo cual se demuestra con una misma substancia a la misma distancia pero

difundiéndose en la cápsula de secreción y en la membrana citoplásmica.

Las paredes celulares son discontinuas y tienen en su superficie, - muchas fisuras y hoyuelos. Asimismo, hay regiones en las depresiones donde existe un grosor variable que decrece o aumenta. En un conjunto de células, es posible, que los microagujeros de la pared celular estén interconectados, complementándose entre sí, independientemente de la presencia o ausencia parcial de la cápsula de secreción. Cuando la cápsula de secreción es muy delgada o inexistente en alguna región, la difusión de partículas entre células se facilita disminuyendo la resistencia mecánica de la célula.

Un último mecanismo de difusión existente, y descubierto no hace -- mucho tiempo gracias al microscopio electrónico denominado plasmodesma, consiste en una barrera constituida por microfibrillas flanqueadas por la membrana citoplásmica, las microfibrillas pasan de una célula a otra por medio de microagujeros, interconectándose (24).

La experimentación y estudio de las microfibrillas se ha llevado a -- cabo en vegetales superiores como las hojas de tabaco, pero no se -- ha confirmado la existencia del plasmodesma en el vegetal inferior, sin embargo, su presencia provee al vegetal superior de un eficiente sistema auxiliar para movilizar el soluto a través de todas sus -- células (24).

(III-5).- Descripción Simplificada de las Biotecnologías termoquímicas.

Objeto.- Mostrar a nivel general la importancia y relación que guar

dan los aspectos eléctricos de la membrana con las propiedades bioenergéticas de la célula vegetal.

Introducción.- La bioenergética vegetal que constituye toda una biotecnología termoquímica es, dentro de la biofísica una rama altamente especializada difícil de analizar y tanto o más extensa que el aspecto eléctrico de la membrana, por lo que solo se expondrán sus características más sobresalientes sin entrar en detalles. Finalmente se hablará de los aspectos térmicos en la difusión.

(A).- Bioenergética Vegetal.

La conversión de energía luminosa y calorífica a las 2 formas energético-orgánicas de ATP y NADPH en los cloroplastos, conduce a un sistema de almacenamiento y distribución de energía química asociado al transporte de electrones en procesos de fotosíntesis y respiración (13).

El almacenamiento de energía es generalmente el primer tema que se analiza en la biofísica vegetal en términos de balances térmicos y de potenciales químicos a fin de obtener la correcta determinación de energía química o eléctrica que una reacción dada pueda aprovisionar o liberar (24).

Transporte de ATP y NADPH

La capacidad de transporte del ATP se evalúa en términos de energía de formación e hidrólisis, y el NADPH<sub>2</sub> puede ser visualizado como la posesión de energía eléctrica de la célula procedente de potenciales químicos. Cuando el ATP y el NADPH<sub>2</sub> son considerados como moléculas individuales, pueden obtenerse las relaciones que guardan entre sí los orgánulos internos de la célula como los cloroplastos-

y las mitocondrias (12).

Otro tema de interés en la bioenergética vegetal lo constituye el intercambio energético entre la Biosfera y el vegetal, así como los procesos de almacenamiento y transferencia de energía de cada uno de los sistemas componentes de la célula con el medio ambiente.

(B).- Dos Aspectos Térmicos importantes en la Difusión.

Para poder tener un conocimiento general de la difusión, no ha bastado con conocer una de sus facetas, sino que es preciso identificar, analizar y cuantificar todas las posibles excitaciones que actúan sobre la membrana. Estas excitaciones se agrupan en dos temas denominados: Termodinámica clásica y Termodinámica de procesos irreversibles.

1).- Termodinámica Clásica.

La Termodinámica Clásica dentro de la biofísica vegetal se aplica al contexto del flujo del agua, para obtener mayor información sobre su energía libre y su potencial químico.

En lo que respecta a la membrana, la termodinámica, considera la influencia de las presiones, hidrostática, osmótica y de turgencia, así como las posibles variaciones volumétricas y de temperatura.

Actualmente es el agua, determinado por la termodinámica clásica -- que queda el término secundario en la investigación, pero muy útil para el punto de vista de los fundamentos y relaciones termodinámicas (13).

2).- Termodinámica de procesos Irreversibles.

Los procesos de difusión se encuentran en los sistemas biológi-

cos de difusión han hecho que surjan nuevas teorías sobre las interacciones entre los componentes de una solución y los aspectos químicos, eléctricos y térmicos, más susceptibles de encontrar en la mayoría de las membranas biológicas. Una de las teorías más aceptadas es la de Onsager (24).

Teoría de Onsager.

El objetivo principal de éste notable investigador ha sido obtener la descripción más completa posible de la difusión a través de membranas biológicas (24).

Onsager fundamenta su teoría en base a tres consideraciones:

- 1.- El solvente es siempre agua.
- 2.- La membrana biológica es un medio poroso.
- 3.- El sistema es isotérmico ( $T = cte$ ).

A partir de éstas consideraciones establece también que en un sistema de difusión existen tres flujos principales:

- 1).- Flujo del agua ( $J_w$ )
- 2).- Flujo del soluto ( $J_s$ )
- 3).- Flujo eléctrico ( $J_E$ )

Cada uno de los flujos mencionados arriba, se compone a su vez de tres variables de uno o dos tipos de energías que intervienen en la difusión, distribuidos de esta forma:

El flujo de agua se compone de: flujo hidráulico, flujo eslabonado y flujo electroosmótico.

El flujo del soluto se compone de: ultrafiltración, difusión pura, y electrotósis.



El flujo eléctrico se compone de: flujo de corriente eléctrica no - difusiva, flujo de corriente eléctrica difusiva y flujo de corriente del potencial eléctrico.

A partir de los flujos y las energías presentes en ella, Onsager - obtiene su sistema de ecuaciones, cuyos detalles son discutidos -- por Leyton (26), Bernal (27) y otros autores.

Cabe agregar que la física de los medios porosos es también reciente y de ella se desprenden muchas características de la teoría de Onsager. Se recomiendan los trabajos de Prygogyn (28) y Scheidegger (26).

## CAPITULO IV

### Propiedades Electromecánicas de la Membrana del Vegetal Inferior

IV-1).- Influencia de las características mecánicas en el comportamiento eléctrico de la membrana.

a).- Determinación del estado de esfuerzo en una membrana cilíndrica.

b).- Discusión sobre la relación entre los factores mecánicos y eléctricos en la membrana.

IV-2).- Conducción de la Electricidad a través de la membrana --- biológica.

a).- Flujo eléctrico en el agua.

b).- Fundamentos teóricos de la electrofisiología de la - membrana.

c).- La membrana bajo condiciones de excitación eléctrica.

d).- Capacitancia en una célula cilíndrica.

e).- Influencia de la temperatura en la membrana de la -- Chara.

IV-1).- Influencia de las características mecánicas en el comportamiento eléctrico de la membrana.

Objeto.- En éste capítulo se aplicarán aspectos concretos de la Ingeniería al terreno de la biología del vegetal inferior, considerando la influencia de las características mecánicas de la membrana sobre las eléctricas.

Introducción.- Para obtener un enfoque mecánico, eléctrico o ambos - efectos, es necesario analizar aspectos mecánico-estructurales, para determinar como se modifican de manera concreta y simplificada, y el papel que juegan en las características eléctricas de la membrana. Es preciso advertir que no se ahondará en aspectos matemáticos muy detallados, porque éstos se desvían del enfoque original y además siempre se someterán todos los aspectos mecánicos y eléctricos a las consideraciones recomendadas por los autores consultados.

Se ha incluido también un breve estudio de las cualidades eléctricas del agua, por ser el agente que contiene el soluto iónico interactuante con la membrana, pero siempre haciendo énfasis en las condiciones experimentales de concentraciones y temperaturas utilizadas experimentalmente.

A).- Determinación del Estado de esfuerzo en una membrana cilíndrica. Para describir los esfuerzos y tensiones más significativos en una membrana biológica animal o vegetal, se deberá de tener en cuenta, que según la especie, sus propiedades mecánicas sólo difieren en magnitud y características particulares de respuesta al ambiente. El análisis teórico, parte generalmente de un modelo idealizado de membrana apegado al sistema de interés.

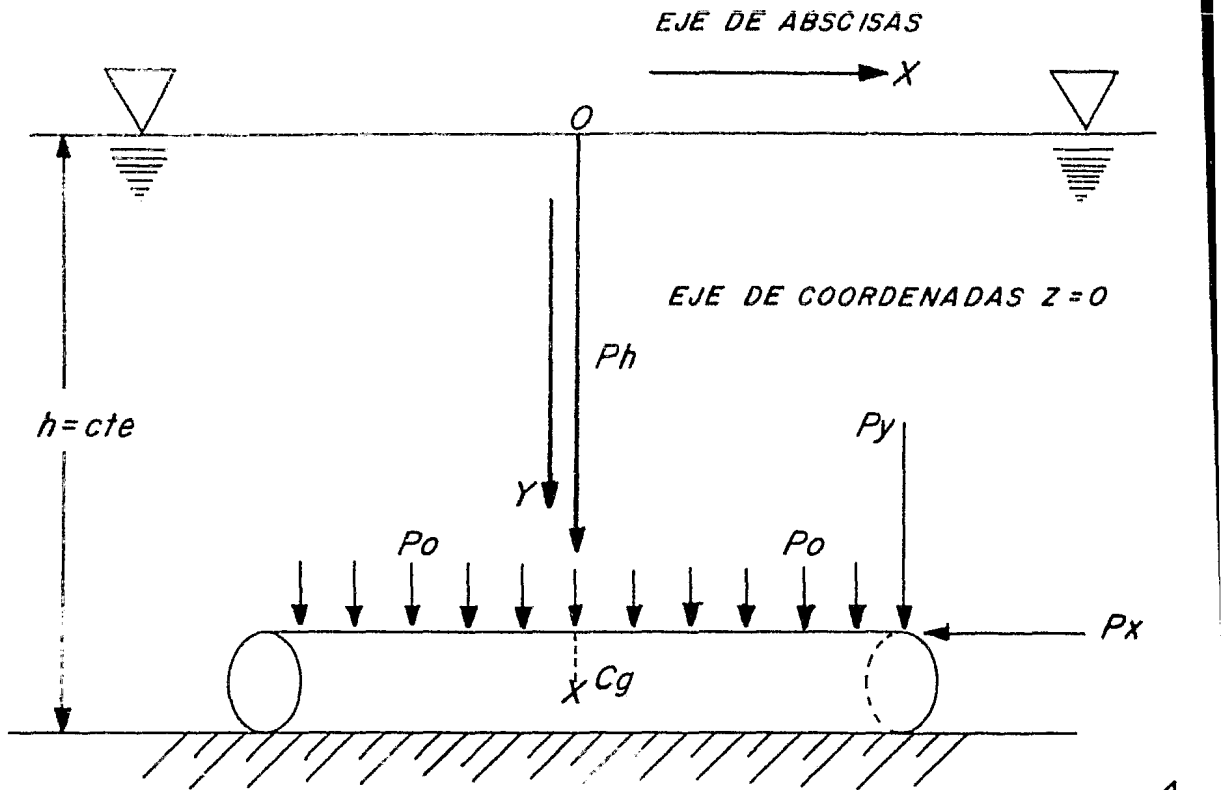
Sea una membrana cilíndrica sometida a las presiones, esfuerzos y tensiones mostradas en las figs. (IV-1) y (IV-1a), donde las consideraciones y análisis matemáticos son válidos para las células.

de Nitella o Chara; los cálculos, se realizan con datos concretos - de una u otra célula, advirtiéndose previamente el tipo de espécimen, limitaciones y origen de los datos.

En el análisis de las figs. (IV-1) y (IV-1a) se hacen 4 consideraciones (28):

- 1).- El fluido que cubre a la membrana es incompresible.
- 2).- La presión hidrostática, es la componente vertical que actúa sobre la línea de acción del centro de gravedad del cilindro (Cg).
- 3).- La membrana está situada sobre un plano horizontal -- del agua en reposo.
- 4).- El agua es neutra, es decir  $ZFE=0$  (Veáse el capítulo - III).

FIG. IV-1



POSICION Y DISTRIBUCION DE LAS PRESIONES QUE ACTUAN SOBRE LA CAPSULA DE SECRECION DE UNA CELULA CILINDRICA.

NOMENCLATURA

$P_h$  = PRESION HIDROSTATICA SOBRE LA MEMBRANA CITOPLASMICA

$P_o$  = PRESION OSMOTICA

$P_x$  = PRESION DEL FLUIDO EN DIRECCION DEL EJE  $x'$

$P_y$  = PRESION DEL FLUIDO EN DIRECCION DEL EJE  $y'$

$P_r$  = PRESION RESULTANTE

$h$  = ALTURA PIEZOMETRICA  $cte$  (m)

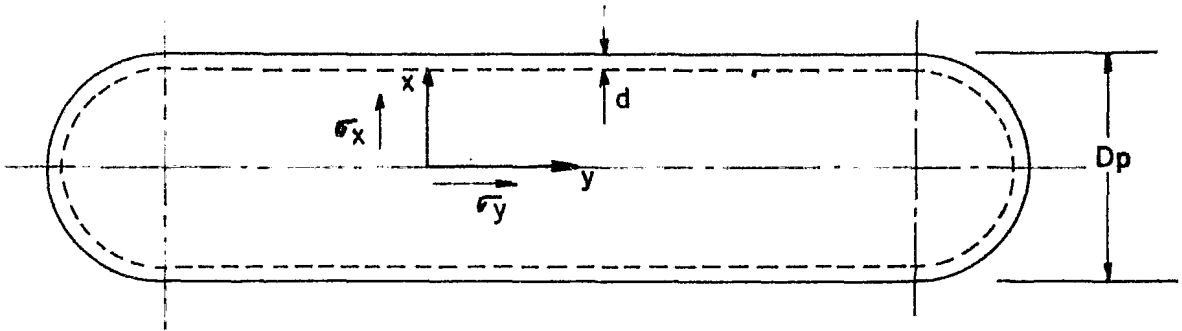
$Z$  = ALTURA GEODESICA (DE COORDENADAS) (m)

$\nabla$  = LIMITE DE SUPERFICIE

( UNIDADES DE PRESION EN  $[Kg/m^2]$  o  $[Kg/cm^2]$  )

( UNIDADES DE ALTURAS EN (m) )

FIG.IV.1 a



LA CELULA DE CLARA O NITELLA SE REPRESENTA COMO UN RECIPIENTE CILINDRICO EN EL CUAL EL ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL ( $\bar{\sigma}_x$ ) Y EL LONGITUDINAL ( $\bar{\sigma}_y$ ) ESTAN UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDOS SOBRE EL GROSOR DE LA MEMBRANA. PARA EL CASO DE ESTE TIPO DE MEMBRANAS PUEDE REPRESENTARSE EL GROSOR REAL "d" POR UNA MEMBRANA DE ESPESOR (CERO)

(29)

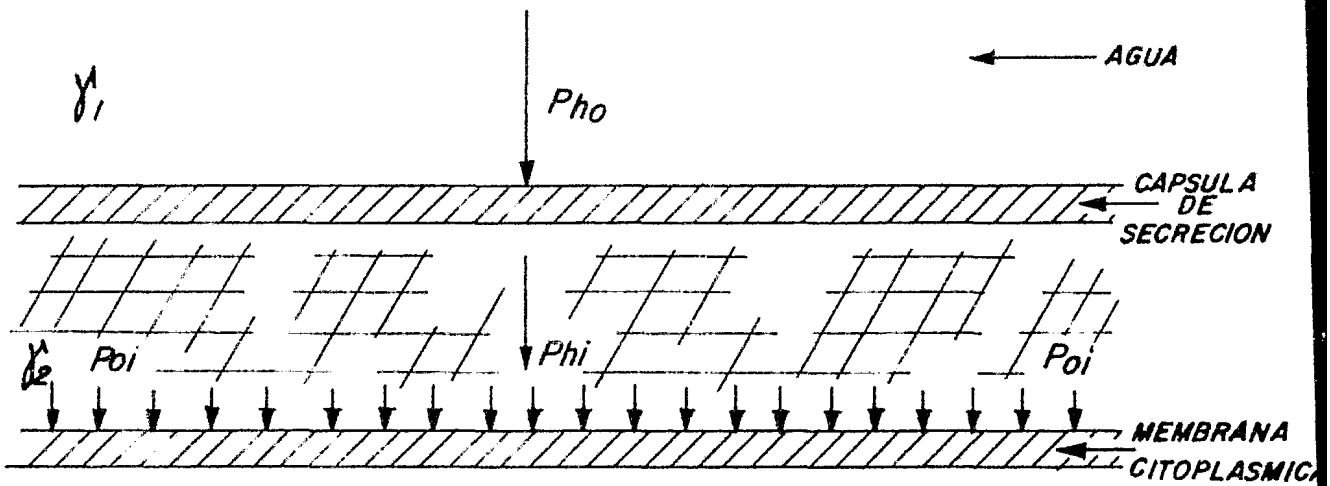
Unidades:

$$\bar{\sigma}_x = \bar{\sigma}_y = [\text{Kg/cm}^2] \text{ O } [\text{Kg/m}^2]$$

$$Dp = [m] \text{ O } [cm]$$

$$d = [m] \text{ O } [cm]$$

FIG. IV-1b



SITUACION DE LA CAPSULA DE SECRECION CON RESPECTO A LA MEMBRANA CITOPLOSMICA

(A).- Determinación e influencia de la presión hidrostática y la fuerza resultante en la cápsula de secreción.

La fuerza resultante que actúa sobre la cápsula de secreción, sólo puede ser determinada calculando inicialmente la presión hidrostática, la cual está determinada por:

$$\frac{Ph}{\delta} + Z = h \quad (IV-1)$$

siendo:

P = Presión de profundidad (Kg/m<sup>2</sup>) ó (Kg/cm<sup>2</sup>)

$\delta$  = Peso específico (Kg/m<sup>3</sup>)

como: Z = 0

La ec. (IV-1) puede expresarse como:

$$Ph = \delta h \quad (IV-1a)$$

Según la ec. (IV-1a), la presión hidrostática depende directamente del peso específico y la altura piezométrica h.

Como una célula vegetal por lo general tiene una cápsula de secreción, se analizará la influencia de la presión hidrostática (Ph) sobre ella.

#### Influencia de la Ph sobre la Cápsula de Secreción.

La llamada cápsula de secreción, por principio, viene siendo una pseudo membrana sobre la membrana, dispuesta como lo muestra la fig. (IV-1b).

Nota.- Las dimensiones y aspecto de la fig. (IV-1b), son muy exa--



geradas, con el fin de dar una mejor idea sobre la disposición de la cápsula de secreción sobre la membrana citoplásmica.

La fig. (IV-1b), proviene de suponer que existen dos presiones hidrostáticas en lugar de una, que actúan sobre la célula, ya que -- dentro de la cápsula de secreción, existe un medio acuoso o semi-- acuoso similar o distinto entre la cápsula de secreción y la membrana citoplásmica. Por lo que:

$$\text{Phi} = N \text{pho} \quad (\text{IV-1b})$$

como:

$$\begin{aligned} \text{Phi} &= \gamma_1 h_1 \\ \text{Pho} &= \gamma_2 h_1 \end{aligned}$$

entonces:

Si  $h = \text{constante}$

$$\gamma_1 h_1 = N \gamma_2 h_1 \quad (\text{IV-1c})$$

$$N = \frac{\gamma_1 h_1}{\gamma_2 h_1} = \frac{1}{2} \quad (\text{IV-1d})$$

Sustituyendo la ec. (IV-1d) en (IV-1b), se obtiene que:

$$\text{Phi}_i = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \times \text{Pho} \quad (\text{IV-1e})$$

La ec (IV-1e) establece que la presión hidrostática interna (Phi) es directamente proporcional a la presión hidrostática externa --- (Pho).

A medida que  $(\gamma_1/\gamma_2)$  se aproximan a 1, la presión (Phi) tiende a

igualarse con la presión ( $P_{ho}$ ), si tal cosa ocurre, entonces, la cápsula de secreción no influye en la difusión que ocurre en la membrana citoplásmica.

En la ecuación del potencial químico (III-6) como se recordará ---- existen dos términos que indican las presiones que, existen en todo estudio de la biofísica vegetal, éstos son:

$$P = R T \ln A_j \quad \text{Presión Osmótica} \quad (\text{IV-1f})$$

$$h = P_j V_j \quad \text{Altura de Presión hidrostática} \quad (\text{IV-1g})$$

Los biólogos y los químicos refieren el volumen  $V_j$  como volumen molar  $\bar{V}$  en ( $\text{cm}^3/\text{mol}$ ), y la presión  $P_j$  o  $\bar{P}$  en ( $\text{Kgmol}/\text{cm}^2$ ), en tanto que dentro de la Ingeniería las unidades para el volumen 'V' son ( $\text{cm}^3$ ) y ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ) para la presión.

Esta aparente discrepancia tiene las siguientes equivalencias (13):

A).- Para la presión hidrostática del agua:

$$\begin{aligned} P &= 1000 \text{ (Kg/m}^2\text{)} = 0.10 \text{ (Kg/cm}^2\text{)} \\ &= 0.00556 \text{ (Kg mol/cm}^2\text{)} = 5.56 \text{ (Mol/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

B).- Para el volumen molar del agua:

$$V_w = 18 \text{ (cm}^3\text{/mol)}.$$

Con las equivalencias de presión hidrostática y volumen molar es posible conocer la altura piezométrica  $h$  sustituyendo en la ec. (IV-1g).

$$\begin{aligned} h &= 5.56 \left[ \frac{\text{Mol}}{\text{cm}^2} \right] \times 18 \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{Mol}} \right] = 99.9 \text{ (cm)} \\ &= 10.08 \text{ (m)} \quad \text{(Columna de agua)}. \end{aligned}$$

La altura piezométrica (h) para una presión hidrostática de 0.10 (Kg/cm<sup>2</sup>) ó (0.191 PAR), es de 10.08 (m) de columna de agua o 76.0 (cm) de Hg.

Si una célula cilíndrica vegetal apta para la experimentación (capítulo II) se encuentra en un estanque de 3 (m) de profundidad, la presión hidrostática que se ejerce sobre su cápsula de secreción sería:

Utilizando la ec (IV-1a)

$$P = \rho h_p = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} (3) (\text{m}) = 3000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} \\ = 0.30 (\text{Kg/cm}^2)$$

Por razones de simplificación de cálculo el valor de 'N' en la ec. (IV-1e), es cercano o igual a 1, siempre y cuando la cápsula de secreción sea ínfima.

$$N \approx 1$$

Si por el contrario, la cápsula de secreción es considerable, y protege la membrana, entonces "amortigua" la presión hidrostática sobre la membrana citoplásmica.

### C).- Presión Osmótica.

La presión osmótica es analizada de manera concreta y simplificada por tener un campo de acción muy extenso.

#### Presión Osmótica (def.)

La presión osmótica es la presión ejercida por las moléculas neutras e iónicas contra la pared de la membrana citoplásmica (semi-permeable), en un medio acuoso o gaseoso.

Matemáticamente está definida como:

$$\bar{P}V_w = - RT \ln A_w \quad (IV-2)$$

La ec (IV-2) representa a la presión osmótica referida a la actividad química\* de un solo elemento o sustancia.

En donde:

$\bar{P}$  = Presión osmótica (Kg/cm<sup>2</sup>)

$\bar{V}$  = Volumen molar (cm<sup>3</sup>/mol)

T = Temperatura °K (absolutos)

R = Constante universal de los gases (Kg-mol/Kg°K)

La ecuación (IV-2) que representa a la presión osmótica proviene -- de la ecuación característica de los gases perfectos utilizada en termoninámica, ésta es:

$$PV = nRT \quad (IV-2a)$$

siendo:

n = número de moles

P = Presión ejercida sobre la membrana por el gas.

Considerando que el análisis de este trabajo está orientado hacia los vegetales inferiores acuáticos, se deberán de tomar en cuenta las siguientes observaciones, aplicables a la ec (IV-2):

1).- La presencia de una cantidad mayor o menor de solutos - modifica la presión osmótica.

2).- Cuando la actividad química del agua (A<sub>w</sub>) varía, aumenta o disminuye la presión osmótica.

3) - El signo negativo en la ec (IV-2) pertenece al término representativo de la presión osmótica ( $\ln A_w$ ), que indica de acuerdo a los bioquímicos la dirección decreciente de la actividad  $A_w$  cuando la concentración aumenta.

4).- El valor de  $RT$  de la ec (IV-2) es obtenido por experimentación en biofísica vegetal y obedece a condiciones especiales, térmicas, químicas, etc.

La tabla (IV-1) muestra los resultados obtenidos para  $RT$  con diferentes temperaturas, y diferentes equivalencias.

Valor de $RT$	Unidades	Temperatura
22.71	LT-BAR/mol	0°C
22.41	LT-atmós/mol	0°C
583	cal/mol	20°C
24.06	LT-Atmosf/mol	20°C
24.37	LT-BAR/mol	20°C
592	cal/mol	25°C
24.47	LT-atmosf/mol	25°C
24.80	LT-bar/mol	25°C

Tabla (IV-1) Valores experimentales de  $RT$  (13).

Se omite la expresión que determina la presión osmótica debida a -- varias sustancias o elementos denominada presión osmótica promedio, por no requerirse en éste trabajo.

En los vegetales, normalmente, la presión osmótica tiene un valor - promedio entre los 3 y 7.3 (BAR) (de 2.95 a 6.80  $\text{Kg/cm}^2$ ), aunque -

llegan a encontrarse presiones de hasta 10 BAR. La presión osmótica aumenta o disminuye de forma inversa con respecto al volumen molar que se encuentre en una región determinada de la célula (13).

Cuando se requiere de condiciones especiales de experimentación, la presión osmótica más conveniente está determinada por los propósitos propios de la clase de experimentación. Por lo general, se procura una presión osmótica baja (solución hipotónica), cuyo rango -- se encuentra entre 0.003 BAR (0.002 Kgf/cm<sup>2</sup>) y 2 BAR (1.98 Kgf/cm<sup>2</sup>).

De los comentarios sobre los valores y variaciones de la presión -- osmótica se deduce que el potencial eléctrico aumenta o disminuye -- en función del número de partículas ionizadas o neutras que acepte o rechace la membrana citoplásmica.

#### Soluciones Hipertónica, Hipotónica y Tónica.

El conocimiento de las concentraciones en un medio acuoso es indispensable para el estudio de las presiones en cualquier célula vegetal, por ser ellas en gran parte las causantes de su comportamiento y respuesta.

Una solución es hipertónica cuando la concentración de soluto en el citoplasma es mayor que en el medio exterior (30).

Es hipotónica si la concentración de soluto en el exterior es mayor a la del citoplasma, y se tendrá una solución tónica cuando -- existe un equilibrio de concentraciones tanto en el exterior como -- en el interior, del citoplasma.

#### Respuesta de la Célula al cambio de concentraciones.

Cuando la solución es hipertónica, la célula sufre un efecto de --

plasmólisis, es decir se deshidrata al perder gradualmente la turgencia original. Si una célula, es colocada en una solución hipotónica, entonces se hidrata nuevamente, recuperando su turgencia original.

Un ejemplo clásico del mecanismo de respuesta al cambio de concentraciones, lo constituyen los glóbulos rojos de la sangre, los cuales se hinchan al encontrarse en una solución hipotónica, debido a las características mecánicas de sus paredes celulares (6).

Las células vegetales, a diferencia de los glóbulos rojos no se hinchan al colocarse en soluciones hipotónicas, sino que solo se deforman ligeramente y en caso de ser colocadas en soluciones hipertónicas, se deshidratan, pudiendo restaurarse por inmersión en una solución hipotónica (6).

Análisis de esfuerzos en la Cápsula de Secreción de la Membrana Citoplásmica.

La variación en la concentración de elementos y sustancias, dentro y fuera de la célula biológica no solo ocasiona cambios en el comportamiento eléctrico de la membrana biológica, sino que además es la causa de la presencia de esfuerzos transversales y longitudinales, distribuidos en la cápsula de secreción.

El estudio de los esfuerzos transversales en la cápsula de secreción de la Chara o Nitella al ser una aplicación directa de la mecánica de materiales puede generalizarse a otros campos de la biología y la medicina.

### Presiones Internas en el Vegetal Inferior.

Dentro de la célula vegetal se ejerce una presión sobre la membrana, producto de la interacción de las sustancias y elementos del protoplasma, ésta presión denominada presión de turgencia (Pt), se encuentra uniformemente distribuída en todas direcciones de la superficie de la célula (31). La presión de turgencia es entonces el punto de partida para el estudio de las tensiones y esfuerzos en la célula.

La superficie y volúmen de la Nitella, Chara y Chlorella, según -- los investigadores japoneses Tamiya y Tazawa (31), puede considerarse como regular para fines prácticos, sin incurrir en errores matemáticos de consideración. Con esta observación, y tomando en cuenta que el objetivo en esta sección es el análisis de esfuerzos y la presión de turgencia en la célula, el estudio se compone de 3 partes:

a).- La elongación y el módulo de Young en la célula cilíndrica.

b).- Esfuerzos longitudinal ( $\sigma_y$ ) y transversal ( $\sigma_x$ ) (o circunferencial), en la célula cilíndrica.

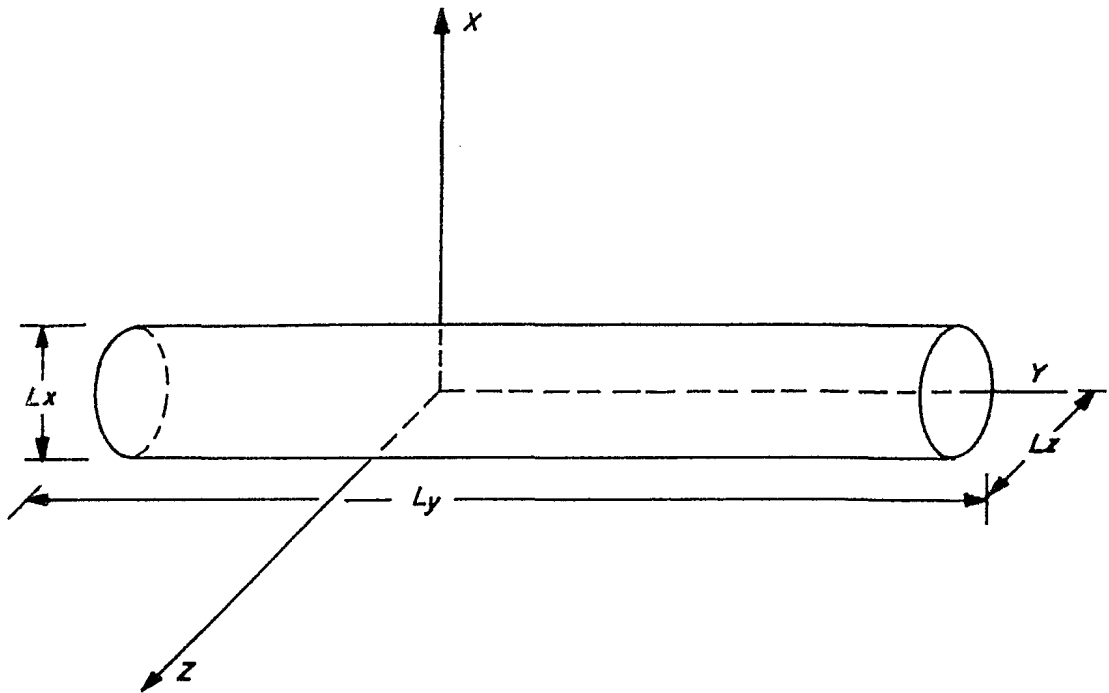
c).- Relación entre Presión de turgencia y concentración.

a).- La Elongación y el Módulo de Young en la Célula Cilíndrica.

