

# Proyecciones

Volumen 12  
Número 1  
Octubre, 2014

Publicación de la Facultad Regional Buenos Aires

Rector

*Ing. Héctor C. Brotto*

Vice - Rector

*Ing. Carlos E. Fantini*

Decano

*Ing. Guillermo Oliveto*

Director

*Lic. Juan Miguel Languasco, Facultad Regional Buenos Aires*

Comité Editorial

*Lic. Gladys Esperanza, Facultad Regional Buenos Aires*

*Dr. Fernando Gache, Facultad Regional Buenos Aires*

Diseño y Diagramación

*Marcela Laura Ferritto, Facultad Regional Buenos Aires*

ISSN 1667-8400  
(Versión impresa)

ISSN 1853-6352  
(Versión en línea)

Registro de la  
Propiedad  
Intelectual  
No 5086253  
(Versión impresa)

Registro de la  
Propiedad  
Intelectual  
No. 5073167  
(Versión en línea)

Propietario

*Facultad Regional Buenos Aires  
Medrano 951 (C1179AAQ)  
Buenos Aires, República Argentina*



**UTN.BA**

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



# Proyecciones

Volumen 11

Número 2

Abril, 2014

Publicación de la Facultad Regional Buenos Aires

## Consejo Editorial

*Dr. Julio Cabero Almenara - Universidad de Sevilla, España*

*Dr. Ricardo Armentano Feijoo - Universidad Tecnológica Nacional/  
Universidad Favaloro, Argentina*

*Dr. Daniel Bia Santana - Universidad de la República, Uruguay*

*Dra. Zulma Cataldi - Universidad Tecnológica Nacional, Argentina*

*Dra. María Cristina Donnamaría - Universidad Nacional de La Plata -  
CONICET, Argentina*

*Dr. Miguel Ángel Laborde, Universidad de Buenos Aires, CONICET,  
Argentina*

*Dr. Walter Edgardo Legnani - Universidad Tecnológica Nacional,  
Argentina*

*Dr. Mario Gerardo Piattini Velthuis - Universidad de Castilla -  
La Mancha, España*

*Dr. Eduardo Jaime Quel - Universidad Tecnológica Nacional -  
CITEDEF, Argentina*

*Dra. Cecilia Verónica Sanz - Universidad Nacional de La Plata,  
Argentina*

*Dr. Saverio Roberto Strangis - Cyclotop, Houston, Texas,  
Estados Unidos*

*Dra. Lurdes Marlene Seide Froemming - Universidade Regional do  
Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil*

*M.Sc. Ignacio Vélez Pareja - Pontificia Universidad Javeriana,  
Colombia*



**UTN.BA**

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

# *Proyecciones*

Publicación de la Facultad Regional Buenos Aires

Proyecciones es una publicación semestral, destinada a la difusión de trabajos originales de investigación en el campo de la ingeniería, en todas sus ramas, de su enseñanza y de las ciencias conexas. Asimismo se publican trabajos originados en las tesis desarrolladas en el ámbito de las carreras de posgrado que se dictan en la Facultad Regional Buenos Aires Eventualmente son aceptadas también obras de revisión en temas específicos.

Todos los trabajos recibidos son objeto de revisión por parte de evaluadores externos, árbitros, y del Comité Editorial, según la metodología descrita en las Instrucciones para la Presentación de Artículos.

Esta publicación cuenta también con una versión en línea, a la cual se puede acceder ingresando en el sitio [www.sectip.frba.utn.edu.ar/proyecciones](http://www.sectip.frba.utn.edu.ar/proyecciones).

La información contenida en los artículos, así como las opiniones y los juicios vertidos, reflejan la creación y el pensamiento de los autores y no constituyen toma de posición o expresión por parte del Comité Editorial o de la Facultad Regional Buenos Aires.

Se permite la reproducción total o parcial de los artículos publicados en Proyecciones, con expresa mención de la fuente y autorización de la Dirección.

## INDICE

- 7**    **Editorial**
- 9**    **Presentación**
- 11**    **Desarrollo básico de algoritmos, hardware y electrónica de control en la Nariz electrónica Patagonia**  
Juan Vorobioff, Carlos Alberto Rinaldi, Norberto Boggio
- 27**    **Interferometría absoluta con diodos láser por barrido en banda base**  
José Luis Puliafito, Gabriel Antonietti, Carlos Mario Puliafito
- 43**    **Modelo elemental de flujo de un fluido viscoso elástico. El glaciar Bahía del Diablo. Parte II**  
Néstor O. Rotstein, Sebastián Marinsek, Mohamed J. Ríos
- 57**    **Propiedades reológicas de la pulpa de kiwi (Actinidia chinensis): comportamiento de Flujo**  
Reynaldo J. Silva Paz, María Lucía Pollio, Andrés Márquez, Patricia A. Della Rocca
- 67**    **Desarrollo y validación de metodología para minimizar la incertidumbre de los calibradores en determinaciones por HPLC en muestras biológicas**  
Jose Luis Delmonte
- 87**    **Reconocimiento automático de objetos y caracteres en una baraja francesa**  
Walter Sebastián Masi, Santiago Germán Silvestre, Alfredo Nicolás Campos
- 97**    **Descripción del dispositivo de aprovechamiento de la energía undimotriz. Parte II**  
Mario Pelissero, Pablo Alejandro Haim, Roberto Tula, Francisco Galia y Federico Muiño



# Editorial

Estimados lectores de *Proyecciones*,

Para mí es siempre un gusto saludarlos. Y siento una enorme satisfacción al escribir estas palabras, ya que inauguran un número más de la revista científica de la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional. Esto quiere decir que la revista se consolida, que avanzamos, y que número a número tenemos mejoras.

Hemos comenzado este año 2014 con una excelente noticia: firmamos un convenio específico con el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Con la asistencia del CONICET vamos a crear una Unidad de Investigación y Desarrollo de las Ingenierías en nuestra Facultad. Dentro de esta Unidad se realizará un Programa de Radicación y Formación de investigadores para el fomento de la investigación, el desarrollo y la transferencia tecnológica. Este trabajo apunta a la consolidación de los grupos de investigación ya establecidos y a la conformación de nuevos grupos a integrar en el mencionado Centro, vinculados a las siguientes áreas temáticas de investigación, desarrollo y transferencia: Modelado, Simulación y Control de Procesos, Biotecnología, Energías renovables y Tecnología de la Energía.

Esta novedad también es una muy buena noticia para *Proyecciones*, ya que este acuerdo permitirá ampliar la recepción de artículos que en ella se publican. Por otra parte, tener una revista científica como ésta nos facilitó el acuerdo, ya que es una evidencia de que la ciencia y la tecnología son una prioridad para nuestra Facultad.

Los resultados de nuestros esfuerzos nos enorgullecen y nos impulsan a alcanzar nuevos horizontes. Estos logros se alcanzan con trabajo. Con el trabajo de personas concretas. Quiero, una vez más, agradecer y felicitar a los autores publicados en este número. También me gustaría reconocer la labor del Consejo Editorial, cuya integración nos enorgullece. Finalmente, mi felicitación y reconocimiento al Director y al Comité Editorial de *Proyecciones*, cuyo esfuerzo da tan buenos frutos.

Esperamos lo mejor, pidan de nosotros la excelencia.



# Presentación

Estamos muy satisfechos con la presentación de este nuevo número de *Proyecciones*. Es el inaugural de su doceavo año de vida. Un proyecto institucional sostenido en el tiempo, y que nos enorgullece.

El primer trabajo de este número corresponde a la tesis “Desarrollo básico de algoritmos, hardware y electrónica de control en la nariz electrónica Patagonia” elaborado por Juan Vorovioff, para acceder al grado de Doctor en Ingeniería, y fue dirigida por Carlos Alberto Rinaldi y co-dirigida por Norberto Boggio. En el artículo se destaca el desarrollo de una nariz electrónica, instrumento que puede oler y que es capaz de realizar análisis cualitativos y/o cuantitativos de una mezcla de gases, vapores y olores. Puede reconocer compuestos volátiles pertenecientes a explosivos que el olfato humano no puede distinguir. Para su logro se utilizaron herramientas como Transformada Onditas, Análisis de Componentes Principales, Análisis discriminatorios lineales y cuadráticos, Redes neuronales y análisis de las constantes de desorción de los compuestos. Interesante, ¿no les parece?

El siguiente trabajo fue escrito por José Luis Puliafito, Gabriel Antonietti y Carlos Mario Puliafito. Se titula “Interferometría absoluta con diodos láser por barrido en banda base”. En sus páginas se presentan los fundamentos de un método alternativo de interferometría absoluta con diodos láser, por modulación directa de la intensidad del haz láser. Este método se caracteriza por no requerir múltiples fuentes o diodos láser especiales sintonizables, lo cual determina un impacto positivo en la reducción de la complejidad y el costo del instrumento. Además, permite obtener discriminaciones en una amplia gama de órdenes de magnitud, sin eliminar por ello la posibilidad de realizar interferometría clásica en el orden submicrométrico.

En esta segunda parte del trabajo de Néstor Rotstein y sus coautores, Sebastián Marinsek y Mohamed J. Ríos profundizan el perfil de velocidad de avance de un glaciar, a partir del conocer la forma matemática del lecho rocoso. El artículo “Modelo elemental de flujo de un fluido viscoso elástico. El glaciar Bahía del Diablo. Parte II” muestra el comportamiento de la dinámica propia de un glaciar y fue realizado por medio de una aproximación a primer orden suponiendo conocida la forma matemática del perfil transversal del lecho. Cabe destacar que la diferencia fundamental respecto del tratamiento estándar que se aplica en estos casos, se basa en que, el perfil del lecho ha sido registrado in situ. Los resultados obtenidos fueron aplicados al glaciar Bahía del Diablo, isla Vega, Antártida Argentina.

El siguiente es un estudio que, tanto por sus aspectos experimentales como por el enfoque teórico, permite caracterizar el comportamiento reológico de la pulpa de kiwi. Este conoci-

miento que se registra en “Propiedades reológicas de la pulpa de kiwi (*Actinidia Chinensis*): comportamiento de flujo” y cuyos autores son Reynaldo Silva Paz, María Lucía Pollio, Andrés L. Márquez y Patricia Della Rocca, es relevante para la industria alimenticia. Los autores realizaron la determinación cuantitativa de la viscosidad aparente y del índice de consistencia de dicha pulpa, analizando el efecto sobre el flujo de la temperatura y de la concentración de sólidos solubles. Luego aplicaron diferentes modelos matemáticos a los datos experimentales a fin de obtener los coeficientes que mejor representan dichos datos, discutiendo los resultados de cada modelo.

El siguiente artículo se titula “Desarrollo y validación de metodología para minimizar la incertidumbre de los calibradores en determinaciones por HPLC en muestras biológicas”, su autor es José Luis Delmonte y resume la tesis de igual nombre presentada por el autor para acceder al grado de Magister en Ingeniería en Calidad dirigida por Claudia C. García Bonelli y codirigida por Omar H. Garonis. En él se destacan varios aspectos, por un lado la necesidad de contar con tecnologías analíticas que permitan la evaluación farmacocinética de las nuevas drogas usadas como medicamentos. Por otra parte, se muestran procedimientos concretos para estimar y minimizar la incertidumbre en la calibración de soluciones patrón utilizadas en HPLC. Así como procedimientos para la determinación de la incertidumbre total del método analítico aplicado a distintos fármacos.

A continuación se presenta el trabajo “Reconocimiento automático de objetos y caracteres en una baraja francesa” escrito por Walter Sebastián Masi, Santiago Germán Silvestre y Alfredo Nicolás Campos. El reconocimiento de objetos y caracteres es una tarea básica en la actividad humana. Actualmente existen varias metodologías para el reconocimiento de objetos y caracteres. Sin embargo, ninguna presenta una respuesta que abarque todos los casos posibles. En este trabajo se decidió desarrollar e implementar algoritmos de transformada de Hough, simetría geométrica, correlación espacial contra patrones, detección de color y conteo de elementos, para la determinación del valor y el palo de los naipes de baraja francesa.

El último trabajo corresponde a una Nota técnica elaborada por Mario Pelissero, Pablo Alejandro Haim, Roberto Tula, Francisco Galia, Federico Muiño y un vasto equipo. Titulada “Descripción del dispositivo de aprovechamiento de la energía undimotriz”, se trata de la segunda parte de la nota presentada en la Revista *+*, Vol. 9 No. 2, Octubre de 2011. En el trabajo se describe el funcionamiento de un dispositivo para el aprovechamiento de la energía undimotriz cuyo objetivo es transformar la energía de las ondas marinas en fluido eléctrico. El trabajo se realizó en un prototipo en escala 1:20 construido por el grupo de Mecánica dentro del Proyecto Aprovechamiento de la Energía Undimotriz de la UTNBA. El dispositivo fue patentado a través del Instituto Nacional de Propiedad Industrial (INPI), y publicado en el Boletín Oficial del INPI en Febrero del 2013.

Esperamos que estos artículos les resulten interesantes.

# Desarrollo básico de algoritmos, hardware y electrónica de control en la Nariz electrónica Patagonia<sup>1</sup>

**Juan Vorobioff<sup>1</sup> , Carlos Alberto Rinaldi<sup>2</sup>, Norberto Boggio<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires / Comisión Nacional de Energía Atómica. Av. Gral Paz 1499 - San Martín (1650) Pcia. de Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> Carrera del Investigador CONICET, Av.Rivadavia 1917 (1033) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

*vorobioff@cnea.gov.ar*

*Recibido el 8 de Octubre de 2013, aprobado el 16 de Noviembre de 2013*

## Resumen

Se desarrolló una nariz electrónica (NE) con algoritmos de procesamiento y hardware completo. Este nuevo instrumento denominado "Patagonia" permitió identificar olores. Mediante métodos analíticos y criterios propios de adquisición y análisis de señales, se implementaron algoritmos de reconocimiento de muestras. Se utilizó Transformada Onditas, Análisis de Componentes Principales, Análisis discriminarios lineales y cuadráticos, Redes neuronales y análisis de las constantes de desorción de los compuestos. Se desarrolló un software con interfaz de usuario simple para poder proveer narices electrónicas comerciales. Se midieron distintas muestras de café, aceites y jugos entre otros alimentos. Se discriminaron correctamente las muestras obteniendo resultados satisfactorios.

**PALABRAS CLAVE:** NARIZ ELECTRÓNICA - ARREGLO DE SENSORES - RECONOCIMIENTO DE PATRONES - EXTRACCIÓN DE PARÁMETROS - CLASIFICADORES

## Abstract

An electronic nose (EN) with data processing algorithms and complete hardware was developed. This new instrument called "Patagonia" enables to identify odors. Sample recognition algorithms using self-developed analytical methods and criteria of signal acquisition and analysis were implemented. Wavelet transform, principal component analysis, linear and quadratic discriminate analysis, neural networks and analysis of the constants of desorption of compounds were used. Software with a simple user interface to provide commercial electronic noses was developed. Different types of coffee, oils and juices from other foods were measured. Samples were correctly discriminated and satisfactory results were obtained.

**KEYWORDS:** ELECTRONIC NOSE - SENSORS ARRAY - PATTERN RECOGNITION - PARAMETER EXTRACTION - CLASSIFIERS

<sup>1</sup> El presente artículo forma parte del trabajo de tesis "Detección de olores mediante una nariz electrónica: Desarrollo de electrónica y algoritmos para la caracterización de la calidad organoléptica de pescado y alimentos" para optar al grado de Doctor en ingeniería, mención procesamiento de señales e imágenes de la Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional, dirigida por Carlos Rinaldi y codirigida por Norberto Boggio.

## Introducción

### Reseña histórica

Dodd y Persaud, en el año 1982 en la Universidad de Warwick, introducen la idea de Nariz Electrónica (NE) como un dispositivo que simula la distinción de olores de un sistema olfatométrico mamífero (Gardner, 1993).

Las narices dependen de los sensores de gas y estos sensores se desarrollaron hace más de 40 años. A comienzos de 1990 se tienen los primeros instrumentos comerciales con el término de "narices electrónicas" o "narices artificiales", utilizados principalmente en la industria alimenticia. Gardner y Barlett definen el término de nariz electrónica como: "un instrumento que comprende un arreglo de sensores químicos-electrónicos parcialmente específicos y un sistema de reconocimiento de patrones apropiado, capaz de reconocer vapores simples y compuestos" (Gardner, 1993).

En la actualidad, no se puede comparar directamente una NE con un receptor biológico. Los sensores que componen la NE no son sensibles a ciertos compuestos, pero sí pueden distinguir compuestos que el sistema biológico no puede. Por ejemplo, las NE pueden reconocer compuestos volátiles pertenecientes a explosivos, mientras que el olfato humano no puede distinguir estos compuestos. También se utilizan otras tecnologías como Cromatografía de gases (CG), Espectrometría de Masas (MS), Espectroscopía Infrarroja (IR), Espectrometría de Movilidad Iónica (IMS),

que pueden realizar este tipo de análisis, pero su complejidad es bien conocida.

En el análisis de datos provenientes de NE se utilizan distintos métodos, estos se pueden separar en métodos estadísticos y técnicas de inteligencia artificial, que incluyen redes neuronales y lógica difusa. Lamentablemente no existen los pasos a seguir para determinar cuál es la estrategia más apropiada (Rock, 2008).

### ¿Qué es una nariz electrónica?

Una Nariz Electrónica es un instrumento que puede oler, es decir, es capaz de realizar análisis cualitativos y/o cuantitativos de una mezcla de gases, vapores y olores. Es un instrumento de olfato artificial que permite distinguir y reconocer aromas utilizando sensores de gas. Un dispositivo de este tipo tiene al menos cuatro partes con diferentes funciones: 1) realiza el muestreo y la adecuación de la mezcla gaseosa, 2) el arreglo de sensores de gas hace la detección, 3) la electrónica de control se dedica a la gestión del arreglo de sensores y adecuación de la señal, y 4) finalmente, la computadora, con algoritmos adecuados de clasificación de patrones, extrae los rasgos característicos o "huellas" de cada aroma y presenta los resultados al usuario mediante una interfaz apropiada. En la Figura 1 se muestra un diagrama en bloques de una NE.

En la práctica, el proceso de identificación durante el muestreo del olor comprende tres etapas: la primera es de limpieza de la cámara

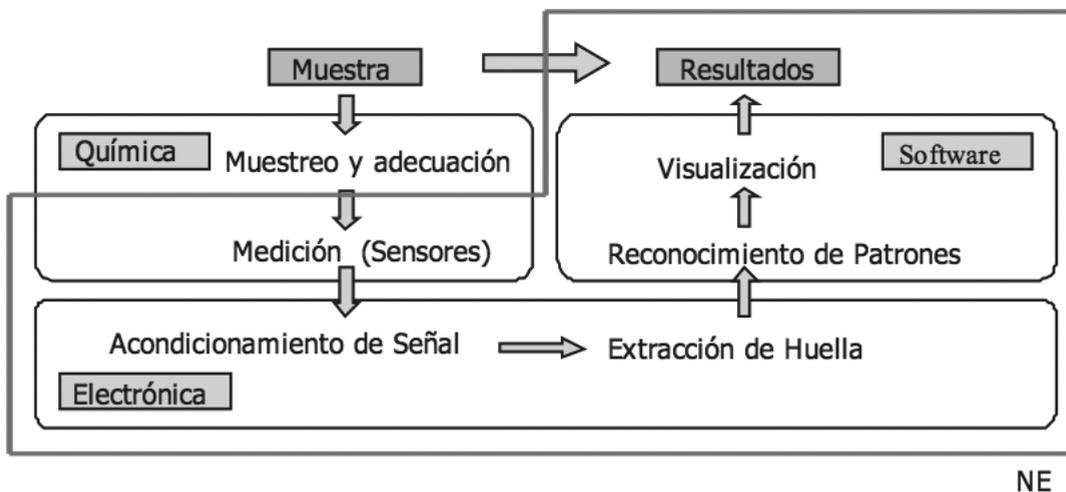


Fig. 1. Diagrama en bloques de NE

de medición y sensores mediante purgas realizadas con "aire limpio", para barrer las moléculas de mediciones anteriores. La segunda etapa es la toma de la muestra, en la que se reciben en la cámara cantidades controladas de "aire con olor" exponiendo los sensores al mismo. Finalmente, la tercera etapa, comprende una segunda purga de la cámara y de los sensores con "aire limpio" previo a la próxima toma de muestras. Es necesaria la estabilización térmica de la muestra y de la cámara en todas estas etapas. Debido a que la humedad afecta tanto la medición como la muestra misma, solo se deben comparar resultados tomados en condiciones iguales de humedad y temperatura. Esto hace necesario establecer protocolos de medición adecuados.

### Sensores de Gas

A continuación se listan los nombres de referencia de los sensores de gas más utilizados en la actualidad, Pearce (2003):

- MOS: Metal óxido semiconductor.
- QCM: Cristal de cuarzo micro balanceado.
- SAW: Ondas acústicas superficiales.
- MOSFET: Transistor de efecto de campo, metal óxido semiconductor.
- CP: Polímeros semiconductores.
- OS: Sensores ópticos

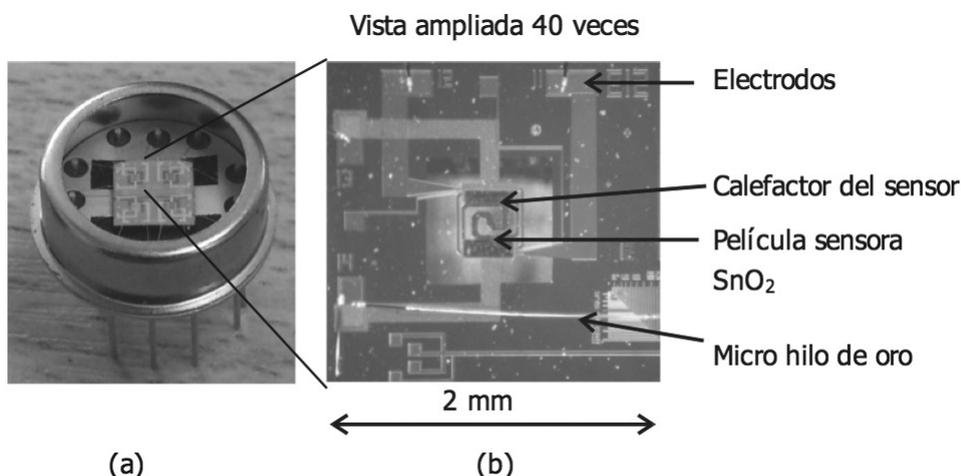
En este trabajo, se utilizaron los sensores de gas MOS de SnO<sub>2</sub> (Pearce, 2003). A continuación se detalla su funcionamiento.

En la Figura 2 (a) se ilustra el conjunto de

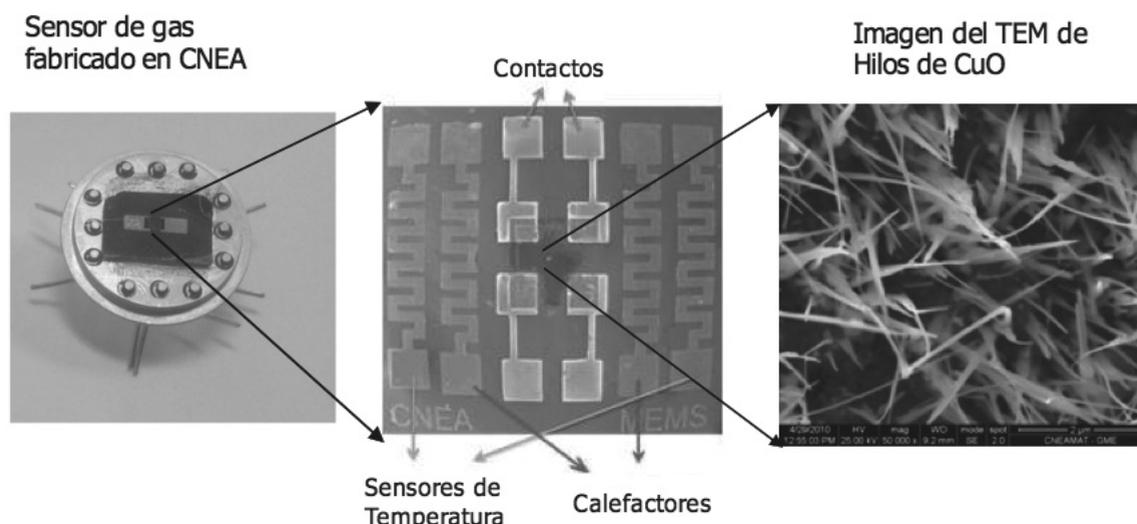
sensores de gas MOS con película delgada de dióxido de estaño (SnO<sub>2</sub>), fabricado en el instituto CNR de Bologna, Italia. Internamente se observa una oblea cuadrada de 6 milímetros de ancho con cuatro sensores. En la Figura 2 (b) se muestra la vista ampliada de un sensor. Cada uno de los sensores tiene 2 milímetros de ancho; debido a su tamaño reducido es un dispositivo MEMS (sistemas micro electromecánicos). Sobre un sustrato micro fabricado en silicio cristalino se deposita una placa que soporta el micro-calefactor de platino y sus contactos eléctricos. Una placa dieléctrica lo separa de la película sensora, depositada sobre el mismo. La película activa de dióxido de estaño nanoestructurada mide alrededor de 80 micrones. Los sensores MOS están formados por una película delgada de material policristalino semiconductor, típicamente dióxido de estaño. También se suelen incorporar impurezas como platino (Pt) o paladio (Pd), para obtener mejor selectividad ante determinados gases (Pearce, 2003; Chen, 2006). Para favorecer el proceso de conducción y obtener mejores respuestas del sensor, las películas necesitan ser calentadas localmente a temperaturas que oscilan entre 250°C y 600°C, dependiendo del sensor utilizado (Pearce, 2003). Esto se realiza con dispositivos calefactores y electrónica adecuada.

Las películas delgadas de SnO<sub>2</sub> se suelen depositar sobre una membrana que, a su vez, se coloca sobre un soporte de silicio.

Las propiedades de los sensores MOS dependen fuertemente de las siguientes variables:



**Fig. 2. Conjunto de sensores de gas italianos tipo MOS de SnO<sub>2</sub>. (a) Encapsulado (b) Vista ampliada. Imágenes tomadas en laboratorio de CNEA**



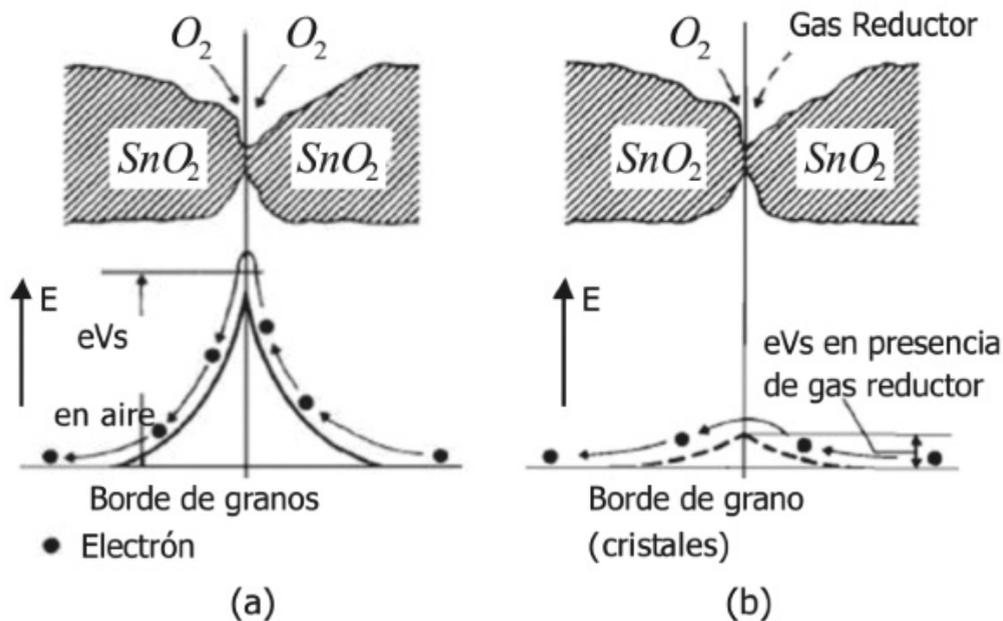
**Fig. 3. Vistas ampliadas del sensor de gas, con película sensora de nano hilos de CuO, fabricado en los establecimientos de CNEA**

- . temperatura local de calentamiento
- . concentraciones de impurezas dopantes
- . tamaño de los cristales (granos).

En la Figura 3 se ilustra un sensor de gas, con película sensora de nano hilos de CuO, fabricado en los establecimientos de CNEA.

En la Figura 4 se muestra un diagrama esquemático para explicar el principio de funciona-

miento de los sensores. Se basa en el proceso químico de reducción de la superficie de los granos del material cuando se acerca un gas reductor como metano ( $\text{CH}_4$ ), monóxido de carbono (CO), alcoholes, hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), etc. Este gas reductor a ser detectado introduce electrones móviles en la banda de conducción a nivel superficial, disminuyendo la carga negativa que suele estar atrapada en la superficie por átomos de oxígeno (gas oxidante) que no participan en el proceso de conducción. De



**Fig. 4. Esquema de conductividad en sensores de gas de SnO2. (a) En presencia de aire (b) En presencia de gas reductor. Imagen tomada de referencia Pearce (2003)**

esta manera aumenta la conductividad eléctrica del sensor en presencia del gas reductor.

El esquema muestra el aumento de la conductividad causado por el incremento de la movilidad de los portadores en sensores de gas SnO<sub>2</sub>:

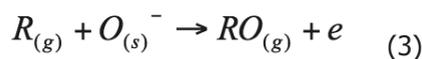
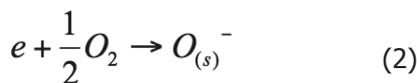
(a) El oxígeno del aire es adsorbido en la cara superficial del SnO<sub>2</sub>, formando una barrera de potencial en los bordes de los cristales.

(b) La barrera de potencial disminuye debido a la reacción de los átomos de oxígeno con el gas reductor, permitiendo que los electrones circulen más fácilmente, en consecuencia aumenta la conductividad eléctrica (Pearce, 2003).

Los sensores de SnO<sub>2</sub> son semiconductores tipo N que en presencia de un gas reductor aumentan su concentración de electrones libres, aumentando su conductividad. La relación entre la conductividad  $\sigma$  y la  $\rho$  resistividad están dadas por:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = e\eta\cdot\mu \quad (1)$$

Donde  $e$  es la carga de un electrón (1,6x10<sup>-19</sup> C),  $\eta$  es la concentración de portadores (electrones o lagunas) y  $\mu$  es la movilidad de los portadores (Pearce, 2003). El mecanismo de aumento de la concentración de portadores en la superficie del sensor se puede explicar con las siguientes ecuaciones:



Donde  $e$  es un electrón de la banda de conducción del óxido semiconductor,  $R_{(g)}$  es el gas reductor,  $s$  y  $g$  indican superficie del sensor y gas, respectivamente. La ecuación (2) indica que el oxígeno es adsorbido en la superficie del sensor, reduciendo su conductividad. En presencia de un gas reductor  $R_{(g)}$ , ecuación (3), se genera un electrón. Esta reacción aumenta la concentración de portadores incre-

mentando la conductividad del sensor.

El sensor de gas sufre una variación en la conductividad cuando las moléculas componentes del olor se adsorben e interactúan con la nanoestructura de la película de SnO<sub>2</sub>. Sin embargo, la medición de esta variación muchas veces no es suficiente para identificar un olor, dado que la mayoría de los sensores químicos son inespecíficos y están lejos de ser selectivos como para distinguir una especie gaseosa. Para mejorar la identificación, se utilizan varios sensores de gas distintos con baja selectividad. Se obtiene un patrón de señales que, bajo ciertas condiciones, permite tener gran repetibilidad en la correspondencia única con un olor.

### Aplicaciones de narices electrónicas

Las NE son utilizadas actualmente en diversas aplicaciones de determinación de olores y compuestos volátiles. Las aplicaciones más comunes están en procesos de la industria alimenticia y control de calidad, diagnóstico médico, monitoreo del medio ambiente, control de procesos industriales, etc.

Las NE son particularmente útiles para el control de calidad de los productos alimenticios. Tradicionalmente la calidad de los alimentos estaba asignada a paneles de expertos humanos y complementados con instrumentación tradicional de la química analítica. La inserción de NE en este sector de aplicaciones está siendo impulsada por su objetividad y bajo costo.

Entre las aplicaciones específicas dentro de la industria de la alimentación está la determinación de la calidad de materias primas, su evolución durante la producción, el monitoreo de procesos de fermentación, la inspección de pescado en almacén, el deterioro por envejecimiento, la verificación de ingredientes para jugos, la graduación alcohólica de licores, el monitoreo de bebidas y la determinación del tiempo en que se produce la pérdida de calidades de aroma en productos conservados.

En muchos casos las NE se usan para aumentar la capacidad o reemplazar los paneles humanos de control de calidad. En otros casos se usan para reducir la cantidad de análisis de química analítica, especialmente cuando son suficientes los resultados de tipo cualitativo. Un área emergente es el uso de NE en el desarrollo

de productos creando nuevos aromas, buscando un buen ajuste entre los aromas sintéticos y los aromas naturales, o bien desarrollando nuevos aromas estudiando la relación con los existentes.

## Parte Experimental

### Desarrollo de algoritmos, hardware y electrónica de control en la Nariz Electrónica PATAGONIA

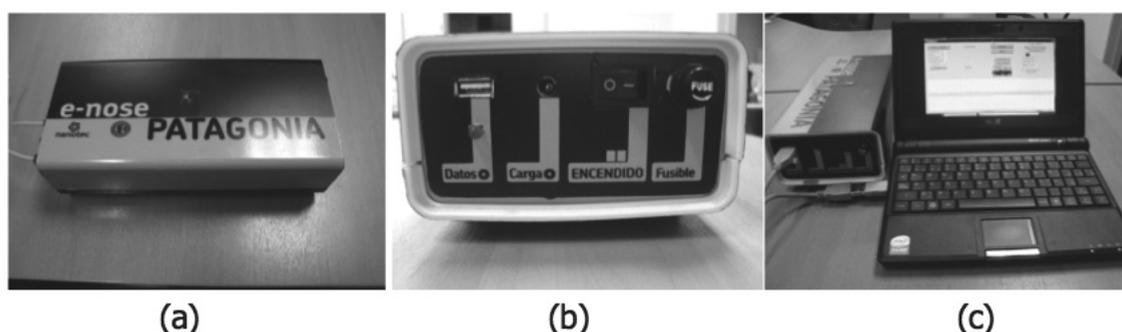
#### Descripción y características técnicas de la NE desarrollada

Se desarrolló una NE PATAGONIA de tamaño reducido. Este desarrollo, realizado en el transcurso de la tesis, incluye algoritmos de proce-

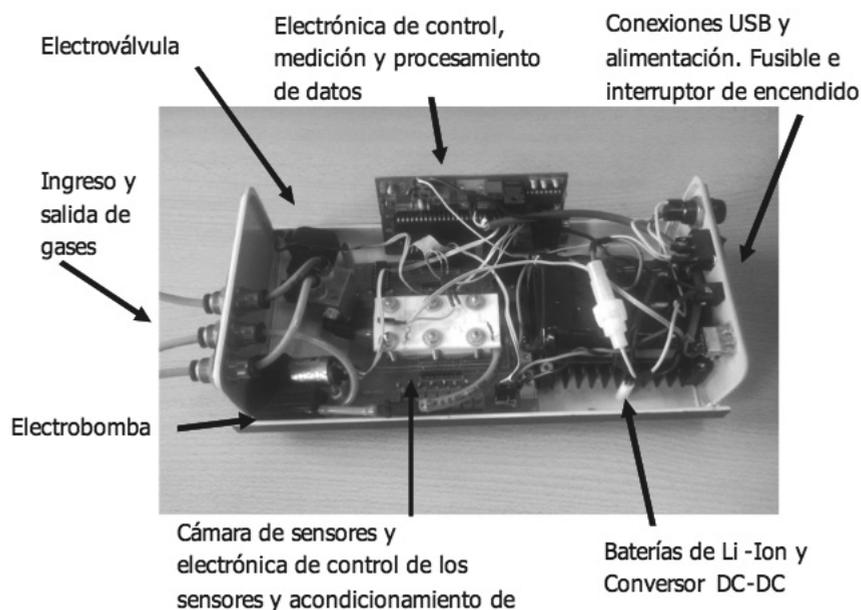
samiento y software propios, hardware completo con adecuación de la mezcla gaseosa, electrónica de control y adquisición de datos (Vorobioff, 2011). En la Figura 5 se muestra la NE PATAGONIA en su versión con baterías internas de Li-Ion.

La NE adquiere datos provenientes de los sensores internos, filtra estos datos y los transmite hacia una netbook a través de comunicación USB. Esta netbook tiene asociado un software propio simple de utilizar para poder operar la NE, procesar datos y mostrar resultados.

En la Figura 6 se muestra el diseño interno de la NE y se detallan sus componentes.



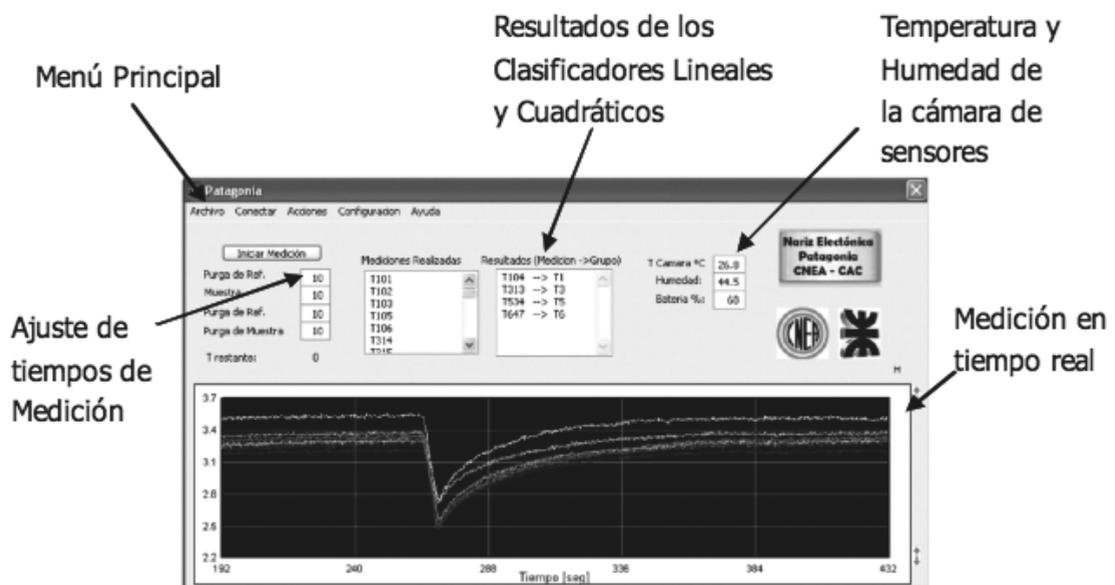
**Fig. 5. NE PATAGONIA con baterías internas de Li-Ion. (a) Vista superior (b) Vista frontal (c) NE con netbook asociada**



**Fig. 6. Diseño Interno de la Nariz Genérica Portátil Modelo PATAGONIA**



**Fig. 7. NE PATAGONIA sin baterías internas, con netbook asociada**



**Fig. 8. Pantalla principal del software de la NE**

En la Figura 7 se muestra la segunda versión de la NE PATAGONIA: reducida, sin baterías y con regulador de tensión interno más pequeño.

El software de la NE cumple las siguientes funciones:

- Simplifica las mediciones automatizando los procesos involucrados.
- Muestra las mediciones en tiempo real y guarda en disco rígido los datos recibidos de la NE.
- Procesa señales, analiza datos y muestras los resultados al operador. Estos resultados se

muestran en una lista donde se clasifica y se indica el grupo al que pertenece la medición realizada. También se muestran los resultados en gráficos de 2 dimensiones.

En la Figura 8 se muestra la pantalla principal del software de la NE. Se observa una medición en tiempo real correspondiente a los 8 sensores. También se observa una lista donde se indican los resultados de los clasificadores. Estos mismos mediante un procesamiento avanzado clasifican e indican a que grupo pertenece la medición de un producto desconocido. Previa-

mente se debe "entrenar" la NE, esto se realiza midiendo sustancias similares e indicando a que grupo pertenecen. Con este entrenamiento se forma una base de datos que se guarda automáticamente en una carpeta del disco rígido de la netbook asociada a la NE. Esta base de datos está formada por archivos en formato CSV (datos separados por comas), cada uno de ellos representa una medición. Mediante estos archivos, se pueden graficar las señales con el software propio de la NE o con cualquier programa convencional que sea capaz de graficar (por ejemplo Excel).

Realizando mediciones y entrenando la NE, se pueden generar muchas bases de datos distintas, cada una de ellas perteneciente a una especie de productos tales como cafés, pescados, aceites, distintas concentraciones de TMA, alcoholes, etc.

En la pantalla principal se especifican los tiempos de medición que varían según los distintos protocolos. En cuadros de texto se indica en tiempo real la temperatura y humedad de la cámara de sensores y el porcentaje de carga de batería. Se tiene un menú principal desplegable, el mismo se utiliza para entrenar la NE (elegir base de datos adecuada), procesar señales, obtener gráficos de Análisis de Componentes Principales (PCA), clasificar y obtener resultados, ajustes, selección de algoritmos, operación y prueba de la NE.

Las características principales de la NE PATAGONIA son:

- Algoritmos de Procesamiento PCA, Fisher, Clasificadores Lineales y Cuadráticos (Webb, 2011).
- Temperatura de la cámara de sensores: 43°C.
- 8 Sensores (2 conjuntos de 4 sensores c/u) marca Silsens, modelo MSGS-4000. Tipo MOS de capa delgada de SnO<sub>2</sub> (Pearce, 2003).
- Temperatura de trabajo de los sensores: 411°C. Con posibilidades de modificar en forma independiente cada uno de ellos en un rango de 350°C a 500°C.
- Microcontrolador Microchip 18F4550 con protocolo de comunicación USB embebido.
- Frecuencia de muestreo: 120 Muestras/segundo.
- Caudal de la electrobomba: 600 cm<sup>3</sup>/minuto.
- Volumen interno de la cámara de sensores: 7,1 cm<sup>3</sup>.

## **Plataformas de trabajo utilizadas en el desarrollo de la nariz electrónica**

Se trabaja con Matlab y herramientas agregadas. Luego se desarrolla un software de manejo de la NE con procesamiento avanzado y análisis de datos en lenguaje C++ totalmente libre de licencias. La NE PATAGONIA utiliza el microcontrolador PIC18F4550 con USB embebido, del fabricante Microchip.

También se realizaron pruebas de medición y comunicación USB con el microcontrolador LPC1769 con tecnología ARM de 32 bits.

En la NE basada en Espectrometría de Movilidad Iónica (Solis, 2006), se utilizan 2 placas de adquisición de datos: una marca National Instrument, modelo NI USB-6210 y otra marca Measurement Computing, modelo usb-1208fs. Para esta NE también se implementa un software propio de control en lenguaje C++.

Los diseños de circuitos electrónicos se realizaron con el software Orcad y posteriormente se mecanizaron en los laboratorios de CNEA con fresadora de placas PCB marca LPKF modelo Protomat S100.

## **Muestreo y adecuación de la mezcla gaseosa**

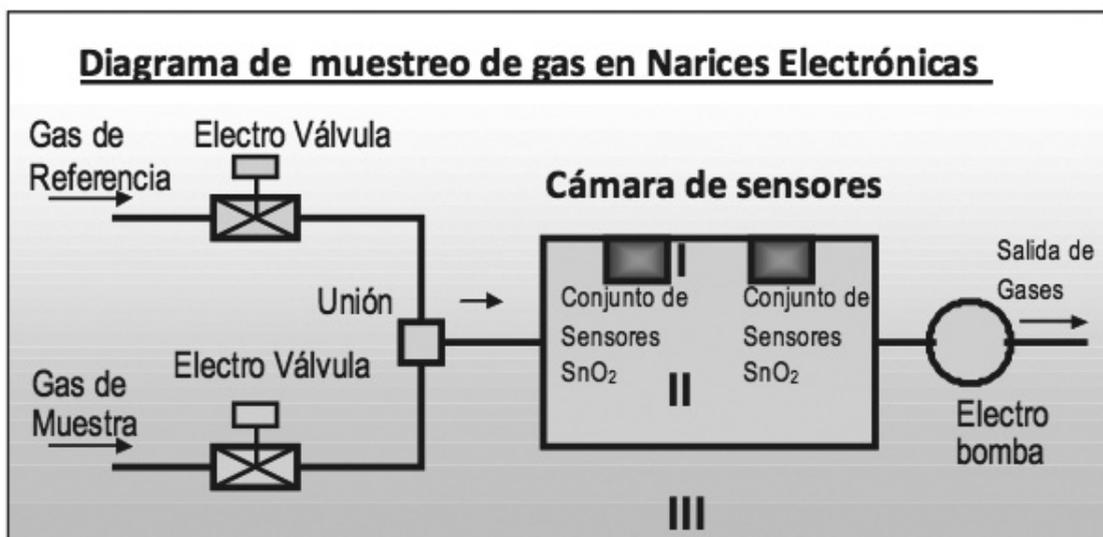
La NE posee un sistema de muestreo de gases que permite el ingreso del gas de muestra a medir y del gas de referencia.

