

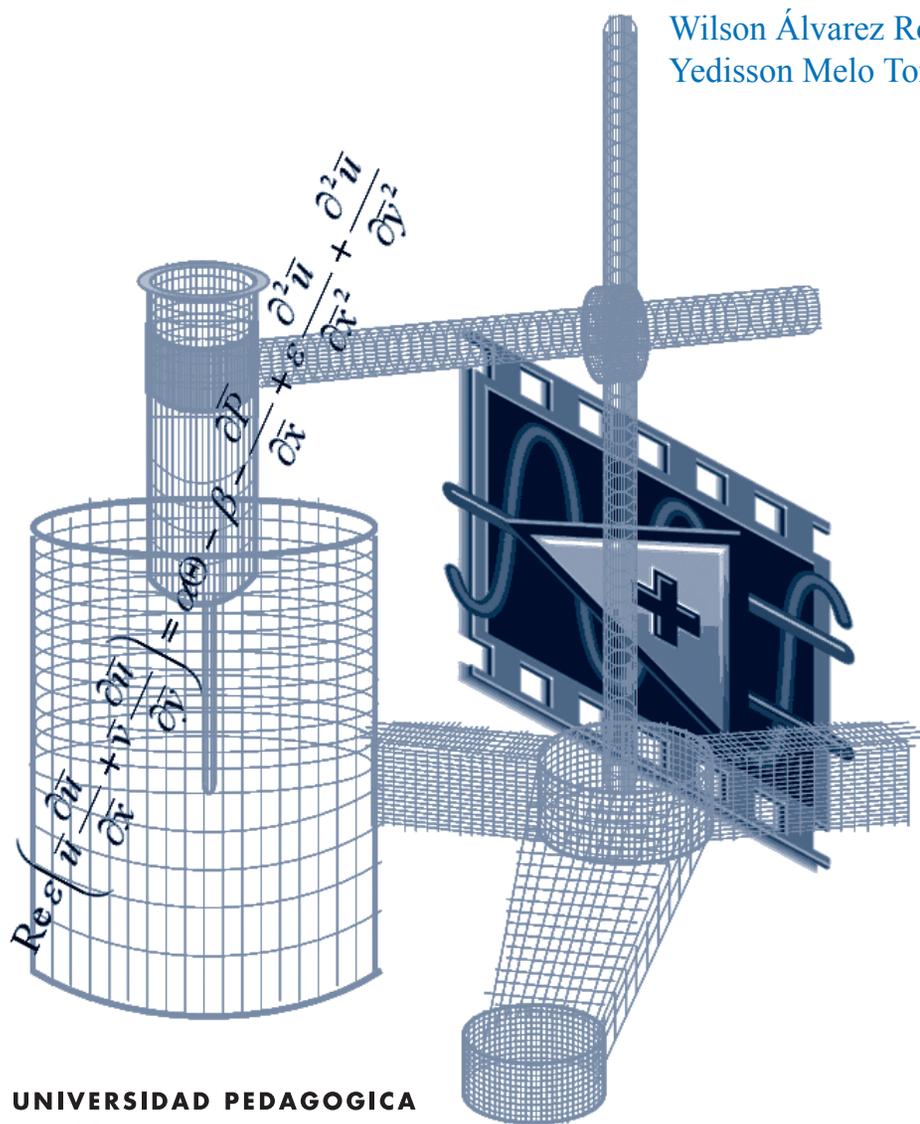
Pre·Impresos **5**

Estudiantes

Facultad de Ciencia y Tecnología Departamento de Física 2010

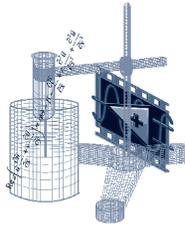
El Oscilador de Densidad Dinámica oscilatoria, fenómenos de transporte y sistemas de adquisición de datos por instrumentos virtuales

Wilson Álvarez Rodríguez
Yedisson Melo Torres



**UNIVERSIDAD PEDAGOGICA
NACIONAL**

Educadora de educadores



Pre·Impresos **5** Estudiantes

Margie Nohemy Jessup Cáceres
Rectora

Rosalba Pulido de Castellanos
Vicerrectora Académica

Ricardo Wilches Rojas
Vicerrector Administrativo y Financiero

Fidel Antonio Cárdenas Salgado
Vicerrector de Gestión Universitaria

Facultad de Ciencia y Tecnología
Departamento de Física

Steiner Valencia
Jefe de Departamento

El computador y las prácticas experimentales
en la enseñanza de la física
Línea de profundización

María Cristina Cifuentes Arcila
Supervisión de contenido

Rosa Nidia Tuay Sigua
Coordinadora Licenciatura en Física

Juan Carlos Bustos
Coordinador Editorial

© Universidad Pedagógica Nacional

© Yedisson Melo
Wilson Alvarez

Imagen de portada

Diseño de un oscilador de densidad basado en
el modelo de Seal Martin

Artículos publicados en diferentes medios
escritos y referenciados en cada uno de los
textos.

Diseño y Preparación editorial

Universidad Pedagógica Nacional
Grupo de Comunicaciones Corporativas 2010

Impreso en
Bogotá, Colombia

El Oscilador de Densidad

Dinámica oscilatoria, fenómenos de transporte y sistemas de adquisición de datos por instrumentos virtuales - Análisis dinámico e instrumentación para adquisición de datos

Presentación	4
El Oscilador de Densidad	5
Las oscilaciones del Atlántico Norte	6
Dinámica de un Oscilador de Densidad	7
Las oscilaciones de flujo	7
Modelando los flujos: el tratamiento de Navier Stokes	8
Del modelo al Oscilador de Densidad	11
Consistencia del modelo	12
Variación de las columnas de líquido	12
Un comportamiento inesperado - Oscilaciones en el potencial	13
Migración de iones: Potencial de unión líquida	14
El problema de las capas: Potencial de corriente	14
En la búsqueda de nuevos sistemas de adquisición	14
Registro de potencial	14
El PC como herramienta de adquisición	15
Los instrumentos virtuales y la tarjeta de adquisición de la National Instruments	16
Consideraciones Finales	17
Referencias	18

Presentación

De acuerdo con la Misión de la Universidad Pedagógica Nacional, el objetivo de esta publicación es resaltar la importancia de la socialización de las ideas en el campo de las ciencias y su enseñanza; como contribución al fortalecimiento de la docencia y la investigación en educación, tendiendo puentes entre los saberes especializados y la cultura en general. Esto resulta pertinente y significativo en la formación de nuevas generaciones de maestros de ciencias e investigadores en pedagogía, desde campos disciplinares específicos, quienes en su futura práctica profesional afrontarán retos y circunstancias diversos, que el entorno social del país le plantea a la educación.

La serie Pre-Impresos es una iniciativa editorial dirigida a la comunidad académica en general, que divulga la producción intelectual de los estudiantes de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la UPN, destacando las experiencias y reflexiones respecto de los temas propios del quehacer disciplinar y pedagógico de los autores. La participación está abierta a todos los integrantes de la comunidad estudiantil que deseen publicar sus trabajos a través de este medio; no hay restricción alguna en cuanto al formato de escritura, número de páginas o tema, con la salvedad de aquellos que estén fuera de los intereses propios de la actividad de la Facultad.

Información:

jcbustos@pedagogica.edu.co
Departamento de Física - UPN

Teléfonos: (57) (1) 3471 190 / 5941894 Ext. 242

El Oscilador de Densidad

Dinámica oscilatoria, fenómenos de transporte y sistemas de adquisición de datos por instrumentos virtuales

Análisis dinámico e instrumentación para adquisición de datos

Yedisson Melo Torres

Wilson Javier Álvarez

Universidad Pedagógica Nacional

Departamento de Física

yedisson_melo@hotmail.com

wilson.javier@yahoo.com.ar

Abstract

A potential tool for science since XVII century has been to reduce the complex systems to simple models, through systems made on laboratories, including software simulations. From this, we introduce a natural phenomena representation upon the construction of a practical device named Density Oscillator or Saline Oscillator. Its behavior represents, in a small scale, the fluids systems temporal evolution either the north Atlantic oscillation or biological systems like the chemical components interactions in the taste. We discuss some device's potentialities both the concepts and the data acquisition informatics tools inclusion.

Resumen

Desde el siglo XVII ha sido una herramienta importante para la ciencia modelar fenómenos complejos a partir de sistemas reproducibles en los laboratorios. Basados en este hecho, presentamos algunas consideraciones del modelamiento de un fenómeno natural, a partir de la construcción de un dispositivo práctico denominado: Oscilador de Densidad u Oscilador Salino. Su comportamiento representa a pequeña escala la evolución temporal de sistemas fluidos, como pueden ser las oscilaciones del Atlántico Norte o sistemas biológicos, como la interacción de componentes químicos en el sentido del gusto. Planteamos algunos alcances del dispositivo desde lo disciplinar y la inclusión de herramientas informáticas para adquisición de datos.

Presentación

Las leyes de la naturaleza a través de los años se han instaurado con base en la construcción de modelos teóricos, que el hombre ha diseñado como herramienta para facilitar la comprensión del comportamiento de los fenómenos que ocurren en su entorno, a partir de la eliminación de variables no relevantes. Dependiendo del carácter general de dichas simplificaciones, los modelos pueden ser abstractos o específicos.