La contractilidad de la célula se identifica desde el punto de vista de la mecánica de materiales como una manifestación propia de la elasticidad, ya que de no existir ésta propiedad, no habría respuesta alguna a las excitaciones del ambiente (31).

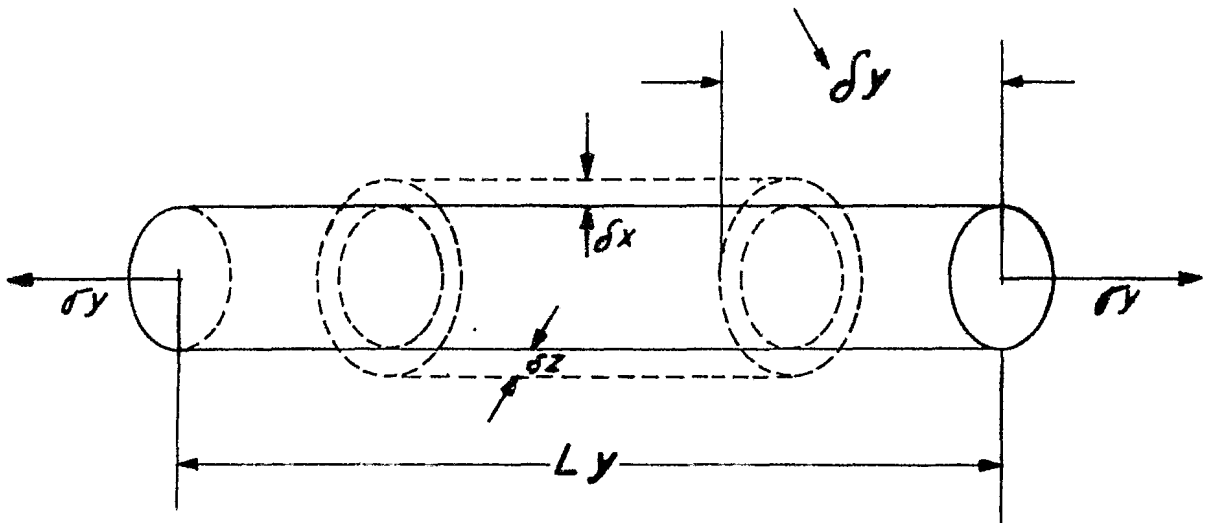


**FIG. IV-2**



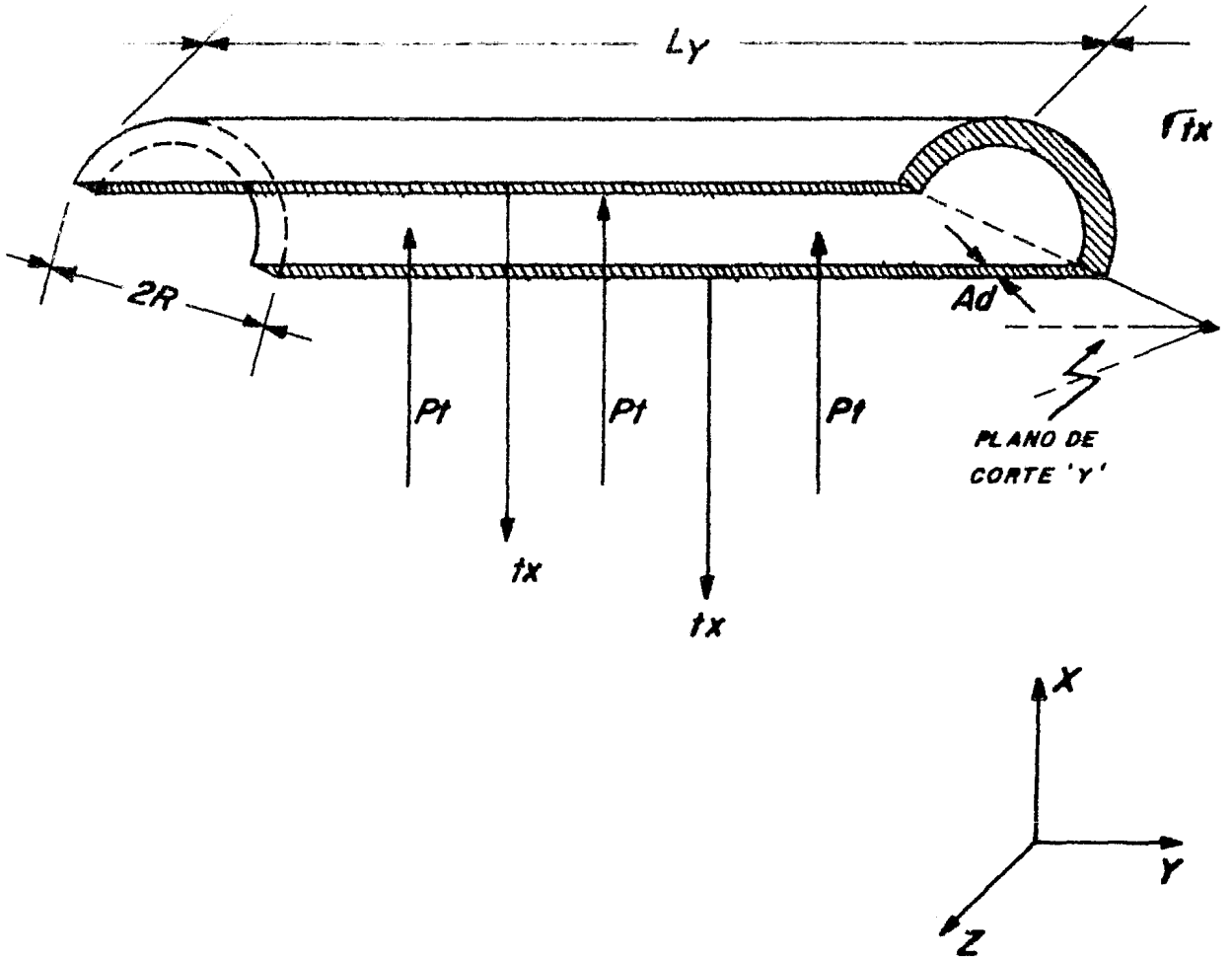
**CELULA CILINDRICA DE CHARA O NITELLA EN CONDICIONES ORIGINALES (31)**

FIG. IV-2a



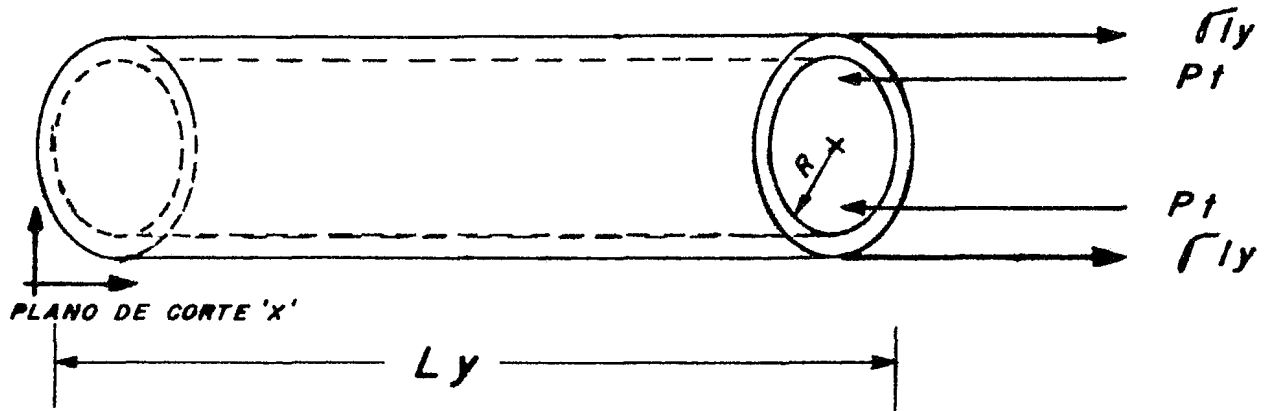
GELULA CILINDRICA DE CHARA O NITELLA BAJA CON TRACCION LATERAL. EL DESPLAZAMIENTO VERTICAL ( $\delta y$ ) ES MUY PEQUEÑO AL APLICARSE EL ESFUERZO  $\sigma_y$  (29)

FIG. IV-3



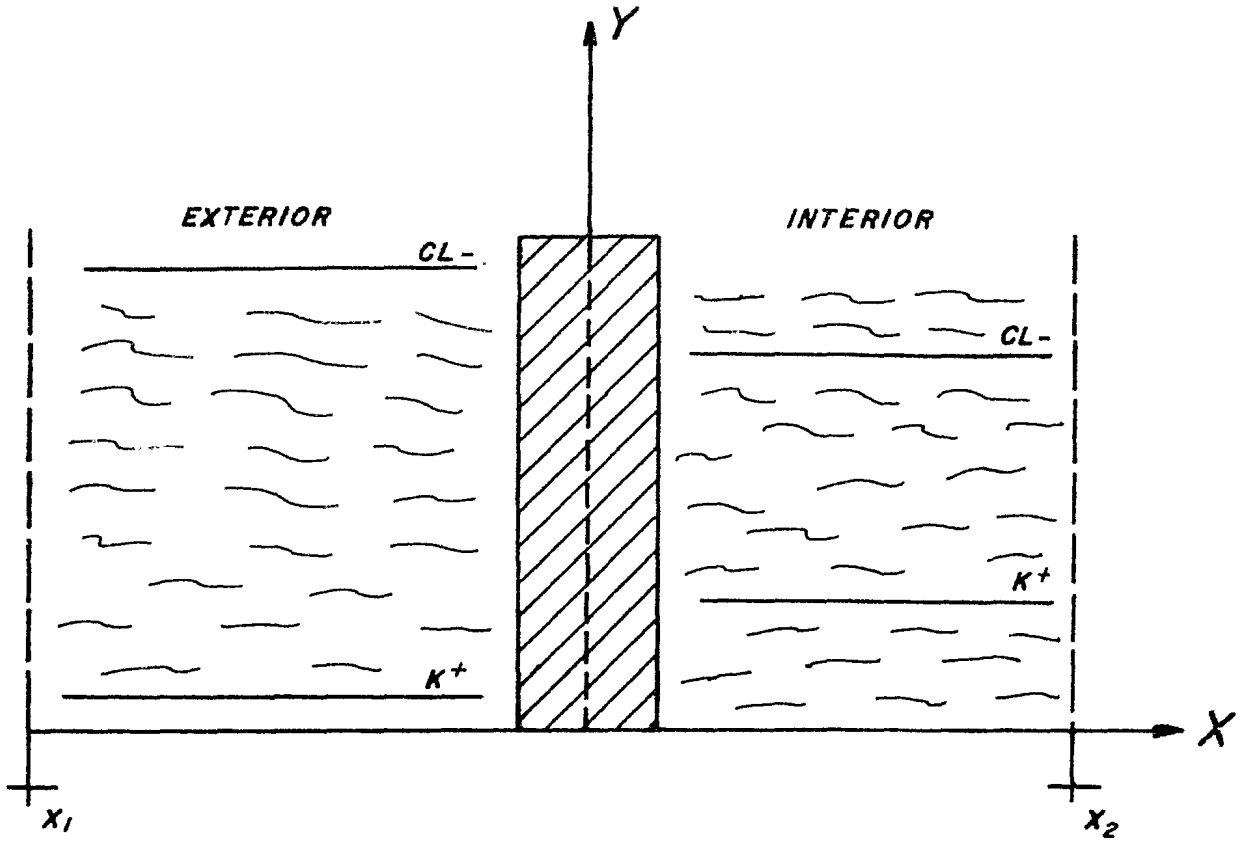
SECCION DE CORTE LONGITUDINAL DE UNA CELULA CILINDRICA HIPOTETICA, MOSTRANDO LOS ESFUERZOS LONGITUDINALES  $\sigma_{tx}$  Y LA DISTRIBUCION DE LA PRESION DE TURGENCIA  $P_t$

FIG. IV-3a



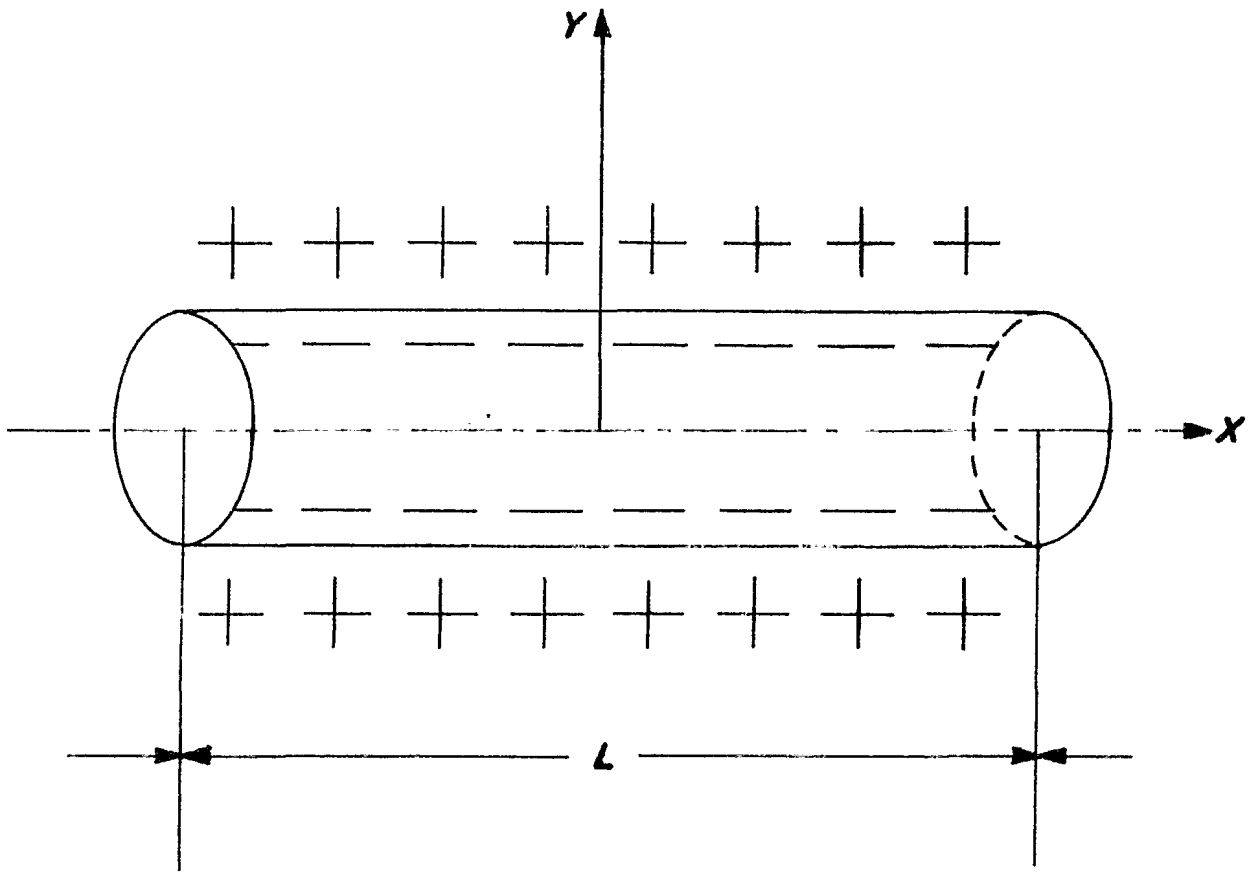
SECCION DE CORTE TRANSVERSAL DE UNA CELULA CILINDRICA HIPOTETICA, MOSTRANDO LOS ESFUERZOS LONGITUDINALES  $\sigma_{ly}$  Y LA PRESION DE TURGENCIA  $P_t$

FIG. IV-4



SOLUCION CONTENIENDO IONES DE  $K^+$  y  $CL^-$  A TRAVES DE UNA MEMBRANA PERMEABLE, LA CONCENTRACION DE  $K^+$  y  $CL^-$  ES DISTINTA DE UN LADO  $x_1$  A UN LADO  $x_2$ , LO QUE PRODUCE UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL (33)

FIG. IV-5



*DISTRIBUCION DE CARGAS EN UNA CELULA CILINDRICA,  
CON UNA MEMBRANA SIMILAR A LA DE DANIELL DAWSON*

(6)

Las células biológicas vivas reaccionan siempre ante las excitaciones del medio externo, y en muchas ocasiones, los cambios en las concentraciones de sustancias y elementos orgánicos e inorgánicos son excitaciones que producen cambios en la presión de turgencia y por lo tanto, en la contractilidad y en la dilatación celular.

La dilatación celular, puede, idealmente calcularse considerando - que la deformación es lineal, equivalente y proporcional a una fuerza de tracción aplicada en una dirección longitudinal a una célula cilíndrica.

La deformación considerada por Tamiya y Tazawa (31) por una fuerza de tracción en dirección longitudinal como la mostrada en la fig.-(IV.2a) se expresa únicamente en la dirección de 'Y' porque en el ambiente acuoso de las algas *Nitella* y *Chara* el desplazamiento vertical " x" es siempre muy pequeño cuando las células han alcanzado su madurez.

Si se considera una célula cilíndrica en un sistema tridimensional, el desplazamiento "  $\delta x$ " es casi el mismo que "  $\delta z$ ", muy probablemente por la distribución uniforme de la presión de turgencia y -- las características estructurales de la cápsula de secreción figs. (IV.2) y (IV.2a). De éstas figuras, puede iniciarse el análisis de esfuerzo-deformación teniendo como base los conceptos teóricos generales de la mecánica de materiales.

El análisis de esfuerzo- deformación de una célula cilíndrica como la mostrada en las figs. (IV.2) y (IV.2a) se inicia con el módulo- de Young, el cual se representa matemáticamente como:

$$E = \frac{\Delta \sigma_y}{\Delta \epsilon} \quad (IV.3)$$

En donde:

$\Delta \sigma_{Ly}$  = Esfuerzo longitudinal ( $\text{Kg/cm}^2$ )

$\Delta \epsilon_{Ly}$  = Deformación Longitudinal (Ad)

La deformación longitudinal está definida a su vez como:

$$\Delta \epsilon = \frac{\Delta L_y}{L} \quad (\text{IV.3a})$$

Siendo:

$\Delta L_y$  = Incremento de longitud

$o$  = desplazamiento lineal ( $\delta x$ )

$L$  = Longitud original

$\Delta E$  = Incremento de deformación.

El módulo de Young o de Elasticidad 'E', es en los vegetales muy elevado (29), y depende de las características químicas de la cápsula de secreción, así, por ejemplo, la celulosa que suele encontrarse en cantidades apreciables en muchos vegetales inferiores y superiores tiene un módulo de Young de  $1.0 \times 10^5$  ( $\text{Kg/cm}^2$ ), siempre y cuando su pureza sea del 100%. La Nitella y la Chara, debido a que sus cápsulas de secreción contienen otros componentes químicos aparte de la celulosa y por la disposición de sus microfibrillas - el módulo de Young es aproximadamente de  $7 \times 10^3 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$  el cual es considerablemente menor al de la celulosa pura.

b).- Esfuerzos Longitudinal ( $\sigma_y$ ) y transversal ( $\sigma_x$ ) en la célula Cilíndrica.

Para analizar los esfuerzos generados por la presión de turgencia (Pt), en la cápsula de secreción de la célula, serán utilizados -



dos diagramas de cuerpo libre, que representan las secciones longitudinal y transversal de una célula cilíndrica figs. (IV.3) y --- (IV-3a).

En las figs (IV-3) y (IV.3a) se tiene la siguiente nomenclatura:

R = radio del cilindro (cm)

$P_t$  = presión de turgencia que actúa uniformemente en un área 'A' ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ).

$\Delta d$  = grosor de la cápsula de secreción de la célula (cm)

L = longitud total de la célula. (cm).

De acuerdo con la fig. (IV.3) y los conceptos básicos de mecánica de materiales se obtiene el esfuerzo longitudinal, éste es:

$$\sigma_{Ly} = \frac{F}{A} \quad \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2} \quad (\text{IV.4})$$

El esfuerzo ocurre sobre una sección anular con área  $A = \pi R^2$ , y una presión  $P_t$  por lo que la fuerza sería:

$$F = P \pi R^2 \quad \frac{\text{Kgf} (\text{cm}^2)}{\text{cm}^2} \quad (\text{IV.4a})$$

El área sobre la cual estaría actuando la fuerza, serían el grosor de la membrana y el perímetro de la célula, éste es:

$$A = P_e \quad d = 2 \pi R \Delta d \quad (\text{cm}^3) \quad (\text{IV-4b})$$

Siendo: 'Pe' el perímetro del cilindro.

Sustituyendo las expresiones (IV.4a) y (IV.4b) en (IV.4) se obtiene:

$$\sigma_{Ly} = \frac{P_t \pi R^2}{2 \pi R \Delta d} = \frac{P_t R}{2 \Delta d} \quad (\text{IV.5})$$

La ecuación (IV.5) representa el esfuerzo longitudinal en una sec-

ción anular de la membrana cilíndrica, éste esfuerzo es paralelo - al eje 'X' del cilindro representado en la fig. (IV.3) y define la deformación que sufre la célula debido a la presión de turgencia - (Pt) (31).

Esfuerzo tangencial o [transversal] sobre la pared celular cilíndrica.

El esfuerzo tangencial ( $\sigma_t$ ), actúa en dirección del eje 'Y' de -- acuerdo a la fig. (IV.3a) y por ser la respuesta del organismo celular a la presión de turgencia (Pt), se apega al caso de la fig. (IV.2a). Para determinar el esfuerzo tangencial, se considera -- una sección longitudinal de magnitud (Ly) en el cilindro. Considerando nuevamente la expresión (IV.4b), se tendrá para éste caso:

$$A = P_e \Delta d = 2L (\Delta d) \quad (IV.5a)$$

La fuerza estaría determinada por:

$$F = PtA = Pt 2RL \quad (IV.5b)$$

Obsérvese que el área en la ec (IV.5b) está determinada por 2RL, - debido a que el esfuerzo actuante transversal  $\sigma_{tx}$ , se aplica en un área rectangular, determinada por la sección transversal de la fig. (IV.3).

Sustituyendo las expresiones (IV.5a) y (IV.5b) en la ec (IV.4) y - simplificando se obtiene:

$$\sigma_{tx} = \frac{Pt 2RL}{2L \Delta d} = \frac{PtR}{\Delta d} \quad (IV.6)$$

La ec (IV-6) expresa el esfuerzo tangencial (o longitudinal), en la cápsula de secreción de la célula cilíndrica.

Deformaciones en la Célula cilíndrica de la Nitella.

Cuando se habló del módulo de Young, se habló brevemente de la formación que sufren las células cilíndricas de Chara o Nitella, ilustradas como desplazamientos longitudinales ' $\delta$ ' en las figs. (IV.2) y (IV.2a), por lo que serán definidas matemáticamente dichas deformaciones.

En la fig. (IV.2), se muestra un elemento cilíndrico de espécimen vegetal bajo esfuerzo 'cero', y en la fig. (IV.2a) bajo un esfuerzo de tensión  $x$ . Los desplazamientos están señalados por  $z$ ,  $y$  y  $x$ . Se observará que  $y$  es positiva mientras que  $x$  y  $z$  son negativos, en el caso de  $y$  por aumentar la magnitud original, y el caso de  $x$  y  $z$  por disminuir (31).

Las deformaciones correspondientes se encuentran sencillamente, -- dividiendo los desplazamientos entre las longitudes iniciales correspondientes:

$$\epsilon_z = -\frac{\delta z}{Lz}; \quad \epsilon_y = \frac{\delta y}{Ly}, \quad \epsilon_x = -\frac{\delta x}{Lx} \quad (IV.7)$$

Estas relaciones pueden calcularse según los datos observados en -- experimentación. Una forma de evaluación derivada de las relaciones (IV.7) es el llamado módulo de poisson determinado por (29):

$$\nu = \left| \frac{E_t}{E_L} \right| \quad (IV.7a)$$

En donde:

$\nu$  = Módulo de Poisson.

$E_t$  = Deformación transversal

$E_L$  = Deformación Longitudinal.

En el módulo de Poisson existen dos observaciones importantes:

- 1).- La deformación transversal será de sentido contrario a la -- deformación longitudinal (colocar el signo (-)).
- 2).- El módulo de Poisson es una relación de deformaciones, no --- relación de desplazamientos.

Evaluación de los esfuerzos  $\sigma_{Ly}$ ,  $\sigma_{Tx}$  y las deforma  
ciones en la cápsula de secreción de la Nitella.

Una vez que han sido definidos matemáticamente los esfuerzos y las deformaciones, se precisa calcularlos a partir de datos conocidos experimentalmente y recomendadas por el investigador T. Takata (31) para una célula de Nitella, éstos son los siguientes:

$d$  = diámetro = 1 (mm)

$L$  = Longitud = 3 (cm)

$E$  = Mod. de Young = 7000 (Kg/cm<sup>2</sup>)

$\Delta d$  = grosor de la cápsula de secreción = 5 ( $\mu m$ )

$P_t$  = Presión de turgencia = 6 (BAR)

- 1).- Cálculo del esfuerzo tangencial  $\sigma_{Ly}$ :

Homogenizando unidades:

$d$  = 1 mm = 0.1 (cm)

$d$  = 5 ( $\mu m$ ) =  $5 \times 10^{-4}$  (cm)

$$P_t = 6 \text{ (BAR)} = 5.917 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

El radio de la célula será:

$$R = \frac{d}{2} = \frac{0.1}{2} = 0.05 = 5 \times 10^{-2} \text{ (cm)}$$

sustituyendo los datos en la ec. (IV.5) se obtendrá:

$$\sigma_{Ly} = \frac{P_t R}{2 \Delta d} \left[ \frac{\text{Kgf/cm}^2 \times \text{cm}}{\text{cm}} \right] = \left[ \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2} \right]$$

$$\sigma_{Ly} = \frac{5.917 \times 5 \times 10^{-2}}{2 \times 5 \times 10^{-4}} = \frac{29.58}{10} \times 10^{-2} \times 10^4$$

$$\sigma_{Ly} = 2.96 \times 10^2 = 296 \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}$$

$$\underline{\sigma_{Ly} = 296 \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}} \quad \circ \quad (300.1 \text{ BAR})$$

2).- Cálculo del esfuerzo transversal  $\sigma_{tx}$ .

Utilizando la ec (IX.6) y sustituyendo datos se tiene:

$$\sigma_{tx} = \frac{P_t R}{\Delta d} = \frac{5.917 \times 5 \times 10^{-2}}{5 \times 10^{-4}}$$

Simplificando se obtiene:

$$\sigma_{tx} = \frac{29.6}{5} \times 10^{-2} \times 10^4$$

$$\sigma_{Tx} = 5.92 \times 10^2 = 592 \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}$$

$$\underline{\sigma_{tx} = 592 \text{ (Kgf/cm}^2\text{)}} \quad \circ \quad (600.3 \text{ BAR})$$

3).- Cálculo de la deformación tangencial (longitudinal)  $\sigma_{yL}$ .

De la ecuación (IV.3)

$$E = \frac{\Delta \sigma_{Ly}}{\Delta E_{ty}}$$

Despejando  $e_t$ , se obtiene la deformación longitudinal

$$\Delta E_t = \frac{296}{7000} = 0.043$$

unidades:

$$\Delta E_t = \frac{\text{Kgf/cm}^2}{\text{Kgf/cm}^2} = (\text{Ad})$$

La deformación transversal en % es:

$$\Delta E = 4.2 \%$$

Cálculo de la deformación transversal  $\sigma_{xt}$ .

De forma análoga a la deformación y como  $\Delta E_{tx} = \Delta E_{tz}$ .

$$\Delta E_t = \frac{592}{7090} = 0.084$$

en % la deformación será:

$$\Delta E_{tz} = \Delta E_{tx} = 8.4\%$$

4).- Cálculo de los desplazamientos.

Utilizando las relaciones (IV.7)

$$\delta y = \epsilon_y L_y \quad ; \quad -\delta x = \epsilon_x L_x \quad ; \quad -\delta z = \epsilon_z L_z$$

Desplazamiento Longitudinal:

$$\delta y = 0.042 \times 3 = 0.126 \text{ (cm)}$$

Desplazamiento transversal:

$$-\delta x = 8.084 \times 0.1 = 0.0084 \text{ (cm)}$$

Desplazamiento Lateral:

$$-\delta z = -\delta z = 0.0084 \text{ (cm)}$$

5).- Cálculo de la Fuerza total ( $E_t$ ) sobre la cápsula de secreción.

El último parámetro por calcular, en el aspecto mecánico es la fuerza sobre la cápsula de secreción. Esta fuerza, se calcula a partir de la presión hidrostática utilizando la altura piezométrica -- (hp) correspondiente.

Si para una presión hidrostática de  $10,000 \text{ (kg/m}^2)$  ( $1.0 \text{ (kg/cm}^2)$ ), se tiene una altura piezométrica (hp) de 10 (m), y la fuerza total-  $F_t$  actúa sobre el centro de gravedad mostrado en la figura (IV-1),-

la expresión que determina la fuerza total será:

$$F_t = \gamma \left( \frac{A_c h}{2} \right) \quad (IV-8)$$

siendo:

$A_c$  = Area del cilindro.

$$F_t = \gamma \left( \frac{eRTT}{2} \frac{(r + L)}{2} \right) h \quad (IV-8a)$$

$$F_t = 1000 \left( \frac{2 (5 \times 10^{-3}) \left( \frac{\pi}{2} \right) (5 \times 10^{-3} + 0.3)}{2} \right) 10$$

$$F_t = 10,000 \left( \frac{0.009587}{2} \right) = 48 \text{ Kgf}$$

Si se supone una profundidad de 3 (m), que corresponde a la distancia aproximada de un estanque donde crece el alga, su valor será:

$$F = 1000 (0.0047) (3) = 14.4 \text{ (Kgf)}.$$

Discusión e interpretación de resultados.

