



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

MODELO EXPERIMENTAL DE UN OSCILADOR NO LINEAL

REPORTE DE
INVESTIGACIÓN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICA

P R E S E N T A

MARÍA DEL CARMEN LEDESMA ORTÍZ

TUTORA

Dra. GERTRUDIS HORTENSIA GONZÁLEZ GÓMEZ

2008





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Del árbol cuelgan todas las palabras hermosas
que brillan, maduran, caen *



A MI FAMILIA

Jorge Humberto Arce Rincón: la oportunidad para elegir, dentro de otros temas de investigación, al OSCILADOR HIDRODINÁMICO DE DENSIDAD SALINO (Os), siempre al pendiente de mis avances; tus comentarios me ayudaron a darle un mejor matiz a este reporte de investigación.

Estefanía del Carmen Butron Ledesma:

tu tiempo, compañía y enseñanzas ...

SI ERES UNA BELLA FLOR QUE ME HA MOSTRADO LA EVOLUCIÓN DEL SER HUMANO, Y DE AQUEL GRAN MOMENTO QUE TODOS EXPERIMENTAMOS:

LA VIDA, tu selección de figuras para el capítulo I enriqueció este trabajo.

Gertrudis Hortensia González Gómez:

que decir de todo lo que hemos compartido y aprendido...

Si los amigos son mágicas joyas

Las horas de trabajo en el análisis de resultados experimentales nos ha brindado la oportunidad de construir entre ambas una pieza de un gran mosaico.

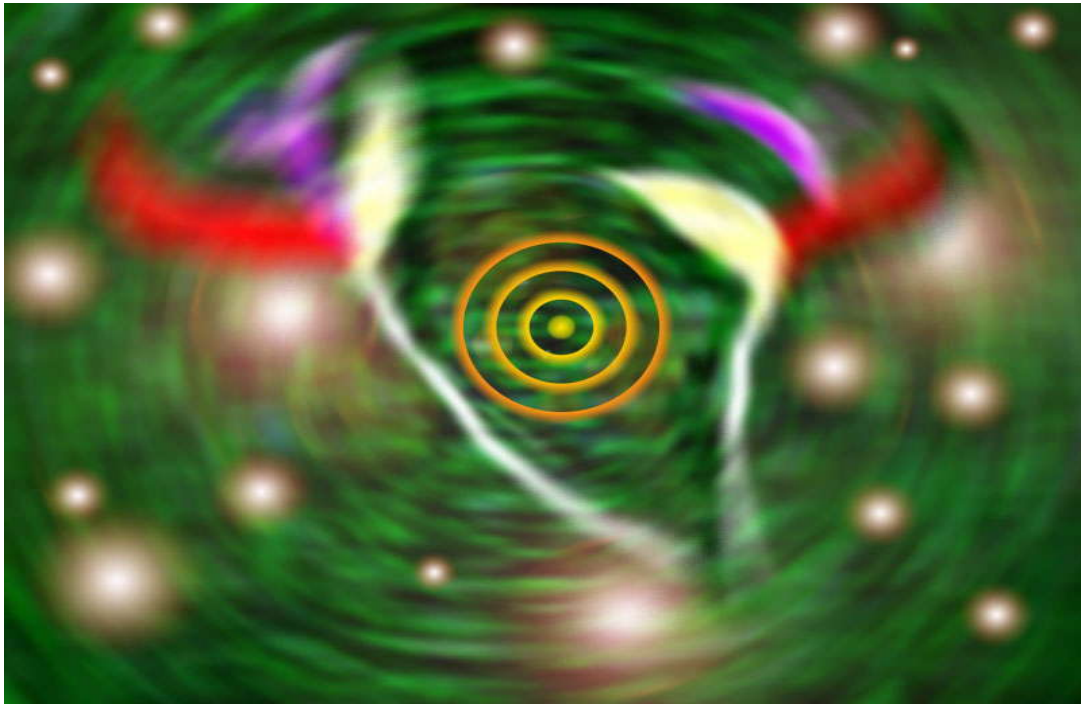
Michael R. Guevara: tu apoyo y enseñanza ...

tus palabras siempre son un gran estímulo para crecer, en esta apasionante tarea que es la investigación.

Leon Glass: la motivación para desarrollar modelos en el área de cardiología, y sus consejos... durante su estancia en la Escuela Latinoamericana de Física (ESLAF – 92).

Oslab > por jugar ...aquella partida de pin-pon, (01-03-07) donde te conocí, y a partir de entonces buscamos juntos los latidos del corazón ...

* Octavio Paz.



ALGUNOS DATOS DE QUIEN PRESENTA Y DIRIGE ESTA INVESTIGACIÓN

△ Un reconocimiento a la Labor de la Mujer Mexicana
Avon Cosmetics, S.A. de C.V. otorgó a

María del Carmen Ledesma Ortiz (Ledesma-O, C.)

Por la participación en el Premio Zazil 1989.

△ La Academia Mexicana de Ciencias otorgó
el Premio Weissman 1992 a la

Dra. Gertrudis Hortensia González Gómez (González,H.)

en el área de Ciencias Naturales.

De manera extensiva mis agradecimientos

☉ A mis amigos ...

entre ellos Silvia Bravo creadora del proyecto del primer observatorio con radiotelescopio de centelleo interplanetario, Coeneo Michoacán-México, Carlos Graef Fdz, Alberto Barajas Celis, Matilde Moreno, Juan Manuel Lozano Mejía, ejes de la Institucionalización de la Ciencia Mexicana en las áreas de la Física y las Matemáticas, de quienes aprendí un estilo de hacer ciencia.

Especialmente a

M.C. Ma. De Lourdes Velasco Arreguí
Dr. Carlos Villareal Luján
Dr. Carlos Málaga Iguíñiz
Dr. Rogelio Soto Ayala
Dr. José Lino Samaniego Méndez
Biól. Jaime García Ruíz
M.Adm. e Ing. Jaime Ledesma Ortíz
Ing. Alejandro Jaramillo Morales[◇]
M.C. José Luis Urrutia Navarro
Laura Cruz Mtz. Alma R. Aguilar García,
Antonio Glez. Reséndiz y Claudia García Serralde.



A mi Alma mater la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO:
FACULTAD DE CIENCIAS, DERECHO, QUÍMICA, INGENIERÍA E IFUNAM, y
La Escuela Nacional Preparatoria 2.

*A cada uno de mis jurados quienes amablemente
revisaron este Reporte de Investigación y me brindaron,
a través de sus comentarios, parte de su experiencia ...
ayudándome a plantear nuevas expectativas en esta
actividad que es la INVESTIGACIÓN*

**HORTENSIA GONZÁLEZ GÓMEZ MI PROYECTO DE MAESTRÍA ESTARÁ
COMO SIEMPRE BAJO TU SUPERVICIÓN Y ENSEÑANZA,
REALIZANDO ASÍ OTRA DE MIS METAS.**

**Pero claro, a mis mascotas.... sin olvidar jamás la creación y esas fuentes
de energía: Dios.**

A todos Gracias:.-.-.-¿¿¿

[◇] Consejero Universitario Suplente.

ÍNDICE

ÍNDICE	4
ABSTRACT	5
RESUMEN	7
I - ANTECEDENTES	9
I.1 De Oscilaciones y Fluidos	10
I.2 El Ciclo Cardíaco como un oscilador	14
II OSCILADOR HIDRODINÁMICO SALINO	23
III OBJETIVOS	27
IV DISEÑO EXPERIMENTAL	28
IV a - MONTAJE EXPERIMENTAL	28
IV b - PROTOCOLOS	30
IV c - CURVAS DE TRANSICIÓN DE FASE	31
IV d - MODOS DE ACOPLAMIENTO	33
V RESULTADOS EXPERIMENTALES	34
V a - Curvas de Transición de Fase	37
V b - Modos de Acoplamiento	48
V c - Otras Observaciones Experimentales	54
VI - CONCLUSIONES y PROPUESTAS	55
BIBLIOGRAFÍA	58

KEYWORDS:

**Rhythms, Experimental Non Linear Oscillator,
Hydrodynamic Oscillator, Phase Transition Curve**

ABSTRACT

The Saline Oscillator is presented as simple but robust experimental model for studying non linear systems.

Chapter II describes the experimental set up and the principal characteristics of this hydrodynamic oscillator.

The purposes of this activity were:

- 1.- Characterize the effect of volume perturbations of relative intermediate intensity on the spontaneous oscillations of the saline oscillator.
- 2.- Review some basic principles of Reset Theory and its application to the saline oscillator, since this activity is part of the work done in the LABSE-FACUNAM, Laboratory of Biophysics of Excitable Systems at the Faculty of Sciences UNAM .

To carry out the first objective two experimental protocols were employed:

- a) Phase Transition Curves (PTC) obtention. In this context phase transition is not related to the ordering of molecules, but to the different moments in the natural oscillation cycle.
- b) Periodic Volume Perturbations to explore Locking Phase Rhythms.

The obtained results lead to conclude that:

A.- PTC for intermediate intensity perturbations contains four regions:

For perturbations close to the start of the natural oscillation (T_0), between $0.1T_0$ and $0.20T_0$, there is no variation in the natural cycle length.

For perturbations applied in middle phases, $0.21T_0$ and $0.59T_0$, there exists a pronounced reduction in the oscillation duration.

For perturbations in delayed phases, there is no noticeable change in the natural cycle length, this is between $0.60T_0$ and $0.85T_0$.

For perturbations applied in phases $0.86T_0$ and $1T_0$, a prolongation in cycle length was observed.

B.- The locking phase rhythms were in general of $n:1$ type, that is, "n" perturbation pulses were coupled to one oscillation of our hydrodynamic system. This result is similar to what has been described for others periodically driven non linear oscillators when intermediate intensities are used.

Chapter IV include conclusions and some general suggestions.

R E S U M E N

A mediados del siglo XX, se empezó a desarrollar de manera muy importante la Dinámica No Lineal (DNL), una nueva forma de estudiar y entender los procesos y fenómenos de la naturaleza, los de tipo social e incluso el arte. Para ello, se han desarrollado interesantes métodos matemáticos, muchos de ellos asociados a la incorporación y desarrollo de la tecnología de las computadoras, cuyo propósito, entre otros, es hacer simulaciones de ecuaciones diferenciales de tipo no lineal, aplicando herramientas conceptuales como formación de patrones y caos, por citar algunas.

Un caso particular de oscilador no lineal es el Oscilador Hidrodinámico de Densidad Salino, descrito en el capítulo II de este manuscrito. El objetivo de mi Investigación Experimental consistió en:

- 1.- Estudiar y caracterizar el efecto de las perturbaciones de volumen con intensidad comparativamente intermedia, sobre la oscilación natural del oscilador salino.
- 2.- Hacer una revisión bibliográfica sobre el Oscilador Hidrodinámico de Densidad Salino, además de conocer los principios de la Teoría de Reinicio.

Para investigar el punto (1) se emplearon dos protocolos:

- (1) Curvas de Transición de Fase (Phase Transition Curve). Donde el concepto transición de fase no se refiere al ordenamiento de las moléculas en un estado termodinámico, sino a los diferentes momentos del ciclo de oscilación.
- (2) Modos de Acoplamiento a Perturbaciones Periódicas.

De los resultados obtenidos se concluye que:

- A.- Las Curvas de Transición de Fases, para medianas intensidades de perturbación, se caracteriza por cuatro zonas:

- (i) Para perturbaciones realizadas en fases próximas al inicio del ciclo natural, T_0 , no hay efecto o variación del ciclo espontáneo, esto ocurre cuando las perturbaciones se aplican en fases entre $0.1T_0$ y $0.20T_0$.
- (ii) En las perturbaciones efectuadas en fases intermedias, se presenta un acentuado cambio en la duración de la oscilación, esto ocurre en las fases entre $0.21T_0$ y $0.59T_0$.
- (iii) Las perturbaciones en las fases tardías entre $0.60T_0$ y $0.85T_0$ no presentan un efecto apreciable.
- (iv) Para perturbaciones muy cerca del final del ciclo, de $0.86T_0$ a $1T_0$, se observa alargamiento en la duración de la oscilación.

B.- Los Modos de Acoplamiento a Perturbaciones Periódicas de Mediana Intensidad tuvieron prioritariamente un ritmo n:1; es decir, a cada perturbación (n) se asocia una respuesta del oscilador hidrodinámico salino, lo que coincide con acoplamientos encontrados en otros sistemas de osciladores de tipo no lineales, cuando se emplean perturbaciones de intensidad relativa mediana. Las analogías que aquí propongo son referidas al sistema cardiovascular.

En el capítulo VI, se muestran las conclusiones de esta investigación experimental.

- Adicionalmente, (i) a partir del capítulo II se presentan parte de las fotografías y registros experimentales que realicé asociados a diferentes facetas de oscilación del Oscilador Hidrodinámico Salino, mostrando algunas de sus dinámicas.
- (ii) las tres propuestas que hago en el capítulo VI, son con el objetivo de mejorar la realización de los experimentos y tener un mejor manejo de datos.

I ANTECEDENTES

La célula, grano natural de vida,
tal como el átomo es el grano natural
de la materia inorgánica.
Y es en la célula donde reaparece
en suma la trama del Universo.



En el siguiente capítulo se presentan algunos conceptos que ayudan a describir sistemas dinámicos con propiedades oscilatorias, en ocasiones estas oscilaciones pueden ser muy complicadas como las presentes en el sistema cardiovascular humano. Existe otro sistema aparentemente sencillo tal es el caso de un sistema hidrodinámico conocido como oscilador salino (Os), este puede ayudarnos a describir algunas de las propiedades dinámicas de los osciladores espontáneos, en el corazón tenemos, entre otros, el latido cardíaco pero existen muchos en la naturaleza. Para describir estos sistemas dinámicos a través de nuevos modelos se necesita, entre otras cosas, de herramientas matemáticas como la dinámica no lineal (DNL).

1.1 De Oscilaciones y Fluidos

Hay en el fondo de todo aquello que se sabe
algo que se ignora;
en lo más viejo,
en lo más estudiado,
en lo mejor conocido,
hay siempre algo nuevo que decir.

Alfonso Buendía[◇]

Muchas situaciones complejas y relevantes para el hombre y su entorno son motivo de grandes investigaciones; por ejemplo, la evolución de los sistemas ecológicos, las señales electrónicas, las variaciones dinámicas en la fisiología vegetal y animal, el régimen de temperaturas de la tierra, los movimientos o flujos de las poblaciones biológicas, o el caso de las dinámicas oceanográficas, como las mareas, etcétera. Desde una perspectiva cualitativa vemos que en todos ellos existen variaciones periódicas, que pueden representarse como oscilaciones.

Las oscilaciones son uno de los patrones dinámicos más comunes en la naturaleza. Una propiedad característica muy importante de las oscilaciones es su período, que pueden ir desde fracciones de segundos, por ejemplo, en las áreas de la biología molecular o en fisiología, como el latir del corazón, la actividad neuronal; hasta miles de años como en las variaciones geológicas. También es frecuente encontrar que las oscilaciones están sujetas a la modulación de otras oscilaciones, como la de los ritmos circadianos (alrededor de un día). La Figura 1 ilustra la influencia del ambiente en la biodiversidad. Los parámetros ambientales tienen variaciones periódicas o ritmos, como pueden ser los ciclos del día y la noche, las estaciones del año, entre otros. Estos ciclos influyen en las variables fisiológicas, y establecen en buena medida las posibilidades de los organismos de habitar un ambiente determinado.



Figura 1.
La influencia de los ritmos circadianos en la biodiversidad.

[◇] Cardiólogo mexicano, presidente de la Sociedad Mexicana de Cardiología 2006-2008.

El Uso de Modelos:

La interpretación de muchos fenómenos y problemas prácticos se han dado desde la teoría atómica, con este punto de vista la materia ha podido ser descompuesta en moléculas, átomos y más recientemente en partículas elementales o subatómicas, dando lugar a algunas de las ideas claves de la cultura moderna y, por supuesto, a la generación de sofisticadas tecnologías. Todas estas teorías están apoyadas en la modelación de la naturaleza, plasmadas en los trabajos de Isaac Newton, James Clerk Maxwell, Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes y otros científicos de distintas disciplinas.

En particular, la necesidad de comprender algunos de los fenómenos asociados con los fluidos surgió, desde mi punto de vista, en la antigüedad, cuando el hombre tuvo problemas por sanar su cuerpo, en la crianza de los hijos, para suministrar agua en sus comunidades, para irrigar sus cosechas o de navegación, entre otros. Para ello operó ruedas hidráulicas, estudió los fluidos de su cuerpo y creó distintos dispositivos, cuyo manejo requeriría del empleo de técnicas especiales para manipular y controlar una variedad muy grande de fluidos.



Leonardo da Vinci (1452-1519) realizó interesantes estudios sobre los fluidos turbulentos y las olas del mar, Figura 2a. Posteriormente, los ingenieros se interesaron en optimar el aprovechamiento de las aguas¹ e investigaron de manera más sistemática la dinámica de los fluidos al igual que sus propiedades fisicoquímicas, Figura 2b. Aproximadamente, en 1950 se comenzó a estudiar metódicamente la transición del flujo laminar a flujo turbulento.

Figura. 2a Patrones de olas y turbulencias son monitoreados actualmente por satélites².

¹ El interés de las grandes empresas industriales por utilizar y extraer elementos petroquímicos y manipular los manantiales naturales, para obtener grandes beneficios económicos, empezó a requerir de la aplicación constante de las teorías científicas y de un novedoso desarrollo tecnológico.

² Las observaciones hechas a través de los satélites artificiales (percepción remota) ayuda a los gobiernos a tomar decisiones para evitar catástrofes en las comunidades próximas a las zonas costeras o tener buenos sistemas de navegación y pesca.

De manera general, observamos que los fluidos con movimientos erráticos, tienen comportamientos difíciles de predecir con exactitud, dado que muestran irregularidades en sus trayectorias. Cuando presentan estas características se dice que el sistema muestra sensibilidad a las condiciones iniciales³, uno de los requisitos para ser tratados bajo la perspectiva de la Dinámica No Lineal (DNL), considerada como una de las grandes revoluciones intelectuales del Siglo XX, integrada por diferentes áreas como el estudio de formación de patrones, acoplamiento de osciladores y caos, entre otros.



Figura.2b Los griegos y los romanos construyeron acueductos y diversos dispositivos hidráulicos.

En el caso de la dinámica de los fluidos en ocasiones se observa la formación de distintos tipos de estructuras; por ejemplo, la formación de ondas cuando viajan por un medio material de tipo líquido, como las que pueden observarse en el agua, sólo se tiene una nueva disposición en la superficie del agua pues el volumen permanece constante. De ahí que la interpretación que se da a una onda es la de perturbación de un medio, Figura 3. En el caso de estudiar fenómenos en medios líquidos, como el agua, deberá tomarse en cuenta, por ejemplo, su densidad y concentración entre otras propiedades físicas⁴. Se muestra en las Figuras 2b y 3, estructuras o patrones diferentes a las que se propagan en el océano.

³ La dependencia de las condiciones iniciales está asociada a la posibilidad de caos, ampliamente estudiado en los sistemas dinámicos.

⁴ Cuando un cuerpo se sumerge en un fluido, éste ejerce una fuerza perpendicular a la superficie del cuerpo en cada punto de la superficie resultando, entonces, que la presión es la fuerza por unidad de área.

En la Figura 4 es claro observar cómo las variaciones climáticas pueden formar diferentes patrones como en el caso de las nubes, consideradas también como agregados, con distinto espesor.



