



BECAS DE VERANO 2019

INFORMES

Tomo 1



Instituto Balseiro
Comisión Nacional de Energía Atómica
Universidad Nacional de Cuyo

San Carlos de Bariloche
Marzo 2019



BECAS DE VERANO 2019

INFORMES

Editores

Pierre Arneodo Larochette – Dpto. Físicoquímica de Materiales
Javier Curiale – División Resonancias Magnéticas
Adriana Condó – División Física de Metales
Federico Mezio – División Reactores de Potencia

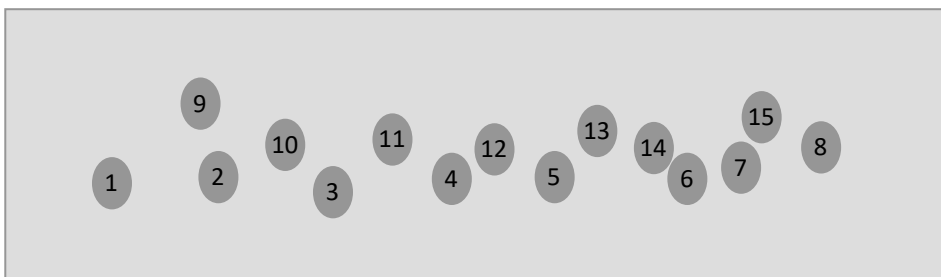
Centro Atómico Bariloche

Contenido

- Participantes de la edición 2019
- Informe del Comité Organizador
- Listado de autores y trabajos
- Informes y pósteres presentados (Parte 1)

Participantes de la edición 2019

Becas de Verano - Instituto Balseiro



- 1 José Armando Gastelo-Roque (UN Pedro Ruiz Gallo, Perú)
- 2 Andrés Ignacio Bertoni (UN Córdoba, Argentina)
- 3 Ayelén Vanina Ruiz (UN Entre Ríos, Argentina)
- 4 Sol Maldonado Betanzo (UN Patagonia San Juan Bosco, Argentina)
- 5 Guadalupe Murga (UN Tucumán, Argentina)
- 6 Daniela Cativa Vasquez (UTN Córdoba, Argentina)
- 7 Dalila Miloc (UTN Villa María, Argentina)
- 8 Emiliano Roberto Neis (UN Misiones, Argentina)
- 9 Federico Carlos David López (UN Catamarca, Argentina)
- 10 Ana Carla Buchini Labayen (UN San Luis, Argentina)
- 11 Bruno Marengo (UTN San Nicolás, Argentina)
- 12 Leandro Londra (UTN Concepción del Uruguay, Argentina)
- 13 Camilo Leonel Amadio (UN La Plata, Argentina)
- 14 Gerardo Emanuel Granados (UN Cuyo, Argentina)
- 15 Germán Chiarelli (U Buenos Aires, Argentina)

Informe del Comité Organizador

La edición 2019 del Programa Becas de Verano tuvo lugar entre el 4 de febrero y el 1 de marzo de 2019 en las instalaciones del Instituto Balseiro (IB) y el Centro Atómico Bariloche (CAB). El Comité Organizador (CO) estuvo integrado por Adriana Condó (División Física de Metales), Javier Curiale (Laboratorio de Resonancias Magnéticas), Federico Mezio (División Reactores de Potencia) y Pierre Arneodo Larochette (Departamento Físicoquímica de Materiales), todos pertenecientes al CAB.

El objetivo principal de este Programa, que a partir de la presente edición depende de la Secretaría de Vinculación e Innovación del IB, es promover que quienes participen se familiaricen con los procesos de investigación y desarrollo en Física e Ingeniería, en nuevos ambientes de trabajo, interactuando y colaborando con investigadores que se desempeñan en el IB y en el CAB. Para tal fin, el Instituto Balseiro, dependiente de la Universidad Nacional de Cuyo y la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), otorgó un premio a dieciséis estudiantes avanzados de carreras de grado en Ciencias Básicas y Aplicadas (con al menos el 75% de avance en la carrera) o jóvenes profesionales que se hayan recientemente graduado en las mismas carreras (no más de un año desde el egreso). El premio consistió en una pasantía de investigación de un mes de duración en grupos de trabajo del CAB-IB e incluyó gastos de estadía y transporte dentro de Argentina. Esta actividad se viene realizando regularmente desde 1994, durante el mes de febrero de cada año.

Se seleccionaron 16 participantes de entre alrededor de 250 postulantes en su mayoría de Argentina. Sólo se recibieron 8 presentaciones impresas provenientes de países de Latinoamérica. Al final de este informe se presentan algunos datos estadísticos de las personas que se postularon. Quienes participaron provinieron de diferentes ciudades de Argentina (San Luis, Catamarca, Tucumán, Rosario, Villa María, Posadas, Paraná, San Nicolás, CABA, Córdoba, Comodoro Rivadavia, Mendoza, Concepción del Uruguay y La Plata). También participó del evento un ingeniero peruano graduado en la carrera Ing. Mecánica Eléctrica. A continuación se presenta un listado con los nombres, universidades y carreras de cada uno de los participantes.

Participante	Universidad	Carrera
José Armando Gastelo Roque	U. N. Pedro Ruiz Gallo (Perú)	Ing. Mecánica Eléctrica
Camilo Leonel Amadio	U. N. de La Plata	Lic. en Física
Lucía Cabrera	U. N. de Rosario	Lic. en Física
Germán Chiarelli	U. de Buenos Aires	Lic. en Ciencias Físicas
Ana Carla Buchini Labayen	U. N. de San Luis	Lic. en Física
Federico Carlos David López	U. N. de Catamarca	Lic. en Química
Andrés Ignacio Bertone	U. N. de Córdoba	Lic. en Química
Dalila Victoria Miloc	U. Tecnológica Nacional	Ing. Química
Ayelén Vanina Ruiz	U. N. de Entre Ríos	Bioingeniería
Emiliano Roberto Neis	U. N. de Misiones	Ing. en Alimentos
Bruno Marengo	U. Tecnológica Nacional	Ing. Electrónica
Sol Micaela Maldonado Betanzo	U. N. de la Patagonia San Juan Bosco	Ing. Electrónica
Leandro Londra	U. Tecnológica Nacional	Ing. Electromecánica
Gerardo Emanuel Granados	U. N. de Cuyo	Ing. en Mecatrónica
Daniela Paola Cativa Vásquez	U. Tecnológica Nacional	Ing. Industrial
Guadalupe Murga	U. N. de Tucumán	Ing. Biomédica

Por motivos personales, la participante Lucía Cabrera no pudo iniciar las actividades.

Los primeros dos días fueron dedicados a recorrer los laboratorios del CAB y recibir una breve explicación de cada una de las propuestas de trabajo presentadas. Luego de elegir alguna de las propuestas, cada participante dedicó el resto de la pasantía a desarrollarla bajo la supervisión de profesionales a cargo.

La pasantía se cerró con la presentación de los resultados en informes escritos y en una sesión de pósteres abierta a toda la comunidad del CAB-IB. Los informes de cada práctica fueron avalados por sus directores, en primera instancia, y revisados entre investigadores involucrados en el Programa. Al finalizar, se realizó un almuerzo de despedida que reunió a participantes del Programa, a responsables de las prácticas y a personal y autoridades del IB.

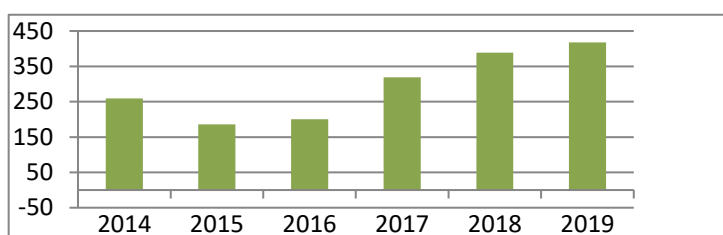
Además de las actividades específicas, se hicieron visitas guiadas grupales durante la pasantía, a la Biblioteca Leo Falicov, a INVAP S.E., a INTECNUS y al reactor RA6 del CAB.

Muchas personas de la comunidad CAB-IB colaboraron para llevar adelante esta actividad. En particular, queremos mencionar a todos los investigadores que presentaron propuestas, a Vanesa Visconti (secretaría), Gabriela Cirelli y Silvana Peralta (página web, inscripción electrónica), Marisa Velazco Aldao, Claudio Fuhr y Tamara Cárcamo (Biblioteca Leo Falicov), Laura García Oviedo (difusión IB), María José Zubrzycki (diseño gráfico), Patricia Rasmussen (administración IB), César Cassina (mantenimiento IB), Eduardo Soverzo y Florencia Gho (viviendas CAB), Carlos Cotaro (almuerzo de cierre), María Luz Martiarena y Santiago Enríquez (Secretaría de Vinculación e Innovación), Paola Vidal (dirección IB), Natalia Cabuccio (Consejo Académico IB) y Silvia Ibarra (Fundación Balseiro).

En este libro, que se encuentra a disposición del público en la Biblioteca Leo Falicov del CAB, se presenta una recopilación de los informes completos que incluye una versión reducida de los pósteres. También es posible descargar las versiones digitales de los mismos a través del sitio web de la Biblioteca.

Información estadística sobre las Becas de Verano 2019

Un total de 419 postulantes completaron el formulario electrónico para comenzar el proceso de inscripción (un 7.5 % de incremento respecto del año anterior). La siguiente es una gráfica de la evolución anual del número de personas inscriptas.



Del total de postulantes, 249 enviaron toda la documentación impresa requerida. La información que se presenta a continuación se refiere al conjunto de personas que completaron la inscripción electrónica.

1) Distribución en carreras de los postulantes

Argentina (total 367 postulantes)

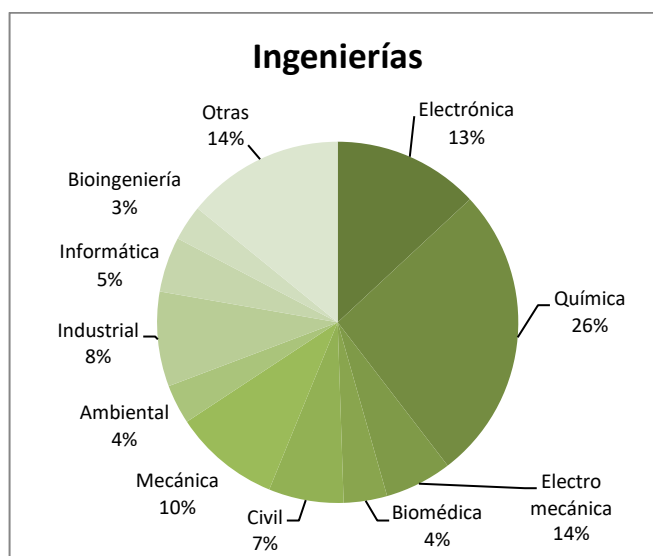
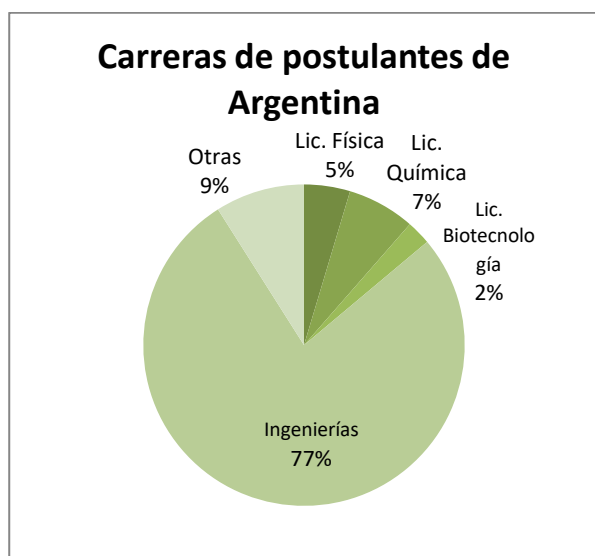
Ingenierías: 283 (75 Química, 37 Electrónica, 27 Mecánica, 24 Industrial, 19 Civil, 17 Electromecánica, 14 Informática, 11 Biomédica, 10 Ambiental, 9 Bioingeniería, 40 otras)

Lic. Física: 17

Lic. Química: 25

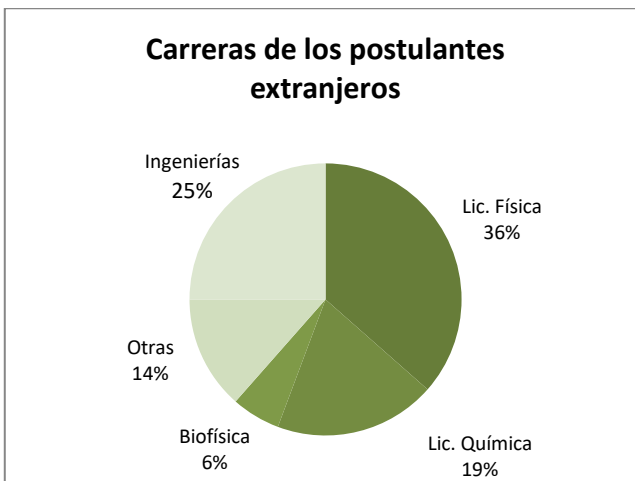
Lic. Biotecnología: 9

Otras: 33

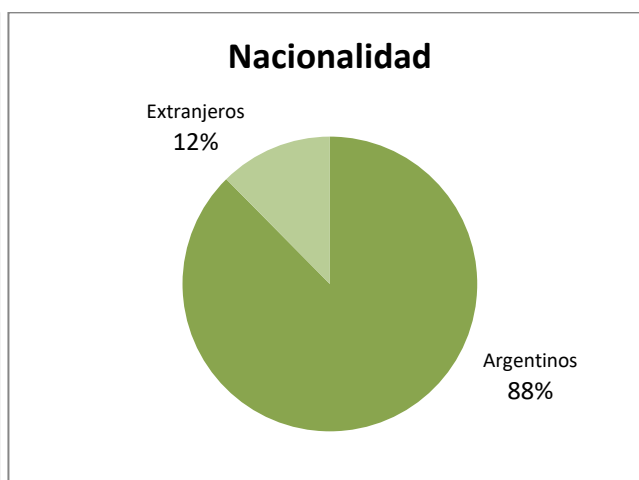
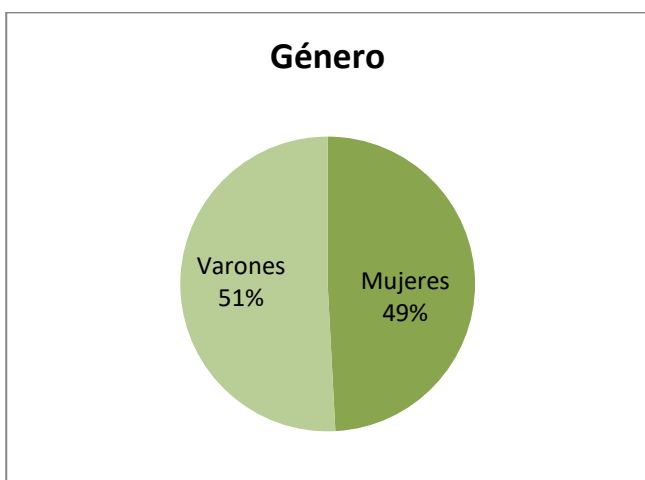


Latinoamérica (total 52 postulantes)

Ingenierías: 13 (6 Química, 2 Civil, 5 otras)
Lic. Física: 19
Lic. Química: 10
Biofísica: 3

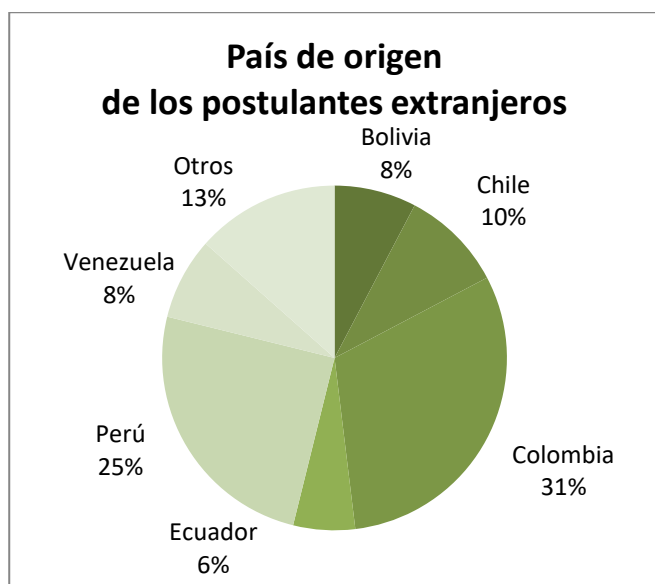


2) Distribución en género y nacionalidad de los postulantes



3) Distribución en países de los postulantes extranjeros (total 52 postulantes)

En "Otros" se incluye a Brasil, México y Paraguay (con un postulante por cada país) y El Salvador y Uruguay (con dos).