Al ser calculados los esfuerzos longitudinal ( $\sigma_{Ly}$ ) y transversal ( $\sigma_{tx}$ ), se observa que en la célula de la Nitella, el esfuerzo longitudinal es la mitad del transversal por dos razones:

- a).- La presión de turgencia normalmente varía poco.
- b).- Las características anatómico-estructurales.

La presión de turgencia, si disminuye, implica que la célula se encuentra bajo un estado de plasmolisis y en ese caso, el organismo puede morir.

En cuanto a las características anatómico-estructurales, el grosor de la cápsula de secreción no excede a varias micras el diámetro, rara vez alcanza 5 (mm), y la celulosa está acompañada normalmente de otras sustancias por lo que el módulo de Young varía entre una

especie local y otra.

En cuanto a la fuerza total ( $F_z$ ), puede decirse, que tiene un efecto ínfimo sobre la cápsula de secreción aunque aumentara la altura piezométrica de 3. a 10 (m), ésto explica en parte por qué las deformaciones tienen desplazamientos tan pequeños.

(B).- Relación entre los factores químicos, mecánicos y eléctricos de la membrana biológica.

Objetivo.- Resumir y comentar de forma breve y concisa cómo influyen y cómo se manifiestan las energías mecánicas y químicas en el potencial eléctrico de la membrana.

Introducción.- Demostrar matemáticamente y en detalle las relaciones que existen entre las energías mecánicas, químicas y eléctricas de la membrana biológica resulta muy laborioso, y tiene además, un número considerable de aspectos físico químicos y meramente químicos en la mayoría de la literatura que existe al respecto. Por lo tanto, limitarse a informar sobre la secuencia de investigación que se sigue en el balance interacción de energías es muy conveniente. El procedimiento más sencillo para tal balance, consta de cuatro etapas:

1).- Establecimiento de condiciones frontera, de índole mecánica, eléctrica y química, así como de los diagramas de cuerpo libre que muestren el estado inicial del sistema de interés.

2).- Planteamiento y aplicación de la Ley de Conservación de la Energía y la Primera Ley de la Termodinámica representadas por la ecuación (III-6).



3).- Se calculan o se eligen los valores consiguientes de: presión osmótica, hidrostática, y potencial químico (energía química), homogenizando las unidades si se requiere.

4).- Utilizando la ecuación de potencial químico, ya conocidos los valores de los términos mecánicos, es posible conocer el valor promedio del potencial eléctrico.

Desde el punto de vista de la Ingeniería, aunque es posible obtener una equivalencia de energías química, mecánica y eléctrica, de tal manera que todas se expresarán en unidades de energía química, ---- eléctrica o mecánica; tal hecho, no se llevaría a cabo sin entrar - dentro del terreno de la química porque en esencia el mecanismo biológico es químico, como se demuestra al estudiar las características eléctricas del agua.

Valor cuantitativo de las presiones en el potencial eléctrico.

Con el propósito de establecer las comparaciones pertinentes entre la presión osmótica y la hidrostática, se ha recurrido a los valores de resultado analizados y recopilados por el investigador P. S. Nobel (13), para con ello determinar la influencia que tienen entre sí dichas presiones, sin entrar en las demostraciones fisicoquímicas.

P. S. Nobel, obtiene los resultados siguientes para las presiones - osmótica e hidrostática: Véase la tabla (IV-1).

Tipo de célula	Presión Osmótica (BAR)	Presión hidrostática ph (BAR)	Observaciones.
Frijol o espinaca	7.3	-5	La Ph negativa se debe a efectos de interfase -- aire - líquido
Chara ó Nitella	3 → 5	1	La Ph está considerada - para una altura piezométrica de 10 (m). La osmótica depende - del agua utilizada.

Tabla (IV-1).- Valores de la Presión osmótica e hidrostática en un vegetal superior y otro inferior (13).

Si se examinaran otros vegetales, los resultados conservarían cierta proporcionalidad, por lo que a grandes rasgos puede decirse que la presión osmótica es mayor a la hidrostática, debido a las dos - razones siguientes:

- 1).- La presión osmótica depende directamente de la concentración del soluto o solutos que se encuentren en el solvente (agua) y su crecimiento es logarítmico.
- 2).- La presión hidrostática, por el contrario, depende de la altura piezométrica y obedece a una relación lineal.

En el potencial eléctrico de la membrana, la presión osmótica influye más que la hidrostática, pues se ha demostrado que en condiciones ideales y considerando un volumen molar de 20 (cm<sup>3</sup>/mol) de agua, una presión hidrostática de 1 BAR genera solo 0.021 (mv) en tanto que la osmótica con una concentración de 0.13 (M) de KCl, -- NaCl y otras sustancias alcanza de 3 a 5 BAR y más del doble del -

potencial eléctrico que genera la presión hidrostática (31) (13).

Influencia del potencial químico en el  
potencial eléctrico.

El potencial químico del agua definido como la combinación lineal - de las principales energías que intervienen en una reacción química en el capítulo III y en donde la 1/4 parte está representada por el potencial eléctrico implica un delicado balance masa-energía que -- por su importancia merece una mención especial.

En el vegetal inferior, el potencial químico proviene fundamentalmente del agua y los solutos que contiene en ella.

Una de las razones más poderosas que confirman la importancia del - potencial químico es la naturaleza dipolar del agua descrita en la - sección (III-2B), y complementada en la 2a. parte del presente ca- - pítulo. Otra de las probables razones viene siendo la permeabilidad altamente selectiva y las complejas reacciones químico-orgánicas - de la membrana citoplásmica (6).

Como comentario, algunos especialistas en el área de Ingeniería - - Eléctrica opinan que la energía química utilizada de forma similar a la de los organismos biológicos con sistemas de realimentación y conversión de energía análogos pueden determinar el futuro en algu - nos problemas de distribución, almacenamiento y uso razonado de la energía eléctrica.

(IV-?).- Conducción de la electricidad a través de la  
membrana biológica.

A).- El flujo eléctrico en el agua.

Para poder describir las características eléctricas de la membrana, ya sea en la difusión, en el transporte activo, durante la excitabilidad, etc., es menester, identificar primeramente las condiciones adecuadas del agua para el desarrollo de las condiciones-eléctricas de la membrana.

En esta sección se van a mostrar los siguientes dos puntos de interés:

1).- Influencia de las propiedades eléctricas del agua en la --  
membrana.

2).- Acondicionamiento químico del agua en la experimentación --  
enfocada a la Chara.

La segunda parte de ésta sección da una visión global sobre las --  
características, conceptos y observaciones de índole eléctrica en  
la membrana a fin de poderlos utilizar adecuadamente en el capítu-  
lo V.

1).- Influencia de las propiedades eléctricas del agua en la mem--  
brana.

El agua, para convertirse en un factor de gran influencia en el --  
potencial eléctrico de la membrana debe contener cierta cantidad -  
de solutos susceptibles de ionizarse.

Los iones definidos como partículas cargadas eléctricamente positi  
va o negativamente son elementos químicos que se encuentran disuel  
tas en diversas concentraciones independientemente de la presencia-  
de una membrana biológica o la existencia de un potencial eléctri-

co aplicado a la solución (31).

Un clásico ejemplo es el de los cristales de NaCl cuyas moléculas existen en iones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , cuando se encuentran en un medio -- acuoso, sec. (IV-1). Las interacciones eléctricas en ese medio tienen siempre un cierto potencial eléctrico (E) relativo establecido entre una región cualquiera de la solución y otra región de la membrana citoplásmica. Es relativo porque en un sistema biológico, - el lugar del mínimo potencial eléctrico depende de diversos aspectos fisiológicos y externos.

Si se aplica una diferencia de potencial a la solución, existiendo una concentración uniforme de iones, los cationes (+), se mueven hacia la región (-), mientras los aniones (-), se dirigen hacia el cátodo (+); éste movimiento de cargas eléctricas de una dirección a otra registra un valor promedio de corriente (32). Si una carga positiva se mueve en una dirección, y una carga negativa en dirección opuesta, existirá una corriente total que implica un equilibrio iónico en la membrana.

Fuerza Electrostática entre dos partículas cargadas.

Dos partículas cargadas en una solución, experimentan una fuerza - adicional, que resulta de la interacción entre ellas o de cualquier campo eléctrico presente en la solución. Por ejemplo, cuando el -- cloruro de sodio NaCl se disuelve produciendo  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , la presencia de un campo eléctrico 'E', determina para el  $\text{Na}^+$  la siguiente fuerza individual (33).

$$F_{\text{na}} = q_1 E \quad (\text{IV-9}).$$

La fuerza sobre el ión  $CL^-$ , será en dirección opuesta y estará determinada por:

$$F_{CL} = -q_2 E \quad (IV-9a)$$

siendo:

- F = Fuerza electrostática (Nw)
- q = Magnitud de carga (coulomb) eléctrica
- E = Campo eléctrico (Nw/coulomb)

El valor de 'q' está determinado por:

$$|q| = 1.6018 \times 10^{-19} \quad (\text{coulomb})$$

Las ecs (IV-9) y (IX-9a), pueden expresarse según la Ley de Coulomb, ya que ejerce una fuerza sobre 2 dependiendo de la distancia, en éstas condiciones:

$$F_{na} + F_{CL} = F$$
$$F = K \left[ \frac{q_1 q_2}{R^2} \right] \quad (IV-9b)$$

siendo:

- R = Distancia entre iones (cargas)
- K = Cte de Coulomb.
- =  $9 \times 10^9$  (Nw - M<sup>2</sup>/cou<sup>2</sup>)

La cte K de Colomb depende de la permeabilidad  $E_0$  y de la cte dieléctrica 'D', relacionadas de la forma siguiente:

$$K = \frac{1}{4\pi E_0 D} \quad (IV-9c)$$

El valor de  $E_0$  es:

$$= 9.85 \times 10^{-12} \quad (\text{cou}^2/\text{Nw-m}^2)$$

D' es adimensional = 1.0058 en el aire a 0°C y 760 (mm Hg) (10 m - H<sub>2</sub>O).

El agua por ser un medio de polarización tiene los siguientes valores para 'K' y 'D':

$$D' = 80.2 \quad \text{A} \quad 20^{\circ}\text{C}$$

$$D' = 78.4 \quad \text{A} \quad 25^{\circ}\text{C}$$

Los valores de K serán:

$$K = 11.2 \times 10^7 \quad (\text{Nw-m/cou}^2) \quad \text{a} \quad 20^{\circ}\text{C}$$

$$K = 11.4 \times 10^7 \quad (\text{Nw-m/cou}^2) \quad \text{a} \quad 25^{\circ}\text{C}$$

Al aumentar la fuerza electrostática entre dos partículas cargadas, próximas a la membrana o entre dos puntos de ésta fig. (IV-4), aumentará el campo eléctrico (E) siempre y cuando la cantidad de moléculas ionizadas no sea muy elevado y el medio acuoso no se encuentre polarizado (poco electrostático). Si por el contrario, aumenta la cantidad de moléculas en un medio acuoso polarizado (muy electrostático), la fuerza electrostática disminuye al disminuir el campo eléctrico 'E' (31) (13).

La razón de tal comportamiento de los iones, en medios polarizados y no polarizados es que la interacción electrostática entre el agua y los iones se cancela parcialmente en base a campos eléctricos producidos por los iones, de tal forma que al aumentar en número aniones y cationes, la atracción electrostática disminuye (33).

Un ejemplo de ello es la relación entre las moléculas aniónicas del agua y las catiónicas del sodio (Na<sup>+</sup>) o el potasio (K<sup>+</sup>), en donde, según la Ley de Coulomb, los aniones del agua atraen al catión potasio (K<sup>+</sup>) lo cual da como resultado que las moléculas del-

agua estén orientadas alrededor de las moléculas catiónicas, con un campo eléctrico local opuesto al de las moléculas de Potasio.

2).- Acondicionamiento químico del agua en la experimentación (enfocado a la Chara).

Los especialistas en la biofísica vegetal requieren determinadas cualidades para el ambiente de experimentación, distintas a las -- originalmente ecológicas, con el propósito de optimizar las características eléctricas de la membrana biológica. Existen dos clases de condiciones de experimentación: térmicas y biológicas.

Condiciones de experimentación térmicas.

Se refieren, en el caso de los vegetales en general a la temperatura y la presión. La temperatura se analizará en el capítulo V y la presión fué descrita en la sección (IV-1a).

Condiciones de experimentación químicas.

Las condiciones químicas, son todas aquellas relacionadas con las concentraciones químicas de sustancias susceptibles de ionizarse y promover determinadas funciones de la membrana, minimizando o inhibiendo a las demás, éstas condiciones se denominan: Sistema Biológico artificial (SBA)\*, o en una mejor designación "Artificial Pond-Water" (APW), o agua de estanque artificial, utilizada muy extensivamente por investigadores japoneses y americanos, la cual, tiene-

(\* Las condiciones (SBA) ó (APW) no son necesariamente las adecuadas para el desarrollo y supervivencia del Alga.



normalmente las siguientes sustancias y características:

KCL, NaCL,  $MgSO_4$  ,  $Ca(NO_3)_2$  ó  $CaCl_2$

Temperatura: mínima 2°C, máxima 25°C

Presión: ambiente 1.03 ( $Kg/cm^2$ )

hidrostática. de 0.01 ( $kg/cm^2$ )

a 0.10 ( $Kg/cm^2$ )

Ph: entre 5 y 10. Incluyendo valores intermedios como 6.8, -  
7.2, etc.

Normalmente, se agregan otras sustancias a las ya mencionadas y -  
otras condiciones externas como la intensidad luminosa, variando la  
longitud de onda, pero para propósitos prácticos de este trabajo se  
evitará entrar en una discusión de acondicionamiento químico e ins-  
trumentación partiendo de un estudio ya conocido.

B).- Fundamentos teóricos de la Electrofisiología de la Membrana.

Objeto.- Comprender y conocer los aspectos teóricos fundamentales -  
en el análisis de las características eléctricas de la membrana.

Introducción.- Para comprender los aspectos teóricos del capítulo -  
V en lo que respecta al cálculo de potenciales, análisis de flujos  
iónicos, e influencia de la temperatura en la membrana se necesitan  
fundamentos físicos, químicos y matemáticos representados por la --  
Ley direccional de Ohm - Fick, y las ecuaciones de Nernst y Goldman  
-  $KAT_2$  a partir de una descripción simplificada de la transferen--  
cia iónica en organismos inferiores.

1).- Transferencia iónica en Organismos Inferiores.

Las células vivas, constantemente intercambian sustancias con el -  
ambiente que las rodea. Al igual que cualquier otra máquina que - -

realiza trabajo, debido a que las células deben de proveerse de -- combustible y liberar los productos de desecho.

Con base en el conocimiento de como las sustancias entran y salen a través de las membranas de las células, se pueden hacer suposiciones sobre las membranas celulares de los organismos inferiores y primitivos (3).

Existe evidencia experimental que demuestra que la membrana está -- compuesta de proteínas y materiales lipídicos, pero sin embargo, -- con todo y los modelos planteados\* no se sabe a ciencia cierta como funciona una membrana, ni la exacta disposición de sus materiales. Experimentalmente, se sabe que una membrana es atravesada más fácilmente por moléculas no cargadas eléctricamente lo que quiere decir que los iones entran con cierta dificultad. Aparentemente, -- la carga eléctrica de los iones dificulta en alguna forma su pasaje a través de la membrana celular y una dificultad mayor surge -- cuando un elemento iónico sale de la membrana celular, (3).

Diversos investigadores, tratando de descubrir o plantear las leyes naturales a las que obedece el comportamiento de la membrana -- coinciden en suponer un mecanismo fundamental común a la mayoría -- de las células estudiadas, y proponer las características particulares en base a la especie del organismo.

#### Distribución de cargas en una membrana.

La primera suposición sobre el mecanismo fundamental común en la -- membrana, es la distribución de las cargas eléctricas.

---

(\*).- Véanse los modelos de Danielli - Dawson y Lucy-Sjostrand. -- (Cap-III).

Considérese el modelo de membrana de Danielli-Dawson explicado en la sec. (III-3a), pero aplicado a una membrana cilíndrica como la mostrada en la fig. (IV-5).

Si de la membrana mostrada en la figura (IV-5), se toma una sección diferencial y se supone también que en tal sección hay un ión (+) y otro (-), entonces, se obtendrá una figura similar a la (IV-4).

#### Estudio Analítico de la Difusión y el Potencial de membrana.

Objeto.- Presentar en forma breve y concisa la metodología utilizada para la obtención de los modelos matemáticos teóricos representativos de la relación entre la difusión y el potencial de membrana.

Introducción.- Debido a la naturaleza de este estudio, no es posible elaborar un estudio analítico muy profundo sobre los fundamentos y consideraciones físico-matemáticas utilizadas para obtener las ecuaciones representativas del comportamiento iónico en la membrana, ya que éste hecho equivaldría a tomar otro punto de vista, distinto al originalmente planteado, sin embargo, se mencionarán y explicarán las 4 expresiones matemáticas más conocidas y aplicables a la mayoría de las ramas de la biofísica, éstas son:

- 1).- Ec. direccional de Ohm.
- 2).- Relación de Difusión de Einstein.
- 3).- Ecuación de W. Nernst.
- 4).- Ecuación de Goldman.

1).- Ecuación direccional de Ohm.- La llamada ecuación direccional de Ohm resulta de considerar un ión con una velocidad constante -- cuando el campo eléctrico entre soluto y solvente es pequeño y obedece a la Ley de Stokes en un medio viscoso.

La ecuación direccional, es utilizada para describir el flujo (J)- de difusión de un ión, considerando la movilidad ( $u_c$ ), la concentración ( $c$ ) del elemento iónico y la variación del voltaje respecto a la distancia ( $dv/dx$ ), matemáticamente se representa como:

$$J_z = (-c) (Z) (U_z) \left[ \frac{dv}{dx} \right] \quad (IV-11)$$

La ec. (IV-II), es una adaptación exclusiva de la Ley de Ohm (original) al campo de la membrana biológica.

2).- Relación de Difusión de Einstein.

Al hablar del coeficiente de Difusión  $D$ , en la 1a. Ley de -- Fick, se puso de manifiesto que podía obtenerse experimentalmente; si éste parámetro se relaciona con la movilidad, es posible calcularlo también analíticamente; y la expresión que permite establecer la relación entre el coeficiente de Difusión ' $D$ ' y la movilidad -- ( $u_c$ ) es la expresión matemática conocida como: Relación de Einstein de difusión, y se representa como:

$$\frac{D}{u_c} = \frac{RT}{z \Phi} \quad (IV-12)$$

siendo:

$Z$  = ión monovalente (-) ó (+)

$D$  = Coef. de Difusión

$U$  = cte. de movilidad

$k$  = cte. de Boltzmann

$\varphi$  = magnitud de la carga eléctrica

T = temperatura absoluta.

La relación de Einstein de difusión es válida para describir el movimiento de un electrón, en un sistema unidimensional.

Einstein dedujo la ec. (IV-12) en 1956 a partir del principio de -- equipartición de energía.

3).- Ecuación de W. Nernst.

Esta ecuación, resulta del análisis realizado para el equilibrio eléctrico en un sistema de Ión único, el cual puede efectuarse de manera teórica o experimental.

La ecuación de W. Nernst, determina, el potencial particular de cada ión monovalente según su concentración externa e interna, y proviene de conjugar la Ley direccional de Ohm y la relación de difusión de Einstein con la 1ª Ley de Fick, aunque también puede ser calculada experimentalmente. Para un ión como el potasio  $K^+$ , quedaría definida de esta forma:

$$E_k = - \frac{RT}{ZF} \ln \frac{(K^+)_1}{(K^+)_2} \quad (IV-13)$$

En donde:

$$\left(\frac{RT}{ZF}\right) = \text{Cte. de Nernst. (mv)}$$

$$(K^+)_1 = \text{Concentración externa de potasio}$$

$$(K^+)_2 = \text{Concentración interna de potasio}$$

De forma general la ecuación de Nernst (IV-13), también puede expresarse

sarse como:

$$E_n = - \frac{RT}{ZF} \text{ Lg } \frac{(a^o)}{(a^i)} \quad (\text{mv})$$

siendo:

$a^o$  = actividad externa.

$a^i$  = actividad interna.

La cte. de Nernst tiene los siguientes valores mostrados en la tabla (IV-2):

Valor de RT/ZF (mv)	Temperatura (°C)
58.2	20°
59.2	25°
60	28°
60.2	30°

Tabla (IV-2).- Valores de la cte. del Pot de Nernst.  
(RT/ZF) (33).

#### 4.- Ecuación de Goldman - Katz.

Esta ecuación que data de fines de la II Guerra Mundial, es ampliamente utilizada para calcular el potencial de membrana\* o de reposo, el cual está relacionado con la permeabilidad y concentraciones de los iones principales de Sodio ( $\text{Na}^+$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y cloro ( $\text{CL}^-$ ).

(\*).- Es más común la designación de potencial de membrana en biofísica vegetal que potencial de reposo.

La ecuación de Goldman - Katz representada en la expresión (IV-14), no solo proporciona una relación entre concentraciones y permeabilidades, sino que además incluye factores térmicos, químicos y eléctricos que influyen en la membrana biológica.

$$E_m = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{P_k \frac{C_k^+}{C_k^+} + P_{Na} \frac{C_{Na}^+}{C_{Na}^+} + P_{Cl} \frac{C_{Cl}^-}{C_{Cl}^-}}{P_k \frac{C_k^+}{C_k^+} + P_{Na} \frac{C_{Na}^+}{C_{Na}^+} + P_{Cl} \frac{C_{Cl}^-}{C_{Cl}^-}} \quad (IV-14)$$

La ecuación de Goldman KATZ tiene la siguiente nomenclatura:

$P_k$  = Permeabilidad del potasio.

$P_{Na}$  = Permeabilidad del sodio.

$P_{Cl}$  = Permeabilidad del cloro.

$(C_k)_o$  = Concentración externa del potasio.

$(C_{Na})_o$  = Concentración externa del sodio.

$(C_{Cl})_o$  = Concentración externa del cloro.

$(C_k)_i$  = Concentración interna del potasio.

$(C_{Na})_i$  = Concentración interna del sodio.

$(C_{Cl})_i$  = Concentración interna del cloro.

C).- La Membrana bajo condiciones de excitación eléctrica.

Objeto.- Definir, discutir y mencionar de que forma se comporta la membrana del alga Chara con una excitación eléctrica, así como conocer el significado y la trascendencia de los términos más usuales aplicables a la electrofisiología del vegetal inferior.

Introducción.- El estudio, la experimentación o simulación del comportamiento eléctrico de la membrana del Alga Chara o cualquier otra, no puede entenderse, sin tomar en cuenta las observaciones, consideraciones y teorías desarrolladas por algunos científicos --

experimentados y reconocidos.

En el caso concreto de la Chara, se analiza también la influencia del ambiente y la temperatura en el comportamiento eléctrico, con una excitación eléctrica.

#### Mecanismo de excitación en la membrana de la Chara.

De una forma muy similar al procedimiento utilizado por Hodgkin, Huxley y Katz en 1950 (35), para determinar el potencial de acción y el tratamiento matemático en las neuronas animales, los investigadores Fujita, Mizuguchi y U. Kishimoto (32) (34), desarrollaron una adaptación de esas técnicas para las algas Chara y Nitella.

Para conocer su procedimiento se ilustra en la fig. (IV-6) una clásica disposición de aparatos, y se mencionan algunas de sus características con las especificaciones utilizadas.

#### Potencial de membrana o de reposo.

El concepto de potencial de membrana, se discutirá brevemente por tener una amplia aplicación dentro de la biofísica en general.

La membrana biológica, para mantener sus condiciones fisiológicas normales, regula la concentración de elementos iónicos y no iónicos cuantitativa y cualitativamente. En el caso específico de los iones principales  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , y  $\text{Cl}^-$ , su correcta concentración origina una diferencia de potencial denominado potencial de membrana\* o de equilibrio.

(\*).- Es más común la denominación de potencial de membrana en biofísica vegetal que potencial de reposo.



### Cálculo experimental del potencial de membrana.

El potencial de membrana puede conocerse directamente, preparando el espécimen vegetal en una solución APW, e introduciendo en el tonoplasto y en el exterior de la membrana un par de finos electrodos conectados a un sistema preamplificador diferencial (35).

Este sistema, descrito resumidamente ha dado buenos resultados a investigadores americanos y japoneses con un máximo de error de  $\pm 1$  (mv) con respecto al verdadero potencial de equilibrio (de membrana) en el estudio de las características eléctricas de la Chara y la Nitella.

### Polarización y Depolarización.

La propiedad que poseen las moléculas de la membrana de tener distribuidas desigualmente sus cargas, pero orientadas en los extremos se denomina polarización. La membrana protoplásmica del vegetal inferior tiene un conjunto de macromoléculas orgánicas con un momento polar definido y una estructura inicial como la mostrada en la fig. (IV-7). (34).

La polarización inicial de la membrana que corresponde al potencial de equilibrio  $E_m$ , puede variar en el tiempo por razones propias de la fisiología celular o bien por la presencia de un potencial de excitación aplicado a la membrana, en cuyo caso se alterará la estructura original del potencial de equilibrio. Fig. (IV-7a).

La disposición de aparatos en la figura (IV-6), no ha cambiado significativamente desde 1960 a la fecha, no así, la sofisticación de cada aparato en particular, que es más preciso y exacto.

Características electrofisiológicas generales  
del alga Chara.

El alga Chara normalmente obedece a la ley del todo o nada, durante las condiciones de excitación ya que la respuesta óptima no se presenta con cualquier estímulo ni cualquier ambiente. Los estímulos o excitaciones dependen de dos condiciones de simulación:

- 1).- Las del agua y sus características químicas (APW)
- 2).- El tipo de excitación eléctrica:

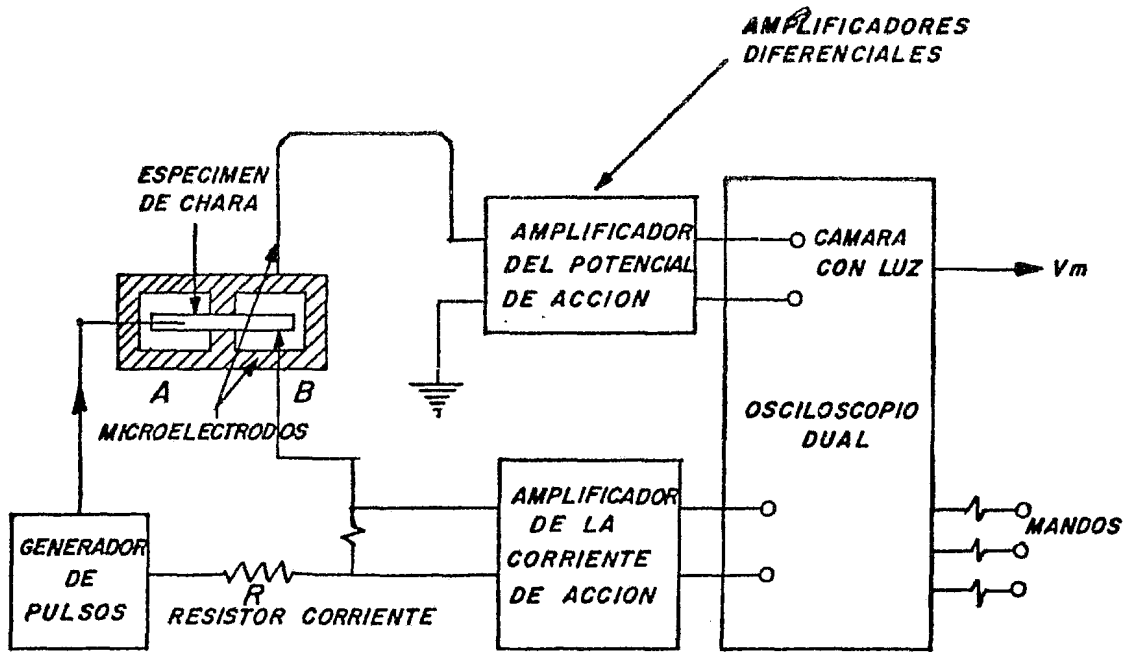
De depolarización y/o hiperpolarización.

Se han hecho diversos experimentos, a partir de estas dos clases de condiciones de simulación, ya sea combinando el APW con la depolarización o la hiperpolarización con el APW, lo que trae como consecuencia que, al cambiar las condiciones externas 'APW' y el tipo de excitación eléctrica, se modifique la selectividad de la membrana, su permeabilidad y características generales obteniéndose distintos potenciales de reposo, potenciales de acción, etc.

Una comprobación sobre el "inestable" comportamiento de la Chara, son las observaciones hechas por el profesor U. Kishimoto y el Prof. Taka Aki Ohkawa (3a) (34) en el sentido de que aislando diferentes ejemplares de Chara en distintas condiciones (APW) y eléctricas obtuvieron diferentes modelos de curvas de respuesta para la depolarización e hiperpolarización en la membrana.

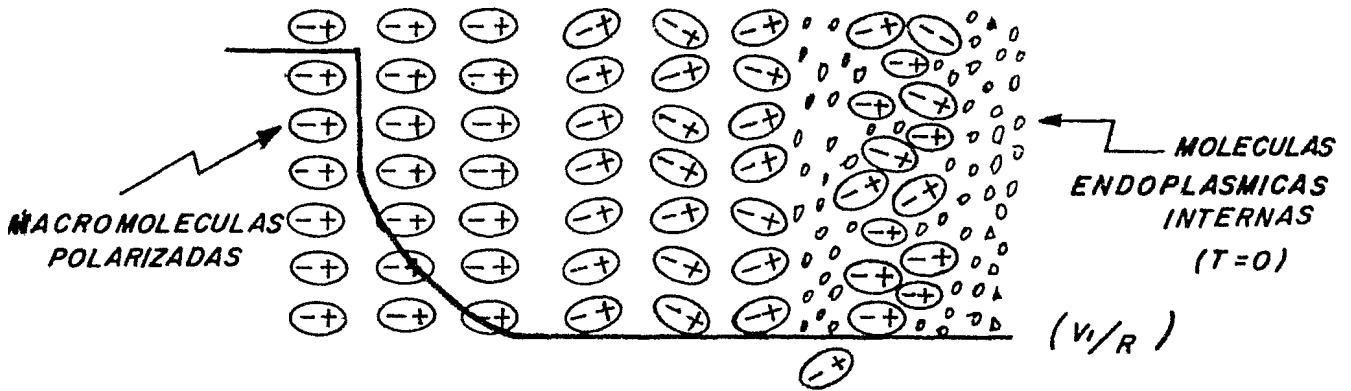
Si se piensa en otros vegetales inferiores como la Nitella, la acetabularia, etc., el resultado es bastante similar si se trata de conocer las características eléctricas utilizando técnicas basadas en las de Hodgkin-Huxley en el axon de calamar.