Los modelos abstractos intentan definir marcos de referencia integrales que puedan abarcar una gran cantidad de fenómenos. Se construyen principios generales que sirven como base para formular las leyes que explican el acontecer fenomenológico en la naturaleza y serán sustentadas o falseadas de acuerdo con los estudios experimentales. Los modelos específicos son definidos para comprender un fenómeno particular donde la selección de variables, además de estar orientada por la teoría, está marcada por las condiciones particulares del problema a resolver y por las herramientas (formales y experimentales) con las que el científico aborda la resolución de ese problema.

El modelamiento específico, dado que no tiene el propósito de copiar con exactitud el entorno, presenta una brecha entre modelo y realidad que se sustenta mediante la verificación experimental (CUDMANI, SALINAS y PESA, 1, 1991), lo que pone de manifiesto el papel crucial de los medios¹ por los cuales se obtienen los resultados, ya que estos definen los límites de validez del modelo constituyendo “*un criterio cuantitativo fundamental para controlar si es posible o no ‘modelizar’ de tal o cual manera una situación concreta y predecir comportamientos fácticos*” (<http://www.scielo.br>, 2, 2008).

Estas preocupaciones señalan la necesidad y el avance en el uso de las “Tecnologías de la información y la comunicación” aplicadas al campo experimental, permitiendo exámenes empíricos más precisos que abarcan períodos de tiempo amplios. Estas tecnologías no pretenden sustituir al experimento clásico sino simplificar el trabajo de verificación.

La oceanografía y la meteorología son los campos en los que se utiliza con más frecuencia el modelamiento, pues los fenómenos, objeto de estudio, son complejos y su comportamiento se desarrolla en períodos que van hasta los miles de años y en márgenes espaciales hasta miles de kilómetros cuadrados; aspectos por los cuales los instrumentos desempeñan un papel relevante.

Dentro de los modelos que se usan para entender la evolución temporal de los fenómenos meteorológicos se destaca el modelo Paleo-climático² que, a pesar de suministrar información sobre la historia del clima del planeta, tiene problemas al momento de predecir fenómenos en los que comportamientos de interés se dan en un tiempo reducido. En vista de esta desventaja la atención de los investigadores se ha dirigido al modelamiento de fenómenos simplificados y concretos que afectan en gran medida al sistema climático real.

Uno de estos modelos hace uso de las restricciones espacio temporales en la interfaz de comunicación entre dos líquidos de diferente densidad. Con su estudio se pretende comprender, de mejor manera, el comportamiento de un fenómeno natural de gran escala como *las oscilaciones milenarias del clima terrestre*, que regulan en gran parte el comportamiento del sistema Océano Criósfera, indispensable para entender la evolución del clima en el planeta.

Con esto como punto de partida, presentamos algunas consideraciones alrededor de un trabajo que se configuró en la línea de profundización «El Computador y las Prácticas Experimentales en la Enseñanza de la Física» del Departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional, el cual hace parte de un trabajo monográfico general titulado «*Estudio de la dinámica de un Oscilador de Densidad: dispositivos de adquisición y posibles implicaciones en la enseñanza de la Física*». La investigación se inició en el año 2006 y algunos de sus resultados respecto a la instrumentación fueron discutidos en el marco del IV

¹. Deben ser precisos, hasta el punto en que los resultados no se reduzcan a una simple inspección o registro de dispositivos convencionales, que en ocasiones, ven comprometida su efectividad en grandes periodos de tiempo.

². Esta información proviene de registros naturales de la variabilidad climática, tales como anillos de árboles, testigos de hielo, polen fósil, sedimentos oceánicos, corales y datos históricos.

Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria, promovido por la Universidad Nacional de Educación a Distancia de España, la Sociedad Cubana de Física y la Universidad de La Habana. Los resultados referentes a la implementación del Oscilador de Densidad a través de un Trabajo Práctico en el aula de clase se discutieron en el marco del VI *Encontro Nacional de Pesquisadores no Ensino das Ciências ENPEC* promovido por la *Sociedade Brasileira de Investigadores em Enseñanza de las Ciencias*; y algunas de las consideraciones acerca de lo experimental se exponen en el trabajo monográfico mencionado.

El documento que presentamos está organizado con base en algunos referentes sobre dinámica de fluidos, especialmente en presencia de oscilaciones de alturas y transporte de masa. Iniciamos presentando el modelo en el que se describe la dinámica de las oscilaciones así como las condiciones de flujo, concluimos con la descripción de la ruta experimental seguida con énfasis en la vinculación de instrumentación virtual y algunos de los alcances del fenómeno en lo relacionado con la climatología.

El Oscilador de Densidad

El Oscilador de Densidad u Oscilador Salino es un sistema no lineal³ compuesto por dos recipientes (interno-externo) dispuestos como se observa en la *Figura 1*.

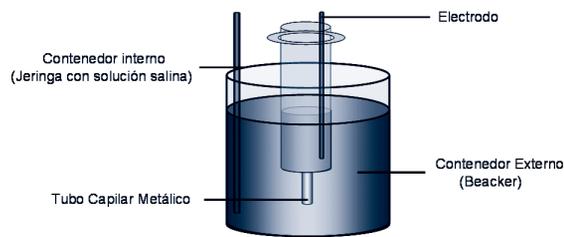


Fig.1 Diseño experimental del Oscilador de Densidad: Una reproducción del dispositivo original se logra con una jeringa y un beaker como contenedores interno y externo respectivamente. Para observar el fenómeno las columnas de líquido deben estar a la misma altura con el fin de mantener el mismo valor de presión.

Los contenedores separan dos fluidos de densidades diferentes con el líquido de mayor densidad alojado en el contenedor interno y el de menor densidad en el externo. En la parte inferior del contenedor interno se acopla un capilar vertical de dimensiones conocidas que dirige el fluido del recipiente interno al recipiente externo y viceversa. Como se observa en la *Figura 2*, cuando los contenedores son ubicados de forma tal que los niveles de las columnas de los líquidos coinciden, un flujo unidireccional de solución salina se dirige en sentido descendente a través del capilar en un circuito convectivo, es decir, de mayor

a menor densidad. En una primera aproximación se esperaría que el flujo continuara hasta que las densidades de los líquidos se igualaran, sin embargo, lo que se observa es un cambio en el sentido del flujo tornándose unidireccional ascendente. El proceso se invierte nuevamente estableciéndose de esta manera una dinámica oscilatoria entre los flujos.

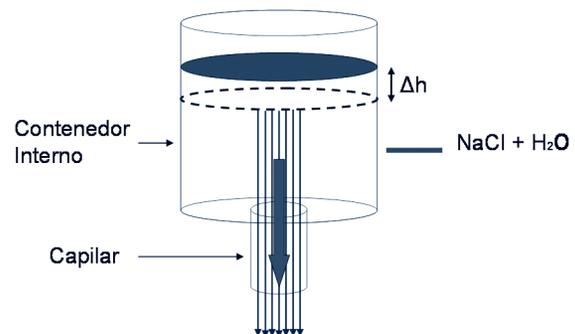


Fig. 2 Flujo unidireccional de solución salina en dirección descendente. Las capas de flujo laminar se dirigen convectivamente del contenedor interno al externo formando un circuito de mayor a menor densidad. La figura permite observar la diferencia de alturas en el contenedor interno en un primer momento de inestabilidad dinámica.

Cuando se incorporan a los contenedores dos electrodos conectados a un instrumento de registro de voltaje (*Figura 3*), se observa una señal de potencial cuya forma corresponde a una oscilación en concordancia con el sentido del flujo de masa, de modo tal que los aumentos corresponden al flujo descendente y los decaimientos al flujo ascendente por el capilar (*Figura 4*).

3. Un sistema cuyas ecuaciones características son de tipo no lineal y no cumplen con el principio de superposición.

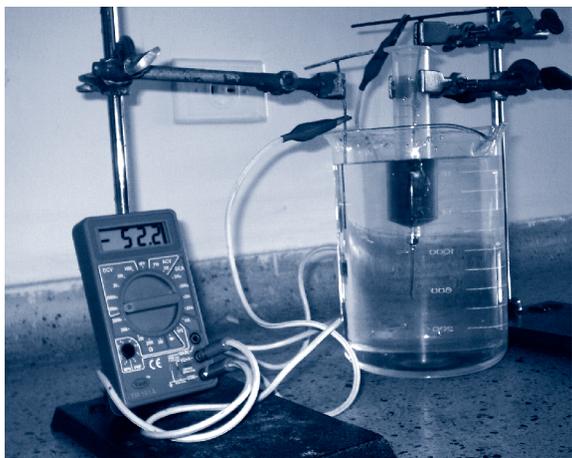


Fig. 3 Dispositivo experimental del Oscilador de Densidad. El contenedor interno es una jeringa de 60 ml con una disolución $H_2O + NaCl$. El contenedor externo es un beaker de 2 L. Los electrodos son conectados a un multímetro convencional y con el fin de observar los flujos se incorpora a la solución azul de metileno.