En el muestreo y adecuación de las muestras es imprescindible utilizar una cámara de sensores y una electrobomba para mejorar las mediciones (Falcitelli, 2011; Lezzi, 2001). Con esto se tiene un flujo de gas constante y controlado.

En la Figura 9 se muestra el diagrama de muestreo de gas utilizado.

La electrobomba se encarga de aspirar la muestra de gas a medir. Esta misma se coloca a la salida de la cámara, de esta manera se reduce la contaminación remanente de muestras anteriores (efecto memoria).

Se tiene un canal de entrada del gas de muestra y un canal de entrada del gas de referencia. Este último se utiliza para limpiar la cámara de



**Fig. 9. Diagrama de muestreo de gas utilizado**



**Fig. 10. Cámara de sensores**

sensores antes y después de realizar la medición. Generalmente se aspira aire en este canal, aunque podría ser otro gas de referencia.

La electroválvula de la NE asegura la inyección de la muestra pura. De esta manera no se mezclan gases entre un canal de entrada y otro.

Se diseñó una cámara estanca partiendo de un modelo anterior. Para establecer la calidad de la misma, se utilizó un caudalímetro que permitió medir sus potenciales pérdidas. En este diseño se redujo el tamaño de la cámara puesto que conviene tener menor volumen en el interior de la misma. Las dimensiones externas de la cámara de sensores son de 56 mm de largo, 17 mm de ancho y 19 mm de alto. El volumen interno es de 7,1 cm<sup>3</sup>. La cámara de sensores se monta sobre una placa electrónica. Esta placa contiene los sensores y la electrónica de control asociada. Para evitar pérdidas de gas entre la unión de la cámara y la placa elec-

trónica se utiliza una junta de látex de 0,4 mm de espesor hecha a medida. En dicha cámara se colocan conectores del tipo "riego de agua", para conectar las mangueras y permitir la entrada y salida de gases. Anteriormente se utilizaban conectores industriales rápidos, pero se tuvieron que reemplazar debido a que tenían pérdidas. Se utilizan mangueras industriales de 4 y de 6 mm de diámetro externo.

Para mejorar las mediciones se calienta la cámara de sensores y se mantiene a una temperatura constante de 43°C. Se implementa un algoritmo PID (proporcional, integral y derivativo) para el control de los calefactores. Como resistencia de calefacción se utiliza alambre de nicrom (Níquel 80%- Cromo 20%) de 160 micrómetros de diámetro. Este alambre se distribuye a través de la cámara mediante 14 orificios de 1 mm de diámetro cada uno.

En la Figura 10 se puede apreciar la cámara de sensores, la disposición del alambre utilizado, los conectores y las mangueras. El sistema de calefacción es capaz de entregar hasta 10 Watt de potencia, mediante un transistor Mosfet modelo IRLZ24. Cabe destacar que las resistencias no tienen contacto con el gas de muestra, con lo que se evita contaminar la cámara con los gases que se puedan generar al calentar dichas resistencias.

La cámara de sensores se realiza con Teflón, para que no se adhieran las muestras de gas que circulan por la misma.

### **Electrónica de Control y Adquisición de Datos**

En la NE PATAGONIA se utiliza el microcontrolador PIC18F4550 con USB embebido, del fabricante Microchip. Sin embargo no se utilizan las librerías de comunicación USB propias del fabricante debido a que no funcionan correctamente. Se utilizan las librerías de comunicación USB del entorno CCS C Compiler. Se modifican dichas librerías para evitar cortes inesperados en la transmisión de datos. También se realizan pruebas de medición y comunicación USB con el microcontrolador LPC1769 con tecnología ARM de 32 bits.

A continuación se describen las principales funciones y características de la electrónica interna de la NE PATAGONIA:

- Consta de un microcontrolador Microchip modelo 18F4550 que mide las señales de los sensores, realiza un filtrado por software y envía los datos mediante comunicación USB a la notebook. Anteriormente se trabajaba con conexión RS232 entre placa de adquisición y PC. Con el protocolo de comunicación USB implementado se mejora la comunicación tanto en calidad como en velocidad de transmisión.
- Mantiene constante la temperatura de los sensores. Esta temperatura se puede regular entre 300 °C y 500 °C mediante potenciómetros internos.
- La electrónica interna calefacciona y estabiliza la temperatura de la cámara en 43 °C, con calefactores y algoritmos PID de control. Con esto se reducen las variaciones de temperatura y humedad que producen variaciones en las mediciones. Se utiliza un sensor de temperatura y de humedad marca Sensirion, modelo SH71,

de espacio reducido y comunicación serie con protocolo SPI.

- Acondiciona las señales de los sensores para poder ser medidas. Esto se realiza con 8 fuentes de corriente fijas, una para cada sensor. Estas corrientes circulan por la resistencia de los sensores. Luego en forma indirecta, mediante amplificadores operacionales, el microcontrolador mide la tensión sobre dichas resistencias. Conociendo la corriente y la tensión se calcula la resistencia de los sensores. Los valores de las resistencias de los sensores varían según el gas que circule por los mismos, la temperatura de trabajo, la humedad y otros factores. En base al cálculo de la resistencia de cada sensor, se obtienen las señales de los sensores.

- Maneja la apertura y cierre de la electroválvula y de la electrobomba.

- Realiza un filtrado por hardware de la señal.

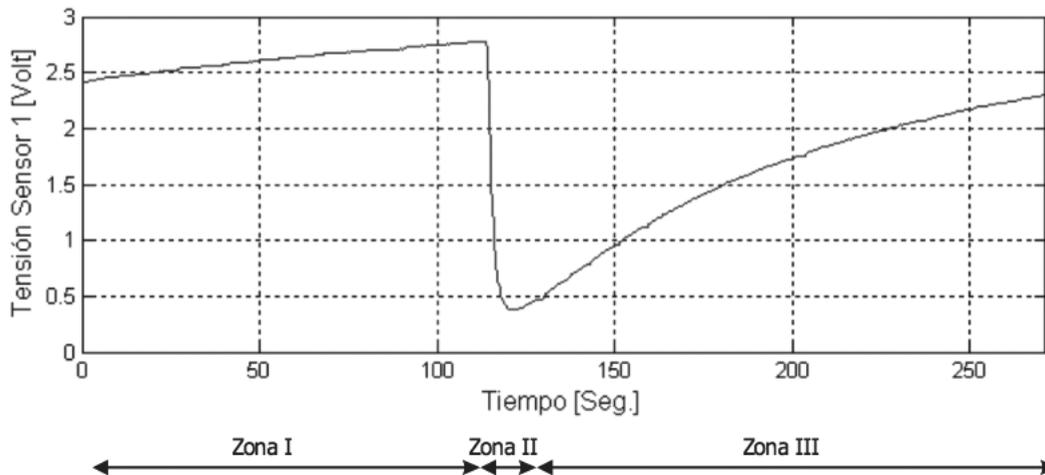
### **Descripción del Procesamiento de Señales y Algoritmos**

Se trabaja con las plataformas de software de Visual C++ y Matlab. A estas plataformas se le agregan herramientas de reconocimiento de patrones.

Para hallar el procesamiento más adecuado, se prueban distintos algoritmos: PCA (Webb, 2011), Transformada Wavelet Discreta (Mathworks Inc, Matlab, 2009), Redes Neuronales (Demuth, 2012), Mapa de Sammon (Scott, 2006), Clasificadores Lineales y Cuadráticos, Fisher, Análisis de funciones discriminantes y otros clasificadores (Webb, 2011).

Las señales obtenidas de la NE, primero deben ser preprocesadas y normalizadas. A partir de estas señales normalizadas se extraen las huellas características. Posteriormente se extraen parámetros obteniendo el espacio de parámetros y se grafican los resultados en dos dimensiones. Se clasifican las muestras en distintos grupos. En base a los clasificadores y al espacio de parámetros se tiene la NE "entrenada", es decir que tiene una base de datos correspondiente a un grupo de mediciones. Mediante este entrenamiento se mide un producto desconocido y se clasifica la medición. Como resultado del clasificador la NE indica a que grupo pertenece la medición realizada.

Por otro lado, mediante un banco de gases y las curvas de calibración adecuadas, se puede pre-



**Fig. 11. Señal típica de un sensor de SnO2. Zona I: purga de aire, Zona II: adsorción y Zona III: desorción**

decir la concentración de un determinado gas.

La NE PATAGONIA dispone de 8 sensores de SnO2 (Pearce, 2003). Para entrenar la NE y establecer correctamente los coeficientes internos y/o autovectores de los algoritmos aplicados generalmente se deben realizar entre 10 y 70 mediciones. Estos valores dependen de la dispersión de los datos, de la cantidad de grupos existentes y de la similitud de las mediciones de un mismo grupo. Por otro lado, se implementaron distintos algoritmos de procesamiento. Estos algoritmos se pueden combinar entre sí de distintas maneras y a cada algoritmo se le pueden aplicar distintos parámetros de procesamiento. También es necesario graficar las señales y los resultados obtenidos para analizar y mejorar los procesamientos de las señales. Al disponer de una gran cantidad de datos para procesar y la necesidad de utilizar un conjunto muy grande de algoritmos para comparar, se automatizó el proceso con un software propio. Se utilizaron pantallas interactivas en C++ y en Matlab (herramienta *guide*). Esto simplificó notablemente la búsqueda y selección de los mejores algoritmos a implementar junto con sus parámetros de procesamiento.

Luego de seleccionar los algoritmos más adecuados en Matlab, estos mismos se implementan en la NE en lenguaje C++. Se ajustan los parámetros de procesamiento y se realizan modificaciones y mejoras en los mismos.

El procesamiento en C++ se ejecuta mucho más rápido respecto de Matlab, teniendo la ventaja de utilizar software libre de licencias.

Se implementan algoritmos en C++ con librerías adicionales de reconocimiento de patrones, muchas de estas se adecuan y se mejoran. También se implementan librerías propias.

### Extracción de la huella característica

En la Figura 11 se muestra una señal típica de la NE PATAGONIA, correspondiente a mediciones de pescado del sensor 1 del conjunto de 8 sensores de SnO2. Se pueden distinguir 3 zonas: la zona I corresponde a la purga de aire inicial, la zona II corresponde a la adsorción del sensor que es el período de tiempo en que se inyecta la muestra y la zona III corresponde a la desorción del sensor, que es el período de tiempo en que se realiza la purga de aire final.

Para mejorar la calidad del procesamiento se debe elegir el método más adecuado de normalización de señales. Para esto se implementan distintos métodos explicados en la introducción de esta tesis y se comparan resultados.

De las señales obtenidas se deben obtener las "huellas" características. Es decir que para cada señal, se debe obtener su valor más relevante. Estas huellas características constituyen una matriz de huellas con cantidad de filas igual a la cantidad de mediciones y cantidad de columnas igual a la cantidad de sensores.

La matriz de huellas se obtiene con distintos métodos y luego se comparan los resultados obtenidos para seleccionar el más adecuado.

Dependiendo de la aplicación y del producto medido se pueden elegir distintos métodos. A continuación se nombran los métodos más utilizados implementados en C++ en la NE PATAGONIA:

- Método I: cálculo de la integral de la señal normalizada en la zona de adsorción (ver Figura XI).
- Método II: cálculo de la integral de la señal normalizada en la zona de desorción (ver Figura XI).
- Método III: suma de las integrales de las zonas de adsorción y desorción de la señal normalizada.
- Método IV: cálculo de variación máxima de la señal respecto de su línea de base en la zona de adsorción.
- Método V: ídem anterior con señal normalizada.
- Método VI: cálculo de la pendiente del logaritmo de la señal en la zona de adsorción.

Se normalizan las señales dividiendo cada señal por el valor de su línea de base. Posteriormente, la matriz de huellas características se centra en el origen y se normaliza por autoescala. Se comparan los distintos métodos de extracción de huellas y se obtienen conclusiones.

### Extracción de parámetros y clasificación de muestras de café

Una vez obtenida la matriz de huellas características, se deben extraer parámetros para obtener el espacio de parámetros y luego clasificar (Scott, 2006).

La extracción de parámetros reduce la dimensión de la matriz de huellas características. Partiendo de una matriz de 8 columnas (dimensión 8), se obtiene una matriz de 2 columnas (dimensión 2). En esta sección utilizamos el método PCA (Webb, 2011) con 2 variantes: por un lado, generamos los autovectores y autovalores con la matriz de correlación y, por otro lado, usamos la matriz de covarianza (Webb, 2011).

Graficamos los resultados en este nuevo espacio de 2 dimensiones y comparamos los gráficos obtenidos entre PCA con matriz de correlación y PCA con matriz de covarianza.

Para poder clasificar un producto desconocido y saber a qué grupo pertenece, primero debemos "entrenar" la NE. El entrenamiento consiste en realizar cierta cantidad de mediciones e indicar a que grupo pertenece cada medición para generar una base de datos. Se puede entrenar la NE con distintos productos, estos entrenamientos se guardan en el disco rígido de la netbook asociada a la NE.

Para probar el funcionamiento de la NE PATAGONIA, realizamos mediciones de 3 tipos de café de una misma marca (3 grupos que denominamos A, B y C) con un determinado protocolo. Para cada grupo de café repetimos la medición 6 veces. En cada medición especificamos a que grupo pertenece. Realizamos el análisis PCA, obtenemos autovectores y graficamos. Con esto tenemos la NE "entrenada" con el correspondiente gráfico PCA. Este gráfico lo separamos en distintas regiones según los grupos que tengamos. Luego realizamos una nueva medición de algún café desconocido y con los autovectores anteriores, proyectamos y agregamos esta medición en el gráfico PCA. Vemos en que zona del gráfico se proyecta esta medición agregada y determinamos a que grupo pertenece. Los resultados se muestran en la sección de "Resultados y Discusión".

También se implementaron clasificadores con Análisis Discriminatorio Lineal (LDA) con el método de Fisher (Webb, 2011).

En el protocolo de medición de café tomamos los siguientes tiempos:

- tiempo de purga inicial de aire: 40 s
- tiempo de inyección de muestras: 35 s
- tiempo de purga final de aire: 30 s para el canal de referencia y 30 s para el canal de muestra

Con el fin de cuantificar la discriminación PCA se ha utilizado el valor de silhouette Rousseeuw (1987), calculado con software MATLAB 7.8. Este parámetro mide la existencia de distintos grupos y se define por el plano de resultados de la ecuación (4).

$$S(i) = \frac{(\min b(i, k)) - a(i)}{\max(a(i), \min b(i, k))} \quad (4)$$

donde es el valor de silhouette correspondiente a cada medición. El valor es la distancia media desde el punto hasta los otros puntos del mismo grupo. El valor es el valor medio de la distancia desde el punto, hacia los puntos pertenecientes a otros grupos k. Para cuantificar los resultados PCA se calcula el valor medio de silhouette para cada método.

El valor de medio de silhouette puede variar entre -1 y +1. La mejor discriminación corresponde al valor +1.

## Resultados y Conclusiones

Resultados del Desarrollo de algoritmos, hardware y electrónica de control en NE PATAGONIA

Se desarrolló una NE PATAGONIA de tamaño reducido. Este desarrollo, realizado en el transcurso de la tesis, incluye algoritmos de procesamiento y software propios, hardware completo con adecuación de la mezcla gaseosa, electrónica de control y adquisición de datos.

Esta NE contiene un software de desarrollo propio para operar la misma en forma automática. Este software incluye procesamiento avanzado de datos y clasificadores en lenguaje Visual C++ totalmente libre de licencias.

Utilizando lenguaje C++ se mejora notablemente velocidad de procesamiento debido a la

independencia de un programa complicado.

El software de la NE PATAGONIA no se implementa en Matlab debido a que es un software muy costoso y para cada NE que se venda se deben adquirir las licencias correspondientes.

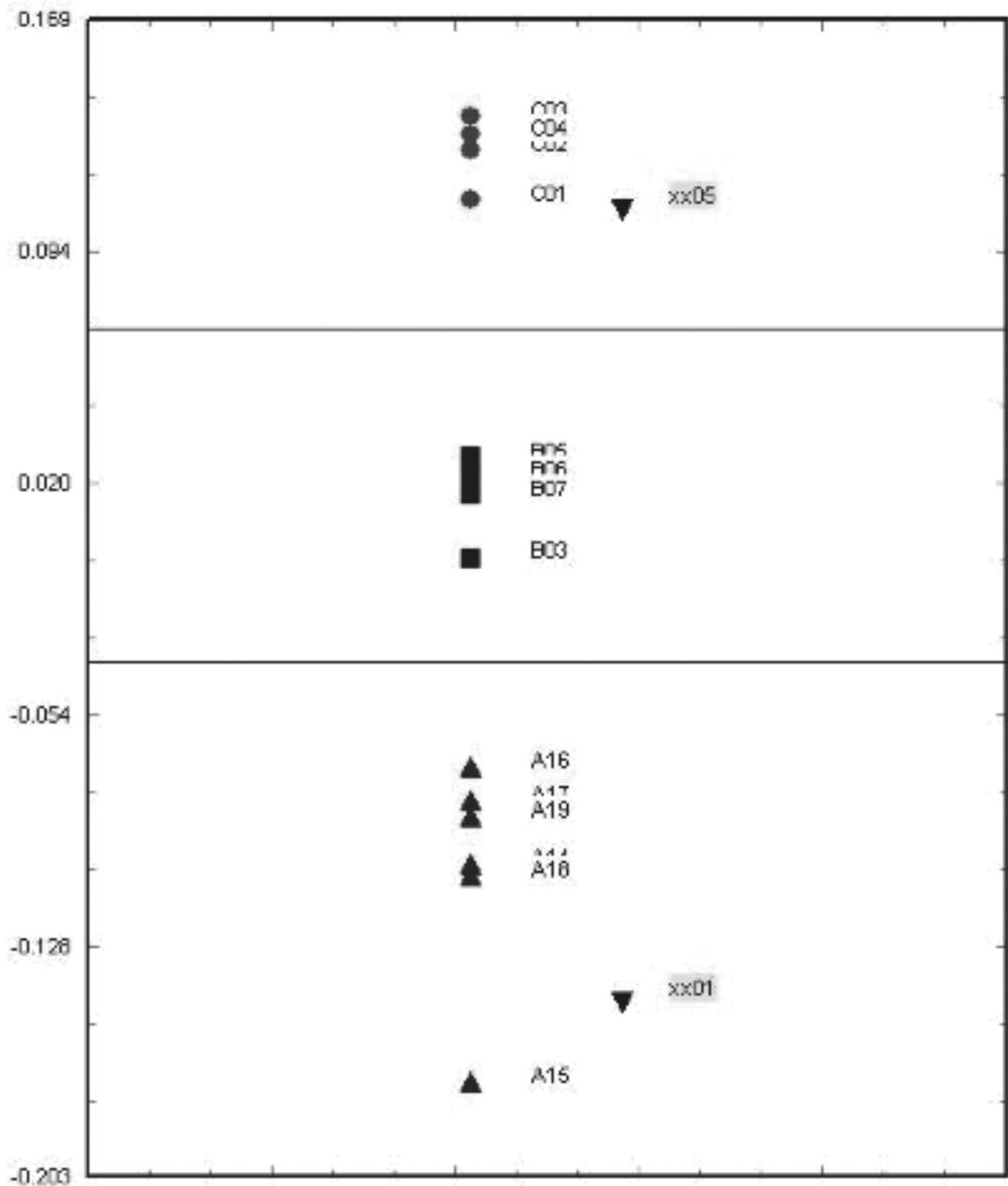
Para normalizar las señales se compararon distintos métodos de normalización. Se obtienen mejores resultados dividiendo las señales por su valor de línea de base. De esta manera el procesamiento se independizó de las magnitudes de corriente, tensión o resistencia del sensor. También se minimizaron los corrimientos de la línea de base entre una medición y otra.

Se probó la NE realizando mediciones de distintos cafés. Se calculó la matriz de huellas características con los métodos explicados en la Sección 3.1.6. Esta matriz se normalizó y se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) con matriz de correlación y PCA con matriz de covarianza.

Con el fin de cuantificar la discriminación PCA se ha utilizado el valor de silhouette Rousseeuw (1987), explicado en la ecuación (4). El valor medio de silhouette puede variar entre -1 y +1, la mejor discriminación corresponde al valor más alto. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos. Se alcanzaron los mejores resultados con el método IV y análisis PCA con la matriz de correlación.

	PCA con correlación	PCA con covarianza
Método I: Integral zona adsorción	0,8237	0,7567
Método II: Integral zona desorción	0,6309	0,5395
Método III: Integral zona adsorción y desorción	0,7085	0,6694
Método IV: variación máxima de la señal en zona de adsorción	0,8795	0,8751
Método V: variación máxima de la señal normalizada en zona de adsorción	0,8749	0,8706
Método VI: pendientes del logaritmo de la señal en la zona de adsorción	0,733	0,7158

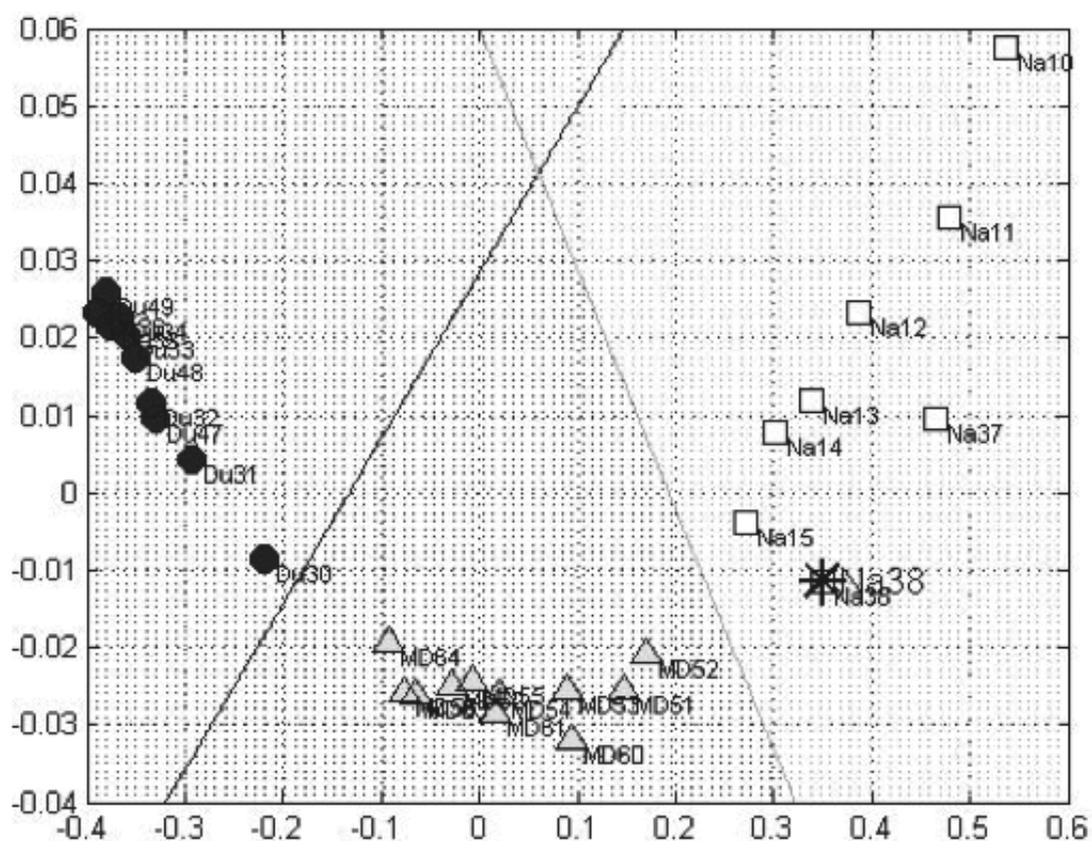
**Tabla 1. Valores de silhouette de discriminación PCA para mediciones de Café.**



**Fig. 12. Pantalla de LDA con método de Fisher incorporada al software de NE PATAGONIA. Clasificación de distintos cafés. (a) café A, (b) café B, (c) café C. (xx) Mediciones de café agregadas y clasificadas correctamente**

En la Figura 12 se muestra la pantalla de resultados obtenidos en la clasificación de cafés, utilizando Análisis Discriminatorio Lineal (LDA) con método de Fisher. Dicha pantalla pertenece al software de la NE. Las líneas horizontales separan los 3 grupos de café medidos. Se agregaron mediciones de café y se clasificaron correctamente con el algoritmo desarrollado.

En la Figura 13 se observan los resultados PCA del software de la NE PATAGONIA, con el cual se analizaron distintas muestras de jugos a través de la matriz de covarianza. Primero se entrena la NE con 3 grupos de jugos conocidos, luego se agregan al gráfico las mediciones desconocidas para saber a que grupo pertenecen. Observando el gráfico notamos que las mediciones se clasifican correctamente.



**Fig. 13. Análisis PCA para distintas muestras de jugos. Mediante clasificador lineal se observan 3 grupos. (Na) jugo de naranja, (Md) jugo de mandarina, (Du) jugo de durazno. (Na38) Medición agregada y clasificada correctamente**

## Referencias

- CHEN, et al. (2006) Micromachined nanocrystalline silver doped SnO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>S sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical* 114 (1): 32-39.
- DEMUTH, H.; BEALE, M.; HAGAN, M. (2012) *Neural Network Toolbox User's Guide*. Cap.1.
- FALCITELLI, M.; BENASSI, A.; DI FRANCESCO, F.; DOMENIRI, C. (2002) Fluid dynamic simulation of a measurement chamber for electronic noses. *Sensors and Actuators B* 85, 166-174.
- GARDNER, J.W.; BARTLETT, P. A. (1993) Brief History of Electronic Noses. *Sensors and Actuators B*, 18, 211-220.
- LEZZI, A. M.; BERETTA, G. P.; COMINI, E.; FAGLIA, G.; GALLI, G.; SBERVEGLIERI, G. (2001) Influence of gaseous species transport on the response of solid state gas sensors within enclosures. *Sensors and Actuators B* 78, 144-150.
- MATHWORKS INC., Matlab Versión: 7.8.0.347 (R2009a), <http://www.mathworks.com>
- PEARCE, T. C.; SCHIFFMAN, S. S.; NAGLE, H. T.; GARDNER, J. W. (2003) *Handbook of machine olfaction - Electronic nose technology*. Wiley-VCH, Weinheim, 79-104.
- ROCK, F.; BARSAN, N.; WEIMAR, U. (2008) Electronic Nose: Current Status and Future Trends. *Chem.Rev*, 108, 705-725.
- ROUSSEEUW, (1987) P.J. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis, *J. Comput. Appl. Math.* 20, 53-65.
- SCOTT, S. M.; JAMES, D.; ALI, Z. (2006) Data analysis for electronic nose systems. *Microchim. Acta* 2006, 156, 183.
- SOLIS, A.A.; SACRISTÁN, E. (2006) Designing the Measurement Cell of a swept-field differential aspiration condenser. *Rev. Mex. Fis.* 52 (4), 322-328, 2006
- VOROBIOFF, J.; RINALDI, C. (2011) Detección de olores mediante una nariz electrónica: desarrollo de electrónica y algoritmos para la caracterización organoléptica de pescado. *Proyecciones UTN FRBA - ISSN: 1667-8400 (versión impresa), ISSN: 1853-6352 (versión en línea)* 26.
- WEBB, A.R.; COPSEY, K.D. (2011) *Statistical Pattern Recognition*, 3ed, Wiley, 463-483.

# Interferometría absoluta con diodos láser por barrido en banda base

**José Luis Puliafito, Gabriel Antonietti, Carlos Mario Puliafito**

Universidad de Mendoza, Facultad de Ingeniería, Instituto de Alta Frecuencia y Microondas,  
Paseo Dr. Emilio Descotte 750 (5500), Mendoza, Argentina

*jose.luis.puliafito@um.edu.ar*

*Recibido el 7 de Junio de 2013 y aprobado el 20 de Octubre de 2013*

## Resumen

Se presentan los fundamentos de un método alternativo de interferometría absoluta con diodos láser, basado en la modulación directa de la intensidad del haz láser (a través de la corriente del diodo), mediante una señal de frecuencia variable (barrido en banda base). Aunque en alguna medida dicho método puede considerarse una variante de la interferometría absoluta superheterodina, presenta la importante diferencia que no requeriría múltiples fuentes láser o diodos láser especiales sintonizables, eventualmente con un impacto positivo en la reducción de la complejidad y el costo del instrumento. Algunos ensayos preliminares sobre un banco experimental de interferometría con diodo láser, desarrollado en el contexto de un Trabajo Final de Ingeniería de la Universidad de Mendoza, han mostrado que el método aquí presentado es realizable.

**PALABRAS CLAVE:** MEDICIÓN DE DISTANCIAS - DIODO LÁSER - INTERFEROMETRÍA ABSOLUTA SUPERHETERODINA - BARRIDO DE FRECUENCIA EN BANDA BASE

## Abstract

This paper presents an alternative method for measuring distances through absolute interferometry with laser diodes, which is based on the direct modulation of the intensity of the laser beam, through the current of the diode, with a variable frequency signal (baseband sweeping or "chirp"). Although the method can be considered a variation of the superheterodyne absolute interferometry, it presents the important difference that it does not require multiple laser sources or special tunable laser diodes, eventually with a positive impact on lowering the complexity and cost of the instrument. Some preliminary tests on an experimental bench, developed in the context of an Engineering diploma work in the University of Mendoza, have shown that the method here presented is achievable.

**KEYWORDS:** DISTANCE MESAUREMENT - LASER DIODE - SUPERHETERODYNE ABSOLUTE INTERFEROMETRY - BASEBAND FREQUENCY SWEEPING

## Introducción

Entre las posibles formas de medición de distancia, la interferometría es una técnica imprescindible cuando se requieren exactitudes del orden del micrón o menos (Fig. 1 fuente: Laser Components GmbH). Hay diversos métodos basados en la interferencia de un haz de luz emitido por una fuente coherente espacial y temporalmente (por ello se usa preferentemente láser), y el haz reflejado por el blanco. En general todos ellos conducen a traducir una variación de distancia en variación de amplitud, sea ésta detectada en forma óptica (con un telescopio) o electrónicamente.

El grado de éxito de una medición por interferometría depende en buena medida de conocer con exactitud la longitud de onda de la fuente así como que su ancho espectral sea muy angosto. El rango de medición está limitado típicamente por la ambigüedad resultante por encima de la mitad de la longitud de onda utilizada, lo que no representa problema en mediciones que implican la determinación de irregularidades superficiales (por ej. en piezas ópticas de precisión. En ciertos tipos de medición en cambio, principalmente en ámbitos industriales, esto representa una limitación importante, pero puede ser parcial o totalmente superada utilizando una extensión del concepto

interferométrico o por la combinación de éste con alguno de los otros métodos alternativos.

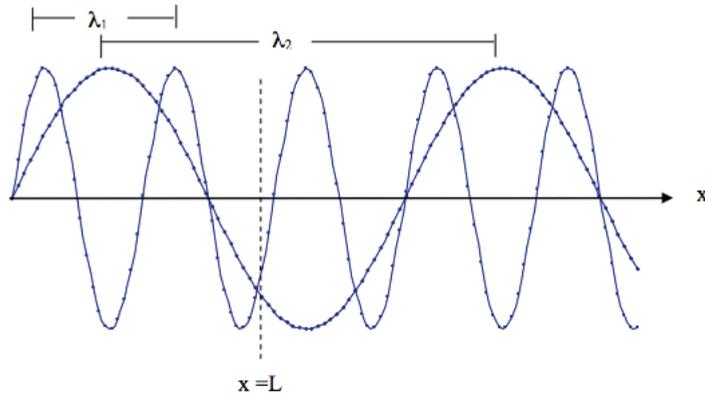
Por ejemplo si el objetivo se desplaza en forma perpendicular al sensor se pueden contar la cantidad de "picos" de amplitud que resultan de la interferencia (*interferometría de desplazamiento*), pudiendo inducirse si el blanco se aleja o acerca de la fuente a través del desplazamiento espectral *Doppler* del haz reflejado; en otros casos se utiliza más de una fuente láser con diferentes longitudes de ondas (muy próximas entre sí y estabilizadas) de forma de producir una longitud de onda "sintética" (de más baja frecuencia) a partir de la mezcla de los haces (*interferometría heterodina* con múltiples longitudes de onda). También se puede producir el "barrido" en frecuencia de una fuente láser sintonizable (con diodos láser TLD<sup>1</sup>), la que se interfiere con otra de frecuencia constante y que oficia como referencia (*interferometría por barrido en frecuencia*). Estas últimas son referidas en general como técnicas de *Interferometría Absoluta*, como contraposición a las clásicas que podrían denominarse de *Interferometría Relativa*.

El principio de medición de la *interferometría absoluta por barrido en frecuencia* es el que sigue (Fig. 2): cierto número de ondas de la luz (de la longitud de onda  $\lambda_1$ ) corresponde

	Tiempo de vuelo	Triangulación	Interferometría
<b>Rango de Medición</b>	10 m a decenas de km	Algunos mm hasta 10 m	Láser estándar: 1m Láser con cavidad externa: 40m
<b>Precisión</b>	Menor que 1mm	0,01 % del rango de medición	Comparable con la longitud de onda del láser
<b>Emisor</b>	Diodo láser pulsado (850 -1650 nm)	Diodo Láser colimado (visible o infrarrojo cercano)	Diodo Láser sintonizable (sin saltos de modo)
<b>Detector</b>	Fotodiodo PIN (Si o InGaAs) Fotodiodo de Avalancha (APD) ( Si o InGaAs)	Detector sensible a la posición (PSD) Array CCD Array de diodos	Fotodiodo

**Fig. 1. Comparación entre algunas técnicas de metrología óptica. La última columna se refiere a interferometría absoluta**

<sup>1</sup> TLD (Tunable Laser Diode): Hay distintos tipos de diodo láseres que pueden utilizarse, según sea la aplicación y el rango de sintonización deseado, entre ellos el diodo de InGaAsP / InP (sintonizable entre 900 nm de 1,6  $\mu\text{m}$ ), y el diodo de InGaAsP / InAsP (sintonizable desde 1,6  $\mu\text{m}$  hasta 2,2  $\mu\text{m}$ ). Estos láseres se sintonizan ya sea ajustando su temperatura o cambiando la corriente de inyección. Los cambios de temperatura permiten una sintonización  $> 100 \text{ cm}^{-1}$ , pero con velocidades de cambio lentas (algunos hertzios), debido a la inercia térmica del sistema. Por otro lado, el ajuste de la corriente de inyección puede proporcionar velocidades de sintonización a tasas de hasta 10 GHz, pero está restringido a un rango de longitudes onda más pequeño (de 1 a 2  $\text{cm}^{-1}$ ). La anchura de línea láser típica es del orden de 10-3  $\text{cm}^{-1}$  o menos. Para lograr rangos mayores de sintonización, así como el estrechamiento de la anchura de línea, debe recurrirse a otros métodos incluyendo el uso de cavidades externas de dispersión óptica.



**Fig. 2. Sintonización del láser que cambia continuamente su longitud de onda desde  $\lambda_1 \Rightarrow \lambda_2$ , permitiendo así determinar el número de picos que corresponden a L.**

a la distancia L a medir. Si continuamente la longitud de onda se varía de  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$  esto se puede considerar como un "estiramiento" del tren de ondas o alternativamente como un desplazamiento virtual del blanco. Durante el estiramiento cierto número de picos de ondas pasa por el punto  $x = L$ . Este número se puede determinar usando un interferómetro. La diferencia de fase  $\Delta\phi$  que resulta del cambio de la longitud de onda permite determinar la distancia L por:

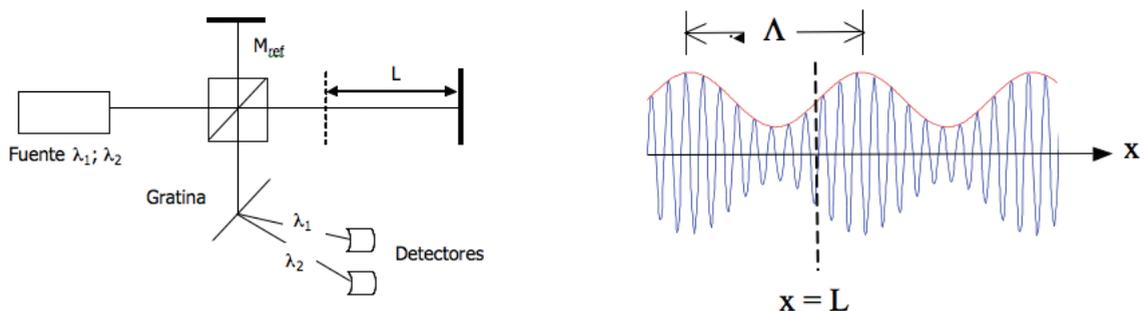
$$L = \Delta\phi / 2\pi \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2| \quad (1)$$

Usando un interferómetro de Michelson, puede medirse el cambio de la fase durante el cambio de la longitud de onda. Puesto que el cambio de  $\lambda_1 \Rightarrow \lambda_2$  de la longitud de onda del diodo láser es difícil de reproducir exactamente, se utiliza un segundo interferómetro de referencia para monitorear simultáneamente una trayectoria de referencia bien definida. Esto da:

$$L = L_{ref} \Delta\phi / \Delta\phi_{ref} \quad (2)$$

Alternativamente, el interferómetro de referencia se puede sustituir por un *interferómetro de regulación*, que cambia una determinada  $\lambda_1$  en un incremento  $\Delta\lambda$  conocido. Usando un segundo láser (el cual emite a  $\lambda_3$ ) puede aumentarse la resolución de esta técnica, al comparar  $\phi_1$  con  $\phi_2$  y  $\phi_2$  con  $\phi_3$ . La exactitud de la técnica depende del rango de variabilidad espectral del diodo láser: cuanto más amplio sea (sin saltos de modos) más alta será la resolución de fase y por lo tanto más exacta la medida. Además, la duración de la medición debe ser tan corta como sea posible para reducir al mínimo las inexactitudes causadas por los cambios del índice de refracción o la vibración del espejo durante el estiramiento de onda. La corta longitud de coherencia, de los láseres convencionales a semiconductor, limita la utilidad de este método a distancias de hasta aproximadamente un metro.

El uso de una cavidad externa (modulada por medio de una gratina óptica), permite extender la longitud de coherencia hasta 100 m, y así medir distancias de hasta 40 m con una pre-



**Fig. 3. Esquema de un interferómetro de dos longitudes de onda con separación óptica espacial (izq.) y resultado de la interferencia de ambas (der.)**

cisión de  $10^{-6}$ . Sin embargo, el costo actual de tales láseres de cavidad externa hace que esta técnica sea prohibitivamente costosa (Laser Components GmbH).

Como alternativa al interferómetro de barrido está el *interferómetro de múltiples longitudes de onda*. Por ejemplo, si se toman dos fuentes láser estabilizadas con longitudes de onda  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  en una configuración Michelson, y éstas luego se detectan independientemente, tras separarlas ópticamente por medio de un prisma o una gratina de difracción (Fig. 3), la detección electrónica de la diferencia de fases entre ambas señales conduce también a una longitud de onda sintética  $\Lambda = \lambda_1 \cdot \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$  como en el anterior método (Salvadé, Y., 1999).

No obstante, este método trabaja bien sólo para diferencias de longitudes de onda grandes, es decir para longitudes de onda sintética pequeñas ( $<1$  mm), ya que la separación espacial está limitada por la máxima resolución espectral –angular que se logra con gratinas o prismas. Más aún, este método requiere gran estabilidad de las longitudes de ondas del láser, lo que es difícil de conseguir en aplicaciones que requieren buena resolución y pequeña sensibilidad a los diversos cambios mecánico-ambientales.

Para solucionar en parte este problema, se requiere detectar la señal total de interferencia sin separación óptica de las dos longitudes de onda. Hay dos tipos de técnicas de detección que se pueden utilizar: la homodina y la heterodina. La *detección homodina* es un método estático mientras que la detección heterodina es un método dinámico. El primero tiene la ventaja a ser simple y barato, sin embargo, la resolución está limitada por las fluctuaciones de la intensidad del láser.

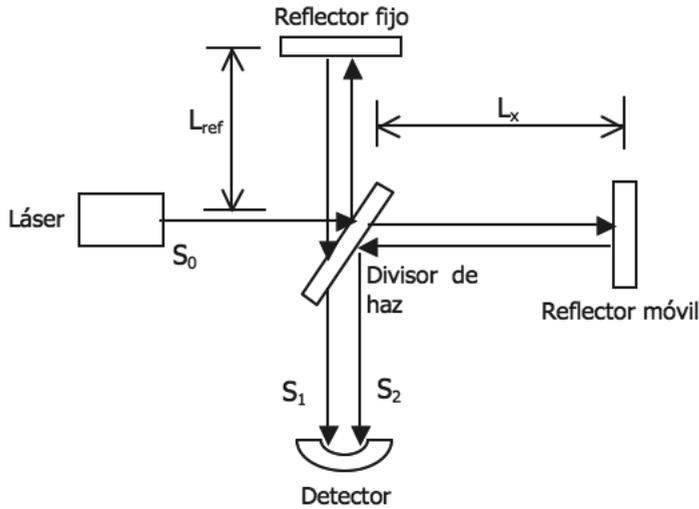
En la técnica heterodina la fase sintética es determinada midiendo las fases interferométricas en ambas longitudes de onda, y computando la diferencia. El haz de referencia tiene la frecuencia óptica  $\nu$ , en tanto que el haz de medición es desplazado en una frecuencia  $f$  con respecto al anterior por medio, por ejemplo, de un modulador acusto-óptico. La detección heterodina da lugar a una señal de interferencia dependiente del tiempo a una frecuencia  $f$ . La fase interferométrica  $\Delta\phi$  puede ser determinada midiendo la diferencia de fase entre una señal de la referencia, generada ópticamente o electrónicamente,

y la señal de medición. Esto permite alcanzar una interpolación de la franja de interferencia mejor que  $1/1000$ . Este método proporciona una medida rápida y trabaja también para superficies ásperas, ya que permite una detección limitada en ruido de disparo (*shot noise*), incluso para energías ópticas bajas en el brazo de medición del interferómetro. Sin embargo, según lo mencionado, la técnica se puede utilizar solamente para las diferencias relativamente grandes de longitud de onda ópticas y así longitudes de onda sintéticas pequeñas.

La detección superheterodina es una variante de la heterodina que permite alta resolución en longitudes de onda sintéticas arbitrarias, y además sin necesidad de estabilidad interferométrica en las longitudes de onda ópticas  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , o la separación óptica de estas longitudes de onda. Esto es de gran importancia en aplicaciones industriales en rangos de distancias grandes con resolución submilimétrica. Ambas longitudes de onda se utilizan para iluminar simultáneamente un interferómetro de Michelson. A diferencia del método heterodino, cada longitud de onda es desplazada por una frecuencia diferente, típicamente  $f_1 = 40.0$  MHz y  $f_2 = 40.1$  MHz. Esta genera una señal con frecuencia  $f = (f_1 - f_2)$  que permite medir directamente la diferencia de fase de valor  $\Delta\phi_{12} = 4\pi L/\Lambda$ , que es ahora solamente sensible a la longitud de onda sintética.

La fuente de un interferómetro de múltiple-longitud de onda (MWI) debe producir un espectro de emisión apropiado que consista en varias longitudes de onda discretas y estabilizadas. Como hemos señalado anteriormente, el rango de no-ambigüedad está dado por la diferencia de frecuencia óptica. La estabilidad y la calibración de la fuente limitarán la exactitud absoluta de la medida. Por otra parte, la distancia máxima que se puede medir por MWI está limitada por la longitud de coherencia de la fuente. Además, la medida de la distancia en superficies ásperas está limitada por la energía de la fuente debido a la dispersión de la luz. El diseño y la realización de la fuente son así de una gran importancia, puesto que el funcionamiento del instrumento estará dado por sus características (coherencia, estabilidad, energía) (Salvadé, Y., 1999).