FIG.IV-6



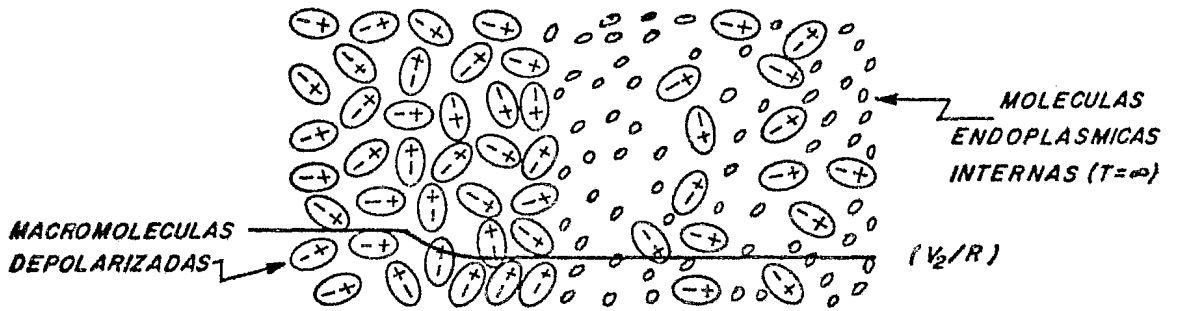
DISPOSICION CLASICA DE APARATOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS ELECTRICAS FUNDAMENTALES DE LA CHARA O NITELLA (32) (34)

FIG. IV-7



ORIENTACION POLAR DE LAS MOLECULAS BAJO  
EL POTENCIAL DE EQUILIBRIO EN EL ALGA CHARA

FIG. IV-7A



ORIENTACION POLAR DE LAS MOLECULAS DURANTE UN POTENCIAL DE EXITACION EN ALGUNA CHARA. LAS LINEAS  $V_1$  Y  $V_2$  CORRESPONDE AL POSIBLE COMPORTAMIENTO DEL POTENCIAL ELECTRICO A TRAVES DE LA MENBRANA PROTOPLASMICA (32)

De las figs. (IV-7) y (IV-7a) se deduce que al estimular eléctricamente la membrana, se depolarizan sus macromoléculas dando como resultado una desorganización en el transporte de sustancias y -- elementos hacia el interior de la célula, y además que el poten-- cial de equilibrio decrezca hasta casi cero (34).

D).- Comportamiento de los iones durante la excitación.

Según los investigadores Uichiro Kishimoto y Mizuguchi (32), en la membrana del alga Chara Corallina, durante el estímulo eléctrico, los iones  $K^+$  y  $Cl^-$ , salen muy rápido de la membrana, disminuyendo considerablemente su concentración original, y otros iones-- como el  $Na^+$ ,  $Ca^{++}$  y  $Mg^{++}$  tienden a entrar a la membrana. Este hecho puede confirmarse evaluando experimentalmente los gradientes-- de concentración, de cada uno de los iones antes y después de haberse aplicado el potencial de excitación, así como sus potencia-- les electroquímicos, que necesariamente son distintos a los poten-- ciales de equilibrio individuales que originalmente tenía cada ión. Las trayectorias de los iones principales, debidas a los gradien-- tes de concentración pueden obtenerse experimentalmente haciendo -- uso de isotopos.

Potencial de Umbral.

Se define como potencial de umbral a la mínima intensidad de vol-- taje capaz de provocar una respuesta por parte de la membrana, y -- aparece en algunos textos bajo el nombre de limen o nivel crítico. La membrana biológica independientemente de su naturaleza animal -- o vegetal posee un determinado potencial de umbral, el cual depen-- de de la especie vegetal y de la estación del año (32), así, por --

ejemplo, algunas algas como la Chara, muestran significativos cambios en la mayoría de las características eléctricas. La razón de este comportamiento es que según las observaciones realizadas por los investigadores Kishimoto y Akbori (34)\*, la concentración de componentes no es la misma.

El potencial de umbral, en la biofísica vegetal es utilizado como un útil parámetro de referencia, para el análisis del mecanismo de excitación en la membrana biológica.

#### Potencial de acción y Potencial de reposo.

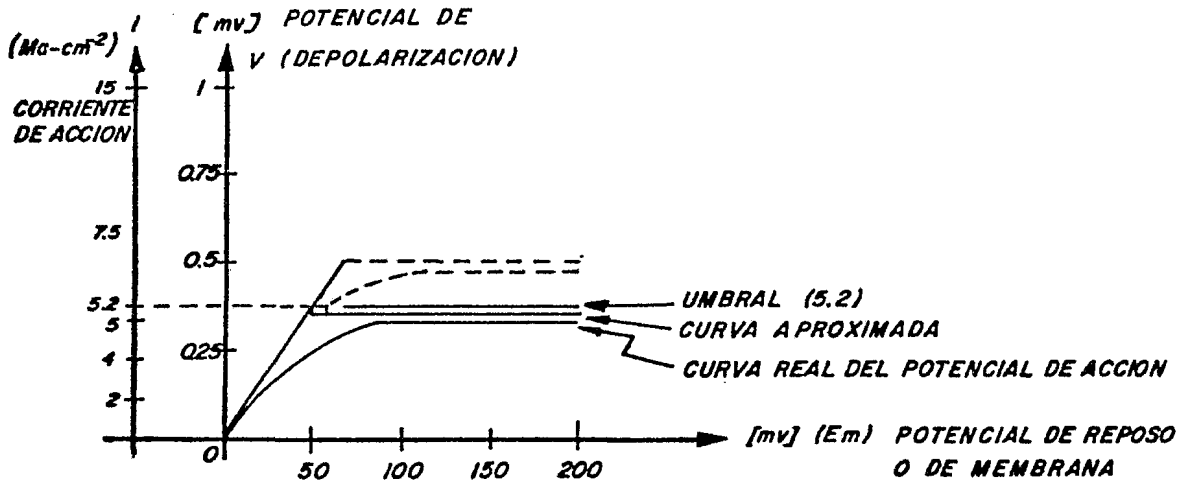
Los cambios en el potencial de membrana y en la corriente de membrana puede conseguirse mediante un estímulo capaz de producir -- un potencial de acción, es decir depolarizando la membrana desde el potencial de reposo hasta el umbral.

En muchos de los estudios realizados en la biofísica vegetal, después de obtener el potencial de acción y definir el de umbral, se procede a dar dos excitaciones o estímulos: sub-umbral y supra-umbral.

El estímulo subumbral permite determinar el valor de la corriente y potencial de depolarización, por ejemplo, en el alga Chara, para un estímulo sub-umbral, muestra gráficamente una corriente y un potencial de depolarización con valor constante comprendido entre - 50 (mv) y 60 (mv) para un cierto APW, fig. (IV-8).

(\*) Kishimoto realizó sus investigaciones, recogiendo especímenes de Chara y Nitella en diversos lagos del Japón y en distintos meses.

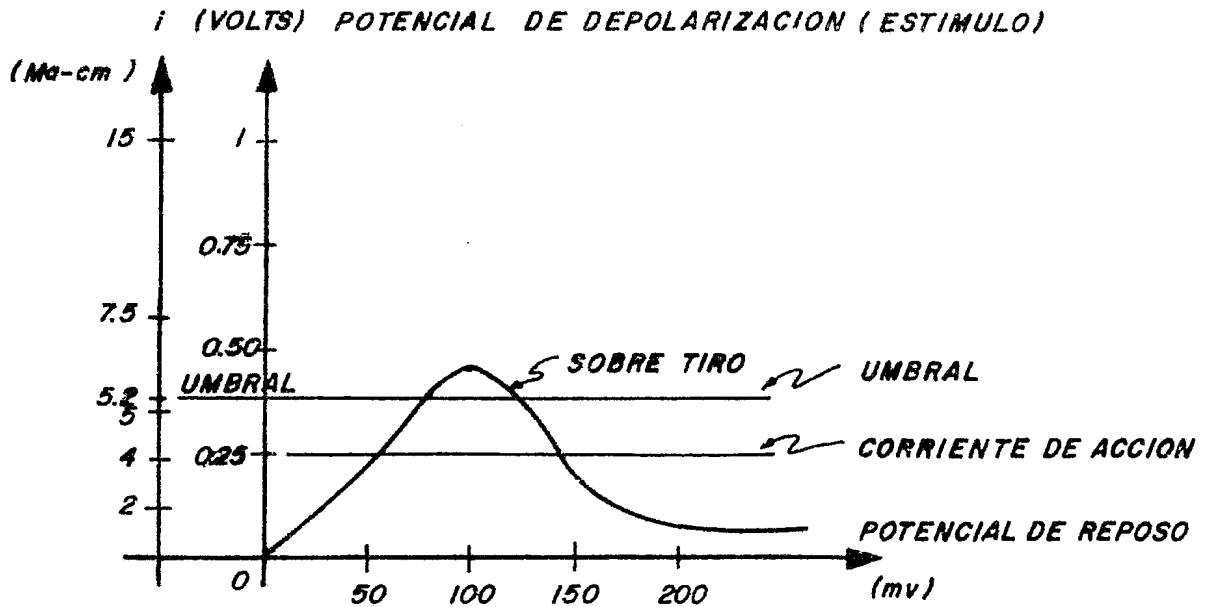
FIG IV-8



RELACION ENTRE EL POTENCIAL DE DEPOLARIZACION Y EL DE REPOSO EN EL ALGA CHARA PARA UN POTENCIAL DE POLARIZACION DE 60 (mv) Y UN POTENCIAL DE REPOSO DE 54 (mv) (32)



FIG. IV-8a



COMPORTAMIENTO DE LA MEMBRANA DE LA CHARA PARA UN ESTIMULO SUPRA UMBRAL CON UN POTENCIAL DE ACCION MAYOR AL DE LA FIG. IV-8 (32)

Cuando se aplica un estímulo supra-umbral a la misma célula de Chara, aparece un sobretiro, que aumenta el potencial y corriente de depolarización, de forma proporcional al voltaje aplicado, así --- cuando el potencial aplicado es de 0.4 volts (aprox), el potencial de reposo será de 100 (mv) fig. (IV-8a).

### Conductancia y Capacitancia en la Membrana Biológica.

#### A).- Conductancia y resistencia.

La conductancia definida como la propiedad que poseen las sustancias de permitir el paso de corriente eléctrica, tiene un valor inverso al de la resistencia, siendo su unidad el (Mho) .

Se utiliza generalmente en la Biofísica vegetal y en otros tópicos de la Bioingeniería la conductancia en lugar de la resistencia, aunque también es utilizado el concepto de resistencia.

La razón por la cual muchos autores utilizan la conductancia en lugar de la resistencia, se debe a que al existir una gran selectividad y una permeabilidad variable en la membrana, éste sistema componente, no se comporta de forma análoga a la resistencia eléctrica común, sino que viene siendo una resistencia eléctrica capaz de variar el flujo eléctrico y seleccionarlo en el tiempo.

Para el desarrollo de este trabajo, se aplican tanto la conductancia como la resistencia, dependiendo de los objetivos planteados por el capítulo V.

Simbólicamente la conductancia sería:

$$G = \frac{1}{R} \quad (IV-16).$$

Cada ión tiene su conductancia en la membrana, y la membrana por tener un potencial de reposo (o de membrana) tiene su propia conductancia (gm), la cual puede conocerse a partir de la resistencia. La resistencia de la membrana del alga Chara es variable y depende de los siguientes factores (34):

- a).- La época del año.
- b).- La concentración de sales de KCL, NaCL ó MgCL<sub>2</sub>, en la solución externa.
- c).- La excitación eléctrica.

Explicación:

A).- La época del año como se indicó anteriormente, influye no solo en la resistencia, sino también en el potencial de acción y en el de reposo, así, se ha determinado que por el mes de Septiembre, el potencial de acción se dispara al disminuir la resistencia de membrana (Rm), y aumenta hacia el mes de mayo.

B).- Según U. Kishimoto y Taka-AkiOhkawa (38) (35), cuando aumenta la concentración de sales (NaCL, KCL, CaCL<sub>2</sub> o MgCL<sub>2</sub>) en la solución externa no existiendo otras substancias originalmente, disminuye el potencial de reposo y el potencial de acción, disminuyendo la resistencia de membrana, probablemente porque el Ca<sup>++</sup> (ión calcio) no está presente.

C).- Durante la excitación eléctrica, la resistencia de membrana disminuye considerablemente desde 100 K $\Omega$  /cm<sup>2</sup> en su solución original hasta aproximadamente 10 K $\Omega$  /cm<sup>2</sup> o menos, cuando la excitación es larga (con duración mayor a 0.5 segs). Si la excitación es corta (menor a 0.5 segs), la resistencia Rm alcanza 50  $\times$   $\Omega$  /cm<sup>2</sup>. -

Resultados similares se encontraron en la Nitella (35).

B).- Capacitancia en una célula de Chara.

Una célula vegetal de geometría regular, como la Chlorella (fig. - II-6), Chara figs (II-7) y (II-8) ó Nitella (fig. (II-10), puede - considerarse que tiene sus cargas externas de naturaleza mecánica como uniformemente distribuidas sobre la superficie, como se muestra en la fig. (No.5).

Si existe una carga neta en alguna región cercana a la membrana, - entonces habrá una diferencia de potencial eléctrico entre dos -- puntos de esa región, que se relaciona con la capacitancia de - - acuerdo a la siguiente expresión:

$$Q = C \Delta E \quad (IV.17)$$

en donde:

Q = carga transportada (coulombs)

C = capacitancia (u farads)

$\Delta E$  = dif. de potencial (volts)

la ec. (IV-17) puede escribirse también como:

$$Q = C (E_f - E_o) \quad (IV-17a)$$

En donde:

$E_f$  = potencial final

$E_o$  = potencial inicial

La capacitancia (C) en la mayoría de las membranas biológicas tienen las mismas unidades y se refieren a una unidad de área (33), - ésto es:

$$C = (qf \times \text{cm}^2) \quad (\text{IV-17b})$$

En la biofísica vegetal, la capacitancia no se refiere a la intensidad de campo eléctrico, sino al potencial (E), en una región -- considerando la geometría particular de la célula. Viendo nuevamente la fig. (IV-5), se tendrá la siguiente nomenclatura:

Qr = Carga por unidad de volumen en la membrana celular

Ca = Capacitancia por unidad de área en la membrana --  
celular.

Ce = Concentración de cargas por unidad de volumen en  
la membrana celular.

Vc = Volumen de la célula cilíndrica.

A = Area del cilindro.

Sq = Carga por unidad de masa en el cilindro

Con éstos parámetros, se procederá a determinar la expresión que -- determina la capacitancia en una célula cilíndrica.

De la ec. (IV-17) se tiene:

$$\Delta E = \frac{Qv}{Ca} \quad (\text{IV-17c})$$

Definiendo cada variable en el denominador y numerador:

$$Qv = Vc \times Ce \times Sq \quad (\text{IV-17d})$$

$$Ca = A \times Ca$$

Unidades:

$$Qv = [ \text{cm}^3 ] \times [ \frac{\text{Mol}}{\text{cm}^3} ] \times [ \frac{\text{Coul}}{\text{Mol}} ] = [ \text{Coul} ]$$

Como:

$$Vc = \frac{d^2 \pi}{4} \times h \quad y \quad Ac = 2\pi R h$$

Se tiene:

$$Q_v = \frac{d^2 T T}{4} \times h \times C_e \times Q_c \quad (\text{IV-17d}')$$

$$A_c = 2 T T R h$$

Sust (IV-17d') en (IV-17c) se tendrá:

$$\Delta E = \frac{R \times C_c \times Q_c}{2 C_a} \quad (\text{IV-18})$$

La ec (IV-18) representa la ec de la capacitancia en una membrana cilíndrica.

La tabla (IV-1) da un conjunto de valores promedio de las células esféricas y cilíndricas, éstos valores corresponden a variables - que intervienen en las características eléctricas de la membrana.

Propiedad física o geométrica	Célula esférica	Célula cilíndrica.
Radio	3 $\mu$ /m	Frontal 500 $\mu$ /m a 2 mm
Longitud	-	2 a 5 (cm)
Dif. de Po- tencial a- través de- la membra- na	-100 (mv)	-100 (mv)
Capacitan- cia	1 a 2 $\mu$ f	1 a 2 $\mu$ f
Resisten-- cia		Variable entre: 100 y 10 $\left[ \frac{K\Omega}{cm^2} \right]$

Tabla (IV-3) Propiedades físicas y geométricas de la membrana celular (34).

Bajo condiciones normales, en la célula, la carga total de los cationes es compensada por otra carga de aniones, de número aproximadamente igual; así por ejemplo, al entrar un número 'n' de aniones a la célula otros tantos cationes son liberados a través de la membrana, manteniéndose el equilibrio. Cuando la neutralidad es alterada bajo condiciones de excitación, cambian las características eléctricas de la membrana, y la célula suele ser perjudicada.

e).- Influencia de la temperatura en la membrana de la Chara.

Para terminar este capítulo, se hablará del comportamiento eléctrico de la membrana cuando la temperatura es una variable. La depolarización de la membrana, no es solo función del potencial de excitación, sino también de la temperatura, lo cual se demostró en base a las experiencias del prof. U. Kishimoto (32), y otros investigadores, para demostrarlo se hicieron evidentes los dos hechos siguientes:

a).- Se comparó la resistividad inicial del APW, antes de la excitación, con la resistividad final del APW, después de la excitación en el alga Chara.

b).- Al variar la temperatura de 5°C a 32°C, el flujo de corriente cambió proporcionalmente después de depolarizar la membrana a diferentes temperaturas.

Desde el punto de vista físico-matemático, la relación proporcional entre la temperatura y la resistividad en una membrana de Chara es similar a la que existe en otros materiales orgánicos e inorgánicos, por lo que es posible utilizar la ecuación de la resistividad eléctrica, que es:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha (T - T_0)) \quad \text{IV-19).$$

En donde:

$\rho$  = Resistividad total

$\rho_0$  = Resistividad de referencia a una temperatura de referencia  $T_0$ .

$T$  = Temperatura final.

$\alpha$  = Coeficiente de temperatura.

Con las siguientes unidades:

$\rho = (\text{ohm-cm}) \approx 100 \text{ K}\Omega \text{ a } 15^\circ\text{C}$

$\alpha = ^\circ\text{C}^{-1}$

$T = ^\circ\text{C}$

Los rangos de temperatura significativos para la membrana del Alga Chara, se encontraron entre  $10^\circ\text{C}$  y  $32^\circ\text{C}$ , abajo de  $10^\circ\text{C}$  la célula no se excita y su respuesta es nula, en tanto que a más de  $32^\circ\text{C}$  la célula muere (34).

La conductancia de la membrana en la chara aumenta al disminuir la resistencia, y ésta a su vez varía en función del potencial de depolarización y la temperatura. En la investigación, la depolarización en la chara se aplica inicialmente para una temperatura determinada y luego para otra, siendo posible conocer las características y comportamiento de la célula para distintas magnitudes de estímulo.

En el capítulo V se discutirá más a fondo la influencia de la temperatura en el potencial de depolarización y en el umbral, ya que éstos aspectos están muy relacionados con la simulación analógica.



Conclusiones del Capítulo IV.

Es posible analizar el comportamiento de la membrana del alga Chara considerando su capacitancia, conductancia y Fem como un circuito  $R_c$ , siempre y cuando ese circuito varíe la corriente al variar la temperatura externa y sea capaz de responder a un determinado potencial. En el capítulo V, se mostrará el posible circuito, así como la metodología para llevar a cabo un estudio sobre las principales características eléctricas de la Membrana de la Chara.

CAPITULO V

Comportamiento y Simulación de la Membrana del Alga Chara.

V-1).- Modelado y Simulación de la Membrana en Vegetales Inferiores.

a).- Concepto de modelo y simulación.

b).- Modelado y simulación en la membrana de la chara.

c).- Analogías Eléctricas aplicadas a la membrana de la chara australis.

V-2).- Identificación de variables biológicas y eléctricas para la excitación en la membrana del alga chara.

a).- Clasificación de variables biológicas y eléctricas.

b).- La FEM en la membrana de la chara.

c).- Modelo Analógico de la membrana de la chara para condiciones de excitación

d).- Comportamiento de la membrana durante una excitación -- senoidal.

e).- Condiciones y valores teórico - experimentales en la -- simulación con un circuito analógico del efecto interno dal en el alga chara.

f).- Antecedentes químicos y eléctricos previos al cálculo - de la variación de  $R_s$  ( $R_l$ ) y la corriente.

g).- Relación entre corriente y potencial durante el cambio- de temperatura.

V-3).- Determinación de los flujos iónicos externo e interno en el- circuito analógico.

a).- Desarrollo matemático del modelo de simulación.

b).- Resumen de los aspectos fundamentales de la teoría de - control en la membrana de la chara.

Conclusiones y Apertaciones.

Capítulo V. Comportamiento y Simulación de la membrana del alga chara.

V-1).- Modelado y simulación de la membrana en vegetales inferiores.

V-2).- Identificación de variables biológicas y eléctricas para la excitación en la membrana del alga chara.

V-3).- Determinación de los flujos iónicos externo e interno en el circuito analógico.

Conclusiones y Aportaciones

Referencias Bibliográficas

V.1).- Modelado y simulación en vegetales inferiores.

Objeto: Para este capítulo existen dos propósitos fundamentales:

1<sup>o</sup>.- Identificar plenamente la diferencia entre modelado y simulación estableciendo su interrelación.

2<sup>o</sup>.- Desarrollar una metodología propia en el análisis de las características eléctricas de la membrana y sus variaciones con respecto a la temperatura.

Introducción.- La membrana biológica vegetal debido a la gran versatilidad que presenta, requiere por un lado de un análisis preciso sobre cada una de sus facultades, y por el otro el conocimiento necesario para obtener un modelo generalmente simplificado, y con éste desarrollar su simulación. En las condiciones mencionadas, se pueden presentar dos casos del comportamiento de la membrana Chara:

a).- Sin excitación.

b).- Bajo excitación

En este estudio, el enfoque principal del modelo representativo de la membrana se realizará sobre las condiciones de excitación, considerando la Fuerza electromotriz que desarrolla y estudiando resumidamente los conceptos de modelado y simulación.

A).- Concepto de Modelo y Simulación.

Un modelo es la representación de una parte de la naturaleza

o de un objeto real o ficticio, es decir, se puede describir el -- comportamiento de un sistema, el cual puede ser de naturaleza biológica, química, eléctrica, etc. (36). Tal descripción, puede hacerse mediante términos orales, numéricos, simbólicos, gráficos, esquemáticos, etc. De aquí se deduce que los modelos puedan ser de tipo -- matemático, físico, gráfico o esquemático.

Los modelos en Ingeniería son generalmente predictivos, y en base a ellos es posible determinar o suponer situaciones futuras que serían difíciles de reproducir en el objeto real. La representación mate-- mática es un medio de predecir en forma numérica fenómenos natura-- les, así como procesos y comportamiento de sistemas componentes o dispositivos contruídos por el hombre.

Simulación.- Cuando el sistema real está sujeto a manipula-- ciones difíciles de realizar, demasiado costosas o imprácticas, la-- operación de un modelo (ó simulación), puede estudiarse para dis--- tintas condiciones de entrada y con ello inferirse las propiedades concernientes al comportamiento del sistema o subsistema real (36).

La simulación es, esencialmente una técnica que se puede en-- focar a la construcción de modelos con la finalidad de predecir el-- comportamiento de los sistemas antes de ser contruídos; o antes -- de funcionar, en el caso de los tejidos vegetales sería, reproducir los efectos en la membrana para comprender su funcionamiento. Es - decir, probar la veracidad del modelo que tanto coinciden los valo-- res simulados con los datos reales conocidos, si es que éstos están disponibles y que tan exactas son las predicciones del comportamien-- to del sistema real hechas en función del modelo de simulación.

Los experimentos o estudios tomados de la simulación, pueden proporcionar resultados cualitativos, cuantitativos, o ambos (36). Cuantitativos, se refieren, a la obtención de datos exactos que -- pueden ser medidos.

Los cualitativos son datos aproximados, representativos del comportamiento del sistema componente; generalmente en los modelos se consideran sólo los efectos de mayor importancia y los efectos - de tipo cualitativo.

B).- Modelado y simulación en la membrana de la chara.

En cualquier vegetal superior o inferior, no puede hablarse - de un modelo único, ni de una sola clase de simulación, dependen -- del tipo de proceso y especie vegetal, los cuales, parten de un pro pósito específico, por éstas razones, el punto de vista de un inves tigator con respecto a otro no es por lo general el mismo.

Para los fines propuestos de evaluar y conocer el comporta-- miento eléctrico de la membrana del alga chara bajo condiciones de excitación eléctrica y con variaciones de temperatura, se han toma-- do en cuenta los antecedentes y fundamentos de la teoría de control aplicada a la membrana vegetal conceptos ya descritos en el capítu-- lo (I).

Cuando se habló en la sección (I-4a) sobre el mecanismo de - la designación biológica y los elementos tradicionales de un siste-- ma componente, no sería posible definir claramente los elementos de un sistema de control tradicional, ya que esos elementos en térmi-- nos biológicos son sustancias orgánicas que hacen las veces de re-- ceptor, selector o modulador, y además, son capaces de intercambiarse, de tal forma que la subs tancia moduladora, sería selectora y -

visceversa, como tal mecanismo conduce a un sistema muy complejo - de índole bioquímica no podría darse un punto de vista ingenieril - adecuado ó satisfactorio, pero en cambio, si es factible, recurrir a un sistema equivalente al de las substancias orgánicas basado exclusivamente en el cambio regulado de las condiciones externas originales y las condiciones finales o respuesta por parte de la membrana para ese cambio regulado.

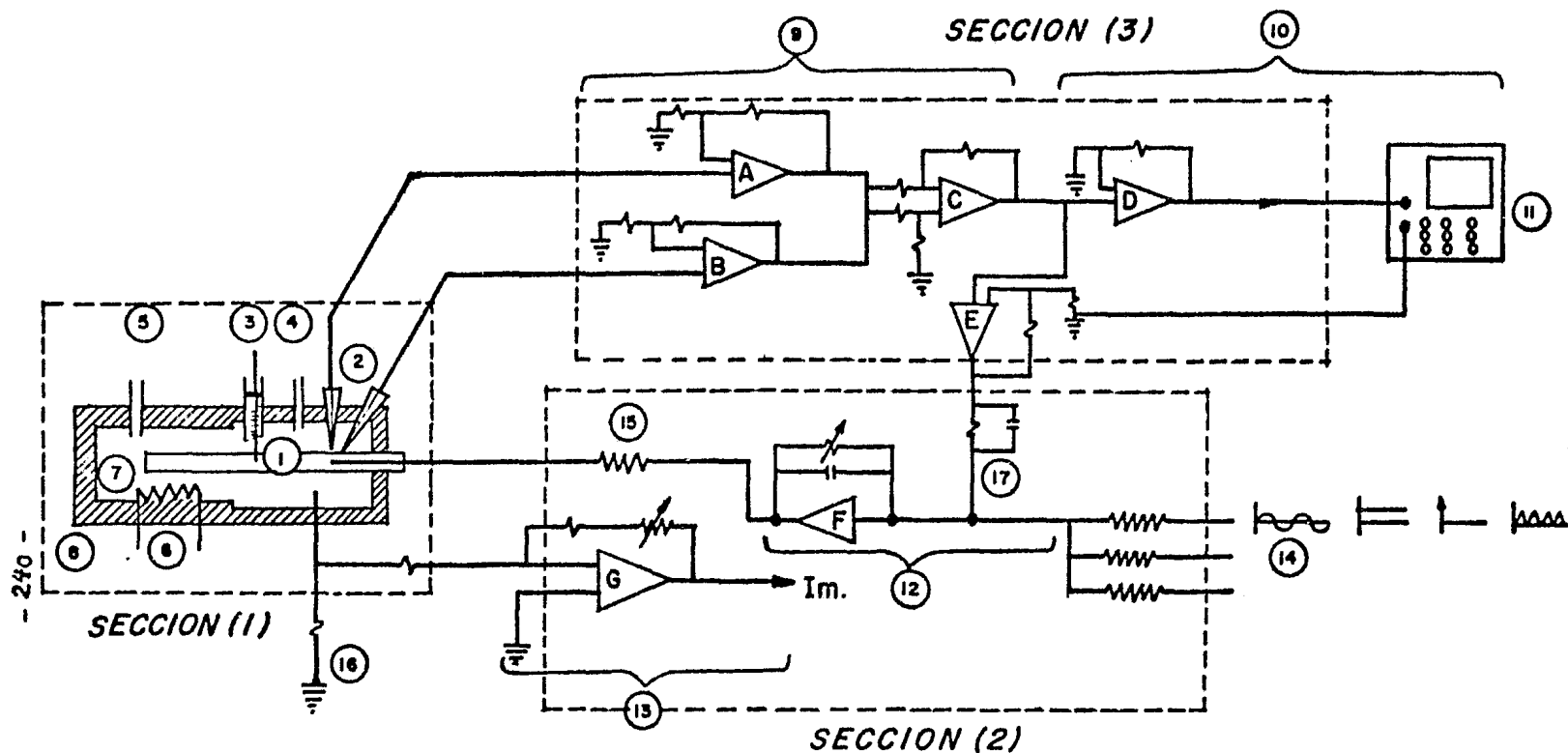
Es decir se trata de un sistema de entrada - salida con su respectiva realimentación.

Uno de los sistemas de experimentación más versátiles que utilizan éste principio se debe al profesor Uichiro Kishimoto (34), quien ha realizado diversas investigaciones sobre los procesos y fenómenos de mayor interés biológico en las membranas de la chara, la Nitella y otras algas.

Partiendo de los datos, estudios y recomendaciones de los investigadores U. Kishimoto y Taka-Aki Ohkawa, se obtendrá un modelo analógico que permita evaluar el comportamiento eléctrico de la membrana de la Chara bajo diferentes condiciones de temperatura y potencial.

La evaluación del comportamiento de la membrana para variaciones de potencial y temperatura se efectuará en 2 fases:

- 1).- Estudiando el procedimiento para el estudio de la membrana de Kishimoto - Ohkawa.
- 2).- Desarrollando una metodología distinta a la de Kishimoto-Ohkawa en lo que se refiere al análisis del circuito equivalente de la membrana.