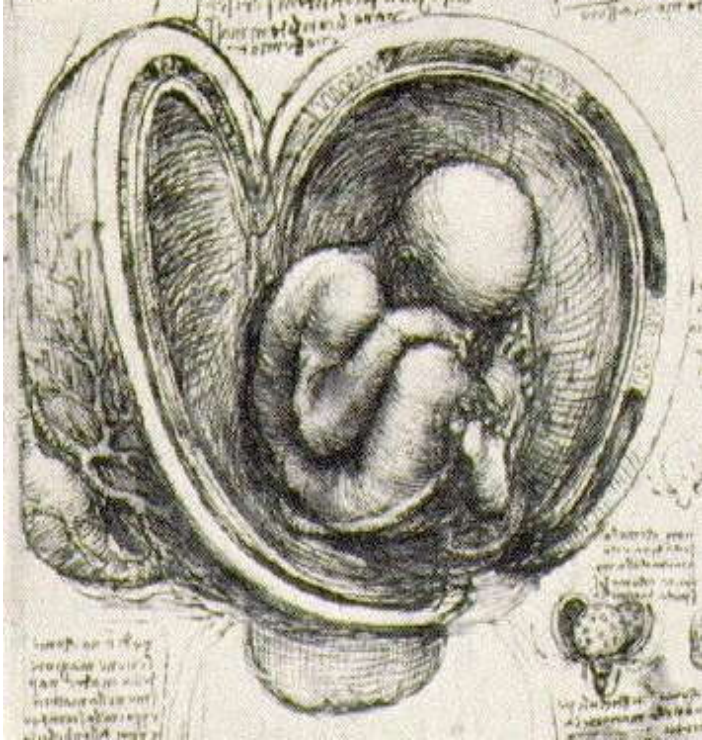
Figura. 4 Inestabilidades fuera de equilibrio: formación y patrón de nubes a 85km del nivel mar⁵.



Figura. 3 Las perturbaciones en el agua genera dinámicas complejas, y pueden estudiarse con DNL.

⁵ <http://www.atoptics.co.uk/droplets/iridimOa.htm>

1.2 EL CICLO CARDIACO COMO UNA OSCILACIÓN



Leonardo da Vinci⁶

“Lo realmente valioso del pensamiento es la intuición.

El intelecto tiene poco que ver en el camino al descubrimiento. Ahí surge un salto en la conciencia, llamada intuición o lo que tú quieras, y llega la solución sin que sepas cómo o por qué.

Entonces, la explicación de las cosas deberá ser lo más simple posible, pero no más”.

Alberto Einstein

A ESTEFANÍA DEL CARMEN (ESTEFANI)

La evolución biológica ha logrado desarrollar distintos mecanismos para lograr la supervivencia, entre ellos están la autorreparación y la autorregulación cuyo resultado principal es mantener de manera dinámica y sistemática las funciones del organismo, así como sus demandas energéticas.

Estos mecanismos que son muy complejos repercuten inevitablemente en la fisiología y composición de los tejidos del cuerpo, y a lo largo de la vida sufren desgaste y dejan de funcionar adecuadamente, entonces, las enfermedades se gestan por las alteraciones en las propiedades de autorregulación en el organismo y en ocasiones el sistema

⁶ www.biografiasyvidas.com/monografia/leonardo

inmunológico⁷ se ve afectado por bacterias y virus manifestando sus acciones en los órganos y en los tejidos de los seres vivos, degradándoles en forma de atrofas y como última consecuencia se tiene la muerte. Aunque algunas bacterias, que viven en el cuerpo humano y en el de otros animales han estado sorprendentemente bien adaptados, tanto que habrían ayudado a diferentes especies a evolucionar, como lo expresa la doctora Julie Segre⁸, del Instituto Nacional de Investigación del Genoma Humano en U.S.A. En particular, el Sistema Cardiovascular ha involucrado y apasionado a un enorme número de estudiosos, quienes han propuesto modelos desde muchos enfoques, en los cuales se intenta representar la dinámica cardiaca y vascular, el flujo sanguíneo y los flujos de energía entre las células y sus bioproductos. Este conocimiento se ha venido enriqueciendo y desarrollando con distintas tecnologías con la finalidad primordial de contar con mejores opciones para mejorar la calidad de vida de los individuos y de algunas especies menores, apoyadas por fármacos e intervenciones terapéuticas.

Dada la complejidad que existe entre los distintos sistemas fisiológicos del cuerpo, aún en nuestros días, el caso del sistema cardiovascular representa un gran reto. Este sistema es muy complicado de estudiar, una forma alterna al punto de vista de las ciencias médicas es desde los planteamientos de las biomatemáticas y la física⁹, clasificándole como parte de los sistemas dinámicos. Actualmente para su modelación se requiere, entre otras cosas, del empleo de elementos matemáticos como la dinámica no lineal (DNL) aunados a diferentes prototipos experimentales y computacionales.

Imaginemos por un momento la dinámica cardiovascular:

El corazón es considerado una bomba formada por tejido muscular, Figuras 5 y 8, la energía de bombeo del corazón proviene de un sistema de conducción eléctrica. El impulso eléctrico se genera en el nódulo sinusal, que es una pequeña masa de tejido de conducción especializado localizada en la aurícula derecha.

El nódulo sinusal genera periódicamente en condiciones normales un impulso eléctrico (de 60 a 100 veces por minuto), viaja a través de las vías de conducción y hace que las cavidades del corazón se contraigan. Las aurículas son estimuladas en primer lugar, estas se contraen durante un breve período de tiempo y posteriormente el impulso eléctrico viaja desde el nódulo sinusal hasta el nódulo aurículo-ventricular, donde disminuye su velocidad de conducción durante un breve instante: "como si se detuviera" y después continúa por las vías de conducción a través del haz de His que se divide en la rama derecha y en la rama izquierda, para proveer de estímulo eléctrico a los dos ventrículos.

⁷ es.wikipedia.org/wiki/Sistema_inmunol%C3%B3gico

⁸ "Creo que realmente debemos cambiar el lenguaje y dejar de pensar a las bacterias como patógenas; deberíamos apreciar a las bacterias como una ayuda para nuestra salud".

⁹ En la actualidad existen programas de investigación y docencia referidos como Física de la Materia Viva o Biofísica.

Las aurículas se contraen antes que los ventrículos para que dé tiempo a que la sangre que contienen se vacíe en los ventrículos antes de que éstos se contraigan. Por tanto, las células del tejido cardíaco presentan actividad eléctrica además de contracciones y relajaciones, movimientos que se realizan de forma rítmica donde cada contracción representa un latido.

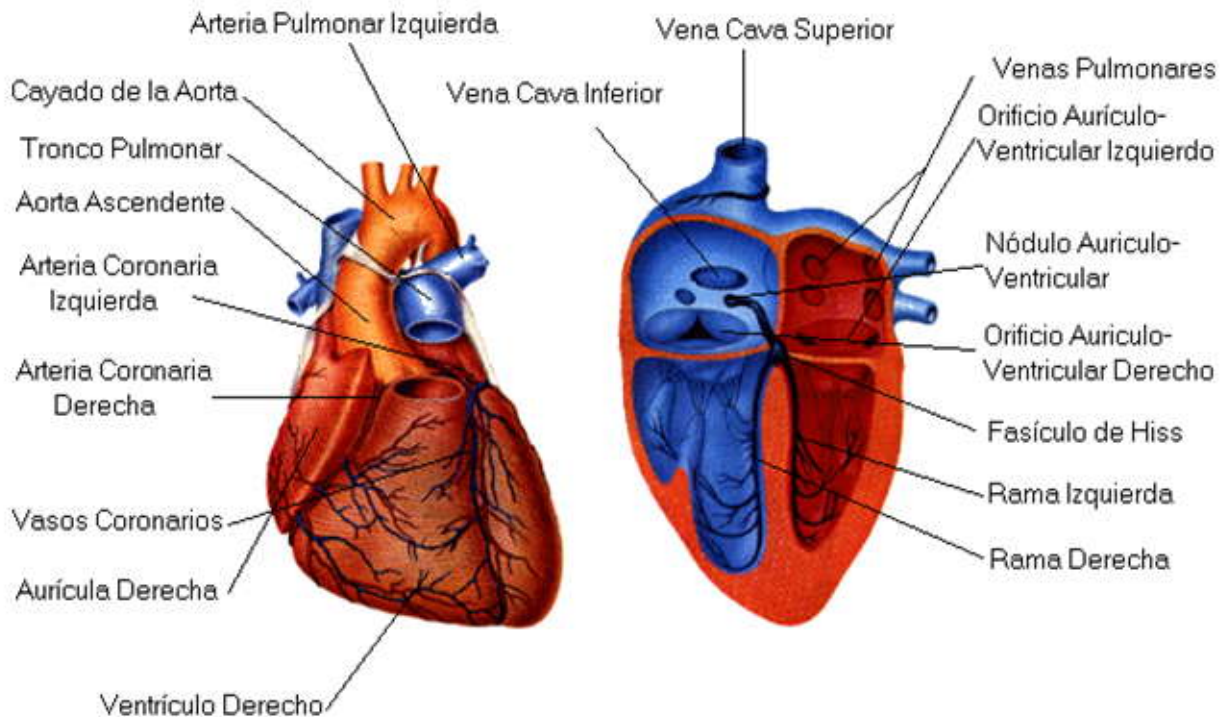


Figura 5. Descripción Anatómica y Morfología Interna del Corazón.

En particular, un ciclo cardíaco¹⁰ consta de dos fases:

- (1) en la sístole se produce la contracción del músculo cardíaco, en la aurícula 0.2 segundos y en el ventrículo 0.3 segundos, bombeando sangre a todo el organismo.
- (2) se llenan de sangre sus cavidades durante la parte del ciclo cardíaco llamada diástole.

¹⁰ Berne & Levy. Physiology. Mosby Year Book, 1993.

¹¹ En México, a partir de 1930 se realizan monitoreos frecuentes a los pacientes afiliados a los centros de salud públicos y privados. Tema abordado en la 3ª Reunión de Investigadores en Variabilidad de los Procesos Fisiológicos, Instituto Nacional de Cardiología, México (2008). [es.wikipedia.org/wiki/Sístole_\(corazón\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Sístole_(corazón))

En el diagnóstico de trastornos cardiovasculares como el de la hipertensión arterial¹¹, la diástole y la sístole son elementos importantísimos para poder determinar el tipo de manejo clínico que se dará al paciente, generalmente, se suministra un fármaco con el objeto de nivelar o recuperar el ciclo natural cardiaco.

Adicionalmente, el corazón puede considerarse como un grupo de células conectadas entre sí, comandadas por algunas células marcapasos, con actividad espontánea, es decir, células que producen señales eléctricas periódicas generando un ritmo determinado. Su principal función es activar y transmitir las señales eléctricas conocidas como potenciales de acción, que recorren y atraviesan al músculo cardiaco desde el nodo seno-atrial, principal marcapasos natural, hasta el nodo del atrio-ventricular y de ahí hasta el ápice del corazón.

La acción biomecánica del corazón¹² hace que se expulse rítmicamente el flujo de sangre a través de las arterias, aproximadamente una vez por segundo. En el caso de anomalías los ritmos y latidos cardiacos se ven modificados, y claro, como una consecuencia, se presentan alteraciones en el propio corazón y en otras regiones del organismo, que influyen de manera trascendente en la salud de una persona. Por tanto, resulta importante analizar con que regularidad se dan las activaciones rítmicas del corazón.

Una estrategia para analizar el sistema cardiovascular, desde la perspectiva experimental¹³, ha sido a través de estudios de fisiología comparada¹⁴, en especies como en ranas, conejos, ratas, perros, gatos, pollo (Figura 6b) e incluso chimpancés, ya que en ellos existen analogías básicas con la dinámica del corazón humano. Los avances en cardiología han sido muchos pero aún quedan titánicas tareas por realizar como el óptimo crecimiento de tejido cardiaco artificial, como se muestra en la Figura 6a.

¹² Genera un estado cuasiperiódico, y también da el carácter de la pulsatilidad en la circulación sanguínea.

¹³ En 1982 fueron emitidas por el Consejo de Organización Mundial de la Salud de las Ciencias Médicas (COICM) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) las Propuestas Internacionales para la Investigación Biomédica Relacionadas con Seres Humanos, documento que completa hasta el presente los esfuerzos que se realizan por parte de la comunidad mundial para delinear no sólo los principios de la ética más apropiada a las investigaciones biomédica en seres humanos.

¹⁴ En otras especies de vertebrados e incluso de invertebrados, estos últimos con patrones de organización distintos.

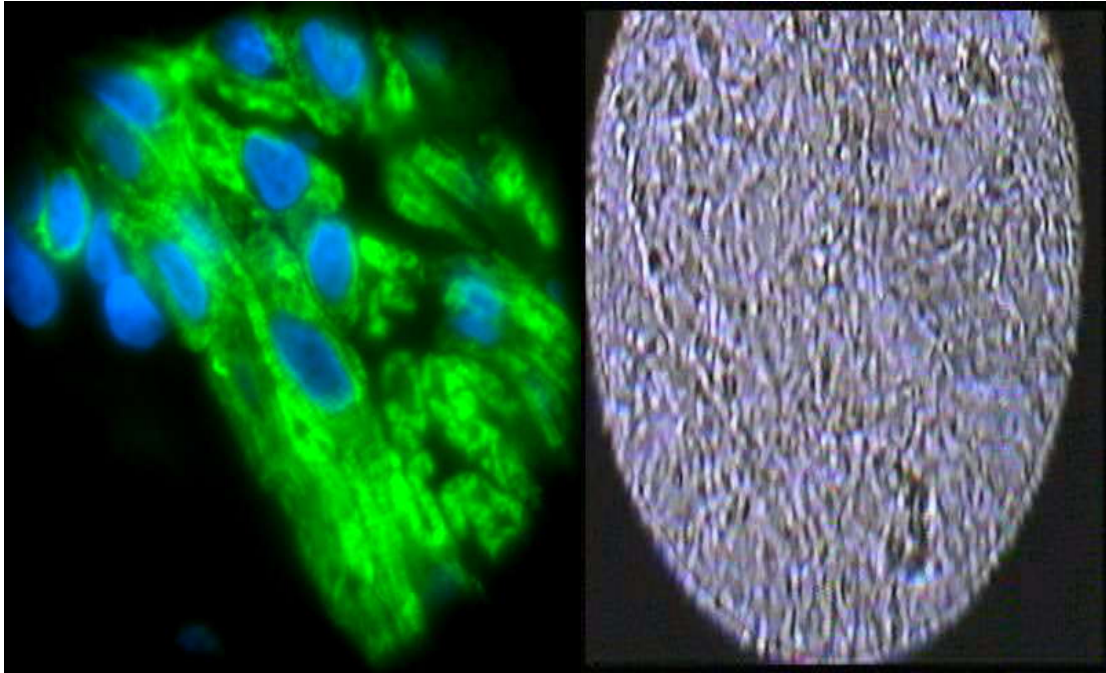


Figura 6a. Tejido cardiaco en Vitro.

Figura 6b. Célula embrionaria¹⁵

Neuronas y Cardiomiocitos:

Dos ejemplos de estructuras de gran relevancia asociados al sistema cardiovascular, son las neuronas y los cardiomiocitos, claros ejemplos de la no linealidad en la naturaleza¹⁶. En el primer caso, las neuronas, se comunican entre sí por medio de mecanismos electroquímicos y su actividad influye en otras. Las neuronas pueden mostrar actividad sincronizada que viaja por una red neuronal, Figura 7, y alcanza al corazón. Se sabe que las señales neuronales que llegan al corazón, son reguladoras, y lo ponen “en contacto” con otras regiones y demandas del organismo. Como se ha dicho, existen en el corazón distintas situaciones asociadas con las propiedades eléctricas, una de ellas es el latido cardiaco que presenta automatismo (oscilaciones espontáneas) y el segundo caso son las células marcapasos cuya dinámica está asociada a las variaciones del potencial eléctrico a través de sus membranas.

¹⁵ estudiada en el LABSE- FACUNAM

¹⁶ www.dynamics.unam.edu/DinamicaNoLineal3/diente_de_sierra.htm

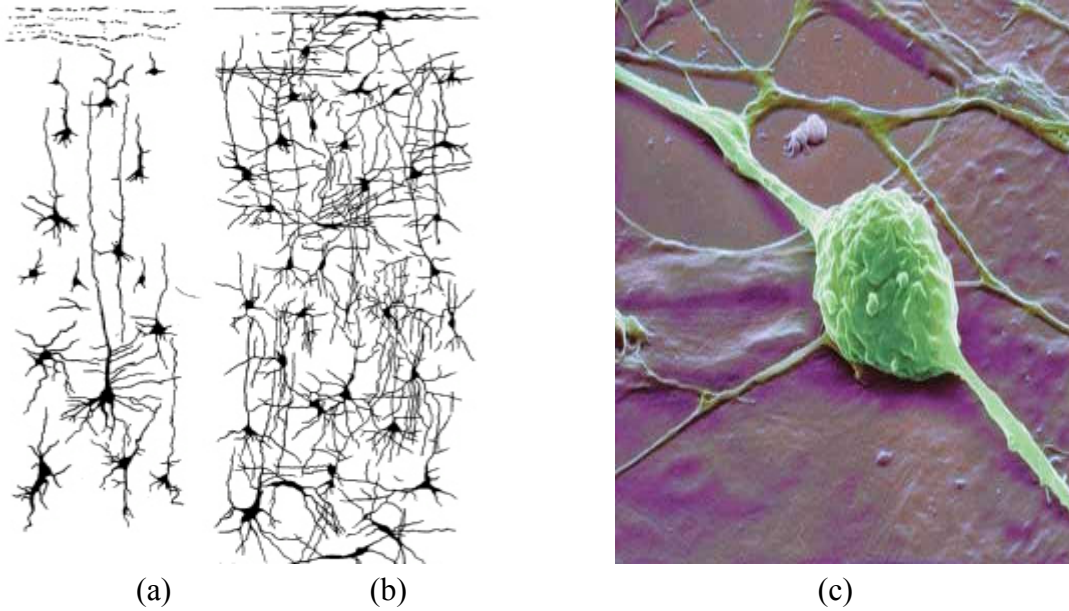


Figura 7. Complejidad de las redes neuronales¹⁷
 a) Corteza visual en un neonato.
 b) en un niño de 3 años.
 c) Interconexiones de una neurona.

La señal eléctrica que se propaga rítmicamente, en el corazón, se origina por la activación o desactivación de corrientes iónicas, que provocan oscilaciones del voltaje en las membranas de las células marcapasos del nodo seno-atrial, ver Figura 9. La fuerza motriz para estas corrientes proviene de las distintas concentraciones electroquímicas que hay entre un lado y otro de dicha membrana. De manera macroscópica, la fuerza motriz se ve reflejada en la biomecánica del músculo cardíaco conformado por arreglos como los que se aprecian en la Figura 8.



Figura 8. Músculo Cardíaco formado columnas celulares cuyas direcciones es irregular.

¹⁷ Ver Gran Enciclopedia Médica, SARPE. (1978).