En lo que sigue analizamos una posible alternativa de interferometría absoluta también ba-



Frecuencia de emisión láser  
 $S_0 \rightarrow \omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$

Frecuencia de modulación  
 $\omega_m = \omega_m(t) \begin{cases} \omega_{m1} = \omega_m(t_1) \\ \omega_{m2} = \omega_m(t_2) \end{cases}$

Tiempos de tránsito  
 $S_1; S_2 \rightarrow \begin{cases} \tau_1 = 2L_{ref}/c \\ \tau_2 = 2L_x/c \end{cases}$

**Fig. 4. Esquema interferométrico de Michelson con modulación lineal de amplitud del láser con barrido de frecuencia en banda base**

sada en la modulación de la intensidad del haz láser pero en este caso directamente a través de la corriente del diodo láser, con una señal de frecuencia variable, es decir haciendo un "barrido en banda base". Aunque en alguna medida dicho método puede considerarse una variante de la interferometría absoluta superheterodina (por barrido o por múltiples longitudes de onda), presenta la importante diferencia que no requeriría múltiples fuentes láser o diodos láser especiales sintonizables, lo que puede tener un impacto positivo en la reducción de la complejidad y costo del instrumento. Algunos ensayos preliminares sobre un banco experimental de interferometría con diodo láser, desarrollado en el contexto de un Trabajo Final de Ingeniería de la Universidad de Mendoza, han mostrado que el método aquí presentado es realizable.

**Análisis del Concepto Interferométrico**

Partimos de un esquema interferométrico del tipo de Michelson, como se muestra en la Figura 4; a diferencia de la interferometría clásica supongamos aquí una modulación lineal de amplitud del láser (AM) con una frecuencia de "barrido"  $\omega_m = \omega_m(t)$ .

La emisión del láser  $S_0$  tiene la forma indicada por la ec. (3). Esta forma se preservará hasta arribar al divisor de haz, en el que se produce una reflexión parcial del haz hacia el reflector fijo (brazo de referencia), en tanto que la parte restante continúa su propagación hacia el reflector móvil o blanco (brazo de medición):

$$S_0 = I_0 \{ \text{sen } \omega_0 t + \frac{1}{2} \text{sen } (\omega_0 - \omega_m) t + \frac{1}{2} \text{sen } (\omega_0 + \omega_m) t \} \tag{3}$$

Una vez que los haces son reflejados por el reflector fijo y el reflector móvil, se produce en el divisor de haz un nuevo haz recombinado, dado por la suma de señales  $S_1 + S_2$  con retardos distintos  $\tau_1$  y  $\tau_2$  respectivamente:

$$S_1 = I_1 \{ \text{sen } \omega_0 (t - \tau_1) + \frac{1}{2} \text{sen } (\omega_0 - \omega_{m1}) (t - \tau_1) + \frac{1}{2} \text{sen } (\omega_0 + \omega_{m1}) (t - \tau_1) \} \tag{4 a}$$

$$S_2 = I_2 \{ \text{sen } \omega_0 (t - \tau_2) + \frac{1}{2} \text{sen } (\omega_0 - \omega_{m2}) (t - \tau_2) + \frac{1}{2} \text{sen } (\omega_0 + \omega_{m2}) (t - \tau_2) \} \tag{4 b}$$

El detector de señales producirá una señal  $S_d$  que es proporcional a la potencia lumínica recibida  $(S_1 + S_2)^2$  de forma que:

$$S_d = (S_1 + S_2)^2 = S_{12} + S_2^2 + 2 S_1 S_2 \tag{5}$$

siendo  $2S_1 S_2 = 2(a_1 + b_1 + c_1) (a_2 + b_2 + c_2)$  el término interferométrico buscado. Se puede conformar una tabla de componentes (Tabla 1), teniendo en cuenta que el producto  $S_1 S_2$  arroja términos del tipo  $\text{sen} \alpha \cdot \text{sen} \beta$ , que se expanden con la forma  $\frac{1}{2} \{ \cos (\alpha + \beta) - \cos (\alpha - \beta) \}$ .

El detector y su correspondiente amplificador constituyen por sí mismos un filtro pasabajo que elimina las componentes con frecuencias del orden de  $\omega_0$ ; esto nos permite descartar di-

<b>Término</b>	<b>Amplitud</b>	<b>Argumento tipo <math>(\alpha + \beta)</math></b>	<b>Argumento tipo <math>(\alpha - \beta)</math></b>
$a_1 \bar{a}_2$	$2 I_1 I_2$	$2\omega_0 t - \omega_0 (\tau_1 + \tau_2)$	$\omega_0 (\tau_2 - \tau_1)$
$a_1 b_2$	$I_1 I_2$	$2\omega_0 t - \omega_{m2} t - \omega_0 (\tau_1 + \tau_2) + \omega_{m2}\tau_2$	$\omega_{m2} t - \omega_0 (\tau_1 - \tau_2) - \omega_{m2}\tau_2$
$a_1 c_2$	$I_1 I_2$	$2\omega_0 t + \omega_{m2} t - \omega_0 (\tau_1 + \tau_2) - \omega_{m2}\tau_2$	$-\omega_{m2} t - \omega_0 (\tau_1 - \tau_2) + \omega_{m2}\tau_2$
$b_1 \bar{a}_2$	$I_1 I_2$	$2\omega_0 t - \omega_{m1} t - \omega_0 (\tau_1 + \tau_2) + \omega_{m1}\tau_1$	$-\omega_{m1} t - \omega_0 (\tau_1 - \tau_2) + \omega_{m1}\tau_1$
$b_1 b_2$	$\frac{1}{2} I_1 I_2$	$2\omega_0 t - (\omega_{m1} + \omega_{m2}) t + \omega_{m1}\tau_1 + \omega_{m2}\tau_2$	$-(\omega_{m2} - \omega_{m1}) t + \omega_{m1}\tau_1 - \omega_{m2}\tau_2 + \omega_{m1}\tau_1$
$b_1 c_2$	$\frac{1}{2} I_1 I_2$	$2\omega_0 t + (\omega_{m2} - \omega_{m1}) t + \omega_{m1}\tau_1 - \omega_{m2}\tau_2$	$-(\omega_{m1} + \omega_{m2}) t + \omega_{m1}\tau_1 - \omega_{m2}\tau_2 + \omega_{m1}\tau_1$
$c_1 \bar{a}_2$	$I_1 I_2$	$2\omega_0 t + \omega_{m1} t - \omega_0 (\tau_1 + \tau_2) - \omega_{m1}\tau_1$	$\omega_{m1} t - \omega_0 (\tau_1 - \tau_2) - \omega_{m1}\tau_1$
$c_1 b_2$	$\frac{1}{2} I_1 I_2$	$2\omega_0 t + (\omega_{m1} - \omega_{m2}) t + \omega_{m1}\tau_1 + \omega_{m2}\tau_2$	$(\omega_{m1} + \omega_{m2}) t + \omega_{m1}\tau_1 - \omega_{m2}\tau_2$
$c_1 c_2$	$\frac{1}{2} I_1 I_2$	$2\omega_0 t + (\omega_{m1} + \omega_{m2}) t + \omega_{m1}\tau_1 - \omega_{m2}\tau_2$	$(\omega_{m1} - \omega_{m2}) t + \omega_{m1}\tau_1 - \omega_{m2}\tau_2$

Tabla 1. Determinación de las componentes del término interferométrico  $2S_1 S_2 = 2 (a_1 + b_1 + c_1) (a_2 + b_2 + c_2)$

<b>N°</b>	<b>Término</b>	<b>Componente</b>
1	$a_1 a_2$	$2 I_1 I_2 \cos [\omega_0 \delta\tau]$
2	$a_1 b_2 + a_1 c_2$	$2 I_1 I_2 \cos [\omega_0 \delta\tau] \cos [\omega_{m2} (t - \tau_2)]$
3	$b_1 a_2 + c_1 a_2$	$2 I_1 I_2 \cos [\omega_0 \delta\tau] \cos [\omega_{m1} (t - \tau_1)]$
4	$b_1 b_2 + c_1 c_2$	$I_1 I_2 \cos [\omega_0 \delta\tau] \cos [\delta\omega_m (t + \tau_1) + \omega_{m2} \delta\tau]$
5	$b_1 c_2 + c_1 b_2$	$I_1 I_2 \cos [\omega_0 \delta\tau] \cos [(\omega_{m1} + \omega_{m2}) (t - \tau_1) - \omega_{m2} \delta\tau]$

**Tabla 2. Componentes agrupadas a la salida del detector del término interferométrico  $2S_1 S_2 = 2 (a_1 + b_1 + c_1) (a_2 + b_2 + c_2)$**

chas componentes y reagrupar términos según la relación trigonométrica  $\cos(\alpha+\beta)\cos(\alpha-\beta) = 2 \cos\alpha \cos\beta$ . Haciendo además  $\delta\tau = \tau_2 - \tau_1$  y  $\delta\omega_m = \omega_{m1} - \omega_{m2}$  obtenemos la Tabla 2.

Un aspecto de interés inmediato, que resulta de la Tabla 2, está dado por el hecho que todas las componentes (incluso la primera que es un nivel de continua) tienen amplitudes que dependen de la fase diferencial  $\omega_0 \delta\tau$  (como corresponde a la interferometría relativa clásica), con lo cual puede rescatarse la información de posición relativa del espejo móvil con un orden de precisión micrométrico. El otro aspecto de interés es que las cuatro últimas componentes poseen factores de tiempo que dependen en forma diversa de la frecuencia de modulación, además de depender de los tiempos de retardos correspondientes. Para una mejor visualización y comprensión de la información contenida por dichos factores de tiempo, se han representado en la Figura 5 (para un conjunto de parámetros cualquiera), no sólo los factores del tiempo relevantes de las últimas cuatro componentes de la Tabla 2, sino también sus composiciones parciales y total.

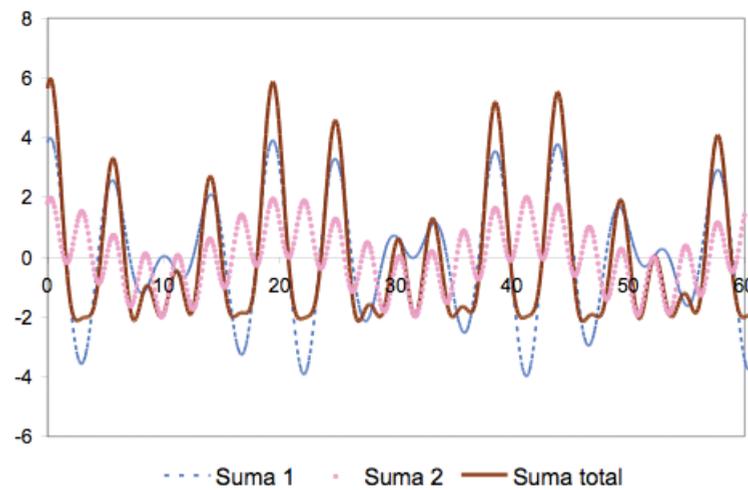
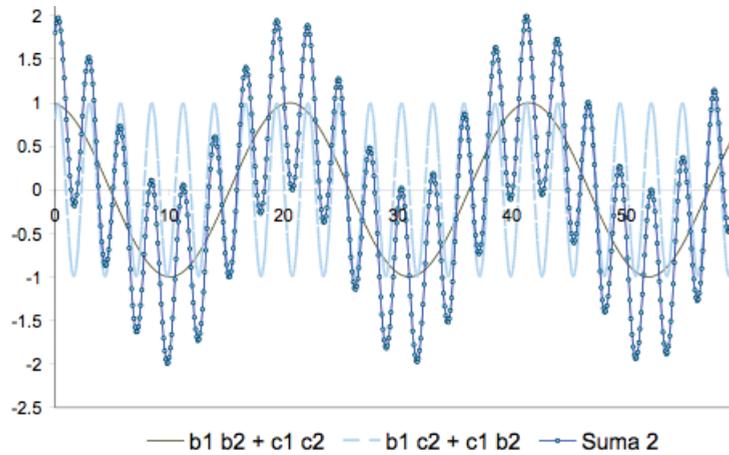
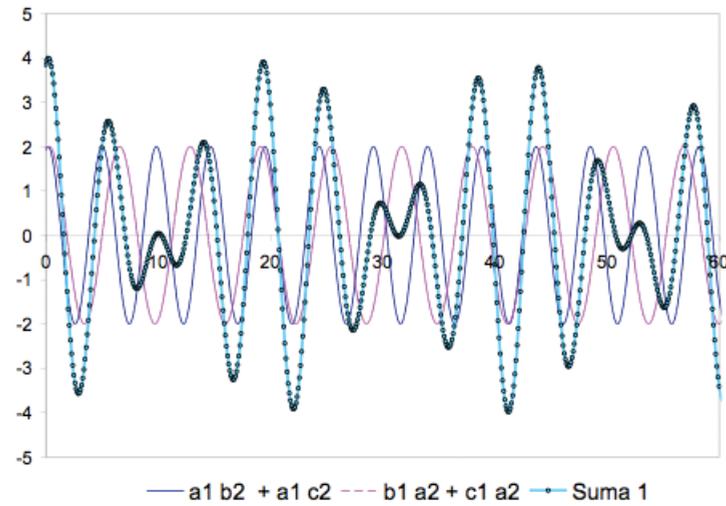
A pesar que la composición total de las últimas cuatro componentes (último gráfico de la Fig. 5) posee gran riqueza, hay información redundante. Es evidente que la envolvente de la suma de la segunda y tercera (gráfico superior de la Fig. 5) es el factor de tiempo de baja frecuencia correspondiente a la cuarta componente (gráfico intermedio de la Fig. 5). A primera vista surge que para rescatar información relevante de la posición del espejo móvil, esta vez con unidades de medida mucho mayores (órdenes de resolución milimétricos y centimétricos), se-

ría suficiente con aislar la cuarta componente, o eventualmente detectar la suma de la segunda y tercera; pero esto trae ventajas y desventajas que hay que apuntar en cada caso.

La primera opción (aislar la cuarta componente) puede realizarse mediante un filtro pasabajo, a la salida del detector, con frecuencia de corte superior igual a la frecuencia diferencial  $\delta\omega_m = |\omega_{m1} - \omega_{m2}|_{\max}$ , determinada por la longitud máxima  $Lx_{\max}$  a medir. Esta opción es simple de implementar, ya que la separación de frecuencia con las componentes de mayor frecuencia es grande. Sin embargo, tiene eventualmente el inconveniente de su pobre separación con la componente de continua, la cual además puede contener ruido de muy baja frecuencia, producto de las vibraciones del blanco, que pueden confundirla con la componente de señal que deseamos detectar.

La segunda opción también es posible colocando un filtro pasabanda cuya frecuencia de corte inferior sea algo menor a  $\omega_{\min}$  y cuya frecuencia de corte superior sea apenas superior a  $\omega_{\max}$ , aunque además debe cumplir que  $2\omega_{\min}$  sea suficientemente menor a  $\omega_{\max}$ . Este requerimiento algo estricto, restringirá en alguna medida la operación del instrumento, pero tiene la ventaja de su buena separación con la continua.

Ya que las primeras dos opciones poseen ciertas limitaciones, no podemos descartar totalmente la propia posibilidad de utilizar la señal completa; el último gráfico muestra que la componente de frecuencia  $\delta\omega_m$  también puede detectarse por el "conteo" de picos de frecuencia  $\omega_m$  entre dos picos de baja intensidad. Tomando las



**Fig. 5. Representación de componentes de la tabla 2 y su composición parcial y total**

precauciones apropiadas, este método reportaría la ventaja de ser insensible a la componente de continua sin introducir las restricciones a la operación de la segunda opción; la mayor desventaja de este método radicaría en el ancho de banda del amplificador del fotorreceptor, el que debería ser suficientemente grande comparado

con  $2\omega_{mmax}$  para evitar distorsión de fase entre componentes, conllevando un compromiso delicado entre ruido, estabilidad y ganancia.

Las tres opciones de detección de información en órdenes grandes de distancia se resumen en el cuadro comparativo (Tabla 3).

	<b>Método de detección</b>	<b>Condiciones</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
1	Componente de baja frecuencia: $\delta\omega_m$	Filtro pasabajo con frecuencia de corte $\omega_c =  \omega_{m1} - \omega_{m2} _{max}$	Simple y permite amplificadores de baja frecuencia	Separación pobre con la componente de continua con sensibilidad a vibraciones
2	Componente suma de frecuencias: $\omega_{m1}$ y $\omega_{m2}$	a) Filtro pasabanda con frec. de corte $\omega_{cinf} < 2\omega_{mmin}$ $\omega_{csup} > \omega_{mmax}$ b) Mantener una relación de excursión de barrido $2\omega_{mmin} \ll \omega_{mmax}$	Buena separación con la componente de continua, que lo hace insensible a vibraciones e iluminación externa	La condición (b) restringe algo la operación del instrumento. Requiere amplificador de ancho de banda grande
3	Composición total	Ancho de banda del amplificador $BW > 2\omega_{mmax}$	Permite detección directa de distancia por conteo de picos	Amplificador de ancho de banda grande

**Tabla 3. Comparación entre posibles técnicas de detección en órdenes grandes de distancia**

En la Figura 6 observamos el esquema optoelectrónico general de un instrumento interferométrico como el discutido. Para evaluar algunas otras condiciones y elementos propios del método propuesto, analizaremos aquí la primera opción que consiste en detectar la frecuencia diferencial  $\delta\omega_m = \omega_{m1} - \omega_{m2}$ .

Para ello comencemos suponiendo que la frecuencia de modulación es producida por un generador de barrido controlado por una rampa con período  $T_B$  (señales 1 y 2 de la Figura 3), esto es:

$$\omega_m(t) = (\omega_{mmax} - \omega_{mmin}) t / T_B + \omega_{mmin}$$

válido para  $0 \leq t < T_B$  (6)

Esto implica que las frecuencias de modulación de las señales provenientes de los brazos de medición y de referencia que se reencuentran en el divisor de haz serán:

$$\omega_m 1(t) = (\omega_{mmax} - \omega_{mmin})(t - \tau_1) / T_B + \omega_{mmin}$$

(7 a)

$$\omega_m 2(t) = (\omega_{mmax} - \omega_{mmin})(t - \tau_2) / T_B + \omega_{mmin}$$

(7 b)

de modo que:

$$\delta f_m = f_{m1} - f_{m2} = (f_{mmax} - f_{mmin})(\tau_2 - \tau_1) / T_B = (\Delta f_m / T_B) \cdot \delta\tau$$

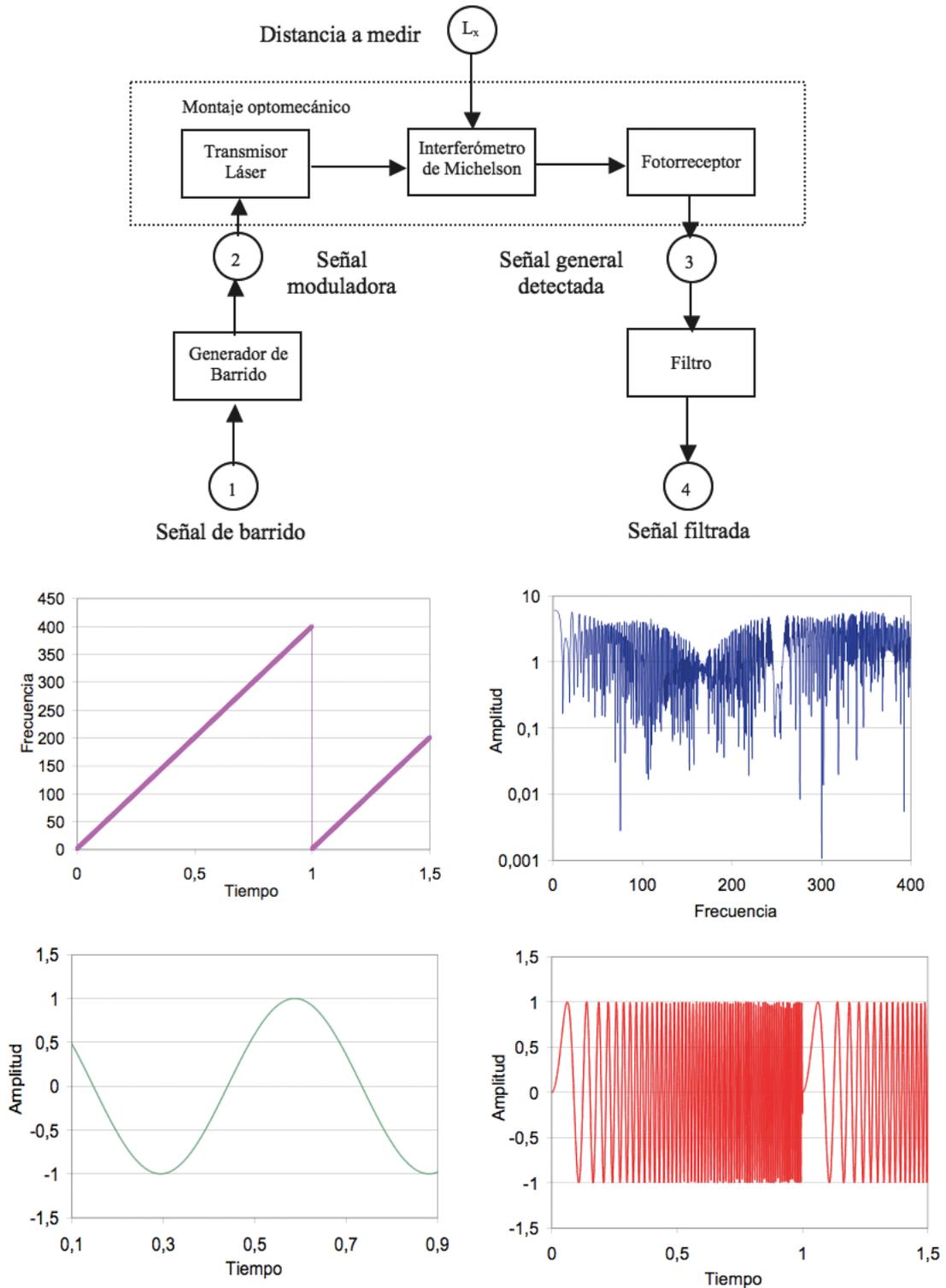
(8)

con  $\Delta f_m = f_{mmax} - f_{mmin}$  el ancho de barrido de modulación y  $\delta\tau = \tau_1 - \tau_2$  el retardo diferencial entre señales. Ya que  $\tau_1 = 2 L_{ref} / c$  y  $\tau_2 = 2 L_x / c$  tenemos que:

$$\delta f_m = (2 \Delta f_m / T_B c) \cdot \delta L$$

(9)

con  $\delta f_m$  la frecuencia diferencial expresada en Hz.



**Fig. 6. (Arriba) Diagrama general de bloques de un instrumento interferométrico con sus distintas partes. (Abajo) Señales simuladas en los puntos notables del instrumento para una cierta distancia a medir, y según el siguiente orden: Superior Izquierda (1)- Rampa de Barrido; Inferior Izquierda (2)- Señal de modulación con frecuencia variable; Superior Derecha (3)- Espectro de frecuencia (amplitudes) de la señal interferométrica detectada (completa); Inferior Derecha (4)- Componente de baja frecuencia de la señal interferométrica.**

<b>Parámetros</b>	$\Delta f_m$ [Hz]	1,00E+08
	$T_s$ [seg]	1,00E-06
	$c$ [m/seg]	3,00E+08

$\delta L$ [m]	$\delta f$ [Hz]	<b>Duración</b> [seg]
1	6,67E+05	3,00E-06
0,1	6,67E+04	3,00E-05
0,01	6,67E+03	3,00E-04
0,001	6,67E+02	3,00E-03
0,0001	6,67E+01	3,00E-02
0,00001	6,67E+00	3,00E-01

**Tabla 4. Estimación de la frecuencia diferencial y duración de la medida para distintos órdenes de resolución, con ciertos parámetros de barrido**

A los fines de tener una idea de los límites del método, se muestra en la Tabla 4 una estimación por medio de la ecuación (9) de la frecuencia diferencial y duración de la medida para distintos órdenes de resolución, tomando ciertos parámetros de barrido que son en principio practicable; la duración de la medida se ha estimado como el doble del período de la frecuencia diferencial.

Como puede observarse en la parte inferior de la Tabla 4, distintos ordenes de resolución que van de 1 metro hasta 10  $\mu\text{m}$  producen frecuencias diferenciales que se encuentran comprendidas entre 700 kHz y 7 Hz, cuando producimos un barrido de frecuencia de 100 MHz en un tiempo de 1  $\mu\text{s}$ .

Aunque este amplísimo rango de discriminación resulta muy interesante y conveniente, no hay que perder de vista que va acompañado de una cierta limitación en la duración de la medición, tanto más pequeño sea el orden de resolución más grande será el tiempo necesario para determinar la medida. Por ejemplo, para determinar un orden de medida de 10  $\mu\text{m}$  se requeriría alrededor de 300 mseg o más. Además, la determinación del orden inferior en

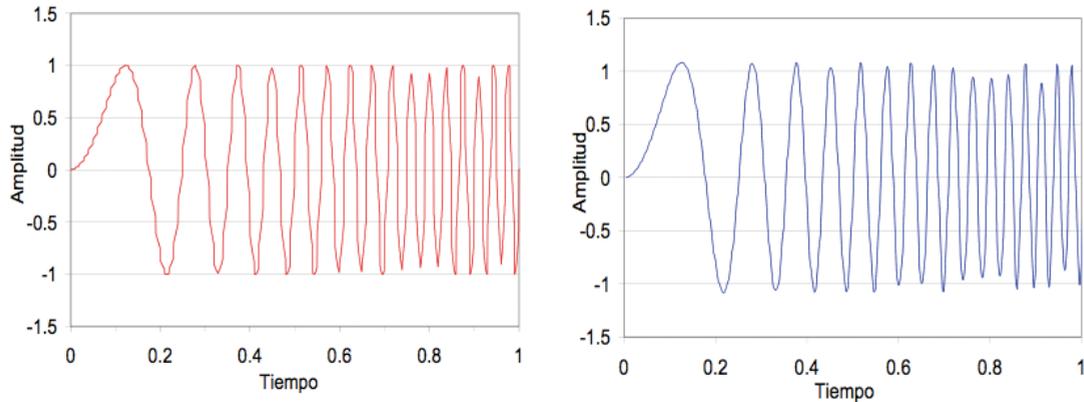
distancias máximas del orden del metro representa una resolución de medida de frecuencia de alrededor de  $10^{-6}$  (esto es determinar 1 Hz en 1 MHz).

Hay otro punto crítico a tener en cuenta: la Tabla 4 está construida con un generador de barrido que es idealmente lineal y muy veloz. Esto exigiría un PLL (Phase Lock Loop) que enganche con precisiones y rapidez inalcanzables con circuitos analógicos.

Hay técnicas de barrido, sin embargo, que se utilizan en equipos especiales (en general de alto costo), que son muy rápidas<sup>2</sup>. En general estos desarrollos se basan en técnicas DDS (Direct Digital Synthesis), que ahora pueden reducirse en costo utilizando integrados de alta performance.

Un caso de DDS integrado es el AD9858 (Analog Devices), de 32 bits con reloj de hasta 2 GHz, que permite cambios de frecuencia arbitrarios (hasta un máximo de 425 MHz) en un tiempo mínimo de 8 ns; esto permitiría realizar un barrido por pasos de 1 MHz entre 1 y 100 MHz en un tiempo algo menor que 1  $\mu\text{seg}$ . Aunque no es estrictamente lineal, con

<sup>2</sup> Por ejemplo el HP / Agilent 8340B Synthesized Sweep Generator permite cambios de frecuencia del orden de 10 GHz en menos de 35 mseg.; otro ejemplo es el Espectrómetro de Microondas por Transformada de Fourier (FTMW) de Pate Lab que utiliza un generador de ondas arbitrarias (AWG) de barrido lineal muy rápido del orden de 1GHz en 2 ns.



**Fig.7. (Izq.): Simulación de barrido por pasos de 1 MHz desde 1 hasta 100 MHz en un tiempo de 1  $\mu$ s y su comparación con un barrido lineal. (Der.): La misma onda reconstituida por un filtro pasabajo de alrededor del doble de la frecuencia máxima.**

un filtro reconstituyente adecuado se puede obtener un barrido casi sinusoidal y bastante linealizado (Fig.7).

También relacionado con el barrido, está el problema de las fases de las ondas en el fin y reinicio de la secuencia, y cómo afecta esto la propia medición de la frecuencia diferencial; hay que tener en cuenta que ésta será en general bastante más baja que la frecuencia de barrido, y por lo tanto en menos de un ciclo de la misma pueden varios inicios y fines de barrido. La Figura 8 muestra una simulación con los valores presentados en la tabla 4, para distancias diferenciales ( $L_x - L_R$ ) de orden milimétrico, centimétrico y métrico. Nótese las discontinuidades de fase, que se presentan en la componente de baja frecuencia en los instantes correspondientes a los fines e inicio de barrido; cuanto más alta es la frecuencia diferencial (órdenes mayores), haciéndose comparable con la frecuencia de barrido ( $1/T_B$ ), más notable es el efecto distorsivo. Idealmente, un filtro pasabajo con un tiempo de integración de alrededor de 1,5 veces el período de barrido, podría reconstituir la señal bastante bien, aunque desde luego introduciendo el retardo correspondiente.

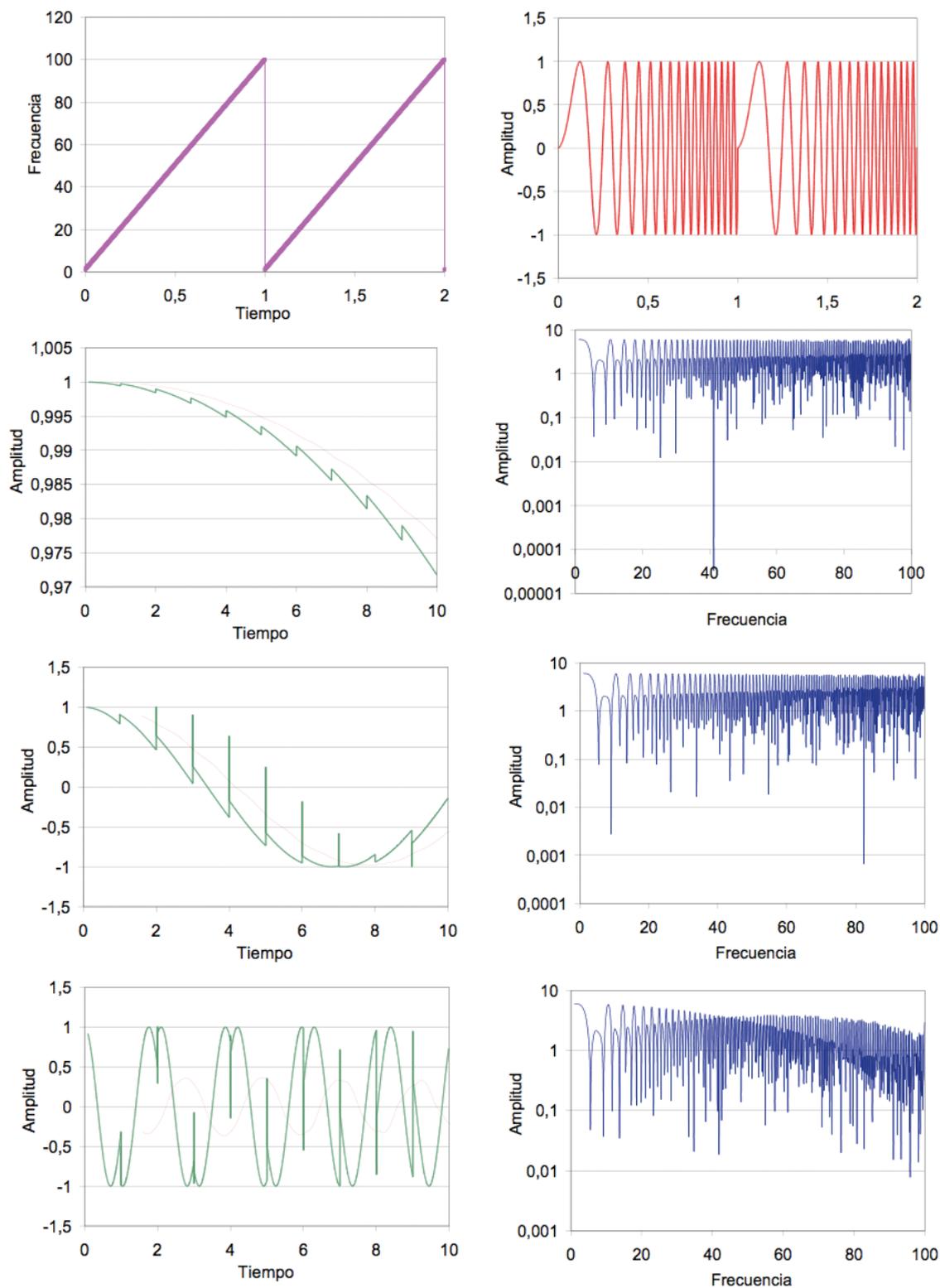
Algunos de estos aspectos, con relación a la posible utilización de un DDS integrado como el AD9858, han sido ensayados en el contexto de otro Trabajo Final de Ingeniería independiente (Guilló Márquez R.F et al., 2012), obteniéndose los siguientes resultados:

Rango de frecuencias: 50 kHz- 420 MHz

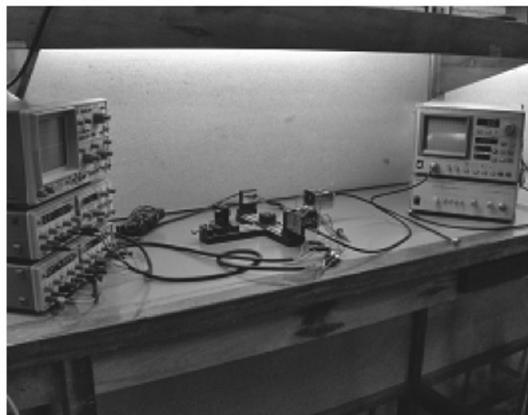
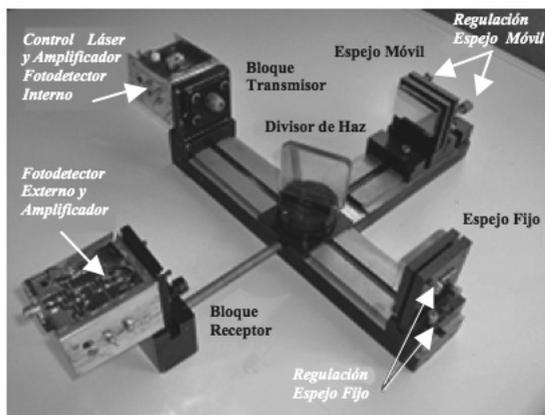
Resolución de frecuencias: 1 Hz  
 Nivel de salida máximo: 0.5 dBm (ajustable)  
 Planicidad de salida: 2 dB  
 Impedancia de salida: 50  $\Omega$   
 Velocidad de salto de frecuencia: 125 MHz (in incremento por cado 8 ns)  
 Transitorio de fase: fase continua  
 Armónicos: menores a -30 dB  
 Espurios de salida: menores a -32 dB  
 Respuesta en frecuencia de la entrada de disparo: 1kHz (principalmente debido a un retardo de reinicio de barrido de 1ms)

Como puede apreciarse, en general, el AD9858 podría ser un candidato adecuado para la implementación de la unidad de barrido; el principal problema observado es el retardo de reinicio de barrido, aunque ello sólo sería una limitación en el caso que éste se reconfigurara. De cualquier forma, tanto la influencia de los errores de fase que se producen durante un barrido como a su reinicio merecen ser investigados con profundidad en relación a su aceptabilidad para el método interferométrico aquí propuesto.

En la Figura 8 también se muestran los espectros de frecuencia de amplitudes de la señal interferométrica completa y cómo estos varían en su composición en los distintos órdenes de distancia medidos. Este fenómeno pudo ser observado con el montaje que se muestra en la Figura.9, que corresponde a un Banco Experimental de Interferometría desarrollado en el contexto de una Tesis de Grado en al Facultad de Ingeniería de la Universidad de Mendoza (Antonietti, G, 2006).



**Fig. 8. Simulaciones con  $TB= 1 \mu s$  y  $f_m$  entre 1 MHz y 100MHz para distintas distancias. De arriba hacia abajo: señal de barrido y modulación resultante; componentes de baja frecuencia (cruda y con filtro de  $\tau =1,5 \mu s$ ) y espectros de frecuencia (señal total) para diferencias de orden milimétrico, centimétrico y métrico respectivamente.**



**Fig.9. (Izq.): Banco Interferométrico Experimental realizado en el contexto de un Trabajo Final de grado en la Fac. de Ingeniería de la Univ. de Mendoza. (Der.): Ensayos de laboratorio utilizando un generador de barrido como modulación del láser y representación en analizador de espectro.**

La idea con la que fuera desarrollado dicho banco fue la de implementar una plataforma de bajo costo para ensayar, con fines académicos, distintas técnicas interferométricas y poder compararlas entre sí. En lo que respecta a la fuente de emisión, y tras una comparación de diodos láser ofrecidos como fuente para equipos de medición ópticos, fue elegido el Sanyo DL3147-165 de AlGaInP, que trae incorporado internamente un fotodetector PIN de monitoreo de potencia. El DL3147-165 trabaja a una potencia máxima de 7 mW, y en una longitud de onda de 650 nm (rojo). Tiene una baja corriente de umbral y una alta temperatura de trabajo, entregando 5 mW a 70°C. El fotodetector externo elegido fue un fotodiodo OSD15-E de Centronics con una buena respuesta en 650 nm y una capacidad de juntura entre 80 a 390 pF lo que permite una respuesta rápida. Para el ensayo en cuestión se desarrolló una modulación directa de la corriente del diodo láser, que permitía un barrido de alta frecuencia, y se dotó a los correspondientes fotorreceptores con amplificadores de gran ancho banda (se utilizaron Amplificadores Operacionales OPA657); el resultado fue un conjunto optoelectrónico (transmisor láser-fotorreceptor) con un ancho de banda cercano a los 100 MHz.

Cuando se modulaba el láser con el generador de barrido de un Analizador de Espectro de 2 GHz, en el contexto de un ensayo con los espejos retrorreflectores correspondientes, podía observarse claramente cómo variaba la composición espectral al variar la posición del espejo

móvil, ésta se manifestaba como una "cresta" en forma de onda con frecuencia y amplitud variable. Incluso con el espejo móvil fijo, podían observarse vibraciones mecánicas y hasta la reacción del espejo frente a las ondas acústicas producidas por la voz humana. Aunque esta observación tiene carácter cualitativo (debido a limitaciones de montaje propias de un modelo optomecánico "breadboard"), demuestra claramente que el principio de la Interferometría Absoluta por Barrido en Banda Base aquí analizado es una técnica viable y que merece los esfuerzos que se destinen a una mayor experimentación.

## Conclusiones

Se ha presentado y analizado un posible método de Interferometría Absoluta basado en la modulación directa de un diodo láser mediante un barrido de frecuencia en banda base de gran ancho de banda. Dicho método, que puede considerarse una variante del interferómetro de barrido así como del método superheterodino de múltiples longitudes de onda, presenta la ventaja de no requerir diodos láser sintonizables o múltiples fuentes láser, disminuyendo así el costo de la parte emisora.

Con un barrido lineal de 1 a 100 MHz en 1 useg. es posible obtener discriminaciones en una amplia gama de órdenes que van desde los 10  $\mu$ m hasta metros, sin eliminar por ello la posibilidad de realizar interferometría clásica en el orden submicrométrico. El generador de barrido pue-

de implementarse con un DDS integrado rápido (1 GSPS) de costo relativamente bajo y un filtro reconstituyente apropiado. Las discontinuidades de fase en la onda detectada, debido al inicio y fin de barrido, pueden en principio subsanarse con un filtro apropiado a la salida. La detección puede realizarse en banda angosta o en banda ancha, presentándose diversas ventajas y desventajas.

El principio de operación ha podido ser constatado cualitativamente en observaciones realizadas en un Banco Interferométrico Experimental, desarrollado en la Facultad de Ingeniería en el contexto de una Tesis de Grado de Ingeniería. Éstas demuestran que el método presentado es viable y digno de mayor investigación y desarrollo.

## Referencias

- ANTONIETTI, G. 2006, Estudio Teórico-Práctico para la Implementación de un Banco Interferométrico Experimental con Diodo Láser- Tesis de Grado de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones en la Fac. de Ingeniería de la Universidad de Mendoza. Agosto 2006, Mendoza, Argentina.
- GUILLÓ MÁRQUEZ, R.F.; PULIAFITO C.M.; ALIQUÓ, P.G.; PULIAFITO, J.L., 2012 Implementación de un sintetizador de banda ancha mediante tecnología DDS- Proyecciones Vol. 10 N° 2, octubre 2012. Universidad Tecnológica Nacional, Buenos Aires, Argentina.
- Laser Components GmbH - Application note p65: Non-Contact Laser Distance Measurement.
- SALVADÉ, Y., 1999, Distance Measurement by Multiple-Wavelength Interferometry – Thèse à la Faculté des Sciences, Institut de Microtechnique - Université de Neuchâtel.



# Modelo elemental de flujo de un fluido viscoso elástico. El glaciar Bahía del Diablo. Parte II\*

Néstor O. Rotstein<sup>1</sup>, Sebastián Marinsek<sup>1, 2</sup>, Mohamed J. Ríos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Medrano 951 (C1179AAQ), Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> Instituto Antártico Argentino- Balcarce 290 (CP 1064), Buenos Aires, Argentina

[nrotstein@cedi.frba.utn.edu.ar](mailto:nrotstein@cedi.frba.utn.edu.ar)

Recibido el 28 de Noviembre de 2013, aprobado el 27 de Diciembre de 2013

## Resumen

A lo largo de este trabajo nos abocamos al estudio detallado de la dinámica propia de un cuerpo de hielo de densidad variable que, apoyado sobre un lecho inclinado, se deforma y fluye debido a los esfuerzos derivados de su propio peso. Esta aproximación a primer orden del comportamiento general de un glaciar la realizamos suponiendo conocida la forma matemática del perfil transversal del lecho. Aplicamos los resultados obtenidos al glaciar "Bahía del Diablo" (isla Vega, Antártida Argentina) cuyo fondo ha sido registrado por medio de mediciones efectuadas con un radar de hielo. El fondo glaciario lo aproximamos por medio de funciones biyectivas, y de hecho en este caso aproximamos la parte del lecho que analizamos por una curva de la forma  $z = a^{-1}y^{3/2}$ . Suponemos que la variación de densidad del hielo en profundidad es una función lineal. Las diferencias que existen entre los valores calculados y los valores medidos en el glaciar podrían deberse a la velocidad de la base del glaciar, que posiblemente responde a mecanismos de deslizamiento que no habremos de contemplar en el modelo.

**PALABRAS CLAVE:** FLUJO MÁSSICO - FLUIDOS - VISCOELASTICIDAD - GLACIAR

## Abstract

Throughout this paper we focus the detailed study of the dynamics of a large body of ice of non-uniform density that, owing to the stresses produced by its own weight, deforms and flows over an inclined bed. This first-order approximation to the overall behavior of a glacier is achieved by assuming that the mathematical profile of the glacier bed is known. We apply the formalism to "Bahía del Diablo" glacier (Vega island, located in the Argentinean sector of Antarctic) whose bed profile was derived from measurements made by means of a portable radar. The part of the glacier bed that we shall analyze is approximated by a bijective function, in this case a curve of the form  $z = a^{-1}y^{3/2}$ . We introduce ice density variations through a linear function. Surface velocities were also measured *in situ*. We find differences between measured and calculated values, which likely arise from glacier base sliding velocity, a mechanism that we do not consider in this work.

**KEYWORDS:** MASS FLUX - FLUIDS - VISCOELASTICITY - GLACIER

\* El presente trabajo se desarrolla en el marco de un PID denominado "Detección de cambios de patrones de radiación medioambientales", en el ámbito de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, de la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional.

## Introducción

La evolución de las masas glaciarias se halla directamente emparentada con los cambios climáticos que se producen a nivel global en el planeta. De hecho, la ablación de masas glaciarias es una medida fuertemente correlacionada con el calentamiento global de la atmósfera.

Sin embargo, la elevación de la temperatura del aire a nivel global no implica necesariamente un incremento de pérdida de masa a nivel local. De hecho, si bien pocos, algunos glaciares alrededor del planeta han mostrado un balance de masa positivo (Servicio Mundial de Monitoreo de Glaciares (WMGS), 2013), sólo por usarlo como referencia diremos que el glaciar Perito Moreno no ha presentado grandes cambios en los últimos años, en tanto que los glaciares de la Península Antártica han experimentado en los últimos 50 años un marcado retroceso (Cook *et al.*, 2005; Cook y Vaughan, 2010).