**FIG.(V-1).- ARREGLO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE LAS CARACTERISTICAS ELECTRICAS FUNDAMENTALES DEL ALGA CHARA POR MEDIO DE LA EXITACION ELECTRICA, UTILIZADO Y DESARROLLADO POR EL PROF. U. KISHIMOTO (35) (38) LA NOMENCLATURA POR SECCIONES ES LA SIGUIENTE:**

**SECCION (1)**

- 1.- ESPECIMEN DE ALGA CHARA
- 2.- ELECTRODOS DE Ag - Ag CL
- 3.- INYECTOR DEL PUENTE DE SAL (KCL)
- 4.- ENTRADA DEL AGUA APW
- 5.- SALIDA DEL APW
- 6.- REGULADORA DE TEMPERATURA DEL ARW
- 7.- APW
- 8.- PARED DEL DEPOSITO

**SECCION (3)**

- 9.- MODULOS PREAMPLIFICADORES
- 10.- MODULOS DE AMPLIFICACION Y REGISTRO DE POTENCIAL
- 11.- OSCILOSCOPIO

**SECCION (2)**

- 12.- MODULO AMPLIFICADOR DE LA SENAL DE ENTRADA
- 13.- REGISTRO DE CORRIENTE
- 14.- MANDOS Y GENERADOR DE SEÑALES
- 15.- ALAMBRE AXIAL
- 16.- RESISTENCIA AUXILIAR 10052
- 17.- PUNTO SUMA



Modelo de Hodgkin - Huxley adaptado al proceso de excitación de la -  
Chara Australis.

Objeto.- Mostrar y dar los lineamientos generales de experi-  
mentación y estudio de las características eléctricas para el alga -  
Chara Australis, basadas en las experiencias de Hodgkin-Huxley.

Introducción.- El modelo de Hodgkin - Huxley y la técnica de  
K. S. Cole (33) aplicados a la neurona de calamar, fué aplicada al -  
terreno vegetal por vez primera hacia 1963, extendiéndose y perfec-  
cionándose hasta mediados de los años 70. La técnica de K. S. Co-  
le originalmente consiste en obtener y retener el voltaje del axon  
por medio de un circuito con realimentación, en el cual se pueden -  
observar las variaciones de corriente cuando existe un voltaje apli-  
cado, de esta manera se pueden conocer los mecanismos iónicos que -  
intervienen en la membrana. Esta técnica adaptada a los vegetales  
inferiores, como se mencionó, no difiere en esencia significativa-  
mente, salvo en las tres consideraciones siguientes:

- 1)- Temperatura
- 2)- APW
- 3)- La especie de alga.

Temperatura. Una de las variables más importantes para este  
estudio es la temperatura, que como se verá, influye en las varia-  
ciones de voltaje y corriente, así como en los procesos biológicos-  
de la célula; por estas razones es menester evaluarla cuantitativa y  
cualitativamente (35).

APW.- El APW o artificial Pond Water, es como se mencionó --  
en el capítulo IV, un ambiente biológico artificial para el vegetal;

necesario para optimizar la experimentación (35).

La especie de Alga.- En este caso, no se precisa de una expli  
cación mayor porque la elección de una especie vegetal u otra depen  
de del interés en particular, datos, etc.

#### Medición y Control Experimental del Alga Chara Australis.

Para obtener un estudio general sobre las características - -  
eléctricas de la membrana del alga Chara Australis, el prof. U. Kis  
himoto (35), determinó un sistema de experimentación que consta de  
3 partes principales:

- 1).- Sección de análisis y experimentación del especimen (Sec. -  
(1)).
- 2).- Sección generadora de señales (Sec. (2)).
- 3).- Sección de preamplificación y registro (Sec. (3)).

Estas tres secciones y su disposición se muestran en la fig.  
(V-1).

Procedimiento de preparación en la sección de análisis y experimen--  
tación del especimen.

La llamada sección (I) o sección de especimen tiene por obje--  
to el mantener las condiciones ambientales químicas (APW) y de tem--  
peratura, necesarias para llevar a cabo la experimentación.

Observando el extremo izquierdo de la fig. (V-1), el comparti--  
mento cilíndrico indicado en el núm. (8), contiene en su interior -  
una solución de APW (7), circundando al especimen del Alga Chara --  
(1), a éste especimen se le introduce un microelectrodo de platino--  
tungsteno y un fino alambre conectado al módulo de control de am-

plificación de la señal de entrada, denominado alambre axial (15). En el exterior de la célula de Chara, se colocan los electrodos de Ag. AgCL (2), una vez que se ha inyectado a la célula una sustancia denominada "puente de sal". El puente de sal (3), es KCL en éste caso y se utiliza para facilitar la medición del potencial de membrana o equilibrio. Puede observarse también, un pequeño regulador de temperatura, ajustable entre 5 y 40°C, (6), dicho control está compuesto de un enfriador y un calentador, cuya finalidad es la alteración de las condiciones del APW, para analizar el comportamiento eléctrico de la membrana.

El APW, se introduce por el receptor (4) y se desecha por el orificio de salida (5).

#### Procedimiento de Preparación en la sección generadora de señales (Sec. (2)).

La sección (2) es propiamente lo que constituye la realimentación del sistema de experimentación, por tener el punto suma (17), o punto de unión entre la sección (3), y el mando externo de las señales de excitación, éstas señales son producidas por un generador de funciones (14), el cual permite entradas escalón, impulso, senoidal, o diente de sierra intermitente; en Japón se han utilizado todas estas señales, así como una combinación de ellas.

Cuando se aplica una entrada producida por ejemplo, por una función escalón, la señal es amplificada en (F) (véase fig. (V-1), teniendo un balance máximo de 130 V a la salida y una ganancia (Hs), no mayor a 2000.

El amplificador (F), se une al alambre axial (15), el cual -- conduce la corriente eléctrica hasta la membrana del alga Chara, y - de ésta a un electrodo aterrizado a una resistencia de 100 (16). La corriente que sale de la membrana al pasar por una resistencia, - determina un voltaje, éste voltaje se mide con un amplificador (G) y por medio del cual es posible obtener un registro de corriente en la membrana Im.

Características y Preparación de la Chara Australis para ésta experimentación.

El espécimen de Chara requiere de cierta preparación previa y de - - ciertas características propias para cumplir satisfactoriamente con las pruebas a las que se le somete, tales características y preparación previa son las siguientes:

A).- Características Geométricas.

Longitud: 3 - 5 [cm]

Diámetro: 500 - 600 [ $\mu$ m]

B).- Características Biológicas.

Célula madura y viva.

C).- Características de la Preparación Química Previa (APW).

a).- El APW se compone de: KCL,  $KNO_3$ ,  $NaH_2PO_4$ , NaCL, -  
Ca  $(NO_3)_2$ ,  $MgSO_4$

Nota:

Estas substancias son comunes de encontrar en la mayoría de las APW, pero difieren en cantidad.

b).- P.H. = 6.8

c).- El alga Chara se somete a un baño externo continuo de solución APW, éste baño por chorro de presión se aplicó a una velocidad de 3 a 5 ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ), para purificar y mantener al espécimen en las condiciones deseadas (33).

Procedimiento de preparación en la sección de Preamplificación y Registro (sección 3).

La sección (3) requiere de menor meticulosidad, ya que es una conexión de sumadores (A) y (B) utilizados para la preamplificación y registro del potencial de membrana. Los preamplificadores (A) y (B) son en esencia dos circuitos integrados conectadas a las terminales de salida de los electrodos Ag - AgCl y platino - tungsteno, éste primer arreglo de pre-amplificadores por tener un potencial de salida pequeño, se une a un 3er. amplificador diferencial (C) que permite aumentar el potencial original, siendo la ganancia total -- (HCs) en los pre-amplificadores igual a la unidad, el propósito de la ganancia unitaria es invertir el signo de la señal resultante y mantener el equilibrio entrada - salida. La salida del último preamplificador de registro (D) conectado a un graficador y/o a un osciloscopio \* (34). El preamplificador (C) constituye la parte principal de la sección (III) y se conecta al punto suita (15) por medio de un inversor (E), también de ganancia unitaria.

C).- Analogías Eléctricas de la Membrana de la Chara Australis.

Objeto.- Desarrollar un circuito eléctrico que simule las propiedades eléctricas de la membrana del alga Chara.

Introducción.- A partir de los antecedentes ya comentados y estudiados sobre las características eléctricas de la membrana en el Capítulo IV, se obtendrá un conjunto de elementos eléctricos que intervienen en el sistema de experimentación de U. Kishimoto, el conjunto de elementos eléctricos conduce al establecimiento de un circuito eléctrico equivalente que permite explicar en forma satisfactoria un fenómeno o un proceso biológico relacionando las propiedades u características de la membrana del Alga Chara.

Diversos autores de renombre como Spanswick (22), T. Ohkawa -- (34), Fenson (23) y otros apoyan esta idea y por tal motivo es posible realizar una simulación en este sentido.

Variables consideradas para el proceso de simulación en la membrana de la Chara.

En la sección (I-2c), se bosquejó la forma en que podría analizarse un sistema biológico desde el punto de vista de la teoría de los sistemas electromecánicos, señalándose algunos ejemplos de aplicación práctica, como el flujo sanguíneo en la arteria aorta, y la difusión de fluidos en distintos medios; siguiendo éstos lineamientos, conviene estudiar la naturaleza de las variables que intervienen en la clasificación elemental. Para ello se recomienda una breve revisión sobre el concepto y clasificación de las variables en un sistema dinámico.

Las analogías eléctricas aplicadas a determinados procesos o propiedades de la membrana biológica no son realizadas en términos

de variables heterogéneas, sino únicamente en términos eléctricos.

Es decir, si por ejemplo, se desea dar una explicación acerca de la bomba electrogénica en un alga 'X', es más conveniente utilizar las características eléctricas de la membrana y representarla como un circuito, que referir el sistema membrana a términos exclusivamente biológicos, o mezclarlas con un sistema no eléctrico (hidráulico, mecánico), etc. Esta observación permite evitar el establecer una analogía entre las p<sub>er</sub>variables y t<sub>rans</sub>variables de un sistema y otro; como ocurriría con la tensión eléctrica y la 2a. Ley de Newton; entonces sólo se manejan términos análogos con unidades idénticas.

V-2).- Identificación de variables biológicas y eléctricas -- para la excitación en la membrana del alga Chara.

Objeto.- Obtener una secuencia lógica de comparación entre las propiedades electrobiológicas de la membrana de la Chara y las propiedades de los elementos eléctricos más usuales y sencillos, como la resistencia, fuentes de voltaje, etc.

Introducción.- De acuerdo a las recomendaciones y observaciones de los autores japoneses ya mencionados (34) (35), es posible analizar el comportamiento eléctrico de la membrana del alga Chara u otro tipo de especimen, bajo diversas clases de condiciones siempre y cuando la(s) analogía(s) consideraciones y consecuencias, contribuyan de alguna forma a explicar el comportamiento de las funciones de la membrana biológica.

(A).- Clasificación de Variables Biológicas y Eléctricas.

Para obtener un circuito analógico que represente el comportamiento de la membrana de la Chara, al ser sometida a una --

excitación eléctrica, resulta más sencillo, clasificar las variables biológicas como el flujo iónico, la resistividad del APW, etc., directamente con los elementos eléctricos correspondientes, por medio de una tabulación que además indique brevemente, la relación y representación esquemática de cada uno de ellos; véase la Tabla - - (V-1):



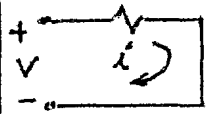
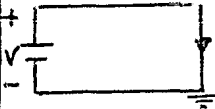

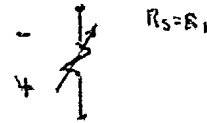
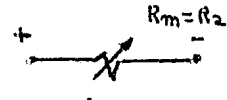
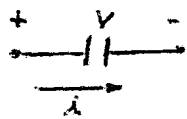
variable asignada	variable asignada	variable eléctrica equivalente	Símbolo de la variable eléctrica equivalente	Representación del elemento eléctrico equivalente.	Observaciones
Flujo iónico	$J_z$	corriente	$i$		-
Potencial de Membrana	$E_m$	Voltaje de referencia (Membrana).	$V_m$		Se considera al pot. de membrana igual al de reposo
Potencial de excitación	$E_v$	Fuente de voltaje aplicado	$V$		Z representa un circuito al cual se le aplica una diferenc. de Pot.
Resistencia de la Solución	$R_s$	Resistencia externa variable.	$R_s$		Esta es la resistencia del APW, y varía con el potencial y/o la temp.
Resistencia de la Membrana	$R_m$	Resistencia de membrana variable	$R_m$		-
Concentración selectiva iónica.	$C$	Capacitancia	$C_m$ $C_m$		La capacitancia en la membrana de la concentración iónica.

Tabla (V.1).- Relaciones Fundamentales entre el sistema dinámico - eléctrico y las propiedades eléctricas de la membrana biológica.

Atributos de la membrana del alga Chara, simplificaciones y observaciones.

- a).- La membrana del alga Chara y muy probablemente la de las otras algas, varían su flujo de corriente al variar la temperatura, de tal forma que no puede establecerse una analogía directa -- entre una variable térmica como lo es la temperatura y la variable biológica asignada correspondiente, de lo cual se concluye que la membrana tiene un sensor termo-electroquímico.
- b).- Otra observación interesante es la capacidad que tiene la membrana vegetal de "amplificar" o "disminuir" una señal producida por procesos fisiológicos. Un caso típico está representado por la fotosíntesis, que hace variar el potencial de membrana cuando el vegetal es sometido a cambios en la intensidad luminosa (17).

Estos comentarios, sobre los atributos complejos de la membrana no implican necesariamente, que no sea posible obtener un circuito analógico ni tampoco excluyen la posibilidad de poder afectar -- por medios eléctricos, electrónicos o mecánicos a ese circuito analógico.

(B) Fuerza Electromotriz en la membrana de la Chara.

Objeto.- Demostrar la presencia de una fuerza electromotriz -- (FEM), durante la excitación eléctrica en la membrana de la Chara, y desarrollar un circuito eléctrico analógico, para reproducir dicho efecto.

Introducción.- El mecanismo biológico capaz de transformar la energía de modo continuo y reversible para asegurar la supervivencia

de una célula vegetal es un sistema realimentado que se encuentra -- hasta en los procesos más elementales. En el caso de la membrana -- biológica, es necesario analizar una parte de ese sistema de reali- mentación cuando se encuentra bajo condiciones de excitación, lo -- cual mostrará la existencia de la FEM, y conducirá a la analogía -- más adecuada para determinar la FEM existente en la membrana de la Chara.

### Discusión.

La membrana biológica de la Chara, como ya se ha visto, tie- ne un comportamiento susceptible de ser analizado cuantitativa y -- cualitativamente por medio de sus variables eléctricas; cuando se- produce una fuerza electromotriz (FEM), que se manifiesta por una - transformación reversible entre la energía eléctrica y la energía - química (35) (37).

La membrana biológica, al poder ser considerada como un conductor - eléctrico, requiere fundamentalmente mantener un gradiente de poten- cial y un suministro continuo de energía para mantener el flujo - - iónico (corriente), al ser sometida a diferentes estados de excita- ción (simulación).

### Excitación y FEM en la Chara.

En el modelo analógico de la corriente iónica pueden repre-- sentarse, las 3 fases que existen después de la depolarización, es- tas fases son: inicial, transitoria y estable posterior:

a).- La fase inicial se refiere al establecimiento del potencial - de reposo o membrana y define la influencia de los iones más- significativos en el APW y otros factores químicos.

- b).- La fase de transición que en la actualidad no ha sido posible determinar plenamente, describe el paso transitorio (en el tiempo) de la corriente del interior de la membrana hacia el exterior, y del exterior al interior, lo cual obedece a un balance relacionado con la polarización molecular en la membrana.
- c).- La fase posterior o de potencial estable, es aquella fase o período representado por el tiempo requerido para que el potencial de acción propagado a través de la membrana decrezca hasta cero, y matemáticamente es igual al lugar geométrico en donde la suma de corrientes (flujos iónicos) es cero, a través de las fases a, b, c, es posible predecir y obtener conclusiones lógicas sobre el comportamiento de la Chara en condiciones de excitación (35).

#### Comportamiento iónico durante la excitación.

Existen dos aspectos complementarios, importantes en las fases a, b, c, de excitación y FEM de la Chara.

1º.- El Dr. U. Kishimoto, ha citado en su obra (34) (35), los trabajos de, otros autores como Safey, Mullins, y Hope, quienes sostienen la teoría de que el ión  $Cl^-$  provoca una corriente (flujo iónico) hacia el interior de la membrana durante la depolarización, manifestada por la salida de amperes. Esta teoría fue descrita utilizando trazadores radioactivos.

2º.- Por otro lado, el ión  $Cl^-$ , resultó también de ser sensible a los electrodos de Ag - AgCl, al comprobar una gran actividad química en el exterior de las membranas de Chara y Nitella cuando se incrementa el potencial de acción.

En lo que respecta al potasio  $K^+$ , puede decirse que éste es el principal responsable de la corriente exterior de equilibrio, hecho que puede verificarse matemáticamente utilizando la 1ª Ley de Fick y la ecuación direccional de Ohm ya estudiadas en el capítulo (IV).

La última corriente por describir brevemente es la corriente transitoria externa, la cual es promovida por diversos cationes internos, entre los que muy probablemente, se encuentran el  $K^+$ ,  $H^+$ , y  $CA^{++}$ . Estas observaciones resumidas por autores japoneses proceden de trabajos desarrollados por Finlay y Custer (38).

#### Modelo Analógico de la Membrana de la Chara para las condiciones de excitación

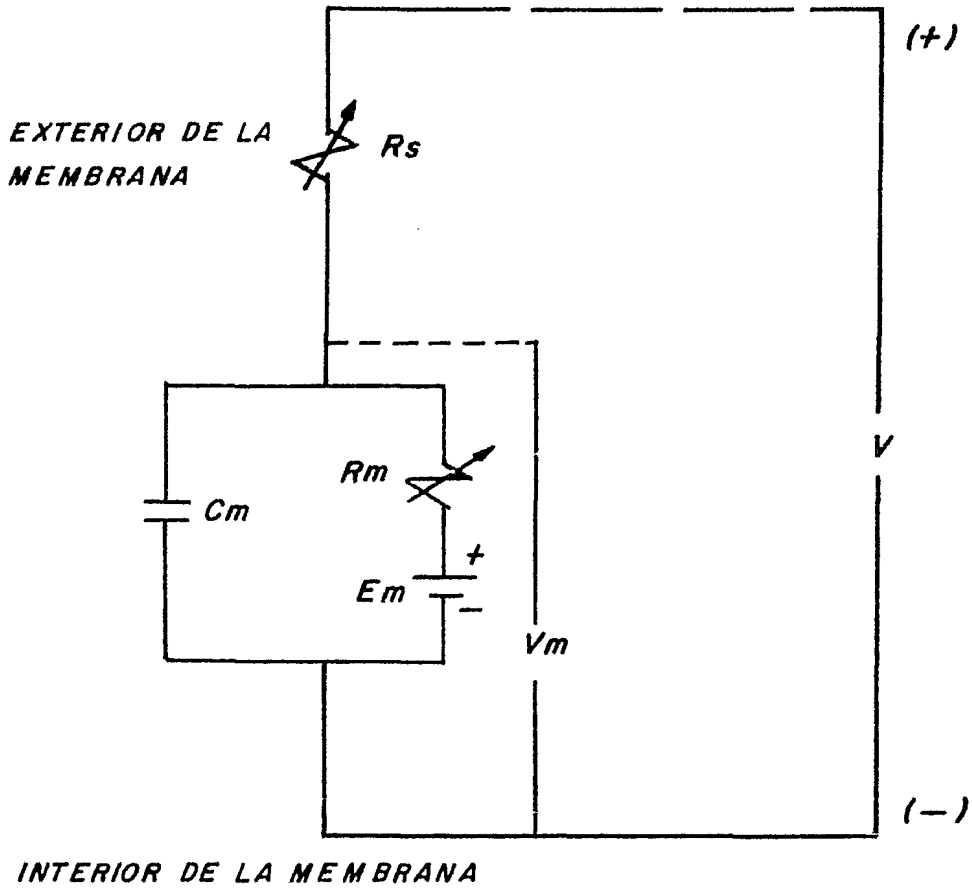
Cuando la Chara se encuentra sometida a una excitación externa variable produciéndose una FEM, la membrana tiene un comportamiento aproximado al de un circuito RC, con una respuesta dependiente de la temperatura (35). Según ésta teoría y las observaciones de los autores citados en éste capítulo y en los anteriores, un circuito representativo sería el mostrado en la fig. (V-2).

El circuito de la fig. (V-2) representa la analogía del comportamiento de la membrana Chara durante la excitación en estado estable, considerando en forma práctica un equivalente de Thevenin donde se han representado los siguientes elementos:

Una resistencia externa  $R_s$ , la cual varía con la temperatura.

Una resistencia ' $R_m$ ' conectada en serie con la FEM ( $E_0$ ).

FIG. V-2



MODELO DEL CIRCUITO ANALOGICO EQUIVALENTE INTERNODAL  
PARA LA MEMBRANA DE LA CHARA (35)

Una capacitancia ' $C_m$ ' conectada en paralelo, con la resistencia  $R_m$  y la FEM ( $E_m$ ), que sirve para describir la variación en el tiempo de la concentración iónica promedio.

En este modelo analógico tanto  $R_m$  como  $E_m$  son variables controladas, por el potencial externo aplicado  $V$ ; siendo posible medir y controlar  $V$  directamente, e indirectamente  $V_m$  y  $E_m$ .

La temperatura, por último, puede regularse independientemente, desde el exterior.

#### Propagación del potencial de acción.

En el capítulo anterior se definió el concepto de potencial de acción, y su importancia; en esta sección serán descritos y comentados los efectos del potencial de acción.

##### A).- Potencial de Acción Cero.

Como se trata de un circuito RC, puede demostrarse que tomando como referencia el instante para el cual no hay propagación del potencial de acción, habrá un potencial que corresponda a un flujo de corriente cero, y para todo valor distinto a cero habrá otro valor de potencial neto diferente de cero; ésto, en el modelo matemático puede verificarse como se verá, para diferentes tiempos ( $t$ ) dentro de ciertos límites. También es posible verificarlo, graficando la corriente de membrana ( $I_m$ ) Vs. la fuerza electromotriz ( $E_m$ ).

##### B).- Potencial de Acción diferente de Cero.

Si se supone ahora que existe un potencial de acción a través de la membrana, aparece un cambio en la generación de la FEM, en donde, se observa la formación de corrientes extraiónicas o corrientes-

eléctricas parciales que causan cambios despreciables cuando el potencial de acción alcanza su valor máximo (o de disparo). (35).

Desde el punto de vista de una analogía eléctrica, las corrientes extraiónicas pueden explicarse como un conjunto de circuitos RC locales con diversas condiciones iniciales, pero, como el sistema tiene valores promedio, los efectos de las corrientes extraiónicas y su posible analogía no se toman en cuenta.

#### Potencial de Control Aplicado V

El potencial de control aplicado (V) es la diferencia de potencial que existe entre el micro electrodo interno colocado dentro de la membrana y el electrodo externo de referencia, éstos, se ilustran en la fig. (V-1) Sección (I), marcados con el número (2). Este potencial (V) permite la evaluación de  $V_m$  y  $E_m$ , como lo demuestran en diversos experimentos algunos autores citados por U. Kishimoto, (35) cuando localizaron zonas externas y cercanas a la membrana con una FEM elevada y una conductancia baja al aplicar una serie de excitaciones al espécimen de la Chara.

#### Resistencia y capacitancia de la membrana.

En el circuito de la fig. (V-2), se encuentran dos resistencias  $R_s$  y  $R_m$ , la resistencia  $R_s$ , representa la resistencia de la solución externa que rodea la membrana, proviene de considerar la conductancia y movilidad del APW, dentro de un límite máximo y otro mínimo. Esta resistencia  $R_s$ , en el medio ambiente tiene un alto valor como se indicó en el capítulo IV, pero, en las condiciones especiales de la fig. (V-1) tiene un promedio de  $5K \Omega$ .



### Resistencia de Membrana.

La resistencia de membrana 'Rm' está relacionada con la permeabilidad, el flujo de difusión, y la concentración de elementos iónicos en el tiempo. Los valores de la resistencia son obtenidos en la membrana de la Chara, en condiciones de no excitación y excitación, teniendo un rango de valores comprendidos entre  $10^{-10}$  y  $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ .

La resistencia de membrana se mide preferentemente por medios experimentales, ya que no resulta sencillo, ni práctico calcular o determinar permeabilidades, movilidades, y concentraciones para distintos iones.

### Capacitancia.

La capacitancia de membrana, indicada como Cm, representa, la selectividad iónica de la membrana, en el tiempo y se relaciona estrechamente con la difusión iónica, debido a la variación de concentraciones externas e internas que dependen de factores como: la intensidad luminosa, excitación eléctrica, y temperatura.

Para este estudio, la intensidad luminosa se considera constante y de poca influencia, en tanto que temperatura y excitación eléctrica, se analizarán con los datos y condiciones representadas en la sección (V-1a), con los tres objetivos siguientes:

- 1).- Establecer la influencia de las variaciones de temperatura en la membrana de la Chara Australis, a partir del medio externo ( $R_s$ ).
- 2).- Formulación y desarrollo del modelo matemático, del circuito de la fig. (V-1), considerando la variación de la temperatura en el medio externo, para conocer las corrientes interna y externa ( $I_1$ , e  $I_2$ ).

3).- Representar mediante un diagrama de bloques al sistema del circuito analógico dando un sencillo punto de vista de la teoría de control, y finalmente, explicar los resultados a los que se llegó, comentando, los trabajos de notables investigadores japoneses sobre la membrana de la Chara y dando sugerencias pertinentes.

Propósito del objetivo (1).

Al identificar las variaciones de temperatura, se obtendrán las variaciones del potencial eléctrico V en la membrana de la Chara, con lo cual se complementará una parte de las características eléctricas requeridas para este estudio.

Propósito del objetivo (2).

Utilizando el modelo matemático del circuito será posible describir ingenierilmente el comportamiento de la membrana de la Chara, y de esa forma comprender su funcionamiento cuando está sometida a variaciones de potencial que a su vez dependen de la temperatura.

Propósito del objetivo (3)

Por medio de un sencillo punto de vista de la teoría de control, puede identificarse el posible mecanismo transductor de temperatura, voltaje, seguido por la célula vegetal.

Los comentarios y explicaciones finales pueden tomarse como una aportación complementaria y tratan de motivar el interés en el terreno de la Biofísica vegetal.

Consideraciones y observaciones pertinentes aplicables a la  
fig. (V-2).

Para poder determinar y comprender acertadamente el procedi

miento y características propias de los experimentos a partir de un circuito analógico (fig. (V-2)), es indispensable, analizar previamente dos antecedentes experimentales:

- a).- El cambio de fase en la corriente de membrana.
- b).- La aparente conductancia negativa de la membrana.

La aparente conductancia, como se verá es parte del cambio de fase, de tal forma que al variar el ángulo de fase, aparece una conductancia negativa, la cual en la realidad no existe.

- a).- Cambio de fase en la corriente de membrana.

La membrana de la Chara, con excitaciones del tipo (U-1), sen - wt (escalón y senoidal) determina el comportamiento del circuito - - equivalente RC, por las razones siguientes (35).

- 1).- La aplicación de una pequeña amplitud de onda senoidal al punto suma en el potencial del circuito de control mostradó en la fig. - - (V-1), da como resultado un conjunto de pequeñas oscilaciones propias del potencial y de la corriente de membrana debido a una determinada temperatura.

Estas oscilaciones debidas a la temperatura tienen un intervalo de avance constante en la fase de la corriente comprendido en intervalos regulares de  $15^{\circ}$  a  $30^{\circ}$  con respecto al potencial de reposo.

Si la frecuencia no cambia durante la excitación, es posible controlar con un mínimo de dificultades el comportamiento eléctrico del -- circuito equivalente de la membrana y además obtener una primera -- aproximación al conocimiento factible del mecanismo selector de iones.

- 092 -

$F_1 = 3 \text{ Hz}$   
 $V_1 = 109 \text{ (mv)}$   
 $F_2 = 5 \text{ Hz}$   
 $V_2 = 114 \text{ (mv)}$   
 $F_3 = 10 \text{ Hz}$   
 $V_3 = 110 \text{ (mv)}$

$$W = 2\pi f$$

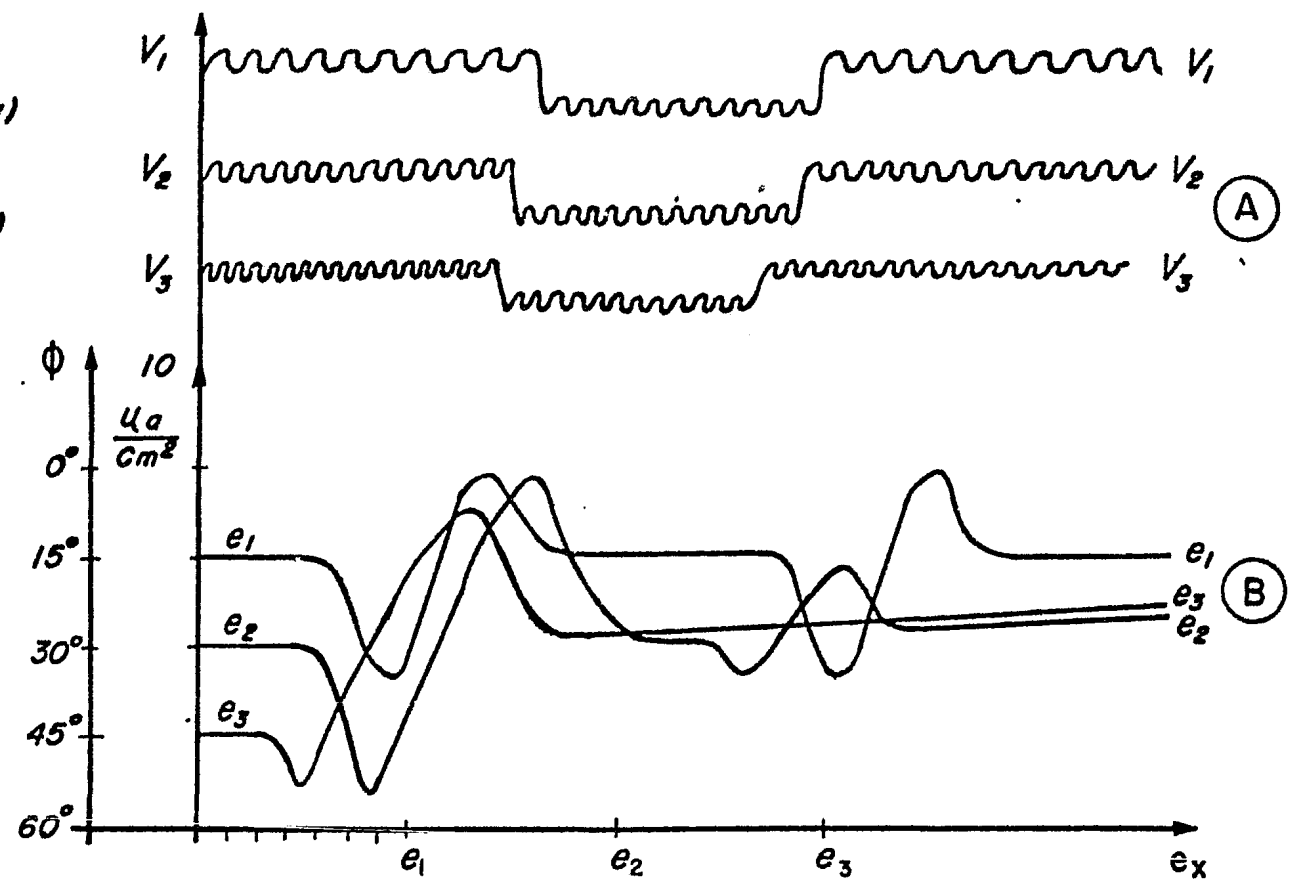


FIG. V-3 - ESTE DIAGRAMA CONSTA DE 2 SECCIONES COMPLEMENTARIAS, LA SECCION (A) Y LA (B) EN LA SECCION (A), SE MUESTRAN LAS ONDAS SENOIDALES DE EXITACION DE LA MEMBRANA DE LA CHARA PARA FRECUENCIAS DE 3,5 Y 10 HZ Y VOLTAJES DE APLICACION EXTERNOS DE 109, 110 Y 114 (mv), RESPECTIVAMENTE. LA SECCION (B) MUESTRA LA VARIACION DEL ANGULO DE FASE DE LAS CORRIENTES DE MEMBRANA A INTERVALOS REGULARES DE  $15^\circ$  EN PROMEDIO, CON RESPECTO AL POTENCIAL DE REPOSO (35) (38).

d).- Comportamiento de la membrana durante una excitación Senoidal.