Listado de autores y trabajos

Tomo 1

Bruno Marengo

Transmisor de RF para notificación y localización de personas en emergencia

Director: N. Catalano (Lab. de Investigación Aplicada en Telecomunicaciones)

Andrés Ignacio Bertoni

Análisis de señales y desarrollo de un algoritmo para el seguimiento de un marsupial vulnerable en el bosque andino-patagónico vía radio-telemetría

Directores: K. Laneri, L. Kazimierski, N. Catalano y G. Abramson (Div. de Física Estadística e Interdisciplinaria)

Federico Carlos David López

Efecto de la humedad y del CO₂ sobre las propiedades de almacenamiento de CO₂ del material Li₄SiO₄

Directores: M. L. Grasso, F. C. Gennari y P. Arneodo Larochette (Depto. Fisicoquímica de Materiales)

Germán Chiarelli

Armado de un medidor de flujo de muones

Director: X. Bertou (Lab. de Detección de Partículas y Radiación)

Sol Micaela Maldonado Betanzo

Ensayos preparativos para el control de movimiento vertical de un robot subacuático

Directores: L. Acha y M. E. Robador (Div. Robótica y Automatización del Proyecto CAREM)

Dalila Miloc

Generación y medición de partículas en aire

Director: M. Caputo (Lab. de Seguridad Nuclear)

Leandro Londra

Anemometría térmica en flujos axiales a través de geometrías complejas

Directores: O. D. Osorio y P. M. Lazo (Lab. de Termohidráulica)

Tomo 2

Ayelén Vanina Ruiz

Estimación de dosis efectiva a partir de bioensayos y mediciones postuladas para situaciones accidentales en reactores de investigación

Directores: C. D. Sosa Vera, P. Andres y F. Merma Velasco (Lab. de Dosimetría y Calibración –Div. Protección Radiológica)

José Armando Gastelo-Roque

Caracterización de materiales de LiCoO₂ para electrodos de baterías de Li-ion

Directores: S. Moreno y D. Cuscueta (Depto. de Materiales Metálicos y Nanoestructurados)

Gerardo Emanuel Granados

Caracterización del sistema de propulsión para el control de un robot submarino

Directores: M. E. Robador y L. Acha (Div. Robótica y Automatización del Proyecto CAREM)

Guadalupe Murga

Remoción de cromo (VI) de efluentes por reducción a cromo (III), catalizada por microorganismos electrogénicos

Directora: B. Prados (Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable - IEDS)

Emiliano Roberto Neis

Desarrollo y caracterización de una emulsión doble para el encapsulamiento de una infusión de *Buddleja globosa* con propiedades antioxidantes

Directoras: Y. Martínez y J. Gervasoni (Depto. de Materiales Metálicos y Nanoestructurados)

Ana Carla Buchini Labayen

Migración entre tecnologías utilizadas en dosimetría termoluminiscente

Directores: F. Merma Velasco, C. D. Sosa Vera y P. Andres (Lab. de Dosimetría y Calibración – Div. Protección Radiológica)

Daniela Paola Cativa Vasquez

Implementación de software basado en motor de videojuegos para uso en simuladores de entrenamiento médico

Directores: R. Cejas Bolecek y M. Fermín (Depto. de Mecánica Computacional)

Camilo Leonel Amadio

Sistema de control de posición para un adquisidor de imágenes de rayos X de alta resolución espacial

Directores: J. Lipovetzky, M. Gómez Berisso y Martín Pérez (Lab. de Bajas Temperaturas)



Transmisor de RF para notificación y localización de personas en emergencia

Bruno Marengo

Ing. Electrónico

UTN - Facultad Regional San Nicolás

Nicolás Catalano

Ing. Electrónico

Director

Laboratorio de Investigación Aplicada en Telecomunicaciones

1 de Marzo de 2019

Resumen

El presente informe detalla el trabajo llevado a cabo durante la Beca de Verano del Instituto Balseiro, edición 2019. Consiste en el desarrollo de un prototipo de un transmisor de Radio Frecuencia de baja potencia. El objetivo es brindar a aquellas personas que se encuentran en la montaña sin cobertura celular u otro medio de comunicación, una manera de dar aviso a las autoridades en caso de emergencia. Además, se transmite una ubicación aproximada con el fin de reducir los costos de los operativos de búsqueda. Para esto se utilizó el protocolo WSPR (*Weak Signal Propagation Reporter*), de alta robustez para comunicaciones de larga distancia. Se desarrolló el prototipo y se realizaron ensayos de transmisión que validan la factibilidad de la solución. Finalmente, se proyecta el trabajo futuro para su implementación.

Abstract

This report details the work carried out during the 2019 edition of the Summer Scholarships of the Instituto Balseiro. It consists in the development of a prototype of a low power RF transmitter. Given the lack of cellular coverage in the mountains area, the aim of this project is to provide people with a means to report authorities in case of an emergency situation. Besides, an approximate location is transmitted in order to reduce the costs of search and rescue missions. The WSPR (*Weak Signal Propagation Reporter*) protocol was used due to its robustness for long distance transmissions. The prototype was designed and developed, and preliminary tests demonstrate the feasibility of the solution. Finally, future work needed for its implementation is detailed.

Resumen	1
Abstract	1
1. Introducción	3
1.1 Motivación	3
1.2 Objetivo	3
1.3 Alcance	3
2. Solución Propuesta	4
2.1 Protocolo de comunicación	4
2.2 Prototipo	5
3. Desarrollo	6
3.1 Ensayos	8
3.1.1 Consumo	8
3.1.2 Receptor	9
3.1.3 Transmisión	9
4. Trabajo futuro	12
4.1 Ensayos	12
4.2 Aplicación	12
4.3 Protocolo WSPR	12
4.4 Hardware	12
5. Conclusiones	13
6. Referencias	13

1. Introducción

1.1 Motivación

Una de las actividades más practicadas en la montañas es el *trekking* o excursionismo, que atrae a miles de personas, tanto experimentadas como no. Consiste en caminar por escenarios naturales, por ejemplo montañas en el caso de Bariloche, en los que puede no haber senderos marcados. Existen numerosas recomendaciones para que sea un deporte más seguro, pero debido a la inmensidad de la montaña y sus riesgos, es común que ocurran accidentes.

Muchos excursionistas se pierden o demoran y no todos llevan consigo los elementos necesarios para guiarse de vuelta. Además de la negligencia, existe el riesgo de sufrir un accidente y no poder volver por medios propios. Generalmente no se cuenta con señal de telefonía móvil y lograr alertar a las autoridades puede ser un problema. El tiempo que transcurre hasta que se notifica puede ser vital para la supervivencia del excursionista.

En caso de perderse, tomará aún más tiempo hasta que se reporte al excursionista como desaparecido, especialmente en caso que no haya realizado el registro de Trekking [1]. Se le suma a esto la dificultad de localizar al excursionista. Para ello, es necesario llevar a cabo un operativo millonario, que implica desde el despliegue de personal durante días hasta el uso de helicópteros, en una carrera contra la supervivencia de quien se encuentra perdido.

El último caso mediático fue a comienzos del 2018 y costó más de 1.5 Millones de pesos [2]. Desde enero hasta noviembre del 2018 hubo 42 rescates en la montaña [3].

1.2 Objetivo

Durante el desarrollo de las Becas de Verano de 2019, se pretende realizar una primera aproximación al desarrollo de una solución de bajo costo que permita, a quién sale a la montaña, alertar una eventual emergencia. Así, no sería necesario esperar a que las autoridades declaren la emergencia, ganando tiempo y aumentando las probabilidades de sobrevivir. Además, se pretende informar la ubicación aproximada, con el objetivo de reducir los gastos destinados a los operativos de rescate.

1.3 Alcance

El presente trabajo abarca la selección de las tecnologías a implementar, el prototipado de un transmisor y el estudio de su factibilidad. También se proyecta el trabajo futuro necesario para su implementación.

2. Solución Propuesta

Como solución al problema, se propone desarrollar un transmisor portable que opere bajo el protocolo de comunicación WSPR. Así, se podrían distribuir transmisores a aquellos que salgan a la montaña y monitorear la emisión de señales de emergencia desde estaciones de radio.

De la misma manera, esta solución se puede aplicar en otros países, y en caso de existir una red WSPR, se pueden aprovechar las estaciones ya instaladas para aumentar las posibilidades de recibir los mensajes.

A continuación se explican las tecnologías involucradas:

2.1 Protocolo de comunicación

WSPR (*Weak Signal Propagation Reporter*) [4] es un protocolo desarrollado y ampliamente utilizado en el ámbito de radioaficionados. Como lo indica su nombre, el mismo se basa en la transmisión de señales de baja potencia, que gracias a la baja frecuencia y tasa de datos de transmisión, logra un alcance excepcional. El protocolo fue desarrollado por el radioaficionado Joe Taylor (K1JT), y se encuentra bajo licencia del tipo GPL.

WSPR consiste en el envío de mensajes que contienen el *callsign* de quien transmite (identificador de estación de radio), la ubicación del mismo basado en el sistema de localización *Maidenhead*, y la potencia transmitida. El *callsign* está formado por 4 a 6 caracteres. Por ejemplo, el Instituto Balseiro posee una estación cuyo *callsign* es **LU9VD** [5]. Por otro lado, el sistema *Maidenhead* divide la superficie de la tierra en una grilla rectangular. El localizador consiste en pares de caracteres que refieren la posición a un rectángulo de la misma. A su vez, cada uno se subdivide en otra grilla y así sucesivamente, por lo que la inclusión de más pares de caracteres significa mayor precisión. A modo de ejemplo, FE48 es un cuadrado que abarca desde el Bolsón hasta Bariloche. FE48HV abarca el centro de Bariloche y FE48HV24 la mitad de la isla Huemul.

El protocolo utiliza una robusta codificación con FEC (*Forward Error Correction*) [6] y un esquema de modulación continua de fase 4-FSK. La tasa de bits de datos es muy baja siendo el ancho de banda de 6 Hz y la duración de cada mensaje, 110.5 segundos. En cuanto a la frecuencia de operación, hay 17 bandas de 200 Hz que van desde los 130 kHz hasta los 1.2 GHz.

Para su funcionamiento se corre un programa llamado WSPR que genera la señal en base a los datos indicados para alimentar un transmisor. El mismo programa se utiliza para la recepción, decodificando las señales. Es capaz de decodificar señales con una SNR (relación señal ruido) de hasta -28 dB en un ancho de banda de 2500 Hz. La transmisión de estos

mensajes se inicia en los minutos pares, siendo necesario estar sincronizado a un reloj de gran precisión.

Las características de este protocolo permiten que receptores puedan escuchar a los transmisores de todo el mundo, lográndose comunicaciones de miles de kilómetros. Cada receptor puede registrar la escucha en la página web de WSPR para informar al transmisor. En la figura 1 se muestra un mapa de 350 escuchas registradas en una semana.



Figura 1. Mapa de escuchas WSPR registradas.

2.2 Prototipo

Se propuso que el transmisor a desarrollar sea de pequeño tamaño y se pueda llevar a la montaña sin que represente una carga. Se pretende controlarlo desde el celular mediante conexión Bluetooth, que genere la señal y la transmita.

Para ello se tomaron en consideración:

- Un Módulo Bluetooth LE HM-10 [7] para entablar la comunicación con el celular.
- Un Arduino Nano [8] para la codificación de los datos y el control del sistema.
- Un oscilador programable SI5351 [9] para la generación de la señal de RF.
- Una antena portable para la transmisión.

Este deberá ser alimentado por una fuente de alimentación portátil como baterías. En la figura 2, se muestra el diagrama en bloques del prototipo.

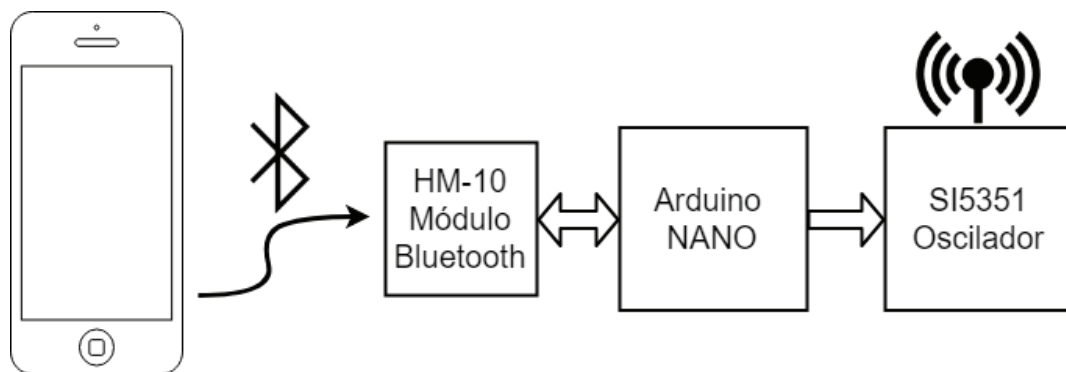


Figura 2. Diagrama en bloques del prototipo.