El aspecto a destacar de los glaciares antárticos es su marcada sensibilidad al cambio climático. Esta característica los transforma de por sí en indicadores fieles e inmediatos de las variaciones climatológicas regionales y, por extensión, de los cambios a nivel global, de donde se desprende la necesidad del seguimiento permanente de la evolución de sus balances de masa.

Sin embargo, a las dificultades generadas por accesos riesgosos, difíciles y limitados sólo a los veranos, se le suma la falta de un modelo detallado de la manera en que actúan e interactúan las diferentes variables climáticas en la evolución de cualquier glaciar. Por lo pronto, lo más que cabe, posiblemente, sea medir *in situ* la mayor cantidad de variables asociadas al problema, y procurar un modelo dinámico de deslizamiento que haga uso de (y eventualmente acople) los valores medidos.

Si bien es de esperar que la dinámica de cada glaciar se halle directamente correlacionada con su entorno (porque toda variación de las condiciones climatológicas y atmosféricas habrá de afectar directa o indirectamente el comportamiento del sistema completo) también es esperable que bajo condiciones similares evolucionen de manera análoga, esto es, dejadas de lado las características del medio

circundante, en términos generales la dinámica debería depender sólo de la masa del glaciar y de la topología del terreno.

En esta línea se inscriben las diversas aproximaciones que tienden a simplificar el tratamiento general de la evolución de glaciares (véase por ejemplo Oerlemans, 2001; Cuffey y Paterson, 2010). En este artículo continuamos la línea de trabajo introducida en un artículo anterior (Rotstein y Marinsek, 2013, de aquí en más RM2013) que consiste en definir matemáticamente el perfil del lecho del glaciar a partir de las imágenes de radar obtenidas por uno de nosotros (S. Marinsek) caminando sobre la superficie del glaciar, en este caso el Bahía del Diablo, en la Península Antártica. El perfil del lecho lo aproximamos por una función biyectiva de las variables espaciales perpendiculares a la dirección del flujo. A la par, y abandonando la hipótesis de densidad constante, permitimos eventualmente pequeñas variaciones en la densidad de masa del hielo glaciario con la profundidad, que habremos de modelizar como lineales (porque nada hay en la dinámica del hielo que indique que la densidad se incrementa de manera más complicada).

Con estas premisas en mente, habremos de presentar en primer lugar, el tratamiento general del problema. Las ecuaciones dinámicas resultan en un conjunto de ecuaciones que, en principio y a la luz de las simplificaciones que proponemos, se reducen a una ecuación diferencial para los elementos de la parte deviatorica del tensor de esfuerzos. El tratamiento matemático de esta ecuación requiere en general de dos integraciones de las variables dinámicas que dependen de la particular forma funcional que resulte para el esfuerzo en la dirección de avance del glaciar. Por esta razón no cualquier perfil que se proponga es capaz de mantener el problema en un nivel matemático tratable, aunque siempre debe tratarse de una función plausible, consistente con los perfiles de lechos conocidos. En la siguiente sección presentaremos la forma del perfil del lecho de un sector del glaciar Bahía del Diablo y diversas aproximaciones propuestas.

Posteriormente, en el Análisis dinámico habremos de estudiar el comportamiento general del flujo suponiendo el perfil propuesto ( $z=ay^{3/2}$ ) y dejaremos para las Conclusiones la comparación de los resultados obtenidos con diferentes perfiles, para el análisis de las implicaciones

de esta formulación y para la discusión de sus resultados.

### Tratamiento general

Un glaciar se comporta como un fluido de tipo plástico, viscoso, sometido a esfuerzos de tensión y de cizalladura, los que en definitiva gobiernan su evolución dinámica. El glaciar evoluciona por deformación de la estructura cristalina del hielo que lo forma, y en función de su elevadísimo coeficiente de viscosidad  $\eta$  (de alrededor de  $10^{13}$  Pa s) lo trataremos como un fluido no newtoniano comparativamente lento, con velocidades del orden de entre 1 a 100 m/año.

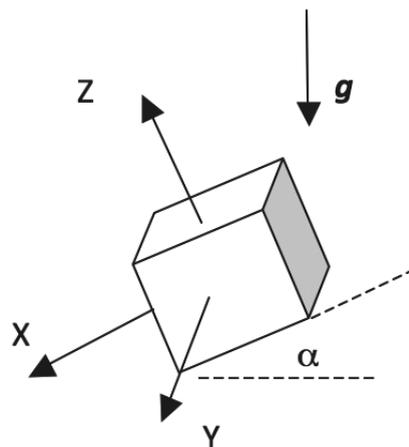
Aun cuando un glaciar fluye viscosamente, su enorme masa hace esperable que en el lecho el hielo puede alcanzar el punto de fusión (sea por fricción, por calentamiento geotérmico, combinación de ambos factores o algunos otros que se han propuesto, véase por ejemplo Liboutry, 1979; Iken, 1981, Fowler, 2010) y en tal caso no sólo derrama sino que además desliza. De esta manera no existiría un único régimen sino que habría que acoplar ambos, el de deformación y el de deslizamiento, en la capa límite de fusión. Los aspectos matemáticos de este tratamiento, formidables en cuanto a su complejidad, por un lado no están bien comprendidos y por el otro nos apartarían de nuestro objetivo central, de modo que por el momento obviaremos su tratamiento. Por lo demás, es posible que la densidad del hielo sufra ligeras variaciones en profundidad, o que exista alguna región en la que la viscosidad pueda ser razonablemente considerada independiente de las tensiones y los esfuerzos de corte, esto es, que localmente se comporte como un fluido newtoniano (Fontelos, Muñoz y Schiavi 2007). Nosotros habremos de introducir ligeras variaciones de la densidad con la profundidad del glaciar, variaciones que podrían simular la compresión gravitatoria.

Para ello, supondremos que el fluido viscoso derrama gravitatoriamente sobre una superficie inclinada, de manera tal que describiremos la evolución cuasiestacionaria del flujo ( $\partial/\partial t = 0$ ) en el sistema de ejes cartesianos XYZ de la Figura 1, orientados en la dirección X del flujo. Obsérvese que la dirección del vector aceleración gravitatoria ya no coincide localmente con el eje Z, sino que forma un ángulo  $\alpha$  que

es precisamente el ángulo de inclinación del glaciar. Por lo demás, las ecuaciones de evolución dinámica serán en este caso:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = \nabla \underline{\sigma} - \rho \nabla G \quad (2)$$



**Fig.1: Sistema coordenado en el que se describe el modelo.**

donde  $\rho$  representa la densidad del fluido,  $\vec{U}=(u,v,w)$  es su velocidad,  $\sigma$  representa el tensor de esfuerzos y  $G$  el potencial gravitatorio. Obsérvese que en el sistema de coordenadas cartesianas propias que hemos adoptado, las componentes del vector  $\vec{U}$  se refieren a las velocidades en las direcciones  $x, y, z$ , respectivamente.

Definamos ahora los esfuerzos en términos de la parte deviatorica del tensor de esfuerzos en la forma:

$$\sigma_{ij}^{(D)} = \sigma_{ij} - P \bar{1} = \eta \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

donde  $P$  es la presión hidrostática,  $\bar{1}$  es la matriz identidad,  $[\sigma_{ij}^{(D)}]$  es la parte deviatorica del tensor y  $\eta$  la viscosidad del fluido. La expresión (3) puede escribirse en términos del tensor de la tasa de esfuerzos  $D_{ij}$  (Cuffey y Paterson, 2010) como:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

Como en (Rotstein y Marinsek, 2003, en adelante citado como RM2013), en lo que sigue supondremos que el flujo avanza uniformemente en la dirección X, sin deformaciones en las direcciones perpendiculares, restricciones que matemáticamente se traducen en las formas:

$$v = w = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

En términos de estas restricciones (que equivalentemente pueden pensarse como los vínculos  $\sigma_{yy}^{(D)} = \sigma_{zz}^{(D)} = \sigma_{zy}^{(D)} = \sigma_{zx}^{(D)} = 0$ )

las componentes no nulas de la parte deviatorica del tensor resultan ser:

$$\sigma_{xy}^{(D)} = \eta \frac{\partial u}{\partial y} \quad (7)$$

$$\sigma_{xz}^{(D)} = \eta \frac{\partial u}{\partial z} \quad (8)$$

Como ya hemos adelantado, habremos de trabajar sobre perfiles del lecho de forma conocida, lo que equivale a decir que existe una relación definida entre las coordenadas perpendiculares a la dirección de avance del flujo, esto es, al menos localmente puede definirse una relación funcional  $z=\varphi(y)$  que determine el perfil del lecho. En tales condiciones es fácil definir las derivadas respecto de una variable en términos de la otra, esto es:

$$dy = \frac{\partial y}{\partial z} dz = f'_z dz \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{f'_z} \frac{\partial}{\partial z} \equiv F \frac{\partial}{\partial z} \quad (10)$$

Ahora podemos escribir las expresiones (7) y (8) en la forma:

$$\sigma_{xy}^{(D)} = \eta \frac{\partial u}{\partial y} = \eta F \frac{\partial u}{\partial z} \quad (11)$$

$$\sigma_{xz}^{(D)} = \eta \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{F} \sigma_{xy}^{(D)} \quad (12)$$

y desarrollar las ecuaciones (1) y (2) en sus

componentes no nulas (los detalles pueden verse en RM2013):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xz}^{(D)}}{\partial z} &= -\rho(z) g \operatorname{sen} \alpha - \frac{\partial \sigma_{xy}^{(D)}}{\partial y} \equiv \\ &\equiv (1 + F^2) \frac{d\sigma_{xz}^{(D)}}{dz} + [F F'] \sigma_{xz}^{(D)} = \\ &- \rho(z) g \operatorname{sen} \alpha \end{aligned} \quad (13)$$

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho(z) g \cos \alpha \quad (14)$$

En las expresiones (10) y (11) hemos escrito  $\rho(z)$  porque como en RM2013 habremos de trabajar con una función de densidad de masa, perturbada a primer orden, en la forma:

$$\rho(z) = \rho_0 \left[ 1 + \varepsilon \left( 1 - \frac{z}{H} \right) \right] \quad (15)$$

donde H es la altura del sistema, es decir, la variable que localmente define la cantidad de masa sobre el lecho del glaciar. Obsérvese que  $z=0$  representa el punto inferior del glaciar en contacto con el lecho, en tanto que  $z=H$  es el extremo superior del sistema, abierto a la atmósfera.

En principio, es posible resolver la expresión (13) para el esfuerzo  $\sigma_{xz}^{(D)}$  y calcular el perfil de velocidades resultante a partir de la ley general de flujo (Glenn, 1952; Nye, 1957)

$$D_{ij} = A(T) \tau^{n-1} \sigma_{ij}^{(D)} \quad (16)$$

donde A(T) es un coeficiente que depende de la temperatura (aunque en sistemas como los glaciares es constante en amplios rangos de temperatura), n es un factor constante empírico, del orden de 3 (Budd and Jacka, 1989) y  $\tau$  es el segundo invariante del tensor de esfuerzos, definido como:

$$\tau^2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij}^{(D)} \sigma_{ij}^{(D)} \quad (17)$$

que en nuestro caso se reduce a la forma:

$$\tau = \sqrt{(\sigma_{xy}^{(D)})^2 + (\sigma_{xz}^{(D)})^2} = \sqrt{1 + F^2} |\sigma_{xz}^{(D)}| \quad (18)$$

y resulta en una ecuación para velocidad de avance del glaciar (véase RM2013):

$$\frac{du}{dz} = 2A(T)(1 + F^2)^{\frac{n-1}{2}} (\sigma_{xz}^{(D)})^n \quad (19)$$

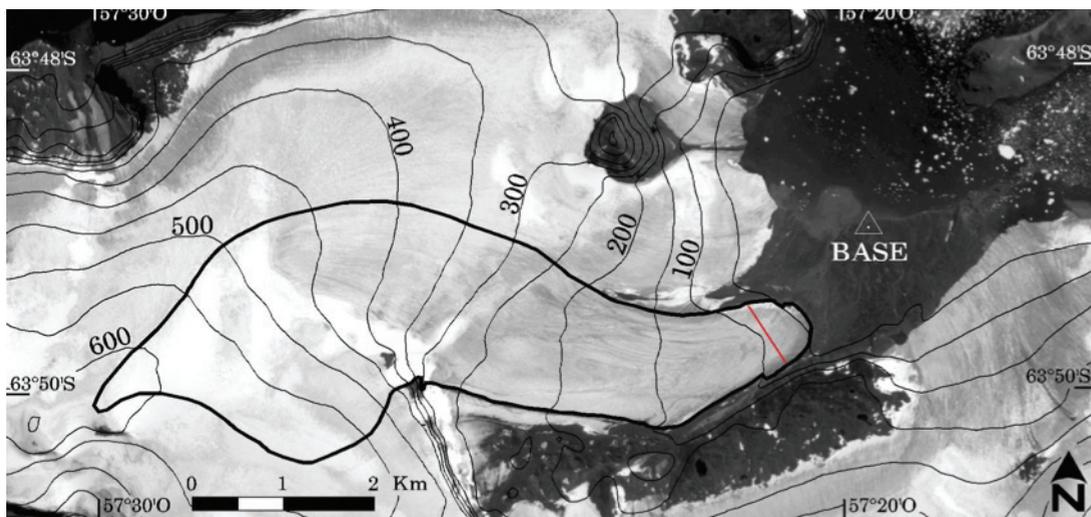
El procedimiento consiste entonces en resolver la ecuación (13) para la componente  $\sigma_{xz}$  y, luego, introducir la solución en la expresión (19) para integrar la función velocidad en términos de la profundidad. Por ello es que no cualquier función parece admisible, o por lo menos no es manejable analíticamente. En la próxima sección discutimos estos detalles.

### El glaciar Bahía del Diablo

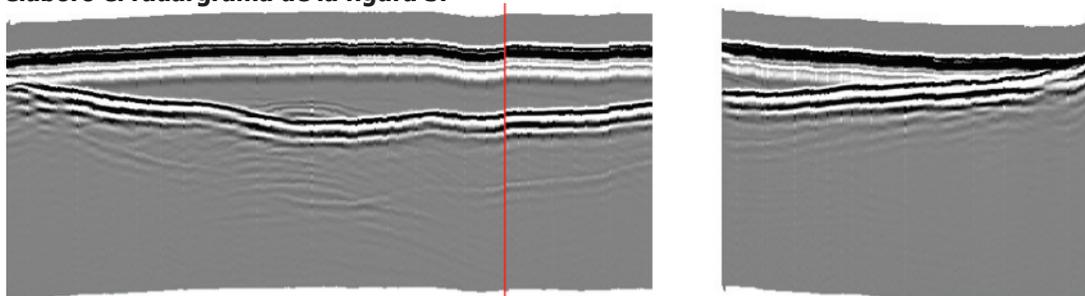
El glaciar Bahía del Diablo (de aquí en adelante GBD), cuya imagen satelital mostramos en

la Figura 2, tiene una superficie de aproximadamente 12 km<sup>2</sup> y se localiza en la isla Vega, al oeste de la Base Marambio. Una de las características salientes del GBD es que termina en tierra, y al ser comparativamente pequeño, aun dentro de las limitaciones logísticas propias del acceso y del clima, puede ser recorrido a pie para efectuar diversas mediciones (además de las que se registran con el instrumental permanente).

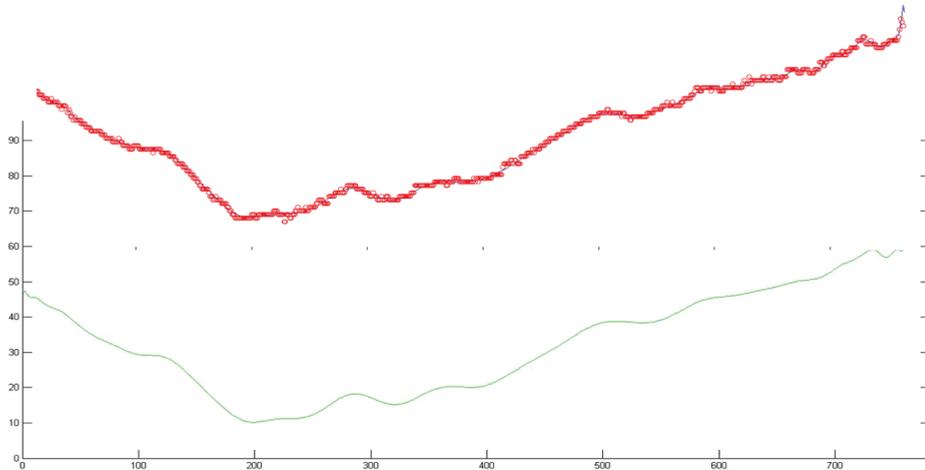
Por lo demás, el GBD no es un glaciar de desprendimiento, de manera tal que las variaciones de su balance de masa, pueden asociarse directamente con el cambio climático. Actualmente se trata del único glaciar de la Antártida que aporta datos detallados al Servicio de Monitoreo Mundial de Glaciares (*World Glacier Monitoring Service-WGMS*), auspiciado por la UNESCO. Este servicio recopila los datos de balance de masa de una amplia diversidad de



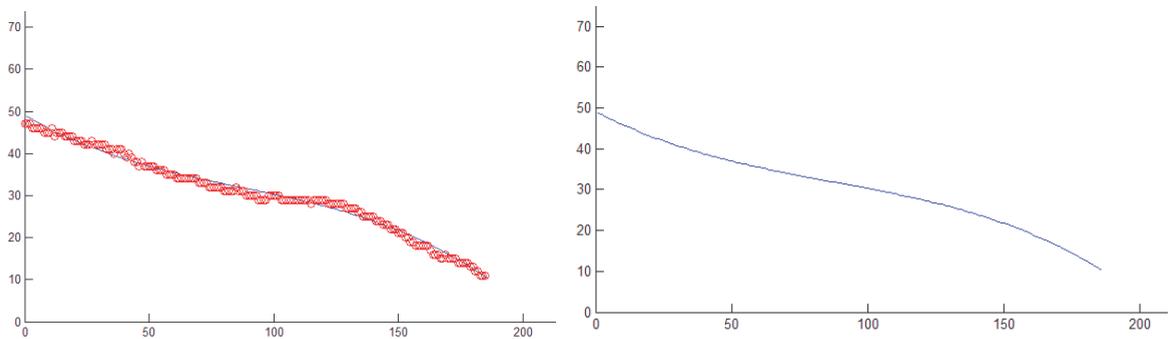
**Fig. 2:** Imagen satelital del sector de la isla Vega donde se encuentra el glaciar Bahía del Diablo (recortado con línea de trazo grueso negro). La línea roja que se muestra en la parte inferior es el camino seguido por S. Marinsek con un radar de mano en Marzo de 2013, sobre el que se elaboró el radargrama de la figura 3.



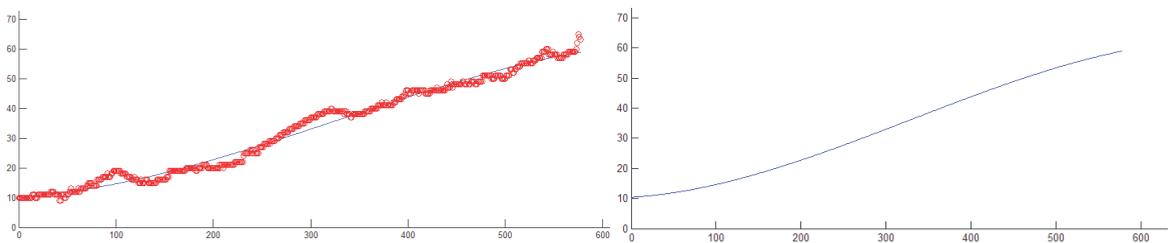
**Fig. 3:** Perfil de datos de radar tomados en la sección transversal de la lengua del GBD. Se pueden observar las reflexiones del lecho del glaciar. La línea roja indica la posición en la superficie de una baliza nivométrica. El sector en blanco se debe a una falla en el radar mientras se realizó la medición.



**Fig. 4: Perfiles del fondo en la región estudiada del GBD. La curva superior es la obtenida con radar (para detalles véase RM2013), y la inferior a la que resulta de interpolar un polinomio de grado 23.**



**Fig. 5: Perfiles real (a la izquierda) y aproximado por una función de tercer grado (a la derecha) del lado izquierdo del fondo del GBD en la región estudiada (la línea roja en la figura 3).**



**Fig. 6: A la izquierda el perfil real del lado derecho del fondo del GBD, y a la derecha el perfil aproximado por una función de tercer grado. El perfil corresponde a la región del GBD estudiada ( la línea roja en la figura 3).**

glaciares ubicados en distintos puntos de la Tierra, lo que permite evaluar el impacto del cambio climático en todo el planeta. La importancia de este tipo de resultados es tal que el WGMS de la Comisión Internacional de Nieve y Hielo (ICSI/IAHS) recolecta y publica datos estandarizados de glaciares como aporte al *Global Climate/Terrestrial Observing System (GCOS/GTOS)*,

establecido por la Organización Meteorológica Mundial (WMO), al Programa Medioambiente de Naciones Unidas (UNEP), al *International Council of Science (ICSU)* y al Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO.

A lo largo de la línea gruesa sobreimpresa en la parte inferior del GBD (en la punta de la

“bota”) uno de nosotros (S. Marinsek) tomó imágenes de radar del lecho de la lengua glaciar durante la última campaña de verano del Instituto Antártico Argentino (Febrero - Marzo 2013). El radargrama se muestra en la Figura 3, y del tratamiento de esas imágenes y su traducción en profundidades y espesores, resulta el perfil del lecho y las profundidades correspondientes, como el que mostramos en la Figura 4 (para los detalles véase RM2013). Obsérvese la línea vertical gruesa en el radargrama de la Figura 3: representa la localización de una baliza nivométrica por medio de la cual se ha medido el desplazamiento anual (la velocidad en superficie) y allí la profundidad corresponde a 73 m.

El primer paso para la aplicación de nuestro formalismo es transformar el perfil del fondo en una expresión matemática biyectiva. De hecho, el perfil completo ajusta por un polinomio de grado 23, como mostramos en la parte superior de la Figura 4, donde los puntos corresponden a los valores del fondo del lecho elegidos para la interpolación y la curva de trazo grueso al perfil obtenido con el radar. La curva inferior corresponde a la interpolación de los puntos del polinomio obtenido.

Una tal función supone un problema de formidable complejidad matemática, toda vez que calcular la velocidad del glaciar supone integrar esa función, elevarla al cubo y con los factores de la expresión (13) volver a integrarla. Por esa razón, elegimos trabajar con funciones aproximantes, como el perfil compuesto que mostramos en las Figuras 5 y 6. Se trata de dos funciones diferentes a derecha e izquierda, con el exclusivo y casi evidente vínculo de que deben empalmar en  $z=0$ . En ambos casos se trata de polinomios de grado 3.

Pero aún tratándose de polinomios de tercer grado, el tratamiento analítico sigue siendo muy complicado porque son completos. El objetivo de este trabajo es comparar los resultados que se obtienen con diferentes curvaturas, de modo tal que aun dentro de los errores propios de ajuste no proponemos funciones arbitrarias sino plausibles y, por lo demás, mantendremos siempre la posibilidad de comparación.

En este artículo investigamos el costado derecho del radargrama. Visto corriente arriba, a la derecha de  $y=200$  m el perfil puede aproximarse por una curva de la forma:

$$z = a^{-1}y^{3/2} \quad (20)$$

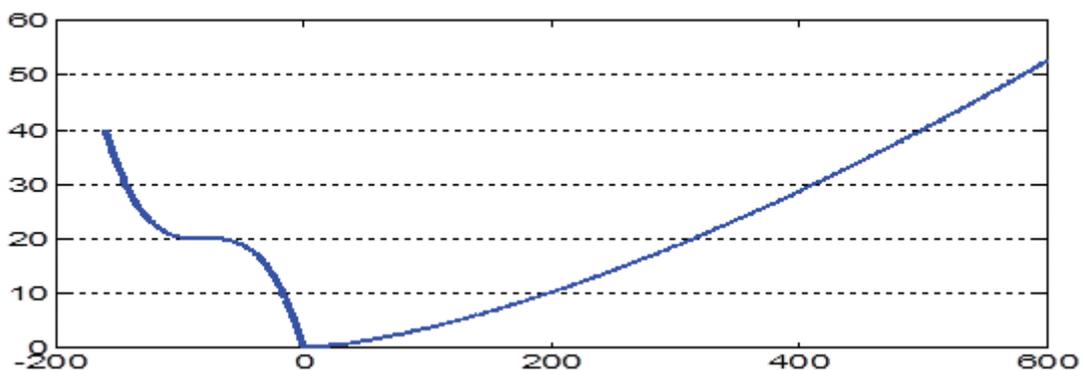
donde  $a$  es una constante cuyas unidades son  $m^{1/2}$ . La figura 7 muestra el perfil resultante con  $a^{-1}=0,00357 m^{-1/2}$ , al que por razones de completitud se le agregó la forma:

$$z = -3,9 \cdot 10^{-5}(y + 80)^3 + 20 \quad (-160 < y < 0) \quad (21)$$

para el lado izquierdo del fondo.

Comparando con la Figura 4 puede verse que el lado derecho empalma satisfactoriamente hasta 500 m de  $z=0$ , a partir de donde la diferencia llega a ser del 5% en exceso aproximadamente, respecto del perfil medido.

En el resto de este artículo trabajaremos el lado derecho expresado en la ecuación (20) y, como quedó dicho, compararemos al final los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos en RM2013.



**Fig.7: Curva resultante del empalme de las funciones (24) y (25) en  $z=0$  (que corresponde a la posición  $y=200$ m medidos desde el borde izquierdo del glaciar).**

## Análisis dinámico para $z = a^{-1}y^{3/2}$

Con el perfil definido en la expresión (20) resulta:

$$y = (az)^{2/3} \quad (22)$$

de modo tal que las expresiones para los esfuerzos resultan en las expresiones:

$$\sigma_{xy}^{(D)} = \eta \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{3}{2a^{2/3}} z^{1/3} \frac{\partial u}{\partial z} \quad (23)$$

$$\sigma_{xz}^{(D)} = \eta \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{2}{3} \frac{a^{2/3}}{z^{1/3}} \sigma_{xy}^{(D)} \quad (24)$$

que llevan a escribir la ecuación (13) en la forma:

$$\frac{d\sigma_{xz}^{(D)}}{dz} \left(1 + \frac{9}{4a^{4/3}} z^{2/3}\right) + \left(\frac{3}{4a^{4/3}} \frac{1}{z^{1/3}}\right) \sigma_{xz}^{(D)} = -\rho(z) g \operatorname{sen} \alpha \quad (25)$$

donde hemos escrito ahora derivadas totales en lugar de parciales porque  $z$  es la única variable espacial que sobrevive. La solución de la parte homogénea de la ecuación (25),  $\sigma_{xz,h}^{(D)}$ , es inmediata y resulta en la identidad:

$$\frac{d\sigma_{xz,h}^{(D)}}{\sigma_{xz,h}^{(D)}} = -\frac{b}{z^{1/3}} \frac{dz}{1 + 3bz^{2/3}} \quad (26)$$

donde hemos definido  $b=3/4a^{4/3}$ . La solución de la expresión (26) es inmediata en la forma:

$$\ln \sigma_{xz,h}^{(D)} = -\frac{1}{2} \ln \left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right) + cte \Rightarrow \Rightarrow \sigma_{xz,h}^{(D)}(z) = \frac{C}{\left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2}} \quad (27)$$

donde  $C$  es una constante a determinar con las condiciones de contorno. La solución particular  $\sigma_{xz,p}^{(D)}(z)$  de la ecuación (25) resulta en la forma:

$$\sigma_{xz,p}^{(D)}(z) = D \frac{C}{\left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2}} \quad (28)$$

donde el coeficiente indeterminado  $D$  se obtiene resolviendo la ecuación:

$$D' \frac{C}{\left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2}} = -\rho_0 g \operatorname{sen} \alpha \left[1 + \varepsilon \left(1 - \frac{z}{H}\right)\right] \quad (29)$$

es decir:

$$D = -\frac{B}{C} \left\{ \int \gamma dz \left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2} - \int \beta z dz \left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2} \right\} \quad (30)$$

donde  $B = \rho_0 g \operatorname{sen} \alpha$ ,  $\gamma = 1 + \varepsilon$  y  $\beta = \varepsilon/H$ . La primera integral, con el cambio de variables  $z^{1/3} = s$ , admite como primitiva a la función que se transforma en:

$$3\gamma \left\{ s \left(s^2 + \frac{1}{3b}\right)^{1/2} \left[ \frac{1}{4} \left(s^2 + \frac{1}{2(3b)}\right) \right] - \frac{1}{8(3b)^2} \ln \left( s + \left(s^2 + \frac{1}{3b}\right)^{1/2} \right) + cte \right\} \quad (31)$$

La segunda integral es casi inmediata y resulta en la expresión:

$$\frac{3\beta}{105} \left( 15 z^{4/3} - \frac{12}{3b} z^{2/3} + \frac{8}{(3b)^2} \right) \left( z^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{3/2} \quad (32)$$

En total, el coeficiente  $D$  resulta en la form

$$D = -\frac{B}{C} \left\{ 3(1 + \varepsilon) z^{1/3} \left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2} \left[ \frac{1}{4} \left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right) - \frac{1}{8(3b)} \right] - \frac{1}{8(3b)^2} \ln \left( \frac{z^{1/3} + \left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2}}{H^{1/3}} \right) - \frac{3\varepsilon}{105 H} \left( 15 z^{4/3} - \frac{12}{3b} z^{2/3} + \frac{8}{(3b)^2} \right) \left( z^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{3/2} \right\} \times \frac{C}{\left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2}} \quad (33)$$

La solución particular del término deviatórico que estamos trabajando resulta en consecuencia:

$$\sigma_{xz,p}^{(D)}(z) = - \frac{\rho_0 g \operatorname{sen} \alpha [G(z, \varepsilon)]}{\left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2}} \quad (34)$$

donde la función  $G(z, \varepsilon) = G_1(z, \varepsilon) + G_2(z, \varepsilon)$  está definida en la ecuación (33) por sus dos partes:

$$G_1(z, \varepsilon) = 3(1 + \varepsilon) \left\{ z^{1/3} \left( z^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{1/2} \left[ \frac{1}{4} \left( z^{2/3} + \frac{1}{3b} \right) - \frac{1}{8(3b)} \right] - \frac{1}{8(3b)^2} \ln \left( z^{1/3} + \left( z^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{1/2} \right) + cte \right\} \quad (35)$$

$$G_2(z, \varepsilon) = - \frac{3\varepsilon}{105H} \left( 15z^{4/3} - \frac{12}{3b} z^{2/3} + \frac{8}{(3b)^2} \right) \left( z^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{3/2} \quad (36)$$

Como ya se dijo, C es una constante a determinar, que podemos evaluar de inmediato a partir del hecho de que en la superficie del sistema ( $z=H$ ) el esfuerzo se reduce a la componente de la presión atmosférica a lo largo del eje x, esto es:

$$\sigma_{xz}^{(D)}(z = H) = P_0 \operatorname{sen} \alpha =$$

$$\frac{C - \rho_0 g \operatorname{sen} \alpha [G(H, \varepsilon)]}{\left(H^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2}} \quad (37)$$

de manera tal que resulta:

$$C = \left( P_0 \left( H^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{1/2} + \rho_0 g [G(H, \varepsilon)] \right) \operatorname{sen} \alpha = C_1 \operatorname{sen} \alpha \quad (38)$$

$$\tau = \sqrt{\left(\sigma_{xy}^{(D)}\right)^2 + \left(\sigma_{xz}^{(D)}\right)^2} =$$

Resolvamos ahora el perfil de velocidades. A partir de la expresión (16) de la ley de Glenn, y teniendo en cuenta que el invariante (18) en este caso se reduce a la forma:

$$\sqrt{1 + \frac{9}{4a^{4/3}} z^{2/3}} \left| \sigma_{xz}^{(D)} \right| \quad (39)$$

resulta (recordemos que trabajamos con  $n=3$ ):

$$\frac{du}{dz} = 2A(T) \left( 1 + \frac{9}{4a^{4/3}} z^{2/3} \right) \left( \sigma_{xz}^{(D)} \right)^3 \quad (40)$$

$$\frac{du}{dz} = 2A(T) \left( 1 + 3bz^{2/3} \right) \left\{ \frac{C - \rho_0 g \operatorname{sen} \alpha [G(z, \varepsilon)]}{\left(z^{2/3} + \frac{1}{3b}\right)^{1/2}} \right\}^3 \quad (41)$$

$$\frac{du}{dz} = \frac{2A(T)(3b)^{3/2}}{\left(1 + 3bz^{2/3}\right)^{1/2}} \operatorname{sen}^3 \alpha \left\{ C_1 - \rho_0 g [G(z, \varepsilon)] \right\}^3 \quad (42)$$

Analizaremos a continuación soluciones con densidad constante y luego analizaremos las soluciones con densidad de masa perturbada por medio de la expresión (15).

### 1 Soluciones con $\varepsilon = 0$

De manera casi evidente la expresión (36) es idénticamente nula y la ecuación (42) puede llevarse a la forma:

$$\frac{du}{dz} = \frac{2A(T)(3b)^{3/2}}{\left(1 + 3bz^{2/3}\right)^{1/2}} \operatorname{sen}^3 \alpha \left( \psi [P_0, H, 0] - \rho_0 g [G_1(z, 0)] \right)^3 \quad (43)$$

donde:

$$\psi [P_0, H, 0] = P_0 \left( H^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{1/2} + \rho_0 g [G_1(H, 0)] \quad (44)$$

es una constante que depende de los valores que se adopten para los diferentes parámetros involucrados, y  $G_1(z, 0)$  se refiere a la función

(34) con  $\varepsilon=0$ , esto es:

$$G_1(z, 0) = 3z^{1/3} \left( z^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{1/2} \left[ \frac{1}{4} \left( z^{2/3} + \frac{1}{3b} \right) - \frac{1}{8(3b)} \right] - \frac{3}{8(3b)^2} \ln \left( \frac{z^{1/3} + \left( z^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{1/2}}{H^{1/3}} \right) \quad (45)$$

La función (45) puede escribirse de manera matemáticamente más amena. Para ello tengamos en cuenta que si bien no conocemos en detalle el valor del parámetro de curvatura  $3b$ , sabemos de su definición (26) en términos de la curvatura  $a^{-1}$  de la expresión (20), que aún a máxima profundidad resulta  $3bz^{2/3} \ll 1$ , lo que permite desarrollar Taylor las raíces y el logaritmo conservando sólo el primer orden.

$$G_1(z, 0) = 3 \left\{ \frac{1}{4} \left( \frac{1}{3b} \right)^{1/2} \left( \frac{3bz^{5/3}}{2} + \frac{5}{4}z - \frac{1}{4} \left( \frac{1}{3b} \right)^{1/2} z^{2/3} \right) - \frac{\ln \left( \left( \frac{1}{3b} \right)^{1/2} \frac{1}{H^{1/3}} \right)}{8(3b)^2} \right\} \quad (46)$$

El término logarítmico que sobrevive es en verdad irrelevante porque aparecerá con igual valor y signo contrario en los términos (44) y (46), y para los valores de curvatura con los que estamos trabajando podemos todavía re-

ducir un orden la igualdad (46) en la forma:

$$G_1(z, 0) = 3 \left\{ \frac{1}{4} \left( \frac{1}{3b} \right)^{1/2} \left( \frac{5}{4}z - \frac{1}{4} \left( \frac{1}{3b} \right)^{1/2} z^{2/3} \right) - \frac{\ln \left( \left( \frac{1}{3b} \right)^{1/2} \frac{1}{H^{1/3}} \right)}{8(3b)^2} \right\} \quad (47)$$

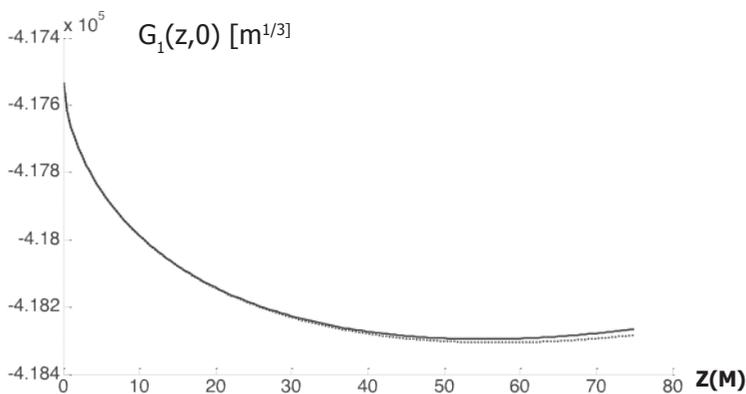
En la Figura 8 mostramos las funciones (46) y (47) para el  $3b=1,2 \times 10^{-3} \text{m}^{-2/3}$  (el valor que surge del parámetro  $a^{-1}$  que usamos para una primera aproximación del perfil del lecho del GBD). Obsérvese que la diferencia entre las funciones no supera el 0,1% en la parte más profunda del sistema (que suponemos de alrededor de 75 m de profundidad).

Con estas consideraciones en mente, la ecuación (43) resulta:

$$\frac{du}{dz} = \frac{Q}{\left( z^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{1/2}} \left( q + z^{2/3} - 5(3b)^{1/2} z \right) \quad (48)$$

donde hemos definido las cantidades:

$$q = \frac{\psi[P_0, H, 0]}{\rho_0 g \frac{3}{16} \left( \frac{1}{3b} \right)} \quad (49)$$



**Fig. 8:** La línea superior es la función real, ecuación (44), prácticamente superpuesta a su primera aproximación (ecuación (46), en línea de puntos). La máxima desviación del valor real está por debajo de 0,09%.

$$Q = 2A(T)3b \operatorname{sen}^3 \alpha \left( \rho_0 g \frac{3}{16} \left( \frac{1}{3b} \right) \right)^3 \quad (50)$$

Ahora bien, la expresión (48) define las derivadas de la velocidad. Por lo pronto, deben ser positivas. Y esta condición impone una relación definida entre la profundidad del glaciar y la curvatura. De allí que, el término cúbico de la expresión (48) sea definido positivo implica:

$$\frac{P_0 \left( H^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{1/2} + 3\rho_0 g \left[ \frac{5}{16} \left( \frac{1}{3b} \right)^{1/2} \right]}{3\rho_0 g \frac{1}{16} \left( \frac{1}{3b} \right)} \quad (51)$$

que se traduce en la condición suficiente:

$$3b > \left( \frac{1}{5H^{1/3}} \right)^2 \quad (52)$$

Para  $H \approx 75$  m, esta condición se transforma en  $3b \approx 2,25 \times 10^{-3} \text{m}^{-2/3}$ , algo así como el doble de la curvatura sugerida en una primera modelización. Para la región del GBD que estamos analizando este es un valor ligeramente elevado, toda vez que supone que la altura máxima se alcanza a unos 455 m del punto de máxima profundidad, esto es, unos 150 m de diferencia respecto del radargrama procesado de la Figura 4.

La condición necesaria y suficiente se expresa

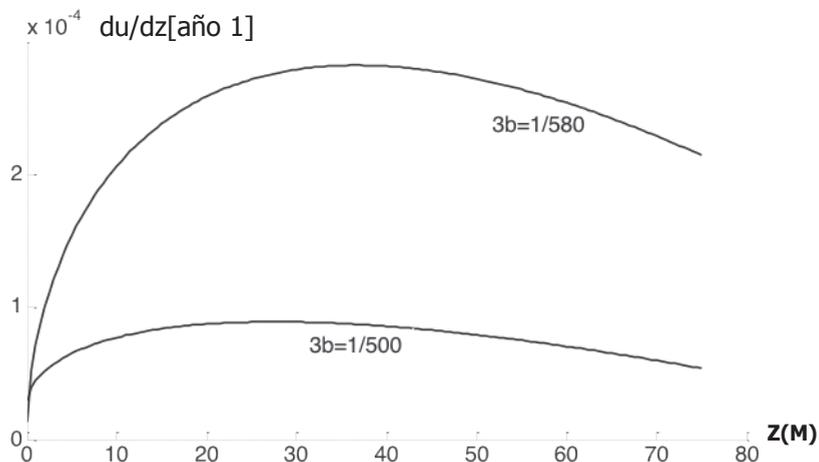
como:

$$\frac{16P_0}{3\rho_0 g} \left( H^{2/3} + \varepsilon \right)^{1/2} > \varepsilon H^{2/3} - 5\beta^{1/2} H \quad (53)$$

donde hemos definido  $\beta = (3b)^{-1}$ . La curva del miembro izquierdo, para los valores típicos de presión y densidad del hielo y  $H = 75$  m, es mayor que la del miembro derecho a partir de  $\beta \approx 590 \text{m}^{-2/3}$ . Para el valor mínimo de  $\beta$  resulta una altura del glaciar del orden de 5 m mayor que la medida; un valor absolutamente tolerable porque queda todavía la curvatura de la capa de hielo por sobre la superficie.

En la Figura 9 graficamos las derivadas de la función velocidad para dos valores diferentes de curvatura. Es casi inmediato que en ambos casos la curva de velocidad exhibirá un punto de inflexión y en ese punto cambiará su concavidad. No deja de ser siempre una velocidad positiva y creciente en altura, pero respecto del caso del perfil parabólico analizado en RM2013 puede verse que la velocidad crece más rápidamente en los primeros metros.

Por lo pronto, aunque tediosa y más bien extensa, la integración de la ecuación (47) es posible. El principal problema que enfrentamos es la falta de convergencia entre métodos diferentes (desarrollo de las curvas en series de potencias, integración por tramos, etc.) que, además, parecen mostrar diferente sensibilidad a los valores de curvatura.



**Fig.9: Derivadas de la velocidad en función de la curvatura. Obsérvese que al cambiar el valor del parámetro de curvatura se modifica el punto de inflexión de la curva de velocidad, que a su vez significa que cambia la profundidad a la cual ocurre este cambio.**

Los valores extremos que podemos evaluar con cualquiera de los métodos dependen naturalmente de la curvatura, y a pesar de la diferente sensibilidad, para los casos analizados están por debajo de los valores medidos en la baliza nivométrica de la figura 3. Esto significa que siempre es posible pensar que existe algún mecanismo extra de deslizamiento sobre una capa de hielo fundido en la base del glaciar (Fowler, 2010).

## 2 – Solución con $\varepsilon \neq 0$

Un breve análisis del orden de magnitud de las expresiones (35) y (36) muestra que la perturbación en la masa es importante sólo por su presencia en la segunda de estas expresiones. De hecho, podemos desarrollar  $G_2(z)$  como:

$$G_2(z, \varepsilon) \approx -\frac{3\varepsilon}{105 H(3b)^{3/2}} \left( \frac{8}{(3b)^2} - \frac{12}{(3b)} z^{2/3} \right) \left( 1 + \frac{3}{2} (3b) z^{2/3} \right) \approx -\frac{3\varepsilon}{105 H(3b)^{3/2}} \left( \frac{8}{(3b)^2} - 18 z^{4/3} \right) \quad (54)$$

de manera tal que la ecuación (43) ahora se escribirá como:

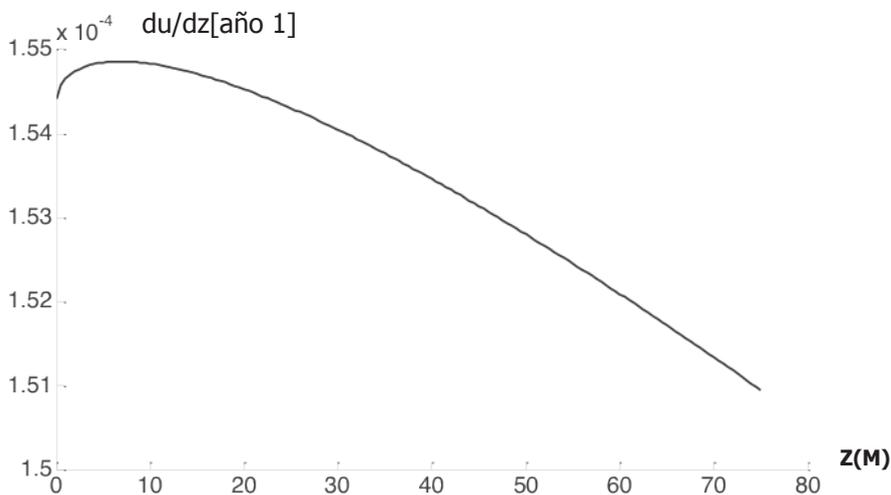
$$\frac{du}{dz} = \frac{2A(T)(3b)^{3/2}}{(1 + 3bz^{2/3})^{1/2}} \text{sen}^3 \alpha (\psi[P_0, H, \varepsilon] - \rho_0 g [G(z, \varepsilon)])^3 \quad (55)$$

donde ahora definimos:

$$\psi[P_0, H, \varepsilon] = P_0 \left( H^{2/3} + \frac{1}{3b} \right)^{1/2} + \rho_0 g [G(H, \varepsilon)] \quad (56)$$

y  $G(z, \varepsilon)$  viene dado por:

$$G(z, \varepsilon) \approx 3 \left\{ \frac{1}{4(3b)^{1/2}} \left( \frac{5}{4} z - \frac{1}{4(3b)^{1/2}} z^{2/3} \right) - \frac{\varepsilon}{105 H(3b)^{3/2}} \left( \frac{8}{(3b)^2} - 18 z^{4/3} \right) \right\} \quad (57)$$



**Fig. 10: Derivadas de la velocidad en función de la curvatura para  $\varepsilon=0,01$  y  $3b=1/500$ . Obsérvese que el punto de inflexión de la curva de velocidad se halla prácticamente en la base.**

En la Figura 10 hemos graficado la curva de derivadas de la velocidad. Obsérvese que, a diferencia del caso  $\varepsilon=0$ , ahora el punto de inflexión se localiza cerca de la base del glaciar, de manera tal que la velocidad misma es prácticamente una función de curvatura única.