Ya se ha explicado por qué conviene trabajar con una onda senoidal y cómo influye en el circuito equivalente, ahora, se explicará lo que está ocurriendo desde el punto de vista biológico y eléctrico.

Cuando la conductancia  $G_m$  aumenta durante la excitación la resistencia disminuye y la capacitancia referida a la concentración iónica ( $cm$ ), se comporta como un circuito cerrado para un  $T=0$ , es decir, -- dicho proceso ocurre antes de la saturación iónica de la membrana. Cuando ésta se satura y la conductancia disminuye para un tiempo --  $t=\infty$ , la capacitancia (concentración) se comporta como circuito --- abierto, lo cual significa que el potencial de excitación y la 'FEM' son prácticamente constantes.

Durante la experimentación en vivo, realizada por el prof. Kishimoto (35), utilizando una onda senoidal, fué posible obtener un conjunto de valores sobre el potencial de excitación el ángulo de fase de la membrana y la frecuencia.

La frecuencia, cuando se varía entre 3 y 10 Hz, variando el potencial y manteniendo una corriente ( $i_m$ ), no mayor a  $10 \mu a/cm^2$ , da un conjunto de gráficas con las que se demuestra, que una onda senoidal permite la obtención de una fase de intervalo de avance promedio de  $15^\circ$ . Obsérvese la fig. (V-3).

Como se verá posteriormente, para estudios posteriores, puede o no variarse la frecuencia, dependiendo de las condiciones de entrada requeridas por el propósito de la experimentación.

Al avanzar la corriente en intervalos aproximadamente regulares, - -

con respecto al voltaje, la membrana, siempre tenía una respuesta - similar a la mostrada gráficamente en la fig. (V-3), pero, cuando el potencial de depolarización 'V', tuvo una entrada escalón, su objeto práctico y la influencia sobre la membrana será el 2º punto a discutir.

Comportamiento de la Membrana durante una excitación de entrada escalón.

Un segundo experimento con excitación de tipo escalón fué desarrollado inmediatamente después de aplicar la excitación senoidal. La razón por la que se aplicó otra excitación distinta fue la determinación de la respuesta de la membrana para condiciones eléctricas de menor estabilidad, cuando se cambia el intervalo de fase original, - de 15º a otro mayor.

Cuando la entrada es escalón y la fase no puede mantenerse en intervalos regulares, el punto de sobretiro, es alcanzado por la corriente de membrana más rápidamente en tanto que su fase se aproxima hasta un valor cercano a 0º, al pasar el sobretiro, la corriente de membrana vuelve al mismo intervalo. Este comportamiento de la membrana no siempre suele ocurrir paralelamente al cambio en la conductancia o en el flujo de corriente.

Al final de este capítulo, en la sección de conclusiones y aportaciones, se discutirán con cierto detalle los motivos a los que obedece el comportamiento de la membrana bajo diferentes condiciones de excitación.

Procedimiento de Depolarización en la membrana de la Chara.

La depolarización aplicada a la membrana se realiza en dos pasos:

- 1).- Cambiando la frecuencia y manteniendo el potencial de depolarización.
- 2).- Cambiando la depolarización senoidal a escalón y manteniendo -- una determinada frecuencia.

Un tercer paso complementario, pero que conviene analizar aparte es la variación de la corriente  $I_m$  (flujo) con respecto a la temperatura, pero sin introducir excitaciones externas y considerando únicamente al potencial de acción (34).

E).- Condiciones y valores teórico - experimentales en la simulación con un circuito analógico del efecto internodal en el alga Chara.

La membrana del alga Chara, al estar sometida a una excitación eléctrica externa y comportarse como un circuito RC, como se vió anteriormente, precisa de una evaluación cuantitativa y cualitativa -- para determinar su validez biológico - matemática, por lo que a continuación se ha elaborado una lista de datos y condiciones recomendables para llevar a cabo la experimentación propuesta.

Condiciones Previas.

Existen tres consideraciones previas en el estudio del circuito analógico de la fig. (V-2), éstas son las siguientes:

- 1).- El voltaje  $V_m$ , no es controlado directamente, ni tampoco la FEM señalada como  $E_m$ , pero en cambio 'V', es modificada con excitaciones senoidales y escalón. Como observación interesante, los investigadores japoneses (34), (35), han utilizado entradas de excitación impulso, diente de sierra y pulso corto, ésta última

no es más que una señal de tiempo muy corto, utilizada exclusivamente para establecer un sobre tiro en la corriente.

- 2).- Cuando  $V=Em$ , no hay flujo de corriente en el circuito y viceversa, si  $V \neq Em$  hay flujo de corriente.
- 3).- La resistencia externa  $R_s$ , bajo condiciones de excitación, tiene un valor apreciable, lo mismo que cuando existe un cambio en la temperatura, en cambio, si no hay excitación ni cambio en la temperatura, entonces  $r_s=0$ .

En cuanto a los datos, por cuestión práctica, se dividen en -- eléctricos y térmicos, ambas clases proceden de varios autores (34), (35), (38), y se muestran a continuación:



DATOS ELECTRICOS.

---

Polarización Inicial $V_0$ :	175 (mv)
Polarización Final $V_1$	52 (mv)
Valor de la FEM máximo	145 (mv)
mínimo	10 (mv)
Valor de $V_m$	$112 \pm 0.75$ (mv)
Valor de la Capacitancia	$1 \mu\text{f}/\text{cm}^2$ , $2 \mu\text{f}/\text{cm}^2$
Frecuencias: mínima	2.5 Hz.
máxima	10 Hz
Tiempos de Polarización	1 a 5 segs.
Resistencia externa ó de la solución ( $R_i = R_s$ )	
máxima	$10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$
mínima	$10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$
Resistencia de Membrana ( $R_2 = R_m$ )	
máxima	15 K $\Omega$
mínima	5 K $\Omega$

---

Tabla (V-2) Datos eléctricos promedio del Alga Chara  
(34), (35).

Datos térmicos

---

Temperatura T1:

Máxima 32°C

Mínima 5°C

Coef ( ) de temperatura:

En el potencial de Reposo 0.75  $\mu\text{C}^{-1}$

Bajo condiciones de polarización. 14.4  $\mu\text{C}^{-1}$

---

Tabla (V-3) Datos térmicos promedio de Alga Chara.  
(34), (35).

Resistividad.- La resistividad 'P', en la membrana del alga Chara - varía según las condiciones ambientales; cuando el vegetal se encuentra en el ambiente acuático, tiene una resistividad y una resistencia considerablemente mayores, que en la solución APW. Los valores promedio para ambas situaciones son:

$$C_0 = 15.833 \times 10^6 \text{ ( } \Omega \text{ - cm)}$$

$$C_1 = 15.833 \text{ ( } \Omega \text{ - cm)}$$

En donde,  $C_0$  es el valor de la resistividad en condiciones ambientales originales, y  $C_1$ , es el valor de la resistividad en condiciones experimentales.

La evaluación cuantitativa del circuito analógico de la fig. ( V-2) tiene los siguientes propósitos:

1).- Determinar el valor de la resistencia externa  $R_s(R_1)$ , para un rango de temperaturas comprendidas entre  $t_0 = 5^\circ\text{C}$  y  $t_f = 32^\circ\text{C}$ , se recomienda elaborar una gráfica de  $R$  Vs  $T$  (resistencia-temperatura),

para observar su comportamiento, discutiendo su(s) posible(s) explicación(es).

2).- A partir de las gráficas de  $I_m$  Vs  $V$  obtenidos de experimentos realizados en Japón (35), se obtendrá el umbral y su(s) variación(es), con respecto a la temperatura.

3).- Determinar el valor de la corriente de membrana  $I_m$  en el circuito analógico de la fig. (V-4), para los diferentes valores de  $R_s$  (resistencia externa  $R_l$ ), con ello, podrá conocerse el posible comportamiento del flujo iónico en la membrana y verificar hasta que punto es válido el modelo analógico propuesto.

El análisis del circuito analógico que representa el comportamiento de la membrana Chara teniendo como excitaciones el cambio de potencial externo  $V_l$  y la temperatura, (fig. (V-4), se realiza utilizando las corrientes de malla, con las cuales, se puede determinar los flujos iónicos externos e internos, para obtener la corriente de membrana  $I_m$ .

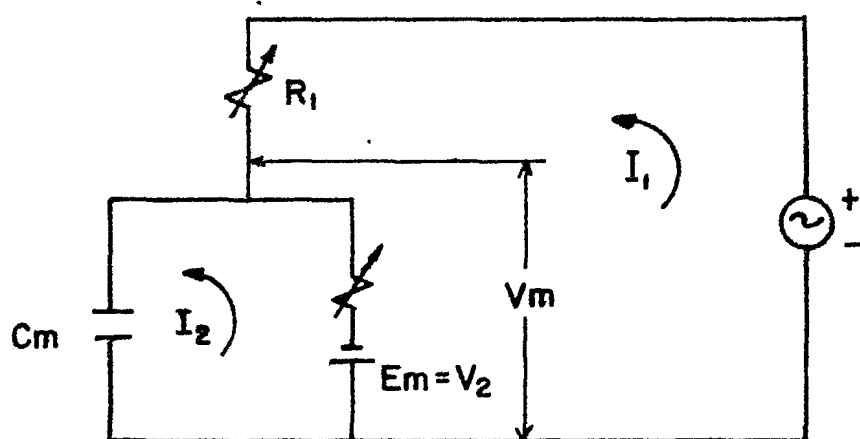
Dos condiciones necesarias para la aplicación del circuito analógico (fig. (V-4).)

Para poder realizar cualquier clase de estudio relacionado con la membrana chara a partir de su circuito analógico (figs. (V-4) y (V-4a), se precisan las siguientes dos condiciones:

1).- Calcular las variaciones de la resistencia externa (ambiental)  $R_l$ , para un rango de temperaturas comprendido entre  $5^\circ$  y  $32^\circ\text{C}$ .

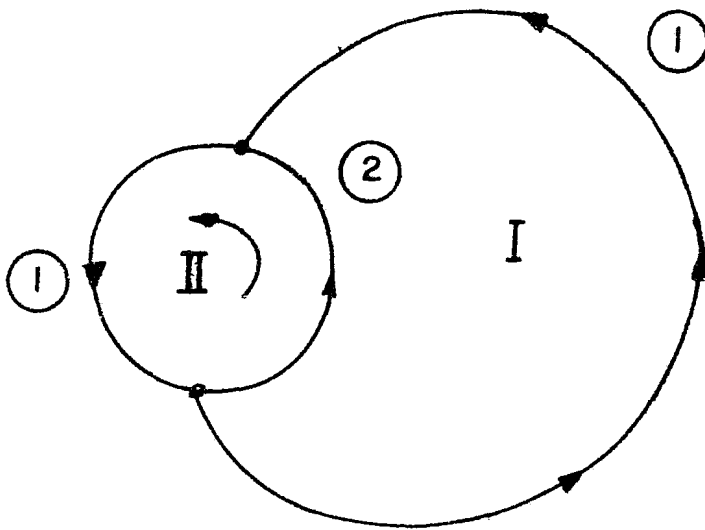
2).- Considerar las variaciones e influencia de la FEM ( $E_m$ ) de la membrana, en el circuito analógico.

FIG. V-4



CIRCUITO ANALOGICO DE SIMULACION, PARA EXITACIONES  
TERMO ELECTRICAS EN LA MEMBRANA DE LA CHARA

FIG. V-4a



*GRAFICA DIRIGIDA DEL CIRCUITO ANALOGICO  
DE LA FIGURA (V-4)*

### Determinación de la Resistencia Externa $R_l$

De acuerdo a lo establecido en la sección (IV-e), para obtener los valores de  $R_l$ , se recurre al concepto de resistividad cuando se prefiere seguir un método matemático distinto a los procedimientos experimentales tradicionales, considerando, el coeficiente y el incremento de temperatura ambiental. El coeficiente de temperatura, varía como se observa en la tabla (V-3), de acuerdo a las condiciones de reposo y excitación.

El cálculo no experimental de la resistencia  $R_l$ , partiendo del concepto de resistividad consta de los siguientes tres pasos:

- 1).- Cálculo de la resistividad final  $\rho_f$  (ec IV-19)
- 2).- Determinación del incremento de temperatura. (ec V-1)
- 3).- Determinación de la relación geométrica  $L/A$  (longitud 'L' Vs área 'A') ec (V-2).

Este segundo método para calcular  $R_l$ , es sencillo de aplicar pero laborioso, por lo que es preferible utilizar el método experimental siempre que sea posible. Las dos ecuaciones requeridas en este capítulo para mostrar el cálculo teórico de  $R_l$  son las siguientes:

$$\Delta t = T_f - T_i \quad (V-1)$$

$$R_l = + \rho_f (L/A) \quad (V-2)$$

En donde:

$T_f$  = temperatura final.

$T_i$  = temperatura inicial.

- $\rho$  = resistividad final  
 $L$  = longitud de la célula  
 $A$  = área de la célula.

La resistividad final como se vió en el capítulo IV, es variable, independientemente de la especie de célula, pero limitada siempre por las condiciones ambientales.

Para complementar, la explicación sobre la resistencia externa ( $R_l$ ), se añade el siguiente ejemplo; en el cual se trata de obtener el valor de  $R_l$  partiendo de éstos datos:

$$\begin{aligned}\rho_i &= 15,810 \quad (\Omega - \text{cm}) \\ \Delta t &= 15^\circ\text{C} \\ \alpha &= 14.4 \quad (\text{u}^\circ\text{C}^{-1}) \quad (10^{-5}) \\ L &= 3 \quad (\text{cm}) \\ R_a &= 0.025 \quad (\text{cm}) \quad (\text{radio de la Chara}).\end{aligned}$$

Cálculos:

1).- Obtención de la resistividad final  $\rho_f$ : aplicando la ec. (IV-19)

$$\begin{aligned}\rho_f &= \rho_i (1 + \alpha(\Delta T)) \\ \rho_f &= 15,810 (1 + 14.4 (15) \times 10^{-5}) \\ \rho_f &= 15,810 + 34.14 = 15,844.14 \quad \Omega - \text{cm}\end{aligned}$$

2).- Obtención de la relación  $L/A$  (ec.(V-2)); partiendo del área cilíndrica ( $A$ ):

$$\begin{aligned}A &= 2 R_a (R_a + L) = 2 (0.025) (\pi) (0.025 + 3) \\ &= 0.475 \quad (\text{cm}^2)\end{aligned}$$

La relación L/A sería:

$$\frac{L}{A} = \frac{L}{A} = 6.315 \text{ (cm)}$$

3).- Cálculo de R1

$$R1 = 15,844.14 \times 6.315 = 100,055.5 \ \Omega$$

$$R1 \approx 100 \text{ K } \Omega$$

El valor de 100 K  $\Omega$  se encuentra dentro de un rango razonable lo cual puede verificarse en la tabla (V-2).

Condiciones de excitación y variación de la temperatura.

Durante una serie de investigaciones realizadas en Japón (35), se confirmó que la solución acuosa APW utilizada en la Chara, tenía una resistencia (R1) variable, la cual disminuía con la excitación desde un valor promedio de  $20 \times 10^5 \ \Omega / \text{cm}^2$  a unos  $2.4 \text{ (K } \Omega / \text{cm}^2)$ , sin embargo, por ser necesario, conocer cuando menos los valores -- promedio de la resistencia, resistividad y conductancia partiendo de una temperatura mínima y otra máxima, se procederá a considerar algunas importantes observaciones químicas.

Conductancia Química y Eléctrica equivalente.

La conductancia en el medio acuoso de la membrana, representada como la resistencia R1, en el circuito de la fig. (V-2), por lo general se estudia desde el punto de vista químico, ya que de esa forma sus propiedades eléctricas, son representadas por resultados más -- exactos y precisos



Los químicos, al analizar las propiedades eléctricas de una solución, refieren sus cálculos a la conductancia química equivalente, o a la conductividad eléctrica, este último procedimiento, no es otro concepto que lo que en Ingeniería se conoce como resistividad (40).

Al comparar la conductancia química equivalente con la conductividad eléctrica, resulta ser más precisa la conductancia química equivalente (CQE), pero definitivamente es un procedimiento exclusivo de la química, en cambio, la conductividad eléctrica, es un método más impreciso por utilizar valores promedio y considerar geometrías regulares.

El método químico (CQE), está referido a las concentraciones, pesos-moleculares y velocidades de reacción (K) (ya discutidas en el capítulo III), pero requiere un considerable número de datos e interacciones para cada temperatura.

Como el enfoque propuesto debe ser propio de la Ingeniería se utiliza en éste caso el método de la conductividad eléctrica en lugar del método (CQE), además el error para éste estudio no es considerable - dadas las limitaciones de temperatura. (40).

F).- Antecedentes Químicos y Eléctricos previos al Cálculo de la --- variación de  $R(s)$  ( $R_1$ ) y la corriente.

Conociendo el significado de  $R_s$  ( $R_1$ ) y para evitar errores futuros - en resultados futuros, se ha elaborado un resumen sobre el comportamiento de una solución acuosa sometida a un potencial eléctrico externo, dentro de la cual no se encuentran ni organismos ni objetos - de cualquier naturaleza. El comportamiento se fundamenta en el siguiente razonamiento:

- A).- Cuando disminuye la concentración iónica (c), en una proporción  $C \propto 1/2$ , la temperatura y la conductancia aumentan.
- B).- Si ocurre que en el proceso (a) disminuye la concentración iónica (c), entonces, la temperatura y la conductancia disminuyen.
- C).- De los razonamientos presentados (a) y (b), se deduce que si la conductancia es el inverso de la resistencia, entonces, la resistencia disminuye cuando aumenta la conductancia y viceversa, (cuando aumenta la resistencia disminuye la conductancia), lo que quiere decir que, al aumentar la temperatura (excitación), la conductancia aumenta y la resistencia disminuye.

Estos razonamientos (a), (b) y (c), pueden demostrarse de la forma siguiente:

- a).- Existen gráficas químicas de conductancia Vs. concentración (39), donde se obtienen las conductancias químicas de electrolitos a  $25^{\circ}\text{C}$  y se demuestra que la conductancia aumenta.
- b).- Supóngase, que se tiene un cubo de hielo, en este caso, la concentración por  $\text{cm}^2$  de moléculas de agua es mayor a la que se tendría en la misma superficie si en lugar de hielo fuera vapor. De ahí se deduce que la concentración cambia con la temperatura (41).

En la solución APW, sin entrar en mayores detalles, no se aplican temperaturas abajo de  $4.5^{\circ}\text{C}$ , ni arriba de  $32^{\circ}\text{C}$ , por razones de índole biológica; asimismo, no se alteran las concentraciones fuera de un rango determinado, ya previsto, según el organismo en experimentación y el objetivo por alcanzar.

Relación entre la resistencia externa (R1) y la Resistencia de Membrana (R2).

Existen 4 relaciones fundamentales entre la resistencia externa o del APW (R1), y la resistencia de membrana (R2), las cuales, precisan de una discusión complementaria para poder comprender primeramente el funcionamiento de la membrana y posteriormente obtener conclusiones lógicas, sobre la respuesta de la membrana, cuando se encuentra sometida a variaciones de Potencial y Temperatura. Ver fig. (V-4). Las cuatro relaciones fundamentales entre R1 y R2 son las siguientes:

- 1).- Tanto la resistencia R1 como la R2, son variables en magnitud, de un sistema biológico a otro, durante la experimentación y en la realidad por razones químico-biológicas. El comportamiento de las dos resistencias en la realidad, es desde el punto de vista matemático no lineal y variable en el tiempo fig. (V-4), sin embargo son susceptibles de linealizarse dentro de un corto rango de tiempo y temperatura siempre y cuando se conozcan los límites de la variación del potencial de umbral y reposo de la membrana.
- 2).- La resistencia de R2 tiene una magnitud cuyo rango es de 2.5 a 7 veces mayor que R1.
- 3).- Cuando R1 varía con respecto al tiempo y la temperatura, regula el flujo de corriente (iones), hacia el circuito interno donde está R2, la Fem (Em) y la capacitancia Cm; haciendo las veces de una válvula de paso en un circuito hidráulico.
- 4).- La resistencia R1 tiene la capacidad de interrumpir la corriente del circuito, en base a límites de temperatura pre-establecidos,

por la escala mostrada en la fig. (V-5).

Partiendo de estos hechos, durante la excitación termoeléctrica y - utilizando osciloscopios y graficadores (38), se obtuvieron diver-- sas gráficas con sus respectivos valores para R1 y R2, durante las fases de reposo, umbral y disparo; la R2 y R1 aparecen en este tra-- bajo como resistencias, por conveniencia, pero, en las gráficas ori-- ginales están representadas como conductancias.

#### Gráficas de las características eléctricas de la Chara.

Existen 3 tipos de gráficas utilizadas en este trabajo:

- a).- Gráficas de temperatura
- b).- Gráficas de tiempo.
- c).- Gráficas de potencial.

Se ha convenido en realizar esta clasificación de gráficas, conside-- rando como referencia a las absisas, que en determinado momento pre-- dominan sobre las ordenadas.

Gráficas de Temperatura.- Estas gráficas representan la variación - de potencial, corriente y conductancia respecto a la temperatura, y permiten tener una idea del comportamiento de cada uno de los com-- ponentes eléctricos principales, mostrados en la fig. (V-4), así co-- mo determinar los valores promedio tanto de temperatura, como de -- potencial, prosistencia y conductancia. Las gráficas de temperatura son 4:

- a).- Potencial de umbral Vs Temp. ( $V_u$  VsT)
- b).- Resistencia (R1 y R2) Vs Temp ( $R_n$  VsT)
- c).- Corriente ( $I_m$ ) Vs Temp. ( $I_m$  VsT)

d).- Conductancia (G) Vs Temp (G VsT)

Gráfica (Vu Vs T).- La gráfica de Potencial de Umbral Vu Vs -- Temp. es una de las más importantes por mostrar las variaciones del potencial de Umbral con respecto a la temp. fig. (V-6). Esta gráfica, muestra una curva semiasintótica, al lado derecho que nunca toca los ejes coordenados, por razones de índole biológica.

Gráfica de R1, R2 Vs T.- Originalmente, las curvas de variación de resistencia Vs Temperatura estaban separadas en dos gráficas similares, las cuales fuerbn unidas en una sola, y son asintóticas con respecto a los dos ejes (fig. (V-6a)); tanto R1 como R2 varían con cierta similitud.

Gráfica de Im Vs T. - Existe una sola curva gráfica de corriente Vs Temperatura (T), la cual está aproximada a una recta y muestra -- los cambios que el flujo iónico muestra con la temperatura. La diferencia de la variación entre las resistencias R1, R2 y la corriente mostrada en la fig. (V-7), es la siguiente:

La corriente tiene un comportamiento prácticamente lineal que comienza poco después de los 2°C con un error prácticamente despreciable. A unos 70  $\mu\text{a. cm}^{-2}$  y 30°C, el flujo de corriente interna  $I_2$ , es máximo, después de ese punto, la membrana prácticamente deja de funcionar.

Gráfica de Conductancia - Vs temperatura.

Al hablar de las resistencias, se habló implícitamente de las conductancias, definidas matemáticamente como:

$$G = \frac{1}{R} \quad (V-3).$$

En donde:

G = conductancia (  $\mu \Omega$  o  $K \Omega$  -  $cm^{-2}$  )

R = resistencia (  $M \Omega$  o  $K \Omega$  -  $cm^{-2}$  )

La conductancia dentro del estudio de la membrana de la Chara es un parámetro útil de referencia para el comportamiento de la corriente. fig. (V-8). Cuando la conductancia aumenta, la temperatura también, y se describe por medio de 2 rectas gráficas (fig. V-8)), nominadas recta (A) y recta (B). La recta (A), se trata de una gráfica determinada para un tiempo inicial  $T = 0$ , y la recta (B) es una gráfica --- estructurada para un tiempo  $T = \infty$ ; éste parámetro de tiempo conocido como tiempo de conductancia estable es utilizado para saber el momento en que la membrana alcanza la máxima cantidad de corriente --- (34), esta gráfica hablando en términos de equivalentes eléctricos, --- indica, que cuando el circuito de la fig. (V-4) que representa la -- membrana internodal), se cierra en  $t = 0$ , la conductancia es muy pequeña; si se cierra en  $t = \infty$ , llega al punto de conductancia estable. La temperatura en estos casos está pre-establecida.

#### Conductancia negativa aparente.

Bajo condiciones de excitación, al aplicarse un pulso en la membrana, la conductancia expresada por conveniencia como:

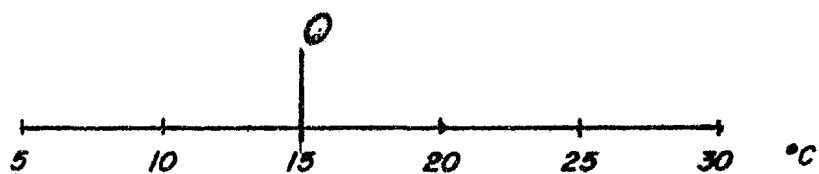
$$G_0 = \frac{di}{dv} \quad (V-4).$$

donde:

$G_0$  = conductancia aparente.

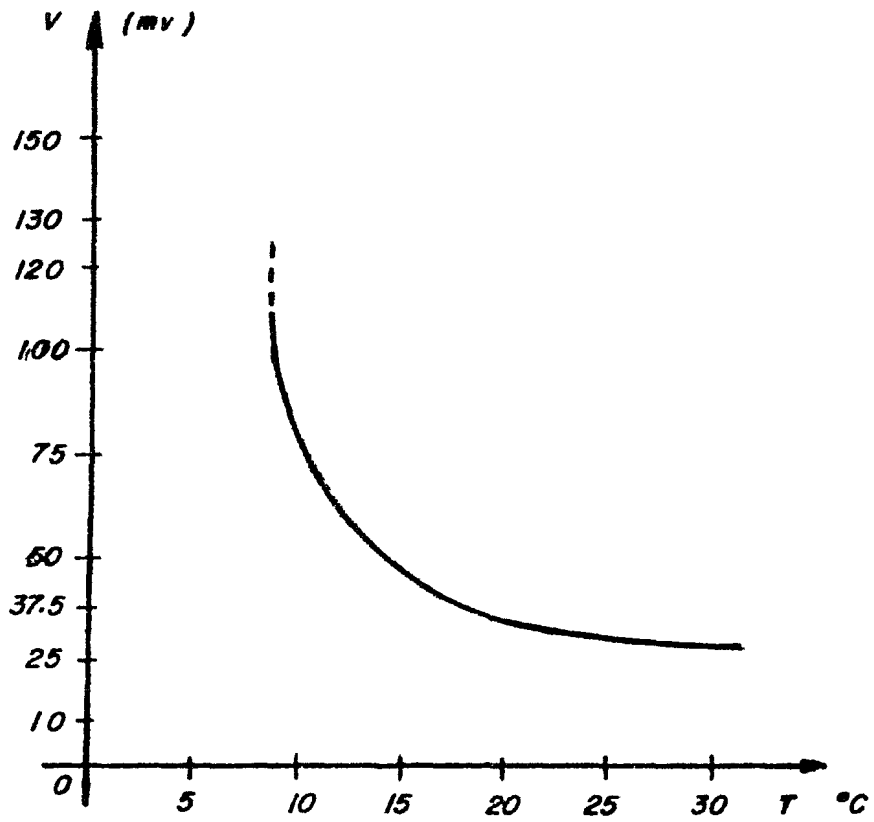
$di/dv$  = gradiente de corriente Vs potencial.