3. Desarrollo

En primer lugar, se realizó el estudio del código fuente del programa WSPR para comprender la codificación y generación de los mensajes. Esto fue posible gracias a que el mismo se encuentra disponible en distintos repositorios Open Source [10]. De esta manera, se tomó parte del código C del mismo y se implementó en el Arduino Nano para generar los símbolos a transmitir. Para poder verificar el funcionamiento del mismo, se desarrolló un script en Python que sintetiza la señal modulada en 4-FSK en banda base. La comprobación se realizó decodificando dicha señal con el programa WSPR.

Un punto clave fue la determinación de la frecuencia de operación. Se trató de una solución de compromiso ya que menores frecuencias tienen mayor alcance, pero el tamaño de las antenas crece considerablemente. Además el SDR utilizado para la demodulación no es capaz de trabajar por debajo de los 20 MHz. Se decidió trabajar en la banda de 10 metros, es decir, 28.1246 MHz.

A continuación, se implementó el oscilador programable para transmitir la señal de RF. Para esto fue necesaria la utilización de una Radio Definida por Software (SDR) [11] para demodular la señal transmitida y así comprobar su correcto funcionamiento. El oscilador es controlado por el Arduino Nano. En consecuencia, se agregó al Arduino el código para generar en el oscilador, a partir de los símbolos de los mensajes, las distintas frecuencias de RF de la modulación 4-FSK.

Por otra parte, se analizaron distintos tipos de antenas teniendo en vista la portabilidad. Se eligió el monopolo vertical de un cuarto de longitud de onda, es decir 2.4 metros aproximadamente. Esta antena puede armarse con un cable, el cual no implica un gran peso, es robusto y puede transportarse enrollado ocupando muy poco espacio. Para sujetar la antena, en su conector se acopla una estaca para afirmarla al suelo mientras que el otro extremo se puede atar a una rama o roca para mantenerla vertical.

En la figura 3 se muestra la respuesta en frecuencia de la antena, verificada utilizando el analizador de RF Keysight FieldFox [12]. Se observa que está correctamente sintonizada a la frecuencia de operación.

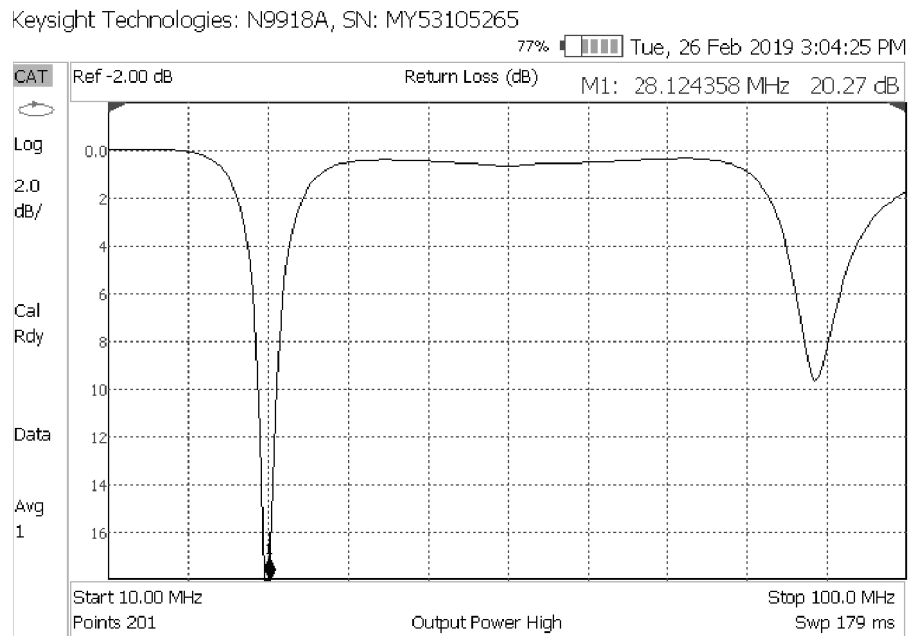


Figura 3. Respuesta en frecuencia del monopolo.

Para controlar la transmisión, se integró el módulo bluetooth que permite establecer una comunicación entre un celular que soporte Bluetooth Low Energy (BLE) y el Arduino. Para ello, se programaron una serie de comandos que permiten comenzar la transmisión y modificar el *Callsign* y la ubicación a transmitir. Estos comandos se envían a través de cualquier aplicación de terceros que lleve a cabo una comunicación BLE.

Para este prototipo, utilizando la herramienta App Inventor [13], se desarrolló una aplicación para dispositivos Android con la interfaz gráfica y el control de la transmisión. Sin embargo, resta incluir en ella la comunicación BLE. En la figura 4 se muestra la interfaz gráfica.

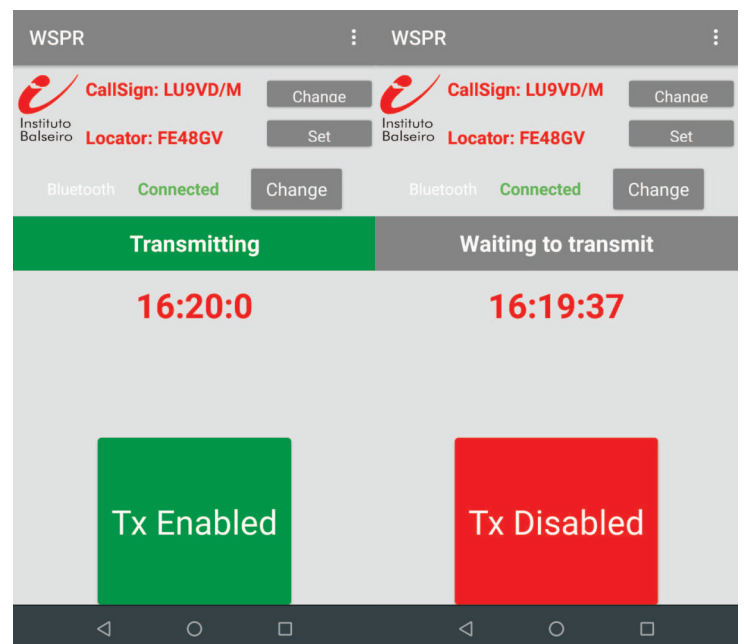


Figura 4. Aplicación para el control del transmisor

En la Figura 5 se muestra el prototipo.

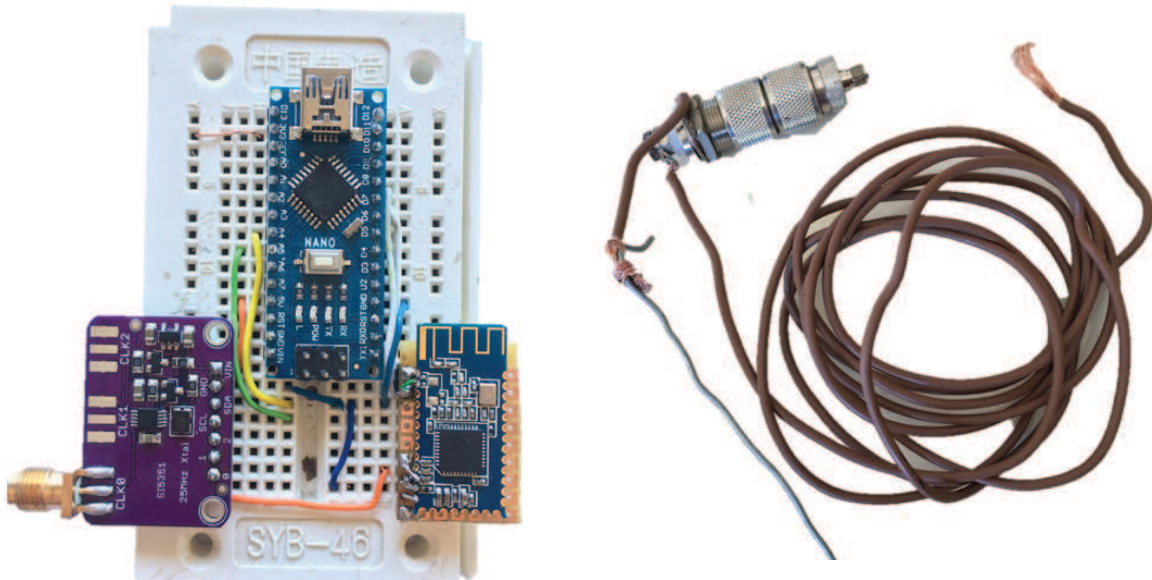


Figura 5. Prototipo y la antena enrollada.

3.1 Ensayos

3.1.1 Consumo

Para tener una aproximación del consumo del dispositivo, determinar una apropiada fuente de alimentación y la autonomía, se realizaron mediciones sobre 10 minutos de funcionamiento, es decir 5 transmisiones. Promediando, el consumo de energía por transmisión es de 1.6 mAh. Es importante aclarar que en este estado de prototipo, el consumo es considerablemente superior al óptimo. Esto es, principalmente, debido a que el *hardware* seleccionado no es apropiado para un producto final, siendo sumamente mejorable. Por ejemplo, el SI5351 consume en *standby*, aproximadamente 20 mA, correspondiente con más del 50% del consumo total.

Si se utiliza un *Power Bank* de 5000 mAh, que ya incluye la electrónica necesaria para la regulación de voltaje y la recarga de la batería, se estima una autonomía de 3125 transmisiones, es decir, más de 100 horas de transmisión. Además, muchos *Power Banks* comerciales incluyen pequeños paneles solares que podrían aumentar aún más la duración.

3.1.2 Receptor

Se instaló en el Laboratorio de Investigación Aplicada en Telecomunicaciones en el CAB una antena de tipo dipolo llamada *Inverted Vee* para recibir las señales. Con ayuda del analizador de RF, se sintonizó la antena a la frecuencia de operación para disminuir las pérdidas y mejorar recepción. En la figura 6 se ve la respuesta en frecuencia de la misma, que muestra un mínimo de pérdida para aproximadamente 28 MHz.

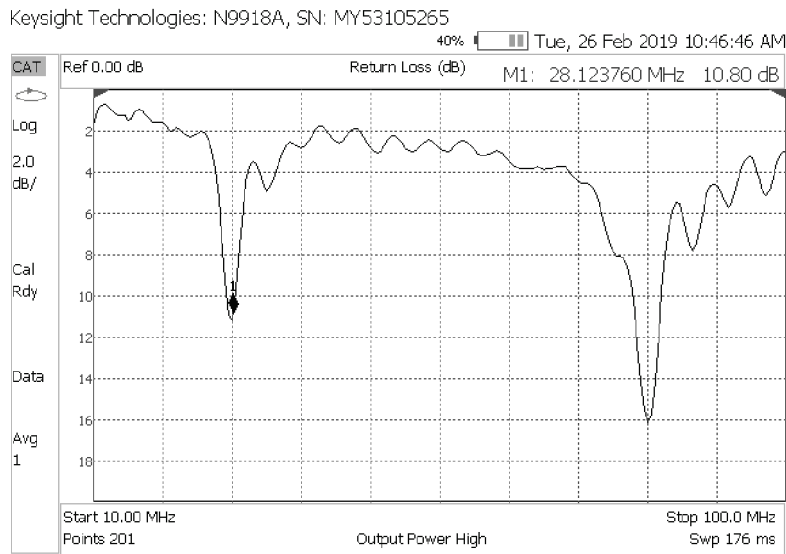


Figura 6. Rta. en frecuencia de la antena del receptor.

La antena alimenta un SDR que demodula la señal y las entrega al programa WSPR para su decodificación.

3.1.3 Transmisión

Para poner a prueba el transmisor, se realizaron dos ensayos. Primero, se llevó hasta el camino "Balcón Gutiérrez" de manera de estar alejado del receptor y sin línea de vista. La distancia entre ambos puntos es de aproximadamente 6 kilómetros en línea recta (Ver Fig. 7). La transmisión se hizo desde la base de la montaña de manera de empeorar las condiciones de línea de vista. Como se ve en la Fig. 8, el programa WSPR ejecutado en el CAB fue capaz de decodificar los mensajes, los cuales listó en la interfaz. Allí se ve el *Callsign* LU9VD y el localizador FE48 transmitidos.



Figura 7. Mapa del ensayo.

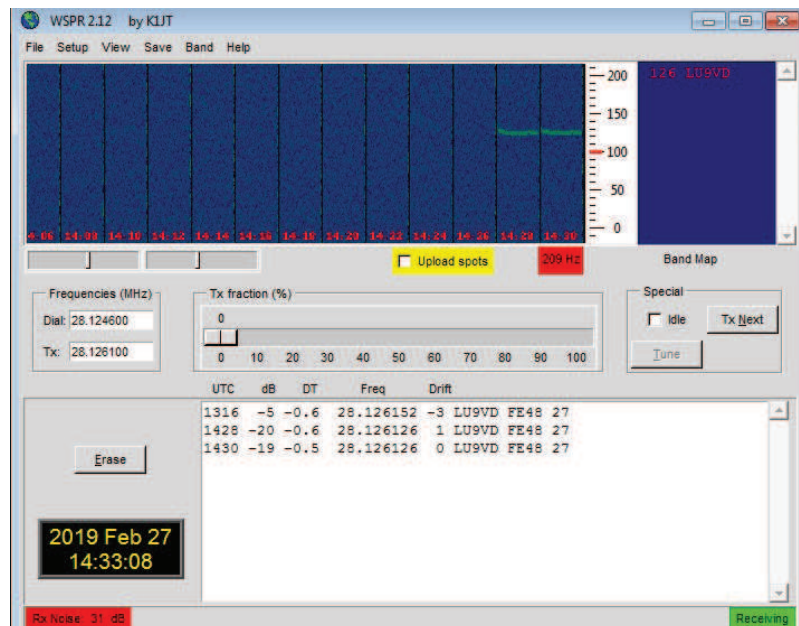


Figura 8. Programa WSPR con los mensajes decodificados.

De la misma manera, se realizó otra transmisión desde detrás del cerro Llao Llao, siendo la distancia hasta el CAB de aproximadamente 15 kilómetros (Fig. 9), con numerosos obstáculos entre ambos puntos. Nuevamente, fue posible decodificar el mensaje, como se ve en la Figura. 10.



Figura 9. Mapa del ensayo.