## Análisis y conclusiones

En este artículo hemos estudiado el perfil de velocidad de avance de un glaciar, conocida la forma matemática del lecho. Esta es la diferencia fundamental respecto del tratamiento estándar, porque en este caso, el perfil del lecho ha sido registrado in situ. En principio, conocidas las funciones que ajustan el perfil del lecho sería siempre posible construir su perfil de velocidades, pero esa construcción es por momentos insalvablemente compleja. De hecho, analizamos sólo un costado de un sector del glaciar, y aún así, el cálculo es muy complicado.

Como en RM2013 hemos introducido un parámetro de perturbación de masa en profundidad porque parece razonable suponer que la densidad del hielo se modifique por efectos de la presión a que lo somete su propio peso. Sin embargo, a diferencia de aquel trabajo, ahora debemos realizar una serie de aproximaciones que, aunque ajustan razonablemente, nos desvían del perfil original. Vale decir, que en todo caso esas desviaciones son comparativamente pequeñas y mantienen el problema dentro del marco de error que introduce la aproximación del perfil del lecho con una curva biyectiva.

La función de perturbación de masa que introducimos es lineal con la profundidad. Salvo la simplificación que se logra con esta forma, no tenemos evidencia empírica que permita asegurar que la elección es correcta. Sin embargo, representa un paso más allá del tratamiento usual, que considera densidad de masa constante en toda la profundidad del glaciar, y por lo demás, en vista de los valores relativamente pequeños que permitimos al parámetro de perturbación  $\varepsilon$ , siempre sería posible desarrollar la función a primer orden.

La dependencia de la velocidad con la curvatura que resulta de este tratamiento es interesante. En primer lugar, debemos apresurarnos a comentar que el perfil completo de velocidad no es fácil de obtener, particularmente porque

no existen primitivas para las funciones involucradas, y porque los métodos de aproximación no parecen ser convergentes. Pero parece evidente que la velocidad del conjunto tiene un cambio de concavidad que se emparentaría con la curvatura del glaciar, lo que parece razonable porque el cambio de curvatura (a ancho glaciario constante) representa un cambio en la masa total del sistema. Y, con la introducción de la perturbación de masa parecería evidente que el punto de inflexión se corre hacia la base del glaciar.

Las curvas de velocidad muestran valores por debajo de los medidos en el lugar, mediante balizas nivométricas. Esto significa que podemos pensar que la base del glaciar se desliza sobre hielo fundido. Como quedó dicho, diferentes mecanismos podrían provocar la fusión del hielo en contacto con el lecho y provocar deslizamiento. A partir de las diferencias entre los valores de velocidad medidos en la superficie y los que brinda el modelo, podría estimarse la velocidad por deslizamiento. Dicho de otro modo, si se conocen en detalle todos los parámetros que intervienen en las ecuaciones de flujo y se fija la curva del perfil de manera segura, es posible utilizar estos modelos para medir la velocidad de la base.

Demás está decirlo, nuevos y mayores esfuerzos serán necesarios para tratar las partes que aquí no hemos discutido y, por otro lado, introducir nuevos métodos de análisis.

## Referencias

- COOK, A. J.; FOX, A. J.; VAUGHAN, D. G. and FERRIGNO, J. G. (2005): *Science*, 308, 541.
- COOK, A. J. and D. G. VAUGHAN. (2010): *The Cryosphere*, 4, 77.
- CUFFEY, K. and PATERSON, W. (2010): "The Physics of Glaciers" (Elsevier: Amsterdam)
- FONTELOS, M.; MUÑOZ, A. y SCHIAVI, E. (2007): *Anales del XX Congreso de Ecuaciones Diferenciales y Aplicaciones y X Congreso de Matemática Aplicada*, Sevilla (España), 1.
- FOWLEr, A. (2010): *Journal of Glaciology*, 56, 965.
- HOOKE, R. (2005): "Principles of glacier mechanics" (Cambridge University Press: Cambridge)
- IKEN, A (1981): *Journal of Glaciology*, 27, 407.
- LLIBOUTRY, L (1979): *Journal of Glaciology*, 23, 67.
- OERLEMANS, J (2001): "Glaciers and climate change" (Taylor & Francis: London)
- ROTSTEIN, N. y MARINSEK, S (2013): *Proyecciones*, 11, No. 2, 67.
- World Glacier Monitoring Service (2013): *Glacier fluctuations series*, pag. 24

# Propiedades reológicas de la pulpa de kiwi (*Actinidia chinensis*): comportamiento de Flujo

**Reynaldo J. Silva Paz<sup>1, 2</sup>, María Lucía Pollio<sup>3</sup>, Andrés Márquez<sup>3</sup>, Patricia A. Della Rocca<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Peruana Unión, Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CITAL), Carretera central Km 19, Ñaña, Perú

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Química, Medrano 951, (C1179 AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup> Universidad Nacional de Quilmes, Departamento de Ciencia y Tecnología, Roque Sáenz Peña 352, Bernal, (B1876BXD), Provincia de Buenos Aires, Argentina

*patriciadellarocca@hotmail.com*

*Recibido el 2 de Febrero de 2014, aprobado 12 de Marzo de 2014*

## Resumen

El kiwi es un fruto que actualmente es consumido en todo el mundo por su sabor y aroma agradable. Sin embargo, todavía no se ha desarrollado de manera suficiente su uso en el procesamiento industrial. El objetivo del presente trabajo fue analizar el comportamiento de flujo de la pulpa de kiwi tomando en cuenta: el efecto de la temperatura (en un rango de 10 °C a 55 °C) y la concentración de sólidos solubles, variando entre 10 – 30 °Brix. La pulpa de kiwi exhibe un comportamiento pseudoplástico, sin tixotropía, que puede ajustarse satisfactoriamente mediante el modelo de la ley de la potencia. El coeficiente de consistencia varió entre 4,381 Pa.s<sup>n</sup> – 12,667 Pa.s<sup>n</sup> y el índice de comportamiento al flujo entre 0,141 – 0,254. Se reveló un efecto significativo de la temperatura y la concentración de sólidos solubles sobre la viscosidad aparente. Esta aumenta a temperaturas inferiores a 25 °C y a concentraciones mayores a 20 Brix. El coeficiente de consistencia se puede ajustar con una relación tipo Arrhenius. La energía de activación al flujo se halla en un rango de 4,76 - 7,55 kJ/mol.K para los valores de concentración de sólidos solubles estudiados.

**PALABRAS CLAVE:** REOLOGÍA - ÍNDICE DE FLUJO - COEFICIENTE DE CONSISTENCIA - VISCOSIDAD - KIWI - PULPA

## Abstract

At present kiwi is a fruit worldwide consumed because of its pleasant flavor and aroma. Nevertheless, its industrial processing has not been yet significantly developed. The objective of this work was the analysis of the kiwi pulp's flow behavior taken into account: temperature influence (in the 10 °C to 55 °C range) and soluble solids concentration varying from 10 °Brix to 30 °Brix. Kiwi's pulp showed a pseudoplastic behavior, with no tixotropy, that satisfactorily fit the power law model. Values ranging from 4.381 Pa.s<sup>n</sup> to 12.667 Pa.s<sup>n</sup> were found for the consistency index and from 0.141 to 0.254 for the flow behavior index. A significant effect on apparent viscosity is shown for both temperature and soluble solids concentration. Viscosity increases at temperatures below 25 °C and concentrations greater than 20 ° Brix. The consistency coefficient followed an Arrhenius type relationship, being the flow activation energy in a 4.76 to 7.55 kJ/mol.K range for the tested soluble solids concentrations.

**KEYWORDS:** RHEOLOGY - FLOW INDEX - CONSISTENCY COEFFICIENT - VISCOSITY - KIWI- PULPA

## Introducción

El kiwi es un fruto climatérico, de forma ovalada, no dehiscente con muchas semillas pequeñas en un pericarpio carnoso. (Ferguson y Boyd, 2002).

Dentro de las variedades más conocidas y comercializadas a nivel mundial se encuentran: Bruno, Abbott y Hayward que poseen buenas características agronómicas tales como vigor, rusticidad y productividad (Bascuñana, 1989). El mercado del kiwi en el hemisferio norte puede ser cubierto, principalmente, por Nueva Zelanda, Chile y Argentina, países que aprovechan las condiciones de producción en contraestación. Esta producción alcanza niveles de calidad internacional y el 60 % de la fruta es exportada. Las condiciones de la costa argentina son ideales para su cultivo porque tienen características climáticas parecidas a las de Nueva Zelanda y además, la adecuada materia orgánica de su suelo lo beneficia (INTA, 2013). La fruta, la pulpa y el jugo de kiwi poseen un alto contenido en agua y fibra soluble e insoluble que ayuda a normalizar los niveles de colesterol y facilita el tránsito intestinal. Es poco calórico y presenta moderada cantidad de hidratos de carbono en forma de azúcares. Una porción de 100 g de kiwi aporta a la dieta 52 calorías. Es una de las frutas más ricas en vitamina C, cuyo aporte supera al de la naranja y el limón. También es rico en vitamina E y folatos y llega a cubrir entre un 9% y un 20%, respectivamente, de las necesidades diarias (Ferguson, 1990; Mitchell, 1994).

El jugo o pulpa de fruta es un sistema multifásico con fase continua acuosa y fase dispersa sólida. La fase acuosa es una disolución de azúcares, sales y otros solutos de bajo peso molecular. La fase dispersa cuenta con otros solutos de mayor peso molecular como proteínas solubles (Martínez et al., 1998).

El conocimiento del comportamiento reológico de los alimentos fluidos es muy importante para el diseño de equipos de proceso (concentración, bombeo, tamizado, mezclado, tratamientos térmicos, etc.), así como también, para su evaluación sensorial y control de la calidad (Rao y Anantheswaram, 1982).

Las pulpas de frutas son generalmente fluidos no newtonianos, que muestran un comportamiento típicamente pseudoplástico. El modelo

de Ostwald de Waele o modelo de la Ley de la Potencia es el más ampliamente empleado para caracterizar este comportamiento.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

Donde:  $\tau$  el esfuerzo de corte (Pa),  $\dot{\gamma}$  el gradiente de velocidad de deformación ( $s^{-1}$ ),  $K$  el índice (también denominada coeficiente) de consistencia ( $Pa \cdot s^n$ ) y  $n$  el índice de comportamiento al flujo (adimensional). La relación entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad de deformación no es lineal como en los fluidos newtonianos, sino potencial.

El índice de consistencia  $K$  se puede representar por una relación tipo Arrhenius:

$$K = A \cdot e^{-E_a/R \cdot T} \quad (2)$$

siendo  $T$  la temperatura absoluta (K),  $R$  la constante de los gases (8,314 J/mol K),  $E_a$  la energía de activación al flujo (J/mol),  $A$  una constante del material ( $Pa \cdot s^n$ ),  $n$  el índice de comportamiento de flujo (adimensional).

El efecto de la concentración sobre el índice de consistencia se describe mediante la ecuación (3), (Cervone y Harper, 1978; Vitali y Rao, 1984):

$$K = K_c (X)^a \quad (3)$$

donde  $K_c$  y  $a$  son constantes y  $X$  es la concentración en sólidos solubles.

Vélez y Barboza (1997), evaluaron el efecto de la concentración en sólidos solubles y la temperatura en el índice de consistencia mediante un modelo logarítmico (4):

$$\ln K = \beta_0 + \beta_1 X + \beta_2 (1/T) \quad (4)$$

donde  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  son constantes.

En este trabajo se analizaron las características fisicoquímicas (acidez, pH, °Brix) de la pulpa fresca y se estudiaron los efectos de la temperatura (10, 25, 40 y 55 °C) y la concentración en sólidos solubles (10, 20 y 30 °Brix) sobre el comportamiento reológico de la pulpa de kiwi.

## Materiales y métodos

### Materia prima

Los frutos de kiwi utilizados fueron provistos por el mercado central de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina, en estado de madurez comercial y libre de daños mecánicos.

### Obtención de la pulpa

Los frutos de kiwi seleccionados, se lavaron y se desinfectaron en agua clorada por 5 min. Se pelaron, trituraron y luego se tamizaron con una malla de abertura 1,5 mm. La pulpa se envasó en bolsas herméticas y las mismas se refrigeraron a 4 °C.

### Análisis fisicoquímico de la pulpa de kiwi

El pH se determinó por el método AOAC (1997), con un potenciómetro marca Mettler Toledo, modelo GmbH. La acidez total titulable se midió según el método AOAC (1997) y se expresó en porcentaje de ácido cítrico. Los sólidos solubles totales se determinaron con un refractómetro marca Palm Abbe™ modelo PA 202 y se expresaron en grados Brix (° Brix).

### Medidas reológicas

Para la caracterización reológica se utilizó un reómetro AR-G2 de TA Instruments con una geometría cono-plato. Las experiencias se llevaron a cabo en un rango de velocidad de deformación de 0 a 100 s<sup>-1</sup>. Para las pruebas se tomaron 22 ml de pulpa de kiwi y se determinó el esfuerzo de corte versus el gradiente de velocidad de deformación. Este procedimiento se realizó para todas las concentraciones de sólidos solubles (10, 20 y 30 °Brix) y temperaturas (10, 25 y 40 °C). Se trabajó con estos rangos de concentración de sólidos solubles y temperaturas que son los usualmente empleados en la industria de procesamiento de kiwi. Se determinaron los valores de la viscosidad aparente como la pendiente de los reogramas (esfuerzo de corte versus velocidad de deformación) en cada punto de velocidad de deformación.

### Análisis estadístico

Se realizó un diseño factorial completamente al azar con dos factores (temperatura y concentración) y tres niveles para cada uno de ellos, 10, 25 y 40 °C y 10, 20 y 30 °Brix, respectivamente. Las experiencias se llevaron a cabo por duplicado según un tratamiento simple. El

análisis de los ajustes de los modelos a los resultados experimentales se realizó a través de los parámetros estadísticos de coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y  $\alpha = 0,05$  (95%).

Para el tratamiento estadístico se utilizó el programa Statistica versión 7 y el Software Microsoft Excel versión 2007.

## Resultados y discusión

### Caracterización de la pulpa de Kiwi

Los valores de la caracterización fisicoquímica de la pulpa de kiwi se muestran en la Tabla 1. Los valores de pH, acidez total, °Brix y densidad, obtenidos son similares a los reportados por Tapia (2012); Mitchell et al. (1994); MacRae et al. (1992) y Kader (1992). La pulpa de kiwi, tiene una acidez baja y medio-alto contenido en sólidos solubles.

Parámetros	Valores promedios
Acidez (%)	1,29 ±0,04
pH	6,8 ±1,25
Sólidos solubles (°Brix)	9,18 ±1,63
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,27 ±0.06

Tabla 1. Composición fisicoquímica de la pulpa fresca de kiwi

### Determinación de parámetros reológicos

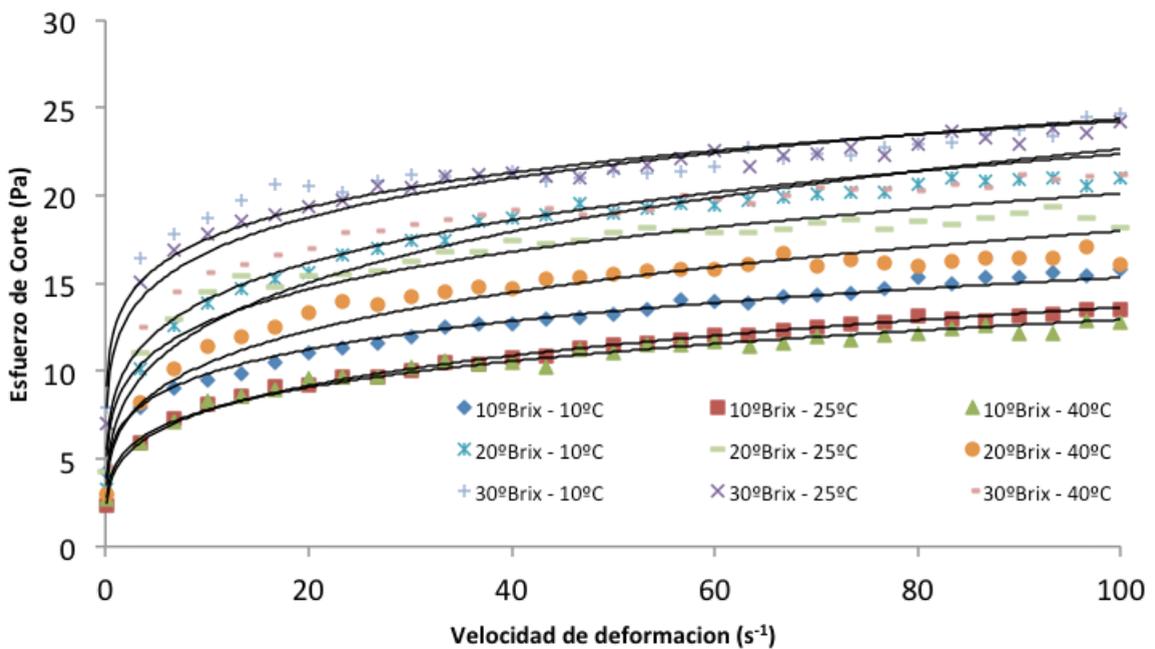
El modelo de la Ley de la Potencia describe satisfactoriamente ( $R^2 \geq 0,966$ ) el comportamiento de flujo de la pulpa de kiwi (Figura 1 y 2). Otros autores han empleado también este modelo en pulpa de níspero (Andrade et al., 2009), pulpa de zapote (Andrade et al., 2010), pulpa de mango (Vidal et al., 2004, Branco y Gasparetto, 2003; Dak et al., 2006, 2007), tomate (Dak et al., 2008.), guayaba (Sánchez et al., 2006), cereza de las indias (Da Silva et al., 2005) jugo de zanahoria pasteurizado (Vandresen et al., 2009) y miel de abeja (Pereira et al., 2003).

El índice de comportamiento de flujo (n) y el índice de consistencia (K) se calcula a partir del modelo de la Ley de la Potencia. Los valores de los parámetros del modelo se presentan en la Tabla 2 para las diversas concentraciones y temperaturas.

La pulpa de kiwi presenta un rango de índice

°Brix	Variables	Temperatura ( °C)		
		10	25	40
10	n	0,193	0,246	0,220
	k	6,303	4,381	4,692
20	n	0,163	0,255	0,236
	k	11,526	7,004	6,057
30	n	0,141	0,202	0,197
	k	12,666	8,834	8,125

**Tabla 2. Parámetros reológicos de la pulpa de kiwi a diferentes temperaturas y concentraciones**



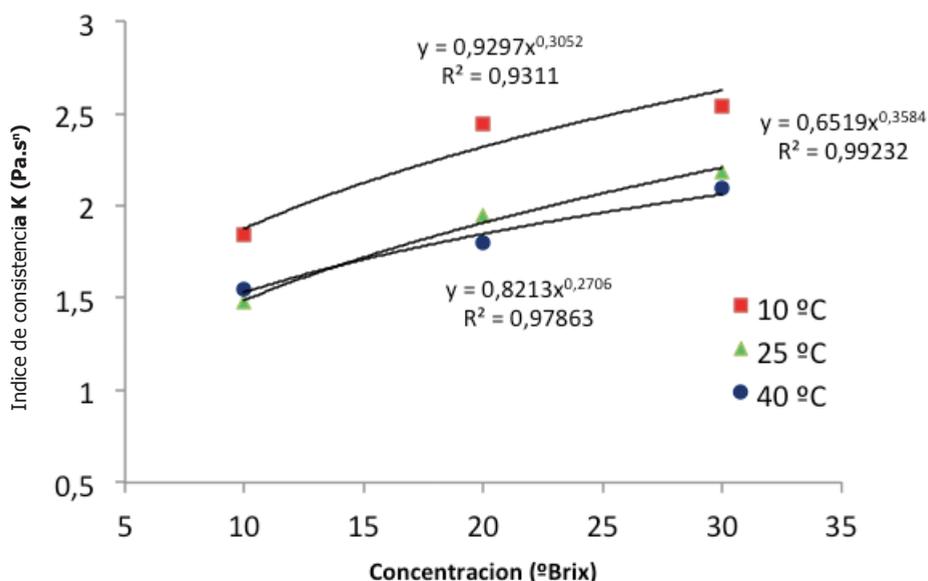
**Fig.1. Reograma de la pulpa de kiwi a diferentes concentraciones y temperaturas**

de comportamiento de flujo ( $n$ ) entre 0,141 - 0,255, inferior a 1, lo que indica que es un fluido no newtoniano con característica pseudoplástica (Molwane y Gunjal, 1985; Torgul y Arslan, 2004; Dak et al, 2006 y 2007). El índice de consistencia ( $K$ ) presentó valores en el intervalo de 4,38 Pa.s<sup>n</sup> a 12,66 Pa.s<sup>n</sup>.

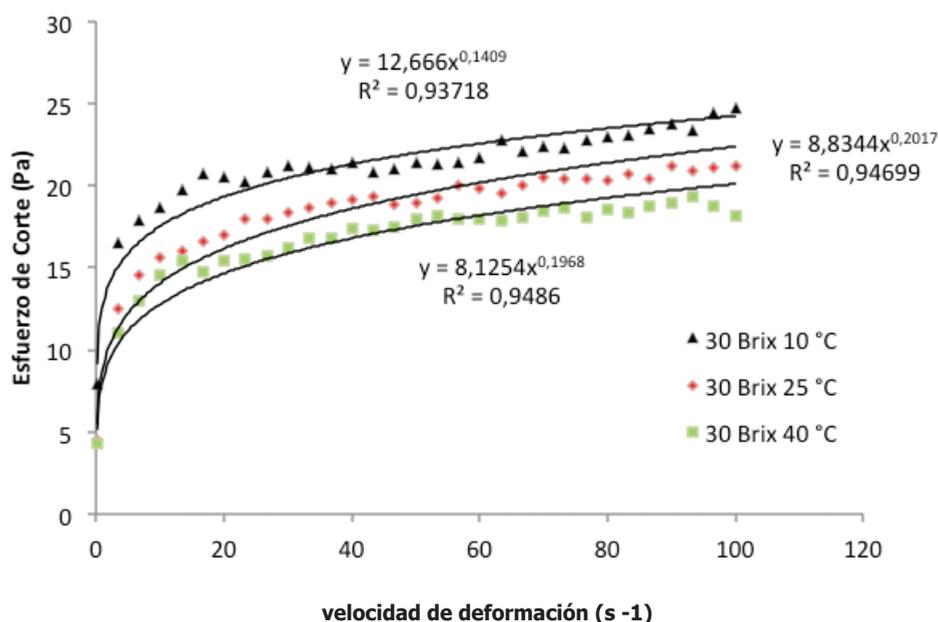
Los fluidos pseudoplásticos fluyen más fácilmente cuando la velocidad de deformación se incrementa, ya que la viscosidad aparente ( $K \gamma^{(n-1)}$ ) se reduce. En la Figura 1 se exhibe este comportamiento que se atribuye a la presencia de sustancias de alto peso molecular en solución y/o a los sólidos dispersos en la fase líquida de la pulpa de kiwi.

La viscosidad aparente de la pulpa de kiwi se incrementa con la disminución de la temperatura, como puede apreciarse en la Figura 2, y disminuye con el aumento de la velocidad de deformación para cada temperatura considerada, facilitando el flujo durante el procesamiento y requiriendo menor potencia para el bombeo (Haminiuk et al., 2006).

En la Figura 3 se aprecia cómo varía el índice de consistencia  $K$ , en función de la concentración y a las distintas temperaturas siguiendo una relación dada por la ecuación (3) (Tabla 3). El índice de consistencia se incrementa a medida que aumenta la concentración de sólidos solubles para las distintas temperaturas 10, 25 y 40 °C. Estos resultados son consistentes con los reportados



**Fig. 2. Ajuste de los datos experimentales de la pulpa de kiwi para una concentración de sólidos solubles de 30 °Brix a 10, 25 y 40 °C de temperatura mediante el modelo de la ley de la potencia**



**Fig. 3. Efecto de la concentración y la temperatura en el índice de consistencia de la pulpa de kiwi**

por otras pulpas o jugos de frutas (Vitali y Rao, 1984, Dack et al., 2008 y Andrade et al., 2009). Asimismo, se aprecia que los valores de índice de consistencia son muy parecidos para las tem-

peraturas de 25 °C y 40 °C, para las diferentes concentraciones en sólidos solubles y bastante distintos a los valores correspondientes a la temperatura de 10 °C.

Temperatura	Kc	a	R <sup>2</sup>
10	0,93	0,305	0,931
25	0,65	0,358	0,992
40	0,82	0,271	0,978

Tabla 3. Valores de Kc y a de la ecuación (3)

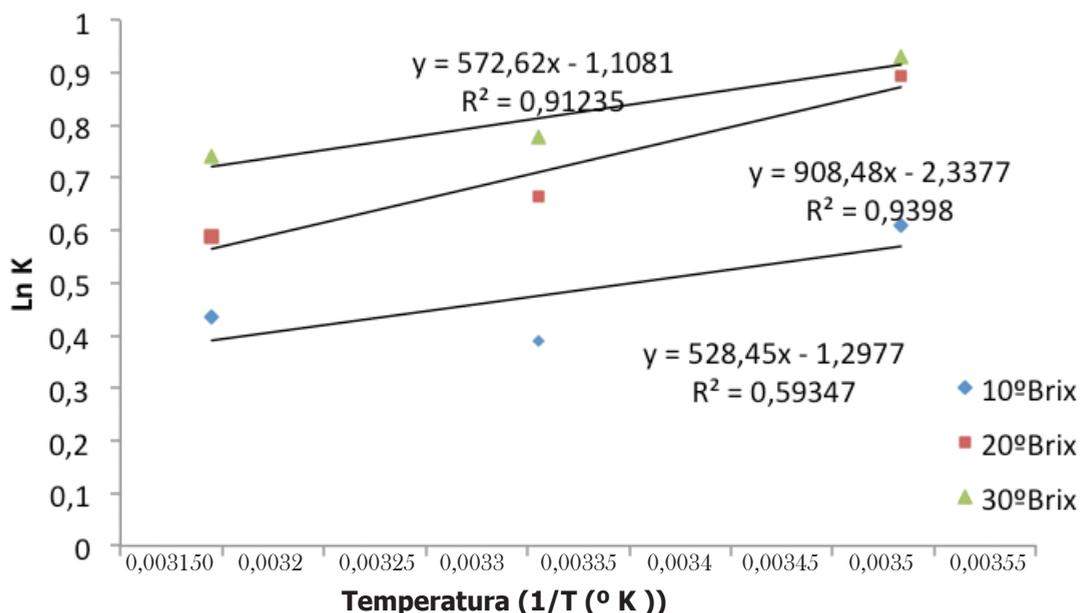


Fig. 4. Aplicación del modelo de Arrhenius a los datos experimentales obtenidos con la pulpa de kiwi

En la Figura 4 se presenta el  $\ln K$  en función de la inversa de la temperatura absoluta ( $1/T$ ) para las diferentes concentraciones de pulpa de kiwi según la ecuación (2).

En la Tabla 4 se detallan los valores de energía de activación calculados para las diferentes concentraciones. Los mismos concuerdan con los reportados para alimentos fluidos por Dak et al. (2008) y Andrade et al. (2009 y 2010).

°Brix	$E_a$ (kJ/mol)
10	4,76
20	7,55
30	4,39

Tabla 4. Energía de activación de flujo de la pulpa de kiwi

En la Tabla 5 se presenta el análisis de varianza del índice de consistencia. El análisis de varianza con un nivel de confianza del 95% ( $\alpha$ , nivel de significación = 0,05), efectuado sobre la variable índice de consistencia,  $K$  ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) bajo el efecto de la temperatura y la concentración, indican que ambas influyen significativamente, siendo de mayor significancia la concentración (Figura 5).

El efecto de ambas variables (temperatura y concentración) en el índice de consistencia de la pulpa de kiwi se describe mediante un modelo logarítmico como en la ecuación (4). El mismo ajusta satisfactoriamente los datos experimentales para las condiciones estudiadas:

$$\ln(K) = -3,29 + 0,032 \cdot X + 1377,08(1/T(^{\circ}\text{K}))$$

$$R^2 = 0,893$$

Fuente de variación	SC	GL	CM	F	Valor p
Concentración (Lineal)	33,84565	1	33,84565	49,16546	0,005957*
Concentración(Cuadrático)	0,96688	1	0,96688	1,40453	0,321293
Temperatura(Lineal)	22,50368	1	22,50368	32,68969	0,010616*
Temperatura(Cuadrático)	4,43216	1	4,43216	6,43832	0,084874
Concentración x Temperatura	2,14666	1	2,14666	3,11833	0,175593
Error	2,06521	3	0,68840		
Total SS	65,96024	8			

\*significancia  $p < 0.05$  ( $\alpha = 95\%$ )

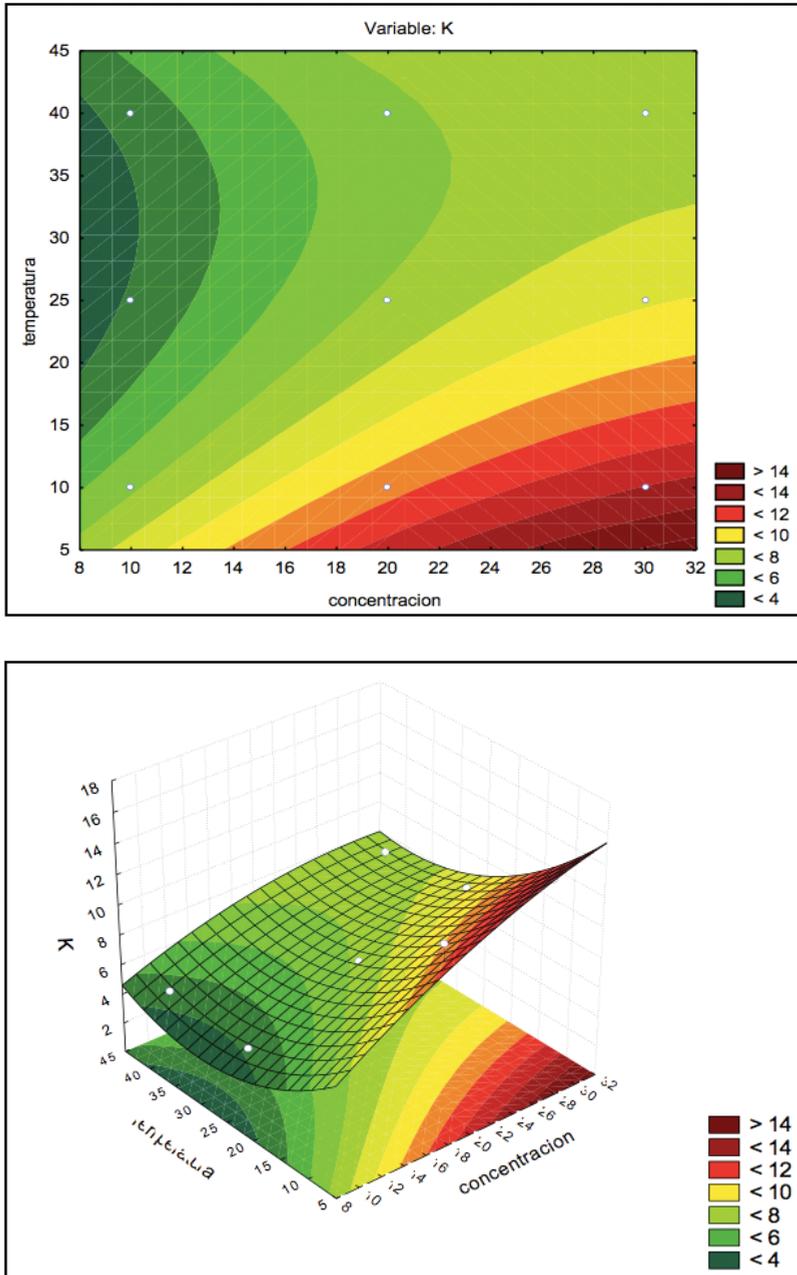
SC: Suma de cuadrados

GL: Grados de libertad

CM: Cuadrados medios

F: Estadístico de Fischer

**Tabla 5. Análisis de varianza del índice de consistencia, K, del diseño factorial**



**Fig. 5. Gráficas de contornos y superficie del índice de consistencia en función de la concentración y la temperatura**

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>
Intercepción	-3,292886352	1,12827911	-2,918503344
Variable X	0,032471887	0,00565305	5,744134653
Variable (1/T)	1377,076129	333,686868	4,126851434

**Tabla 6. Coeficientes del modelo, errores típicos y estadístico t de Student**

Fuente	SC	GL	CM	F	Valor p
Regresión	0,959208	2	0,479604	25,01299	0,001228
Residuos	0,115045	6	0,019174		
Total	1,074253	8			

**Tabla 7. Análisis de varianza del modelo**

En la Tabla 6 se presentan los coeficientes del modelo, sus respectivos errores típicos y el estadístico t de Student. En la Tabla 7 se detalla el análisis de varianza del modelo.

## Conclusiones

La pulpa de kiwi tiene una baja acidez y un valor medio-alto en contenido de sólidos solubles (<sup>o</sup>Brix) que la hacen atractiva para la elaboración de diferentes productos tales como néctares, pulpas, salsas y jugos. El estudio de su comportamiento reológico es muy importante para la industria alimenticia ya que nos permite conocer cuáles son los equipos (agitadores,

bombas, etc.) requeridos para la elaboración de los mencionados productos y las demandas energéticas.

La pulpa de kiwi presenta un comportamiento pseudoplástico que puede modelarse muy satisfactoriamente con la Ley de la Potencia en el rango de temperaturas estudiadas. La dependencia del índice de consistencia con la temperatura se describe con una relación tipo de Arrhenius. La consistencia de la pulpa de kiwi aumenta con el incremento en el contenido de sólidos solubles y con la disminución de la temperatura.

## Referencias

- ANDRADE et al. (2010) Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de zapote. Universidad de Córdoba – Colombia. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 33, N° 2.
- ANDRADE et al. (2009) Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero. Revista Facultad Agronómica de la Universidad de Córdoba- Colombia.
- Association of Official Analytical Chemists– AOAC (1997) Official Methods of Analysis, 16th ed, Arlington, Virginia.
- CASTRO, E. y DE HOMBRE MORGADO, R.A. (2007) Parámetros mecánicos y textura de los alimentos. Universidad de Chile, Facultad de ciencias químicas y farmacéuticas, departamento de ciencia de los alimentos y tecnología química. 142 p.
- CERVONE, N.W. and HARPER, J.M. (1978) Viscosity of an intermediate moisture dough. J. Food Process Eng., 2, 83-95.
- CHÁVEZ, S. y FRANCO, H. (1996) Propiedades biomecánicas de los frutos, caso zarzamora. En: IX Curso de Actualización, Frutales con Futuro en el Comercio Internacional. Memorias. México: Fundación Salvador.
- BASCUÑANA, M. (1989) Cultivo de la actinidia-kiwi. Editorial Aedos, S.A., Barcelona.
- BRANCO, I.G. y GASPARETTO, C.A. (2003) Response surface methodology applied to the study of temperature effect on the rheological behavior of ternaries mixtures with mango pulp and orange and carrot juices. Cienc. Tecnol. Aliment. 23 (supl):166– 171
- DA SILVA et al. (2005) Rheology of acerola juice: effects of concentration and temperature. Cienc. Tecnol. Aliment. 25(1):121-126

- DAK et al. (2008) Rheological Properties of Tomato Concentrate. *International Journal Of Food Engineering* vol. 4-7:11
- DAK et al. (2006) Flow characteristics of juice of "Totapuri" mangoes. *Journal of Food Engineering*, 76, 557-561.
- DAK et al. (2007) Effect of temperature and concentration on rheological properties of "Kesar" mango juice. *J. Food Eng.* 80(4):011-1015.
- FERGUSON, A. R. (1990) *Kiwifruit management*. in: *Small fruit crop management*. Ed. Prentice Hall, New Jersey. p. 472 – 503.
- FERGUSON, I. Y BOYD, L. (2002) Los nutrientes inorgánicos y la calidad de la fruta. pp. 17-46. En: KNEE, M. *Bases biológicas de la calidad de la fruta*. 1ª Edición Editorial Arancibia, Zaragoza, España., 289p.
- GÓMEZ et al. (2003) *Manual de Industrias Lácteas*, Edición: Mundi-Prensa Libros.
- HAMINIUK et al. (2006) Rheological Characterization of Blackberry Pulp. *Braz. J. Food Technol.* 9(4):291-296.
- HOLDSWORTH, S. D. (1971) Applicability of rheological models to the interpretations of flow and processing behavior of fluid food products. *Journal of Texture Studies*, Vol. 2 (1971) 393-418.
- Ibartz, A. (2005) *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos "Tecnología de los Alimentos"* Editor: Mundi-Prensa.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS (ICNT). Norma 695.
- INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA (INTA). (2013) <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=16975>
- KADER, A.A. (1992) *Postharvest technology horticultural crops*. Publication 3311, University of California, Dir. Agr. Nat. Resources.
- MACRAE et al. (1989) Changes in the softening and composition of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) affected by maturity at harvest and postharvest treatments. *J. Sci. Food Agric.* 49, 413-430.
- MARTÍNEZ et al. (1998) *Termodinámica y cinética de sistemas Alimento Entorno*. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- MITCHELL, F.G. (1994) *Composition, maturity, and quality*. En: *Kiwifruit growing and handling*. Ed. ANR Publications University California, California.
- MOHSENIN, N. N. (1986) *Physical properties of plant and animal materials: structure, physical, characteristics and mechanical properties*. New York: Gordon and Breach Science Publishers. 664 p.
- MOLWANE, S.D. and GUNJAL, B.B. (1985) Viscometric characteristics of cold-break and hot-break extracted tomato juice concentrates. *J. Food Sci. Technol.*, 22, 353-357
- ORREGO, C. (2003) *Procesamiento de Alimentos*. Universidad Nacional de Colombia.
- PEREIRA, E.; QUEIROZ, A. y FEITOSA, R. (2003) Comportamento reológico de mel da abelha urucu (*Melíponascutellaris*, L.). *Rev. ciênc. Exatas nat.* 5(2):179-186.
- SÁNCHEZ et al. (2002) Estudio de Fluidos no newtonianos con los métodos de volúmenes y elementos finitos. *Revista de Ingeniería*. Universidad de Santiago de Chile.
- SÁNCHEZ et al. (2006) Efecto de la temperatura en las propiedades reológicas de purés de guayaba (*Psidium Guajaba* L.), Grupo de Investigación en Alimentos de Origen Vegetal. Universidad de Zaragoza (España), <http://www.horticom.com/pd/imagenes/66/391/66391.pdf>
- TAPIA DURÁN, M. (2012) Estudio de factores fisiológicos del kiwi (*Actinidia deliciosa*) variedad Hayward, y sus efectos en la textura durante el almacenamiento. <http://www.tesis.uchile.cl/handle/2250/112182>
- TORGUL, H. y ARSLAN, N. (2004) Mathematical model for prediction of apparent viscosity of molases. *Journal of Food Engineering*, 62, 281-289.
- SCHWARTZBERG, H. (1990) Food freeze concentration. In H. G. Schwartzberg, & M. A. Rao *Biotechnology and food process engineering*, p. 127-202.
- VANDRESEN et al. (2009) Temperature effect on the rheological behavior of carrot juices. *J. Food Eng.* 92 (3):269-274.
- VELEZ-RUIZ, J.F. y BARBOSA-CANOVAS, G.V. (1997) Effect of concentration and temperature on the rheology of American Society of Agricultural Engineers, 40 (4) , 1113-1117.
- VIDAL, J.; PELEGRINE, D. y GASPARETTO, C. (2004) Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga (*Mangífera indica* LKeitt) *Ciênc. Tecnol. Aliment.* 24 (1):39-42.
- VITALI, A. A. and RAO, M.A. (1984) Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: effect of temperature and concentration. *J. Food Sci.*, 49, 882-888.



# Desarrollo y validación de metodología para minimizar la incertidumbre de los calibradores en determinaciones por HPLC en muestras biológicas\*

**José Luis Delmonte**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires,  
Escuela de Posgrado, Medrano 951 (C1179AAQ),  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

*jdelmonte@frba.utn.edu.ar*

*Recibido el 16 de Agosto de 2013, aprobado el 20 de Septiembre de 2013*

## Resumen

Los avances tecnológicos y la aparición de nuevas moléculas, así como la existencia de medicamentos similares y las características farmacocinéticas de ciertas drogas o fármacos (vale decir su paso a través del organismo en función del tiempo y de la dosis) han generado la necesidad del desarrollo de nuevas metodologías analíticas. Estas técnicas cuentan con una estricta estandarización de los procesos en ellas involucrados y el estudio de herramientas específicas para mejorar la calidad de las mediciones analíticas. Las sustancias que hemos estudiado tienen una ventana terapéutica estrecha, es decir, la concentración plasmática eficaz está muy cerca de la tóxica. Es por este motivo que el monitoreo terapéutico (medición de la concentración en plasma) es de suma importancia para definir la dosis adecuada de administración de estos fármacos. En este trabajo se muestran los procedimientos para estimar y minimizar la incertidumbre en la calibración de soluciones patrón utilizadas en HPLC. También se presenta la evaluación de la incertidumbre total del método analítico aplicado a distintas drogas.

**PALABRAS CLAVE:** INCERTIDUMBRE - SOLUCIÓN PATRÓN - CALIDAD EN LAS MEDICIONES - HPLC

## Abstract

Technological advances and the appearance of new molecules, as well as the existence of similar medicines and the pharmacokinetic characteristics of certain drugs (that is, the passage of such chemicals through organism as a function of time and dose) have generated the necessity of the development of new analytical methodologies. These techniques include a strict standardization of the processes involved and the study of specific tools to improve the quality of the analytical measurements. The substances that we have studied have a narrow therapeutic window, that is, the effective plasmatic concentration is quite close to the toxic one. For this reason the therapeutic monitoring (measurement of the plasma concentration) is extremely important to define the proper dosage of these drugs. In the present work, procedures to estimate and minimize uncertainty in calibration of HPLC standard solutions are shown. The evaluation of total uncertainty of the analytical methods applied to different drugs is also enclosed.

**KEYWORDS:** UNCERTAINTY - CALIBRATION STANDARDS - MEASUREMENTS QUALITY - HPLC

\*El presente artículo forma parte del trabajo de tesis "Desarrollo y validación de metodología para minimizar la incertidumbre de los calibradores en determinaciones por HPLC en muestras biológicas", para optar al grado de Magister en Ingeniería en Calidad de la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional, dirigida por Claudia C. García Bonelli y codirigida por Omar H. Garonis.

## Introducción

### Breve descripción del problema y su importancia

La metrología resulta esencial en todos los ámbitos de la vida ya que brinda importantes herramientas científicas y técnicas para asegurar la calidad de las mediciones. La necesidad de contar con mediciones exactas en la actualidad es un postulado fundamental para alcanzar un desarrollo integral de nuestra sociedad y encaminarla hacia un estado de maduración tecnológica comparable con los más altos estándares mundiales. Un gran número de decisiones se basan sobre información obtenida de mediciones, en particular químicas, tanto cuantitativas como cualitativas, generadas en pos de mantener bajo el control deseado todas las actividades que de ellas dependan, como: monitoreo de procesos, desarrollo de nuevos materiales en áreas tecnológicas emergentes, el desarrollo de nuevas moléculas, acuerdos multilaterales, la protección del medio ambiente, etc.