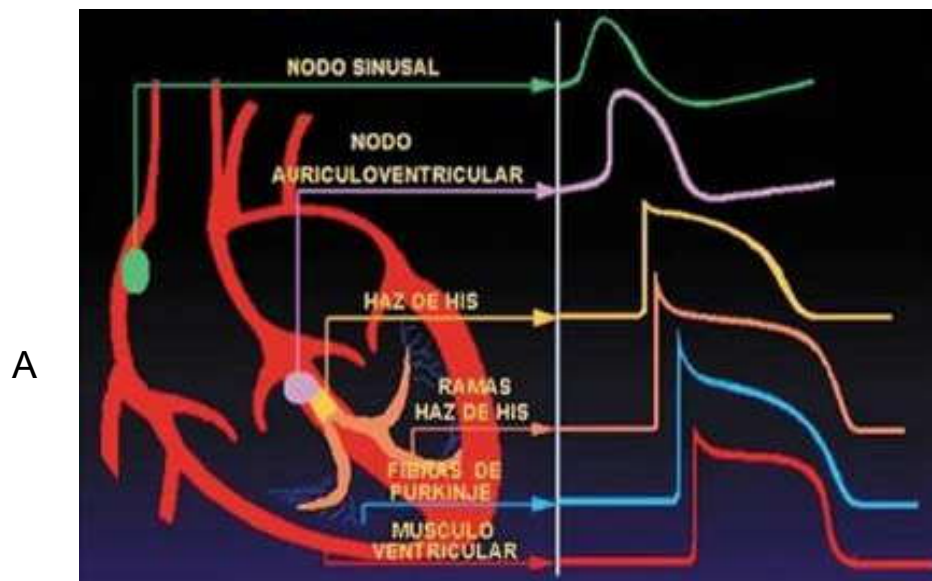


Figura 9. (A) Registros eléctricos del corazón en diferentes zonas, las curvas de voltaje se conocen como Potenciales de Acción. Se han encontrado Ritmos 2:1, 1:1 en las Fibras de Purkinje (parte del sistema de conducción cardiaco) y Músculo Papilar entre otros.

Uno de los aspectos más interesantes de la actividad eléctrica del corazón es que el reacciona de manera muy específica a las perturbaciones de voltaje que ocurren a su alrededor. Las oscilaciones de voltaje de la membrana, Potenciales de Acción, Figura 9, inducen la contracción celular, pero se necesita un mínimo de intensidad para alcanzar esta respuesta. A esta mínima intensidad de estimulación que ocasiona respuesta en un 50% de veces se le denomina umbral.

A.T. Winfree, Leon Glass y Michael Guevara, entre otros, desde hace 25 años, han mostrado que es posible estudiar las oscilaciones espontáneas de tejido cardiaco. Entender cómo actúan o cuál es el efecto de las estimulaciones, en particular las de tipo periódicas en los osciladores biológicos, nos lleva a considerar conceptos como el de reinicio de fase por medio del cual es posible describir los efectos de los estímulos individuales ó de grupo asociados a las distintas oscilaciones en estudio. En particular, los ritmos de oscilación pueden restablecerse después de una perturbación manteniendo su frecuencia y amplitud natural, es decir, restablecen la dinámica que tenían antes de ser perturbados.

En el corazón algunas circunstancias externas al organismo o alteraciones fisicoquímicas pueden generar estados dinámicos conocidos como arritmias¹⁸, definidos como cualquier ritmo cardiaco diferente del ritmo sinusal normal, de manera general, se entienden como una variación en el origen, frecuencia, regularidad o la conducción del impulso cardiaco, Figura 10a.

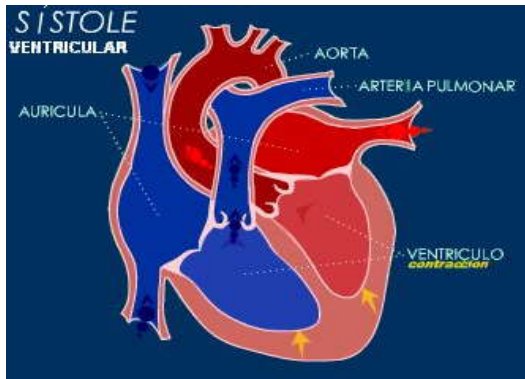


Figura 10a. Las arritmias se pueden generar en cualquier momento del día, principalmente después de los 50 años.

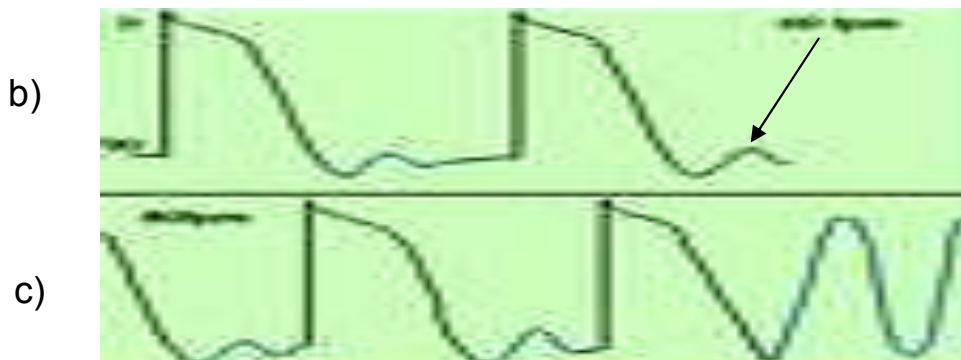


Figura 10. Despolarizaciones tardías de pequeña amplitud:
b) son apenas apreciables
c) o puede convertirse en taquicardia.

¹⁸ Actualmente, es posible curar un gran número de alteraciones en el ritmo cardiaco con técnicas de cardiología muy específicas, esto hace que los pacientes mejoren su vida y puedan re-incorporarse a sus actividades laborales y familiares.

Algunas taquicardias auriculares y ventriculares se desencadenan por el ejercicio, y son consideradas fisiológicas, otras pueden ser producidas por la actividad generada por ejemplo, por despolarizaciones tardías, es decir, despolarizaciones que ocurren después de que ha terminado la fase de contracción ventricular y la carga eléctrica en el interior de la célula se vuelve menos positiva.

En los hospitales de todo el mundo especializados en cardiología, generalmente cuentan con un departamento de arritmias en donde se tienen registros como el de la Figura 10b, 10c, que describe una dinámica anómala del corazón. Descubrir a tiempo estos procesos puede salvar la vida de los individuos, desafortunadamente, muchas veces no se cuenta con la tecnología ni con el suficiente personal calificado. Realizar experimentos asociados a los procesos cardiovasculares resulta muy costoso, aunque se han realizado desde la antigüedad, pero a partir de la segunda mitad del Siglo XX con el uso de las computadoras y el avance tecnológico se hacen ensayos dinámicos con protocolos en ocasiones muy complejos. Una forma alternativa para estudiar las propiedades básicas dinámicas del sistema cardiovascular es recurrir a dispositivos experimentales sencillos o simular modelos dinámicos, con las cuales es posible estudiar y generar cambios de tipo asincrónico o periódico que pueden ser relevantes en el fortalecimiento del conocimiento de la medicina clínica y, por supuesto, en la salud de las personas.

II. EL OSCILADOR HIDRODINÁMICO SALINO

*La Vida está inmersa en un gran
fluido, del que poco sabemos.
Pero nos lleva ...
a un viaje infinito.*

**Carmen Ledesma-O.
(2007)**

El Oscilador Hidrodinámico Salino (Os) es un sistema con dinámicas complejas que pueden ser estudiadas bajo diferentes perspectivas. Su importancia radica en poder contar con una forma simple para modelar, entre otras cosas, oscilaciones no lineales como las presentes en el sistema cardiovascular, en algunos procesos difusivos, en fenómenos climáticos u oceanográficos, entre otros.

En el *Geophysical Fluid Dynamics* (1970) Seelye Martin¹⁹, de la Universidad de Washington, publicó un artículo donde presenta sus observaciones referentes a la oscilación producida por dos fluidos, de diferentes densidades e interconectados por un orificio. El estudió básicamente las oscilaciones derivadas de las diferencias de densidad entre dos soluciones, empleando un tubo capilar colocado en la base del contenedor interno, que era sumergido en un contenedor externo. Sus investigaciones han servido de fundamento para estudiar los osciladores no lineales de tipo hidrodinámico que han sido tema de científicos, ingenieros, matemáticos y biólogos.

El mérito de Seelye Martin fue encontrar un experimento simple que muestra una dinámica oscilatoria de tipo hidrodinámico, de tipo no lineal, empleándose para ello dos soluciones de diferente densidad: agua salada y agua dulce.

A partir de entonces se han reproducido e innovado arreglos experimentales sencillos asociados al oscilador salino. Actualmente, en varios centros de investigación en el mundo se continúa abordando el tema.

En México, también se realizan estudios entorno a este sistema dinámico.

En el Laboratorio de Biofísica y Sistemas Excitables de la Facultad de Ciencias de la UNAM (LABSE) se han estado estudiando los efectos de perturbaciones bifásicas de volumen de intensidad fuerte, como los acoplamientos a perturbaciones periódicas. Este grupo de investigación encabezado por Jorge Humberto Arce Rincón, Gertrudis Hortensia González Gómez, quien presenta este manuscrito y otros

¹⁹ Nació en Northampton, MA., en 1940, se graduó de físico y en 1967 obtuvo su doctorado.

compañeros estamos caracterizando las diferentes dinámicas del oscilador hidrodinámico salino.

Con los datos experimentales y simulaciones numéricas, entre otros, se han estado construyendo mapas que ayudan en la caracterización del Os. El trabajo que aquí se presenta forma parte de las investigaciones globales para caracterizar de manera integra al oscilador hidrodinámico salino, bajo la perspectiva de la Teoría del Reinicio, basada en el estudio de las perturbaciones a un sistema oscilatorio de tipo no lineal. Para analizarle es posible construir un mapa geométrico llamado Curva de Transición de Fase (CTF) conocido también como Phase Transition Curve (PTC), por sus siglas en inglés.

La dinámica propia del oscilador nos presenta patrones geométricos específicos que pueden ser modificados por diferentes tipos de perturbaciones, en este trabajo se manejaron pulsos de agua de tipo puntual y trenes de pulsos de agua.

Veamos cómo se construye un oscilador salino:

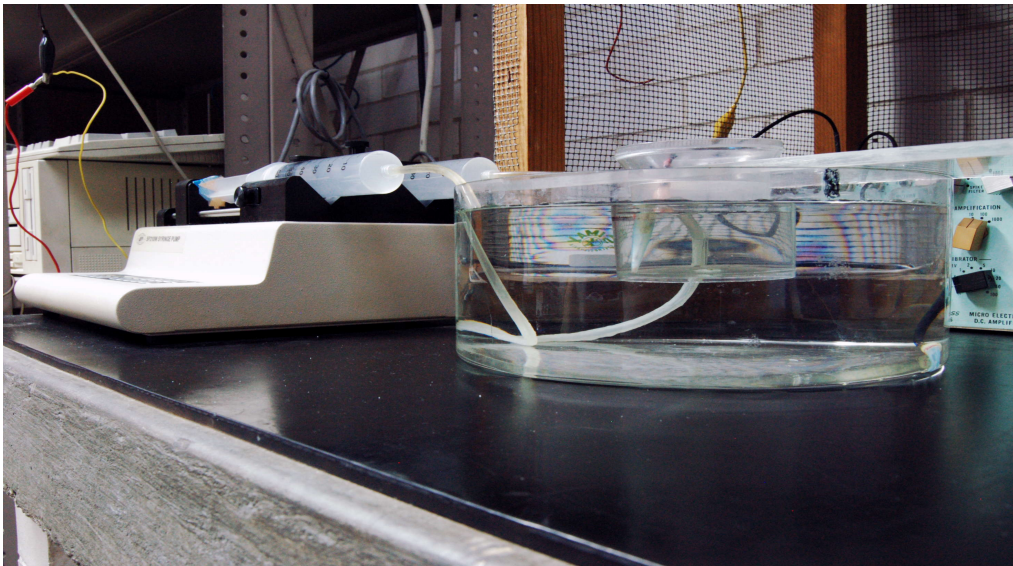


Figura 11. Prototipo básico de un oscilador salino.

Tómense dos recipientes con dos líquidos de diferentes densidades colocados como en la Figura 11, e interconectados por un orificio capilar.

El contenedor externo contiene un líquido de menor densidad, mientras que el contenedor interno contiene una solución salina con densidad mayor. El contenedor interno está sostenido por un sujetador plástico, la altura del volumen de agua salada estará al mismo nivel que el agua destilada o agua dulce del recipiente externo.

Una primera consideración experimental sobre el oscilador salino:

Se trata de un sistema autoorganizado. La diferencia de presiones hidrostáticas conduce al desplazamiento de una pequeña masa de agua salada desde el contenedor interno al contenedor externo. Por lo tanto, se establece de manera espontánea un patrón dinámico de ascensos y descensos de flujos de agua como consecuencia de la diferencia de presiones hidrostáticas (gradiente de presión).

Cabe notar que, el movimiento descendente de volumen de agua salina cambia la presión hidrostática del contenedor externo; el nuevo desnivel de presiones ocasiona la subida en contra de la gravedad de un volumen de agua dulce, que penetra por el orificio del recipiente interno hasta que casi se da la igualdad en las presiones, pero como la densidad del agua salina es mayor que la del agua dulce, de nueva cuenta se presentará una caída de agua salada y comenzará entonces un nuevo ciclo, con un periodo característico, ver Figura 14.

Por su parte, los ciclos de los flujos de agua (salada y dulce) están asociados con el diámetro del orificio del contenedor interno, el gradiente de densidades y los volúmenes de las soluciones de los contenedores; estos ciclos oscilantes ocurren ininterrumpidamente, hasta que los dos volúmenes (agua dulce y agua salada) eventualmente alcanzan la misma densidad (Yoshikawa,1991).

En general, es posible observar a simple vista o con ayuda de un colorante vegetal²⁰ la presencia de un flujo descendente que llega hasta el fondo del contenedor externo después de unas decenas de segundos, este flujo se detiene unos segundos, ver Figura 12.1 y 12.2, y después otro flujo ahora de agua dulce asciende por el orificio capilar; el flujo ascendente perdura por aproximadamente 15-18 segundos, ver Figuras 12.3 y 12.4. La duración de las oscilaciones hidrodinámicas, depende del diseño experimental, pero pueden llegar a sostenerse por muchas horas y en ocasiones puede el oscilador hidrodinámico de densidad salino durar algunos días.

²⁰ Primeras fotografías a color del oscilador de densidad salina realizadas en el LABSE Ledesma-O, C., et al. Octubre 2007.

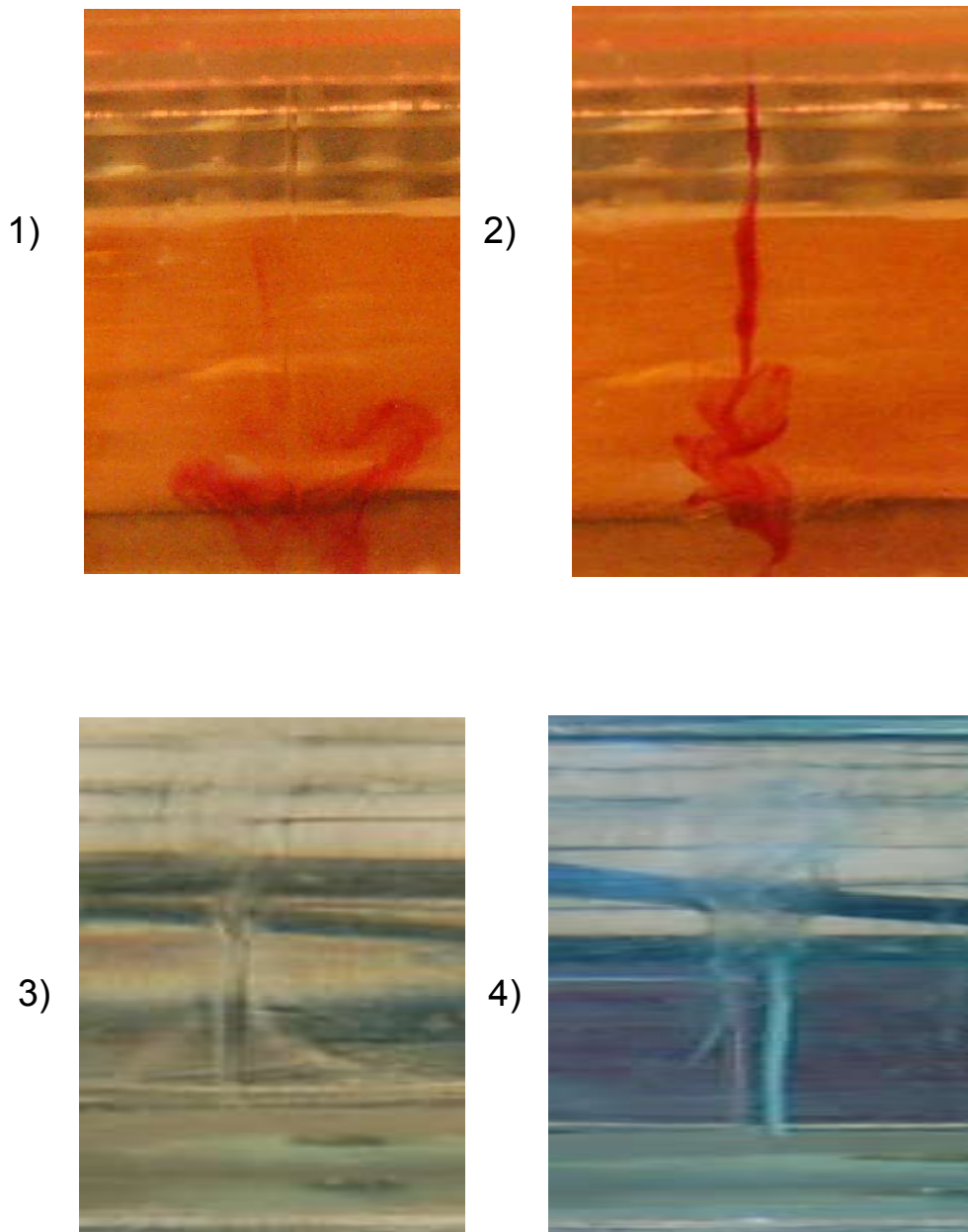


Figura 12. Fotografías del flujo en el oscilador salino. Fotografía 1) y 2) Flujo descendente por el orificio capilar y sus efectos en la base del contenedor exterior. 3) y 4) Flujo ascendente de agua dulce por el orificio capilar, nótese que la fotografía corresponde al interior del contenedor interno con solución salina.

III. OBJETIVOS

GENERAL

Estudiar el efecto de las perturbaciones puntuales de mediana intensidad en un oscilador no lineal hidrodinámico.

PARTICULARES

- 1.- Caracterizar el efecto de introducir perturbaciones de volumen de mediana intensidad, 1.5ml y 2ml, en la oscilación espontánea de un Oscilador Hidrodinámico Salino (Os).
- 2.- Construir las Curvas de Transición de Fases (CTF) o PTC, por sus siglas en inglés, que relacionan los cambios de fase producidos por las perturbaciones de volumen de agua con el momento del ciclo natural en el que son aplicadas.
- 3.- Encontrar los modos de acoplamiento: clasificar los diferentes tipos de organización entre las perturbaciones de volumen, (1.5ml , 2ml) al aplicarse periódicamente, y las oscilaciones espontáneas del sistema hidrodinámico salino.

IV DISEÑO EXPERIMENTAL

En las siguientes secciones se describirá cómo la dinámica del oscilador salino Os puede verse afectada ante perturbaciones de volumen de agua. Para ello se inyectan y retiran, del contenedor externo, volúmenes de agua fijos de 1.5 ml ó 2 ml con un tiempo total de perturbación de 2.6 segundos, que representa alrededor del 7.4% del ciclo, se consideran entonces como perturbaciones muy breves, y por tanto podrá emplearse la Teoría del Reinicio en la modelación de los resultados experimentales.