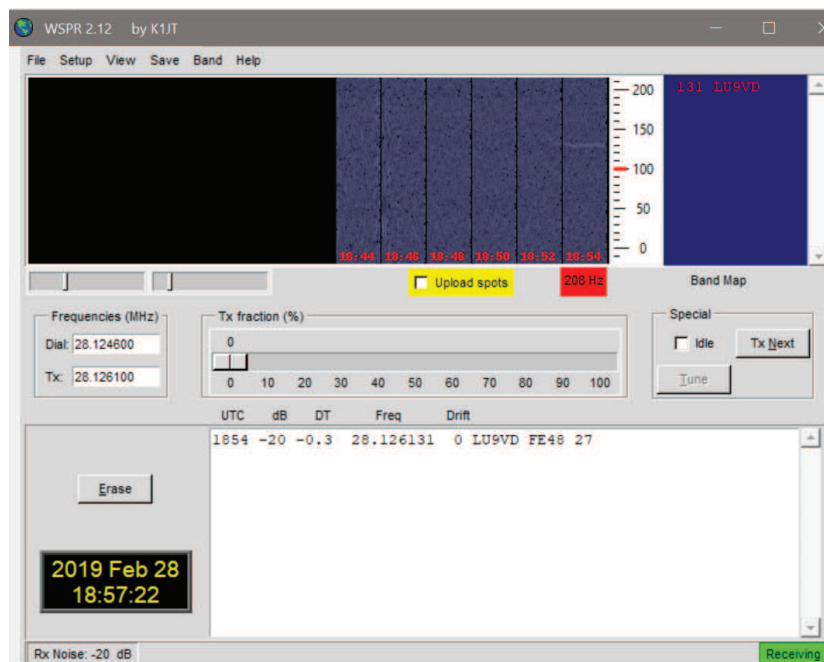


Figura 10. Programa WSPR con los mensajes decodificados.

Es importante comentar que durante algunas pruebas, se forzaron fallas en la transmisión como cortarla antes de tiempo, o comenzar a transmitir antes o después del tiempo correcto. Aún así, el protocolo WSPR fue capaz de decodificar las señales. Esto se debe a la robusta codificación con corrección de errores FEC.

4. Trabajo futuro

4.1 Ensayos

Resulta prudente llevar a cabo ensayos más exigentes, los cuales no pudieron realizarse debido a la acotada duración de las Becas de Verano.

4.2 Aplicación

Para un mejor y más fácil control del transmisor, es necesario trabajar en la aplicación para integrar la comunicación y la interfaz gráfica. Además se debe tomar la ubicación del GPS del celular y generar automáticamente el localizador a transmitir.

4.3 Protocolo WSPR

Se podría proponer esta solución en el ámbito de radioaficionados para extender su uso y aprovechar las estaciones ya instaladas. Esto permitiría adecuar los datos transmitidos, y por ejemplo, utilizar menos caracteres para la identificación y más para la ubicación de manera de aumentar la precisión de la misma.

4.4 Hardware

La utilización de un Arduino Nano se corresponde con una etapa de desarrollo, ya que posee numerosas características no utilizadas en esta solución. Esto va en detrimento del tamaño y la autonomía del producto final. Es por eso que debe estudiarse implementar el código en un microcontrolador más apropiado y de menor consumo.

Dada la vital robustez que el producto final debe tener, se prevé utilizar un oscilador de mejores prestaciones, como ser la deriva, estabilidad y el consumo. Además, se podría estudiar el agregado de una etapa de amplificación para aumentar la potencia de transmisión y lograr un mayor alcance.

Por último, una vez definido el hardware, se debe integrar la totalidad de los componentes y ensamblarlos en un contenedor que los proteja y se pueda transportar.

5. Conclusiones

En el marco de las Becas de Verano 2019, se logró desarrollar un transmisor portable e implementar el protocolo WSPR para transmitir un aviso y una localización aproximada. Se comprobó la robustez del protocolo, principalmente la codificación con corrección de errores, siendo apto para la aplicación. Si bien el trabajo constituye una primera aproximación quedando trabajo futuro a realizar, las pruebas preliminares demuestran que el desarrollo es factible.

6. Referencias

- [1] https://www.nahuelhuapi.gov.ar/intro_registro.html
- [2] <https://www.economicasbariloche.com.ar/el-rescate-de-joaquin-santos-costo-mas-de-15-m/>
- [3] <https://www.rionegro.com.ar/hubo-42-rescates-en-la-montana-en-el-ultimo-ano-GG5998190/>
- [4] <http://wsprnet.org>
- [5] <https://www.qrzcq.com/call/LU9VD>
- [6] Digital Communications: Fundamentals and Applications, 2nd Edition. Bernard Sklar
- [7] <http://www.jnhuamao.cn/bluetooth.asp>
- [8] <https://www.arduino.cc/en/uploads/Main/ArduinoNanoManual23.pdf>
- [9] <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si5351-B.pdf>
- [10] <https://sourceforge.net/projects/wsjt/>
- [11] <https://www.rtl-sdr.com/>
- [12] <https://www.keysight.com/en/pcx-x205201/fieldfox-handheld-rf-and-microwave-analyzers?cc=AR&lc=eng>
- [13] <http://appinventor.mit.edu>

OBJETIVO

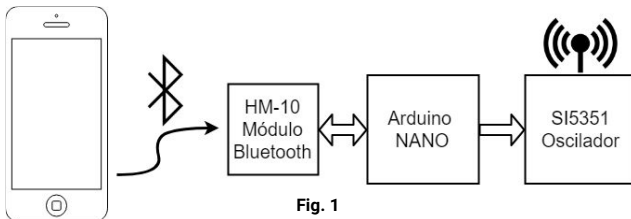
Se pretende realizar una primera aproximación al desarrollo de un **transmisor portable que opere el protocolo WSPR**, y permita a quien sale a la montaña alertar una eventual emergencia. Así, no sería necesario esperar a que las autoridades declaren la emergencia, ganando tiempo y aumentando las probabilidades de sobrevivir. Además, se pretende **informar la ubicación aproximada, reduciendo los gastos de los operativos de rescate**.

De esta manera, se podrían **distribuir transmisores a los excursionistas y monitorear la emisión de señales de emergencia**. En países donde hay redes WSPR, se pueden utilizar las estaciones ya instaladas para aumentar las posibilidades de recibir los mensajes.

SOLUCIÓN

El transmisor debe ser de pequeño tamaño y que se pueda llevar a la montaña sin que represente una carga. Este debe ser alimentado por una fuente de alimentación portátil.

Se pretende controlarlo desde el celular mediante conexión Bluetooth Low Energy, que genere la señal y la transmita utilizando el protocolo WSPR. La Fig. 1 muestra el diagrama en bloques.



DESARROLLO

PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

WSPR ("Weak Signal Propagation Reporter"), es utilizado por radioaficionados de todo el mundo para transmitir y recibir señales de baja potencia. Gracias a la robustez del mismo, es posible **decodificar mensajes enviados a miles de kilómetros**.

Los mensajes incluyen:

1. Un **identificador** de estación de radio (Callsign).
2. Un **localizador** basado en el sistema de localización Maidenhead.
3. La potencia transmitida.

PROTOTIPO

1. El **Arduino** codifica los mensajes y controla el sistema (Fig. 2).
2. Se trabaja en la banda de **28.1246 MHz**.
3. El **oscilador programable** genera las distintas frecuencias de la modulación 4-FSK.
4. La **antena** es un monopolo vertical de un cuarto de longitud de onda (2.4 mts) (Fig. 3).
5. El módulo **Bluetooth LE** permite controlarlo desde el celular.
6. Se desarrolló una **App** con la interfaz gráfica y el control de la transmisión (Fig. 4). Resta incluir en ella la comunicación BLE.

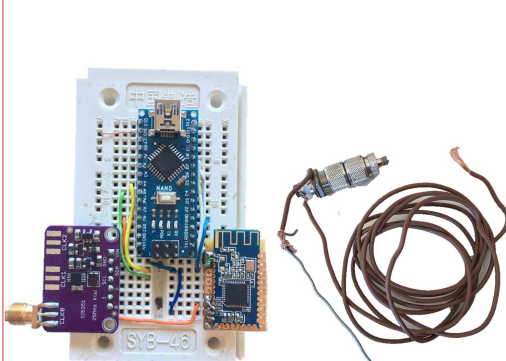
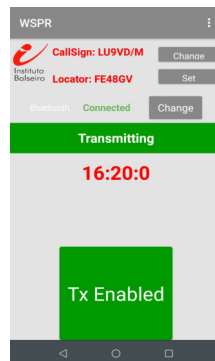


Fig. 3. Antena enrollada



ENSAYOS

CONSUMO

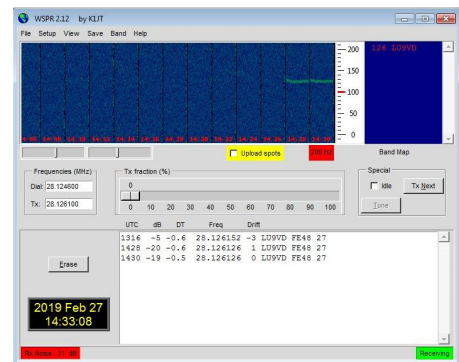
- El consumo de energía **del prototipo** es de **1.6 mAh aprox. por transmisión**.
- Si se utiliza un Power Bank de 5000 mAh, se estima una autonomía de 3125 transmisiones, es decir, más de 100 horas de transmisión.

RECEPTOR

- Se montó una antena en el CAB para monitorear las transmisiones.

TRANSMISIÓN

- Se realizó en ensayo desde el Balcón Gutiérrez hasta el CAB (Fig. 5).
 - ✓ Aprox. 6 kilómetros en línea recta.
 - ✓ Sin línea de vista
- Se decodificó con éxito el mensaje (Fig. 6).



TRABAJO FUTURO

- Realizar ensayos más exigentes.

APP

- Integrar la comunicación BLE a la interfaz gráfica.
- Generar el localizador en base a la posición GPS del celular.

PROTOCOLO WSPR

- Proponer en el ámbito de radioaficionados la extensión de su uso y aprovechar las estaciones ya instaladas.
- Adecuar los datos transmitidos, y por ejemplo, utilizar menos caracteres para la identificación y más para la ubicación de manera de aumentar la precisión.

HARDWARE

- Implementar el código en un microcontrolador más apropiado y de menor consumo.
- Utilizar un oscilador de mejores prestaciones, como la deriva y la estabilidad.
- Agregar una etapa de amplificación para aumentar la potencia de transmisión y lograr un mayor alcance.
- Se debe integrar la totalidad de los componentes y ensamblarlos en un contenedor que los proteja y se pueda transportar.

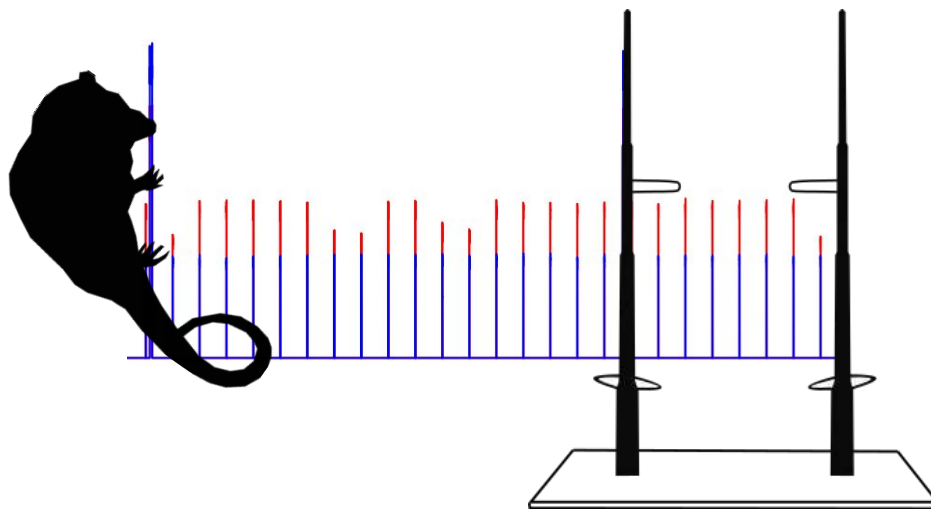
CONCLUSIONES

Se logró desarrollar un transmisor portable e implementar el protocolo WSPR para transmitir un aviso y una localización aproximada. Si bien el trabajo constituye una primera aproximación quedando trabajo futuro a realizar, las pruebas preliminares demuestran que el desarrollo es factible.



Informe de Trabajo - Programa Becas de Verano 2019 - Instituto Balseiro

Análisis de señales y desarrollo de un algoritmo para el seguimiento de un marsupial vulnerable en el bosque andino-patagónico vía radio-telemetría



Lugar de Trabajo: División de Física Estadística e Interdisciplinaria (FiEstIn)
- Instituto Balseiro (IB) - Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA)



Becario: Lic. Andrés Ignacio Bertoni (*andresibertoni@gmail.com*)
(Licenciado en Química - FCQ - UNC, Córdoba, Argentina)

Directora: Dra. Karina Laneri (*karinalaneri@gmail.com*)

Colaboradores: Lic. Laila Kazimierski (*lailakazimierski@gmail.com*)

Ing. Nicolás Catalano ; Dr. Guillermo Abramson

Centro Atómico Bariloche (CAB), Bariloche, Argentina

Febrero 2019

Abstract

This work presents a complete interdisciplinary methodology for animal tracking in dense vegetation environments via radio telemetry, taking as an applied example the case of the vulnerable nocturnal marsupial *Dromiciops gliroides* in the Andean-Patagonian Forest. As part of the developed methodology, a protocol for the processing and analysis of raw radio signals was programmed, using the extracted information in an *ad-hoc* algorithm adjusted to the experimental configuration, for the tracking of the animal over time. The section of the method that requires computational effort was automatized in a software written in Python 3.

Key words

Animal Tracking — Wildlife Radio Telemetry — Signal Processing — Signal Analysis — Tracking Algorithm — Conservation Ecology — *Dromiciops gliroides* — Andean-Patagonian Forest — Python 3

Resumen

Este trabajo presenta una metodología interdisciplinaria completa para el seguimiento de animales en entornos de vegetación densa vía telemetría, tomando como un caso aplicado el del marsupial nocturno vulnerable *Dromiciops gliroides* en el bosque andino-patagónico. Como parte de la mencionada metodología se desarrolló un protocolo para el procesamiento y análisis de las señales de radio crudas empleando información extraída en un algoritmo de localización desarrollado ad-hoc, que se ajusta a la configuración de la captura de señal, para la localización del animal en el tiempo. La sección del método que requiere un tratamiento computacional se automatizó en un programa escrito en Python 3.

Palabras clave

Monitoreo animal — Radio telemetría para vida silvestre — Procesamiento de señales — Análisis de señales — Algoritmo de localización — Ecología de la conservación — *Dromiciops gliroides* — Bosque andino-patagónico — Python 3

Introducción

El presente trabajo está enmarcado en un proyecto interdisciplinario ya existente, en el que participan biólogos, ingenieros en telecomunicaciones y físicos, cuyo objetivo principal es el desarrollo de un sistema de monitoreo de pequeños animales en el bosque mediante radio telemetría.

Dicho proyecto puntualmente trata el caso del “monito del monte” (*Dromiciops gliroides*), un pequeño marsupial que habita en parte de una reserva del bosque andino-patagónico. La metodología novedosa que viene desarrollando dicho grupo de investigación pretende lograr trayectorias de superior resolución espacio-temporal, además de poder adaptarse a una configuración terrena arbitraria y funcionar incluso en presencia de obstáculos físicos, como una alta densidad de vegetación. Adicionalmente al potencial genérico de la metodología propuesta, de poder adaptarse al estudio de virtualmente cualquier especie animal en su hábitat, el estudio del caso particular confiere a la presente propuesta una faceta de conservación de los bosques templados de la Patagonia.