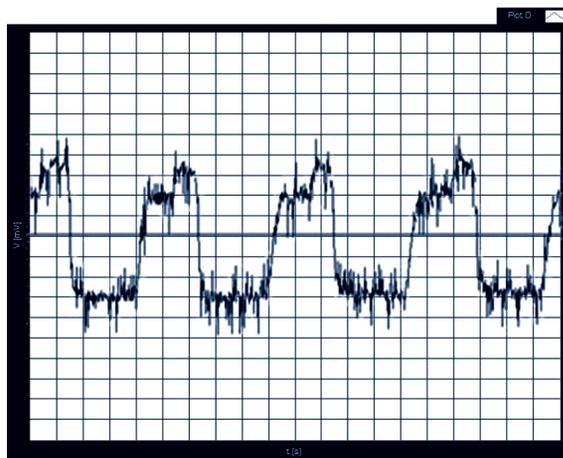


Fig. 4 Gráfica característica de potencial vs. tiempo registrada en el Oscilador de Densidad. Los aumentos en el potencial corresponden a flujos descendentes de solución salina dirigidos hacia el contenedor externo y los decaimientos corresponden a flujos ascendentes de agua dirigidos hacia la solución salina.

Antes de explorar detalladamente la dinámica del oscilador mencionaremos algunas de sus potencialidades en el campo de la física aplicada, con el fin de mostrarlo como un fenómeno que no es aislado y que permite realizar aproximaciones a diversos fenómenos en diferentes campos.

Las oscilaciones del Atlántico Norte

Estudios de registros paleoclimáticos -registros de hielo de Groenlandia y registros de sedimentos marinos del Atlántico Norte- revelan que el sistema climático de la Tierra se ha caracterizado por cambios milenarios que ocurrieron durante los últimos periodos glaciales (Pleistoceno) e interglaciales (Holoceno). Estos cambios fueron más intensos en presencia de grandes casquetes de hielo durante los periodos glaciales y más débiles durante los climas interglaciales como el actual (LUQUE, 3,2003).

En la década de los setenta se obtuvieron muestras del casquete glaciar de Groenlandia que aportaron registros de los últimos 100.000 años del ciclo glacial. Su estudio reveló la existencia de dos tendencias en los cambios climáticos: la presencia de ciclos glacial-interglacial y las oscilaciones rápidas de escala milenaria. Estas últimas, después de

varios años de discusión, fueron atribuidas a los cambios en las concentraciones de CH_4 en los glaciares y se caracterizan por ser oscilaciones cuyo periodo corresponde a 1500 años, en el cual los casquetes glaciares debieron enviar icebergs al Atlántico Norte para producir los cambios climáticos predominantes en esta región de la Tierra (LUQUE, 3,2003). Actualmente, la explicación de la causa de las oscilaciones milenarias que más toma fuerza considera la circulación oceánica profunda centrándose en las interacciones de varios componentes del sistema climático de la Tierra como los márgenes marinos de los casquetes glaciares, el océano profundo o el sistema de carbono a través de sus conexiones de flujo con las masas de agua fría y densas que se hunden en los mares septentrionales.

La interacción entre estos componentes, pertenecientes al sistema océano-criósfera, determina la formación de agua profunda en el Atlántico Norte -*North Atlantic Deep Water*- (NADW, por sus siglas en inglés). La constitución del NADW se encuentra controlada por la salinidad del agua superficial, que a su vez está relacionada con la tasa de liberación de agua dulce procedente de los casquetes glaciares.

Adicionalmente, en su formación se producen alteraciones de los valores de CO₂ atmosférico (LUQUE, 3,2003). La generación del NADW produce un gran cambio en la cantidad de calor que es transportada a través del océano y forma parte del denominado *conveyor belt* o circulación termohalina (Figura 5), que es la circulación convectiva que afecta de modo global al conjunto de las masas de agua oceánicas y es muy importante por su significativa participación en el flujo neto de calor, desde las regiones tropicales hacia las polares, sin las que no se comprendería el clima terrestre. La circulación es debida al fenómeno de convección producido por diferencias de densidad entre el agua procedente del trópico y el agua fría producto del derretimiento de icebergs, con las masas de agua más densas tendiendo a hundirse y las menos densas a ascender. En el caso de las masas oceánicas las diferencias de densidad dependen de dos factores: la temperatura y la salinidad. La densidad decrece cuando aumenta la temperatura y crece con la salinidad (<http://en.wikipedia.org>, 4, 2008).

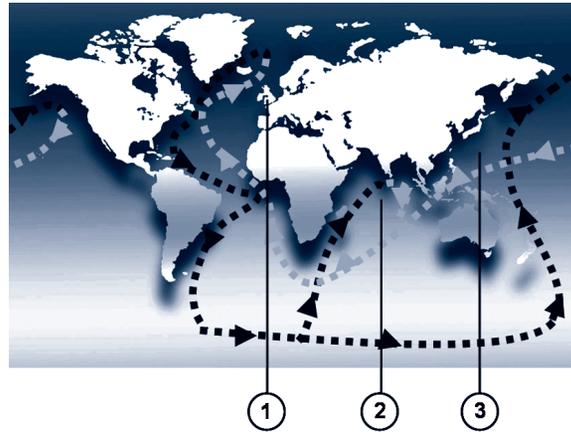


Fig.5 Esquema del circuito termohalino (conveyor belt). Las flechas oscuras representan masas de agua fría y las claras masas de agua cálidas. 1. Agua fría de alta salinidad en el Atlántico Norte. 2 y 3. el NADW regresa a la superficie en los océanos Índico, y Pacífico a través del proceso de Elevación.

Las oscilaciones en la salinidad del Océano Atlántico con la circulación oceánica termohalina y su consiguiente influencia sobre el clima del Atlántico Norte comprenden períodos que son demasiado largos para ser registrados mediante observación y demasiado cortos para ser detectados mediante los registros paleoclimáticos de alta resolución. Es esta la razón por la que se han introducido diversos sistemas modelos como el Oscilador de Densidad, que

a partir del control de variables dinámicas, reproducen algunos comportamientos del océano y su estudio es importante porque proporciona las bases necesarias para comprender, de manera aproximada, cómo se comporta el clima en nuestro planeta, sin dejar de lado la relación con otros fenómenos, métodos y modelos propuestos para generar una explicación con alto grado de proximidad del sistema climático real.

Dinámica de un Oscilador de Densidad

Oscilaciones de flujo

Una vez descrito el comportamiento del sistema y sus implicaciones en la Física aplicada, nos interesa conocer las causas de su comportamiento y predecir sus alteraciones en condiciones especiales considerando los factores de presión y densidad en el tiempo. En un primer momento las alturas de las columnas de líquidos es la misma y por lo tanto la presión sobre ellas tiene el mismo valor, deduciendo que el sistema se encuentra en estado de equilibrio inestable. Debido a la diferencia entre las densidades, la presión que ejerce la columna de líquido interno sobre la parte inferior del capilar es mayor que la ejercida por el líquido externo, originando el flujo convectivo descrito.

Es posible observar en este proceso que la altura de la solución salina decrece en relación con la columna externa, hasta el punto en que la presión del líquido externo sobre la parte inferior del capilar sea mayor que la presión del líquido interno amortiguando el flujo hasta hacerlo cesar por completo. Posteriormente, atribuimos al empuje del líquido externo el flujo ascendente. Este flujo de agua hacia arriba hace que la columna interna regrese hasta una altura próxima pero no igual a la inicial (debido al fenómeno de difusión que se presenta), donde su presión nuevamente supera a la presión del líquido externo y se produce un nuevo flujo descendente.

Se establece así la dinámica oscilatoria que estará relacionada con el gradiente de presiones mencionado y con la razón entre las densidades que amortigua la oscilación, debido a un fenómeno difusivo. Podemos caracterizar entonces esta dinámica a partir de las ecuaciones, producto de las fuerzas que actúan sobre el sistema, la ecuación que describe la diferencia de alturas en los dos contenedores y del análisis de las diferencias de potencial que son medidas en el oscilador.

Modelando los flujos: el tratamiento de Navier Stokes

Los modelos de los que parte el estudio de cualquier sistema - además de ser coherentes, sencillos y concretos- deben hacerse explícitos a través de un lenguaje representativo; en el caso de la física el lenguaje más usual para los modelos es la matemática. Por tal motivo, presentamos una caracterización desde el punto de vista matemático de los principios generales que sustentan la evolución de los estados de un sistema fluido⁴, con el fin de usarlos en una descripción detallada de la evolución del oscilador.

La descripción de los estados de un sistema físico clásico se hace explícita cuando se determina matemáticamente la evolución de las variables dinámicas o termodinámicas que lo representan⁵ respecto a algún parámetro (tiempo, posición etc.) (CAMPOS, 5, 2002). Así, para el estudio y caracterización de un fluido en movimiento es necesario realizar una aproximación matemática de este, que sea comprensible y que concuerde con los sucesos fenomenológicos. Una primera aproximación está presente en el modelo de Euler.

Según este modelo, en un fluido en movimiento se puede fijar un punto arbitrario como referencia y medir la velocidad de las partículas que pasan

por él. Matemáticamente, consiste en expresar una función de velocidad v en el tiempo que nos diga cuál es la velocidad de la partícula que está en una posición r , perteneciente al dominio en el que se confina el fluido (RINCÓN, 6, 2005). Este modelo es una particularización del de Navier Stokes (NS) que considera la influencia de la viscosidad en la evolución del flujo de masa y parte de la sumatoria de fuerzas sobre un volumen deformable que se mueve en el mismo sentido que el flujo másico (volumen de control) y su influencia sobre el impulso del fluido.

La descripción matemática de los estados de un flujo según el modelo NS se efectúa con un pequeño elemento de fluido fijo por el que circulan determinado número de líneas de corriente, como se ilustra en la *Figura 6*.