*FIG. V-5*



*ESCALA DE TEMPERATURAS EN LA MEMBRANA  
CHARA TENIENDO COMO CONDICION DE EQUILIBRIO  
15 °C*

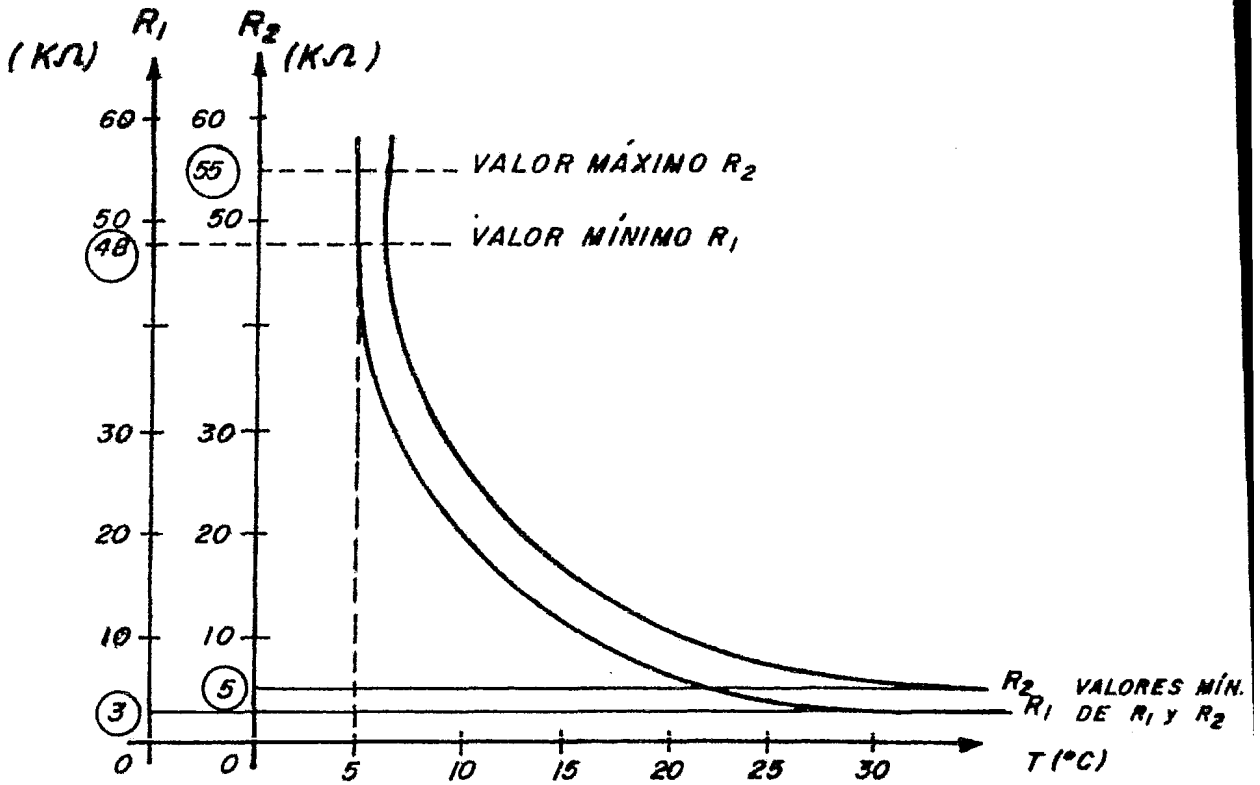
FIG. V-6



CURVA DE VARIACION DEL UMBRAL CON RESPECTO  
A LA TEMPERATURA

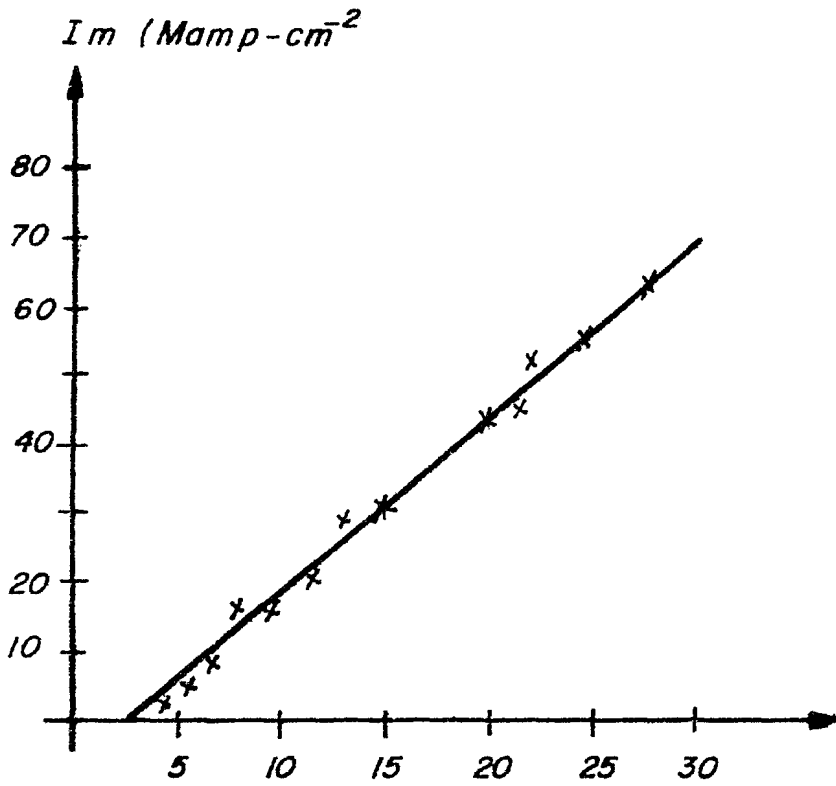


FIG. V- 6a



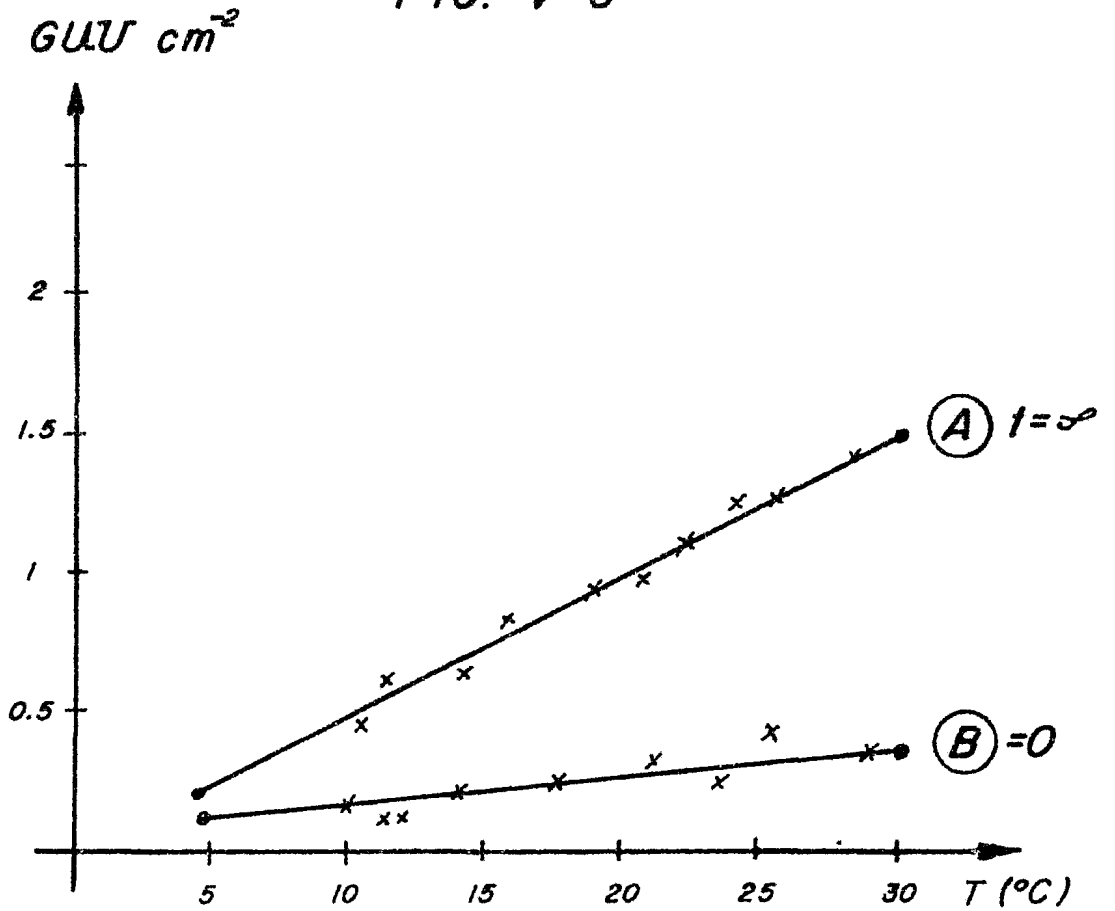
VARIACIONES POSIBLES DE LAS RESISTENCIAS  $R_1$  y  $R_2$   
RESPECTO A LA TEMPERATURA

FIG. V-7



GRAFICA DE CORRIENTE Vs. TEMPERATURA EN LA MEMBRANA DE LA CHARA. LOS PUNTOS DE CRUZ (x), CERCANOS A LA RECTA CORRESPONDEN A LAS MEDIDAS EXPERIMENTALES

FIG. V-8



ESTAS GRAFICAS, DETERMINADAS POR LAS RECTAS (A) Y B CORRESPONDEN A LA VARIACION DE LA CONDUCTANCIA G VS T EN EL CIRCUITO LA FIG. (V-4)

La conductancia aparente  $G_0$ , pasa en determinado momento de positiva a negativa, y cuando ésto ocurre la FEM 'Em' aumenta de nivel - en comparación con el voltaje de aplicación. Este proceso ocurre - gradualmente y no ocurre necesariamente con un cambio simultáneo - de temperatura.

#### Comportamiento de la capacitancia con y sin excitación.

La capacitancia que representa la membrana citoplásmica y su concentración iónica, no muestra ninguna variación significativa con la - temperatura, y su valor es prácticamente  $(1 \mu f)$ ; en cambio, cuando se aplican sucesivamente depolarizaciones de 50 (mv/10 segs) a - 50 (mv/20 segs), la corriente determina otro comportamiento de la - capacitancia pasando de un valor constante a uno variable.

En base a otros estudios como los del Axon de Calamar y la Nitella, se concluyó que la capacitancia del axón decrecía alrededor de un - 2% durante la excitación y en la Nitella, hasta un 15%, éste hecho para algunos autores no es válido, y para otros sí, debido a que - influye la temperatura (35) ya que existe un pequeño coeficiente - de temperatura ( $\alpha$ ).

En el caso concreto de la Chara, un potencial aplicado de 41.4 --- (mv/10 mseg) da como resultado un incremento en la capacitancia de 3 a 5  $\mu f/cm^2$ , en cuanto a la corriente, decrece alrededor de un -- 10% en forma transitoria sobre un valor original de 5 ( $\mu amp/cm^2$ ).

La FEM 'Em', relaciones y comportamiento antes y durante la excitación.

La FEM de la Chara, sobre la cual se ha hablado a grosso modo. por -

el hecho de intervenir activamente en el circuito analógico interno de la membrana, requiere de una explicación suplementaria sobre su comportamiento e influencia.

La FEM, puede calcularse teóricamente conociendo  $I_m$  y  $G_m$  o experimentalmente durante la excitación, su valor máximo depende de la magnitud del potencial de depolarización, y es casi el mismo que el que tendría el potencial de acción inicial (sin variar la temperatura), cuando va más allá del umbral.

Al igual que las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  la FEM ( $E_m$ ), muestra cambios continuos, pero proporcionales para todo cambio de excitación  $V$ .

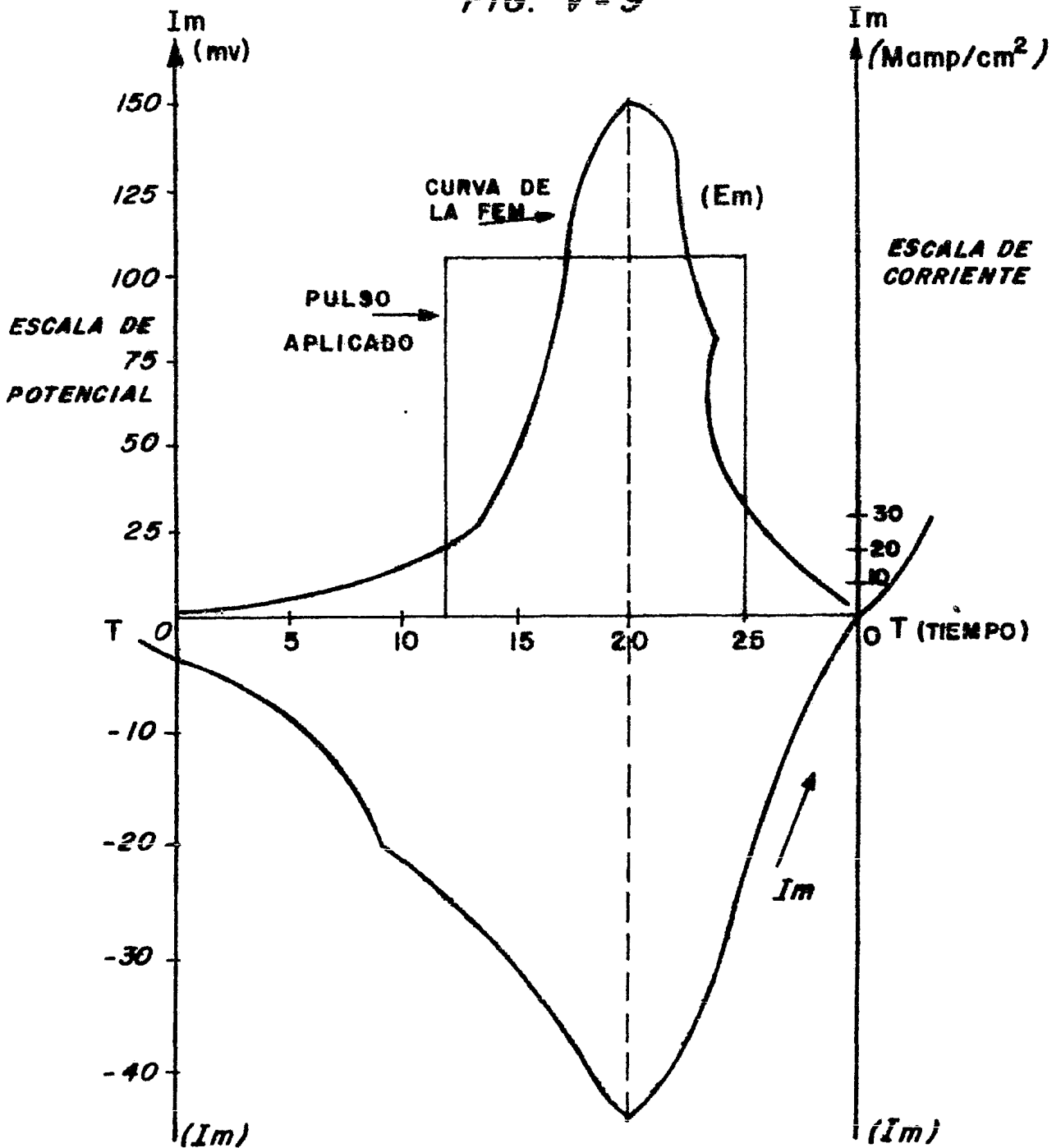
#### Incremento de Potencial en la FEM.

Cuando se incrementa el voltaje  $E_m$  (fig (V-4), sobre el potencial de membrana, la corriente se vuelve negativa, es decir, se dirige hacia adentro de la membrana, esto indica que si la regulación de iones hacia afuera (+) o hacia adentro (-), es promovida por una FEM ( $E_m$ ), la membrana tiene siempre una resistencia positiva (35).

La generación de la FEM ( $E_m$ ), ocurre transitoriamente y alcanza un valor pico (o de disparo), de 150 (mv) graduando el potencial externo de 41.4 (mv/10 seg) con entrada impulso cuadrado (compuesta), en ese instante, puede determinarse el paso de la corriente de positivo (+) a negativo (-) fig. (V-9).

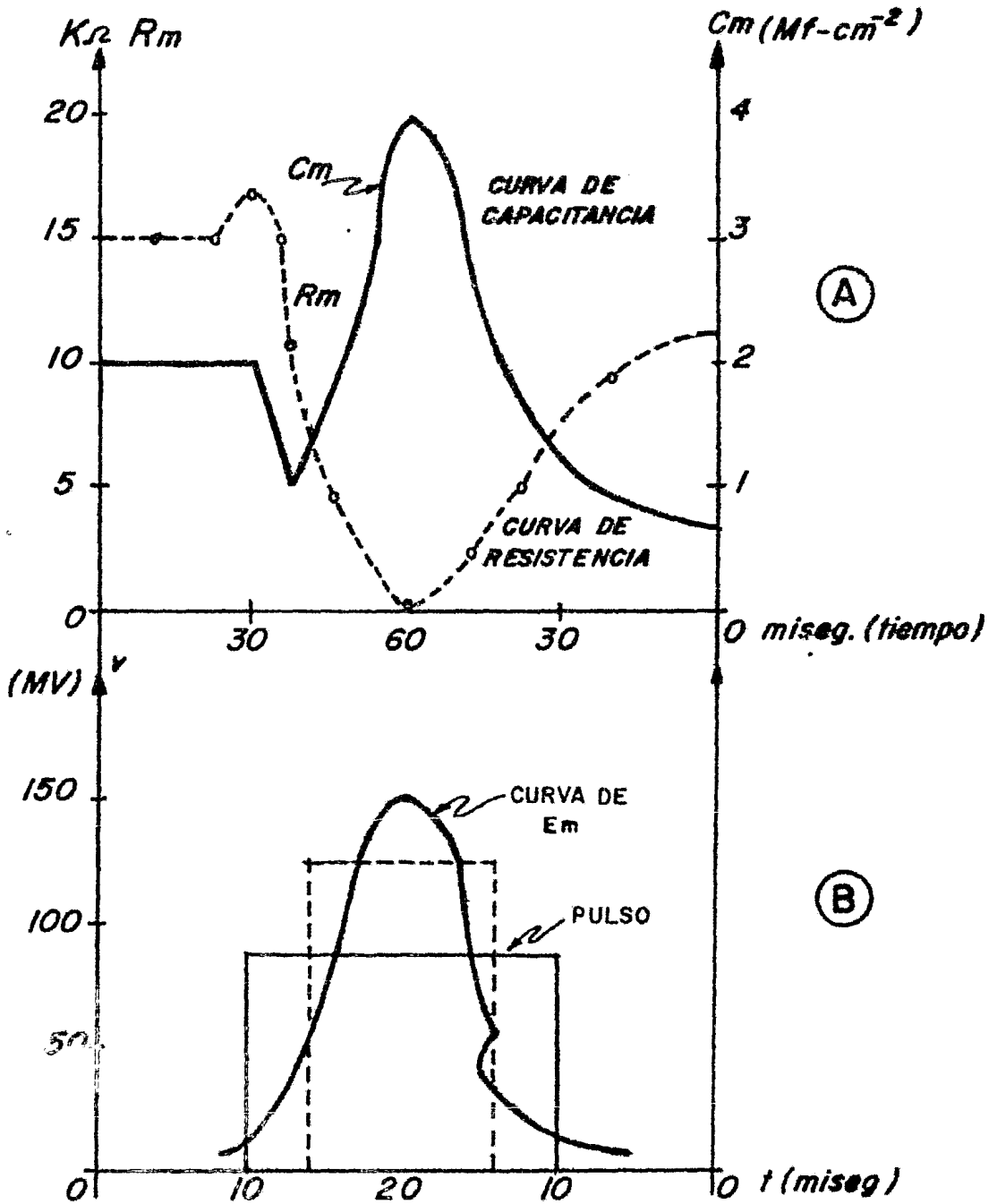
Inicialmente, la FEM, tiene un valor no mayor a 3 (mv), después asciende instantáneamente hasta el valor máximo y al mismo tiempo la  $I_m$  baja a su mínimo valor, repitiéndose el ciclo. fig. (V-9a).

FIG. V-9



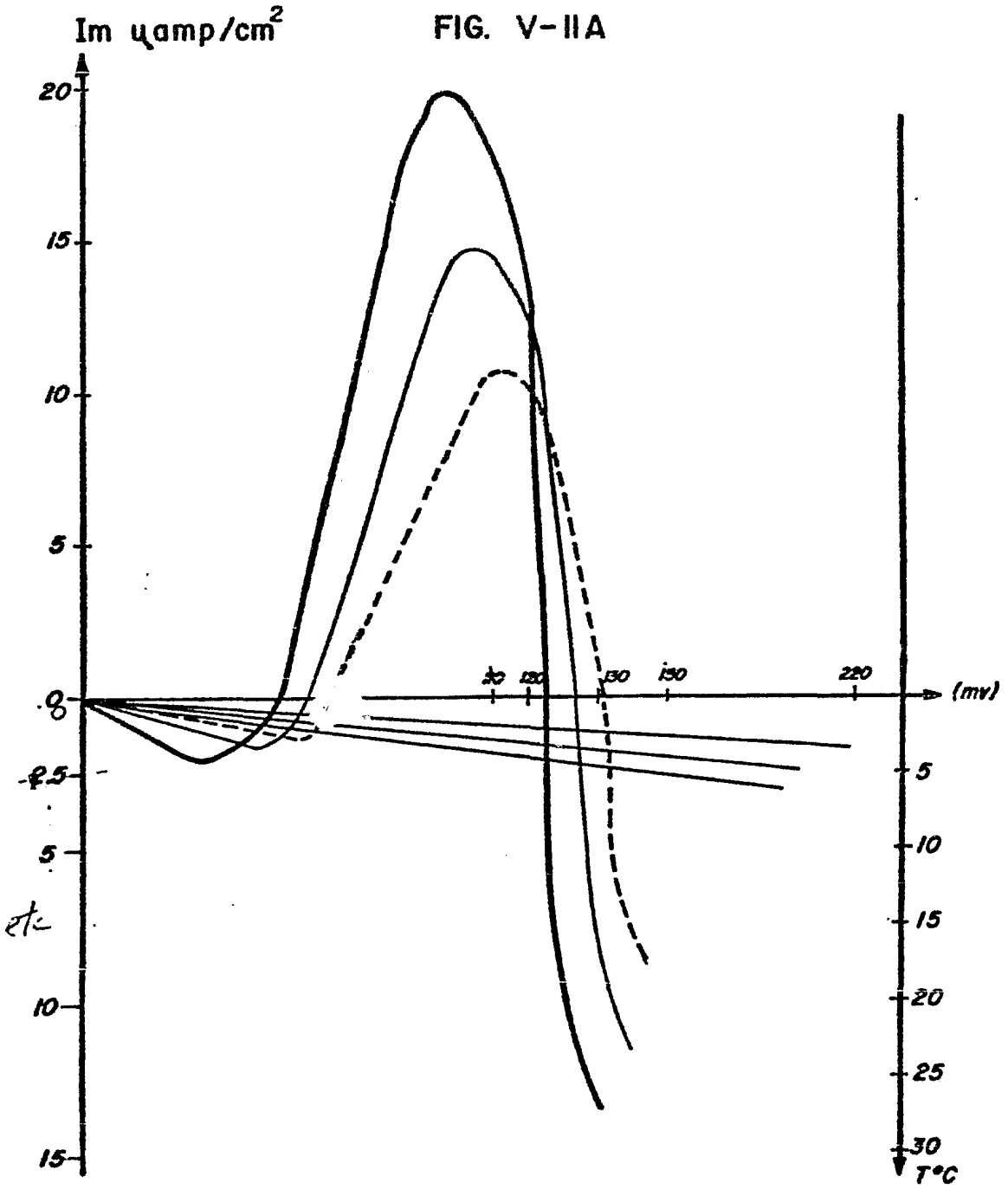
CURVAS DE COMPORTAMIENTO DE LA FEM ( $E_m$ ) O ( $V_2$ ) Y LA CORRIENTE DE MEMBRANA  $I_m$ . OBSERVESE LA RELACION INVERSA ENTRE  $E_m$  e  $I_m$ , CUANDA SE APLICA UNA ENTRADA PULSO

FIG. V-10



LA GRAFICA (A) ES COMPLEMENTARIA DE LA GRAFICA (B) Y DEFINEN LA RELACION ENTRE LA RESISTENCIA ( $R_m$ ) Y LA CAPACITANCIA ( $C_m$ ) CON RESPECTO AL TIEMPO, EN LA MEMBRANA CHARA.

FIG. V-IIA







*Las Figuras V-IIA y V-IIB, Estas gráficas representan la variación de  $I_m$  Vs  $V$ , y de  $T$  Vs  $V$ , en donde se muestra la variación del potencial del umbral original situado en 120 (mv), 90 °C, y 10  $M\mu\text{m}-\text{cm}^2$  tomando como referencia 220 (mv)*

### Relaciones de la FEM ( $E_m$ ) con la resistencia y capacitancia.

Cuando la FEM ( $E_m$ ), de la membrana Chara, se encuentra bajo excitación, la resistencia de membrana  $R_m$  ( $R_2$ ), sufre variaciones, como -- las mostradas en las gráficas de la figura (V-10), donde puede apreciarse que la resistencia  $R_2$  alcanza un máximo cuando la capacitancia  $C_m$  y la FEM ( $E_m$ ), se encuentran a su mínimo nivel; estando la -- membrana sometida a una excitación de pulso cuadrado.

Después de la aplicación del pulso, la magnitud de  $E_m$ , varía muy -- poco respecto al valor máximo que alcanzó inicialmente durante la -- excitación. Obsérvese también que en la gráfica de la fig. (V-9) se confirma que la corriente  $I_m$  muestra un comportamiento inverso; -- cuando la  $E_m$  es máxima (150 mv), la corriente es mínima (40 uamp/cm<sup>2</sup>), -- para un mismo tiempo de depolarización.

### Frecuencias de Depolarización.

En la experimentación del alga chara, no conviene utilizar frecuencias inferiores a 3 Hz, porque las respuestas son ambiguas y no dan una descripción satisfactoria de la membrana, por ello, es usual -- aplicar frecuencias comprendidas entre 3 y 10 Hz como máximo. (35).

La frecuencia crítica cuando el potencial externo varía de 108 a -- 115 (mv)/seg. con una entrada senoidal - escalón, si el potencial no es variable, una frecuencia de 3 Hz, es adecuada y se mantiene prácticamente constante.

Cuando se rompen los límites de potencial aplicado, y frecuencia, -- el sistema pierde estabilidad y posteriormente ya no es posible --

analizarlo adecuadamente.

G).- Relación entre corriente y potencial durante el cambio de temperatura.

El flujo de corriente, como se vió, varía con la temperatura, - a cada variación de corriente, le corresponderá por tanto una variación de potencial en sentido decreciente (depolarización).

Representación gráfica de 'Im' Vs. 'V'.

Si se grafica la corriente Vs. potencial considerando la temperatura, aparecerán dos zonas bien definidas, como se ve en la fig. (V-11); éstas zonas son:

- a).- La zona (I) que representa el lugar geométrico descrito por el flujo de corriente, su valor máximo depende de la temperatura, así, por ejemplo, cuando la corriente aumenta, aumenta la conductancia, porque la temperatura tiende a aumentar.
- b).- En la 2a. zona, de la fig. (V-11), aparece la continuación de las curvas Im Vs. V, algunas se encuentran a la izquierda del punto de umbral original y otras a la derecha, representan precisamente la variación del umbral con la temperatura.

A cada una de las curvas representadas en la fig. (V-11), le corresponde una temperatura, un potencial y una corriente distintos, - ya que al variar la temperatura, varía el flujo y con el flujo (corriente), el potencial.

Obtención del Umbral en un conjunto de curvas Im Vs. V.

En la fig. (V-11), el punto de umbral tiene como coordenadas (110 --

(mv) y  $10 \text{ Uamp-cm}^{-2}$ , éste para una temperatura de  $12^{\circ}\text{C}$ . Estos datos, no es de modo alguno una especulación, sino, un resultado matemático calculado, con la expresión:

$$\frac{dI}{dv} = \frac{dI}{dT} \quad (\text{V-5})$$

siendo:

$dI/dv$  = Variación de la corriente de membrana respecto al potencial aplicado.

$dI/dt$  = Variación de corriente respecto a la temperatura.

Si la variación de la corriente de membrana respecto al potencial -- aplicado es igual a la conductancia aparente, entonces la expresión (V-5) puede escribirse como:

$$G_0 = \frac{dI}{dv} \quad (\text{V-5a}).$$

Para que la expresión (V-5a), se cumpla de forma necesaria y suficiente,  $dI/dv$  deberá de cambiar de signo, ese cambio de signo, no -- implica la existencia de una corriente negativa, sino que indica el sentido de los iones hacia dentro de la membrana. Desde el punto de vista exclusivamente matemático, el cambio de signo de  $dI/dv$  implica un cambio de pendiente, así por ejemplo, cuando  $G_0 = m_1 (+)$ ,  $m_2 (+)$  etc la pendiente es positiva, en tanto, que cuando,  $G_0 = m_1 (-)$ , --  $m_2 (-)$ , etc. la pendiente es negativa; por tanto, el punto donde -- cambia la pendiente de signo es precisamente el punto de umbral.

#### Intervalos de temperatura.

En la membrana de la Chara Australis, el conjunto de temperaturas -- aplicado desde  $5^{\circ}\text{C}$  a  $30^{\circ}\text{C}$ , tiene un intervalo arbitrario, que se -- ajusta a intereses propios de cada investigador, así por ejemplo, -

es posible tomar intervalos regulares de 2°C, 4°C, etc., o bien, realizar todo el análisis considerando toda la gama de temperaturas comprendidas entre 4.5°C y 30°C.

Con esta ventaja, y de acuerdo a los fines requeridos en este estudio, para tener un punto de vista práctico, sin mucho error, se han tomado intervalos de 5°C, los cuales dan valores regulares aproximados (en promedio), de voltaje y corriente (34).

V-3).- Determinación de flujos iónicos interno y externo en el circuito analógico.

Objeto.- Determinar, utilizando un circuito analógico fig. (V-4), la corriente de  $I_m$ , comparando los resultados con los valores de las gráficas mostradas en la fig. (V-6) y (V-11).

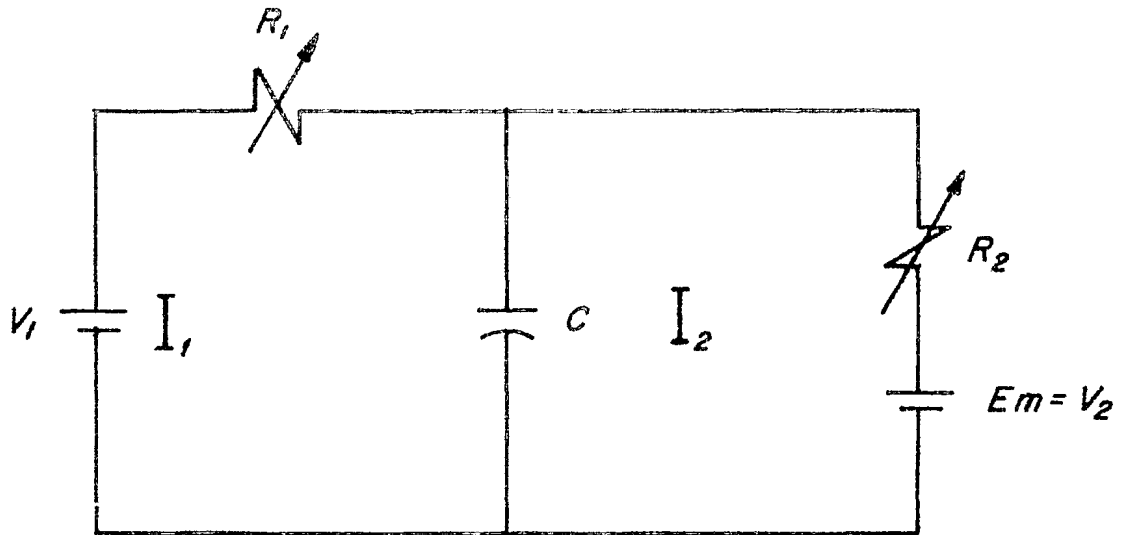
Introducción.- Para saber hasta que punto es válido el modelo analógico propuesto, con respecto al modelo real de la membrana del alga *Chara Australis* y su balance de flujos iónicos, se obtendrá el modelo matemático del circuito que representa al modelo analógico, el cual deberá de contener las variables consideradas en la sección (C) de este capítulo. El procedimiento empleado como se verá enseguida, difiere del utilizado originalmente en Japón, debido al enfoque matemático que propone éste trabajo.