Radio-telemetría

La radio-telemetría consiste en la transmisión de información a través de ondas electromagnéticas planas de longitudes de onda entre 1 mm y 10000 km (frecuencias de 300GHz y 30 Hz, respectivamente). La radio-telemetría aplicada a la vida silvestre involucra un transmisor vinculado a un animal silvestre en vida libre que emite pulsos de características conocidas a un receptor adecuado (ej.: antena de radio con polarización lineal, con frecuencia y ganancia ajustadas). Esta técnica de seguimiento animal permite obtener información sobre el movimiento de especies de animales silvestres que son difíciles de observar y/o seguir en su hábitat natural y para los que la habitualmente utilizada tecnología satelital ofrece serias limitaciones [1].

Un pulso transmitido lleva consigo información de forma, duración, intensidad, frecuencia y fase. Características como la forma, la duración y la frecuencia permiten identificar al pulso y diferenciarlo de otros pulsos, el ruido base y otras interferencias (ej.: mediante filtrado por frecuencias). Por otro lado, asumiendo que la onda pierde energía al atravesar un medio material, la intensidad de un pulso es indicativo de la distancia entre el emisor y el receptor; para tal determinación bastaría una calibración con al menos dos distancias conocidas [2]. La diferencia de fase detectada cuando una misma onda alcanza a dos receptores distintos aporta información del ángulo de arribo de dicha señal, respecto a la dirección normal a la recta que une los receptores (ver figura 1).

Con las calibraciones pertinentes, la información completa de un pulso detectado por un par de receptores permitiría, en principio, determinar la recta que une al transmisor con el punto medio del par de receptores (dirección) y determinar la distancia entre éstos. Conociendo la ubicación georeferenciada (vía GPS) de una estación de receptores, es posible entonces ubicar geográficamente al transmisor. Si se desea lograr una trayectoria para el transmisor de interés, dicha información espacial puede actualizarse realizando el mismo análisis descrito para pulsos a distintos tiempos.

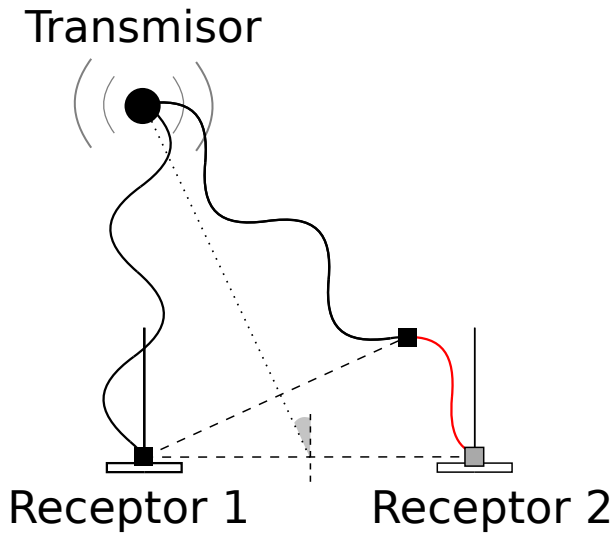


Figura 1 - Diagrama general de un transmisor que emite una onda que llega a dos receptores distintos; la misma emisión electromagnética es detectada por los receptores con una diferencia de fase que es proporcional a la diferencia de camino (en rojo), información que permite determinar el ángulo de arribo de la señal respecto de la dirección normal a la recta que une los receptores.

Esta tecnología se prefiere frente a la localización por sistemas de posicionamiento global (GPS), debido a que la segunda posee un alto error en la determinación espacial (del orden de los 10 m), que además depende de qué tan despejado u obstruido está el sector monitoreado. La radio-telemetría es adecuada para funcionar en entornos con presencia de múltiples obstáculos físicos, dado que trabaja con radiación de frecuencias relativamente bajas, las cuales tendrían una baja atenuación en el bosque.

Animal a monitorear

El monitoreo por telemetría está dirigido al marsupial arbóreo nocturno *Dromiciops gliroides*, un pequeño animal endémico de la porción norte del bosque templado de la Patagonia, con un peso promedio de aproximadamente 30 g. Se trata de una especie con un papel ecológico clave en un bioma con una fauna empobrecida [3,4]. Es considerado un “arquitecto ecológico” porque actúa como dispersor de las semillas de 16 especies de plantas, de las cuales consume sus frutos. Dicho consumo facilita la germinación de las semillas, luego del paso por el tracto digestivo. El desplazamiento del animal por la vegetación asegura la distribución espacial de las mismas [5]. Actualmente en Argentina es reconocido como un marsupial vulnerable [6]. Las características del animal imponen limitaciones a la metodología a implementar, tales como el peso máximo de los dispositivos transmisores a ser equipados o los momentos adecuados para realizar mediciones de su movimiento, dado que sólo se desplazan durante las noches con escasa luz lunar.

No existe, previo a este trabajo, un sistema de monitoreo capaz de determinar con suficiente precisión la posición del marsupial en el tiempo (una trayectoria geolocalizada), debido a un alto grado de error en la determinación. Ésto fuerza la limitación de los intentos previos a estudios del área habitada (*home-range*), tratándose de un análisis estático en lugar de uno dinámico [7-12].

Objetivos

El objetivo general es contribuir al mejoramiento del sistema de monitoreo de vida silvestre vía radio-telemetría, que ya se viene desarrollando en el proyecto interdisciplinario mencionado anteriormente.

A raíz del objetivo principal, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- I) Diseñar e implementar un protocolo para el procesamiento y análisis de las señales de radio crudas provenientes de la captura de receptores, para el reconocimiento y lectura de los pulsos del transmisor.
- II) Desarrollar y emplear un algoritmo para la localización del transmisor en el espacio y en el tiempo (modelo de movimiento), a partir de la información extraída desde los pulsos del transmisor.

Materiales y métodos

Equipamiento de medición

La configuración experimental consiste en un arreglo espacial de estaciones receptoras que se ubican en puntos extremos del terreno a monitorear, que se encuentran georeferenciados por un agrimensur.

Dichas estaciones están conformadas por dos antenas omnidireccionales con polarización lineal, configuradas para captar óptimamente en un intervalo reducido de radiofrecuencia alrededor de 150 MHz. Las antenas se encuentran aseguradas sobre una base soporte, que mantiene una separación fija de 1 m. A su vez, éstas se encuentran conectadas a un par de receptores RTL-SDR (*'dongles'*), que están modificados para compartir el reloj de uno de ellos, denominado *master*. Ver figura 2.

Los receptores se comunican con una computadora portátil que corre un *script* en Matlab, el cual se comunica con los drivers de tales receptores para la captura de señales. La información recolectada en una captura se guarda en un archivo binario comprimido *.mat* (extensión para estructuras de datos interpretables por Matlab), que almacena una matriz con la señal para cada antena del par, como información compleja, para la cantidad de puntos tomados durante la captura.

En las sesiones experimentales que se tratan en el presente trabajo, por cada medición realizada se efectuaron dos capturas de 60 segundos cada una, empleando para ellas una frecuencia de

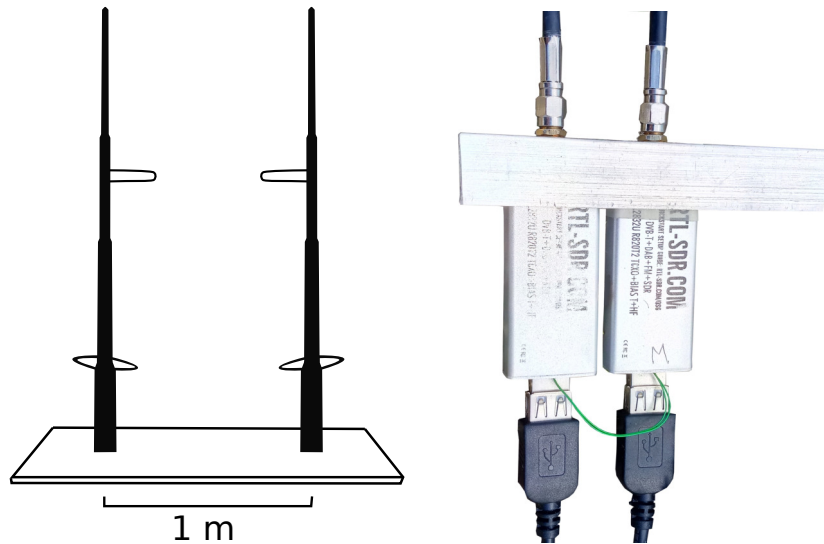


Figura 2 - Estación receptora. *Izquierda*: esquema de un par de antenas omnidireccionales con polarización lineal, aseguradas a una base con separación de 1 m entre sí. *Derecha*: foto de un par de receptores RTL-SDR (*'dongles'*) modificados para que compartan un reloj interno.

muestreo de 300 mil puntos por segundo. La ganancia debió ser adaptada entre cada par de antenas y los dispositivos transmisores activos, procurando detectar señales alejadas sin que las fuentes cercanas hagan saturar a los receptores.

Los especímenes a monitorear llevan adheridos al cuerpo un transmisor de peso inferior al 5% de su peso. El dispositivo transmisor cuenta con una batería que le confiere una autonomía de hasta dos meses. Vale mencionar que el agotamiento paulatino de la batería conlleva una disminución de la potencia en el tiempo, que es independiente de la distancia entre emisor y receptor. Este problema podría solucionarse si las calibraciones se realizan con más frecuencia y/o se caracteriza el decaimiento de la batería en el tiempo, para luego realizar las correcciones pertinentes sobre la curva de calibración inicial.

Las mediciones efectuadas involucraron transmisores Telenax TXA-004G y ATS A2426, que transmiten en radiofrecuencia a 149,5 MHz; éstos emiten pulsos de aproximadamente 15 ms cada 2 segundos.

Al sistema de monitoreo se introdujo una señal adicional con el fin de servir en la sincronización de señales y en correcciones de calibración de la diferencia de fase durante el post-procesamiento. La señal adicional corresponde a un oscilador con atenuador, que emite pulsos en la misma frecuencia que el transmisor pero con una duración al menos 10 veces mayor y una separación temporal entre pulsos de 30 segundos. Estas características permiten detectar y aislar los pulsos del oscilador junto a los del transmisor y al mismo tiempo diferenciarlos entre sí.

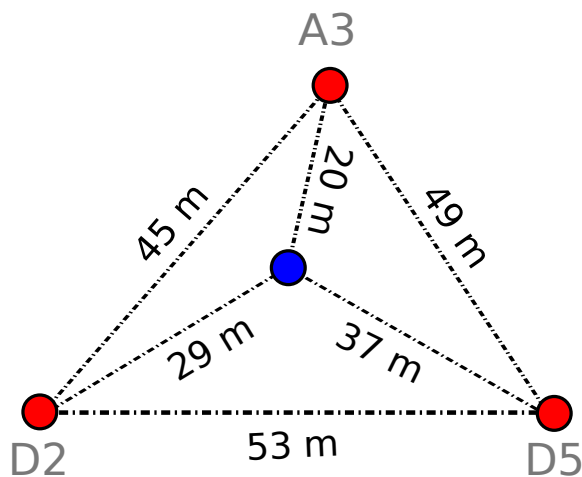


Figura 3 - Grilla del terreno empleado para las pruebas preliminares (campo de manzanos); sobre los puntos en rojo, se encuentran las estaciones receptoras sobre puntos georeferenciados; el punto azul corresponde a la ubicación del oscilador.

Pruebas preliminares

Se realizaron pruebas preliminares para verificar la operatividad de los dispositivos de medición y lograr una puesta a punto del protocolo de medición. Éstas se llevaron a cabo en un predio abierto del Instituto Balseiro (IB), en el Centro Atómico Bariloche (CAB), el cual cuenta con una grilla aproximadamente cuadrículada con puntos marcados por manzanos y una escasa vegetación adicional. Las estaciones receptoras se ubicaron en disposición triangular como muestra la figura 3. Los puntos de la grilla no se corresponden en distancias con los de la configuración experimental final (hábitat a monitorear), ni se encuentran georeferenciados; sin embargo, se midieron las distancias entre las estaciones receptoras y los dispositivos emisores en pos de emplear las señales capturadas en el futuro diseño de un algoritmo de localización que considere potencias y diferencias de fase.

Calibraciones en el sitio de estudio

Una vez completadas las pruebas preliminares, se procedió con la realización de las calibraciones finales en el hábitat del animal a monitorear. Dichas mediciones ocurrieron en el Parque Municipal Llao Llao, una reserva ecológica de acceso restringido ubicada a más de 25 km del centro de la ciudad, hacia el noroeste. El predio a monitorear se encuentra previamente caracterizado por biólogos y cuenta con puntos georeferenciados por un agrimensor, indicados por estacas etiquetadas, que se disponen en una grilla cuadrículada como muestra la figura 4.

Vale indicar que la porción de bosque a monitorear es considerablemente inhomogénea y dinámica (vientos fuertes provocan la caída de árboles de importante tamaño, alterando radicalmente su entorno tras el evento), por lo que las calibraciones efectuadas en el lugar poseen una utilidad limitada en el tiempo.

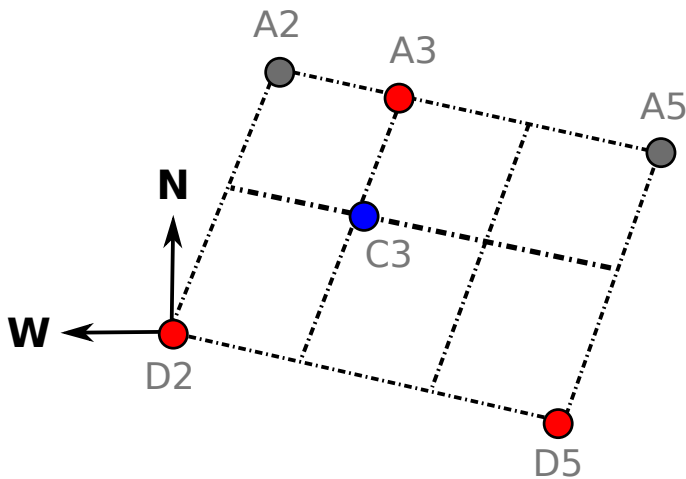


Figura 4 - Grilla del terreno monitoreado (bosque); sobre los puntos en rojo, se encuentran las estaciones receptoras sobre puntos georeferenciados; el punto azul corresponde a la ubicación del oscilador.

Programa desarrollado

I) Protocolo de procesamiento de señales

Para el procesamiento de las señales de radio crudas, se escribió un software enteramente en Python 3, comentado en inglés, que se organiza en 8 archivos interdependientes. Para el desarrollo inicial y la depuración de errores se emplearon Jupyter Notebooks. El código completo se encuentra disponible en el anexo del trabajo.