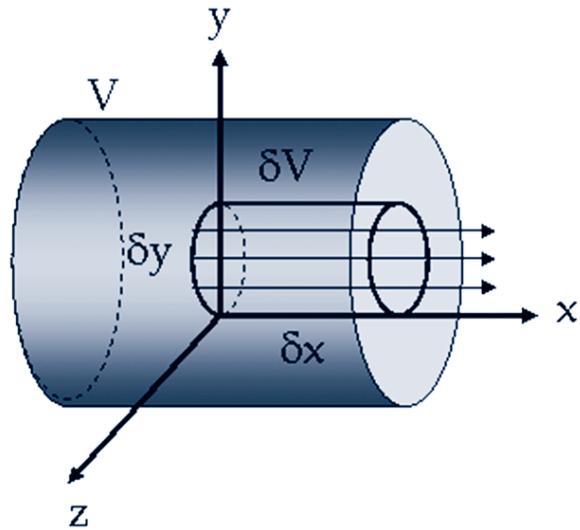


Fig. 6 Volumen de Control. Para caracterizar un fluido viscoso en movimiento se le atribuye un conjunto de líneas imaginarias continuas dirigidas en la dirección de movimiento, denominadas líneas de corriente, que sirven para dar cuenta de sus propiedades. Entonces se define el flujo como la cantidad de líneas de corriente que circulan en el tiempo (LANDAU, 7, 1986).

⁴. Para los fines del presente documento, entiéndase fluido como un medio continuo que se compone de moléculas unidas por fuerzas cohesivas débiles y toman la forma de los recipientes que los contienen.

⁵. En sistemas diferentes a los clásicos, esta descripción matemática exige además tener en consideración variables de tipo eléctrico, magnético, cuántico, entre otras.

El uso de la ley de conservación de la masa sobre el volumen de control conlleva a la ecuación⁶:

$$\left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) \right] = 0 \quad (1)$$

que se conoce como *ecuación de continuidad*. Esta ecuación expresa que la cantidad de masa fluida que entra al volumen de control es la misma que sale por él, resaltando que dicho flujo másico debe ser proporcional a la velocidad que posee el fluido en cada punto del espacio.

De acuerdo con el modelo expuesto, en un flujo real o viscoso sobre el elemento de volumen diferencial no sólo tenemos que considerar las fuerzas que se deducen de la ecuación de Euler⁷, además se consideran dos tipos de fuerzas adicionales denominadas esfuerzo normal y esfuerzo cortante (σ y τ)⁸. Así, la ecuación de movimiento de un fluido viscoso puede obtenerse sumando al flujo de impulso ideal un término que dé la transferencia de impulso viscoso en el fluido; para esto adicionamos $-\sigma_{ik}$ (LANDAU, 7, 1986) que se relaciona con los esfuerzos cortantes y normales respectivamente (Figura 7).

Con estas consideraciones y siguiendo el análisis de Musod, Young y Okiishi (8, 1999) podemos realizar la sumatoria de esfuerzos en cada cara del volumen. Como el volumen de control es deformable, es conveniente escribir la sumatoria por unidad de volumen, lo que nos lleva a las expresiones:

$$\delta F_{sx} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \delta x \delta y \delta z$$

$$\delta F_{sy} = \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \delta x \delta y \delta z$$

$$\delta F_{sz} = \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) \delta x \delta y \delta z$$

Si además consideramos las fuerzas que actúan sobre el elemento debido al peso, denominadas “intrínsecas”, se cumple que:

$$\delta \vec{F} = \delta \vec{F}_s + \delta \vec{F}_b$$

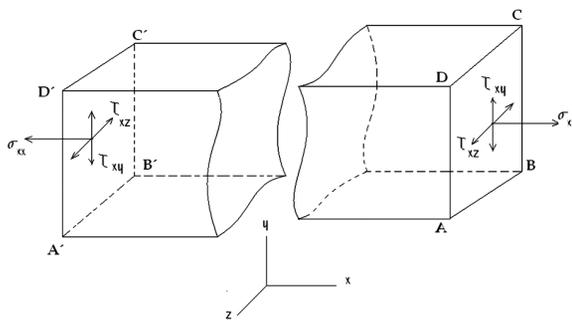


Fig. 7 Notación de doble subíndice para los esfuerzos. El primer subíndice indica la cara sobre la que se genera el esfuerzo y el segundo su dirección. Dado que el fluido tiende a distribuirse en todas las direcciones, debe existir un esfuerzo por cada dirección en el espacio. En las direcciones xz y xy el esfuerzo es cortante (debido a que es perpendicular a la dirección de flujo) y en la dirección xx el esfuerzo es normal (debido a que se dirige en la dirección de flujo, perpendicular a la superficie del volumen de control). En la figura, las líneas curvas indican que el volumen es deformable en acuerdo con la naturaleza del fluido (MUZOD, B YOUNG, D y OKIISHI, 8, 1999).

⁶ En esta expresión ρ es la densidad y $v=v(u,v,w)$ es la velocidad del flujo.

⁷ La expresión de Euler
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(p)$$

se obtiene escribiendo las componentes temporal y espacial de la velocidad e igualando la fuerza por unidad de volumen al producto de la masa por la aceleración. Dicha igualdad es posible gracias a la fuerza total que actúa sobre el volumen.

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\text{grad}(p)$$

⁸ Que son la intensidad de la fuerza por unidad de área en un punto del elemento si se especifica la orientación del área.

donde \vec{F}_s y \vec{F}_b son las fuerzas superficiales e intrínsecas respectivamente.

Escribimos los términos de las fuerzas \vec{F}_s y \vec{F}_b , además de los componentes espacial y temporal de la aceleración en la segunda Ley de Newton por unidad de volumen para obtener expresiones para x de la forma:⁹

$$\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

Como el volumen de fluido es deformable se podría pensar que hay una correspondencia entre los esfuerzos y las deformaciones, teniendo como parámetro principal la presión. Dicha relación puede ser establecida por medio de la ecuación constitutiva de los fluidos newtonianos¹⁰ que describe la evolución de los esfuerzos a medida que el volumen de fluido se deforma en el espacio con dilatación q , esto es:

$$\sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot q$$

Dado que el fluido es incompresible, la dilatación volumétrica no cambia y por tanto $\nabla \cdot q = 0$ reduciendo la expresión para la dirección x a:¹¹

$$\sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}$$

Ahora podemos aprovechar esta relación en conjunto con las ecuaciones constitutivas en las demás direcciones para simplificar las expresiones de la sumatoria de fuerzas. Es claro que en estas hay más incógnitas que ecuaciones (debido a que se incluyen esfuerzos y velocidades) por lo que simplificamos con la ecuación de continuidad para obtener en forma general:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v}$$

Estas ecuaciones se denominan ecuaciones de Navier-Stokes. Cuando son combinadas con la ecuación de conservación se tiene una descripción matemática completa del flujo viscoso. Hay cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas y , en consecuencia, el problema está bien planteado en términos matemáticos. Infortunadamente, debido a la complejidad general de las ecuaciones, no se producen soluciones matemáticas exactas salvo en unos cuantos casos, que siendo comparados con resultados experimentales concuerdan. Así, se considera que las ecuaciones de Navier-Stokes (NS) son las expresiones diferenciales de movimiento que rigen el comportamiento de fluidos viscosos (MUZOD, B YOUNG, D y OKIISHI, 8, 1999).

⁹ Para las direcciones y y z estas expresiones son respectivamente

$$\rho g_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\rho g_z + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

¹⁰ En los que la viscosidad es casi nula y constante sin importar la presión aplicada sobre él

¹¹ Para las demás direcciones las expresiones pueden escribirse como

$$\sigma_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\sigma_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

Del modelo al Oscilador de Densidad

Una vez establecidas las relaciones principales que dan cuenta de la evolución espacial y temporal de cualquier fluido viscoso, establecemos la manera en la que este modelo interpreta y explica la evolución del flujo que acontece en el Oscilador de Densidad. Dado que las ecuaciones NS no tienen solución analítica exacta, una descripción del sistema puede realizarse a partir del análisis de los flujos que acontecen en el tubo capilar. Para esto, las ecuaciones NS se expresan en términos de los parámetros del sistema; aquí resaltamos que podemos proceder de dos formas:

La primera implica suponer la geometría del capilar y escribir las ecuaciones NS en coordenadas cilíndricas. Aunque no se solucionan explícitamente, se suele recurrir a simulaciones numéricas para establecer la evolución de los flujos (OKAMURA, M y YOSHIKAW, 9, 2000). La segunda implica considerar que la longitud L del capilar es muy grande comparada con su diámetro b , permitiendo establecer una geometría rectangular para ubicarse en el flujo. Siguiendo la línea de Steinbock, Rehberg y Lange (10, 1998) escribimos las coordenadas x y y de las ecuaciones NS en un sistema de coordenadas rectangular, donde se introducen la densidad de la sal ρ_s , del agua ρ_w , la presión P , la viscosidad dinámica de la solución salina v_s , la viscosidad cinemática de la solución μ_s y un parámetro Θ^{12} , que dé cuenta de la variación de la concentración en el tiempo. En otras palabras, como no conocemos exactamente la solución de las ecuaciones, pero sí lo que cada término en ellas significa, escribiéndolas en los términos del sistema podremos dar cuenta de la forma en la que cada parámetro afecta globalmente el com-

portamiento del sistema de manera más o menos precisa. Cuando son contrapuestos los resultados experimentales con las conclusiones que se pueden generar a partir de este análisis, estos están en acuerdo. Es decir:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g + g \frac{(\rho_s - \rho_w)\Theta}{\rho_s} - \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial P}{\partial x} + v_s \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right).$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial P}{\partial y} + v_s \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

Como en el oscilador se presenta un fenómeno difusivo, este dependerá de un coeficiente D denominado *coeficiente de difusión*, que es característico de cada líquido y está relacionado con la variación de la concentración en el espacio del fluido. De esta forma, dicha relación puede escribirse como:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right)$$

Finalmente, para abarcar todos los puntos de los que se puede obtener información de la dinámica de flujos, hace falta introducir parámetros que hablen de sus características como el caudal de flujo Q , el número de Reynolds Re y otros que hagan dimensionalmente correcta la ecuación como las componentes adimensionales de la posición y la velocidad $\bar{x}, \bar{y}, \bar{u}, \bar{v}$, el parámetro adimensional de la presión y finalmente β, ϵ y α como parámetros de control que se deducen del teorema de Buckingham¹³.