IV.a MATERIAL Y MONTAJE EXPERIMENTAL

- ◇ Vaso de plástico de 100 ml, con un orificio en el centro de su base.
- ◇ Cristalizador (contenedor externo) con capacidad de 3.5 litros.
- ◇ Dos electrodos impolarizables de plata clorada: Ag/ AgCl.
- ◇ Bomba peristáltica digital de infusión/retiro, syringe-pump-WPI, con un flujo máximo de 70.6 ml / min), Fig.(14).
- ◇ Disolución de NaCl en H₂O, 3 molar, 90 ml.
- ◇ 3.1 litros de agua destilada.
- ◇ Amplificador de voltaje, con ganancia x10, marca WPI.
- ◇ Convertidor A/D, para computadora personal.
- ◇ Computadoras asociadas a dos funciones:
 - (i) registro y almacenamiento de las señales digitalizadas del oscilador salino.
 - (ii) control automático de la bomba peristáltica, con programas ad-hoc desarrollados en PASCAL.
- ◇ Programas para la adquisición y análisis de datos: Acquire y Review.

Condiciones Iniciales del Experimento:

Se coloca un palillo de madera en el orificio del fondo del vaso de plástico o contenedor interior, el palillo bloquea el orificio capilar de su base. Se vierte en él una solución salina con una concentración 3 molar de NaCl; el contenedor exterior contendrá el agua destilada. El contenedor interno se coloca sobre un soporte plano dispuesto en la superficie del cristalizador para que quede parcialmente sumergido en el contenedor externo. Una observación importante al respecto es que inicialmente las dos soluciones tienen la misma altura y el palillo de madera limitará temporalmente la frontera entre una y otra solución.

Posteriormente se retira el palillo y desciende el primer flujo de agua salada, como se mostró en las Figuras 12.1 y 12.2 para posteriormente ascender Figuras 12.3 y 12.4. Asociados a los flujos del oscilador de densidad salino, se desarrollan diferencias de potencial eléctrico que resultan buenos marcadores de los cambios de dirección del flujo. Para contar con un registro de la evolución de los ciclos de oscilación, empleamos electrodos impolarizables. El empleo de este tipo de sensores es esencial, pues por tratarse de un medio acuoso electrolítico, se pueden generar corrientes eléctricas que llegarían a modificar la textura y composición superficial en otro tipo de electrodos, formándose películas de óxidos e impidiendo un buen registro en los datos.

Los electrodos de plata clorurada se identifican con diferentes colores para posteriormente sumergirlos en cada recipiente. La manera de colocarles es indistinta, pero por formalidad y para que el flujo de la corriente nos indique el mismo sentido deben mantenerse siempre en la posición elegida. Para iniciar el proceso de oscilación espontánea se requiere, como se ha comentado anteriormente, el retiro del palillo, entonces la solución salina del contenedor interno comienza a caer a través del orificio unos 20 segundos, por acción de la gravedad, la disolución salina atraviesa el agua destilada del contenedor externo y se deposita en el fondo de este contenedor escasos segundos; por lo que se ha reducido un poco el volumen del recipiente interno y ha aumentado en la misma proporción el volumen del contenedor externo, esto ocasiona un nuevo diferencial de presiones que propicia la formación de un flujo ascendente de agua dulce. El flujo ascendente, ver figura 12.3 y 12.4 se mantiene durante aproximadamente 21 segundos hasta que de nuevo es mayor la presión en el recipiente interno y produce un nuevo flujo descendente. Una vez estabilizados los flujos se puede monitorear la señal en el osciloscopio, esta se envía al convertidor A/D, que transmitirá a la computadora las variaciones de voltaje asociadas a la diferencia de presiones y cambios de dirección de flujo. El registro obtenido es una señal oscilatoria. Para asegurar la estabilización del montaje se deja sin perturbar alrededor de una hora. En la figura 13 la señal de color morado muestra las oscilaciones hidrodinámicas salinas producidas por las diferencias de presiones entre los contenedores. La línea roja es un cursor auxiliar. En el trazo verde se registrará la fase de inyección cuando haya perturbaciones.

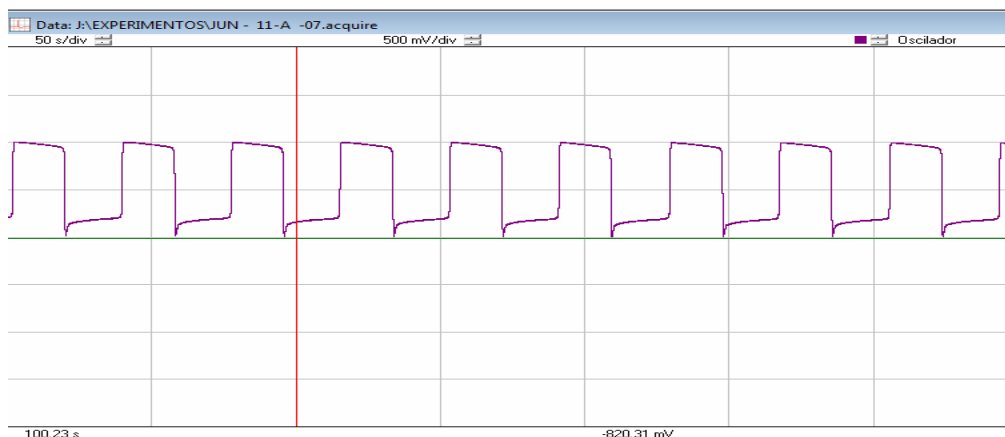


Figura 13. Registro de oscilaciones hidrodinámicas sin perturbación.

IV.b PROTOSCOLOS EXPERIMENTALES

Se probaron dos protocolos de perturbación: pulsos aislados y pulsos periódicos, para obtener:

- 1-) La Curva de Transición de Fase (CTF) o Phase Transition Curve (PTC).
- 2-) Los Modos de Acoplamiento por Forzamiento Periódico.

Las perturbaciones se generan por medio de una bomba que utiliza un par de jeringas para inyectar y retirar los volúmenes de agua deseados. Unas mangueras conectadas a las jeringas se colocan dentro del contenedor externo. Figura 14.

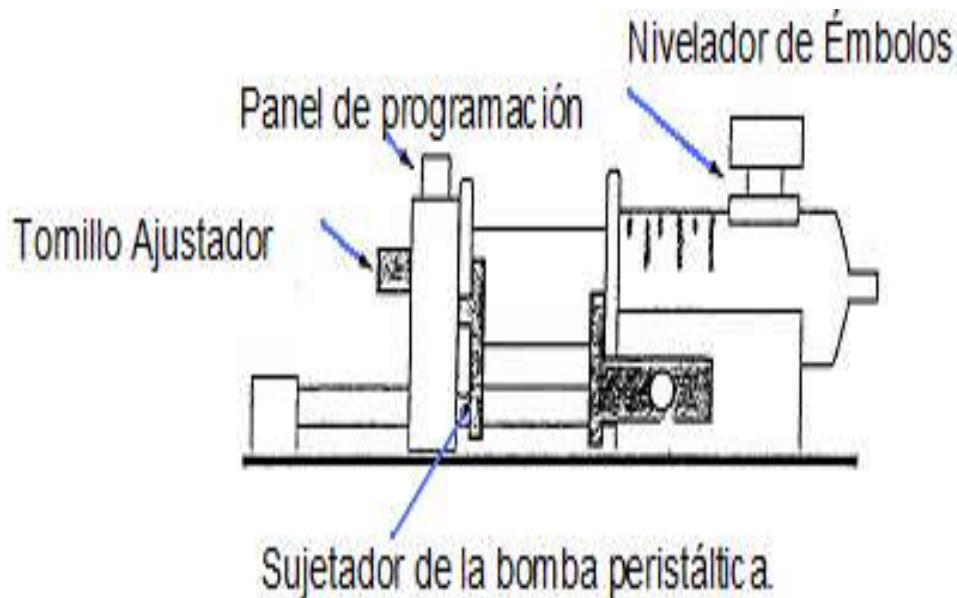


Figura 14 a) Esquema de la bomba empleada para perturbar al oscilador salino.

En este trabajo se inyectaron 1.5 ml, con una jeringa ó 2 ml usando dos jeringas con agua dulce, a la mayor tasa de inyección de la bomba 1.3 segundos, lo cual representa una tasa de flujo de 1.18 ml/s. Inmediatamente es retirado por la bomba el volumen introducido, con el objetivo de dejar al sistema en las mismas condiciones antes de la perturbación. El tiempo para el retiro del agua es el mismo, por lo que el tiempo total de perturbación es de 2.6 segundos.

Para verificar la estabilidad del montaje, en cada sesión experimental se determina la duración promedio de los ciclos del oscilador y se calcula su coeficiente de variación, que debe ser menor o igual a 3%.

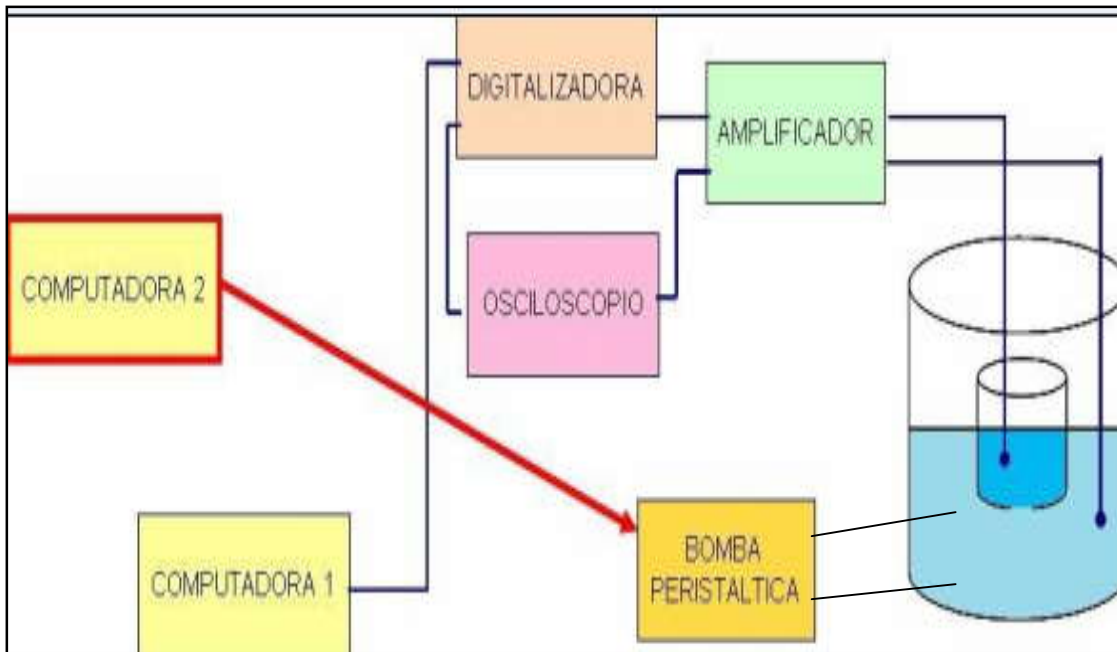


Figura 14.b) Diagrama de flujo para el montaje del Oscilador Salino.
Las conexiones azules llevan la señal de voltaje de los electrodos al amplificador y luego a la computadora de captura.

IV.c PROTOCOLO EXPERIMENTAL PARA OBTENER LAS CURVAS DE TRANSICIÓN DE FASE: CTF (1)

Las Curvas de Transición de Fase son una representación gráfica de la relación entre Fases Viejas y Fases Nuevas; se construyen al relacionar el momento o fase en que se aplica una perturbación. Fase Vieja (F_v) es el momento o fase del ciclo del oscilador hidrodinámico salino en que se aplica una perturbación. Esta perturbación puede mover al oscilador a un nuevo momento o fase de su ciclo, fase a la cual llamamos Fase Nueva (F_n). Los valores de F_v se obtienen directamente de los registros experimentales. Los valores de F_n se adquieren a partir de un cálculo sencillo que considera la duración del ciclo perturbado. Para facilitar su análisis y comparación, los datos se normalizan con respecto al periodo basal de cada experimento y se grafican.

Observar los registros de voltaje en la pantalla de la computadora o de un osciloscopio digital, ayuda a definir en qué momento se ha estabilizado el sistema, para posteriormente iniciar las perturbaciones hidrodinámicas correspondientes.

Se programa en la bomba peristáltica el volumen deseado y el modo de operación, en nuestro caso fue: inyección y retiro del volumen 1.5ml ó 2ml. El volumen de agua se aplica al contenedor exterior, también llamado cristalizador.

Los momentos del ciclo en los que se aplicarán las perturbaciones, es decir, las fases viejas medidas en segundos, se establecen de manera aleatoria; es decir, por sorteo por ejemplo 20 fases diferentes, elegidas de manera que queden distribuidas en toda la duración ciclo de oscilación, posteriormente clasificamos estos valores en una columna de valores pares y otra de valores impares.

Para iniciar un ciclo de captura de datos experimentales en la computadora, incluyendo la perturbación, nos ayudamos con un cursor vertical del osciloscopio como referencia, Figura 13. Cuando la oscilación espontánea cruza ese cursor en una fase convenida, entonces se procede a dar el estímulo. Se graban alrededor de 10 ciclos previos, el ciclo perturbado y alrededor de 10 registros posteriores a la perturbación, con el objetivo de asegurar que el sistema se ha restablecido. Se debe verificar, además, que la recuperación sea prácticamente instantánea. Se repite el proceso anterior variando el valor de las fases de perturbación.

Determinación de las Fase Vieja y Fase Nueva

Se mide el período del ciclo inmediatamente anterior al pulso aplicado, y lo llamamos T_0 , como se trata de un proceso cíclico, tenemos que elegir un momento del ciclo para considerarlo siempre como “evento marcador”, hemos elegido como evento marcador el inicio del flujo descendente. Al periodo que contiene a la perturbación lo llamamos T_1 y al periodo del ciclo posterior, T_2 . El efecto de las perturbaciones se verá reflejado en T_1 , en función de las fases en que fueron aplicadas las perturbaciones. Las figuras 15-18 muestran algunos ejemplos de los registros del oscilador salino perturbado puntualmente.

La *Fase Vieja* como definimos más arriba, es el momento del ciclo natural en el cual aplicamos el pulso de perturbación, lo obtenemos en el registro experimental como el tiempo entre la aplicación de la perturbación T_c , y el evento marcador previo. Posteriormente, para representarlo en términos del ciclo espontáneo, el resultado se divide entre la duración del ciclo previo a la perturbación (T_0). Figura 15.

La *Fase Nueva* se obtiene como la diferencia entre el periodo anterior a la perturbación (T_0) y el ancho del efecto provocado, donde el ancho del efecto es el tiempo desde el momento de la perturbación (T_c) al inicio del nuevo ciclo sin perturbar (T_2), esta diferencia se divide entre la duración del periodo basal o anterior a la perturbación (T_0).

IV.d *PROTOCOLO EXPERIMENTAL PARA OBTENER LOS MODOS DE ACOPLAMIENTO (2)*

El protocolo (2), cumple con los mismos requisitos experimentales que el protocolo (1), excepto que las perturbaciones se aplicarán de manera periódica, a través de un programa de computadora creado en el laboratorio que controla a la bomba de inyección/ retiro. Los tiempos de estimulación se calculan de acuerdo al siguiente esquema:

- (a) Se determina el periodo basal de la oscilación espontánea, T_0 , de cada experimento. Un valor típico es por ejemplo 34.6 segundos. A partir de este dato se establecen los periodos de perturbación como fracciones de la duración total, ejemplo, $0.5T_0$, $0.3T_0$, etc. La secuencia de aplicación de los trenes de perturbaciones con periodo determinado fue asignada por sorteo.
- (b) El programa maneja los valores en milisegundos. El programa aplica los pulsos a la bomba y se efectúa la inyección y retiro de agua de forma consecutiva y automática, utilizamos trenes de pulsos de agua de 20 pulsos y de 25 pulsos.
- (c) Se graban alrededor de 10 ciclos previos a la perturbación periódica (tren de perturbaciones) y de igual manera 10 ciclos posteriores al efecto producido por la interacción.

Para analizar los modos de acoplamiento, después de registrar las perturbaciones periódicas elaboramos una tabla de acuerdo a la relación correspondiente entre el número de perturbaciones (n) y número de oscilaciones (m), expresado lo anterior como la relación (n:m).

V RESULTADOS EXPERIMENTALES

Aquí presento los resultados obtenidos al aplicar pulsos de volumen de 2ml al oscilador salino en diferentes fases de su ciclo. El registro de voltaje está invertido respecto a las oscilaciones de volumen; es decir, el trazo **a** corresponde al inicio de la caída de agua salada, el trazo **b** corresponde al inicio de la subida de agua dulce a través del orificio de fondo del contenedor interno. Las Figuras 15 al 18 muestran los efectos sobre el oscilador salino de pulsos puntuales de flujo de agua bifásico. Las Figuras 15- 18 muestran los efectos sobre el oscilador salino asociados a los pulsos puntuales de flujo de agua de tipo bifásico.

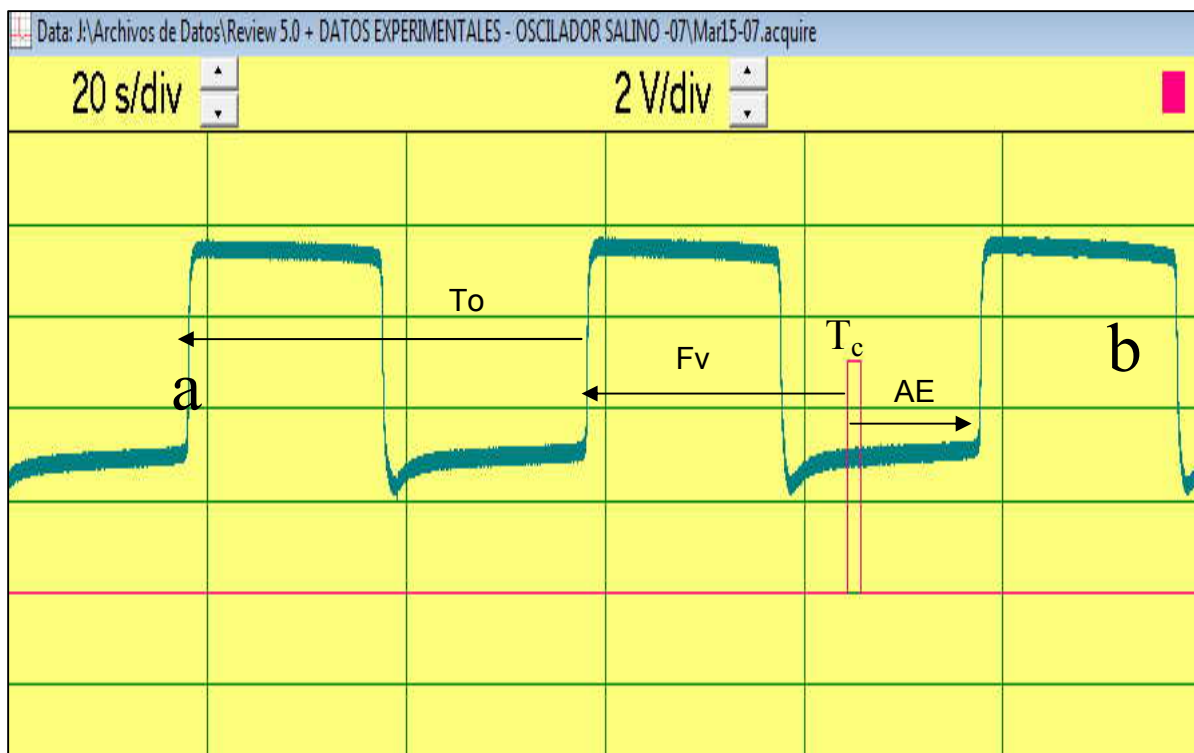


Figura 15. Registro de voltaje asociado a los cambios de dirección de flujo en el oscilador salino durante una perturbación puntual. $T_o = 40.80$ segundos. **a** inicio de la caída de agua salada. **b** inicio de la subida de agua dulce. AE define el ancho del efecto. Fase Vieja o de perturbación (F_v) = 0.63s. Como vemos, no hay efecto (E) apreciable sobre el O_s . El trazo en rojo corresponde solamente a la inyección del volumen preestablecido de agua.