El *script* principal es “monitotracker.py”, el cual itera sobre los archivos .mat (estructuras de datos de Matlab) o .wav (archivo de señal de audio) que fueron generados durante las calibraciones o mediciones de seguimiento del animal (*tracking*). Para cada uno de estos archivos, se corre el protocolo de procesamiento que se resume en el archivo “getpulses.py”, donde cada uno de sus pasos realiza una acción puntual, debidamente comentada, mediante el uso de funciones de librerías o módulos más complejos escritos *ad hoc*.

El protocolo de procesamiento de señales implementado se detalla a continuación:

■ 1) Carga de librerías y módulos

La librería central para el programa es NumPy, por conferir las herramientas básicas para el manejo de información matricial compleja, métodos para realizar transformaciones de Fourier, etc. La librería SciPy sirve para la carga de archivos los .mat hacia estructuras de NumPy. Por último, la librería Matplotlib permite la generación de gráficos 2D de la señal cruda y procesada.

Por otro lado, los módulos importados son 3 (“recpulses.py”, “foufilt.py” y “sahfuncs.py”), los cuales reúnen un total de 7 funciones construidas para los pasos del presente protocolo (“recpulses”, “foufilt”, “synchronize”, “getpower”, “getphase”, “pairpulses” y “savepulses”).

- 2) **Carga de información del experimento**

En esta sección se introducen manualmente características de la medición: tiempo de captura, frecuencia de muestreo, límite inferior estimada para la frecuencia de escucha de las antenas, frecuencia del dispositivo emisor y duración estimada de los pulsos a reconocer.

- 3) **Carga de señales crudas**

Este paso traslada la información del archivo .mat a una *array* NumPy de $M \times N$, donde M es el número de antenas en la estación y N es la cantidad de puntos tomados en el tiempo de captura (equivale a frecuencia de muestreo por la cantidad de segundos muestreados). Cada uno de los puntos es una cantidad compleja, del cual puede extraerse módulo y fase. Adicionalmente se guarda una imagen .png via Matplotlib del valor absoluto de la señal sin procesar, en el tiempo (ver ejemplo de la figura 5).

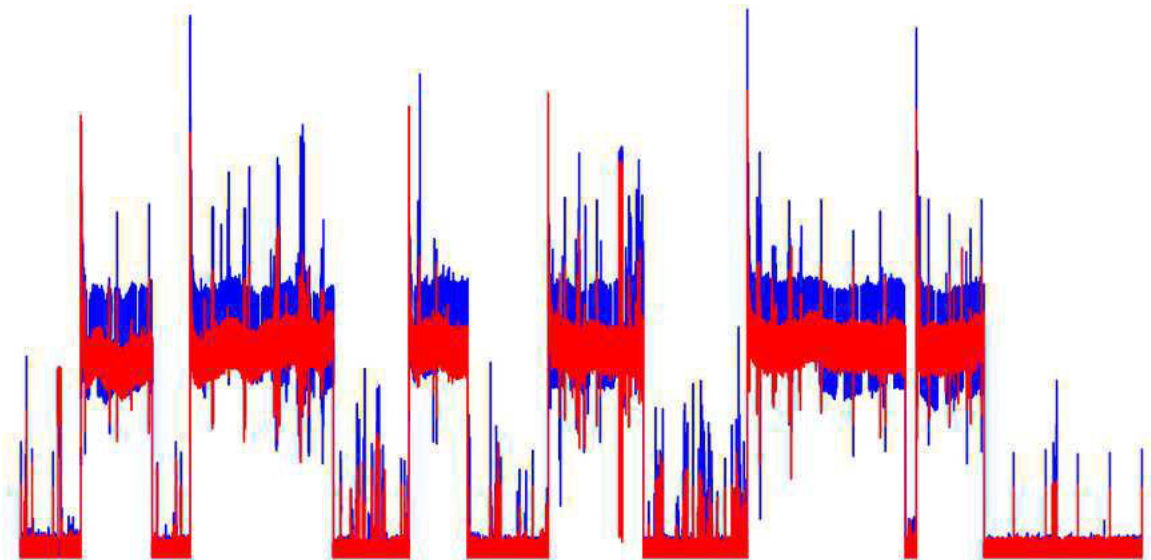


Figura 5 - Valor absoluto de una señal sin procesar para una captura de 60 segundos (la señal correspondiente a cada antena del par receptor se diferencia por color). Se observa la presencia de gran cantidad de ruido de base; algunos sectores están montados a señales interferentes de gran intensidad.

- 4) **Filtrado de Fourier (por frecuencias)**

El filtrado de la señal es una etapa crucial del protocolo, que involucra la selección automática de un pico en el dominio de la frecuencia que corresponde a los pulsos de los dispositivos de transmisión de interés. Dicho pico es aislado con una ventana polinómica suave (mediante uso del módulo “*sswindow.py*”) previo a realizar el paso inverso de la transformación.

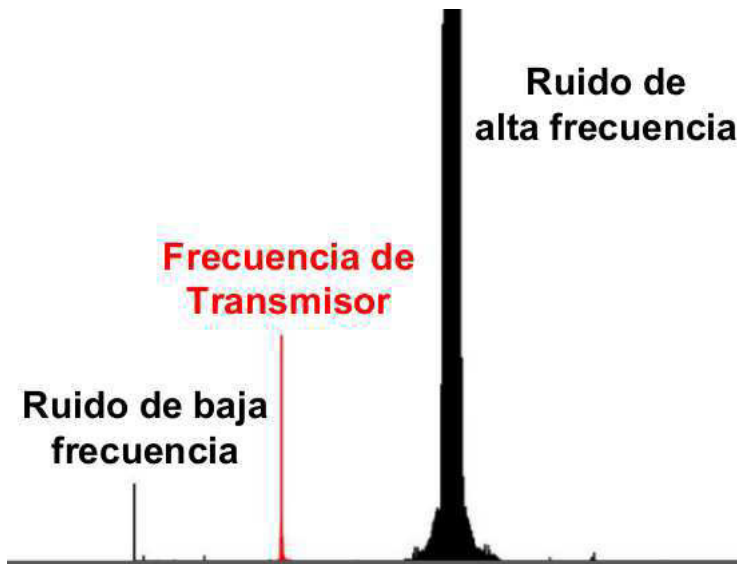


Figura 6 - Porción del dominio de las frecuencias para la señal del ejemplo de la figura 5. *En negro*: picos de baja y alta frecuencia que corresponden a interferencias y ruido de base; *en rojo*: pico que corresponde a la frecuencia de interés (a la que emiten los dispositivos emisores).

El uso de una ventana polinómica, para recortar una sección del espectro de las frecuencias, evita la introducción de frecuencias espurias sobre la señal al regresar al dominio temporal. Los criterios de la selección automática se basan en asumir que las frecuencias que se mezclan en la señal temporal se encuentran agrupadas, pudiendo diferenciar el pico de la señal de interés de aquellos que corresponden al ruido de baja o alta frecuencia, en función de su proximidad al valor de frecuencia de interés (ver figura 6).

Por la gran extensión de los archivos a procesar, en pos de no extender demasiado los tiempos de post-procesamiento, se decidió emplear un *zero-padding* (extensión con ceros del *array* a transformar para mejorar la resolución en el dominio de la frecuencia) muy reducido (un valor de 1.1, que corresponde a trabajar con un *array* con el 110% de los puntos de la señal original). Como resultado de este paso, deberían eliminarse las interferencias de alta frecuencia y la mayoría del ruido de base, sin alterar la intensidad de los pulsos en cuestión (ver figura 7).

■ 5) Reconocimiento de pulsos

Una forma de identificar cada uno de los pulsos es mediante la binarización de la señal. El algoritmo asociado distingue aquellos valores de la señal que superan un valor crítico, que se define automáticamente desde histogramas de la señal, donde se asume que los valores de los pulsos y del ruido están agrupados y se diferencian entre sí. Los valores que superaron el valor crítico se ajustan a una función ventana no diferenciable, tras asumir que los pulsos poseen una separación entre sí que es superior a la resolución de medición. Dicha función ventana luego se convierte a una versión polinómica y diferenciable. En el proceso de binarización se lee la primera información sobre los pulsos: la cantidad total, cada tiempo de inicio y cada longitud temporal.

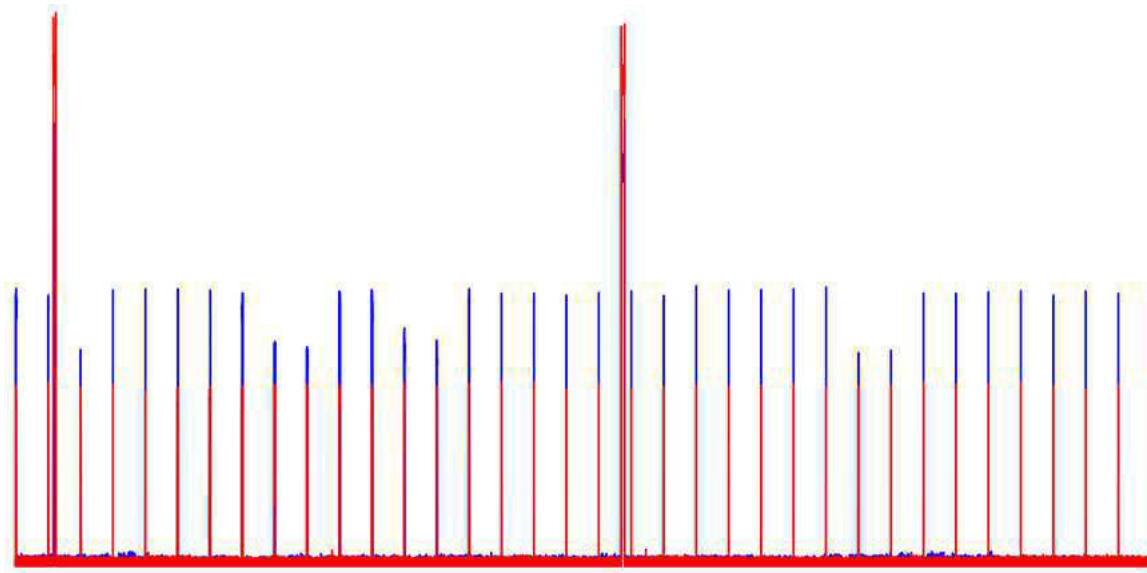


Figura 7 - Valor absoluto de una señal filtrada para una captura de 60 segundos (la señal correspondiente a cada antena del par receptor se diferencia por color). Los pulsos observados sólo corresponden a las frecuencias seleccionadas (en rojo) en la figura 6.

- **6) Sincronización de los pulsos**

Por motivos que tienen relación directa con la electrónica de los dispositivos empleados para la recepción de señales, una misma señal alcanza a ambas antenas con cierto corrimiento temporal (independiente de la diferencia de fase, la cual depende de la diferencia de camino) que debe ser corregido. Para corregir dicho desplazamiento temporal se emplea como referencia el primer pulso de oscilador detectado; en caso de no detectar pulsos de oscilador en ambas antenas, se procede a usar como referencia el primer pulso del transmisor. La figura 8 muestra un ejemplo para la sincronización de un pulso de oscilador detectado por las dos antenas de una misma estación receptora.

- **7) Actualización de pulsos**

Tras haber sincronizado las señales capturadas por el par de antenas de la estación receptora, es necesario actualizar la información temporal de los pulsos y por ende reconstruir las funciones ventana.

- **8) Emparejamiento de pulsos por tiempo de inicio**

Si bien se asume que el primer pulso de oscilador (transmisor en su defecto) detectado en cada señal corresponde al mismo pulso de dispositivo emisor, ésto no es necesariamente cierto para los pulsos siguientes. Éstos pueden no ser detectados por distintos motivos y por consiguiente no ser reconocidos en el paso previo. Dado que se conoce el tiempo inicial de cada pulso, es posible emparejar los pulsos según el tiempo en el que fueron

detectados. De esta forma, es posible construir una grilla temporal donde los pulsos están debidamente emparejados y aquellos ausentes identificados.

■ 9) Limpieza de los pulsos

Si bien la mayoría del ruido de base se elimina tras el filtrado por frecuencias, existe una cantidad remanente en la señal entre pulsos. Este paso empleó la función ventana diferenciable generada en el paso 7 para aislar los pulsos de la señal y eliminar dicho ruido residual. Tras haber completado la limpieza de la señal se procede a guardar una imagen .png (vía Matplotlib) de su valor absoluto en el tiempo (ver figura 9).

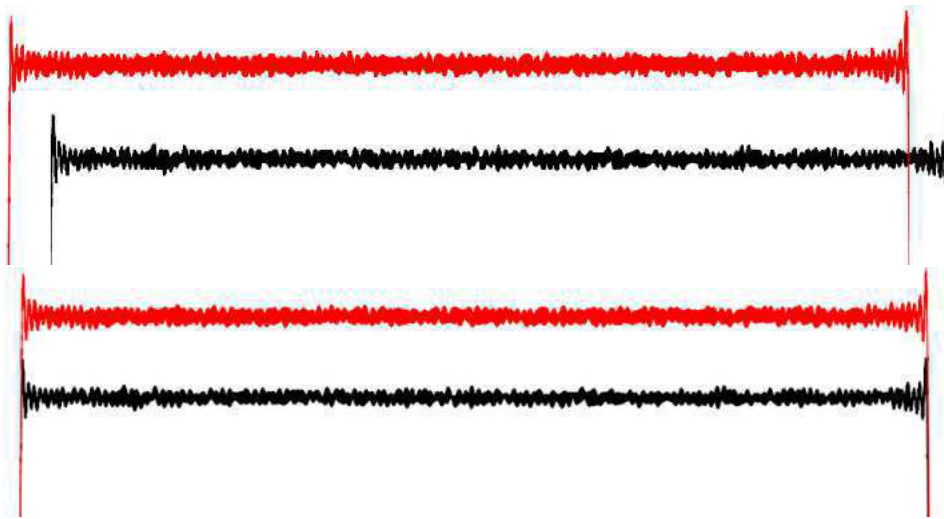


Figura 8 - Valor absoluto para un pulso de oscilador extraído desde una señal filtrada (la señal correspondiente a cada antena del par receptor se diferencia por color). *Arriba:* pulsos con desfasaje temporal. *Izquierda:* pulsos con desfasaje temporal. *Abajo:* pulsos sincronizados.

■ 10) Lectura de potencia y fase

Contando con pulsos limpios correctamente identificados, se procedió a leer la potencia promedio y la potencia máxima de cada pulso, según cómo fue detectado por cada antena del par receptor. La diferencia de fase fue calculada por dos vías distintas: desde el dominio temporal y desde el dominio de la frecuencia. La estrategia temporal consiste en calcular la fase de lo que resulta de multiplicar la señal compleja S_2 , detectada por una antena, por el conjugado de la señal detectada por su compañera S_1^* :

$$S_1(t) = e^{i\omega t} \quad , \quad S_2(t) = e^{i\omega t + \phi}$$

$$S_1^*(t) \cdot S_2(t) = e^{-i\omega t} \cdot e^{i\omega t + \phi} = e^{\phi}$$

El promedio temporal de dicho valor corresponde a la diferencia de fase entre éstas señales. La estrategia en frecuencias consiste en realizar la transformada de Fourier del pulso y calcular la fase del valor complejo que corresponde al máximo de la frecuencia (que, tras un filtrado efectivo por frecuencias, sólo corresponde a la del pulso transmisor).