¹² Un número de cero a 1 que hace referencia a la concentración en el tiempo. Un parámetro $\Theta = 1$ se conseguirá en el momento en el que la diferencia de concentraciones sea cero y un parámetro $\Theta = 0$ se conseguiría en el momento inicial del experimento.

¹³ Aquí Q es la cantidad de fluido por unidad de tiempo que circula a través del tubo capilar definida como

$$\bar{x} = \frac{x}{L}, \quad \bar{y} = \frac{y}{L}, \quad \bar{u} = \frac{ub}{Q}, \quad \bar{v} = \frac{vL}{Q} \quad \text{y} \quad \bar{P} = \frac{pb^3}{\rho_s L v_s Q},$$

son los grupos dimensionales de la posición y la velocidad. La condición de turbulencia del flujo está descrita por el número de Reynolds.

$$Re = \frac{Q}{v_s}$$

Y finalmente los parámetros de control se expresan como

$$\alpha = \frac{gb^3}{v_s Q} \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right), \quad \beta = \frac{gb^3}{v_s Q}, \quad \text{y} \quad \epsilon = \frac{b}{L}$$

Con estos parámetros, las ecuaciones NS y la condición de difusión pueden leerse como:

$$\text{Re} \varepsilon \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}} \right) = \alpha \Theta - \beta - \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{x}} + \varepsilon \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{y}^2}$$

$$\text{Re} \varepsilon^3 \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}} \right) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{y}} + \varepsilon^4 \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}^2} + \varepsilon^2 \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial \bar{y}^2}$$

$$\varepsilon \left(\bar{u} \frac{\partial \Theta}{\partial \bar{x}} + \bar{v} \frac{\partial \Theta}{\partial \bar{y}} \right) = \frac{D}{Q} \varepsilon^2 \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \bar{x}^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \bar{y}^2}$$

Una vez escritas las ecuaciones de esta forma, podemos deducir las siguientes consideraciones:

Concluimos que introducir el número de Reynolds en forma proporcional al caudal de flujo, implica que este se observará en capas definidas (flujo laminar) siempre y cuando el ancho del capilar no sea muy grande. Se puede deducir que la velocidad con la que el flujo sale del contenedor interno depende de la presión que ejercen los líquidos en su parte inferior así como de la razón entre las densidades y la longitud del capilar, siendo amortiguada por la diferencia de concentración, producto de la difusión entre los líquidos.

De esta manera, y conociendo el significado físico de cada componente de las ecuaciones NS originales, pueden ser establecidas relaciones entre los parámetros del Oscilador y el comportamiento dinámico de los flujos presentes a través del capilar.

Consistencia del modelo

Con los resultados anteriores se puede verificar que el comportamiento de los flujos depende directamente de la diferencia de presiones que son ejercidas sobre el tubo capilar, que a su vez están determinadas por las alturas de las columnas de líquido. Entonces, el estudio de la evolución de las alturas completará la comprensión de la dinámica de flujos. Damos importancia aquí a las causas que generan la variación en las columnas de líquido en los contenedores a partir de las fuerzas presentes en la totalidad del sistema, con el fin de establecer una dinámica acorde con los resultados experimentales.

En la línea de Yoshikawa (9, 2000), deducimos que la fuerza que actúa en el oscilador para causar los flujos y sus cambios debe constar de cuatro componentes:

la fuerza convectiva F_v , la fuerza correspondiente al gradiente de presiones F_{pre} , la fuerza producto de las variaciones en la viscosidad F_{vis} y la fuerza gravitatoria F_{gra} . Entonces la fuerza total por unidad de masa que actúa sobre el flujo puede ser escrita como:

$$a = F_v + F_{pre} + F_{vis} + F_{gra}$$

La fuerza convectiva causa el amortiguamiento del flujo y la fuerza del gradiente de presión es la causante de su aceleración, ambas influenciadas por el componente de la fuerza gravitatoria.

Los términos de fuerza F son proporcionales al cambio de la velocidad promedio de flujo (\bar{w}) en la dirección z excepto cuando hay cambio en él. Durante los flujos, F_v y F_{vis} son menores que cero mientras que $F_{pre} + F_{gra}$ son mayores que cero, lo que matemáticamente nos permite escribir:

$$\frac{d\bar{w}}{dt} = -k\bar{w} \quad (k > 0) \quad \{1\}$$

que explicaría el comportamiento de las alturas.

Variaciones en las columnas de líquido

Con el propósito de establecer un puente entre las variaciones de las alturas con la dinámica de flujo para el oscilador, atribuimos a $x(t)$ la altura del líquido confinado en el contenedor interno en función del tiempo (Steinbock, 10, 1998). Experimentalmente puede describirse esta altura en términos de funciones exponenciales de la forma e^{-kt} (Figura 9).

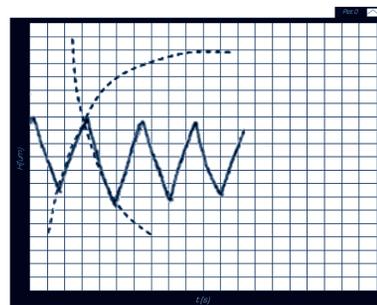


Fig. 9 Gráfica característica de altura de la columna interna vs. Tiempo. Los trazos continuos representan los hallazgos experimentales y las líneas punteadas azules corresponden a extrapolaciones exponenciales. En general, las variaciones de la altura en el contenedor interno suelen ser pequeñas, por lo que se necesitan cámaras especiales para monitorear este comportamiento.

Este comportamiento debe corresponder a la ecuación diferencial:

$$\dot{x}(t) = -kx(t) \quad k > 0.$$

Derivando esta ecuación, se puede observar que corresponde a la expresión propuesta para la evolución de las alturas dando por sentado que el problema está bien planteado en términos de fuerzas, haciendo consistente el modelo.

Otro aspecto que influye en la evolución de los estados del oscilador, está relacionado con la altura crítica a la cual ocurren las reversiones de flujo. Para Yoshikawa (9, 2000) los niveles críticos son comprendidos a partir de las áreas superficiales en los contenedores, que pueden relacionarse con las alturas de la forma:

$$S_{out} \Delta h' = -S_{in} \Delta h$$

siendo S_{in} y S_{out} las superficies de los fluidos interno y externo respectivamente y $\Delta h'$ y Δh las diferencias de altura de los líquidos externo e interno. Inicialmente el sistema se encuentra en equilibrio cuando las presiones de las dos columnas de fluido son las mismas, es decir:

$$(\rho_0^s + \rho_w) g \left(H_{in} + \frac{L}{2} + \Delta h \right) = \rho_w g \left(H_{out} + \frac{L}{2} + \Delta h' \right)$$

En la expresión, ρ_0^s y ρ_w son las densidades iniciales de la solución salina y agua respectivamente.

Ahora podemos concluir que la altura de equilibrio en el contenedor interno H_{eq}^0 en cada oscilación de flujo, es proporcional a la diferencia entre la altura inicial del contenedor interno y su diferencia de altura.

$$H_{eq}^0 = H_{in} - \Delta h$$

Debido a que la diferencia en la densidad decrece con el flujo oscilatorio, si ΔH_{eq} es la diferencia en la altura de equilibrio en las oscilaciones sucesivas, el estado de equilibrio en la n -ésima oscilación estará dado por:

$$H_{eq}(n) = H_{eq}^0 + (n-1)\Delta H_{eq}$$

que concuerda con la ecuación diferencial de las alturas en el oscilador (Ecuación 1).

Así, desde esta perspectiva dinámica, queda descrita la evolución de los flujos del oscilador, tanto en términos de fuerzas sobre el volumen de control representativo de los flujos, como en términos de las presiones y las alturas de las columnas de líquido.

La dinámica que exponemos es propuesta a la luz de un modelo macroscópico de la materia, que considera al flujo como un medio continuo donde cada elemento diferencial que lo representa es lo suficientemente grande como para contener un elevado número de moléculas. No en tanto, como fue mencionado en la descripción de su fenomenología, la variación en las alturas de los líquidos tiene relación con los potenciales que se registran. En lo que sigue, explorar la naturaleza de este potencial finalizará la discusión de esta parte.