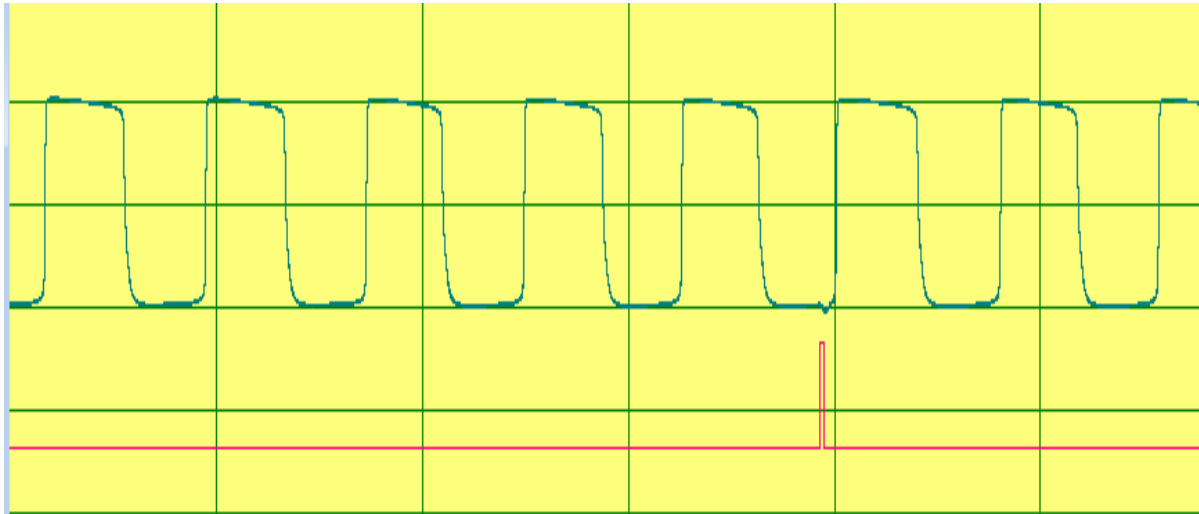


Figura 16. Registro de voltaje asociado a los cambios de dirección de flujo en el Os durante una perturbación puntual. $T_0 = 40.80$ segundos. Fase Vieja o de perturbación 0.95 segundos. Como vemos, hay un pequeño efecto de prolongación del periodo del oscilador salino. El trazo en rojo corresponde solamente a la inyección del volumen de agua preestablecido.

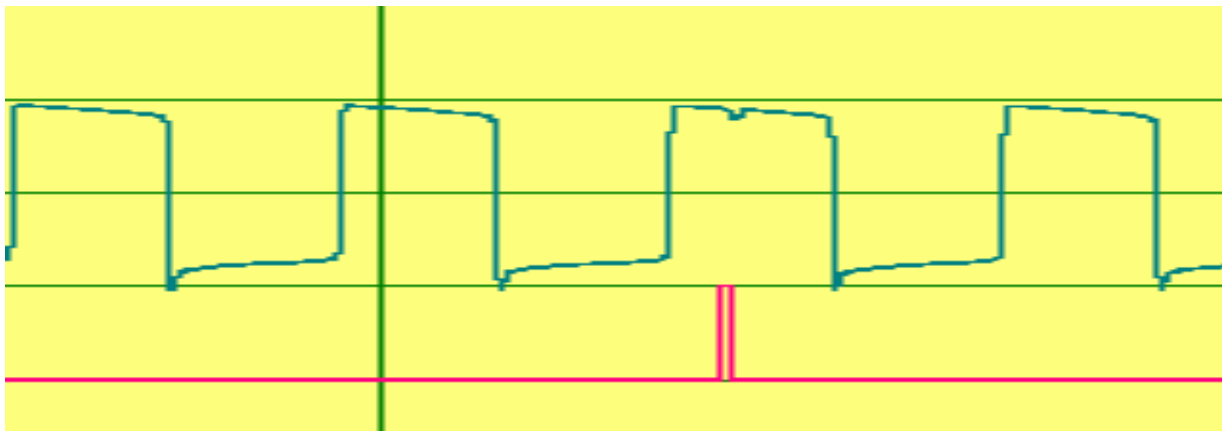


Figura 17. Registro de voltaje asociado a los cambios de dirección de flujo en el Os durante una perturbación puntual. $T_0 = 40.80$ segundos. Fase Vieja (Fv) o de perturbación 0.12 segundos. Como vemos, se aprecia un efecto solamente de deformación en la cresta de la oscilación. El trazo en rojo corresponde a la inyección del volumen de agua preestablecido. Los registros provienen de un experimento diferente pero con las mismas condiciones experimentales, además se ha amplificado la presentación del registro para que se puedan visualizar mejor los detalles del efecto del pulso de volumen de agua. La línea verde vertical es el cursor del programa de análisis de datos. Este registro está amplificado el ancho del pulso para poder apreciar el efecto o pequeña muesca localizada sobre el oscilador salino.

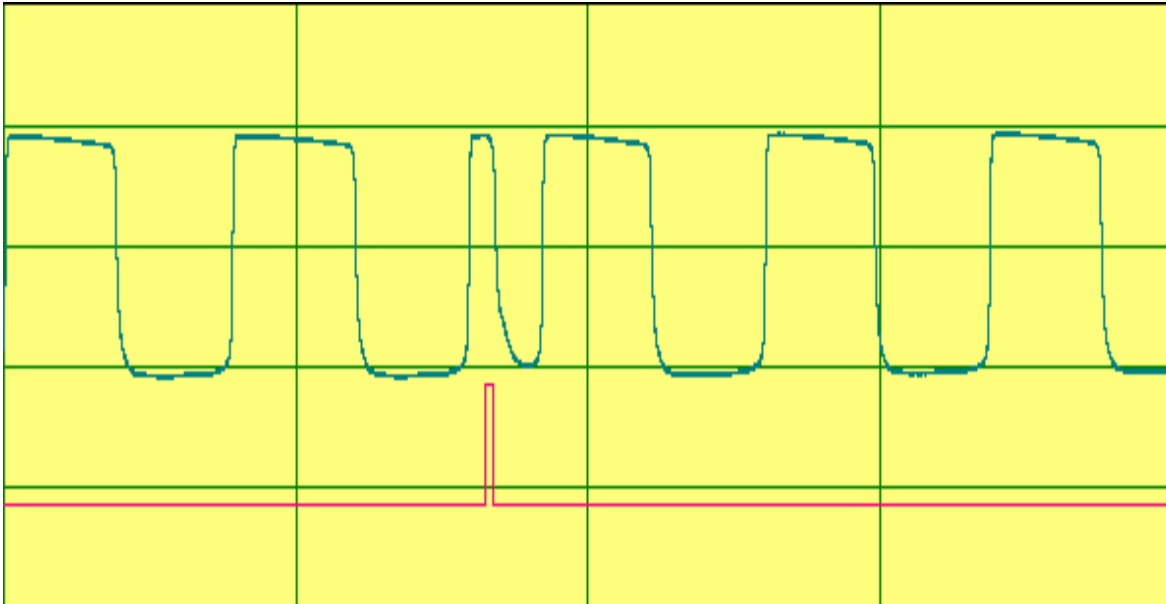


Figura 18. Registro de voltaje asociado a los cambios de dirección de flujo en el Os durante una perturbación puntual. $T_o = 40.80$ segundos. Fase Vieja (Fv) o de la perturbación 0.16 segundos. Como vemos, se aprecia un efecto muy marcado, tanto que se inicia una nueva oscilación adelantada aunque muy breve. El trazo en rojo corresponde solamente a la inyección del volumen de agua preestablecido.

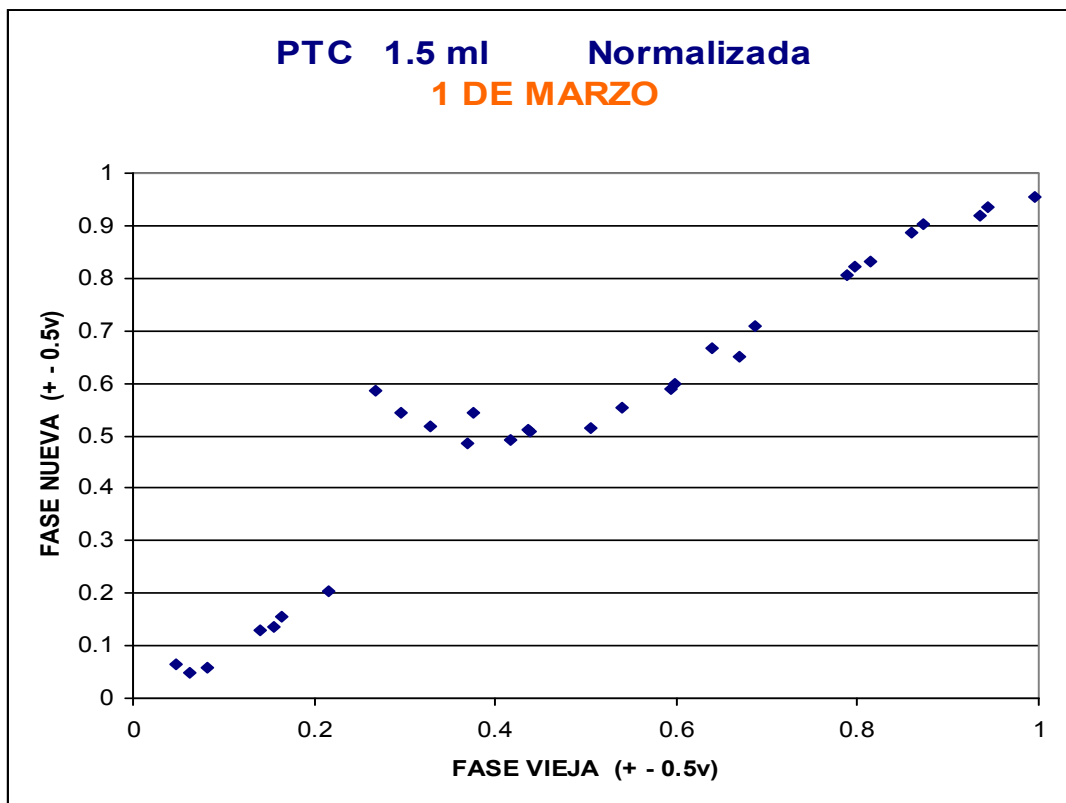
Con muchas fases se construye la Curva de Transición de Fase y los datos se grafican normalizados con respecto al periodo basal en cuyos ejes se representan las variables necesarias para describir el estado dinámico del fenómeno en estudio. En el caso del oscilador salino las variables a considerar son las fases viejas y las fases nuevas normalizadas; es decir, en el espacio fase se representará el efecto que tiene la onda del oscilador salino al ser perturbada con un pulso de volumen de agua; por tanto, con muchas fases se puede construir la Curva de Transición de Fase.

El espacio fase de un sistema dinámico es un espacio matemático en coordenadas ortogonales en cuyos ejes se representan las variables necesarias para describir el estado dinámico del fenómeno en estudio. En el caso del oscilador salino las variables a considerar son las fases viejas y las fases nuevas normalizadas; es decir, en el espacio fase se representará el efecto que tiene la onda del oscilador salino al ser perturbada con un pulso de volumen de agua; por tanto, con muchas fases se puede construir la Curva de Transición de Fase.

V.a CURVAS DE TRANSICIÓN DE FASE.

En las gráficas 1,2,3,4,5 se presentan las Curvas de Transición de Fase (CTF) con los efectos obtenidos al perturbar con 2 ml y 1.5 ml de volumen de agua. Recordemos que estos valores corresponden al rango de perturbaciones de intensidad intermedia. La notación CTF es la castellanización de PTC (Phase Transition Curve) empleada en la teoría del reinicio para analizar la dinámica de las oscilaciones en el oscilador salino perturbadas por un pulso de agua dulce.

1 DE MARZO DE 2007: PTC	
Volumen de Perturbación: 1.5 ml usando 1 manguera	
To = 34.61 s	c.v. = 1.37%

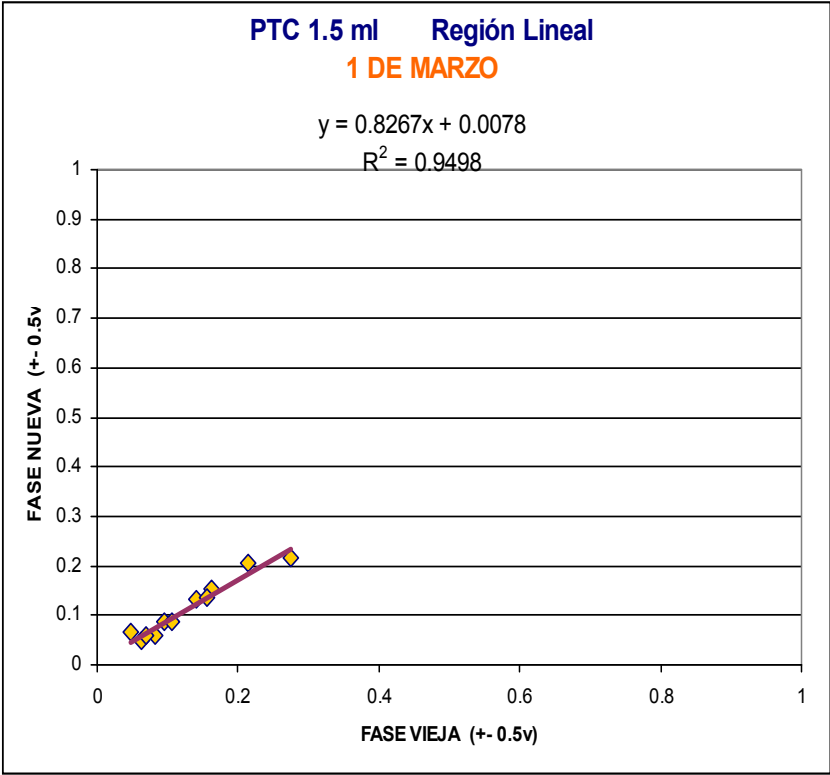


GRÁFICA-1. Fase Vieja – Fase Nueva.
Perturbaciones de Mediana Intensidad.

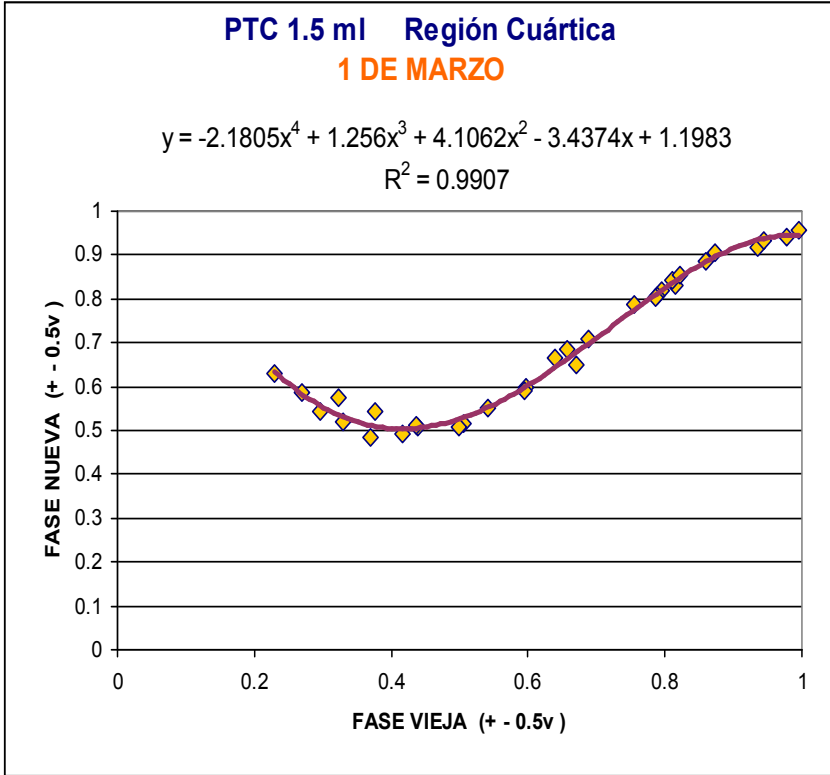
1 DE MARZO DE 2007: PTC
Volumen de Perturbación: 1.5 ml usando 1 manguera

To = 34.61 s c.v. = 1.37%

Región Lineal



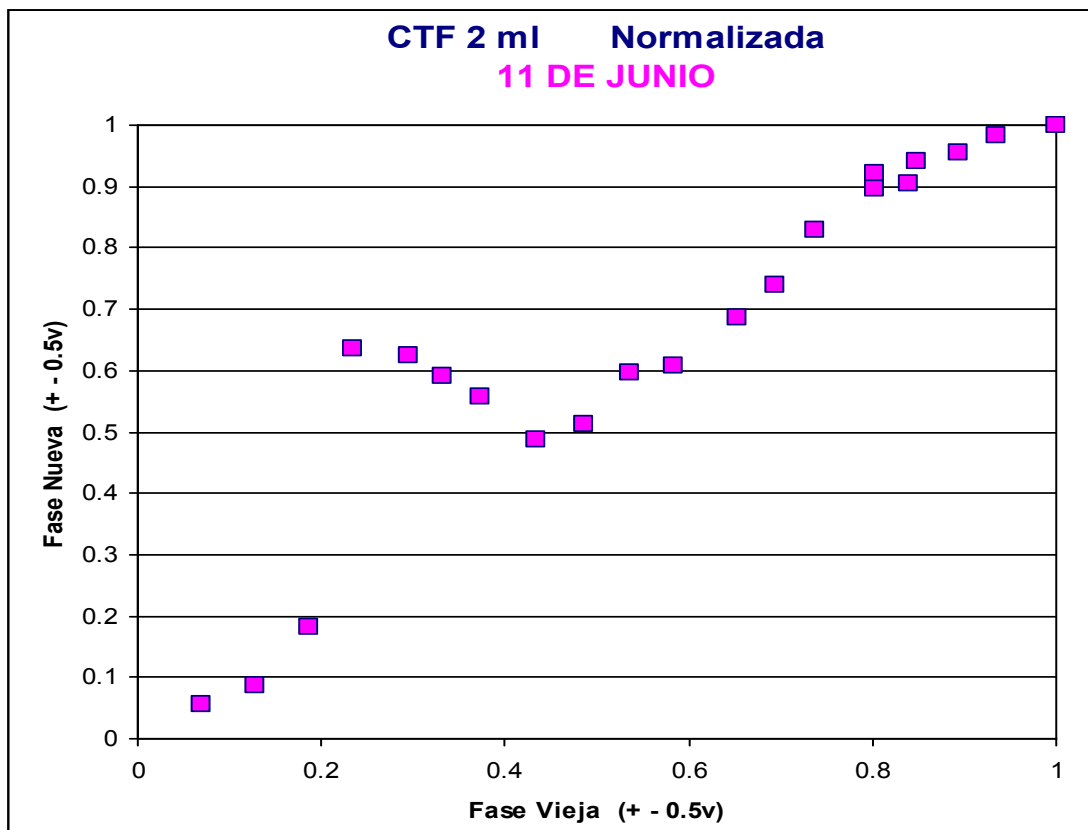
Región Cuártica



GRÁFICA 1a Regresión Lineal y Cuártica, a la función (Fv) vs. (Fn)

Para analizar la consistencia de los resultados experimentales, se muestran a continuación las réplicas para dos experimentos cuyas condiciones iniciales son equivalentes: dos mangueras y un volumen de agua de 1ml cada una, inyección/ retiro de agua neto 2ml.