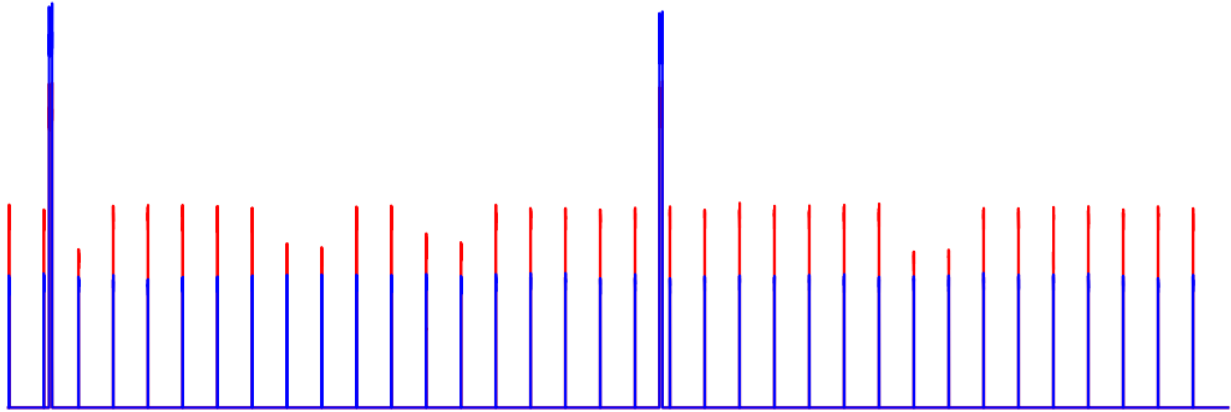


Figura 9 - Valor absoluto de una señal filtrada para una captura de 60 segundos, luego de haber aplicado una ventana polinómica ajustada a los pulsos sincronizados (la señal correspondiente a cada antena del par receptor se diferencia por color).

▪ 11) **Generación de una tabla de valores**

La operación final del protocolo de procesamiento de señales consiste en escribir una tabla que indique la cantidad de pulsos detectados y los valores extraídos desde cada uno de ellos, indicando cuáles corresponden a un transmisor o a un oscilador. La información que se escribe es el tiempo de inicio promedio del pulso, la potencia media y máxima detectada por cada antena, y la diferencia de fase entre señales calculada por las dos vías arriba desarrolladas.

II) Algoritmo de localización espacio-temporal

Una vez finalizadas las mediciones que corresponden a la calibración del ángulo de arribo (según diferencia de fase) y de la distancia (según intensidad del pulso), es posible convertir la información de los pulsos a un puntos tentativos del espacio a cada tiempo.

Dada la simetría del par de antenas en cada estación (especificidad según el plano que contiene a ambas antenas), existe cierta ambigüedad en la determinación del ángulo de arribo. Por lo tanto, para la localización efectiva de un punto en el espacio es necesario tener más de una estación receptora, ubicada convenientemente en algún arreglo geométrico conocido (ej. figuras 3 y 4).

Sólo empleando la información de la diferencia de fase es posible estimar un punto del espacio por triangulación (intersección de rectas de arriba); mientras que si se emplea únicamente la información de potencia de la señal, es posible determinar dicho punto por trilateración (intersección de círculos alrededor de cada antena, de radio que responda a la distancia calculada); ver figura 10. La combinación de ambas estrategias con peso dinámico permitiría determinar puntos en el espacio de una manera más robusta.

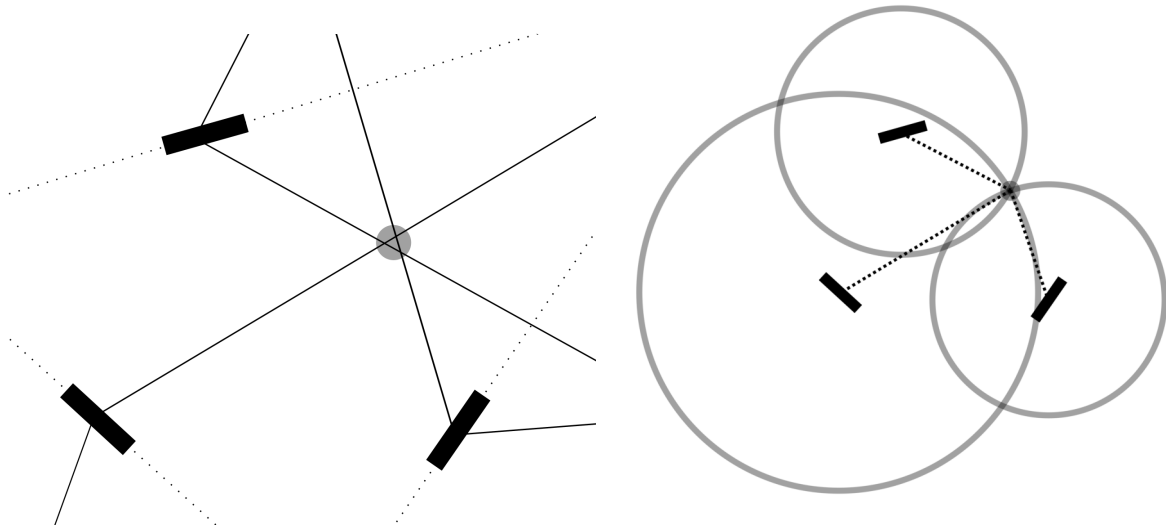


Figura 10 - Estrategias para localización de un punto en el espacio a partir de la diferencia de fase (*izquierda*, triangulación) y de la potencia de la señal (*derecha*, trilateración).

Conociendo la ubicación geográfica de cada estación de antenas, los pulsos pueden convertirse a puntos geolocalizados para cada tiempo, lo que permitiría la construcción de una trayectoria para el animal monitoreado. Sin embargo, considerando la complejidad y el dinamismo del hábitat a monitorear, y dadas las limitaciones tecnológicas de los elementos emisores y receptores, se espera obtener pulsos que otorguen información errónea, incompleta o ausente para algunos tiempos. Por esta razón, para poder construir una trayectoria a partir de un conjunto de datos que potencialmente posea dichos puntos problema, asilados o consecutivos, se ideó un modelo de movimiento.

El algoritmo diseñado ajusta los puntos geolocalizados (a cada tiempo) a una trayectoria que es factible para el animal monitoreado. Para ello contempla las limitaciones físicas en el desplazamiento del animal, imponiendo valores máximos para la distancia de desplazamiento y ángulo de giro. Dichos valores límite provienen de estudios observacionales para el animal a monitorear, realizados por biólogos. Para el caso del “monito del monte”, se encuentra reportado que la distancia media de desplazamiento es de $1,07 \pm 0,92 m$, con un máximo de $12,01 m$, y que los ángulos de giro son en general pequeños (agrupados alrededor de 0°) [13].

Si bien para el presente caso de estudio se encuentra reportada información sobre los ángulos de giro en el desplazamiento del animal, en caso de ausencia de información dicho valor máximo permitido puede ser definido en función de la velocidad de desplazamiento (definida entre los dos puntos consecutivos previos). Los valores se tomarían desde una interpolación lineal que corresponde a una relación inversamente proporcional entre ángulo máximo de giro y velocidad de desplazamiento; la cota superior correspondería a 180° para el animal quieto y la cota inferior a 0° cuando el animal se haya desplazado la máxima distancia en el paso previo. La misma estrategia podría emplearse para casos donde se cuente con histogramas de los ángulos de giro del animal, tomando las mismas cotas de ángulo pero reemplazando la interpolación lineal por una función Gaussiana que se ajuste a las observaciones realizadas.

Dado que el algoritmo es capaz de tratar con incertidumbre local, el modelo de movimiento propuesto es lo suficientemente robusto como para adaptarse a faltantes de información o puntos determinados con craso error, se encuentren éstos aislados o consecutivos. Si bien el parecido de la trayectoria ajustada con la trayectoria exacta depende de la calidad de las mediciones realizadas, el presente modelo intenta extraer una trayectoria físicamente posible que mejor represente a los datos disponibles.

La figura 11 resume las reglas del modelo de movimiento y la figura 12 muestra esquemáticamente tres casos ficticios en los que, aplicando el modelo desarrollado, se intentan ajustar trayectorias factibles a conjuntos hipotéticos de puntos geolocalizados.

MODELO DE MOVIMIENTO PROPUESTO

- 1)** El primer punto es siempre **aceptado** (sitio de liberación conocido).
- 2)** Puntos ausentes o que involucren una distancia o ángulo superior a los **valores límite*** para el paso temporal, serán **rechazados**.
(*: valores determinados observacionalmente por biólogos)
- 3)** Un punto **rechazado** (i) genera una **incertidumbre local** en la trayectoria, alrededor del punto previo (i-1); el siguiente punto (i+1) se **acepta** o **rechaza** tomando como reemplazo del rechazado al **punto más próximo** sobre la **circunferencia de incertidumbre local**.
- 4)** Si dos o más puntos consecutivos son **rechazados** (i, i+1, i+2, ...), la **incertidumbre local** del punto previo (i-1) crece en radio linealmente.

Figura 11 - Modelo de movimiento propuesto. El código de colores empleado se corresponde con el de la figura 12.

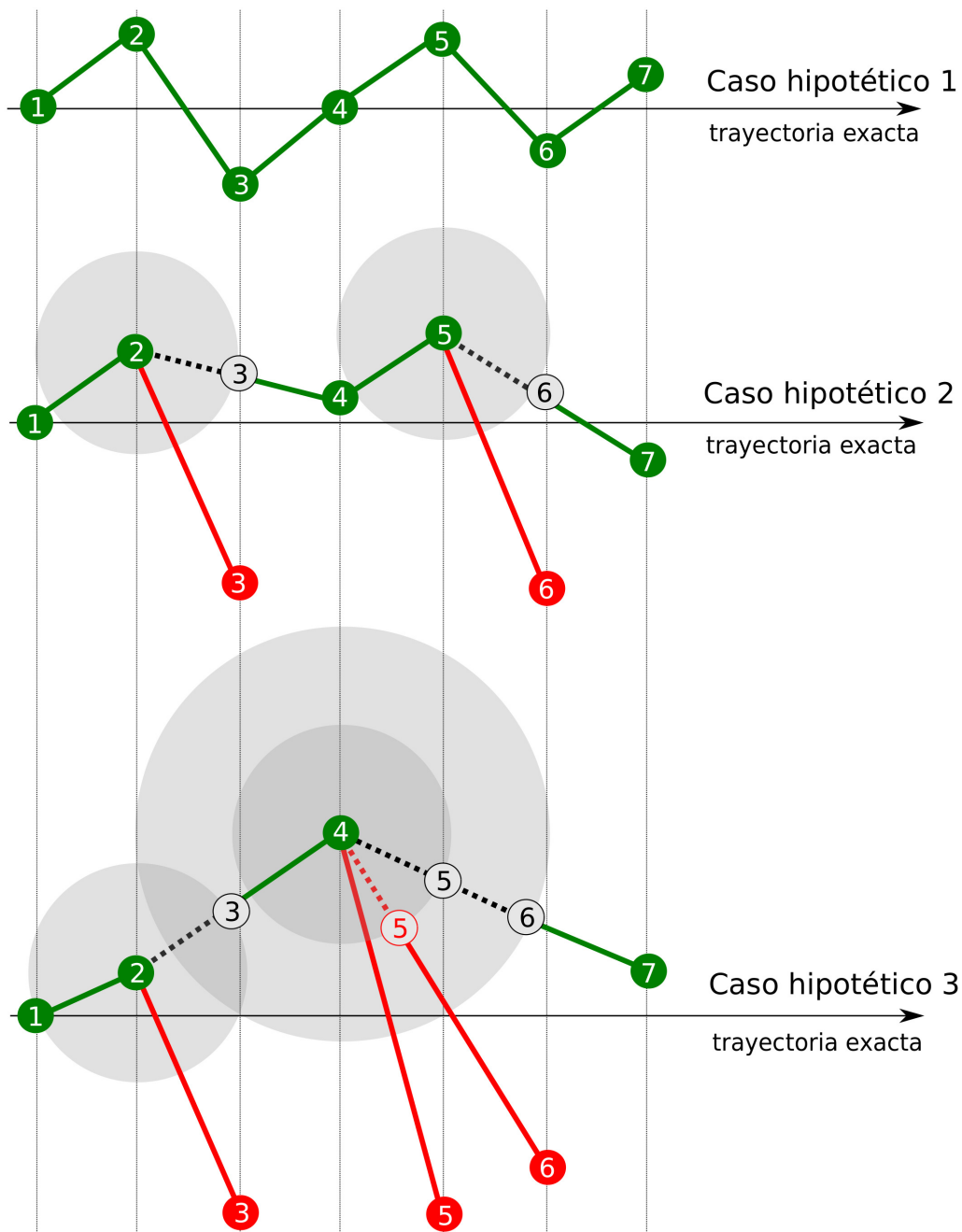


Figura 12 - Esquema de casos de ajuste de trayectorias factibles a conjuntos hipotéticos de puntos geolocalizados. La trayectoria exacta corresponde al animal desplazándose hacia la derecha a velocidad constante. Por simplicidad, el error de la determinación sólo existe en la dimensión perpendicular al desplazamiento. Los puntos con números en color blanco corresponden a aquellos que provienen de medidas experimentales y el uso de calibraciones; el código de colores se corresponde con el de la figura 11. *Caso hipotético 1*: ausencia de puntos con craso error. *Caso hipotético 2*: presencia de puntos aislados con craso error. *Caso hipotético 3*: presencia de puntos consecutivos con craso error.

Discusión

Una mejora apreciable del nuevo protocolo de análisis de señales, frente al anterior, es en el tiempo de procesamiento por archivo. Dado que cada paso fue desarrollado e implementado con especial consideración la eficiencia del algoritmo, el procesado total requiere pocos segundos en lugar de varios minutos.

Adicionalmente a la reducción de tiempos, se logró una mejora sustancial de la calidad de la señal procesada. El filtrado por Frecuencias es capaz de eliminar las interferencias mayores y la mayoría del ruido de base, sin alterar la intensidad de los pulsos de interés. Anteriormente, filtros digitales de la señal (Nyquist de orden 45) generaban una disminución global de la intensidad de los pulsos en función de la relación señal/ruido para la captura analizada. Dado que la cantidad de ruido (e interferencias) que se introducía en las capturas no era constante ni homogénea, la aplicación de dicho filtro digital introducía un error sistemático variable en las calibraciones para la distancia (según la potencia del pulso).

Aunque el protocolo sea lo suficientemente robusto, existen muy pocos casos donde el ruido asociado a la señal está poco agrupado en frecuencias (uno de los supuestos iniciales para el filtrado de Fourier automático), por lo cual el algoritmo de filtrado falla en aislar únicamente la porción de frecuencias que corresponde a la señal de interés; un error en este paso vuelve inútiles los pasos siguientes del protocolo.