Un comportamiento inesperado - oscilaciones en el potencial

Uno de los aspectos que hacen del oscilador un sistema interesante es que puede ser analizado desde las perspectivas macro y micro de la materia. Es así como las explicaciones anteriores sobre la dinámica de los flujos y las columnas de líquidos se basan en la comprensión a "gran escala" del sistema. Moviéndonos a los niveles micro, encontramos comportamientos que nos llevan a considerar el carácter iónico de la conductividad eléctrica en soluciones, vinculándonos con la visión atomista de la materia que explica los fenómenos electrolíticos responsables de los potenciales que pueden ser registrados.

La discusión a propósito de las razones para la obtención de potenciales se encuentra en debate hoy día por la comunidad científica, sobresaliendo dos hipótesis principales que presentamos a continuación y que se enmarcan dentro del campo explicativo de los fenómenos de transporte de iones presentes en las soluciones¹⁴. Con el fin de aportar elementos de juicio para esta discusión, desarrollamos una serie de trabajos experimentales que se detallan en el trabajo monográfico mencionado.

14. Presentamos solo algunas generalidades de las hipótesis de formación de potencial basados en las experiencias de Das y Rao en Hydrodynamical Oscillator – a simple non linear Dynamical System. National Conference on non linear Systems and Dynamics 2003

Migración de iones: potencial de unión líquida

Una primera hipótesis es considerar el potencial de unión líquida (junction potential) existente en la interfaz que une los líquidos de los contenedores. En una primera aproximación puede ser comprendida esta hipótesis si se consideran las velocidades promedio de los iones presentes en las soluciones. En soluciones electrolíticas estas velocidades difieren debido a su naturaleza química, por ejemplo, en las soluciones como el $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ los cationes tienen velocidades promedio diferentes a los aniones cuando en conjunto se mueven convectivamente en un flujo, concluyéndose que existe una correspondencia entre la velocidad del flujo y las velocidades migratorias promedio de los iones presentes.

Considerando la disolución problema NaCl con diferencia de concentraciones, se establece un fenómeno convectivo que tiende a difundirse a través de la superficie de contacto entre las soluciones. La fuerza conductora para las migraciones de iones debe ser proporcional a la diferencia de concentraciones iónicas de los componentes, haciendo que la velocidad de migración (velocidad de flujo) varíe considerablemente a través del tiempo y, en consecuencia, produzca una separación de cargas en la superficie de contacto que es lo que se registra.

Cuando hay flujo descendente (por diferencia de concentraciones, de densidades y a la acción de la gravedad) la velocidad migratoria aumenta produciendo, de manera subsiguiente, un incremento en el potencial registrado hasta un punto donde el flujo

es aproximadamente estacionario, en el cual el potencial se estabiliza. Cuando hay flujo ascendente su velocidad es reducida disminuyendo el potencial medido. En este caso el potencial no alcanza a estabilizarse gracias a los fenómenos descritos en la dinámica de las oscilaciones. El desarrollo de esta hipótesis requiere que las soluciones sean de tipo electrolítico, sin importar la ubicación de los electrodos respecto de la posición del capilar en el oscilador.

El problema de las capas: potencial de corriente

La segunda hipótesis para entender la formación del potencial, que considera el potencial de corriente "*streaming potencial*", parte de la base de que en el oscilador ocurre un proceso faradaico en el cual el potencial es producido en la interfaz electrodo-disolución. Debido al flujo convectivo, se forma en el capilar una doble capa electrónica gracias a que los elementos constitutivos de la mezcla poseen velocidades migratorias diferentes.

Cuando los líquidos fluyen de arriba hacia abajo y viceversa, la fase móvil de la doble capa es llevada con el flujo causando una separación de carga. La dirección de la separación, cuando el flujo es ascendente, sería opuesta a cuando la solución salina fluye descendientemente causando la oscilación. A diferencia de la hipótesis del potencial de unión líquida, esta hipótesis no requiere que las soluciones sean electrolíticas, solamente que sean capaces de generar una doble capa electrónica en el capilar y que el flujo sea convectivo, con la restricción de que en el contenedor externo se encuentre el compuesto menos denso.

En la búsqueda de nuevos sistemas de adquisición

Examinamos la ruta experimental seguida para el estudio de la dinámica del Oscilador de Densidad. Como ya se discutió, ésta se puede realizar a partir de la consideración de las propiedades eléctricas de las soluciones acuosas, que resultan de la movilidad de los iones que están presentes en las soluciones de electrolitos fuertes y débiles. Con esto es posible la obtención de potenciales que como producto de la inversión de los flujos en el oscilador y de los cambios en la concentración salina, son de tipo oscilatorio. Nos centraremos ahora en las consideraciones en torno a la vinculación y adecuación de instrumentación para el registro de este potencial.

Registro de potencial

El montaje experimental original que se utilizó para la inclusión de herramientas de adquisición de datos está constituido por un beaker de 2000 ml, una jeringa plástica de 60ml con agujas metálicas, electrodos, una solución en agua de NaCl y azul de metileno para hacer evidente los flujos. El primer registro que se obtiene de los potenciales oscilantes se hace al incluir en el dispositivo original un multímetro digital que captura la diferencia de potencial en los electrodos.

Este proceso hace de la adquisición de los datos un trabajo dispendioso y poco efectivo, debido a que los intervalos de variación entre los registros son demasiado cortos y el tiempo que tarda el sistema para autorregularse es del orden de días (dependiendo de la concentración de la solución). Cabe señalar que se encuentran multímetros con software incorporados, como el PROTEK 506, que solucionan de sobremanera los problemas que se señalan; sin embargo, estos multímetros son poco comunes y no en todos los laboratorios se tiene acceso a él.

El PC como equipo de adquisición

Un segundo registro que obtenemos de los potenciales se establece al reemplazar el multímetro y sus conexiones a los electrodos por un cable monofónico, blindado con las especificaciones requeridas para la conexión a la entrada de sonido del ordenador. Las diferencias de potencial se interpretan por medio de un instrumento virtual (VI) diseñado en el ambiente virtual LABVIEW¹⁵ de la National Instruments. El VI y su código fuente (Figura 9) puede descargarse vía Internet. La ejecución del programa se controla desde el panel frontal del instrumento.

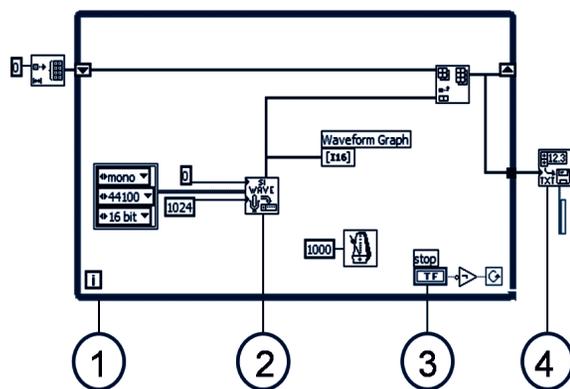


Fig. 9 Diagrama de bloques para adquisición de datos con la tarjeta de sonido del PC. 1. Estructura While para controlar la ejecución del programa. 2. Herramienta de adquisición de señal, que permite entradas estéreo o mono, la tasa de muestreo y la calidad de la señal. 3. Botón de control de ejecución. 4. Herramienta de almacenamiento de datos para formato txt o xls.

Dependiendo del tipo de análisis y de la tarjeta de sonido, hay que tener presente que no es posible realizar medidas de tensión DC y que la impedancia de entrada es baja. Esto significa que existe un límite para frecuencias bajas y que, para potenciales de orden pequeños, es necesaria una etapa de amplificación que puede ser hecha por medio de amplificadores operacionales básicos (AOB). En el caso del oscilador el rango de voltaje es del orden de los mili-Voltios, haciendo que sea complicada la adquisición por este medio. Ubicamos un AOB en línea con el dispositivo unido al PC como en la (Figura 10) con el fin de aumentar la diferencia de potencial. Los resultados para una concentración no saturada de NaCl, en un contenedor interno de 50 ml y con contenedor externo de 2L, se muestran en la (Figura 11).

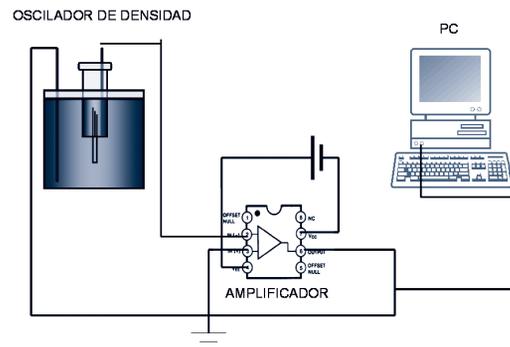


Fig. 10 Esquema del circuito amplificador empleado en la obtención de datos por medio de la tarjeta de sonido del PC. El amplificador utilizado en la práctica es un AOB tipo LM 741 configurado como Inversor; se escogió esta configuración dado que los datos obtenidos correspondían con los datos esperados.

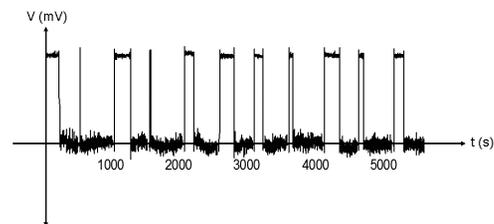


Fig. 11 Gráfica de Potencial vs. tiempo para el oscilador de Densidad. En la Gráfica se observa el perfil de la oscilación, sin embargo los valores obtenidos son afectados por el ruido de la tarjeta, lo que dificulta extraer sus valores exactos.