11 DE JUNIO DE 2007: CTF	
Volumen de Perturbación: 2 ml usando 2 mangueras	
$T_o = 37.66 \text{ s}$	$c.v. = 0.85\%$



GRÁFICA 2 Volumen de Perturbación: 2 ml

11 DE JUNIO DE 2007: CTF

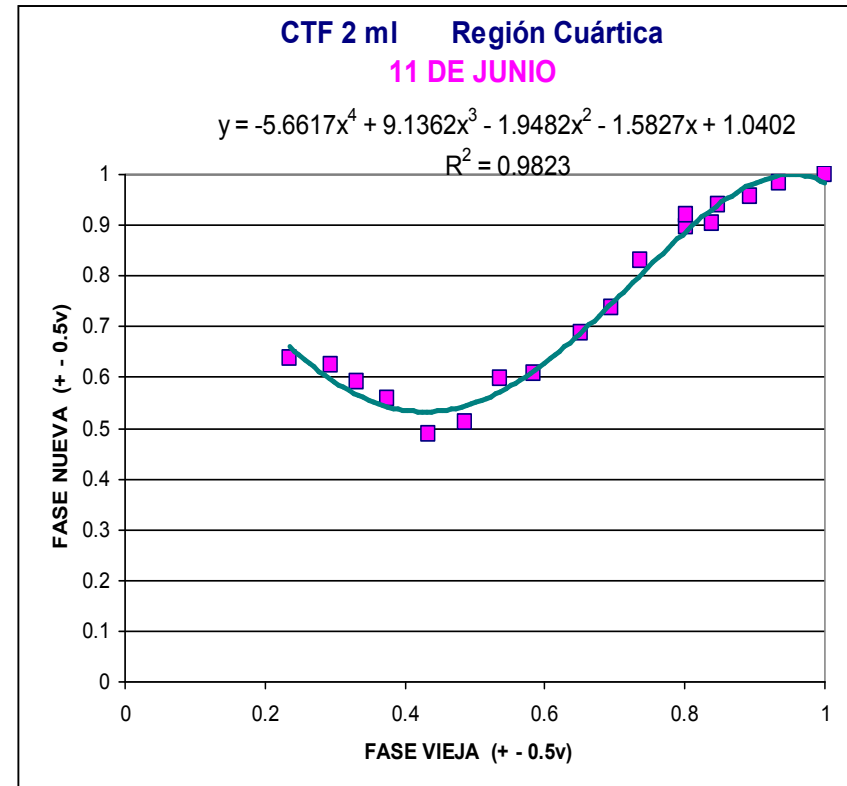
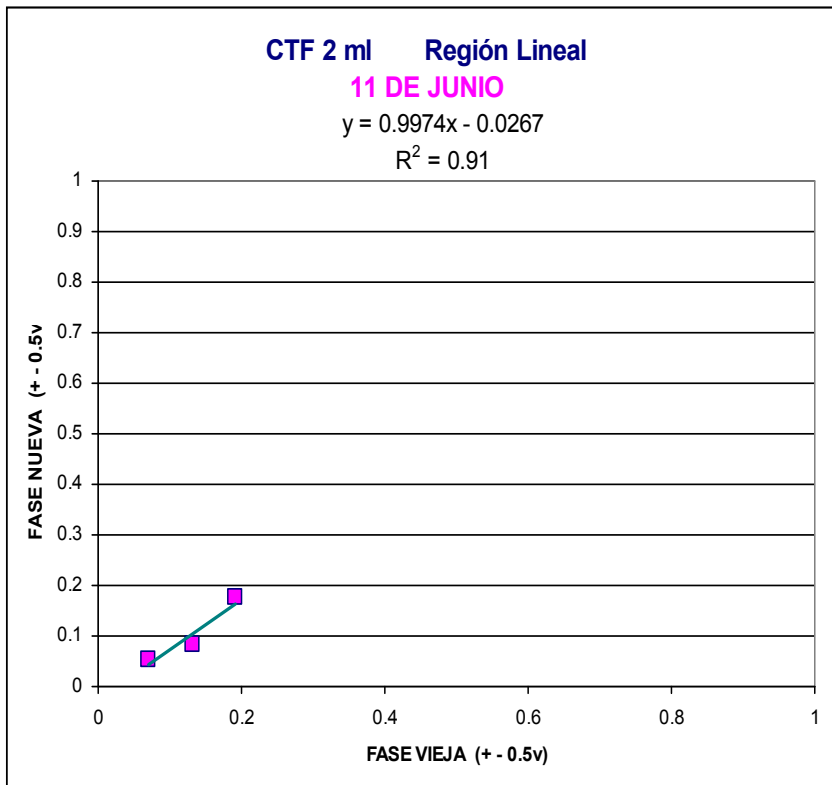
Volumen de Perturbación: 2 ml usando 2 mangueras

To = 37.66 s

c.v. = 0.85%

Región Lineal

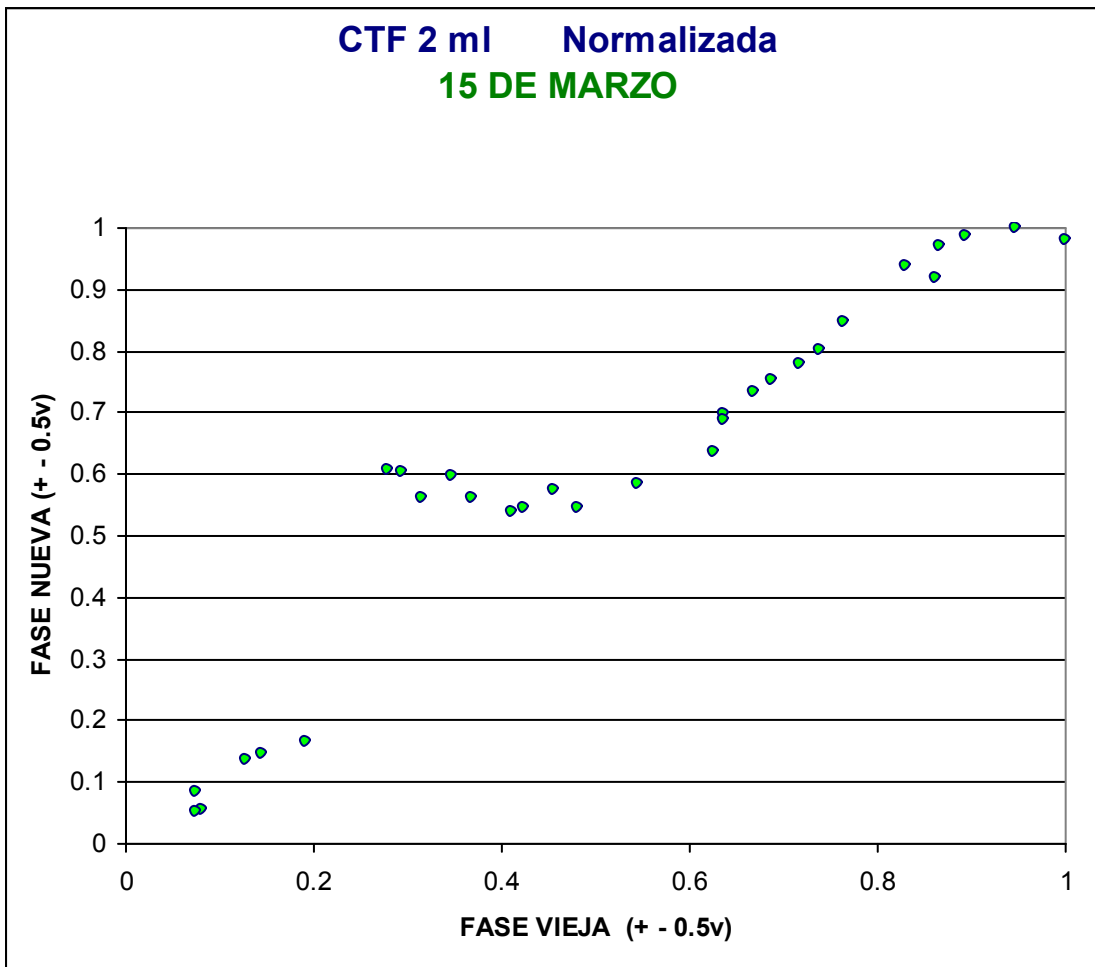
Región Cuártica



GRÁFICA 2a Perturbaciones de 2 ml. Regresión lineal y cuártica, respectivamente.

2ª Réplica.

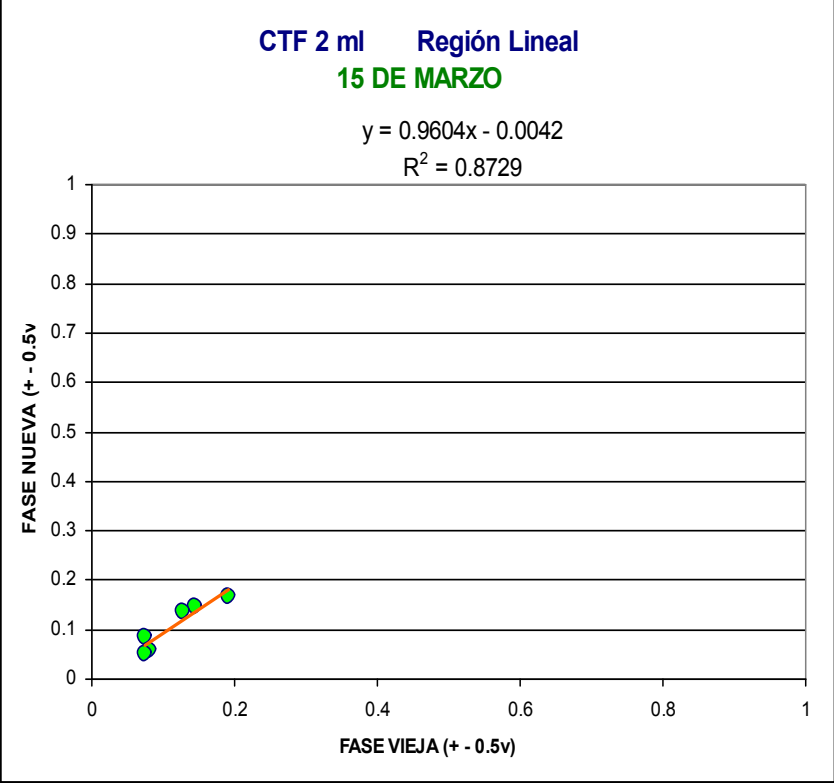
15 DE MARZO de 2007: CTC	
Volumen de Perturbación: 2 ml usando 2 mangueras	
To = 40.88 s	c.v.= 1.30%



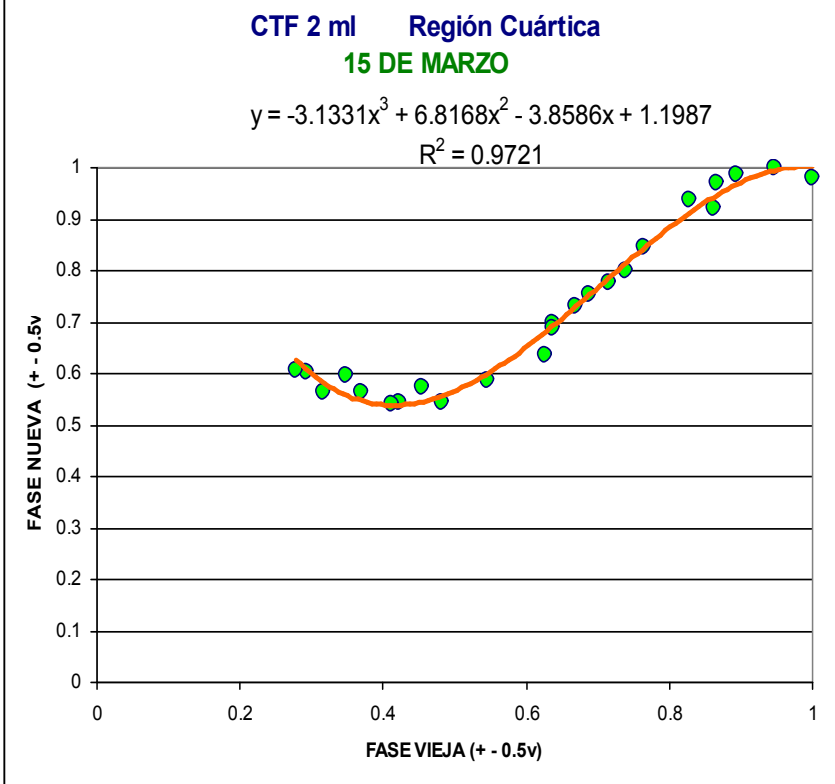
GRÁFICA 3 Perturbaciones de 2 ml.

15 DE MARZO de 2007: CTF	
Volumen de Perturbación: 2 ml usando 2 mangueras	
To = 40.88 s	c.v.= 1.30%

Región Lineal



Región Cuártica

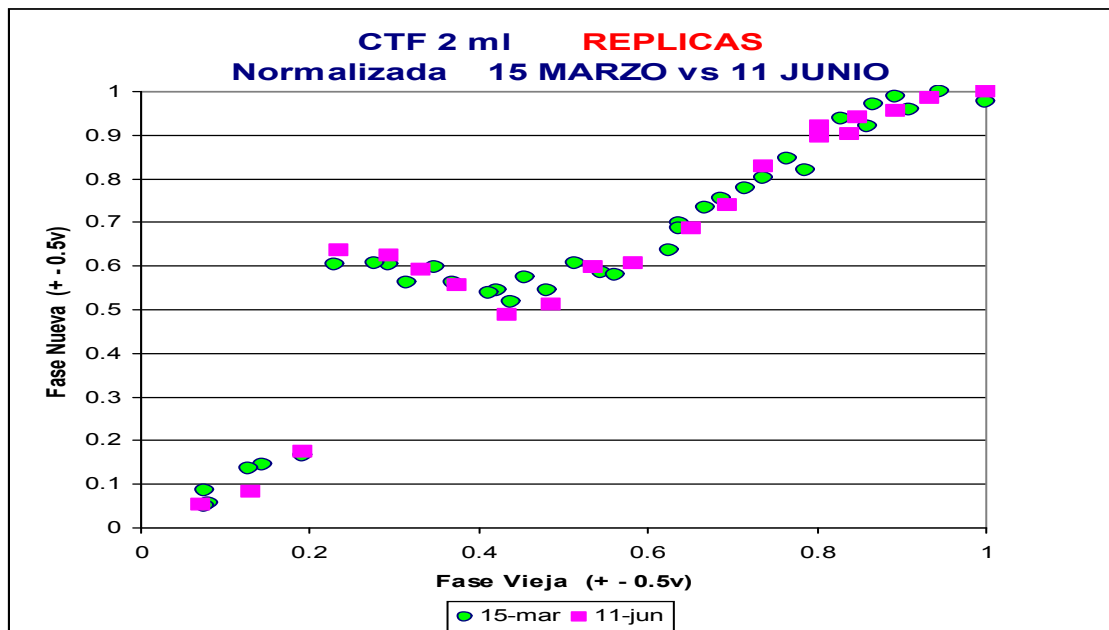


GRÁFICA 3a Perturbaciones de 2 ml. Regresión lineal y cuártica.

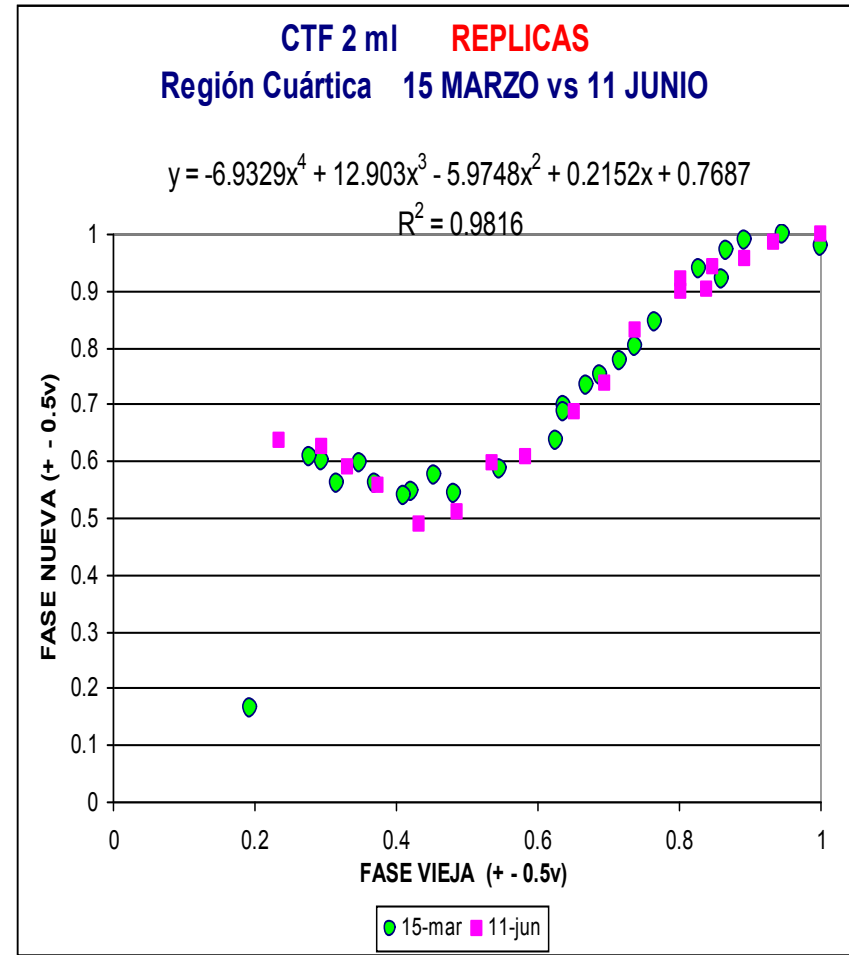
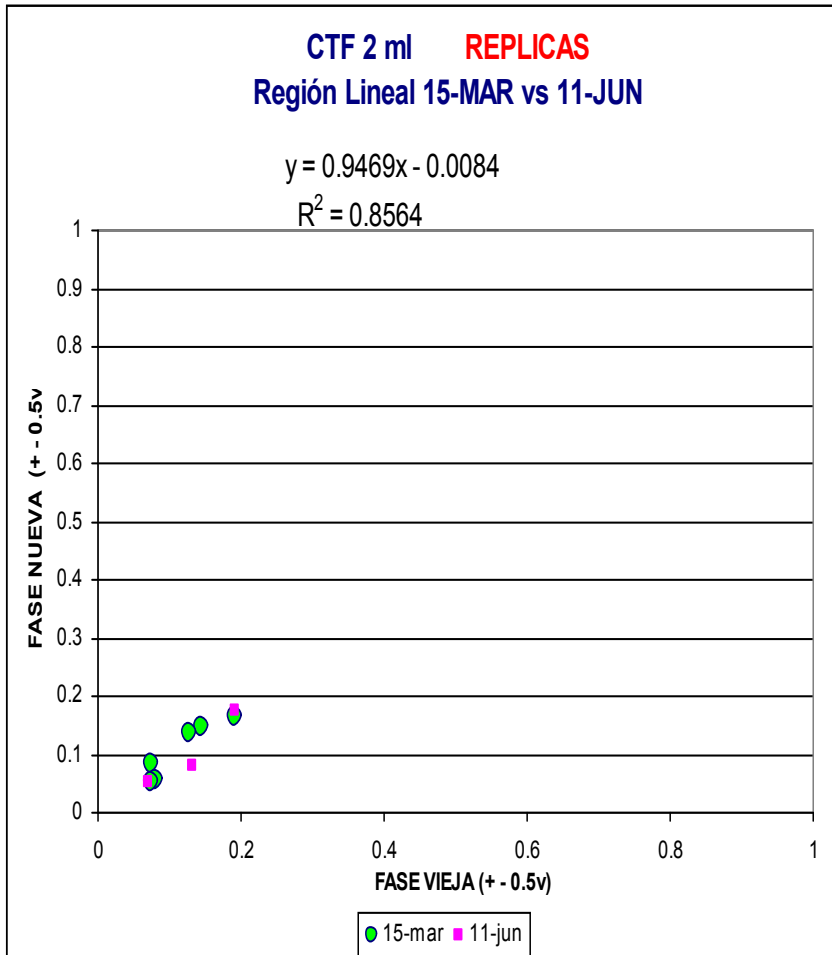
Observemos la comparación de los dos tipos de experimentos.