El análisis químico es transversal a una inmensa variedad de actividades con intereses sociales y económicos, por lo que obtener un resultado confiable resulta una tarea altamente compleja debido a que deben mantenerse bajo riguroso control y seguimiento una enorme cantidad de factores, como ser entre otros: la metodología empleada, el tipo de muestra, su concentración, la infraestructura e instrumentos del laboratorio, el sistema de la calidad, la capacitación del personal, el desarrollo de los proveedores, una adecuada calibración de los instrumentos y que este resultado responda adecuadamente a las necesidades de información requerida.

Todos estos factores provocan que nuestras mediciones tengan una variabilidad analítica producida durante el proceso de medición y que es debida a la existencia de imperfecciones en los sistemas de medida; es la responsable de que cuando se mide repetidamente una magnitud en una misma muestra, se produzca una distribución de resultados que probablemente difiera de aquel considerado como verdadero. Esta variabilidad hace que los resultados de las mediciones sean tan sólo una aproximación del valor del mensurando; por esta razón los organismos internacionales de normalización recomiendan que todo resultado de una medición debe ir acompañado de alguna indicación

cuantitativa que informe la calidad metrológica con la que se ha obtenido. Este parámetro es la incertidumbre asociada a un resultado. El énfasis en la incertidumbre (analítica) es prácticamente nuevo para la mayoría de laboratorios clínicos y analíticos y requerirá información actualizada por parte de los fabricantes de equipos y calibradores e investigaciones por parte de los profesionales del laboratorio.

El desarrollo de nuevas moléculas y la existencia de medicamentos similares, han generado estudios sobre las características farmacocinéticas de ciertas drogas o fármacos. Esta situación ha generado la necesidad de desarrollar metodologías analíticas con una estricta estandarización de los procesos en ellas involucrados y el estudio de herramientas específicas para mejorar la calidad de las mediciones. El método por excelencia para este tipo de análisis es la cromatografía en fase líquida habitualmente denominado HPLC.

### Naturaleza del problema

La cromatografía líquida de alta performance (HPLC) es una técnica analítica que permite separar sustancias y cuantificarlas dando un valor de concentración.

Fundamento: es un método donde se contactan dos fases, una estacionaria sólida y otra líquida. Dependiendo de la afinidad de las sustancias a medir por cada una de las fases, quedará retenida por más tiempo la que tenga mayor afinidad por la fase estacionaria (envasada en una columna); al ser retenida por más tiempo, saldrá más tarde en la corrida cromatográfica. El compuesto menos retenido en la fase estacionaria, o sea con menor afinidad, saldrá más rápido. De esta manera tendrán distintos **tiempos de retención** ( $T_r$ ) y serán identificados selectivamente. Son 4 los parámetros que van a determinar la afinidad de cada sustancia con la columna, así como el ensanchamiento de la señal que se transmite en forma de cima gaussiana. Estos 4 parámetros conforman la teoría del plato teórico dinámico (*rate theory*): difusión en remolino, difusión molecular, resistencia a la transferencia de masa, velocidad lineal de fluido.

La calibración de este tipo de técnica analítica se realiza preparando soluciones patrones

y estándares de calibración (o calibradores, vale decir una solución de referencia con la cual se contrasta la sustancia a determinar y cuantificar) de diferentes concentraciones. Se grafica una curva de señal en función de concentración en la cual se interpola la señal de la muestra problema determinándose así un valor de concentración. La mayoría de los métodos de análisis por HPLC requieren la preparación de los calibradores en el laboratorio ya que no existen patrones comerciales para la totalidad de las determinaciones por lo cual, estos calibradores tienen una incertidumbre asociada. Es fundamental disminuir lo máximo posible la incertidumbre de los calibradores para que no se propague en la incertidumbre final del método. No es conveniente comenzar una medición comparando el elemento o sustancia a determinar y cuantificar con un patrón de referencia que tiene una incertidumbre asociada considerable. Se propone minimizar este valor mejorando la incertidumbre de los equipos e instrumentos de laboratorio utilizando las técnicas descritas más adelante.

### **Criterios para el éxito**

Se propone minimizar el valor de incertidumbre del patrón de referencia mejorando la incertidumbre de los equipos e instrumentos de laboratorio (balanzas, pipetas, material volumétrico (material de laboratorio utilizado para medir volúmenes), drogas, pureza de las drogas, etc.) y trabajando en el laboratorio con un sistema de gestión de la calidad de los procedimientos analíticos. Una manera de disminuir la incertidumbre de las pipetas es por medio de un control exhaustivo de la precisión con control gravimétrico. Este control se realiza pesando un volumen determinado con una pipeta automática  $n$  veces (de 5 a 10) calculando el promedio y desvío estándar, y por ende el coeficiente de variación porcentual. El control de la exactitud se realiza con un service y calibración externos por un laboratorio adecuado. De la misma manera se procederá con la balanza analítica, una verificación diaria de la precisión y exactitud es conveniente, con el control de la masa de una pesa con masa conocida, además de calibración externa por un service periódicamente. Con respecto del material volumétrico, existe en el mercado material calibrado por unidad o por lote, con una incertidumbre determinada. En cuanto a las drogas que se utilizarán como material de referencia, es condición la

adquisición de drogas de alta pureza, marca reconocida en el mercado, con una incertidumbre asociada ya que con ellas se va a contrastar los datos de las muestras.

### **Incertidumbre analítica**

La incertidumbre es un parámetro asociado al resultado de la medición que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser razonablemente atribuidos al mesurando. Cuando se informa el resultado de medición de una magnitud, es obligatorio proporcionar alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado, de manera tal que el usuario pueda evaluar su confiabilidad. Sin esa indicación, los resultados de las mediciones no podrían ser comparados, ni entre sí, ni con valores de referencia dados en una especificación o norma. La incertidumbre del resultado de una medición refleja la falta de conocimiento exacto del valor del mesurando. Pueden ser algunas fuentes de incertidumbre las siguientes: definición incompleta del mesurando, realización imperfecta de la definición del mesurando, muestreo no representativo, inadecuado conocimiento de los efectos de las condiciones ambientales sobre la medición o medición imperfecta de las condiciones ambientales, desvíos personales en la lectura de instrumentos analógicos, resolución finita del instrumental o del umbral de discriminación, valores inexactos de los patrones de medición y materiales de referencia, valores inexactos de constantes y otros parámetros obtenidos de fuentes externas y empleados en los cálculos, aproximaciones y suposiciones incorporadas en el método de medición y procedimiento, variaciones en las observaciones repetidas del mesurando bajo condiciones aparentemente idénticas, entre otras.

### **Estrategias para el cálculo de incertidumbre:**

Para adoptar la estrategia adecuada en el cálculo de la incertidumbre de un método analítico, se trata de llegar a una armonización (consenso), ya que hay diversidad de criterios en la estimación de incertidumbre analítica. No hay una estrategia ideal para la totalidad de determinaciones; cada uno de los métodos existentes será el más acertado dependiendo del objetivo del análisis y de la información recopilada; pero siempre se debe demostrar que el criterio elegido es estadísticamente válido y relevante para la disciplina.

La armonización puede observarse tanto en el marco mundial como en diferentes asociaciones regionales y supranacionales y tiene el objetivo de: eliminar barreras técnicas, asegurar y facilitar su libre intercambio de los mismos, garantizar su esencial seguridad, contribuir a la comparabilidad de productos y establecer exigencias mínimas acerca de la calidad de los productos, entre otros.

En los últimos años se tomaron en cuenta diferentes enfoques del cálculo de incertidumbre analítica. Una es la presentada en la Guía ISO GUM:1995 (también conocida como aproximación *bottom-up*) (Eurachem, 2000), que está basada sobre identificar, cuantificar, combinar y expandir todas las fuentes de incertidumbre del procedimiento analítico. Además existen dos aproximaciones alternativas que calculan la incertidumbre de forma más global, agrupando fuentes de incertidumbre siempre que sea posible. La primera de estas aproximaciones es la propuesta por el *Analytical Methods Committee* (AMC) (AMC, 1995) y está basada sobre la utilización de la información generada en los ejercicios interlaboratorio de tipo colaborativo. La segunda se basa en la utilización de la información generada en la verificación de la trazabilidad del método analítico (Maroto, 2002).

Se conoce como Aproximación ISO (*bottom-up*) a la estrategia para el cálculo de la incertidumbre propuesta por la ISO, presentada en la Guía ISO GUM:1995, la cual se aplicó inicialmente a las medidas físicas, y con el tiempo, viendo la flexibilidad del método, fue adaptada por Eurachem para las mediciones químicas. En la actualidad es la más utilizada, y será la estrategia de cálculo de incertidumbre que se adopta, ya que será más sencillo trabajar sobre los distintos factores individualmente para minimizarla.

## Parte experimental

### Soluciones propuestas

El objetivo es minimizar el valor de incertidumbre del patrón de referencia mejorando la incertidumbre de los equipos e instrumentos de laboratorio (pureza de las drogas, balanzas, pipetas, material volumétrico, termómetros) y trabajando en el laboratorio con un sistema de gestión de la calidad de los procedimientos analíticos.

En la práctica, la selección de un instrumento de medición es un factor clave en el proceso de medición y se inicia delimitando el uso previsto y las características metrológicas. Se deben considerar los siguientes aspectos: capacidad de medición, relación de incertidumbre (cociente entre la tolerancia (diferencia admisible especificada entre valores máximo y mínimo de una magnitud) y la incertidumbre del instrumento. por acuerdo internacional se establece que una relación de incertidumbres entre 3 y 10 es apropiada para asegurar la confiabilidad en las mediciones), relación Costo-Beneficio, condiciones críticas de funcionamiento, manejo, operatividad y adaptación a las necesidades. Se debe realizar un informe detallado de las condiciones a las que operará el instrumento (temperatura, presión, humedad, vibraciones, etc.).

Es importante también la determinación de los períodos de calibración y verificación, según factores: metrológicas, debidas al instrumento (desgaste o deterioro y recomendaciones del fabricante), al uso (frecuencia y severidad, las condiciones ambientales), al registro de calibraciones previas, al costo: (costo de correcciones).

La pureza de los reactivos es de fundamental importancia para la exactitud de los resultados de un análisis y se utilizarán para los análisis de laboratorio, drogas o reactivos químicos de máxima pureza. Existen en el mercado drogas de diferentes calidades y de diferentes purezas. Según Disposición ANMAT 5040/06:

“En todos los casos, los estándares deberán ser trazables y contar con protocolos analíticos, así como ser almacenados conforme a las instrucciones del proveedor. Frecuentemente, éstos deben ser conservados en un lugar fresco, al abrigo de la luz, con baja humedad y siempre en frascos bien cerrados a los fines de resguardar su identidad durante todo el período de vida útil del mismo. Se debe llevar la planilla de stock de estándares en la que debería figurar la cantidad disponible de cada uno, masa utilizada y período de validez.”

La balanza microanalítica electrónica será la adecuada al uso previsto en función de su capacidad de medición y su precisión asociada. Dicha balanza analítica requerirá una verificación diaria de la precisión y exactitud, con el control del peso de una pesa calibrada con masa co-

nocida, además de calibración externa por un service periódicamente, respetando el programa de calibraciones elaborado a dichos efectos. Las consideraciones necesarias de uso, mantenimiento, calibración y verificación serán las detalladas en la disposición ANMAT 5040/06.

“Las balanzas analíticas deben ser instaladas en un local adecuado, niveladas, libre de corriente de aire, en mesadas exclusivas para las mismas y estables. Siempre que se pueda, estarán dispuestas en ambientes con temperatura controlada. Las balanzas deben ser acondicionadas después de su uso. Debe haber un programa de mantenimiento que incluya el mantenimiento y la calibración periódica (como mínimo, anualmente) con toda la información registrada y archivada.”

Una manera de disminuir la incertidumbre de las pipetas es por medio de un control exhaustivo de la precisión con control gravimétrico. Este control se realiza pesando un volumen determinado con una pipeta automática  $n$  veces (de 5 a 10) calculando el promedio y desvío estándar, y por ende el coeficiente de variación porcentual. El control de la exactitud se realiza con un service y calibración externos por un laboratorio adecuado. Las normas ISO 9001 y ISO 17025 exigen la comprobación periódica de los aparatos de medida volumétricos, y la ISO 8655 y la DIN 12650 son las reglamentaciones técnicas equivalentes más utilizadas en cuanto a su manejo en el laboratorio.

Es conveniente una calibración cada tres meses y un control diario de funcionamiento que conste de las siguientes pruebas al menos: estanqueidad (tomar el volumen nominal máximo de agua destilada y poner la pipeta en un soporte sin vibraciones y verificar que durante 1 minuto no se formen gotas claras en la punta), control visual: observar durante el uso diario si hay rayas o daños en el cono de trabajo, o uniones flojas y de aparecer alguno se procede a efectuar una prueba de gravimetría y un control de funcionalidad al uso que se le dará. La calibración de pipetas comprende la comparación de volumen real (valor medio para el volumen que se determina gravimétricamente para un número dado de pipeteos repetidos) y volumen teórico (volumen regulado en el indicador digital de la pipeta). Los parámetros estadísticos a informar y controlar van a ser la exactitud (desviación cuantitativa del valor real frente al teó-

rico) y la precisión (desviación típica en % del valor real. También llamada desviación típica relativa (DTR) o coeficiente de variación (CV)).

Con respecto al material volumétrico, existe en el mercado material calibrado por unidad o por lote, con una incertidumbre determinada. Al utilizar instrumentos de vidrio, se debe tener en cuenta que este material se expande y se contrae de acuerdo con la temperatura, por eso se deben respetar las recomendaciones del fabricante. Su calibración suele efectuarse con una frecuencia de tres meses considerando un uso diario mediante una comparación entre el volumen actual dispensado con el volumen nominal ajustado, para ello se mide un líquido de densidad conocida a una temperatura determinada y se convierte la masa en volumen o con un factor de corrección (debido al empuje del aire dado que la densidad del agua es muy inferior a la de las pesas), teniendo en cuenta que el líquido usado sea agua destilada, la cual se expande 0,02% por grado Celsius a los 20° C. (norma ISO 4787 y ASTM E 542-01).

Con respecto de la medición de temperatura, el error máximo de su medida permitido (EMP) es un parámetro clave a tener en cuenta en cuanto a la elección del instrumento de medición en el laboratorio clínico y depende sustancialmente del objeto de la medición. Se deben establecer las medidas que con cada termómetro se efectuarán y asignarle como error máximo permitido el más estricto de las categorías de medida que se realizan con el mismo. Las categorías se definen como A con un EMP (° C) = 0,5, B con un EMP (° C) = 1,0 y C con un EMP (° C) = 2,0. Este error admisible se utilizará como criterio de aceptación de las calibraciones. La frecuencia de calibración de un termómetro depende de las características del instrumento y del uso. En general es suficiente calibrar los termómetros una vez al año. También deberían calibrarse siempre que exista alguna sospecha de funcionamiento incorrecto o después de haber sido sometidos a temperaturas inadecuadas (IRAM 9102.)

### **Metodología utilizada**

Las sustancias que se estudiarán a continuación (fenmobarbital, carbamazepina, difenilhidantoína) tienen una ventana terapéutica estrecha, es decir la concentración plasmática eficaz está muy cerca de la tóxica. Es por este motivo que

el monitoreo terapéutico (medición de la concentración en plasma) es de suma importancia para redefinir la dosis de administración de estos fármacos.

Presentaremos a continuación los cálculos de fenobarbital; el procedimiento de cálculo para las demás sustancias es similar, variando fundamentalmente la concentración a obtener que contenga la dosis terapéutica requerida por cada una.

### Práctica de fenobarbital

El fenobarbital es un barbitúrico de acción prolongada utilizado en el tratamiento de las convulsiones neonatales, tónico clónicas generalizadas, epilepsias parciales, prevención de convulsiones febriles y en el estado de mal elíptico resistente a otros tratamientos.

### Preparación de solución patrón de fenobarbital:

Paso 1: Definición del mensurando

Se efectúa la preparación de una solución patrón de fenobarbital para determinación de HPLC a partir de una droga de alta pureza, según los pasos detallados en la Figura 1.

$$Cc_{FBT} = (m \cdot p / V)$$

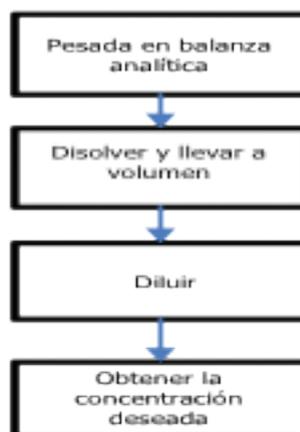
**Cc<sub>FBT</sub>**: concentración del estándar de calibración [generalmente en mg/ml]

**m**: masa del estándar de alta pureza [generalmente en mg]

**p**: pureza estándar

**V**: volumen del líquido del estándar de calibración

[generalmente en ml]



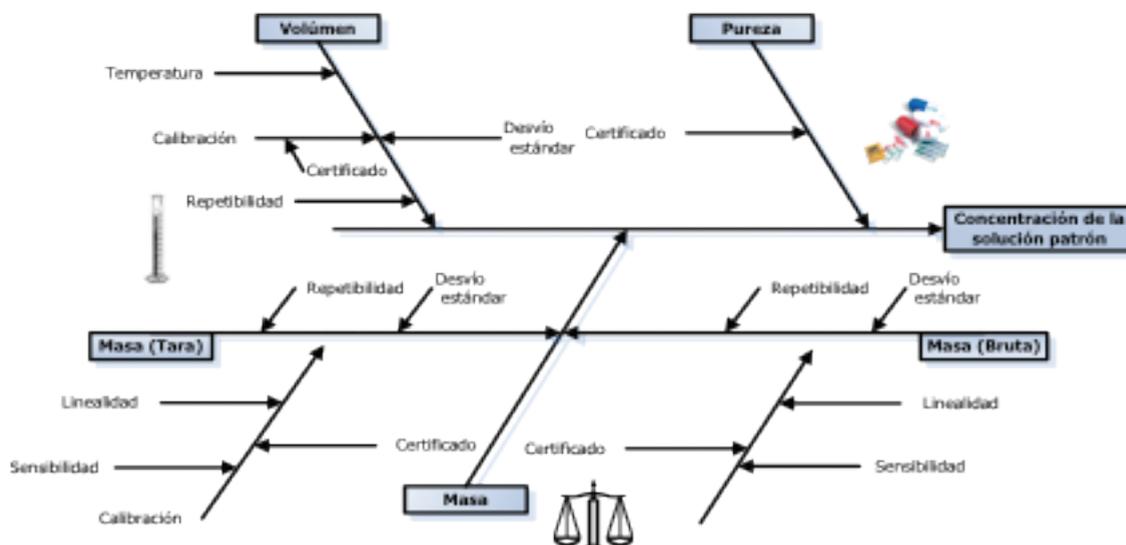
**Fig.1. Preparación de un estándar de calibración**

Paso 2: Identificación de las fuentes de incertidumbre

Se confeccionó una lista completa de las fuentes de incertidumbre. Para visualizarlo de forma clara se realizará un diagrama causa-efecto de Ishikawa o espina de pescado. Ver Figura 2.

Paso 3: Cuantificación de la incertidumbre de cada fuente

Se estimará la incertidumbre total, para ello se consideran todas las fuentes de incertidumbre que puedan ser significativas y se obtendrá la contribución individual de cada una de ellas. Además se calculará la incertidumbre estándar, mediante el cociente entre dicha incertidumbre y un factor de cobertura que depende de la dis-



**Fig. 2. Diagrama causa-efecto para identificación de fuentes de incertidumbre**

tribución asumida y el intervalo de confianza correspondiente.

(1) Pureza

Se analiza la pureza de la droga mediante datos del fabricante; a saber: pureza superior al 99%; en el certificado del fabricante no declara la incertidumbre de la pureza, por lo tanto se toma la peor situación.

$$\Delta p = 1\% = 0,01$$

$$Pureza = (99 \pm 1)\%$$

$$Pureza = (0,99 \pm 0,01)$$

Por no poseer información del tipo de distribución se asume una distribución rectangular, al considerar el peor caso; con

$$k = \sqrt{3}$$

$$u(p) = \Delta p / k$$

$$u(p) = 0,01 / \sqrt{3}$$

$u(p)$ : Incertidumbre estándar debido a la pureza de la droga

$$u(p) = 0,0057735$$

(2) Masa

Se pesan 5 mg de la droga para su posterior disolución y dilución; y las fuentes de incertidumbre tenidas en cuenta serán las siguientes:

- 1- Repetibilidad
- 2- Resolución digital
- 3- Calibración

El efecto combinado de la incertidumbre se evidencia en el ensayo de linealidad que muestra el certificado.

$$u(m) = 0,00013g$$

$$u(m) = 0,13mg$$

Las pesadas asumen una distribución normal con  $k = 2$

$$u(m) = Sm / k$$

$$u(m) = 0,13mg / 2$$

$u(m)$ : Incertidumbre estándar debido a la masa de la droga

$$u(m) = 0,065mg$$

(3) Volumen

Existen tres fuentes de incertidumbre en la obtención del volumen deseado:

- 1- Incertidumbre del matraz aforado de 5 ml
- 2- Variación en el llenado del matraz
- 3- Diferencias de temperatura

3-1- Calibración

En el certificado del fabricante se declara:

Valor nominal: 5 ml

Tolerancia: 0,025 ml

Temperatura: 20,00 °C / 68 °F

Y la incertidumbre expresada en la tolerancia será:

$$u(V)_1 = \Delta v / k$$

$$u(V)_1 = 0,025ml / \sqrt{6}$$

Se asume distribución triangular  $k = \sqrt{6}$

$$u(V)_1 = 0,0102062 \text{ ml}$$

3-2- Repetibilidad

Valor nominal: 5,006 ml

La repetibilidad está representada por la magnitud estadística: desviación estándar

$$\delta v = 0,013ml$$

$$u(v)_2 = \delta v / k \text{ con } k = 2$$

$$u(v)_2 = 0,013m / 2 = 0,0065 \text{ ml}$$

3-3-Temperatura

Se expresará la incertidumbre debida a la variabilidad térmica estimada:

Volumen  $V = 5ml$

Variación de temperatura =  $\Delta T = \pm 2^\circ C$

Coefficiente de expansión térmica del agua =

$$\alpha = 2,110^{-4} \text{ } ^\circ C^{-1}$$

Variación del volumen

$$\Delta V = \pm V \Delta T \alpha$$

$$\Delta V = \pm 5ml \cdot 2^\circ C \cdot 2,110^{-4} \text{ } ^\circ C^{-1}$$

$$\Delta V = 2,1 \times 10^{-3} \text{ ml}$$

$u(v)_3 = \Delta V / k$  Con  $k = \sqrt{3}$  Asumiendo una distribución rectangular

$$u(v)_3 = 0,0012124355 \text{ ml}$$

$$u(V) = \sqrt{(u(V)_1)^2 + u(V)_2^2 + u(V)_3^2}$$

Se procede a combinar las incertidumbres individuales relativas al volumen.

$$u(V) = \sqrt{(u(V)_1)^2 + u(V)_2^2 + u(V)_3^2}$$

$$u(V) = \sqrt{0,0102062072ml^2 + 0,0065ml^2 + 0,0012124355ml^2}$$

$u(v)$  : incertidumbre estándar debido al volumen de la droga

$$u(v) = 0,01216 \text{ ml}$$

Paso 4: Cálculo de la incertidumbre combinada  
 La incertidumbre combinada estará dada por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de todas las fuentes (o sea las fuentes de incertidumbre se propagan cuadráticamente). Se combinan las incertidumbres en su expresión relativa, para obtener índices provenientes de distintas fuentes de incertidumbre adimensionales, por lo tanto combinables.

$$u(FBT)/CcFBT =$$

$$\sqrt{(u(p)/p_0)^2 + (u(m)/m_0)^2 + (u(V)/V_0)^2}$$

$$CcFBT = (m \cdot p / V) \text{mg / ml}$$

$$CcFBT = 5 \text{mg} \cdot 0,99 / 5 \text{ml} = 0,99 \text{mg / ml}$$

$$u(FBT)/CcFBT =$$

$$\sqrt{(0,005773505 / 0,99)^2 + (0,065 \text{mg} / 5 \text{mg})^2 +$$

$$(0,0121608659 \text{ ml} / 5 \text{ml})^2}$$

$$u(FBT)/CcFBT = \sqrt{3,4010110^{-5} + 0,000169 +$$

$$0,0000059154} = 0,0144542577$$

Incertidumbre combinada

$$u(FBT) = 0,0144542577 \cdot 0,99 \text{mg/ml}$$

$$u(FBT) = 0,01430971 \text{ mg/ml}$$

Paso 5: Cálculo de la incertidumbre expandida  
 Se obtiene multiplicando la incertidumbre por un factor de cobertura k, el cual depende de la probabilidad de contener al valor verdadero y de la distribución asumida.

Incertidumbre expandida

$$U(FBT) = k \cdot u(FBT) \quad k = 2$$

$$U(FBT) = 2 \cdot 0,0143097151 \text{mg/ml}$$

$$U(FBT) = 0,0286194302 \text{ mg/ml} \approx 0,029 \text{ mg/ml}$$

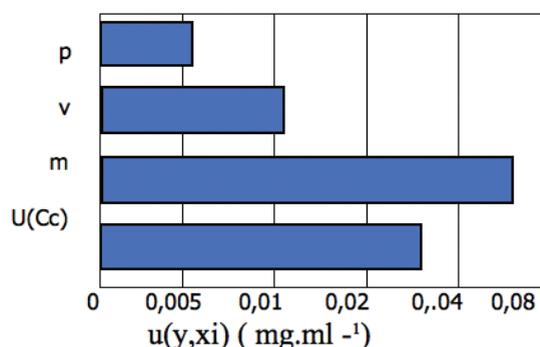
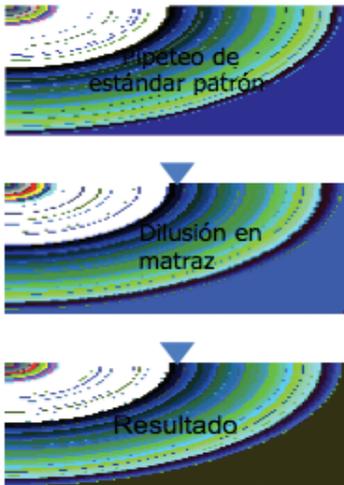


Fig. 3. Contribuciones de las incertidumbres al estándar de calibración

	A	B	C	D	E
1			P	M	V
2		Valor	0,99	5,000	5,000
3		Incertidumbre	0,005773505	0,065	0,0121608659
4					
5	P	0,99	0,995773505	0,99	0,99
6	m	5,000	5,000	5,065	5,000
7	V	5,000	5,000	5,000	5,0121608659
8					
9	Cc	0,99	0,995773505	1,00287	0,98665
10	u(y,xi)		0,005773505	0,01287	-0,00335
11	u(y) <sup>2</sup> ,u(y,xi) <sup>2</sup>	0,0002101928	0,0000333334	0,0001656369	0,0000112225
12					
13	u(CcFBT)	<b>0,014498027</b>	U(CcFBT)	<b>0,028996055</b>	<b>≈ 0,029</b>

Tabla 1: Tabla de valores e incertidumbres



**Fig. 4.a NIVEL 4**

**NIVEL 4**

Se efectuó la preparación del calibrador nivel 4 a partir del estándar patrón.

Identificación de las fuentes de incertidumbre:

- 1- Incertidumbre estándar del patrón
- 2- Dosificación con pipeta
- 3- Volumen

- 1- Incertidumbre estándar del patrón

$$u(\text{FBT}) = 0,0143097151 \text{ mg/ml}$$

$$U(\text{FBT}) = 0,0286194302 \text{ mg/ml} \approx 0,029 \text{ mg/ml}$$

- 2- Dosificación con micropipeta  
Se emplea pipeta monocanal de volumen variable.

Gilson / P1000 / 200-1000  $\mu\text{l}$

El certificado considera:

- 1- Densidad del líquido de referencia utilizado
- 2- Desvío estándar de las mediciones
- 3- Condiciones ambientales

$$u(\text{pipeta}) = \pm 0,00033 \text{ ml} \quad \text{con } k=2$$

$$u(\text{pipeta}) = 0,00033 \text{ ml} / 2$$

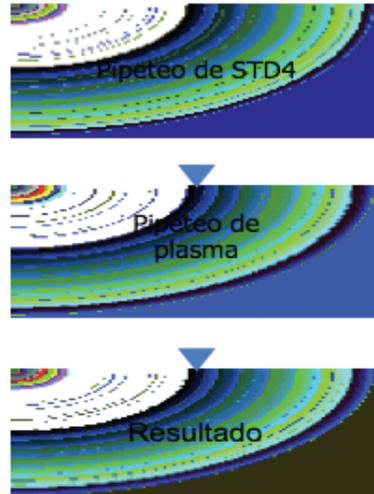
$$u(\text{pipeta}) = 0,000165 \text{ ml}$$

- 3- Volumen

- 1- Incertidumbre de certificado del matraz aforado de 5ml

- 2- Variación en el llenado del matraz

- 3- Diferencias de temperatura.



**Fig. 4.b NIVELES 3, 2, 1**

- 3-1- Calibración

El certificado del fabricante declara:

Valor nominal  $V_0 = 5 \text{ ml}$

Tolerancia =  $0,025 \text{ ml}$

Temperatura =  $20,00^\circ \text{ C} / 68,00^\circ \text{ F}$

La incertidumbre asociada a la tolerancia asume una distribución Triangular:

$$u(V_1) = \Delta V / k = 0,025 \text{ ml} / \sqrt{6} \quad k = \sqrt{6}$$

$$u(V_1) = 0,0102062 \text{ ml}$$

- 3-2- Repetibilidad

La repetibilidad está representada por la magnitud estadística: desviación estándar

$$\delta v = 0,013 \text{ ml}$$

$$u(V)_2 = \delta v / k \quad \text{Con } k = 2$$

$$u(V)_2 = 0,013 \text{ ml} / 2 = 0,0065 \text{ ml}$$

- 3-3- Temperatura

Volumen  $V_0 = 5 \text{ ml}$

Variación de la temperatura:  $\Delta T = \pm 2^\circ \text{ C}$

Coefficiente de expansión térmica del agua

$$\alpha = 2,110 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ \text{ C}^{-1}$$

$$\text{Variación del volumen } \Delta v = \pm V_0 \Delta T \alpha$$

$$\Delta V = 2,110 \cdot 10^{-3} \text{ ml} \quad \text{con } k = \sqrt{3}$$

(distribución rectangular)

$$u(V_3) = \Delta V / k$$

$$u(V_3) = 0,00121243 \text{ ml}$$

Cálculo de la incertidumbre combinada

$$u(V) = \sqrt{u(V_1)^2 + u(V_2)^2 + u(V_3)^2}$$

Nivel 4	Descripción	Valor	Incertidumbre estándar	Incertidumbre estándar relativa
Cc	Concentración del estándar de calibración	0,99 mg/ml	0,0144822961 mg/ml	0,0146285819
X <sub>p</sub>	Dosificación pipeta	0,5 ml	0,000165 ml	0,00033
V	Volumen	5 ml	0,0121608600 ml	0,0024321720

**Tabla 2. Valores e incertidumbres del nivel 4**

$$= \sqrt{(0,0102062072^2 + 0,0065^2 + 0,00121243^2) ml^2}$$

$$= 0,01216086 \text{ ml}$$

Combinación del nivel 4

Factores a considerar:

1- Incertidumbre estándar del patrón

$$u(\text{FBT}) = 0,0144822961 \text{ mg/ml}$$

2- Dosificación pipeta  $u(\text{pipeta}) = 0,000165 \text{ ml}$

3- Volumen  $u(V) = 0,01216086$

Concentración del estándar en su cuarto nivel :

$$C\text{STD4} = 0,1 \text{ mg/ml}$$

$$u(\text{STD4}) = \sqrt{u(\text{FBT})^2 + u(\text{pipeta})^2 + u(V)^2}$$

$$u(\text{STD4})/C\text{STD4} = \sqrt{(u(\text{FBT})/C(\text{FBT}))^2 + (u(\text{pipeta})/X_p)^2 + (u(V)/V_0)^2}$$

$$u(\text{STD4}) = (\sqrt{(0,0002139954 + 0,0000001089 + 0,0000059154)}) \cdot 0,1 \text{ mg/ml}$$

$$u(\text{STD4}) = 0,0148330630 \cdot 0,1 \text{ mg/ml}$$

$$u(\text{STD4}) = 0,001483 \text{ mg/ml}$$

Incertidumbre expandida

$$U(\text{STD4}) = k \cdot u(\text{STD4}) \text{ Con } k = 2$$

$$U(\text{STD4}) = 0,0029666 \text{ mg/ml} \cong 0,0030 \text{ mg/ml}$$

### NIVEL 3

Identificación de las fuentes de incertidumbre

1. Incertidumbre estándar 4 (STD4)

2. Dosificación con pipeta

1 -Incertidumbre del STD4

$$u(\text{STD4}) = 0,0014833063 \text{ mg/ml}$$

con  $k = 2$

$$U(\text{STD4}) = 0,0029666126 \text{ mg/ml} \cong$$

$$0,0030 \text{ mg/ml}$$

2 -Dosificación pipeta

1- 1ml STD4

2- 1ml plasma libre de droga

Micropipeta monocanal de volumen variable

Gilson / P1000 / 200 a 1000  $\mu$ l

El certificado considera:

1- Densidad del líquido de referencia utilizado

2- Desvío estándar de las mediciones

3- Condiciones ambientales

$$u(\text{pipeta}) = \pm 0,0019 \text{ ml} \quad \text{con } k = 2$$

$$u(\text{pipeta}) = 0,00095 \text{ ml}$$

Combinación del nivel 3

Factores a considerar:

1- Incertidumbre estándar del patrón

$$u(\text{STD4}) = 0,0014833063 \text{ mg/ml}$$

2- Dosificación pipeta

Concentración del estándar en su tercer nivel :

$$C\text{STD3} = 0,05 \text{ mg/ml}$$

$$u(\text{STD3})/C\text{STD3} = \sqrt{(u(\text{FBT})/C(\text{FBT}))^2}$$

$$+ (u(\text{pipeta}_1)/X_p)^2 + (u(\text{pipeta}_2)/X_p)^2$$

$$u(\text{STD3})/C\text{STD3} = 0,0148937825$$

$$u(\text{STD3}) = 0,0007446891 \text{ mg/ml}$$

Incertidumbre expandida

$$U(\text{STD3}) = k \cdot u(\text{STD3}) \text{ con } k = 2$$

$$U(\text{STD3}) = 0,0014893783 \text{ mg/ml}$$

$$\cong 0,0015 \text{ mg/ml}$$

### NIVEL 2

Identificación de las fuentes de incertidumbre

1- Incertidumbre estándar 4 (STD4)

2- Dosificación con pipeta

Nivel 3	Descripción	Valor	Incertidumbre estándar	Incertidumbre estándar relativa
CcFBT	Concentración del estándar de calibración (nivel 4)	0,1 mg/ml	0,0014833 mg/ml	0,014833
X <sub>p</sub>	Dosificación pipeta	1 ml	0,00095 ml	0,00095
X <sub>p</sub>	Dosificación pipeta	1 ml	0,00095 ml	0,00095

**Tabla 3. Tabla de valores e incertidumbres del nivel 3**

1 -Incertidumbre del STD4  
 $u(STD 4) = 0,0014833063 \text{ mg/ml}$  con  $k = 2$   
 $U(STD4) = 0,0029666126 \text{ mg/ml}$   
 $\approx 0,0030 \text{ mg/ml}$

2 -Dosificación pipeta  
 1- 0,250 ml STD4  
 2- 0,750ml plasma libre de droga

Micropipeta monocal de volumen variable  
 Gilson / P1000 / 200 a 1000  $\mu\text{l}$

El certificado considera:  
 1- Densidad del líquido de referencia utilizado  
 2- Desvío estándar de las mediciones  
 3- Condiciones ambientales

$u(\text{pipeta}) = \pm 0,0019 \text{ ml}$  con  $k = 2$   
 $u(\text{pipeta}) = 0,00095 \text{ ml}$

Combinación del nivel 2

Factores a considerar:

1- Incertidumbre estándar del patrón

$u(STD4) = 0,0014833063 \text{ mg/ml}$

2- Dosificación pipeta.

Concentración del estándar en su segundo nivel  
 :  $CSTD2$

$$CSTD2 = 0,025 \text{ mg/ml}$$

$$u(STD2) / CSTD2 = \sqrt{(u(FBT) / Cc(FBT))^2 +$$

$$(u(\text{pipeta}_1) / X_p)^2 + (u(\text{pipeta}_2) / X_p)^2}$$

$$u(STD2) / CSTD2 = 0,0153643810$$

$$u(STD2) = 0,0003841095 \text{ mg/ml}$$

Incertidumbre expandida  
 $U(STD2) = k \cdot u(STD2)$  con  $k = 2$

$U(STD2) = 0,0007682190 \text{ mg/ml} \approx$   
 $0,00077 \text{ mg/ml}$

### NIVEL 1

Identificación de las fuentes de incertidumbre

1- Incertidumbre estándar 4 (STD4)

2- Dosificación con pipeta.

1 -Incertidumbre del STD4

$u(STD 4) = 0,0014833063 \text{ mg/ml}$  con  $k = 2$

$U(STD4) = 0,0029666 \text{ mg/ml} \approx 0,0030 \text{ mg/ml}$

2- Dosificación pipeta

1- 0,875 ml Plasma libre de droga

Micropipeta monocal de volumen variable  
 Gilson / P1000 / 200 a 1000  $\mu\text{l}$

El certificado considera:

1- Densidad del líquido de referencia utilizado

2- Desvío estándar de las mediciones

3- Condiciones ambientales

$u(\text{pipeta}) = \pm 0,0019 \text{ ml}$  con  $k = 2$

$u(\text{pipeta}) = 0,00095 \text{ ml}$

2- 0,125 ml del nivel 4

Micropipeta monocal de volumen variable  
 Gilson / P200 / 50a 1000  $\mu\text{l}$

El certificado considera:

1- Densidad del líquido de referencia utilizado

2- Desvío estándar de las mediciones

3- Condiciones ambientales

Nivel 2	Descripción	Valor	Incertidumbre estándar	Incertidumbre estándar relativa
CcFBT	Concentración del estándar de calibración (nivel 4)	0.1 mg/ml	0,0014833 mg/ml	0,014833
X <sub>p</sub>	Dosificación pipeta	0,250 ml	0,00095 ml	0,0038
X <sub>p</sub>	Dosificación pipeta	0,750 ml	0,00095 ml	0,001266667

**Tabla 4. Tabla de valores e incertidumbres del nivel 2**

Nivel 1	Descripción	Valor	Incertidumbre estándar	Incertidumbre estándar relativa
CcFBT	Concentración del estándar de calibración (nivel 4)	0,1 mg/ml	0,0014833 mg/ml	0,014833
X <sub>p</sub>	Dosificación pipeta	0,125 ml	0,000165 ml	0,00132
X <sub>p</sub>	Dosificación pipeta	0,875 ml	0,00095 ml	0,0010857143

**Tabla 5. Tabla de valores e incertidumbres del nivel 1**

$$u(\text{pipeta}) = \pm 0,00033 \text{ ml} \quad \text{con } k = 2$$

$$u(\text{pipeta}) = 0,000165 \text{ ml}$$

Combinación del nivel 1

Factores a considerar:

1- Incertidumbre estándar del patrón

$$u(\text{STD4}) = 0,00150 \text{ mg/ml}$$

2- Dosificación pipeta

Concentración del estándar en su segundo nivel (CSTD1)

$$(CSTD1) = 0,0125 \text{ mg/ml}$$

$$u(\text{STD1})/CSTD1 = \sqrt{(u(\text{FBT})/Cc(\text{FBT}))^2 + (u(\text{pipeta}_1)/X_p)^2 + (u(\text{pipeta}_2)/X_p)^2}$$

$$u(\text{STD1})/CSTD1 = 0,0149312067$$

$$u(\text{STD1}) = 0,00018664 \text{ mg/ml}$$

Incertidumbre expandida

$$U(\text{STD1}) = k \cdot u(\text{STD1}) \quad \text{con } k = 2$$

$$U(\text{STD1}) = 0,0003732 \text{ mg/ml} = 0,00038 \text{ mg/ml}$$

Se prepararan varios niveles de concentración de los estándares para confeccionar una curva de calibración, cumpliendo con la función  $y = ax + b$  (regresión lineal).

FBT Nivel	Valor de concentración mg/ml	Incertidumbre combinada mg/ml	Incertidumbre expandida mg/ml	Incertidumbre relativa %
Patrón	1,000	±0,015	±0,029	2,9
4	0,1000	±0,0015	±0,0030	3
3	0,05000	±0,00074	±0,0015	3
2	0,02500	±0,00038	±0,00077	3,08
1	0,01250	±0,00019	±0,00038	3,04

CBZ Nivel	Valor de concentración mg/ml	Incertidumbre combinada mg/ml	Incertidumbre expandida mg/ml	Incertidumbre relativa %
Patrón	1,000	±0,015	±0,029	2,9
4	0,02000	±0,00030	±0,00060	3
3	0,01000	±0,00015	±0,00030	3
2	0,005000	±0,000078	±0,00016	3,2
1	0,002500	±0,000038	±0,000076	3

DFH Nivel	Valor de concentración mg/ml	Incertidumbre combinada mg/ml	Incertidumbre expandida mg/ml	Incertidumbre relativa %
Patrón	1,000	±0,015	±0,029	2,9
4	0,02500	±0,00037	±0,00075	3,0
3	0,01250	±0,00015	±0,00030	2,4
2	0,006250	±0,000079	±0,00016	2,56
1	0,003125	±0,000038	±0,000076	2,432

**Tablas 6.a, 6.b, 6.c. Incertidumbres a distintos niveles de concentración para fenobarbital, carbamazepina y difenilhidantoína**

En síntesis, se ha desarrollado un método para el cálculo de incertidumbre en la preparación de las soluciones patrones para determinaciones por HPLC sobre base a las directrices generales de la guía GUM ISO 1995 y EURACHEM e intentando optimizar el cálculo de la incertidumbre de los equipos e instrumentos de laboratorio (pureza de las drogas, balanzas, pipetas, material volumétrico, termómetros) y trabajando en el laboratorio con un sistema de gestión de la calidad de los procedimientos analítico.

### Validación del método

En este apartado se enfocan los esfuerzos en demostrar que el método propuesto es consistente. En el laboratorio, para obtener resultados confiables, es necesario trabajar bajo un sistema de gestión de la calidad y con la utilización de métodos validados con equipos certificados, instrumentos con la precisión adecuada, insumos de calidad analítica y controles de calidad. La norma 5040/06 nos sugiere cómo debemos validar los métodos bioanalíticos, e indica los criterios de aceptación de los parámetros de validación, también indica las condiciones de los equipos críticos para las determinaciones analíticas, como balanza ana-

lítica, pipetas automáticas, congeladores y heladeras, peachímetros, calidad de reactivos y solventes, centrífugas, equipos de HPLC, etc.

Según Disposición ANMAT 5040/06:

“La metodología bioanalítica utilizada para la cuantificación del principio activo y/o metabolitos, debe estar bien caracterizada, validada y documentada.” “La validación tiene por objeto demostrar que el método utilizado es confiable y reproducible.” “En la etapa bioanalítica de los estudios de bioequivalencia, deben aplicarse las Buenas Prácticas de Laboratorio”. “Se hará una presentación detallada de la metodología bioanalítica utilizada para la determinación del principio activo, con detalle de: a) Control de calidad o Curva Estándar de Concentración, b) Precisión Intra-día (CV%), c) Exactitud Intra-día, d) Precisión Inter-día (CV%), e) Exactitud Inter-día, f) Linealidad, g) Rango lineal, h) Sensibilidad/LOQ, i) Recuperación (%).” “Toda la metodología bioanalítica debe estar detalladamente descripta en el protocolo y en el informe final.”