¹⁵. Labview es un lenguaje de programación gráfico que utiliza iconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones en donde la configuración de herramientas virtuales se hace posible de manera sencilla. Usa programación de flujo de datos y construye un tablero usuario—interfaz denominado panel frontal. Los programas de Labview se denominan Instrumentos virtuales porque su apariencia y operación imitan instrumentos físicos, como los osciloscopios y los multímetros (<http://www.ni.com>, 11, 2008). Por ser un lenguaje orientado a experimentación, las herramientas matemáticas para análisis de que el programa dispone no requieren programación codificada y, a pesar de que la comunicación usuario-interfaz es de carácter tradicional, el resultado de los estudios que en él se realizan son confiables.

Queremos mencionar aquí que un análisis exhaustivo requiere eliminar el ruido propio de la tarjeta manipulando el VI original para filtrar la señal, o ubicando un condensador en línea con el experimento. Nuestro propósito era encontrar el perfil de la oscilación por lo que los ajustes mencionados no fueron necesarios ya que, una vez conocido el perfil, podíamos hacer uso de otro dispositivo más sofisticado que nos permitiera datos con mayor tasa de muestreo, efectividad y precisión.

Los instrumentos virtuales y la tarjeta de adquisición de la National Instruments

Una de las dificultades al hacer experimentos con la tarjeta de sonido, aparte de las que se señalaron, radica en la cantidad de datos que son requeridos para llevar a cabo análisis certeros del comportamiento del Oscilador, lo cual, sumado con el hecho de que sus tiempos de relajación son demasiado extensos, se convierte en problema. Por esta razón necesitamos hacer uso de un dispositivo que facilite aún más la labor experimental, garantizando confiabilidad, una mayor impedancia para la recepción de señales y mayor adaptabilidad práctica. Dicho dispositivo se puede obtener también en el ambiente LabView.

Labview, además de proporcionar opciones para el tratamiento de datos, presenta junto con su versión estudiantil una serie de herramientas como la tarjeta de adquisición de datos PXI¹⁶. Su implementación permite un registro en simultáneo. Un estudio del oscilador puede hacerse al ubicar varios dispositivos variando el valor de sus parámetros, facilitando así la labor experimental. Se pueden realizar mediciones con tasas de muestreo desde tres hasta dos millones de muestras por segundo, haciendo de la tarjeta una herramienta de precisión de alto nivel.

En el diseño del VI pensamos en tres características especiales además de las que debe tener un instrumento de medición: la generación automática de los archivos de datos en diferentes formatos, una conexión a red para el control y ejecución de la

aplicación desde una ubicación remota (control remoto) y, finalmente, la facilidad de compartir entre usuarios los datos de un mismo experimento sin necesidad de acudir a otras aplicaciones, salvo las que estén incluidas dentro del mismo instrumento.

El VI diseñado satisface las expectativas anteriores ya que en su panel frontal (Figura 12) incorpora elementos clásicos de la adquisición en conjunto con herramientas para compartir datos; dicha característica se realiza teniendo como entrada la dirección IP de los computadores con los que se quiere compartir la información, permitiendo a los usuarios visualizar los datos sin manipular la ejecución.

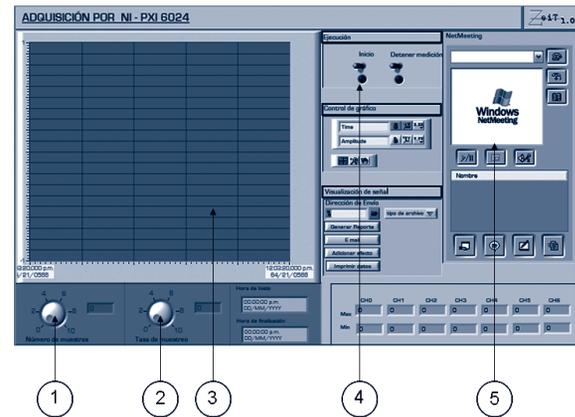


Fig. 12 Vista del Panel Frontal del Instrumento Virtual. El panel frontal del VI posee dos entradas para la adquisición de señales aplicables a siete canales independientes: 1. entrada de Número de muestras. 2. entrada de Tasa de muestreo. 3. Gráfica central de visualización de señal. 4. Botón “Iniciar medición”, con este se inicia la adquisición de datos. 5. Aplicación “NetMeeting” para facilitar la visualización de las señales a otros usuarios.

Adicionalmente, se incorporaron dos herramientas al VI; la primera permite la generación automática de reportes en diferentes formatos como el *txt* para bloc de notas, el *xls* para Excel y el *html* para generación de reportes web; y la segunda, que permite la conexión a Internet de la aplicación por medio de los protocolos *smtp* y *pop*. Estos a su vez permiten al VI, después de terminar el muestreo, generar el reporte html y enviarlo a una dirección de correo electrónico.

¹⁶ Técnicamente, se puede mencionar que la tarjeta tiene impedancia alta, a diferencia de la tarjeta de sonido; y proporciona diferentes rangos de medida de potencial reales, simplificando la labor de calibración. No obstante, Labview no es un software de libre licencia, razón por la cual, su consecución es limitada y la tarjeta de adquisición es de un elevado costo.

co que el usuario ha identificado como contenedor. Además, desde un equipo remoto se puede controlar la ejecución del VI, utilizando el *Web Browser* de LabVIEW, que inserta al VI dentro de una página de Internet, como objeto *ActiveX*.

Antes de la ejecución del VI, se realizó una prueba piloto para comprobar la efectividad de los canales y los posibles problemas que tuvieran en la implementación del oscilador. A diferencia de la tarjeta de sonido, las terminales de los electrodos fueron conectadas de forma directa a la tarjeta CB 68 LP, obteniéndose el perfil que se detalla en la *Figura 13*.

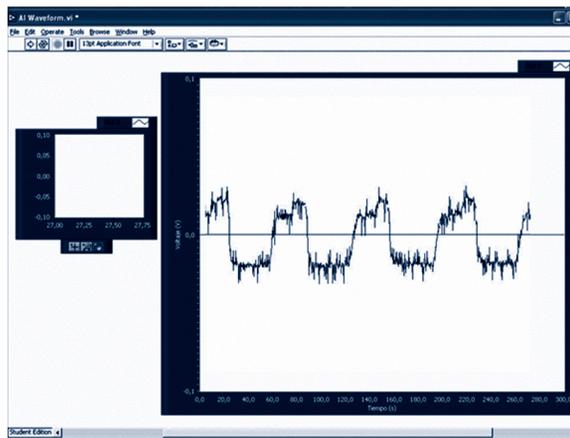


Fig. 13 Instrumento virtual (VI) piloto en LabVIEW 6.0. En el panel izquierdo se registran los pulsos de voltaje en tiempo real obtenidos de manera directa desde el dispositivo. El panel derecho presenta la gráfica de potencial contra tiempo del Oscilador en un intervalo de 270 segundos.

Pensando en la necesidad de aportar elementos de juicio para entender de manera holística el comportamiento del Oscilador de Densidad, se prepararon dos experimentos principales, utilizando cuatro muestras con soluciones acuosas de $NaCl$, KCl , Na_2SO_3 y Na_2SO_4 ; con azul de metileno, para hacer evidentes los flujos. La longitud del capilar se mantuvo constante en 7,0 cm. y la altura externa en 15 cm. en un beaker de 800ml. Las señales de potencial fueron registradas por la tarjeta PXI 6024 de la National Instruments e interpretadas por medio del software diseñado. La tasa de muestreo para la medición se mantuvo constante en cuatro muestras por segundo y el montaje experimental se detalla en la *Figura 14*.

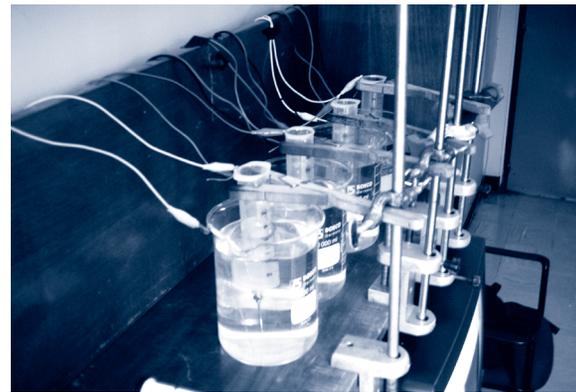


Fig. 14 Adecuación del Oscilador de Densidad para la conexión de cuatro de los canales de la tarjeta. En la figura se observan cuatro osciladores, con soluciones acuosas diferentes, que son conectados en línea a la tarjeta PXI. La conexión es establecida por medio de la tarjeta CB 68 LP de National Instruments.

Consideraciones finales

En una exploración detallada del sistema Oscilador de Densidad se encuentra un fenómeno interesante que vincula dos campos de la física, que por lo general se desarrollan de manera independiente: la dinámica de fluidos y la física ondulatoria. Estos se complementan para lograr una explicación del sistema, pues para dar cuenta de las oscilaciones de flujo que ocurren y la manera como se presenta su amortiguamiento, se hace necesario conocer teorías relacionadas con la mecánica de fluidos en la que se involucran conceptos de presión y densidad en conjunto con el principio de Pascal y el modelo

de los fluidos estáticos y dinámicos. Para atribuir un significado a los potenciales electroquímicos asociados a las oscilaciones de flujo, la concepción anterior se queda corta en cierto sentido, lo que pone de manifiesto que su estudio debe ser abordado no sólo desde el punto de vista de los modelos macroscópicos de los fluidos, sino también desde la visión atomista de la materia que permite explicar los fenómenos electrolíticos responsables de los potenciales eléctricos registrados.