- (i) Experimentos con dos mangueras y volumen de 2ml, (n=2) gráfica (4).
- (ii) Todos los experimentos agrupados, 2ml y 1.5 ml , (n=3) gráfica (5).

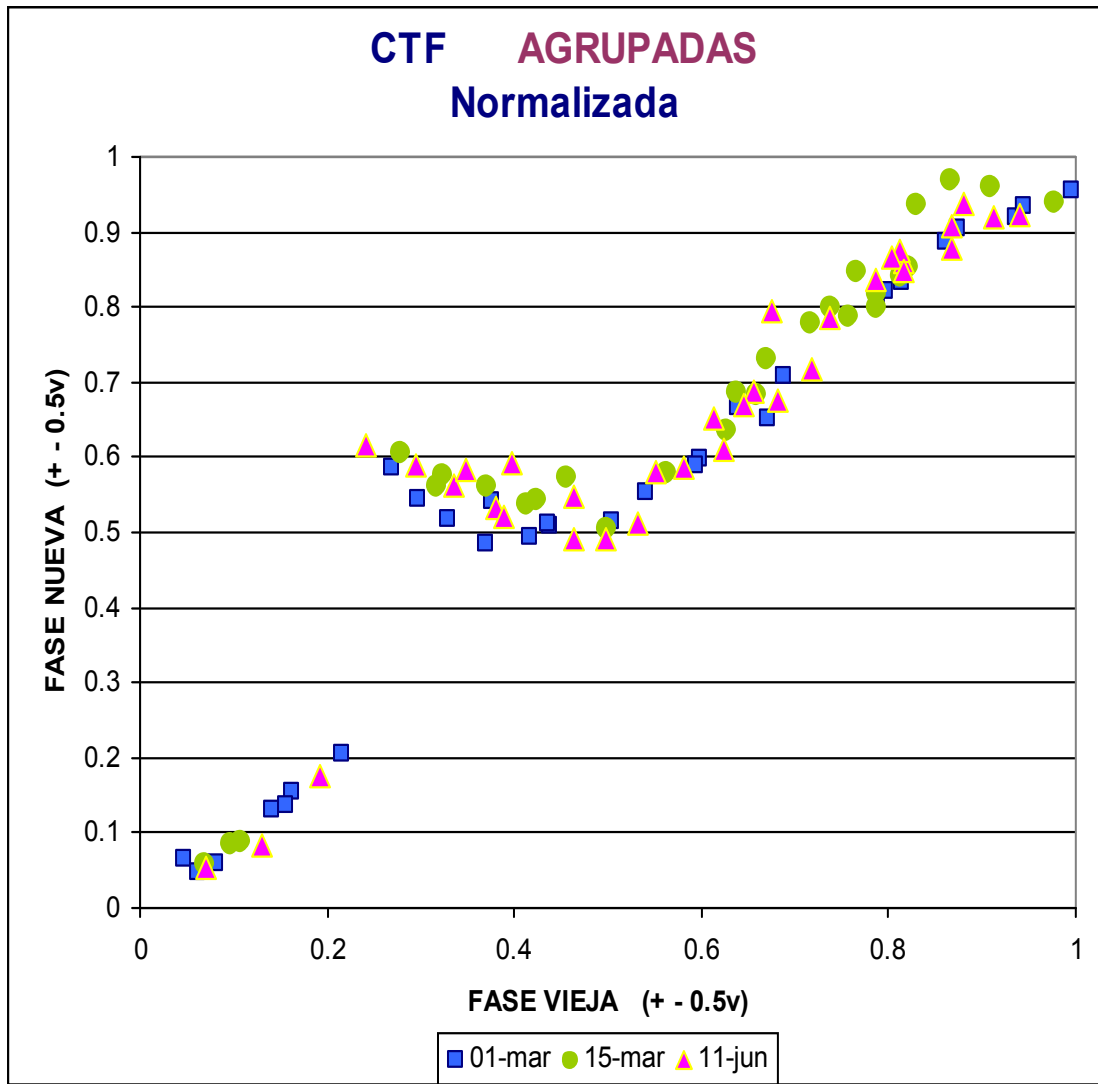
Como se puede apreciar, el tipo de curva experimental es similar; es decir, no es afectado significativamente el comportamiento del oscilador salino, siempre que se mantenga en el rango de las perturbaciones puntuales de mediana intensidad y con los regímenes de volumen establecidos.



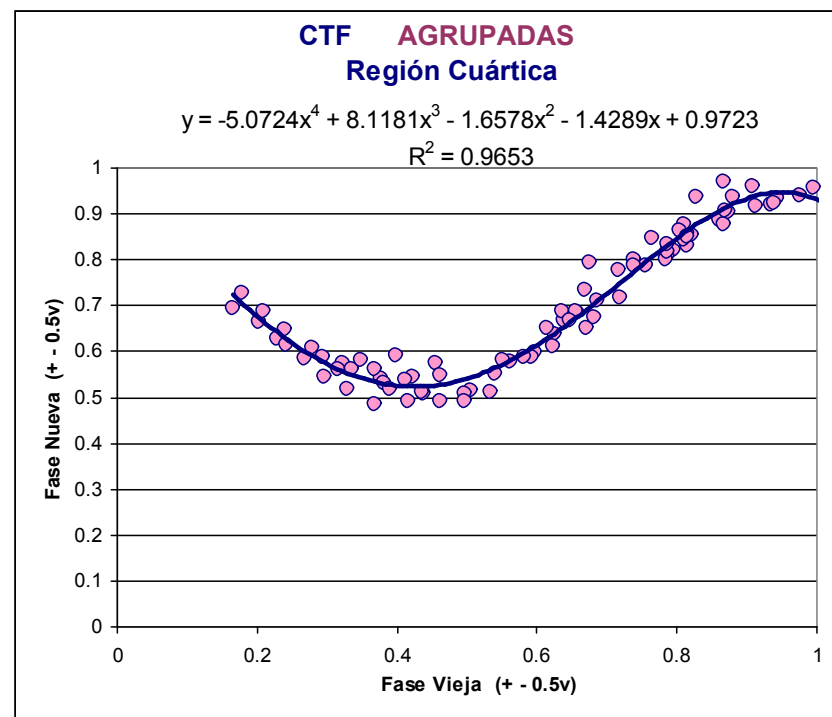
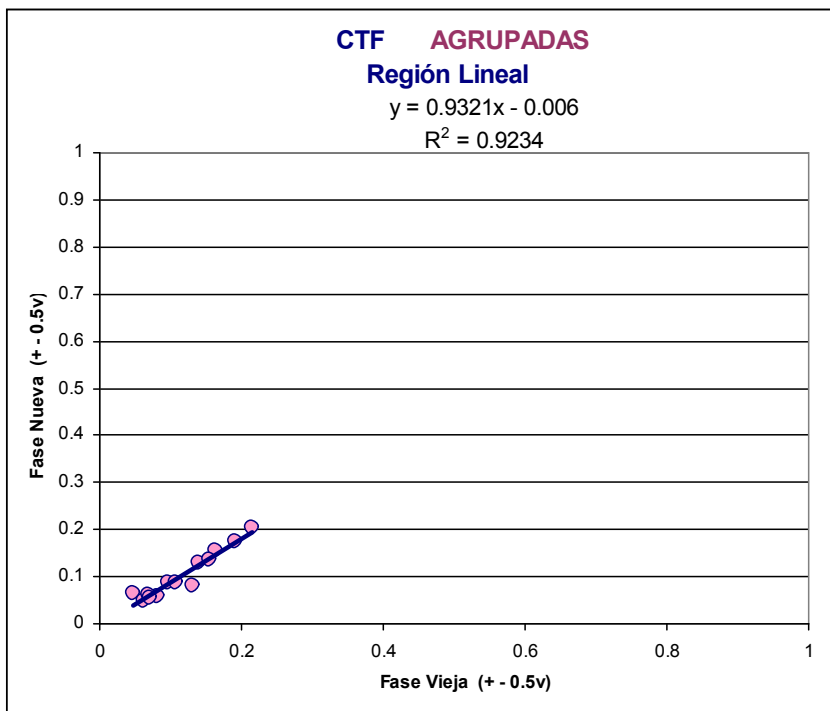
Gráfica 4. Resultados agrupados para 2 experimentos. Volumen 2 ml.



GRÁFICA (4a) Datos agrupados para 2 ml. Regresión lineal y cuártica.



GRÁFICA 5. Gráficas Agrupadas. Perturbaciones de 1.5 y 2 ml.



GRÁFICA 5a. Datos agrupados de perturbaciones de 1.5 y 2 ml. Regresión lineal y cuártica.

De los resultados obtenidos se observa que en la CTF, para medianas intensidades de perturbación, se pueden caracterizar cuatro zonas:

- (i) Para perturbaciones realizadas en fases próximas al inicio del ciclo no hay efecto, esto ocurre para fases entre 0.1 y 0.20 T_0 .
- (ii) Las perturbaciones realizadas en fases intermedias, se presenta un acentuado efecto sobre la oscilación, esto ocurre para fases entre 0.21 y 0.59 T_0 .
- (iii) En fases tardías, las perturbaciones no producen efecto apreciable: entre 0.60 T_0 y 0.85 T_0 .
- (iv) Perturbaciones realizadas entre 0.86 T_0 y 1 T_0 , esto es, muy cerca del final del ciclo, se observa alargamiento en la duración de la oscilación.

La utilidad de estos resultados, radica en la posibilidad de usar la CTF para contrastar predicciones teóricas con los resultados experimentales.

V-6 MODOS DE ACOPLAMIENTO

El fenómeno surge cuando un hombre extrae algo radicalmente nuevo de hechos que son del conocimiento de muchos. M. Sandoval Vallarta²¹,

Como se describió en la sección IV el protocolo (2), para perturbaciones periódicas, cumple con las mismas características experimentales que el protocolo utilizado para perturbaciones puntuales. Los volúmenes empleados fueron 1.5ml y 2ml con inyección y retiro inmediato, empleando la mayor tasa de flujo de la bomba. En esta etapa del trabajo experimental las perturbaciones se aplicaron de manera periódica, a través de un programa de computadora creado en el laboratorio que controla a la bomba de inyección/ retiro.

A continuación analizaremos los modos de acoplamiento entre la onda del oscilador salino (m) y las perturbaciones continuas realizadas por los pulsos de volúmenes (n). Los diferentes modos de acoplamiento serán entonces representados como n:m. Las perturbaciones intermedias con volúmenes de 1.5ml y 2ml, producen acoplamientos o ritmos mayoritariamente 1:1 ó 2:1, los resultados para trenes de 20 perturbaciones, están presentados en la tabla 1. Para el caso de 25 perturbaciones continuas, tabla 2, podrá observarse una alternancia entre éstos ritmos, 1:1 o 2:1, obsérvese la región sombreada. En los registros 19 al 22 se muestran algunas de las situaciones encontradas, registro de la figura 19 se tiene un ritmo 2:1; es decir, ocurren una oscilación del Os por cada dos perturbaciones periódicas, esto es debido a que el período de perturbación es muy corto y no le da tiempo suficiente al sistema del oscilador hidrodinámico de densidad salino de seguir a todas las perturbaciones ni de mantener su ritmo natural.

Por otro lado, los anchos de las crestas y los valles en la onda del oscilador se redujeron de manera importante, de un periodo basal de 33.2 segundos, ahora la duración de un ciclo es de 22.8 segundos. El acoplamiento es estable y se mantiene durante la perturbación continua de 25 pulsos.

²¹ La responsabilidad moral del hombre de ciencia; cuadernos americanos, LVI(2),43 (1951).

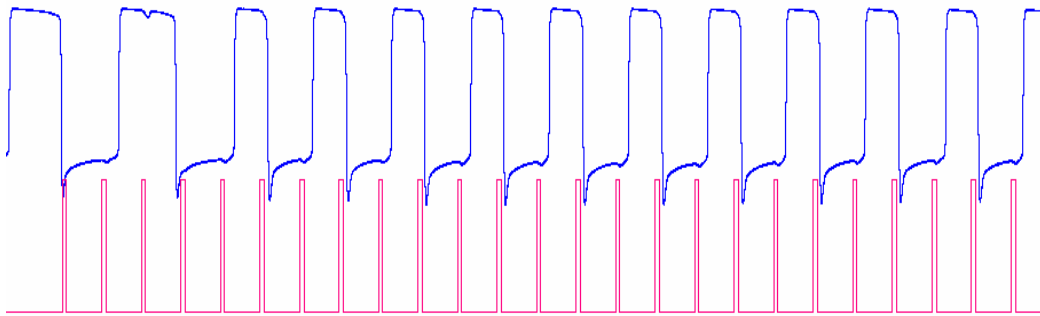


Figura 19. Ritmo 2:1 entre el oscilador salino y las perturbaciones de 2 ml.

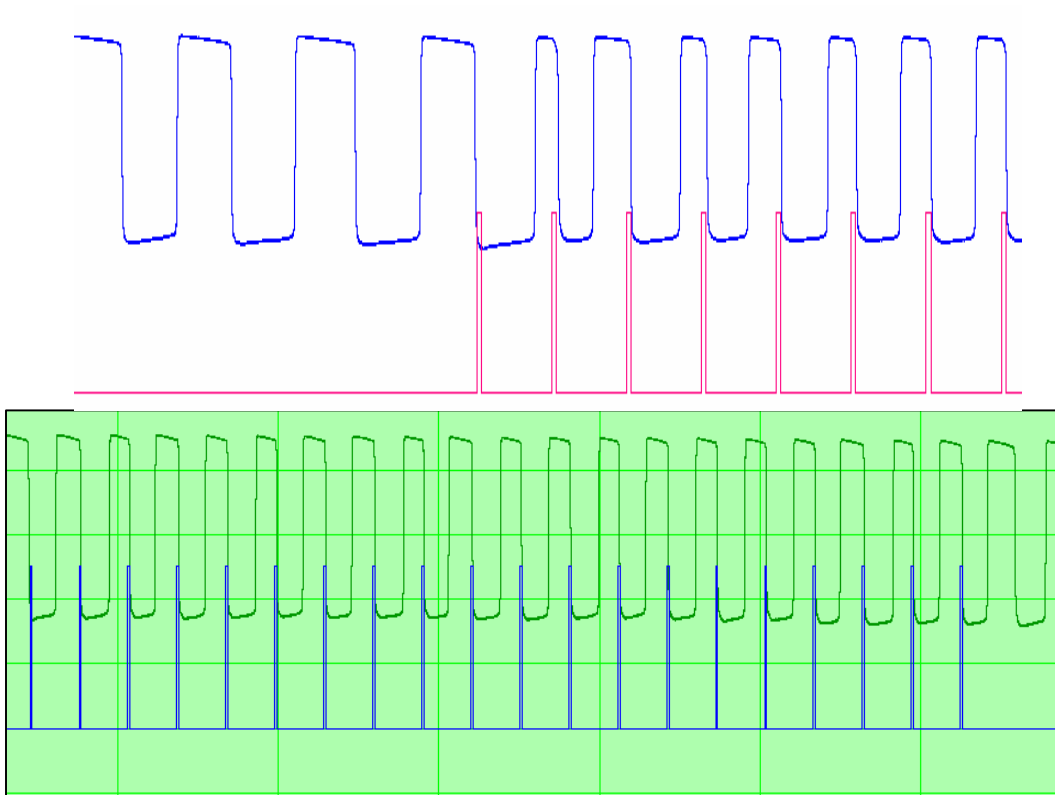


Figura 20. Tren de 20 pulsos, se presenta un ritmo 1:1. a partir del 4º pulsos de perturbación. En el recuadro de la derecha puede verse que el ritmo fue estable durante el resto del tren de pulsos.

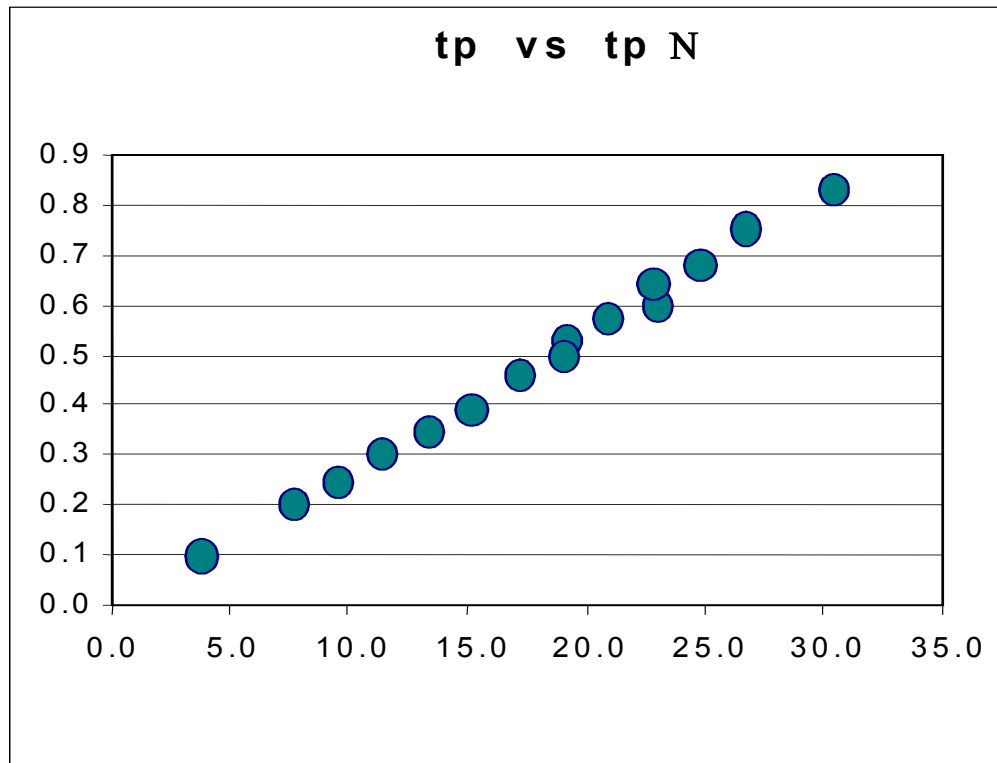
En la figura 20, el acoplamiento alcanzado fue 1:1, lo que indica que por cada perturbación hay una oscilación del oscilador salino; puede apreciarse que el acoplamiento con el tren de pulsos de volumen se mantiene constante. En este caso, como puede observarse son muy pequeños los cambios en la forma de los valles y crestas, de la onda del oscilador. En este caso se aplicaron 20 perturbaciones continuas.