El modelo analógico eléctrico se muestra en la fig. (V-12).

A).- Desarrollo matemático del modelo de simulación.

El enfoque matemático que se propone, conduce a un proceso iterativo, susceptible de ser analizado, utilizando una computadora digital en lugar de una analógica, de tal manera que se conozcan las características generales del circuito a partir de los valores pro-

FIG. V-12



CIRCUITO EQUIVALENTE INTERNODAL DE LA  
MEMBRANA CHARA MODIFICADO.

medio de sus componentes.

El circuito que representa las variaciones de la membrana chara según la temperatura y el potencial, considerando la FEM ( $E_m$ ) se muestra en la fig. (V-12). Este circuito de C.A. tiene las siguientes ecuaciones, obtenidas utilizando el método sistemático de análisis de redes:

$$V_1 = I_1 \left( R_1 + \frac{1}{SC} \right) + I_2 \left( - \frac{1}{SC} \right) \quad V-6$$

$$-V_2 = I_2 \left( - \frac{1}{SC} \right) + I_1 \left( R_2 + \frac{1}{SC} \right) \quad V-6a$$

Las ecuaciones V-6 y V-6a pueden escribirse en forma matricial, quedando como:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ -V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_1 + 1/SC & - 1/SC \\ - 1/SC & R_2 + 1/SC \end{bmatrix} \quad (V-6b)$$

El sistema V-6B, se resuelve para  $I_1$  e  $I_2$  utilizando la regla de Kramer:

$$I_1 = \frac{\begin{vmatrix} V_1 & - 1/SC \\ - V_2 & R_2 + 1/SC \end{vmatrix}}{\Delta}; \quad I_1 = \frac{V_1 (R_2 + 1/SC) - V_2 (1/SC)}{\Delta} \quad V-6c$$

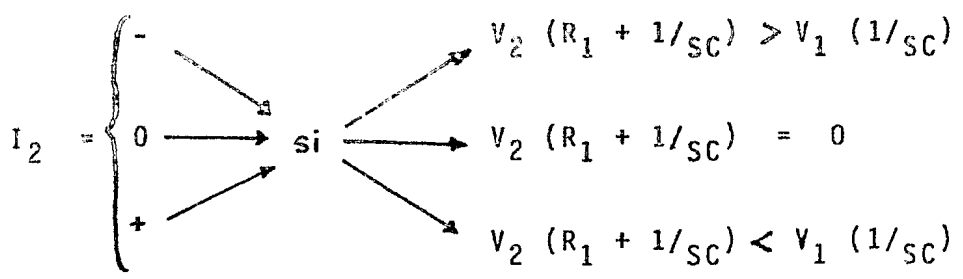
$$I_2 = \frac{\begin{vmatrix} R_1 + 1/SC & + V_1 \\ - 1/SC & - V_2 \end{vmatrix}}{\Delta}; \quad I_2 = \frac{V_2 (R_1 + 1/SC) + V_1 (1/SC)}{\Delta} \quad V-6d$$

La delta  $\Delta$  es:



$$\Delta = \begin{vmatrix} R_1 + 1/SC & 0 \\ -1/SC & R_2 + 1/SC \end{vmatrix} = (R_1 + 1/SC)(R_2 + 1/SC) - (1/SC)^2$$

La corriente  $I_2$  representa el flujo iónico de entrada (-) y salida (+), con las siguientes relaciones:



La  $I_m$  total está determinada por la expresión (V-7), la cual se obtiene sumando  $I_1$  e  $I_2$ . Desde el punto de vista de la bioingeniería, la  $I_m$  total representa el posible movimiento del flujo iónico del exterior al interior de la membrana de acuerdo a sus características principales.

$$I_m = \frac{V_1 (R_2 + 1/SC) + V_1 (1/SC) - (V_2 (R_1 + 1/SC) + V_1 (1/SC))}{(R_1 + 1/SC)(R_2 + 1/SC) + (1/SC)^2} \quad \text{V-7}$$

La  $I_m$  en consecuencia tiene las mismas condiciones que la  $I_2$ , pero a diferencia de  $I_2$ , la  $I_m$  da una idea generalizada sobre lo que ocurre en el sistema membrana - medio externo.

**Resumen sobre las condiciones que deben cumplirse en el modelo analógico.**

Para poder verificar si el modelo analógico de la membrana interno-externa funciona, se resumen las siguientes cinco condiciones básicas:

- 1).- El potencial  $V_1$ , siempre decrecerá (depolarización), mientras - que  $V_2$  (que representa la FEM ( $E_m$ )) aumentará. El proceso es casi - lineal.
- 2).- Las resistencias  $R_1$  y  $R_2$  son variables, pero  $R_2$ , siempre será - mayor que  $R_1$ , las dos decrecen cuando la temperatura aumenta.
- 3).- Si no se aplican al sistema entradas impulso o rampa, la capa- citancia es prácticamente constante para cualquier tiempo 't', en -- caso contrario, su valor se dispara entre 2 y 4  $\mu\text{f}/\text{cm}^2$  en un tiempo- de 10 a 20 m segs, y un potencial 'V' de 20 a 40 (mv).
- 4).- La temperatura, se tomará en sentido creciente o decreciente -- pero en un sólo sentido.
- 5).- La corriente total  $I_m$ , aumentará, pero mostrará un punto máxi- mo y un mínimo. Debido a que en forma experimental se obtienen los- valores de  $I_m$ , en este análisis los resultados pueden considerarse - aproximados, para  $I_m$ .

#### Desarrollo.

A continuación y a modo de interpolación, se han seleccionado tres - conjuntos de datos, que pueden denominarse:

Valores de Límite Superior (5°C)

Valores de Límite Intermedio (15 C)

Valores de Límite Inferior (30 C)

Para evitar trabajar con más variables, se supondrá que no aparecen- excitaciones rampa o impulso, es decir  $C_m = \text{cte}$ . Con ésto se calcu- lará  $I_m$ .

Valores generales de límite superior:

$$\begin{aligned} V1 &= 210 \text{ (mv)} \\ R2 &= 55 \text{ (K } \Omega \text{)} & T &= 5^\circ\text{C} \\ R1 &= 45 \text{ (K } \Omega \text{)} \\ V2 &= 6 \text{ (mv)} \\ C_m &= 1 \text{ (}\mu\text{f/cm}^2\text{)} \\ W &= 3 \text{ (Hz)} \end{aligned}$$

Valores generales de límite intermedio

$$\begin{aligned} V1 &= 175 \text{ (mv)} \\ V2 &= 70 \text{ (mv)} & T &= 15^\circ\text{C} \\ R2 &= 15 \text{ (K } \Omega \text{)} \\ R1 &= 10.5 \text{ (K } \Omega \text{)} \\ W &= 3 \text{ (Hz)} \\ C_m &= 1 \text{ (}\mu\text{f/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

Valores generales de límite inferior

$$\begin{aligned} V1 &= 20 \text{ (mv)} \\ V2 &= 145 \text{ (mv)} \\ R1 &= 1.25 \text{ (K } \Omega \text{)} & T &= 31^\circ\text{C} \\ R2 &= 2 \text{ (K } \Omega \text{)} \\ W &= 3 \text{ (Hz)} \\ C_m &= 1 \text{ (}\mu\text{f/cm}^2\text{)} \end{aligned}$$

Cuando se tiene un determinado circuito de C.A. y se conoce la frecuencia 'W' con la que trabaja, conviene expresarla preferentemente en radianes por segundo (Rads/seg), debido a que gráficamente, es más sencillo de ilustrar y con ello de dar y tener una idea de lo que está ocurriendo.

En este caso:

$$3 \text{ Hz} = 18.3 \text{ (rad/s)}$$

A).- Cálculo de la corriente  $I_m$  cuando  $T = 5^\circ\text{C}$  utilizando la ec -  
(V-7) y sust los datos de límite superior, recordando que:

$$\frac{1}{SC} = \frac{1}{j\omega C}$$

se tiene; desarrollando inicialmente el numerador:

$$\begin{aligned} & V_1 (R_2 + 1/SC) + V_1 (1/SC) - V_2 (R_1 + 1/SC) - V_2 (1/SC) \\ &= 210 (55 + \frac{1}{18.3}i) + 210 (\frac{1}{18.3}i) - 6 (45 + \frac{1}{18.3}i) - 6 (\frac{1}{18.3}i) \\ &= 11,550 + 23i - 270 - 0.655i = 11280 + 22.34i \end{aligned}$$

El numerador  $\Delta$  (delta) será:

$$\begin{aligned} \Delta &= (R_1 + 1/SC) (R_2 + 1/SC) - (1/SC)^2 \\ \Delta &= (45 + \frac{1}{18.3}i) (55 + \frac{1}{18.3}i) - (\frac{1}{18.3}i)^2 \\ \Delta &= 2475 + 5.44i \end{aligned}$$

Colocando al numerador y al denominador en sus lugares respectivos y multiplicando por el conjugado del denominador se obtiene:

$$I_m = \frac{11280 + 22.34i}{2475 + 5.44i} \cdot \frac{2475 - 5.44i}{2475 - 5.44i}$$

$$I_m = 4.55 - 0.09i \text{ (}\mu\text{amp/cm}^2\text{)}$$

B.- Corriente para los valores de límite intermedio, cuando  $T=15^\circ\text{C}$ .

Aplicando el mismo procedimiento que en el inciso anterior se -  
tiene:

En el numerador:

$$\begin{aligned} & V1 (R2 + 1/SC) + V1 (1/SC) - V2 (R1 + 1/SC) - V2 (1/SC) = \\ & = 175 (15 + \frac{1}{18.3}i) + 175 (\frac{1}{18.3}i) - 70 (10.5 + \frac{1}{18.3}i) - 70 (\frac{1}{18.3}i) \\ & = 1890 + 19.2i - 7.64i = 1890 - 11.48i \end{aligned}$$

Calculando el denominador: (delta  $\Delta$ )

$$\begin{aligned} \Delta & = (10.5 + \frac{1}{18.3}i) (15 + \frac{1}{18.3}i) - (\frac{1}{18.3}i)^2 \\ \Delta & = 157.5 + 1.337i \end{aligned}$$

Sust el numerador y el denominador , y multiplicando por su conjugado:

$$I_m = \frac{1890 - 11.48i}{157.5 + 1.377i} \cdot \frac{157.5 - 1.377i}{157.5 - 1.377i}$$

Reduciendo:

$$I_m = \frac{297659.20 - 4410.53i}{24,808.15} = 12 - 0.17i$$

$$I_m = 12 - 0.17i \quad \mu\text{amp/cm}^2$$

C).- Cálculo de la corriente  $I_m$ , para los datos de límite inferior cuando  $T = 30$  C.

Nuevamente se repite el proceso aplicado cuanto  $T = 5^\circ$  y  $15^\circ$

Desarrollo del numerador.

$$\begin{aligned} & V1 (R2 + 1/SC) + V1 (1/SC) - V2 (R1 + 1/SC) - V2 (1/SC) \\ & 20(2 + \frac{1}{18.3}i) + 20(\frac{1}{18.3}i) - 145 (1.25 + \frac{1}{18.3}i) - 145 (\frac{1}{18.3}i) \\ & 40 - 181.25 + 2.18i - 15.84i \end{aligned}$$

Reduciendo el numerador se obtiene:

$$- = 141.25 - 13.06i$$

Calculando el valor del denominador:

$$\Delta = (R1 + 1/SC) (R2 + 1/SC) - (1/SC)^2$$

$$\Delta = (1.25 + 0.054i) (2 + 0.054i) - 0.003i^2$$

$$\Delta = 2.5 + 0.175i$$

Substituyendo el numerador y el denominador en la ec (V-7):

$$I_m = \frac{-141.25 - 13.66i}{2.5 + 0.175i} \cdot \frac{2.5 - 0.175i}{2.5 - 0.175i}$$

Reduciendo se obtiene:

$$I_m = \frac{-3533.4 - 316i}{655.03} = -5.4 - 0.48i$$

$$I_m = -5.4 - 0.48i \text{ } \mu\text{amp/cm}^2$$

La presencia del signo negativo en la corriente (flujo)  $I_m$ , no indica necesariamente que el sentido elegido para la corriente sea opuesto, sino que también existe la probabilidad de que en determinado momento influya en el cambio de signo la presencia de la FEM, lo cual implicaría un aumento en la magnitud de la corriente  $I_2$  en la 2a. malla. (fig. V-12).

Sin entrar en grandes detalles puede decirse lo siguiente:

La corriente se inicia en el circuito de simulación fig. (V-12), con un valor muy bajo, alcanza un máximo, decrece y cambia su sentido. Gráficamente, la corriente es una curva que funciona de una forma similar a una senoide pero de ninguna forma se trata de una curva regular, del seno o el coseno.

B).- Resumen de los aspectos fundamentales de la teoría de control en la membrana de la chara.

Objeto.- Comentar en forma simplificada, las características sobresalientes de la membrana durante las condiciones de excitación. a través de un sistema de control, expuesto en bloques.

Introducción.- Es evidente, como se indicó en el capítulo I, que existe un verdadero sistema de control en cada una de las componentes de la célula vegetal, pero éste sistema por ser puramente bioquímico, aparentemente, no es adecuado para un análisis ingenieril, sin embargo, cuando son cambiadas las condiciones y el punto de vista, es posible efectuar una serie de interesantes estudios sobre su fisiología.

La metodología utilizada para lograrlo, se basa en investigaciones anteriores realizadas por Hodgkin y Huxley en el axon del calamar, pero con adaptaciones al terreno biológico vegetal, ideadas en Japón por el prof. U. Kishimoto y sus colaboradores quienes han conseguido buenos resultados (35) (39). Sin embargo la idea del posible mecanismo de control utilizado por la membrana Chara y su diagrama de bloques son uno de los puntos originales de este trabajo.

Sistema equivalente de control termoeléctrico en el -  
Sistema componente membrana.

El mecanismo de control equivalente de la membrana del alga chara, representado en términos eléctricos, resulta paradójico, por ser sencillo de comprender y difícil de desarrollar, para demostrar tal afirmación, examínese el diagrama de bloques de la fig. (V-14).

El proceso mostrado en la fig (V-13), representa el funcionamiento de la membrana del alga chara, bajo condiciones de excitación termoeléctricas, éste funcionamiento se explicará a continuación:

FIG. V-13

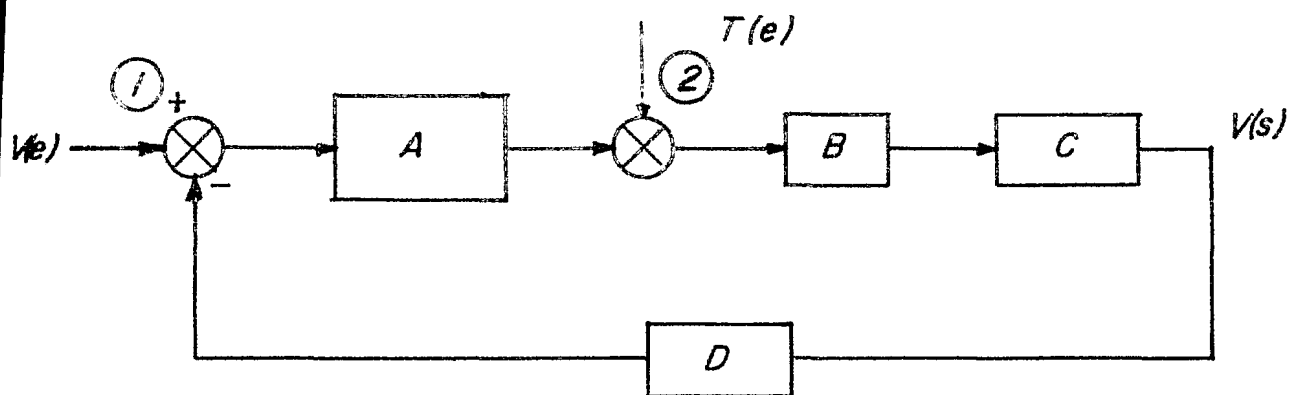


DIAGRAMA DE BLOQUES FINAL QUE EXPLICA EL MECANISMO DE CONTROL DE LA MEMBRANA CHARA EN CONDICIONES DE EXITACION ELECTRICA Y TERMICA DONDE:

A).- UNIDAD DE RECEPCION ELECTRICA

B).- UNIDAD DE REGULACION TERMICA

C).- PLANTA O CIRCUITO INTERNO

D).- UNIDAD DE REALIMENTACION ELECTRO-TERMICA

1).- ENTRADA DE EXITACION ELECTRICA (V(e))

2).- ENTRADA DE EXITACION TERMICA (T(e))



Exteriormente, la membrana está sujeta a un voltaje de excitación  $V(e)$  esa señal de voltaje, es regulada (amplificada o disminuida) debido a procesos electroquímicos, tal representación puede verse en el extremo izq. de la fig. (V-13) donde el bloque (A) representa la unidad de recepción eléctrica.

Si por el contrario, interviene otra excitación como la temperatura  $T(s)$ , entonces el flujo iónico es regulado por los cambios de temperatura, y al mismo tiempo, la FEM ( $E_m$ ) de la membrana efectuará una transformación de energía química a eléctrica, éste efecto se encuentra representado en el bloque (B). El efecto transductor-termoquímico - eléctrico, es siempre precedido por una regulación-termo-eléctrica para poder modificar la señal exterior  $V(s)$ , según las conveniencias fisiológicas de la célula como se muestra en el bloque (c). El bloque (c) vendría haciendo las veces de 'la planta' en un sistema electromecánico.

El último bloque, que tiene la letra (d) en la fig. (V-13), indica esquemáticamente la respuesta modificada de la membrana, (célula)-al realimentarse el sistema.

El verdadero funcionamiento del mecanismo transductor termoquímico-eléctrico y la regulación térmica de la célula vegetal del alga - chara (o en otros organismos), no está todavía identificado, pero se sabe que su ganancia deberá de ser unitaria porque de otra forma el sistema se desequilibra, resultando su respuesta errónea, para lograr utilice sustancias de reserva, o mecanismos especiales para desechar sustancias no deseables.

En cuanto a la llamada Designación Biológica, ya estudiada en el -- capítulo (1), para fines propios de la Ingeniería, bastará con deter

minar adecuadamente (y nó al arbitrio), los elementos receptor y selector según las propiedades biológicas propias de cada célula o sistema componente celular. En el caso concreto de la membrana chara, la recepción en el circuito analógico de la fig. (V-12) se realiza con una resistencia externa variable, y la selección de la respuesta a una excitación externa, en la 2a. malla del circuito de la fig. -- (V-12).

### Conclusiones y Aportaciones

Objeto.- Resumir y señalar adecuadamente las aplicaciones, tendencias y observaciones importantes encontradas para este trabajo.

Introducción.- Como se dijo en el capítulo I, y se verificó en éste capítulo, los procesos fisiológicos vegetales, de un organismo o un sistema componente, son susceptibles de ser simulados, considerando simplificaciones adecuadas, para el desarrollo de modelos matemáticos o de simulación, cuestión que se complicaría profundamente, si se consideran todos los procesos celulares, y por lo tanto el modelo sería prácticamente imposible de realizar por principio, en cambio, el proceso simplificado se puede ir complicando de tal forma que se pueda incrementar el grado de complejidad matemático y por lo tanto la simulación real. De acuerdo a este procedimiento, ya explicado y aplicado, las conclusiones y aportaciones se han dividido en dos secciones para una mejor comprensión:

- 1).- Explicación teórica de los resultados obtenidos.
- 2).- Perspectivas futuras y opiniones sobre la biofísica vegetal.

1).- Explicación teórica de los resultados obtenidos.

Con el propósito de dar a conocer el posible funcionamiento -- del mecanismo iónico de la membrana chara, se comentarán las -- principales teorías de varios autores, así como el punto de -- vista personal, al respecto.

Se han llegado a concretar, de los resultados obtenidos, los -- cuatro hechos siguientes:

- 1.- El flujo en la chara es interno y externo y depende del tiempo y la temperatura, este proceso comprende dos fases: depolarización e hiperpolarización.

Fase de Depolarización.- Cuando el flujo va del exterior al interior de tal forma que el potencial aplicado disminuye gradualmente se dice que la membrana está en fase de depolarización.

Fase de Hiperpolarización.- La fase de Hiperpolarización es lo contrario a la fase de Depolarización; su estudio requiere un análisis similar al desarrollado para la depolarización.

- 2.- Es probable que la corriente interna transitoria durante la depolarización, sea causada por un movimiento hacia el exterior de aniones internos (posiblemente  $Cl^-$ ) - (35) (39)

- 3.- Las curvas representativas de la variación del umbral, - las cuales se representan con diferente pendiente, fig. (V-11), representan el aumento o disminución en el flujo de iones  $K^+$ , ó  $Na^+$ , a través de la membrana; no se descarta la posibilidad de que exista un mecanismo similar en células animales, por ser susceptibles de alterarse -

con diferentes magnitudes de onda.

- 4.- El defasamiento de la corriente mostrado en las gráficas de la fig. (V-3) cuando se aplica una entrada escalón, - se debe a cambios en la capacitancia y conductancia (resistencia), los cuales son el resultado de las variaciones, de temperatura y potencial, externo; el significado de tales efectos en términos biológicos es un cambio en las condiciones ambientales de la membrana, lo que produce, un cambio en la corriente a través de la capacitancia, modificando la frecuencia natural del organismo celular, el propósito de ésta respuesta puede deberse a -- una forma de protección de la continuidad de las funciones vitales del vegetal dentro de un rango de tolerancia predeterminado por la naturaleza particular del organismo en cuestión.

Conclusiones sobre el comportamiento de la capacitancia  $C_m$  y la resistencia  $R_m$ .

Aunque no se estudiaron a fondo la capacitancia  $C_m$  y la resistencia  $R_m$ , existe evidencia del elevado valor explícito de cada una de ellas; 4 a 5  $\mu\text{f}/\text{cm}^2$  para la capacitancia y  $10^2 \text{ K}\Omega$  para la resistencia, en tiempos comprendidos entre 20 y 30 mL-seg, lo que para algunos autores resulta ilógico. Desde un punto de vista personal, puede no serlo, debido al siguiente fundamento teórico:

El flujo iónico hacia el interior de la membrana durante la depola-

rización, equivale, en términos eléctricos a la presencia de una reactancia capacitiva en un circuito de C. A. Esta aseveración proviene de la siguiente observación:

Cuando los iones cargados atraviesan los canales de la membrana (recuérdense las teorías biológicas sobre la membrana en el capítulo -- III), son acelerados o retardados en su movimiento original, lo que ocasiona una leve alteración en la corriente original y una pequeña variación de fase, ya estudiada anteriormente, cuando se utilizó la onda senoidal como entrada.

Según éstas ideas puede concluirse que el valor de la intensidad de corriente, es alterado por la reactancia, sobre todo porque las frecuencias con las que trabaja el circuito son bajas y bien delimitadas.

Inductancia en la Membrana.

Para algunos autores reconocidos (38) y en opinión propia, existen también efectos inductivos en la membrana Chara, ya que el flujo iónico varía en el tiempo y el potencial, pero tales efectos no son bien conocidos ni se tiene información confiable al respecto.

Las resistencias, por su parte, siempre son muy grandes si se comparan con las resistencias eléctricas normales; en la membrana, esos valores se deben sobre todo a razones fisiológicas, y en el caso del ambiente externo, R1 se debe por principio a condiciones ecológicas y posteriormente a un conjunto de condiciones químicas conocidas como APW.

Comentarios sobre la Bioingeniería y la Célula Vegetal.

De la Bioingeniería puede decirse lo afirmado por el Dr. John Lenihan de la Universidad de Glasgow (41):

La Bioingeniería, guiada por un camino positivo, podría ser la principal contribución de la tecnología moderna al bienestar de la humanidad y la naturaleza.

Finalmente y en opinión propia: la célula vegetal constituye al igual que las células animales una obra maestra de Ingeniería -- con la que ningún proyecto tecnológico concebido por el hombre podría atreverse a competir.

BIBLIOGRAFIA DEL  
CAPITULO (I)

- (1).- Argos. Enciclopedia Temática. Ed. Argos Tomo 58. Madrid 1978.
- (2).- de Rosnay Joel, Orígenes de la Vida. Ed. Mtnez Roca. Colección Microcosmo. Barcelona 1974.
- (3).- BSCS de Venezuela, Ciencias Biológicas. Ed. CECSA. Caracas. - Venezuela 7a. Ed.
- (4).- Bollinger G. Jhon. Controles Automáticos. Ed. Trillas. México 1979.
- (5).- Ministerio Español de Educación y Ciencia. Automática (I). Ed. Universidad Nal. de Educación a distancia. Madrid 1976.
- (6).- Nason, Alvin. Biología. Ed. Limusa & Wiley. México, 1970.
- (7).- Domínguez R. Ramón. Química Elemental. Ed. Porrúa Hnos. México 1968.
- (8).- Chopin & Raffte. Química, Ciencia de la Materia, la Energía y el Cambio. Ed. Publicaciones Cultural 1968.
- (9).- Espinosa & Lara R. Bioingeniería. Sus tendencias actuales. - Revista de Ingeniería 1977. Vol. 47. Fac. de Ingeniería.
- (10).- Domínguez V. Sergio. Análisis de Sists. Biológicos. Rev. de Ingeniería 1977. Vol. 47. Fac. de Ingeniería.
- (11).- Lara Z. Rolando. Modelo Neurológico. Facultad de Ingeniería. U.N.A.M. 1974, México.

BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO II.

- 12).- Motts & Calderón, Botánica. Ed. A. H. México 1949.
- 13).- Park S. Nobel, Plant Cell Physiology. Ed. W. H. Freeman & Company. San Francisco 1971.
- 14).- Spanswick Roger. The Electrogenic Ion Pump. Section of - Botany G & D. Plant Science Physiology Journal. Cornell University. New York 1979.
- 15).- Donald F. Tindall. Observations on Nitella Aluminata from Southwestern U.S.A. and Northern Mexico. Botany Dept. - Southern Illinois University. Journal Phycology. Vol. 6. 1969.
- 16).- Spanswick, Lucas & Dainty. Plant Membrane Transport: Current Conceptual Issues. Ed. Elsevier Biomedical Press. Canadá. 1974.
- 17).- Palma Marvin. Glicol. Ed. Interamericana. 1a. Ed. México -- 1969.



BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO III

- 18).- Gregor & Gregor. Tecnología de Membranas Sintéticas. Revista. Investigación y Ciencia. Septiembre 1978.
- 19).- Allend Bard. Equilibrio Químico eds. del Castillo. Madrid - 1970.
- 20) Van Vlak Lawrence. Materiales para Ingeniería. Ed. CECSA. México 1964.
- 21) Flashka & Barnard. Química Analítica Cuantitativa. Volumen II. Ed. CECSA. México 1973.
- 22).- Neurocibernética: fisiología y modelos matemáticos neuronales. Rev. de Ingeniería. Ismael Espinosa E. Enero-Marzo 1977. Fac. de Ingeniería UNAM.
- 23).- Fenson & Silverberg. Changes in electroosmotic measurements in Nitella TransLucens. Journal Canadien de botanique. 1980.
- 24).- Leyton Leonard. Fluid Behavior in Biological Systems. ed. -- Oxford - Clarendon Press. London 1975.
- 25).- Bernal, M. D. The Structure of water and its implications - in the state and movement of living organisms. Ed G. E. Fogg. - Cambridge University 1965.

- 26).- Scheidegger Adrian. The physics though porous media. Ed.  
Springer Verlag. Osterrich 1974. (Austria).
- 27).- Prigogyn. Introduction to thermodynamics of Irreversible Pro-  
cess. Ed. American Elsevier. New York 1972.

B I B L I O G R A F I A

DEL CAPITULO IV.

- 28).- Mataix, Claudio. Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Ed. Harla México - Madrid 1969.
- 29).- Shanley F. R. Mecánica de Materiales. Ed. McGraw Hill 1971. México.
- 30).- Salvat. Diccionario Enciclopédico. Salvat Editores Madrid. - 1976. Tomo 6.
- 31).- Tamiya & Tazwa. The relation of Turgor Pressure to Cell volume in Nitella and Mechanicals Properties of Cell Wall. - Osaka University 1964.
- 32).- G. Key Eugene. Principles of Electricity Ed. Barnes & Noble. College Outline series. Los Angeles 1967.
- 33).- Bahill Terry A. Bioengineering Ed. Prentice Hall. Carnegie Mellon University New Jersey 1981.
- 34).- U. Kishimoto & Akabori. Electrical Characteristics of Chara-Corallina. C.E.G. Osaka University 1960.
- 35).- Geddes L.A. & Da Costa. Principles of Applied Biomedical -- Instrumentation. New York. Jhon Wiley & Sons. 1975.

BIBLIOGRAFIA DEL CAPITULO V

- 36.- Mandujano W. R. Federico. Desarrollo y Simulación del modelo -  
del Músculo esquelético. Tesis. Fa-  
cultad de Ingeniería. U.N.A.M. 1980.
- 37.- Sears W. Francis. Electricidad y Magnetismo. Ed. Aguilar. --  
Madrid 1972.
38. U. Kishimoto. Taka A. Ohkawa Breakdown Fenomena in Chara Membra-  
ne. C.E. G. Osaka University 1977.
- 39.- U. Kishimoto, Taka A. Ohkawa Anode Breakdown Excitation in Cha-  
ra membrane. C. E. G. Osaka University 1975.
- 40.- Meislich & Turk. Fundamentos de Química. Ed. CEGSA México, 1970
- 41.- Cárdenas & Manrique. Termodinámica. Ed. Harla México 1976.
- 42.- Leniran John. Ingeniería Humana. Ed. Alianza Editorial.  
Madrid 1980.
- 43.- E. Steudle & V. Zimmermann. The Plant Physiology. Ed. Cana--  
dian Journal Botany. Canadá 1976.