Otro aspecto a destacar es la existencia de una di-

versidad de sistemas de medición de voltaje que se pueden emplear para realizar trabajos con el Oscilador de Densidad, dependiendo de las necesidades e intenciones que se proyectan para cada una de ellos. LabVIEW provee un sistema de control y automatización eficiente y con alto grado de confiabilidad, además de permitir el tratamiento de los datos, visualización de gráficos, generación de reportes en diferentes formatos y el control de la ejecución desde ubicaciones remotas, facilitando la labor experimental y permitiendo al investigador centrarse en el análisis del fenómeno.

Dadas las complicaciones experimentales al realizar un estudio sistemático de la influencia de los parámetros del Oscilador, nos centramos en la utilización de la tar-

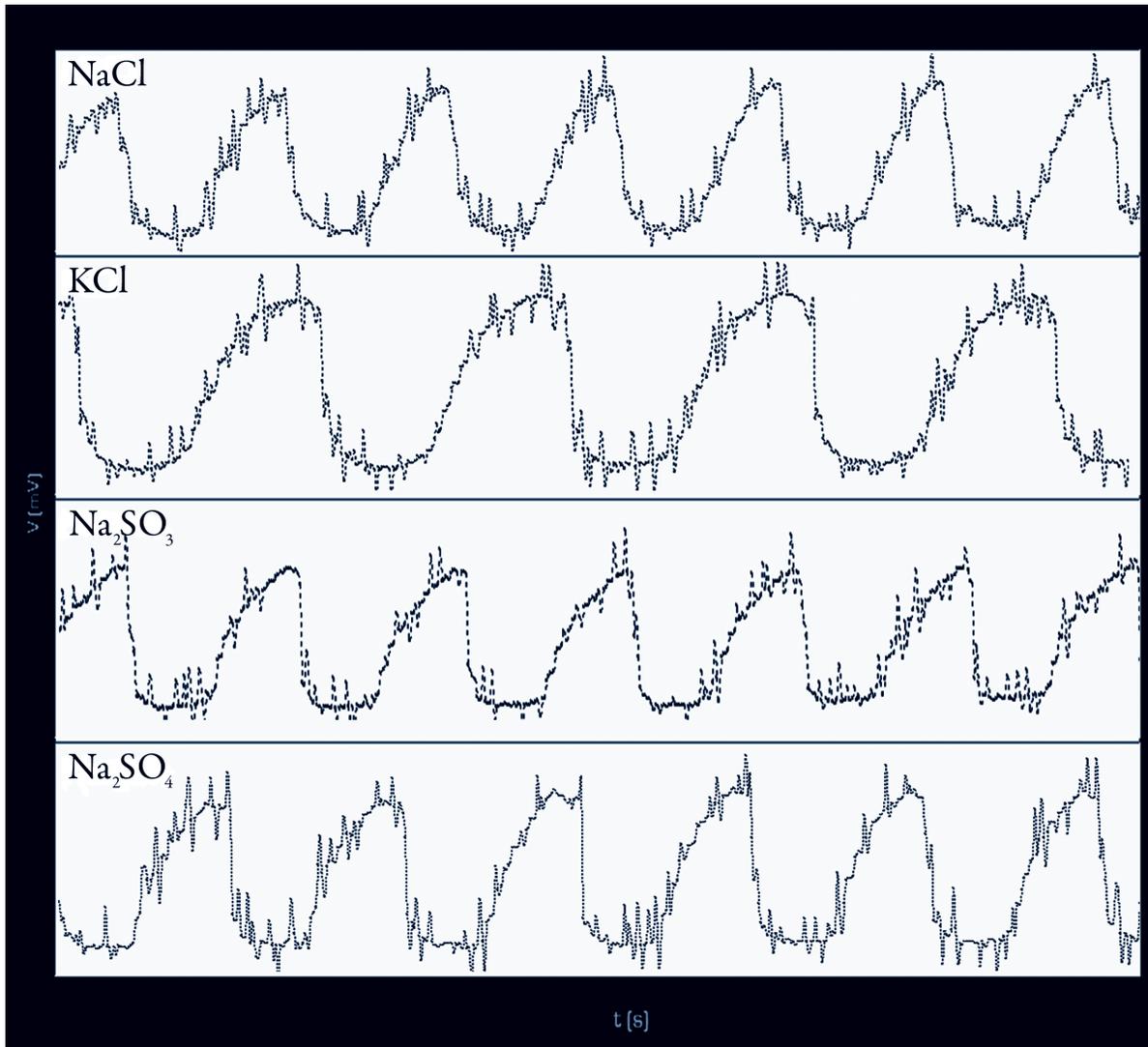
jeta de adquisición PXI 6024 con su tarjeta de conexión *CB 68 LP* del departamento de Física de la Universidad Pedagógica Nacional, con el fin de abrir un espacio para la utilización regular de este potente sistema de adquisición en diversos estudios experimentales.

El principal objetivo de este documento es presentar al lector un sistema diferente en cierto sentido, para que encuentre las relaciones con sistemas físicos más generales y de implicación directa con problemas actuales de la ciencia. Es sólo un principio y, en una profunda búsqueda, se encontrarán sistemas similares en los que también puede hacerse uso del análisis que presentamos y otros, que se convierten en una parte valiosa de la construcción de conocimiento rico y eficaz de la Física.

Referencias

- [1] CUDMANI, SALINAS, y PESA (1991). Modelo y realidad, Taller desarrollado durante la VII Reunión Nacional de Educación en Física. Argentina.
- [2] Futuros Docentes y Futuros Investigadores se Expresan sobre el Modelado en Física, disponible en http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-47442001000300010, febrero de 2008.
- [3] LUQUE, Marín. El Lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6.000 años (2003) Tesis de doctorado en ciencias geológicas, Barcelona
- [4] Thermohaline Circulation. Disponible en http://en.wikipedia.org/wiki/Thermohaline_circulation, febrero de 2008.
- [5] CAMPOS, D. Prolegómenos a los sistemas dinámicos (2002) Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [6] RINCÓN, N y FAJARDO F. Estudio de un oscilador de densidad mediante medidas de potencial eléctrico (2005) Tesis Pregrado, Universidad Nacional de Colombia.
- [7] LANDAU, L y LIFSHITZ, Mecánica de Fluidos, Curso de Física Teórica (1986), Editorial Reverté, Barcelona.
- [8] MUZOD, B YOUNG, D y OKIISHI, T. Fundamentos de Mecánica de Fluidos (1999) Editorial Limusa, México.
- [9] OKAMURA, M y YOSHIKAW, K. Rhythm in a saline oscillator (2000) Physical Review Letters, Volumen 61, Número 3.
- [10] STEINBOCK, O LANGE y REHBERG. Density oscillator: analysis of flow dynamics and stability (1998), Physical Review Letters, Volumen 81, número 4.
- [11] Tutorial Labview [Online], Disponible en <http://www.ni.com>, diciembre de 2006.

Gráficas de potencial tiempo para diferentes soluciones acuosas



Gráficas de potencial vs. tiempo para diferentes soluciones electrolíticas (NaCl, KCl, Na₂SO₃ y Na₂SO₄). La escala de tiempo está graduada en intervalos de 0,25 segundos y se muestran 500 puntos. En las gráficas se observan las diferencias en los períodos de oscilación para los cuatro compuestos, el eje y fue alterado para observar las diferencias en la amplitud y el perfil de las gráficas para cada solución.

Sobre los Autores

Yedisson Melo y Wilson Javier Álvarez, son licenciados en Física de la Universidad Pedagógica Nacional y pertenecieron a la línea de profundización El Computador y las Prácticas Experimentales en la Enseñanza de la Física. Sus áreas de trabajo han estado relacionadas con la dinámica de fluidos, su influencia en los modelos climáticos y la experimentación con ambientes virtuales. Participaron como ponentes en el IV Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria en Cuba, 2007, con el trabajo titulado Incorporación de Instrumentación virtual en el estudio experimental del Oscilador de Densidad, evento organizado por la Sociedad Cubana de Física, la Universidad de La Habana y la Universidad Nacional de Educación a Distancia UNED de España. Participaron como autores en el VI Encuentro de investigadores en enseñanza de las ciencias en Florianópolis, SC, Brasil, 2007, con la ponencia titulada "O trabalho prático como rota alternativa para a aprendizagem dos conceitos de pressão e densidade: o caso do Oscilador de Densidade", evento organizado por el ABRAPEC. Participaron del V encuentro iberoamericano de redes de maestros e investigadores que hacen investigación desde la escuela. Fueron estudiantes de intercambio educativo como parte del convenio institucional entre la Universidad Pedagógica Nacional y el Centro Universitario UNIVATES en la ciudad de Lajeado, Brasil, donde se vincularon como Estagiários de Pesquisa en el grupo de investigación de Formación de Profesores, en el proyecto Concepciones didácticas de futuros profesores, interdisciplinariedad e investigación en la enseñanza de las ciencias exactas. Actualmente se desempeñan como docentes en el sector privado.

www.pedagogica.edu.co