En la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos para un experimento con trenes de 20 perturbaciones. Los modos de acoplamiento se indican como n:m, encontramos que hubo predominancia de ritmos 1:1, una vez transcurridas las primeras perturbaciones que suelen dar acoplamientos transitorios. También observamos acoplamientos cuasiperiódicos que no se incluyen en la tabla. Debemos considerar que los periodos de perturbación impuestos, no siempre logran acoplarse o imponerse al ritmo natural de oscilador salino, esto dependerá del momento en que recibe la nueva perturbación y de la intensidad de la misma.

TABLA DE ACOPLAMIENTOS: 20 perturbaciones				
Volumen = 2 ml		ritmo predominante 1:1		
Periodo Anterior	Periodo Posterior	Periodo de Perturbación	Ritmo	Tp Normalizada
To (s)	T* (s)	t_p (s)	n:m	tp N= t_p / T_o
37.75	37.68	7.66	4:1	0.20
36.95	37.48	9.54	3:1	0.25
37.08	38.69	11.42	3:1	0.30
37.61	38.81	13.43	2:1	0.35
38.69	38.16	15.18	2:1	0.39
36.80	38.83	17.20	2:1	0.46
35.87	34.93	19.21	1:1	0.53
37.48	33.05	19.08	1:1	0.54
36.41	35.87	20.96	1:1	0.57
38.16	35.73	23.10	1:1	0.60
35.74	35.75	22.83	1:1	0.64
36.27	36.54	24.85	1:1	0.68
35.33	39.76	26.73	1:1	0.75
36.68	36.27	30.50	1:1	0.83

Tabla 1. Modos de acoplamiento asociados a perturbaciones periódicas aplicadas al oscilador salino con volúmenes fijos de agua, de 2 ml.

Como una manera de verificar el buen control del protocolo de perturbaciones periódicas, se presenta en la gráfica 6 la relación entre el periodo de las perturbaciones aplicadas de manera consecutiva (tp), contra ese mismo periodo normalizado respecto al T_0 previo, es decir, respecto al periodo del ciclo sin perturbar inmediatamente anterior al tren. Esto se hace así, pues podrían existir variaciones del ciclo natural a lo largo del experimento. La relación lineal revela también que con los pulsos aplicados, fueron exploradas las diferentes regiones de manera regularmente distribuida.



Gráfica 6. Periodo de los pulsos de perturbación aplicados (tp), contra tp normalizada respecto al ciclo natural de oscilación.

En la tabla 2 puede apreciarse nuevamente los modos acoplamiento con el tren de pulsos de volumen, se indican aquellos que fueron estables durante la mayor parte del tren. Y las franjas de color muestran las alternancias entre los ritmos 2:1 y 1:1.

TABLA DE ACOPLAMIENTOS: 25 perturbaciones 12 – junio – 07 ritmo predominante 2:1				
Periodo Anterior	Periodo Posterior	Periodo de perturbaciones	Ritmo	tp Normalizada
To (s)	T* (s)	t_p (s)	n:m	tpN = t_p / T_o
32.78	33.04	6.71	4:1	0.20
31.98	34.12	8.20	3:1	0.25
32.92	34.14	9.94	3:1	0.30
33.45	32.91	11.55	2:1	0.34
33.04	33.32	13.16	2:1	0.39
33.18	32.11	14.91	2:1	0.44
33.45	33.18	16.53	2:1	0.49
33.99	33.46	18.27	2:1	0.53
33.99	33.46	18.27	1:1	0.53
33.31	33.31	20.02	2:1	0.60
33.31	33.31	20.02	1:1	0.60
33.85	31.71	21.49	2:1	0.63
33.85	31.71	21.49	1:1	0.63
32.64	33.99	22.98	2:1	0.70
32.64	33.99	22.98	1:1	0.70
32.92	33.19	26.60	1:1	0.80

Tabla 2. Modos de acoplamiento del oscilador salino ante 25 perturbaciones continuas de volúmenes de agua.

Algunos casos particulares, se presentan en los registros de la figura 21, conocidos como acoplamientos transitorios. Se observan variaciones en la duración de la fase de caída de agua salada. Puede apreciarse claramente la dependencia de la fase de aplicación del pulso de perturbación para el efecto observado. Si la fase es mayor a 0.2 se logra adelantar una nueva oscilación, aunque en ocasiones sólo parcialmente, como ocurre en el ciclo 3º de la figura.

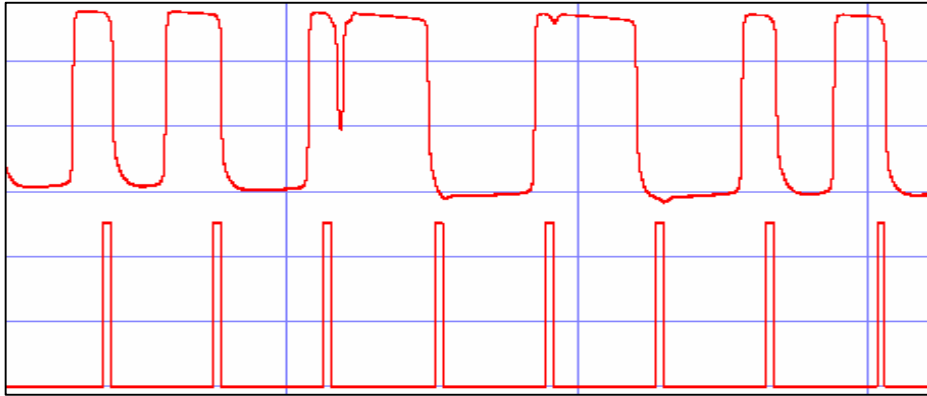


Figura 21. Ritmos transitorios durante perturbaciones continuas.

Para el caso de la figura 22, se aprecia una pequeña muesca en parte inferior del registro, con reducción en el período. Al terminar el tren de pulsos, recupera su forma original. El registro presenta un ritmo 2:1.

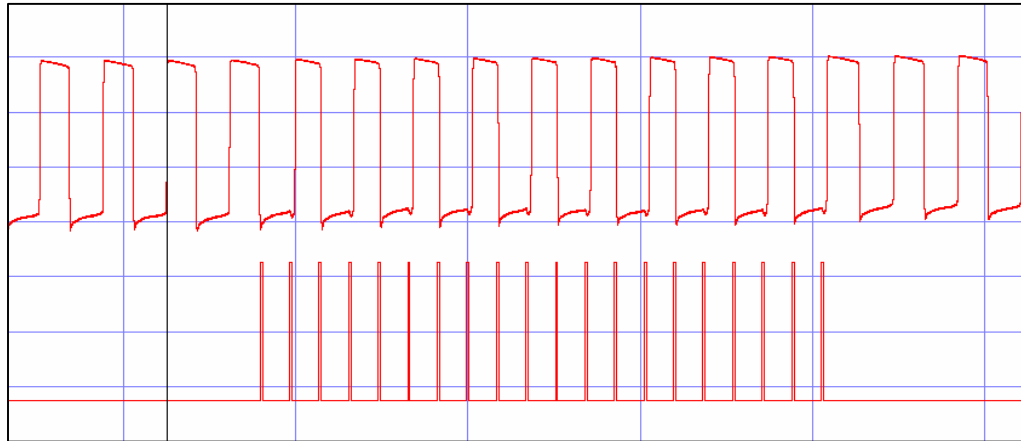


Figura 22. Se aprecia una pequeña muesca en la región inferior del registro, la cual desaparece una vez terminado el tren de pulsos. Ritmo 2:1.

Las pequeñas ondulaciones apreciadas en el registro anterior son una huella de las perturbaciones por pulsos bifásicos de volumen, que son de intensidad suficiente para poderlas reconocer en los registros, pero no tan fuertes como para provocar una oscilación asociada a cada perturbación.

Por otro lado, como puede apreciarse en las tablas, predominantemente se generaron ritmos $n:1$; es decir, a n perturbaciones, correspondió una oscilación espontánea. Este tipo de acoplamiento se da cuando la intensidad de las perturbaciones no es muy grande. Asimismo encontramos una región importante de frecuencias para los acoplamientos 1:1 que ocurren cuando la frecuencia de perturbación no es tan diferente a la frecuencia del oscilador salino.

V-c OTRAS OBSERVACIONES EXPERIMENTALES

El sistema hidrodinámico salino, es muy sensible a algunas variaciones del medio ambiente, desde luego a vibraciones como las de tipo mecánico, asociadas al lugar; por tanto, el experimento debe realizarse en espacios libres de corrientes de aire, sonidos estridentes, entre otros. Por otro lado, pude corroborar experimentalmente que como comenta J. Walker en su artículo: “La fuente de sal y otras curiosidades basadas sobre las diferentes densidades de los fluidos”, los flujos descendentes asociados con el oscilador salino van depositando sales de cloruro de sodio en la base, principalmente. Los registros de sales en la pared se deben principalmente a las propiedades de las soluciones acuosas y al alto nivel de adhesión molecular del NaCl con el vidrio del cristizador.



Figura 23, Zonas del contenedor externo donde se deposita el NaCl.

J. Walker comenta que si se coloca un estrato de agua salada sobre uno de agua fresca, el agua salada se hunde. Yo además lo realicé experimentalmente en un oscilador salino sometido a perturbaciones de agua de manera periódica y/o puntual en donde la interconexión entre los contenedores es por medio de un orificio capilar. Observé lo siguiente:

Una vez que el oscilador salino entró en su etapa de amortiguamiento y se dio por terminado el experimento, dejé ligeramente húmedo el contenedor externo a temperatura ambiente, aproximadamente 8 días, y se produjo la formación de cristales de NaCl con una alta adhesión a las paredes del cristizador. En la figura 23 puede observarse las diferentes densidades de acumulación de cristales. Este registro cualitativo²² de los efectos de la cristalización en un oscilador salino bajo perturbaciones periódicas y puntuales no había sido reportado.

²² Algunos datos e información reciente serán presentados en artículo: El Oscilador Azul, actualmente en preparación.

VI CONCLUSIONES

El Oscilador Hidrodinámico Salino representa un buen modelo para entender aspectos dinámicos de osciladores no lineales. En particular, en este Reporte de Actividad de Apoyo a la Investigación sobre el Oscilador Hidrodinámico Salino con Perturbaciones de Mediana Intensidad, se analizó y caracterizó el efecto de las perturbaciones puntuales de volumen, sobre la oscilación espontánea del sistema, encontrando que:

1. Es posible caracterizar el efecto de perturbaciones puntuales, siempre que se cumplan un par de condiciones, ya comentadas en la sección de métodos de este reporte: la duración de la perturbación debe ser breve comparada con la duración del ciclo, y la recuperación del sistema debe ser muy rápida.
2. De los resultados obtenidos se concluye que la Curva de Transición de Fase puede ser caracterizada por cuatro zonas:
 - (i) Para perturbaciones realizadas en fases próximas al inicio del ciclo no hay efecto, esto ocurre para fases entre $0.1T_0$ y $0.20T_0$.
 - (ii) En fases intermedias, se presenta un acentuado efecto sobre la oscilación, esto ocurre para fases entre $0.21T_0$ y $0.59T_0$.
 - (iii) Perturbaciones en fases tardías, no hay efecto apreciable: entre $0.6T_0$ y $0.85T_0$.
 - (iv) Para perturbaciones realizadas entre 0.86 y $1T_0$, esto es, muy cerca del final del ciclo, se observa un pequeño alargamiento en la duración de la oscilación.
3. Los Modos de Acoplamiento tuvieron predominantemente un ritmo $n:1$, en donde $n =$ No. de perturbaciones de agua aplicadas, esto coincide con acoplamientos encontrados en otros sistemas oscilantes de tipo no lineal, para este nivel de intensidad. Por ejemplo, se han observado este tipo de acoplamientos en el músculo papilar de cobayo²³ y en las Fibras de Purkinje²⁴.

²³ En algunas regiones del corazón el ritmo de actividad 1:1 puede pasar al ritmo 2:1, depende de si se tiene alguna alteración corporal; por ejemplo, algunas enfermedades cardiovascular, aumento de la frecuencia ó reducción de la intensidad de la estimulación eléctrica, en el caso de reducción de excitabilidad reducida como en el momento de tener alto contenido de potasio o disminución de la temperatura, ver González, H. et al. (2004).

²⁴ En tejido de perro, reportado por Chialvo y Jalife, (1987).

4. El diseño de los protocolos de perturbación: pulsos aislados y pulsos periódicos, para obtener la Curva de Transición de Fase (CTF) y los Modos de Acoplamiento por Forzamiento Periódico, junto con todas las réplicas respectivas, sirve entre otras para:
 - a) Proporcionar robustez a los resultados, es decir, confianza en que las características dinámicas encontradas para este sistema, son reproducibles.
 - b) Corroborar la estandarización de los instrumentos asociados al diseño experimental del oscilador hidrodinámico salino.
5. El sencillo montaje del diseño experimental, facilita la incorporación de instrumentos como los electrodos de plata-clorurada, con los cuales es posible realizar medidas de voltaje confiables, asociadas a los cambios de flujo de los ciclos de oscilación.
6. Como el corazón realiza movimientos dinámicos asociados con diferentes oscilaciones no lineales se puede entonces considerar al oscilador salino como un modelo experimental muy accesible y asequible para probar algunas hipótesis relevantes sobre la dinámica de este órgano, como se comentó en el trabajo, capítulo I.
Adicionalmente, hasta donde tengo información, los protocolos experimentales descritos en este manuscrito, el diseño experimental aquí presentado, el análisis de resultados empleando de la teoría del reinicio junto con las analogías presentadas en las tablas de Modos de Acoplamientos I y II, de este Reporte de Apoyo a la Investigación y el artículo Reset, entrainment and bistability in the saline oscillator. Model and experiment (González H. et al.) son los primeros resultados para analizar situaciones en el área de cardiología, hecho que pone en alto la calidad científica de las investigaciones mexicanas.

Por todo lo anterior surgen enseguida algunas preguntas entre ellas la siguiente:

¿Se podrán simular dinámicas del tipo del ritmo cardiaco en el sistema hidrodinámico salino? La respuesta es sí.

Una particularidad importante de los ritmos es que si son fisiológicos, no son estrictamente periódicos, sus fluctuaciones, son generadas por la influencia e interrelación con su entorno y las variables internas del cuerpo, característica que también se observa en el oscilador salino, pero en menor medida, pero con la ventaja de que las causas de las variaciones se pueden reconocer más fácilmente.

Finalmente, desde mi perspectiva, otra ventaja de analizar al sistema hidrodinámico de densidad salino brinda la posibilidad para aprender e innovar técnicas de análisis, experimental y teórico, para fenómenos con oscilaciones no lineales.

PROPUESTAS

- ◇ La estructura que he propuesto para analizar los acoplados, tabla 1 y 2, considero es una manera sencilla para conocer la dinámica del oscilador salino antes y después de interactuar con las perturbaciones periódicas de volumen de agua, además de contener información sobre los ritmos, entre otros.
- ◇ El protocolo (I) empleado para perturbar puntualmente al Oscilador Salino presenta algunos aspectos experimentales que pueden ser mejorados a través de su automatización. Como por ejemplo, hace falta automatizar la obtención de las Curvas de Transición de Fase, ya que en ocasiones, al oprimir manualmente el interruptor de la bomba de agua, se puede oprimir por más tiempo del establecido, observándose pulsos más largos, aún con habilidad del ejecutante. Esto ocasiona variaciones en la Curva de Transición de Fase. Lo anterior sucede, principalmente, al ajustar el osciloscopio en valores muy cercanos a la fase 1 o por los efectos de la luz sobre el osciloscopio y la fatiga visual del experimentador. Para minimizar este efecto luminoso coloqué una pantalla en la ventana del laboratorio, principalmente en la época de primavera.
- ◇ Se deben realizar acciones de mantenimiento que aseguren condiciones óptimas para la operación eficaz de los equipos; incluyendo limpieza, lubricación, nivelación de la mesa de operación e incluso la sustitución de piezas de desgaste. Esto debe hacerse antes y después de un experimento.



BIBLIOGRAFÍA

ASTROFÍSICA:

Steffen W, “ Proyecto Cosmovisión. El Universo en 3D”, Rev. Ciencia y Desarrollo, v.29, n.173, p.4-9,(2003).

BIOFÍSICA:

González H, et al, “Actividad rítmica del músculo papilar inducida por estimulación de alta frecuencia: ritmos n:1, formas de transición de histéresis”, Arch. Cardiol. Mex., 74(1): (2004).

Ledesma – O. C., et al, “Polymers: a new challenge in the Faculty of Sciences of UNAM”, II Simposio Latinoamericano de Polímeros, (SLAP'90).

Schrödinger, E, ¿Qué es la vida Tusquets?, Ed. (1984).

DINÁMICA NO LINEAL:

Arce, H. “Foro RED-MAT: La curva de restitución anómala: un estuche de monerías” Conferencia en el Coloquio "Perspectivas en Sistemas Complejos, IF-UNAM, (2006).

Banks, J. et al, “On Devaney’s Definition of Chaos”, The American Mathematical Monthly, v.99, n.1-4, p.332-334,(1992).

González H, et al, “ Reset, entrainment and bistability in the saline oscillator. Model and experiment” Phys. Review E, enviado, (2008).

Glass, L. y M.R. Guevara, “On dimensional Poincaré maps for periodically stimulated biological oscillators” In Proceedings of Colloque International du CNRS, no. 332 Sur la théorie de l’iteration et ses applications. Ed. du CNRS, Paris, pg. 205-210 (1982).

Ledesma – O. C., et al, “El Oscilador Azul”, en preparación.

Martin, S. “A Hydrodynamic Curiosity: the Salt Oscillator”, Rev. Geophysical Fluid Dynamics, v.1, p.143-160,(1970).

Rincón, N. E. et al, “Estudio de un oscilador de densidad mediante medidas potencial eléctrico”, Rev. Brasileira de Ensino de Física, v.28, n.1, p.67,(2006).

Walker, J. “The salt fountain and other curiosities based on the different density of fluids”, Scientific American, v.237, n.4, p.142-150,(1977).

Yoshikawa, K. “Use of a saline oscillator as a simple nonlinear dynamical system: Rhythms, bifurcation, and entrainment”, Am.J. Phys. 59(2), February (1991).

LIBROS Y OTRAS FUENTES

Asistencia A : **Primera Reunión Científica Internacional: Ritmos Biológicos y Memoria**, Cd. Méx. (2007).

El Cuerpo Humano, Ed. Salvat, S.L. (2006).

Física, v. II, Feynman, R., Addison-Wesley Iberoamericana,(1987).

From Clocks to Chaos: The Rhythms of Life, Glass L. and M. C. Mackey, Princeton University Press, Princeton 1988.

Gran Enciclopedia Médica, SARPE. (1978).

Mathematical Methods, Arnold, V.I, Springer -Verlag, (1980).

Methods of Theoretical Physics, Morse. M. – Feshback.H., McGraw-Hill, (1953).

Serie de Documentos Técnicos No. 778, Health Guidelines for Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture. Ginebra, Suiza. Organización Mundial de la Salud, (1989).

FIGURAS:

4 – <http://www.atoptics.co.uk/droplets/iridimOa.htm>

7 – Conel, J.L., The postnatal Development of the Human Cerebral Cortex, VOL.I. The cortex of the Newborn, Harvard University Press, Cambridge, Mass.(1939).

8 – tejidodbiologias.freecomfigbox.com

9 – html.rincondelvago.com