En síntesis, se ha desarrollado y validado un método para cuantificar fenobarbital, carbamazepina y difenilhidantoína en plasma humano por HPLC con detección UV que se adapta a las

			Criterios de aceptación según la norma 5040 ANMAT	Cumple
Veracidad (exactitud según la norma)	QCbajo QCmedio QCalto	bias% 3,1 bias% -5,9 bias% 0,7	bias% < 15%	<b>SÍ</b>
Recuperación	QCbajo QCmedio QCalto	99,89% 99,46% 99,09% CV%=0,4	La recuperación debe ser precisa: CV < 15%	<b>SÍ</b>
Linealidad		El coeficiente de regresión (r <sup>2</sup> ) siempre fue mayor a 0,99	Respuesta lineal	<b>SÍ</b>
Límite de cuantificación	LQ = 1,25 µg/ml	CV% 7,1 y bias% 0,4	Preciso y exacto	<b>SÍ</b>
Estabilidad	Estable a largo plazo (1 mes)			
Precisión intradía	QCbajo QCmedio QCalto	CV% 2,0 CV% 2,3 CV% 2,6	CV < 15%	<b>SÍ</b>
Precisión interdía	QCbajo QCmedio QCalto	CV% 2,0 CV% 5,1 CV% 2,1	CV < 15%	<b>SÍ</b>

**Tabla 7.a Resumen de los parámetros de validación de fenobarbital**

			Criterios de aceptación según la norma 5040 ANMAT	Cumple
Veracidad (exactitud según la norma)	QCbajo QCmedio QCalto	bias% 4,4 bias% 4,7 bias% 2,2	bias% < 15%	<b>Sí</b>
Recuperación	QCbajo QCmedio QCalto	99,6% 97,62% 101,1% CV%=1,8	La recuperación debe ser precisa: CV < 15%	<b>Sí</b>
Linealidad		El coeficiente de regresión ( $r^2$ ) siempre fue mayor a 0,99	Respuesta lineal	<b>Sí</b>
Límite de cuantificación	LQ = 0,25 µg/ml	CV% 3,4 y bias% 8,4	Preciso y exacto	<b>Sí</b>
Estabilidad	Estable a largo plazo (1 mes)			
Precisión intradía	QCbajo QCmedio QCalto	CV% 3,7 CV% 1,4 CV% 2,6 01-07-2011	CV < 15%	<b>Sí</b>
Precisión interdía	QCbajo QCmedio QCalto	CV% 2,8 CV% 2,7 CV% 2,2	CV < 15%	<b>Sí</b>

**Tabla 7.b Resumen de los parámetros de validación de carbamazepina**

			Criterios de aceptación según la norma 5040 ANMAT	Cumple
Veracidad (exactitud según la norma)	QCbajo QCmedio QCalto	bias% 1,7 bias% 0,6 bias% -1,2	bias% < 15%	<b>Sí</b>
Recuperación	QCbajo QCmedio QCalto	100,82% 102,73% 109,43% CV%=4,3	La recuperación debe ser precisa: CV < 15%	<b>Sí</b>
Linealidad		El coeficiente de regresión ( $r^2$ ) siempre fue mayor a 0,99	Respuesta lineal	<b>Sí</b>
Límite de cuantificación	LQ = 0.313 µg/ml	CV% 5,0 y bias% -0,1	Preciso y exacto	<b>Sí</b>
Estabilidad	Estable a largo plazo (1 mes)			
Precisión intradía	QCbajo QCmedio QCalto	CV% 1,6 CV% 1,5 CV% 2,6	CV < 15%	<b>Sí</b>
Precisión interdía	QCbajo QCmedio QCalto	CV% 1,4 CV% 1,6 CV% 2,4	CV < 15%	<b>Sí</b>

**Tabla 7.c Resumen de los parámetros de validación de difenilhidantoína**

<b>Analito</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nivel 1</b>	<b>U(exp)%</b>	<b>Nivel 2</b>	<b>U(exp)%</b>	<b>Nivel 3</b>	<b>U(exp)%</b>
<b>CBZ</b>	ug/ml	3,011	20,05	8,853	18,21	14,074	18,75
<b>DFH</b>	ug/ml	6,848	20,04	12,873	17,42	22,054	19,58
<b>FBT</b>	ug/ml	11,246	21,38	28,382	17,89	62,247	18,81

**Tabla 8. Tabla resumen de valores de incertidumbre de fenobarbital, carbamazepina y difenilhidantoína para los tres niveles**

necesidades del laboratorio en el rango analítico estudiado.

### Cálculo de la incertidumbre total del método

A continuación se explicará cómo se calcularon los diferentes términos de incertidumbre y como se observa en el siguiente procedimiento, puede obtenerse un término de incertidumbre a partir de la precisión resultante de la reproducibilidad intralaboratorio, también conocida como condición de precisión intermedia (es la magnitud que relaciona la variación de los resultados observados, cuando uno o mas factores, tales como tiempo, equipamiento, operador, varían dentro de un mismo laboratorio) de una medición (componente relacionado con el error aleatorio) y otro que incluye los datos de evaluación externa de la calidad para estimar el bias o sesgo que es la diferencia entre la esperanza matemática de los resultados de ensayo y un valor de referencia aceptado. El sesgo es el error sistemático total en contraste con el error aleatorio. Un valor grande del sesgo refleja una diferencia sistemática importante con respecto al valor de referencia aceptado.) y la incertidumbre relativa a su estimación (componentes relacionados con el error sistemático).

$$uc = \sqrt{b^2 + s^2} \quad U = uc.k$$

**S:** componente relacionado con el error aleatorio.  
**b:** componente relacionado con el error sistemático.

**uc:** incertidumbre combinada.

**U:** incertidumbre expandida

**k:** factor de cobertura

**(b)** Componente de precisión (SRw)

Se considera el **coeficiente de variación acumulada** (SRw) de un periodo de tiempo (entre 6 meses y un año). Estos datos son obtenidos a partir de control de calidad interno, en condiciones de precisión intermedia:

- el mismo procedimiento de medida
- el mismo laboratorio
- el mismo equipo
- diferentes operadores
- más de un lote de reactivo
- más de una calibración
- más de un mantenimiento preventivo

$$CV\% = \frac{\delta_x}{X} . 100$$

**(s)** Componente relacionado con el error sistemático u(bias)

Se emplea un esquema de evaluación externa de la calidad para estimar el bias, la incertidumbre relativa a su estimación y la incertidumbre del valor aceptado de referencia:

$$U(Bias) = \sqrt{RmsBias^2 + \left(\frac{\Delta Bias}{\sqrt{n}}\right)^2 + u(Cref)^2}$$

$$Bias\% = [VI - VN] / [VN] * 100$$

VI= Valor informado por el laboratorio

VN= Valor nominal del esquema de evaluación externa

Cálculo de incertidumbre del método analítico considerando los calibradores:

$$u(x) = \sqrt{S^2 + b^2 + STD^2}$$

$$U(\text{exp}\%) = K.u(x)$$

<b>Analito</b>	<b>Unidades</b>	<b>Nivel 1</b>	<b>U(exp)%</b>	<b>U(exp)%<sup>1</sup></b>	<b>Nivel 2</b>	<b>U(exp)%</b>	<b>U(exp)%<sup>1</sup></b>	<b>Nivel 3</b>	<b>U(exp)%</b>	<b>U(exp)%<sup>1</sup></b>
<b>CBZ</b>	ug/ml	3,011	20,05	20.196	8,853	18,21	18.478	14,074	18,75	18.987
<b>DFH</b>	ug/ml	6,848	20,04	20.199	12,873	17,42	17.80	22,054	19,58	19.73
<b>FBT</b>	ug/ml	11,246	21,38	21.37	28,382	17,89	17.99	62,247	18,81	18.87

**Tabla 9. Tabla resumen de valores de incertidumbre de fenobarbital, carbamazepina y difenilhidantoína para los tres niveles, incluyendo la incertidumbre de los calibradores**

Analito	Nivel 1 ug/ml	U(exp) ug/ml	U(exp) <sup>1</sup> ug/ml	Nivel 2 ug/ml	U(exp) ug/ml	U(exp) <sup>1</sup> ug/ml	Nivel 3 ug/ml	U(exp) ug/ml	U(exp) <sup>1</sup> ug/ml
CBZ	3,011	0,60370	0,60810	8,853	1,61213	1,63585	14,074	2,6388	2,67223
DFH	6,848	1,37233	1,3832	12,873	2,24247	2,29139	22,054	4,31817	4,35125
FBT	11,246	2,40439	2,4032	28,382	5,07753	5,10592	62,247	11,7086	11,746

**Tabla 10. Tabla comparativa de los valores de incertidumbre absoluta expandida calculados por ambos métodos**

Analito	Nivel 1 ug/ml	U(exp) ug/ml	U(exp) <sup>1</sup> ug/ml	Nivel 2 ug/ml	U(exp) ug/ml	U(exp) <sup>1</sup>	Nivel 3 ug/ml	U(exp) ug/ml	U(exp) <sup>1</sup> ug/ml
CBZ	3,01	0,61	0,61	8,9	1,7	1,7	14,1	2,7	2,7
DFH	6,9	1,4	1,4	12,9	2,3	2,3	22,1	4,4	4,4
FBT	11,3	2,4	2,4	28,4	5,1	5,1	63	12	12

Analito	Nivel 1 mg/ml	U(exp) mg/ml	U(exp) <sup>1</sup> mg/ml	Nivel 2 mg/ml	U(exp) mg/ml	U(exp) <sup>1</sup> mg/ml	Nivel 3 mg/ml	U(exp) mg/ml	U(exp) <sup>1</sup> mg/ml
CBZ	0,00301	0,00061	0,00061	0,0089	0,0017	0,0017	0,0141	0,0027	0,0027
DFH	0,0069	0,0014	0,0014	0,0129	0,0023	0,0023	0,0221	0,0044	0,0044
FBT	0,0113	0,0024	0,0024	0,0284	0,0051	0,0051	0,063	0,012	0,012

**Tabla 11. Tablas comparativas de los valores redondeados de incertidumbre absoluta expandida calculados por ambos métodos**

El criterio de redondeo que se utiliza es redondear a la segunda cifra significativa de la incertidumbre expandida, aumentándola en una unidad, siempre que el orden de magnitud siguiente al que corresponde redondear sea distinto de cero. El orden de magnitud que asuma la incertidumbre será el mismo que deberá tener el valor nominal, por lo tanto, no está de más aclarar que la incertidumbre y el valor nominal tendrán el mismo orden de magnitud. Considerando que ninguno de los resultados ofrecidos por los fabricantes, service y proveedores de calibraciones a través de los certificados de calibración de los instrumentos que permitieron llevar adelante esta serie de ensayos supera las dos cifras significativas, se considera conveniente este criterio.

## Conclusiones

Se ha calculado la incertidumbre del método analítico validado para determinación y cuantificación de fenobarbital, carbamazepina y difenilhidantoína en sus diferentes niveles de concentración y se ha vuelto a calcular dicha incertidumbre, teniendo en cuenta además de los factores aleatorios y sistemáticos descriptos anteriormente, el factor relativo a la preparación de los calibradores en sus distintos niveles. No fue necesario el empleo de ninguna herramienta estadística, tan solo aplicando el criterio de redondeo comentado anteriormente (esto indica que las diferencias decimales obtenidas en los dos métodos no son significativas), se

puede afirmar que el resultado es el mismo, o sea que la contribución individual de la preparación de la solución patrón y los calibradores es despreciable, si es calculada de manera adecuada, ante la incertidumbre total del método.

## Futuras líneas de trabajo

1) El cálculo y evaluación de la incertidumbre en el análisis químico es una actividad clave dentro de la administración de los recursos de un laboratorio de análisis clínicos y da un gran valor a la calidad de los productos certificados y a la trazabilidad del resultado informado. La incertidumbre es una manera adecuada de medir y categorizar objetivamente a un laboratorio de análisis clínicos, más allá de su sistema de gestión de la calidad.

2) Se ha desarrollado un método simple y sencillo para minimizar el valor de incertidumbre del patrón de referencia a distintos niveles de concentración, mejorando la incertidumbre de los equipos e instrumentos de laboratorio (pureza de las drogas, balanzas, pipetas, material volumétrico, termómetros) y trabajando en el laboratorio con un sistema de gestión de la calidad de los procedimientos analíticos. Para alcanzar los objetivos planteados, se ha armonizado un amplio conjunto de conceptos, métodos y modelos de gestión orientados a normalizar esta actividad. Este trabajo se ha basado sobre la metodología presentada en "Quantifying Uncertainty in Analytical measurement" Apéndice

A –Preparación de un Standard de calibración; EURACHEM / CITAC Guide CG 4; Segunda edición: 2000, al momento de planificar el cálculo de incertidumbre y en las recomendaciones presentadas en la disposición ANMAT 5040/06 en lo relacionado a la selección del instrumento, mantenimiento, conservación, calibraciones y service, además de la pureza de los materiales de referencia utilizados.

3) Los valores de incertidumbre obtenidos en su expresión relativa porcentual expandida, a los distintos niveles de concentración para el fenobarbital, oscilan entre 2,9 y 3,08 %, para la carbamazepina entre 2,9 y 3,2 % y entre 2,4 y 3,0 para la difenilhidantoína, con un intervalo del 95% de confianza de contener al verdadero valor.

4) Se ha demostrado la validez del método de preparación de soluciones patrones y sus calibradores propuesto, o sea se lo ha validado mediante la validación del método analítico de determinación y cuantificación de fenobarbital, carbamazepina y difenilhidantoína, es decir, se han realizado las pruebas y ensayos necesarios para validar cada uno de los parámetros estadísticos requeridos para afirmar que el método analítico para cada analito provee información consistente sobre su adecuación al uso previsto.

5) Se ha elaborado un procedimiento operativo estándar que permitió estimar de manera adecuada la incertidumbre total del método, combinando cuadráticamente los factores de origen aleatorio que se presentan en el laboratorio (agrupados con la denominación de precisión intermedia) y los sistemáticos resultantes de la evaluación externa de la calidad (bias) y se obtuvo como resultado una incertidumbre expandida relativa porcentual para fenobarbital, Nivel 1 de concentración: 21,38%, Nivel 2: 17,89% y Nivel 3: 18,81%. Para carbamazepina a Nivel 1: 20,05%, Nivel 2: 18,21% y Nivel 3: 18,87% y para difenilhidantoína a Nivel 1: 20,04%, Nivel 2: 17,42% y Nivel 3: 19,58%.

6) Se ha vuelto a calcular la incertidumbre teniendo en cuenta además de los factores aleatorios y sistemáticos descriptos anteriormente, el factor relativo a la preparación de los calibradores en sus distintos niveles y se concluyó que este último es despreciable frente a los otros dos, ya que los resultados son iguales, obteniendo como resultado una incertidum-

bre expandida absoluta para fenobarbital, Nivel 1 de concentración: 0,0024 mg/ml, Nivel 2: 0,0051 mg/ml y Nivel 3: 0,012 mg/ml. Para carbamazepina a Nivel 1: 0,00061 mg/ml, Nivel 2: 0,0017 mg/ml y Nivel 3: 0,0027 mg/ml y para difenilhidantoína a Nivel 1: 0,0014 mg/ml, Nivel 2: 0,0023 mg/ml y Nivel 3: 0,0044 mg/ml.

7) El trabajo se aboca a demostrar que la incertidumbre asociada a los calibradores es despreciable en relación a los otros componentes de incertidumbre. También sería de gran valor realizar un abordaje completo, combinando para tal fin todas las fuentes de incertidumbre en un solo análisis para estudiar el aporte relativo de cada una de ellas. Es posible también calcular la incertidumbre utilizando información de datos de validación o ejercicios colaborativos. Se plantea la elaboración de una curva de calibración con datos de entrada de concentraciones asignadas a los materiales de referencia (X) y las respuestas generadas por el equipo o sistema de medición (y), considerando un comportamiento lineal, la expresión matemática para la recta de calibración estará dada por:

$$y(X) = a + bX$$

Para evaluar la incertidumbre se debe tener en cuenta la incertidumbre estándar asociada a cada uno de los componentes de entrada, así también como las correlaciones entre ellos. Por otro lado deben considerarse los coeficientes de sensibilidad de cada uno de los factores a fin de combinarlos. Se estima el residuo *i*-ésimo entre el punto (x,y) y la recta de calibración. La desviación estándar residual estará dada por la expresión (2) e indicará si es correcto el ajuste con dos grados de libertad. Luego de obtener la recta de calibración, para determinar la concentración de la muestra, se la mide de manera repetida *m* (*m*>1) veces, en la expresión (3)

$$b = \frac{\overline{x \cdot y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{S^2_x} \quad (1) \quad S_e = \sqrt{\frac{\sum e_{2i}^2}{n-2}} \quad (2)$$

$$X_0 = \frac{\bar{Y}_0 - a}{b} \quad (3)$$

A partir de aquí, para simplificar cálculos, se considera la hipótesis que: las incertidumbres asociadas a los materiales de referencia de los estándares de calibración *U<sub>x</sub>* son despreciables

frente a los otros factores de incertidumbre  $U_y$ . Se deduce que el intervalo de incertidumbre expandida  $(1-\alpha)$  para  $x_0$  (intervalo de predicción), según:

$$U^2(x_0) = \frac{S_e^2}{b^2} \left[ \frac{1}{m} + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{ns^2_x} \right]$$

$$X_0 = \frac{\bar{Y}_0 - a}{b} \pm t_{n-2\alpha/2} \cdot \frac{S_e}{b} \cdot \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{ns^2_x}}$$

Este enfoque puede ser el inicio de una serie de trabajos de aplicación a diferentes problemas, mas aún pudiendo verificar la hipótesis anterior, objetivo del presente trabajo. Realizar un abordaje completo, combinando para tal fin todas las fuentes de incertidumbre en un solo análisis utilizando datos de validación y ejercicios colaborativos, permitirá encarar con optimismo otros problemas de similar interpretación en la química analítica.

zar un abordaje completo, combinando para tal fin todas las fuentes de incertidumbre en un solo análisis utilizando datos de validación y ejercicios colaborativos, permitirá encarar con optimismo otros problemas de similar interpretación en la química analítica.

## Agradecimientos

El autor agradece a las autoridades y docentes de la UTN. BA por su permanente apoyo. Asimismo a la Dra. María Eugenia Almagro y al Dr. Emiliano Buitrago, así como al ININFA, Instituto de Investigaciones Farmacológicas (CONICET-UBA) al Mg. Ricardo Brunetti, Dr. Christian Hocht y Esp. Fernando Kornblit.

## Referencias (revisar todas las referencias)

- IRAM 301:2005 equivalente a ISO/IEC 17025:2005 - Requisitos Generales para la Competencia de Laboratorios de ensayo y Calibración, ISO (2005).
- Evaluación de la Incertidumbre de la medición, OAA (Alba N. Zaretsky, Buenos Aires- Argentina, (2008).
- ISO GUM: 1995 Guide to the expression of Uncertainty in Measurement (GUM), ISO, (1995).
- Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. EURACHEM/ CITAC Guide CG 4, Segunda edición: 2000. Apéndice A – Preparación de un Standard de calibración.
- IRAM-ISO 15189: 2007 Laboratorios de análisis clínicos –Requisitos particulares para la calidad y la competencia (2007).
- Materiales de referencia certificados / J. Riu -Quimiometría y Cualimetría -Universitat Rovira i Virgili.
- Guía ISO 34 General requirements for the competence of reference materials producers, ISO 2000).
- Disposición Nº 5040/2006, Buenas Prácticas para la Realización de Estudios de Biodisponibilidad/ Bioequivalencia, ANMAT.
- ISO 8655, Piston-Operates volumetric apparatus (2002).
- DIN 12650, The Standard Committee for Laboratory Devices and Equipment in the DIN (1996-07)
- ISO 4787:2011, Lab. glassware - Volumetric instruments - Methods for testing of capacity and for use.
- ASTM E 542-01, Standard Practice for Calibration of Laboratory Volumetric Apparatus1 (2007).
- IRAM 9102, Método de calibración y control del punto 0 °C, 4/12/1970.
- Incertidumbre de med. en met. de ensayo microbiológicos cuali y cuantitativos, Carnevali De-Falke, (OAA) (2008).
- Incertidumbre En Mediciones Químicas. Recta de Calibración; Kornblit, F.; Puglisi, C. - INFOSIM n°8, 2002. <http://portal.oas.org/linkclick.aspx?fileticket=uy27xwj4w1w%3d&tabid=584>
- Nuevas consideraciones sobre incertidumbres y recta de calibración en Química Analítica, Boletín informativo del sistema interamericano de metrología – OEA, Querétara, México / Diciembre (2008).
- Incertidumbre en métodos analíticos de rutina. UNIVERSITAT ROVIRA VIRGILI Alicia Maroto (2002).

Materiales de referencia y comparaciones interlaboratorios. CENMA. UNIVERSIDAD DE CHILE. Herramientas para el control de calidad en laboratorios de ensayos. CHILE (2006).

Estrategias para el cálculo de incertidumbre, Instituto de estudios avanzados. Universitat Rovira i Virgili, Alicia Maroto, Ricard Boqué, Jordi Riu, F. Xavier Rius. PL. Imperial Tàrraco, 1. 43005-Taragona.

Certified reference material BCR-649, Community Bureau of Reference (BCR), Community Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM), Geel (Belgium), (2000).

Incertidumbre y precisión. Técnicas de Lab. Alicia Maroto, Ricard Boqué, Jordi Riu, F. Xavier Rius, (2001)

Estimating uncertainties using information from the validation process, Alicia Maroto, Jordi Riu, Ricard Boqué, F. Xavier Rius, *Analytica Chimica Acta* 391 (1999) 173-185.

IRAM 35050 Proc. para la evaluación de la incertidumbre de medición, (2001).

IRAM 35051 Proc. para la evaluación de la incertidumbre de medición en la calibración, (2004).

IRAM 35052 Procedimientos para la evaluación de la incertidumbre en química analítica, 2009.

IRAM 34552-1. Estadística. Vocabulario y símbolos. Definiciones de probabilidad y de estadística (2003).

IRAM 34553-1. Estadística. Exactitud (certeza, repetibilidad y reproducibilidad) de los métodos de medición y de sus resultados. Parte 1: Principios generales y definiciones, (2006).

Resolución 1189/2007, Créase el Sistema Nacional de Evaluación Externa en Servicios de Salud. Registros Nacionales de Entidades Evaluadoras Externas en Servicios de Salud y de Servicios de Salud con Evaluación Externa. Requisitos; Ministerio de Salud de la República Argentina, Boletín oficial (2007)

Estudio de la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos con ciertos procedimientos de medida bioquímicos-clínicos- Bernardino González de la Presa.

Measurement uncertainty revisited: Alternative approaches to uncertainty evaluation. Michel Gouache y cols. A case study in the practical estimation of measurement uncertainty. *Accrued Quality Assurance* (2005)

Guide to the Evaluation of Measurement Uncertainty for Quantitative Test Results, EUROLAB (2006).

Handbook for calculation of measurement uncertainty in environmental laboratories, Edition 2, report 537, approved 2004-02.

Declaración de política referente a la trazabilidad metrológica, revista #5 OAA, Diciembre (2011).

Norma nacional IRAM 2 – Sistema de unidades (1989)

JCGM 200:2012– Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM).

Declaración de política referente a la trazabilidad metrológica, revista número 5 del Organismo Argentino de Acreditación (OAA), diciembre (2011).



# Reconocimiento automático de objetos y caracteres en una baraja francesa

**Walter Sebastián Masi<sup>1</sup>, Santiago Germán Silvestre<sup>1</sup>, Alfredo Nicolás Campos<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Electrónica, Medrano 951 (C1179AAQ) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua, Av. Rivadavia 1439 (C1033AAE), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

*sebastianmasi@hotmail.com*

*Recibido el 20 de Septiembre de 2013 y aprobado el 23 de Octubre de 2013*

## Resumen

El reconocimiento de objetos y caracteres es una tarea básica en la actividad humana. El procesamiento digital de imágenes ofrece la oportunidad de realizar esta tarea de manera automática, objetiva y veloz. Actualmente existen varias metodologías para el reconocimiento de objetos y caracteres, sin embargo ninguna presenta una respuesta que abarque todos los casos posibles. En este trabajo se decidió desarrollar e implementar algoritmos de transformada de Hough, simetría geométrica, correlación espacial contra patrones, detección de color y conteo de elementos, para la determinación del valor y el palo de naipes de baraja francesa. Se aplicaron distintos tipos y niveles de distorsión en las barajas (desenfoque, ruido gaussiano y rotación). Como resultado de aplicar conjuntamente los algoritmos de reconocimiento se obtuvo una efectividad del 96% para naipes en buen estado. En los naipes distorsionados se llegó a valores mayores del 75% siendo los naipes con rotación (principalmente las figuras) los que presentaron mayor error.

**PALABRAS CLAVE:** RECONOCIMIENTO DE CARACTERES – OCR – RECONOCIMIENTO DE OBJETOS – PROCESAMIENTO DIGITAL – RECONOCIMIENTO DE NAIPES

## Abstract

Objects and characters recognition is a common activity on our life. Digital images processing offers high speed automation, objectivity and accuracy. Nowadays there are many objects and characters recognition methodologies. However, none of them shows a solution which could apply for all possible cases. In this paper, pattern comparison, geometric symmetry, Hough transform, color detection and objects count procedures were developed to get the value and suit of cards belonging to a standard French 52-card deck.

Different kind and levels of distortions were used, like unfocused, Gaussian noise and rotation distortions. 96% efficiency was obtained as a result of applying all the recognition algorithms in a deck in good condition. In the case of distorted cards, were reached values greater than 75%. The rotated cards (figures mainly) showed the biggest error level.

**KEYWORDS:** CHARACTERS RECOGNITION – OCR – OBJECTS RECOGNITION – DIGITAL PROCESSING – CARDS RECOGNITION

## Introducción

La visión artificial también conocida como visión por computador, es un subcampo de la inteligencia artificial donde el propósito es lograr que un computador "entienda" las características de una escena. La importancia de este campo de investigación se basa en la posibilidad de automatizar procesos de detección y reconocimiento de objetos en imágenes, los cuales facilitan la evaluación de resultados a gran escala con una capacidad de procesamiento superior a la evaluación por parte de un ser humano. La necesidad de reconocer de forma automática caracteres, formas y objetos tiene un amplio espectro de utilización, en reconocimiento de etiquetas, códigos de barra, presencia de objetos, huellas digitales (Donald, H. y Mc Mahon, 1974, p. 1), escritura manuscrita, entre otros.

La principal problemática que presenta el reconocimiento de objetos es la calidad de la imagen a procesar y las condiciones en las cuales fue adquirida la misma (iluminación no uniforme, sombras, oclusión parcial) (T. Shivanand, 2010, p. 1), (Shan Du, 2013, p. 1), este es un factor importante y determinante para obtener un resultado satisfactorio en nuestro sistema de reconocimiento (Shan Du, 2013, p. 2). Para el Reconocimiento Óptico de Caracteres u OCR, se emplean metodologías como redes neuronales, k vecinos más próximos y contrastación contra patrones entre otros (T. Arrighi, 2012, p. 1). La tecnología OCR proporciona la habilidad de convertir imágenes de caracteres, en caracteres capaces de ser interpretados por una computadora. Así, las imágenes de caracteres en letra de máquina son extraídas de un mapa de bits de la imagen obtenida por un escáner (D. Barragán, s.f., p. 1). Existe la posibilidad de tener ambigüedades en el reconocimiento de caracteres (1/I, 0/O, 0/D, 2/Z, 8/B, and 5/S) utilizando la tecnología OCR (Christos-Nikolaos E. Anagnostopoulos, 2008, p. 11) por lo que se empleó este método cuidadosamente para un reducido conjunto de caracteres aislando las posibilidades de falla.

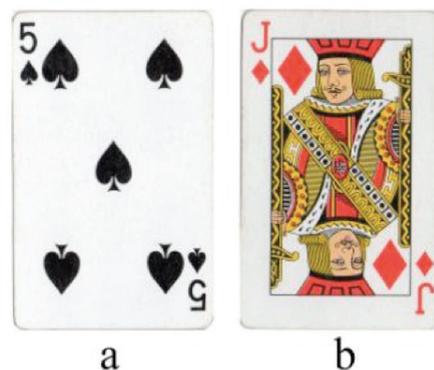
El objetivo del presente trabajo consiste en la comparación de procedimientos en la detección e identificación de los naipes de sobre diferentes barajas. Para ello se parte de la imagen escaneada del naipe donde se encuentra el superíndice con el valor y el centro de la mis-

ma donde están los elementos o el dibujo de la figura si corresponde, luego procesarlos con distintos algoritmos y arrojar los resultados de las operaciones junto con sus respectivos tiempos de procesamiento, comparando así su performance y efectividad.

## Materiales y métodos

### Datos utilizados

Una baraja francesa consta de 52 naipes que se agrupan en 4 palos, dos rojos y dos negros. Consta de 13 valores: 9 numéricos (del 2 al 10) y 4 figuras (J, Q, K, A) (Fig. 1).



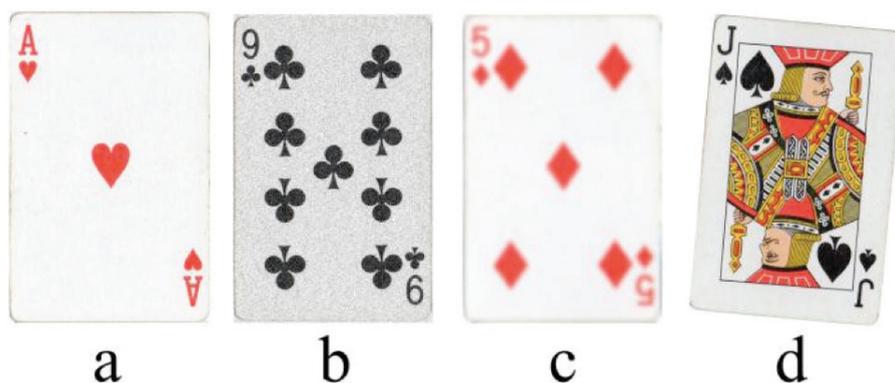
**Fig. 1. a) Naipe numérico; b) Naipe figura**

Se digitalizaron con una resolución de 300 dpi, dos barajas, distintas entre sí, una de ellas con pronunciado desgaste debido a su intensivo uso.

### Metodología

Se le realizaron alteraciones a la baraja en buen estado por medio de filtros digitales para simular condiciones desfavorables. Se utilizó esta diversidad de condiciones para poder contemplar los distintos tipos de distribuciones de formas, colores y caracteres junto con las consecuencias de distintas intensidades de uso y así poder realizar distintas comparaciones de rendimiento y efectividad sobre los métodos propuestos con el fin de evaluar los tiempos de operación junto con su resultado arrojado al momento de identificar el naipe en cuestión. Partiendo de una baraja digitalizada sin alteraciones, la misma fue afectada por los siguientes filtros digitales, ver Figura 2.

. Ruido Gaussiano Monocromático hasta en un 30%. Es un ruido cuya densidad de probabilidad responde a una distribución normal.



**Fig. 2. Alteraciones en los naipes a) Imagen original; b) 30% de ruido Gaussiano; c) Desenfoque Gaussiano de 7 píxeles; d) Rotación horaria de 5 grados**

. Desenfoque Gaussiano hasta un radio de 7 píxeles. Este desenfoque aplicado a un mapa de bits mezcla ligeramente los colores de los píxeles vecinos el uno al otro, haciendo que la imagen pierda detalles, y de esta forma se vea más suave y menos nítida.

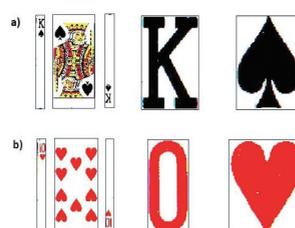
. Rotación en sentido horario de hasta 5 grados.

La metodología que se utilizó en este procesamiento se puede resumir en el esquema presentado en la Figura 3. (Yao Yuan, 2010, p. 1)



**Fig. 3. Metodología utilizada para el análisis**

En primera instancia se umbralizó la imagen para la eliminación de la mayor parte del ruido. Luego se la separó en 3 partes, para poder segmentar el valor y el palo. (Fig. 4)



**Fig. 4. Naipe separado en 3 partes, luego segmentado el valor y el palo. a) Figura; b) Numérico**

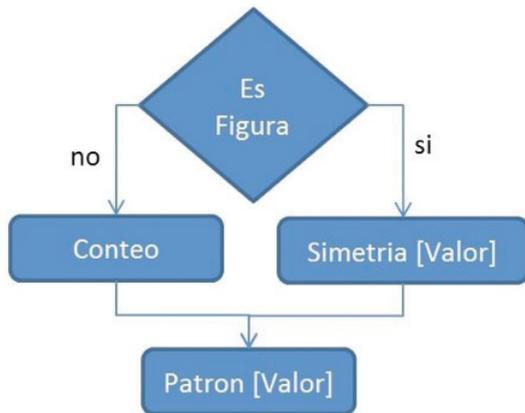
Luego que se individualizó el valor y el palo, se detectó el color y si es o no figura. Con esa información se le aplicaron los distintos métodos a los sectores importantes del naipe (centro, valor y palo).

#### Determinación del Valor

Utilizando la imagen que contiene la información del valor del naipe, se utilizaron diversos métodos para determinación del mismo. Dependiendo de si es o no una figura se utilizaron distintas metodologías para poder tener siempre dos caminos independientes para la obtención del valor (Fig. 5).

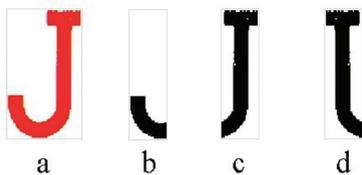
*Es una figura (J, Q, K, A):*

Se analizó la simetría geométrica del segmento que contiene el valor, ya que es distinta para cada una de las cuatro letras. El naipe *Jack* no tiene simetría vertical (Fig. 6.1) en cambio el naipe *Queen* sí (Fig. 6.2). En el caso de la simetría vertical se dividió verticalmente por la mitad la imagen. La parte derecha se reflejó

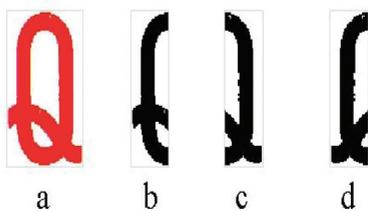


**Fig. 5. Análisis del valor**

horizontalmente y luego se comparó con la mitad izquierda. En la simetría horizontal se realizó la misma operación pero cortando la imagen horizontalmente.



**Fig. 6.1. Jack.** a) Original b) Mitad izquierda c) Mitad derecha d) Mitad derecha reflejada



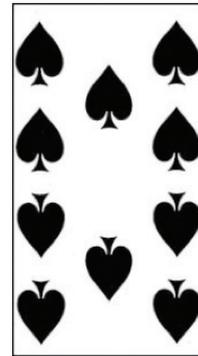
**Fig. 6.2. Queen.** a) Original b) Mitad izquierda c) Mitad derecha d) Mitad derecha reflejada

Es un número (del 2 al 10):

Para los casos en que era un número (2 al 10) se contaron la cantidad de objetos que se encuentran en el sector medio del naipe. Por ejemplo para el naipe 10 de pica, se contaron 10 elementos (Fig. 7).

*Ambos casos (numérico o figura):*

Se contrastó contra un patrón el segmento de la imagen que contiene el valor del naipe. Esta comparación se realizó mediante una correlación en dos dimensiones entre la imagen a analizar y

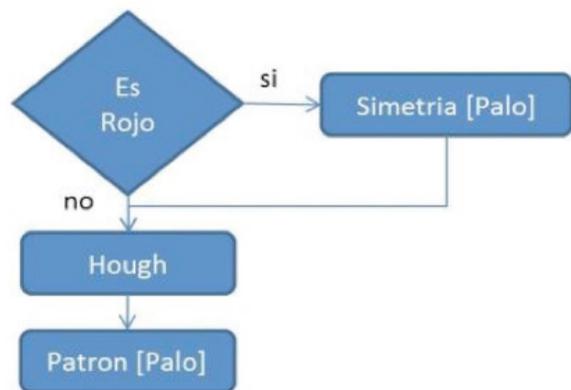


**Fig. 7. Sector medio del naipe 10 de pica**

un patrón fijo. Esto permite comparar ambas imágenes y obtener una probabilidad de similitud entre ambas.

### Determinación del palo

Para determinar el palo se pudieron utilizar entre 2 o 3 métodos según el color fuera rojo o negro (Fig. 8).

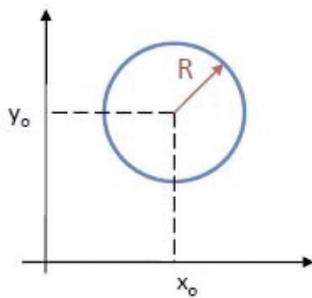


**Fig. 8. Análisis del palo**

Si el color del naipe es rojo, se analizó la simetría geométrica del palo, ya que el diamante tiene simetría vertical y horizontal y el corazón no.

Independientemente de cuál fuera el color del naipe se aplicó la Transformada Circular de Hough (Ec.1) para identificar las distintas formas características de cada palo (líneas, círculos, etc.).

Esta transformada consiste en recorrer la imagen con círculos de un radio fijo (Fig. 9). Para el centro de cada círculo se suman cuántos puntos del círculo coinciden con la imagen original, de esta manera se obtiene un dominio transformado. Luego el centro con mayor cantidad de coincidencias es el lugar de la imagen donde es más probable que haya un círculo (Fig.10).



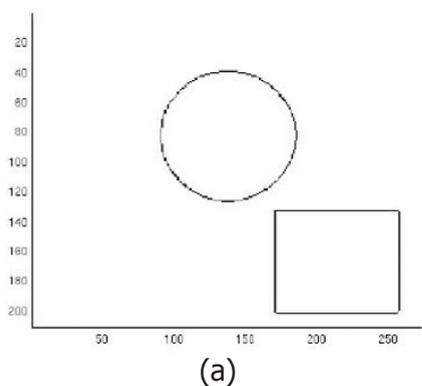
**Fig. 9. Representación de un círculo mediante su ecuación 1**

Por otra parte, al igual que para determinar el valor, se realizó una comparación contra patrón a través de una correlación en dos dimensiones con un conjunto de imágenes definidas y estandarizadas en tamaño.

## Resultados y Discusión

### Primera prueba (Baraja N°1):

Se realizó sobre una baraja en muy buen estado. Como resultado se obtuvo un 98% de efectividad. Todos los métodos empleados funcionaron correctamente en todos los naipes analizados. El único naipe en el que un método falló fue el Ace de Picas en el cual la detección del valor por conteo fue incorrecto. El Ace de Picas de esta baraja contiene muchas formas y textos que perjudican el correcto funcionamiento de la detección de la cantidad de elementos en el segmento medio del naipe (Fig. 11). Como el procesamiento empleado utiliza más de un método, la determinación del valor se pudo realizar correctamente a través de la identificación de su superíndice contrastando contra un patrón.

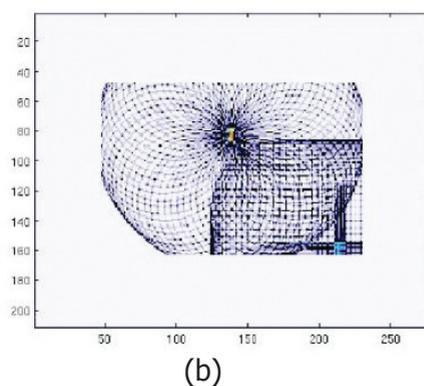


**Figura 11. Ace de Picas de la baraja N°1**

### Segunda prueba (Baraja N°2)

Para esta prueba se utilizó otra baraja completamente distinta. Esta baraja difiere en el tamaño de las figuras, las formas y tamaño tanto de los palos como de los valores respecto de la que se utilizó en la primera prueba. El resultado que se obtuvo fue una efectividad del 83%. La efectividad de cartas analizadas en todos los casos, se tomó como la cantidad de cartas en las que todos los métodos aplicados fueron exitosos.

Al realizar la comparación entre los resultados obtenidos para cada método en cada baraja (Tabla I) se observó que la efectividad en todos los casos fue igual o menor. Esto se debe a que la baraja N°1 fue la que se utilizó como referencia. Esto se aprecia notablemente en los métodos que utilizan comparación contra patrón. En cambio el resto se mantuvieron en niveles cercanos, ya que no dependen de ninguna referencia.



**Fig. 10. a) Imagen donde se encuentra un círculo de radio R y otra figura aleatoria; b) Resultado de aplicar la Transformada de Hough**

Método	Baraja 1	Baraja 2
Color	100%	100%
Figura	98%	100%
Valor Patrón	100%	89%
Valor Simetría	100%	81%
Valor Conteo	100%	97%
Palo Patrón	100%	92%
Palo Hough	100%	97%
Palo Simetría	100%	100%

**Tabla 1. Resultados barajas N°1 y N°2**

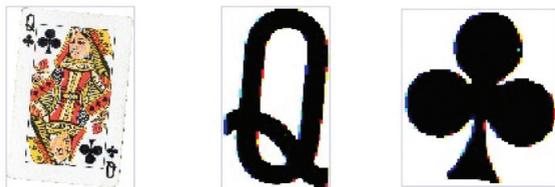
### Tercera prueba con distorsiones (Baraja N°1)

El objetivo fue poner a prueba el funcionamiento de los procesos de reconocimiento en condiciones extremas. Para ello se utilizó la baraja N°1 a la cual se le aplicaron distintos filtrados digitales obteniendo distorsiones que perjudican la determinación de los parámetros.

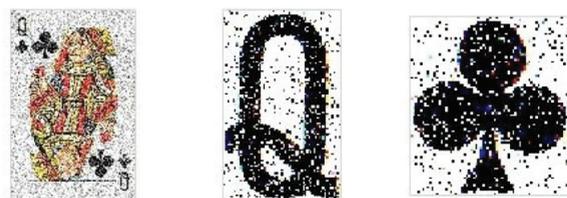
Se comprobó que los métodos empleados para la separación de las zonas donde se encuentra la información valiosa a analizar funcionaron correctamente para todos los casos extremos de distorsión. (Fig. 12, 13 y 14)



**Fig. 12. Resultados del desenfoque Gaussiano**



**Fig. 13. Resultados de la rotación**



**Fig. 14. Resultados del ruido Gaussiano**

Como se aprecia en las figuras previas, los métodos que dependen de las formas del valor y el palo no se ven afectados por la rotación o el ruido Gaussiano pero sí por el desenfoque, ya que se distorsiona notablemente la forma de la imagen.

En estas pruebas, el desenfoque Gaussiano (*blur*) se aplicó desde un radio igual a 1 píxel hasta un radio igual a 7 píxeles incrementándolo de a un píxel más por prueba. La rotación se aplicó desde 1 grado hasta 5 grados siempre en sentido horario con incrementos de un grado. El ruido Gaussiano monocromático se aplicó desde un 5% hasta un 30% en pasos de a 5%.

Los resultados de efectividad obtenidos para cada distorsión de la baraja N°1 se detallan en la Tabla 2.

Distorsión	Efectividad
blur1	94%
blur2	92%
blur3	94%
blur4	92%
blur5	90%
blur6	77%
blur7	29%
ruido5	96%
ruido10	96%
ruido15	94%
ruido20	98%
ruido25	85%
ruido30	79%
rotacion1	96%
rotacion2	90%
rotacion3	81%
rotacion4	75%
rotacion5	75%

**Tabla 2. Resultados de las distintas distorsiones sobre la baraja N° 1**

Se pudo apreciar que para 17 de las 18 abarajas los resultados fueron superiores al 75% de cartas en las que ningún método falló.

Relacionando los resultados de eficacia y analizando la Figura 13, se notó que la inclinación empieza a afectar a partir de un nivel de inclinación de 4 grados. Esto afecta notoriamente en la segmentación de la parte izquierda central y

derecha del naipe.

Por otro lado se analizó la efectividad de cada método por separado para cada baraja con distorsión. (Tabla 3)

Distorsión	Color	Es figura	Valor Figura		Valor no Figura		Palo			
			Patrón	Simetría	Patrón	Conteo	Patrón	Hough	Simetría	
bl	blur1	98%	94%	87%	100%	100%	100%	100%	98%	100%
	blur2	98%	100%	80%	100%	100%	100%	100%	98%	100%
	blur3	98%	100%	87%	100%	100%	100%	100%	98%	100%
	blur4	98%	94%	80%	100%	100%	100%	98%	98%	100%
	blur5	98%	94%	73%	100%	100%	100%	98%	98%	100%
	blur6	98%	88%	60%	89%	100%	100%	98%	96%	100%
	blur7	96%	69%	53%	56%	100%	100%	81%	90%	100%
Ruid	ruido5	98%	100%	100%	100%	100%	100%	98%	100%	96%
	ruido10	100%	94%	93%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	ruido15	100%	100%	87%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	ruido20	98%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	ruido25	98%	100%	87%	100%	100%	100%	98%	100%	84%
Ro	ruido30	100%	100%	77%	97%	100%	100%	100%	98%	85%
	rot1	100%	100%	93%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	rot2	98%	88%	80%	100%	100%	97%	100%	98%	100%
Rot	rot3	98%	94%	40%	100%	100%	100%	98%	100%	100%
	rot4	98%	94%	20%	100%	100%	100%	98%	100%	100%
	rot5	96%	94%	20%	100%	100%	100%	96%	100%	100%

Tabla 3. Comparación de resultado para cada baraja con distorsión

En todos los casos analizados la efectividad de los métodos de detección de color y determinación de si el naipe es literal o numeral fue superior al 96%. Esto se debe a que el color rojo y el negro son muy distintos y no dependen de la forma, ni se ven afectados por el ruido. Es importante que estos valores sean altos ya que algunos métodos dependen del color y de si es figura o no.

Los resultados del valor por patrón si es figura fue casi inmune a la rotación y al ruido Gaussiano (efectividad mayor al 88%) ya que no deforman mucho la forma de la letra, en cambio el desenfoque afectó más a este método porque sí lo hace, como se aprecia en la Figura 11.

El ruido Gaussiano en general no afectó a ningún método, en el peor caso la efectividad fue del 77% y en la mayoría fue del 100%. Esta distorsión tuvo poco impacto porque el proceso aplica métodos de eliminación de ruido previo a la aplicación del resto de los métodos.

También se pudo apreciar que la rotación afectó mucho a los métodos de obtención del valor por simetría de las figuras y no a los métodos de simetría de los palos. Esto se debe a que una letra se ve mucho más afectada en su simetría si se la inclina que cualquiera de los palos.

Al mirar los resultados de la determinación del valor por conteo para los naipes que no son figura se notó que es un método altamente efectivo y confiable ya que los ruidos casi no lo afectaron (en todos los casos 100% y en uno 97% de efectividad).

En cuanto a los resultados obtenidos en la determinación del palo mediante el método de la Transformada Circular de Hough es prácticamente inmune al ruido y a la rotación, y es afectada en muy poca medida por un desenfoque Gaussiano de 7 píxeles de radio (siendo este desenfoque un ruido muy importante). En cambio, el método de comparación contra patrón, disminuye su efectividad con altos niveles de desenfoque.

Para el caso de naipes literales, se observó que el método de comparación contra un patrón siempre fue superior al método de simetría geométrica, el cual se ve muy afectado por la rotación y el desenfoque Gaussiano.

## Conclusiones

Se pudo concluir que todos los distintos procesos utilizados fueron altamente efectivos, tanto al cambiar de baraja como al agregarle distorsión mediante el filtrado digital a las imágenes originales. Se pueden utilizar los resultados comparativos obtenidos en las pruebas para determinar el valor y el palo del naipe en el caso de que un método no coincida con el otro ya que muestran qué métodos son más efectivos e independientes a los distintos ruidos aplicados, por lo tanto se puede determinar cuál es más confiable.

La obtención del palo fue el proceso con menos fallas, luego la determinación del valor de los naipes que no son figuras y por último el valor de los naipes que son figuras. Por otro lado se observa que el método de patrón fue muy efectivo en todas las pruebas, esto a pesar de que las formas de las letras, números y palos varían considerablemente de una baraja a otra y el patrón siempre es el mismo

A futuro se podrán mejorar los métodos agregando por ejemplo un método que detecte la rotación del naipe, para luego corregirla y así mejorar los resultados obtenidos para la distorsión por inclinación. Analizando mayor cantidad de barajas se podrían mejorar los umbrales utilizados en los distintos métodos (por ejemplo en la segmentación del naipe).

## Referencias

- ANAGNOSTOPOULOS, CH.N. E.; ANAGNOSTOPOULOS, I. E.; PSOROULAS, I. D.; LOUMOS, V. y KAYAFAS, E., September 2008, License Plate Recognition From Still Images and Video Sequences: A Survey IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS, VOL. 9, NO. 3
- ARRIGHI, T.; ROJAS, J. E.; SOTO, J.C.; MADRIGAL, C. A. y LONDOÑO, J. A., 2012, Recognition and Classification of Numerical Labels Using Digital Image Processing Techniques.
- BARRAGÁN, D. s.f. Reconocimiento de Caracteres Ópticos (OCR) Usando MATLAB.
- CUEVAS JIMÉNEZ, E.V.; ZALDIVAR NAVARRO, D. S.F., Visión por computador utilizando MATLAB y el Toolbox de Procesamiento Digital de Imágenes.
- DU, S.; IBRAHIM, M.; SHEHATA, M. y BADAWY, W., February 2013, Automatic License Plate Recognition (ALPR): A State-of-the-Art Review IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS FOR VIDEO TECHNOLOGY, VOL. 23, NO. 2.
- JARAMILLO, M.A.; FERNÁNDEZ, J.A. y MARTÍNEZ DE SALAZAR, E. s.f. Filtro de Mediana Sobre Redes Neuronales.
- MCMAHON, D. H.; JOHNSON, G. L.; STANLEY L. T. y WHITNEY, C. G. , April 1975, A Hybrid Optical Computer Processing Technique, IEEE Transactions on computers.
- SHIVANAND, T.; RAHMAN,S. y PILLAI, G., 2010, Efficient and Robust Detection and Recognition of Objects in Grayscale Images.
- YAO YUAN, WU XIAO-LI. X. I., 2010, Vehicle License Plate Recognition System Based on Digital Image Processing



# Descripción del dispositivo de aprovechamiento de la energía undimotriz. Parte II<sup>1</sup>

**Mario Pelissero, Pablo Alejandro Haim, Roberto Tula, Francisco Galia y Federico Muño<sup>2</sup>**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Mecánica, Medrano 951(C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

*undimotriz@gmail.com*

*Recibido el 10 de Julio de 2013, Aprobado el 20 de Agosto de 2013*

## Resumen

En este trabajo se describe el funcionamiento de un dispositivo para el aprovechamiento de la energía undimotriz; el objetivo es transformar la energía de las ondas marinas en fluido eléctrico. El trabajo se realizó en un prototipo en escala 1:20 y lo llevó a cabo por el grupo de Mecánica dentro del Proyecto Aprovechamiento de la Energía Undimotriz de la UTN.BA Departamento de Ingeniería Mecánica; el lugar de trabajo fue el Laboratorio de Ingeniería Mecánica II. El dispositivo desarrollado fue patentado a través del Instituto Nacional de Propiedad Industrial (INPI), y publicado en el Boletín Oficial del INPI en Febrero del 2013.

**PALABRAS CLAVE:** ENERGÍA UNDIMOTRIZ - ENERGÍA DE ONDAS - ENERGÍA RENOVABLE - DISPOSITIVO ELECTROMECAÁNICO - ENERGÍA NO CONVENCIONAL

## Abstract

This paper describes the operation of a device for harnessing wave energy; the goal is to transform the energy of sea waves into electricity. The work was done in 1:20 scale prototype and was performed by the Mechanical group of the Project "Wave Energy Harnessing" from the UTN.BA Department of Mechanical Engineering, the workplace was the Mechanical Engineering II Laboratory. The patented device was developed through the Industrial Property National Institute (INPI) publication date in the Official Gazette of the INPI in February 2013.

**KEYWORDS:** SEA WAVES ENERGY – WAVES ENERGY - RENEWABLE ENERGY - ELECTROMECHANICAL DEVICE - UNCONVENTIONAL ENERGY

1 La primera parte de este trabajo ha sido publicada en Proyecciones, Año 9 N° 2, Octubre 2011.

2 Forman parte del equipo de autores del presente trabajo: Guillermo Oliveto; Ana Julia Lifschitz; Diego Gagnieri; Germán Suppo; Matías Baldo; Gustavo De Vita; Mariano Montoneri; Ezequiel Heinke; Olaf Gawron; Tomás Santino y Sebastián Bernal.

## Introducción

Dentro de las energías renovables de origen marino la energía undimotriz ocupa los primeros puestos como alternativa concreta para iniciar su aprovechamiento. En la actualidad dentro del escenario marino, los proyectos más afianzados son la energía eólica a distancias medias y lejanas de la costa como, en segundo término se están afianzando cada día más los emprendimientos para el aprovechamiento de la energía de las corrientes y de las ondas marinas, evidentemente falta aún para tornarlos competitivos; pero la instancia del agotamiento de los recursos hidrocarbúricos nos obliga a pensar a priori el estudio de otros recursos a los efectos de prepararnos para un futuro no muy lejano.

En el mundo ya existen numerosas propuestas para el aprovechamiento de la energía undimotriz, si lo consideramos en forma global podemos citar casi 1000 patentes; a principios de este siglo, en Francia se presentó el primer emprendimiento formal de baja potencia del tema y a partir de allí aparecieron en forma esporádica algunos prototipos sin mayor relevancia, hasta que en la década de 1970 se produjo la primera gran crisis petrolera que llevó a las autoridades y al medio científico tecnológico a una intensa búsqueda de otras fuentes energéticas; sin duda alguna, esta fue la gran primer señal de alerta de la volatilidad del mercado energético cuando se tenía en cuenta un solo recurso: el petróleo.

Los países que integran la Gran Bretaña empezaron a estudiar el tema de las energías renovables y debido a su carácter insular pusieron foco en las energías marinas, estos desarrollos fueron creciendo a lo largo de estas décadas y además fueron acompañados por otros países con mucha tradición marina como Dinamarca, Noruega, España y Portugal. En la actualidad la mayoría de los países europeos con frentes marinos están estudiando y cuantificando desde sus institutos universitarios los recursos energéticos marinos además están colaborando activamente con los proyectos para la captación de los mismos. Esta situación se replica también en países altamente dependientes de recursos energéticos externos como China, Japón, India y Australia quienes han establecido políticas de estado de apoyo y financiamiento en I+D para el aprovechamiento de sus recursos renovables.

Los emprendimientos basados en el recurso undimotriz que ya están funcionando de forma comercial son dos:

El primero de ellos está situado en la costa de Dinamarca; responde a un desarrollo de la firma Wavestar y la Universidad de Aalborg; el dispositivo (Imagen 1) de captación está ubicado en un muelle y responde a un modelo de una boya que copia el movimiento de las ondas, a través de sistemas hidráulicos lo traslada a un sistema de transformación energética; de esta forma cuando las condiciones del mar lo permiten se procede a captar ese recurso y proveer a



**Imagen 1. Plant Undimotriz "Wavestar" (Dinamarca)**



**Imagen 2. Planta Undimotriz "Mutriku" (España)**

la población cercana de energía eléctrica.

El otro caso está situado en España en la costa vasca y es conocido con el nombre de Mutriku (Imagen 2); la tecnología utilizada se denomina OWS (Oscilating Wave System) y se basa en el movimiento del agua dentro de tubos que están instalados en un muelle, la ventaja es que el accionamiento de la turbina lo realiza el flujo de aire tanto ascendente como descendente cuando el agua de mar entra y sale de los tubos; esto evita que el agua de mar sea la impulsora de la turbina por lo cual se facilitan las tareas de mantenimiento y se evitan los fenómenos de corrosión producidos por el contacto del agua de mar con los componentes metálicos del equipo.

Otro caso emblemático es el dispositivo denominado "Pelamis" (Imagen 3) que significa víbora de mar; este dispositivo estuvo instalado en la costa de Portugal en Adocura; se caracteriza por una estructura flotante constituida por una serie de segmentos tubulares mecánicamente unidos que solo se sujeta en un extremo dejando que naturalmente se acomode en la

dirección de las ondas. El funcionamiento del equipo se basa en la fluctuación de los segmentos bajo la acción de las ondas, en cada unión de los segmentos se ubican una serie de pistones que captan este movimiento y trasladan el fluido comprimido a un tanque acumulador que libera la presión accionando un generador eléctrico. Si bien es cierto que la utilización de estos equipos a distancias lejanas de la costa permitió lograr proveer de energía eléctrica a la población costera, la aparición de problemas de mantenimiento obligó al retiro de los equipos a los efectos de replantear el diseño de algunos de sus componentes; esta tarea se está realizando en el centro de investigación EMEC, en las islas Orkney, Escocia.

Finalmente, en nuestro continente, varios países están estudiando el tema; pero tan solo Brasil ha pasado de la faz experimental a la instalación de un dispositivo a tamaño real (Imagen 4) en el puerto de Pecem en el Estado de Pernambuco, este equipo tiene características similares al Wavestar de Dinamarca, es decir consta de un sistema de boyas que capta el movimiento ondular y lo traslada mediante palancas a una pla-



**Imagen 3. Planta Undimotriz "Pelamis" (Portugal)**



**Imagen 4. Equipo undimotriz en Brasil**

taforma donde se ubican una serie de pistones que comprimen agua al compás del movimiento de las ondas: este fluido comprimido se acumula en un tanque y a partir de su liberación controlada sobre una turbina se va generando la energía eléctrica; en estos momentos se encuentra en una etapa de verificación en el funcionamiento y en su ajuste.

Como se puede apreciar algunas propuestas responden a ideas muy originales y otras como la nuestra es simple y novedosa.

### Parte experimental

El dispositivo para el aprovechamiento de la energía undimotriz transforma la energía de las ondas marinas en energía mecánica y luego en energía eléctrica en el lugar de captación, a continuación el fluido eléctrico generado se transporta hacia la costa mediante cables submarinos a una estación transformadora para luego distribuirla en los lugares de consumo.

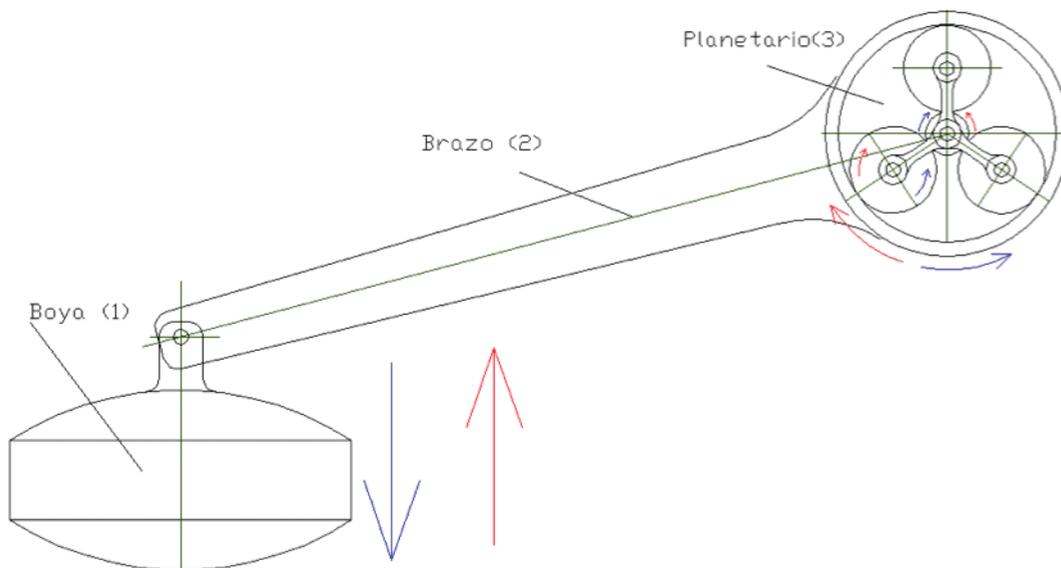
Dicho dispositivo fue presentado ante el Instituto Nacional de Propiedad Industrial. La patente fue registrada a nombre de la UTN FRBA y sus creadores son el Mg. Ing. Pablo Alejandro Haim y el Prof. Roberto Tula; se ha presentado el 27/09/11 con el número 20110103542, además

el 06/02/2013 fue publicada la patente en el Boletín Oficial del INPI N° 725, Pag. 35.

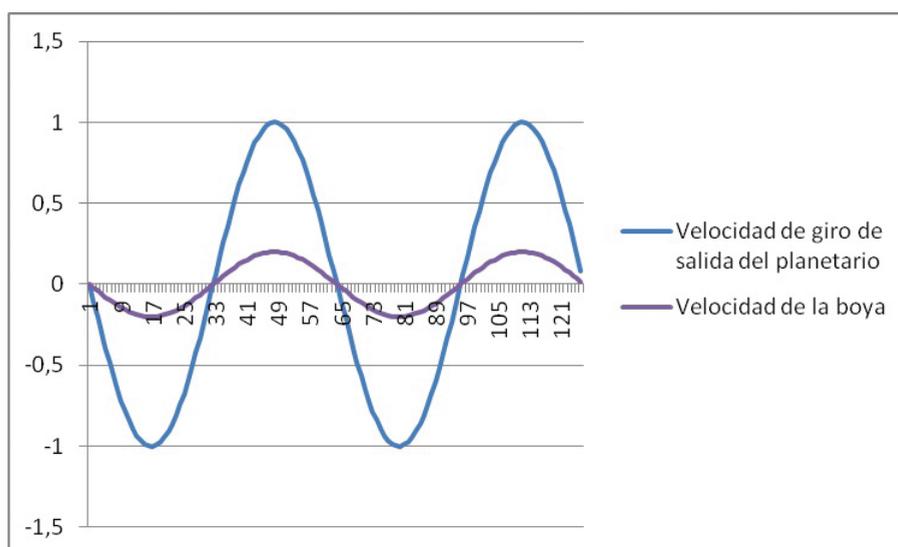
Este dispositivo consiste de dos boyas (1) de acero naval huecas rellenas con poliuretano expandido cuyo peso ronda las 10 toneladas cada una. Dichas boyas debido al principio de Arquímedes generan un empuje igual al de su peso lo que permite mantener el momento torsor en el eje del brazo de palanca (2) constante, tanto en el ascenso como en el descenso la boya.

Las boyas al ser atravesadas por las ondas marinas describen un movimiento vertical que dependerá de la altura de la onda y su velocidad de desplazamiento, es decir, del período y altura de la onda. Debido a las características propias de las ondas hace que el movimiento captado por las boyas trasladado al eje se traduzca en un movimiento lento o sea de bajas revoluciones por minuto; a los efectos de darle más efectividad se requiere un incremento significativo en el número de vueltas. Este incremento se realiza mediante un sistema de engranajes denominado planetario (3), que permite aumentar la relación de transmisión en espacios reducidos (Figura 1).

El aumento de la relación de transmisión se realiza en dos etapas mediante dos sistemas pla-



**Fig. 1. Conjunto boya-brazo-planetario**



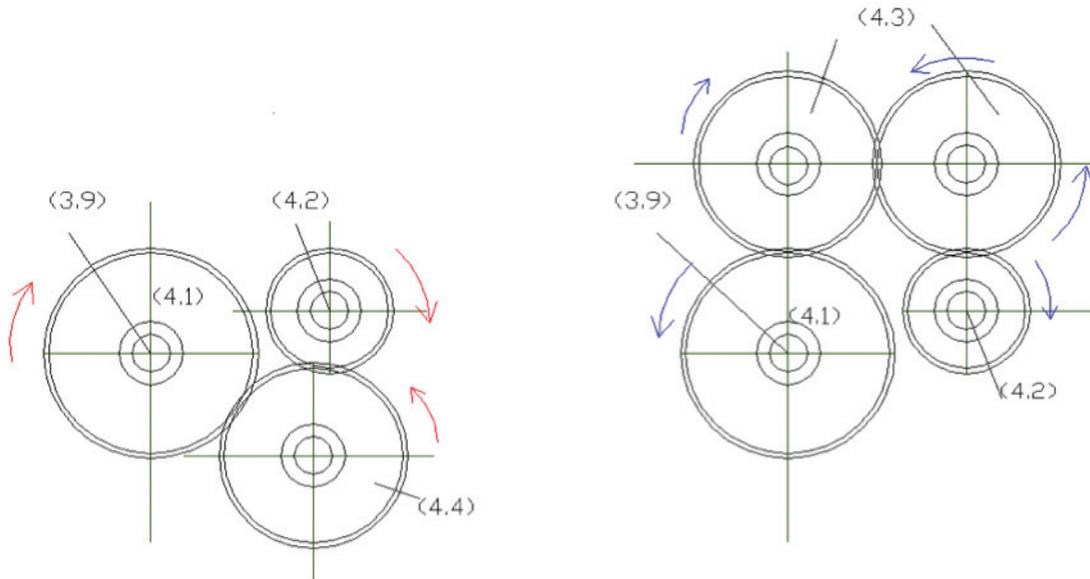
**Fig. 2. Esquema de velocidad de giro de entrada y salida del planetario**

netarios en serie; debido a esto se produce una disminución del torque a la salida del planetario (principio de conservación de la energía); es decir la potencia de entrada al planetario igual a la potencia de salida menos las pérdidas del sistema, o sea que se produce un menor torque pero un mayor número de vueltas.

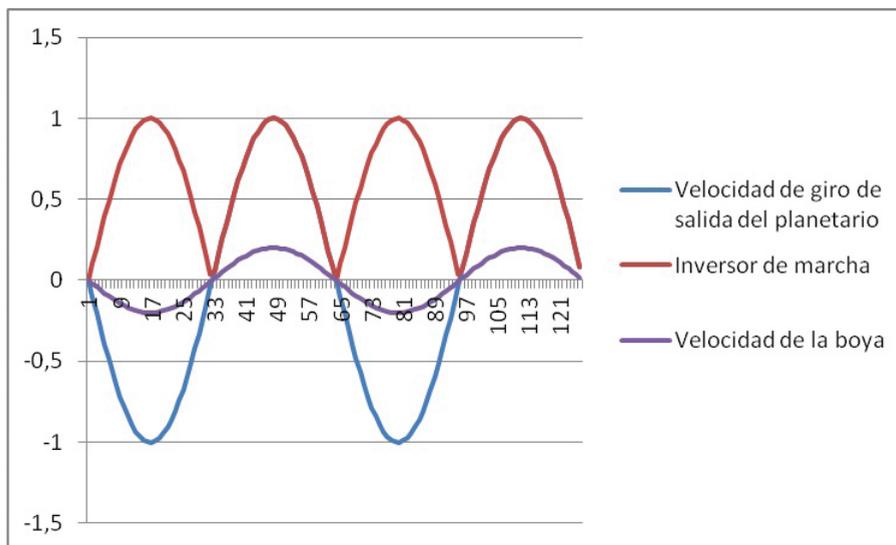
Como se puede observar en la Figura 2, el sentido de giro del eje de salida del planetario dependerá directamente de que la boya ascienda o descienda; sin embargo para acoplar un generador eléctrico es necesario que el sentido de

giro de entrada al generador sea uno solo, por lo tanto se deberá acoplar al eje de salida del planetario un sistema de engranajes que unifican el sentido de giro. (Fig. 3)

El sistema unificador de marcha consiste en dos cadenas cinemáticas en paralelo con diferente cantidad de engranajes en cada una de su cadena. Cuando el sentido de giro (3.9) es horario se activa la cadena cinemática de la izquierda de la Fig. 3, que al tener cantidad de engranajes impares tiene un sentido de giro de salida (4.2) al igual que el de la entrada.



**Fig. 3. Sistema unificador de sentido de giro**

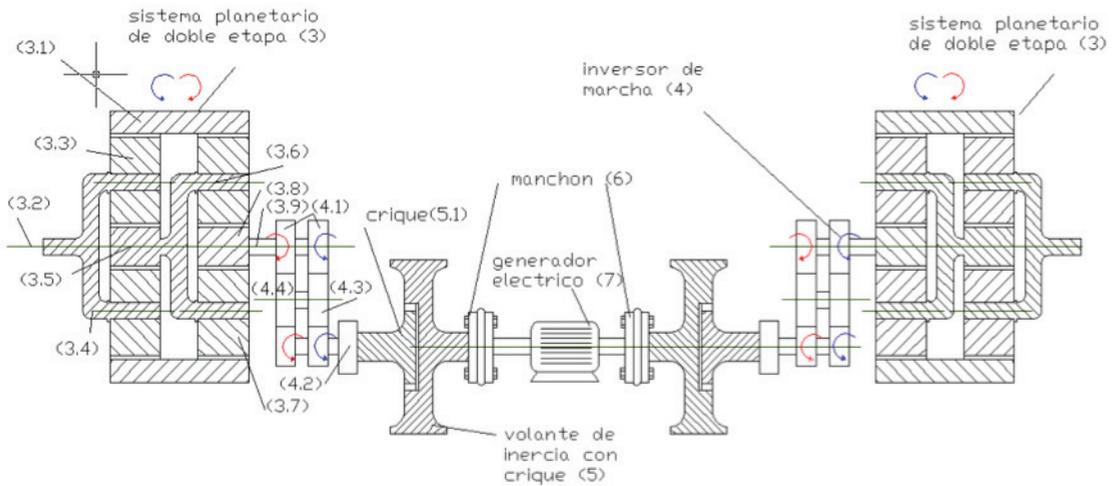


**Fig. 4. Esquema de velocidad de giro de entrada, salida del planetario y del unificador de sentido de giro**

En el caso de que el sentido de giro sea anti-horario, se desactiva la cadena cinemática izquierda y se activa la derecha, (Figura 3). Al ingresar al engranaje (4.1) y transmitir el movimiento a través de la cadena de engranajes pares (4 engranajes), se cambia el sentido de giro del último engranaje de la cadena (4.2) a giro horario. De esta manera siempre tendremos una salida de giro horario independiente del sentido de giro que ingresa al dispositivo.

Los giros del eje a la salida del dispositivo se pueden describir como una señal senoidal amplificada positiva (Figura 4).

Cuando la boya llega al punto muerto superior e inferior, la cadena cinemática se detiene; este hecho deberá evitarse pues en esa circunstancia también el generador dejaría de funcionar. Para salvar esta situación, se agrega un volante de inercia entre el unificador de giro y el generador; de esta forma el volante permite suministrar en forma constante el movimiento al eje del



**Fig. 5. Esquema completo en corte**

generador. Esto permite que el volante acumule la energía cuando la velocidad que brinde la boya exceda el número de giros que necesita el eje del generador y también entregue energía cuando el número de giros en la salida del unificador este por debajo de los que necesite el generador eléctrico. Ver en la Figura 5 el corte completo del equipo.

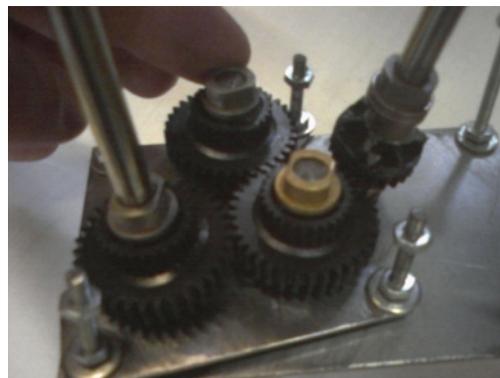
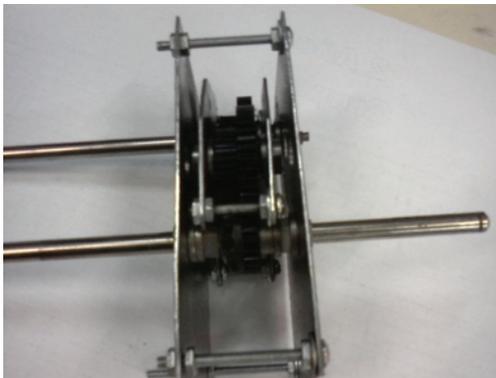
### Resultados

A los efectos de corroborar en la práctica esta propuesta teórica se construyó la cadena cinemática a escala reducida (1:20); de esta forma se pudo verificar el funcionamiento del sistema.

En las siguientes fotos se muestran partes de la cadena cinemática:

Los resultados obtenidos fueron los esperados, la cadena cinemática funcionó correctamente, el volante de inercia acumulaba la energía excedida y la entregaba cuando la boya se detenía.

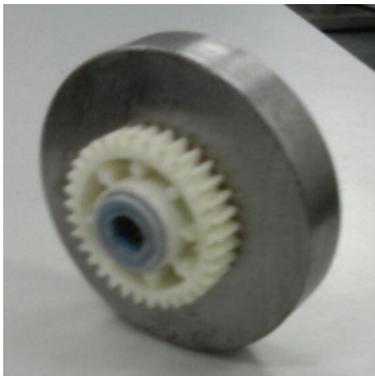
En el citado ejemplo se puede apreciar el generador eléctrico conectado a 10 leds de alto destello ubicados en la parte superior del equipo; durante el funcionamiento los leds alcanzaron su máxima intensidad. Este prototipo fue diseñado para verificar el funcionamiento elevando las boyas en forma manual.



**Sistema unificador de giro (Imagen 5)**



**Sistema multiplicador, planetario (Imagen 6)**



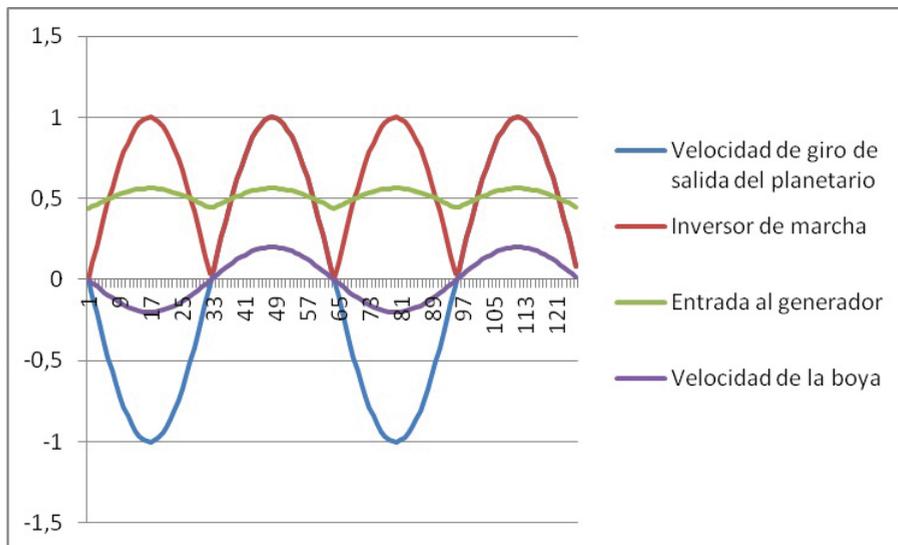
**Volante de inercia y sistema completo (Imagen 7)**



**Equipo finalizado (Imagen 8)**



**Imagen renderizada del equipo a escala real (Imagen 9)**



**Fig. 6. Gráfico de variación de rpm de la cadena cinemática**

## Discusión

Si bien los resultados obtenidos en este equipo fueron los esperados y del orden buscado, será necesario realizar un salto de escala, por ejemplo pasar a un prototipo a escala 1:10 y realizar los ensayos en un canal de simulación de olas (canal naval); este hecho es de crucial importancia para determinar diversos factores como el rendimiento del equipo, su comportamiento frente a distintos frentes de ondas y la forma más adecuada para el diseño del equipo, de esta forma se podrá afianzar la tecnología desarrollada.

## Conclusiones

El dispositivo electromecánico desarrollado permite utilizar la energía undimotriz para transformarla en energía eléctrica, es decir mediante el sistema mecánico se transformó el movimiento vertical de la boya en un movimiento circular sinusoidal a través del brazo de palanca. Mediante el planetario se amplificó el movimiento y con el unificador de giro y el volante de inercia se rectificó el movimiento, teniendo como salida una cantidad de giros cuasi constantes, ver Figura 6.

A los efectos de obtener del generador una tensión y frecuencia determinada se van a utilizar los denominados Inverter, estos sistemas electrónicos ajustan la salida de señal eléctrica a los valores requeridos.

## Agradecimientos

Queremos agradecer a las autoridades de la UTN.BA por el apoyo que siempre nos han brindado para el desarrollo de este proyecto, especialmente al Dr. Marcos Cohen que nos apoyó desde los inicios del proyecto y finalmente al Dr. Walter Legnani, como referente y guía en la investigación y desarrollo.

## Referencias

HAIM, A. y TULA, R. (2013) "Mecanismo de accionamiento para una máquina electromecánica transformadora de energía undimotriz en energía eléctrica". Boletín Oficial del Instituto Nacional de propiedad Industrial. ISSN-0325-6545. Pag. 35, Bs. As.

IBAÑEZ, P. (2006) "Energía Marina: Situación actual y perspectivas". Workshop Red de Pilas de Combustible, Baterías e Hidrogeno, Sevilla, España.

LEGAZ POIGNON, R. (2006) "Energía Marina: Desarrollo de una planta de energía de las olas en el Cantábrico". 2º Jornada Internacional sobre Energía Marina, Bilbao, España,

CARTA GONZÁLEZ, J. A.; CALERO PÉREZ, R., COLMENAR SANTOS, A. y ALONSO CASTRO GIL, M. s/f "Centrales de energías renovables". Editoriales: UNED y Pearson Prentice Hall. España

## **INSTRUCCIONES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS**

El presente instructivo reúne las condiciones generales de presentación y formato e información general para todos los interesados en remitir sus contribuciones.

### **Presentación de los textos**

Los trabajos, en versión impresa (original y copia), podrán ser remitidos a los miembros del Comité Editorial:

Lic. Gladys Esperanza, Lic. Juan Miguel Languasco, Dr. Fernando Gache

proyecciones@frba.utn.edu.ar

Facultad Regional Buenos Aires,  
Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva  
Medrano 951 (C1179AAQ) Buenos Aires, República Argentina

### **Recomendaciones generales**

Proyecciones es una publicación destinada a un público amplio, con formación específica en diferentes campos del conocimiento, que se distribuye en diversos países de habla castellana. Por tal razón, se recomienda a los autores preservar la pureza y la claridad idiomática de sus textos y evitar el uso de vocablos de uso corriente en disciplinas particulares, pero no conocidos (o con significado distinto) en otros ámbitos. Asimismo, no deberán emplearse palabras derivadas de traducciones incorrectas (por ejemplo, asumir en lugar de suponer, o librería por biblioteca) o pertenecientes a otros idiomas, salvo cuando no existan en castellano equivalencias válidas, o cuando se refieran a técnicas o procesos conocidos por su denominación en la lengua original.

Se recomienda también evitar el uso indiscriminado de mayúsculas cuando se haga mención sustantivos comunes, como por ejemplo elementos químicos o técnicas particulares.

Es conveniente, en todos los casos, efectuar una adecuada revisión ortográfica y de sintaxis de los textos antes de su envío.

### **Pautas específicas**

Se deberán contemplar las siguientes pautas:

La presentación corresponderá a un formato adecuado para hojas tamaño A4 (21cm x 29,7cm) escritas con interlineado simple, conservando los siguientes márgenes: superior e inferior, 2,5 cm; derecho e izquierdo, 3 cm; encabezado y pie de página, 1,2 cm. La fuente escogida es Tahoma, tamaño 12. Se recomienda muy especialmente a los autores respetar esta pauta, pues las conversiones posteriores desde otras fuentes, diferentes a la mencionada, pueden representar la distorsión o la pérdida de caracteres especiales, como las letras griegas. Se deberá emplear sangría en primera línea de 1cm y alineación justificada en el texto.

En la página inicial se indicará el título en negrita, centrado y con mayúscula sólo en la primera letra de la palabra inicial; en otro renglón, también en negrita, iniciales y apellido del (de los) autor(es) y, finalmente, en *italica*, el nombre y la dirección postal de la(s) institución(es) a la(s) que pertenece(n), junto con la dirección de correo electrónico del autor principal. Este autor será el enlace con el Comité editorial para todos los requerimientos vinculados con la publicación. Se recuerda que a los efectos de esta publicación solo se listarán debajo del título hasta cinco autores, figurando los restantes en el pie de la misma página.

A continuación, dejando tres espacios libres, el texto, en espacio simple, comenzando con un resumen de 50 a 100 palabras, en castellano e inglés, también en negrita y con tamaño de fuente 10. Luego del resumen, deberán consignarse las palabras clave que orienten acerca de la temática del trabajo, hasta un máximo de cinco. Asociaciones válidas de palabras (por ejemplo, contaminación ambiental, fluorescencia de rayos X) se considerarán como una palabra individual.

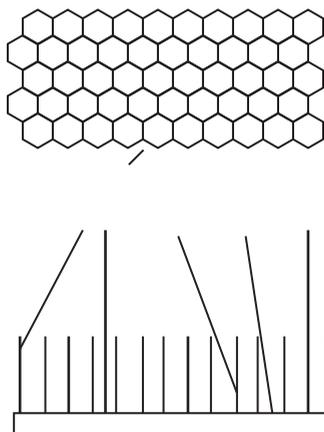
Se aconseja ordenar al trabajo de acuerdo a los siguientes ítems: Introducción, Parte Experimental, Resultados y Discusión, Conclusiones, Agradecimientos (si existieren) y Referencias. Cada uno de ellos tendrá categoría de título y deberá ser presentado en forma equivalente al título original del trabajo, en negrita y centrado, mientras que los subtítulos se consignarán en el margen izquierdo y en negrita. Ninguno de estos ítems deberá ser numerado. La extensión del trabajo no podrá ser mayor que 20 páginas.

El autor principal deberá remitir su trabajo en soporte electrónico y diagramado en la forma propuesta para la versión final impresa.

Sólo se aceptarán trabajos realizados íntegramente en Microsoft Word.

### **Tablas y Figuras**

Las figuras deberán ser ubicadas en el texto, en el lugar más cercano a su referencia, con números arábigos y leyendas explicativas al pie. Las imágenes fotográficas deberán estar al tamaño 1.1 a 300ppi, en formato tif, jpg o eps. Los gráficos o dibujos se presentarán, preferentemente, en vectores (formato .cdr o .ai); en el caso de estar presentados en forma de mapa de bits su resolución en 1.1 deberá ser mayor a 800 ppi. No podrán reproducirse figuras en color salvo en casos excepcionales que quedan a juicio del Comité Editorial, cuando el uso del mismo redunde en un cambio muy significativo de la comprensión técnica del trabajo.



**Fig. 1. Ejemplo de ubicación de la figura y su leyenda explicativa (centrada, en negrita y fuente 10)**

Las tablas se incluirán en el lugar más cercano a su referencia, con números arábigos y acompañadas con un título auto-explicativo en el encabezado.

**Tabla 1. Ejemplo de formato para tabla y título (centrada, en negrita y fuente 10)**

<b>Magnitud</b>	<b>Condición A</b>	<b>Condición B</b>
<b>Magnitud A</b>	<b>1a</b>	<b>1b</b>
<b>Magnitud B</b>	<b>2a</b>	<b>2b</b>

## Agradecimientos

Los agradecimientos deberán ser escuetos y específicos, vinculados al trabajo presentado. Serán suprimidos los de naturaleza general o no aplicables a la contribución.

## Referencias

Las referencias se consignarán en el texto indicando el apellido del autor (o primer autor, en trabajos de autoría múltiple) y el año de la publicación. Ejemplos: Gould (1958); Sah y Brown (1997); Probst y colaboradores (1997). Cuando la referencia se coloque a continuación de una oración completa en el texto, la forma indicada se convertirá en: (Gould, 1958). Las referencias múltiples se indicarán bajo un único par de paréntesis; ejemplo: (Sah y Brown, 1997; Probst y colaboradores, 1997). El ítem Referencias contendrá todas las citas consignadas en el texto, ordenadas alfabéticamente, tomando el apellido del primer autor. Los artículos incluidos en publicaciones colectivas deberán figurar en el orden: apellido e iniciales de todos los autores; entre paréntesis, año de publicación; abreviatura internacionalmente aceptada de la publicación; volumen; primera página del artículo. Las referencias a libros consignarán iniciales y apellido de todos los autores; título; página (si corresponde); editorial: Ejemplos:

**GOULD, E. S. (1958)** *Curso de Química Inorgánica*. Selecciones Científicas, Madrid, España.

**PROBST, T.; BERRYMAN, N.; LARSSON, B. (1997)** Anal. Atom. Spectrom. 12, 1115.

**SAH, R.; BROWN, P. (1997)** Microchem. J., 56, 285.

No deberán incluirse, bajo el ítem **Referencias**, citas bibliográficas no mencionadas específicamente en el texto del trabajo.

## Mecanismos de Aceptación y Normativa General

Los trabajos serán revisados por reconocidos especialistas, designados por el Comité Editorial. El dictamen será, en cada caso: a) aprobado en su versión original; b) aprobado con pequeñas modificaciones; c) revisado, con necesidad de modificaciones significativas; d) rechazado. En los casos diferentes a su aprobación directa, el trabajo será enviado al autor principal. Cuando se trate de cumplir con modificaciones sugeridas por los árbitros, el trabajo será sometido a una nueva evaluación.

El envío de una contribución para *Proyecciones* supone que ésta no ha sido publicada previamente y, adicionalmente, la cesión de los derechos de publicación por parte de los autores. Cuando el trabajo ha sido ya presentado en una reunión científica (sin publicación de actas) o inspirado en una presentación de esta naturaleza, se aconseja citar la correspondiente fuente. Con el fin de formalizar la cesión de los derechos antes mencionados, el autor principal deberá cumplimentar el formulario de Autorización y Declaración Jurada para la Publicación de un Artículo que se encuentra a continuación. El mismo deberá ser completado, firmado y remitido al Comité Editorial como requisito previo a la publicación.



**UTN.BA**

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

## Autorización y Declaración jurada para la publicación de un artículo

### 1. Identificación del trabajo:

Título: \_\_\_\_\_

Área de conocimiento: \_\_\_\_\_

Nº de páginas del trabajo: \_\_\_\_\_

Fecha de envío del archivo y del soporte magnético:                    /                    /

### 2. Identificación del autor/a:

Nombre y Apellido del Autor/a: \_\_\_\_\_

Tipo y Nº de documento: \_\_\_\_\_

Domicilio: \_\_\_\_\_

### 3. Identificación Institucional:

Universidad y/o organismo: \_\_\_\_\_

Dependencia / departamento: \_\_\_\_\_

Domicilio: \_\_\_\_\_

En calidad de titular de los derechos de autor del mencionado trabajo, **autorizo** a la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional, **a publicar, sin resarcimiento de derechos de autor**, conforme a las condiciones arriba indicadas, en medio electrónico, en la red mundial de computadoras, en la colección de proyectos de investigación de la Facultad Regional Buenos Aires, en su versión en línea e impresa y sitios en las que esta última haya otorgado licencias, para fines de lecturas, impresión y/o descarga por Internet, **a título de divulgación de la producción científica generada por la Universidad**, a partir de la fecha.-----

Deslindo a la Facultad Regional Buenos Aires y a la Universidad Tecnológica Nacional de toda responsabilidad legal que surgiera por reclamos de terceros que invoquen la autoría del artículo cuya publicación se efectúe.-----

He sido informado que puedo registrar mi trabajo de investigación en el Registro de la Propiedad Intelectual, no siendo responsable la Universidad Tecnológica Nacional y/o Facultad Regional Buenos Aires por la pérdida de los derechos de autor por falta de realización del trámite ante la autoridad pertinente.-----

Asimismo, quedo notificado que para obtener el título de "Patente de Invención" es necesario presentar la solicitud de patente dentro del año de la publicación o divulgación. (art. 5 Ley 24.481).-----

Declaro bajo juramento que el presente trabajo es una obra inédita, verídica y todos los datos e información consignados en el mismo se encuentran bajo mi exclusiva responsabilidad. Garantizo que la obra no contiene ningún planteamiento ilícito y que no infringe algún derecho de otros.-----

.....  
Nombre y Apellido

.....  
Firma

.....  
DNI/ LC /LE /Pasaporte



**UTN.BA**

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

## **Doctorado, Maestrías y Carreras de Especialización**

Doctorado en Ingeniería

*Mención en Procesamiento de Señales e Imágenes*

Maestría en Administración de Negocios

Maestría en Docencia Universitaria

Maestría en Ingeniería Ambiental

Maestría en Ingeniería en Calidad

Maestría en Ingeniería en Sistemas de Información

Maestría en Tecnología de los Alimentos

Maestría en Procesos Biotecnológicos

Maestría en Ingeniería Estructural

Especialización en Docencia Universitaria

Especialización en Ergonomía

Especialización en Higiene y Seguridad en el Trabajo

Especialización en Ingeniería Ambiental

Especialización en Ingeniería en Calidad

Especialización en Ingeniería en Sistemas de Información

Especialización en Ingeniería Gerencial

Especialización en Tecnología de los Alimentos

Especialización en Ingeniería en Telecomunicaciones

## **Cursos de Posgrado**

Dirección de Empresas

Higiene y Seguridad del Trabajo

Automación Industrial

Formulación y Evaluación de Proyectos

Sistemas Integrados de Gestión-Calidad, Medio Ambiente y Salud, y Seguridad Ocupacional



**UTN.BA**

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES

## **Carreras de Grado**

Ingeniería Civil

Ingeniería Eléctrica

Ingeniería Electrónica

Ingeniería Industrial

Ingeniería Mecánica

Ingeniería Naval

Ingeniería en Sistemas de la Información

Ingeniería Química

Ingeniería Textil

## **Ciclos de Licenciatura**

Licenciatura en Ciencias Aplicadas

Licenciatura en Tecnología Educativa

Licenciatura en Gestión de la Producción Gráfica