Un inconveniente que aún no es posible resolver es la superposición de pulsos de transmisor con pulsos de oscilador, lo cual ocasiona la pérdida de información de ambos pulsos para un tiempo dado. A pesar de la eventual ocurrencia de pérdida de información durante la captura, el modelo de movimiento desarrollado está diseñado para tratar con puntos faltantes en la grilla temporal, los cuales pueden corresponder a casos donde la antena no logra detectar el pulso por encima del ruido o cuando el protocolo de procesamiento falla en filtrar, reconocer y/o aislar los pulsos.

La lectura del máximo de potencia de pulso parecería ser más robusta que la lectura de su potencia media. Esto quizás se deba a que la primera lectura ignora fluctuaciones de potencia a lo largo del pulso. No es posible asegurar qué lectura es la más representativa de la potencia del pulso, dado que eventuales aumentos irregulares de la potencia durante el pulso hacen a la primera lectura poco fiable.

En cuanto a las dos estrategias para el cálculo de la diferencia de fase, parecería ser que la estrategia temporal es mucho más robusta para los pulsos del transmisor, mientras que la estrategia que emplea la fase de la máxima frecuencia sería más adecuada para los pulsos del

oscilador (si bien no se observa una mejora significativa en todos los casos). Esto último puede explicarse considerando que la longitud temporal del pulso del oscilador es considerablemente mayor, lo que deriva en información más exacta en el dominio de la frecuencia. La duración del pulso de transmisor es muy inferior, por lo que la diferencia de fase calculada por la estrategia por frecuencias posee fluctuaciones muy altas (incluso tomando el valor absoluto); sin embargo, parecería que los pulsos del transmisor están mejor filtrados (oscilaciones cortas con poco ruido montado), volviendo la estrategia temporal más adecuada. En general, para cualquier pulso, se observaron menos fluctuaciones en la diferencia de fase calculada por la estrategia temporal.

Durante las mediciones en el hábitat a monitorear, se encontraron múltiples dificultades experimentales en lograr calibraciones fiables. Por la gran densidad de vegetación en el predio, no es sencillo acomodar visualmente las estaciones receptoras para que la recta normal al par de antenas pase por el punto donde se ubica el oscilador. Otro problema experimental es la existencia de una diferencia de fase intrínseca a la electrónica de los receptores, el cual debe corregirse mediante corrección determinada vía mediciones en ausencia teórica de diferencia de fase (ángulo de 0° respecto a la recta normal al par de antenas). Con el fin de eliminar estos inconvenientes, se propone explorar a futuro una variación del presente método que le confiera un rol más central a la información de los pulsos del oscilador.

Se cree que la información de los pulsos del oscilador poseen un gran potencial para contribuir al mejoramiento del sistema de monitoreo, fundamentalmente porque durante una medición de seguimiento animal el oscilador se encuentra siempre en una posición fija y conocida, emitiendo con una potencia definida y modulable que no decae durante la sesión (dada la posibilidad de recargar su batería antes de cada medición, a diferencia de los transmisores que se encuentran vinculados al animal silvestre en vida libre).

La primera mejora sería emplear la intensidad del pulso del oscilador para ajustar en una constante las curvas de calibración de potencia de los pulsos del transmisor. Reconociendo que cambios en las condiciones ambientales poseen un impacto en la potencia de las señales recibidas (ej.: humedad ambiente), si se asume que dichos cambios son homogéneos en el espacio, convertir la intensidad de los pulsos del transmisor a cantidades relativas a los pulsos del oscilador sería una forma de independizarse de tales cuestiones ambientales, prolongando la vida útil de la calibración inicial. Esta mejora no elimina la necesidad de realizar sucesivas calibraciones, debido a que no logra tener en consideración cambios locales en el hábitat monitoreado (ej.: cambios bruscos en la vegetación). La segunda mejora consiste en redefinir el sistema de referencia de las mediciones en función de la posición conocida del oscilador. Esta alternativa impide cuantificar el error sistemático inicial en la diferencia de fase, aunque permitiría corregirlo sin conocerlo, ahorrando pasos en el proceso de calibración inicial.

Prospectivas

Si bien la implementación del primer objetivo ya es completa y funcional, aún resta ampliar el programa para considerar información de calibración e información sobre la distribución espacial (geométrica) de las estaciones receptoras, para la determinación de puntos geográficos en función del tiempo, que corresponderían al animal monitoreado en su hábitat.

También es de interés explorar la factibilidad de emplear la información de los pulsos del oscilador, con ubicación fija y potencia estable, para trabajar con señales normalizadas en las condiciones ambientales y para la determinación de puntos geolocalizados a partir del uso de un único sistema de referencia, lo cual simplificaría la calibración del sistema de monitoreo.

Una vez determinados los puntos geolocalizados a distintos tiempos, se procederá a la implementación del modelo de movimiento descrito para finalizar el cumplimiento del segundo objetivo general planteado. Con la finalidad de cumplir este segundo objetivo, se acordó con el equipo de trabajo continuar los esfuerzos a la distancia durante el mes de marzo de 2019.

Referencias

- 1 - Hidalgo-Mihart, M.; Olivera-Gómez, L. “Manual de técnicas para el estudio de la Fauna; Capítulo 8: Radio telemetría de vida silvestre”; INECOL & UAQ, p. 165-202. (2011)
- 2 - Javaid, R.; Qureshi, R.; et al. “RSSI based Node Localization using Trilateration in Wireless Sensor Network”; BUJICT Journal 8 (2), p. 58-64. (2015)
- 3 - Rodríguez-Cabal, M.; Aizen, M.; Novaro, A. “Habitat fragmentation disrupts a plant-disperser mutualism in the temperate forest of South America”; Biological Conservation 139, p. 195-202. (2007)
- 4 - Rodríguez-Cabal, M.; Barrios-García, M.; et al. “Node-by-node disassembly of a mutualistic interaction web driven by species introductions”; Proceedings of the National Academy of Sciences 110 (41), p. 16503-16507. (2013)
- 5 - Fontúrbel, F.; Jiménez, J. “Conectando la ecología de una especie con la conservación de ecosistemas: el caso del monito del monte (*Dromiciops gliroides*)”; Revista Chagual 9, p. 61-64. (2011)
- 6 - Ojeda, R.; Chillo, V.; Diaz Isenrath, G. “Libro rojo de mamíferos amenazados de la Argentina”; SAREM. (2000)
- 7 - Fontúrbel, F.; Jiménez, J. “Underestimation of Abundances of the Monito Del Monte (*Dromiciops gliroides*) due to a Sampling Artifact”; Journal of Mammalogy 90 (6), p. 1357-1362. (2009)
- 8 - Salazar, D.; Fontúrbel, F. “Beyond habitat structure: Landscape heterogeneity explains the monito del monte (*Dromiciops gliroides*) occurrence and behavior at habitats dominated by exotic trees”; Integrative Zoology 11 (5), p. 413–421. (2016)
- 9 - Fontúrbel, F.; Silvia-Rodríguez, E.; et al. “Spatial ecology of monito del monte (*Dromiciops gliroides*) in a fragmented landscape of southern Chile”; Journal of Mammalogy 75, p. 1-9. (2010)
- 10 - Magrach, A.; Rodríguez-Pérez, J.; Piazzon, M.; Santamaría, L. “Divergent effects of forest edges on host distribution and seed disperser activity influence mistletoe distribution and recruitment”; Journal of Ecology 103. p. 1475-1486. (2015)
- 11 - Balazote Oliver, A.; Amico, G.; Rivarola, M.; Morales, J. “Population dynamics of *Dromiciops gliroides* (Microbiotheriidae) in an austral temperate forest”; Journal of Mammalogy 98 (4), p. 1179–1184. (2017)
- 12 - di Virgilio, A.; Amico, G.; Morales, J. “Behavioral traits of the arboreal marsupial *Dromiciops gliroides* during *Tristerix corymbosus* fruiting season”; Journal of Mammalogy 95 (6), p. 1189–1198. (2014)
- 13 - Oliver, A. B.; “Efectos del comportamiento de dispersores en la dinámica de la plantas: selección de hábitat y patrones de movimiento del monito del monte (*Dromiciops gliroides*) y sus efectos en la dinámica poblacional de la planta parásita aérea *Tristerix corymbosus*”; Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. (2018)

Anexo - *Scripts de Python 3*

monitotracker.py

```
#####  
## M O N I T O T R A C K E R ##  
#####  
  
print("#####\n## M O N I T O T R A C K E R  
↪ ##\n#####")  
  
### Loads basics  
# 1.1) Loads libraries  
print("Loading libraries...")  
from time import time as t ; Gst = t()  
import os  
  
# 1.2) Imports modules  
print("Importing modules...")  
from getpulses import getpulses  
# getpulses(file_path) ~ no return (saves .dat file)  
  
### Do you want to generate graphs? ###  
# (Useful but heavily loads RAM, doubling processing time)  
# (Hardcoded option)  
graph = True  
#####  
  
### 2) Process raw signals  
print("Processing whole data batch!")  
cwd = os.getcwd()  
for type_fol in os.listdir(cwd):  
    type_path = cwd+"/"+type_fol  
    if os.path.isdir(type_path) and type_fol != "__pycache__":  
        print("Accessing %s..."%type_fol)  
        for ant_fol in os.listdir(type_path):
```

```

ant_path = type_path+"/"+ant_fol
if os.path.isdir(ant_path):
    print("Accessing %s..."%ant_fol)
    for file in os.listdir(ant_path):
        if file.endswith(".mat") or file.endswith(".wav"):
            print("\n*****\nReading
↪ %s...\n*****\n"%file)
            file_path = ant_path+"/"+file
            getpulses(file_path, graph)

```

```

### END MESSAGE

```

```

print("### ALL DONE!!! ###\n")
print("(Total batch time: %s s)\n"%(t()-Gst))
#####
#   Andrés Ignacio Bertoni (andresibertoni@gmail.com) - 2019   #
#   Summer Scholarship 2019 - Balseiro Institute - FiEstIn (CNEA) #
#####

```

getpulses.py

```

#####
## G E T P U L S E S ##
#####

```

```

def getpulses(file_path, graph=False):
    # Get pulses from complex signal data in .mat format
    print("#####\n## G E T P U L S E S
↪ ##\n#####\n")

    ### Loads basics
    # 1.1) Loads libraries
    print("Loading libraries...")
    from time import time as t ; Gst = t(); st = t()
    import gc; gc.collect()
    import numpy as np
    import scipy.io as sio

```

```

from matplotlib import use as pltuse
pltuse("Agg")
import matplotlib.pyplot as plt
import wave

# 1.2) Imports modules
print("Importing modules...")
from recpulses import recpulses
#recpulses(data, time, fps, pulse_types) ~ returns.keys():
→ 'barrier', 'cln_pulses', 'n_info', 't_info', 'scln_pulses'
from foufilt import foufilt
#foufilt(data, fps, target_freq, pad=10, phw=1, verb=True,
→ phase=False)
# ~ returns new_data (if phase==False) / phase (if phase==True)
from sahfuncs import synchronize, getpower, getphase, pairpulses,
→ savepulses
# synchronize(data, nshift) ~ returns sdata
# getpower(data, ninfo) ~ returns power
# getphase(data, fps, target_freq, ninfo) ~ returns phases
# pairpulses(ninfo, tinfo) ~ returns ninfo, tinfo
# savepulses(file_path, tinfo, power, phase, pulse_types) ~ no
→ return (saves .dat file)

### 2) Loads hardcoded data
print("Loading hardcoded data...")
signal_time = 60 # [s] (Total duration of signal data)
fps = 300000 # Frames (samples) per second
target_freq = 149.5*(10**3) #[Hz]
freq_0 = 125*(10**3) #[Hz]
target_freq -= freq_0
pulse_types =
→ {'Transmisor':(10e-3,20e-3,4), 'Oscilator':(100e-3,200e-3,20)}
# {'Name':(min_len, max_len, time_gap), }
print("(%s s)\n"%(t()-st))

```

```

### 3) Loads main data
# 3.1) Loads signal data
name = file_path.split("/")[-1][:-4]
if file_path.endswith(".mat"):
    print("Loading .mat file (%s)..."%name); st = t()
    data = sio.loadmat(file_path)["captura"]
elif file_path.endswith(".wav"):
    print("Loading .wav file (%s)..."%name); st = t()
    tmp_data =
    ↪ np.fromstring(wave.open(file_path,"r").readframes(-1),'int16')
    tmp_data = tmp_data[:,2]+1j*tmp_data[1:2]
    data = np.zeros((1,tmp_data.size),dtype=complex)
    data[0] = tmp_data
# 3.2) Creates time array
time = np.linspace(0,signal_time,data.shape[1])
print("(%s s)\n"%(t()-st))

# 3.3) Saves raw signal image
if graph:
    print("Saving raw signal image..."); st = t()
    plt.figure(figsize=(14.4,4.8))
    plt.plot(time, abs(data[0]), color="red", markevery=1000000)
    if data.shape[0] == 2:
        plt.plot(time, abs(data[1]), color="blue", markevery=1000000)
    plt.savefig(file_path[:-4]+"_raw")
    plt.close("all")
    gc.collect()
    print("(%s s)\n"%(t()-st))

### 4) Gets pulses
# 4.1) Fourier Filters raw data
print("Fourier filtering raw data..."); st = t()
data = fougilt(data, fps, target_freq, phw=5, pad=1.1)
print("(%s s)\n"%(t()-st))

```



```

# 4.2) Recognizes pulses
print("Recognizing pulses..."); st = t()
rec = recpulses(data, time, fps, pulse_types)
ninfo = rec['n_info']
tinfo = rec['t_info']
print("(%s s)\n"%(t()-st))

# 4.3) Fixes the time shift between pulses (assumes two antennas)
if data.shape[0] == 2:
    print("Fixing time shift between signals...\n    (Assumes two
    → antennas)"); st = t()
    data = synchronize(data, ninfo, tinfo, pulse_types)
    print("(%s s)\n"%(t()-st))

# 4.4) Recognizes synchronized pulses
print("Recognizing synchronized pulses..."); st = t()
rec = recpulses(data, time, fps, pulse_types)
ninfo = rec['n_info']
tinfo = rec['t_info']
print("(%s s)\n"%(t()-st))

# 4.5) Pairs pulses by start times
print("Pairing pulses by start times..."); st = t()
ninfo, tinfo = pairpulses(ninfo, tinfo)
print("(%s s)\n"%(t()-st))

# 4.6) Cleans data
print("Cleaning raw data..."); st = t()
data *= rec['scln_pulses']
print("(%s s)\n"%(t()-st))

# 4.7) Saves clean synchronized signal image
if graph:
    print("Saving clean signal image..."); st = t()
    plt.figure(figsize=(14.4,4.8))
    plt.plot(time, abs(data[0]), color="red", markevery=1000000)

```

```

    if data.shape[0] == 2:
        plt.plot(time, abs(data[1]), color="blue", markevery=1000000)
    plt.savefig(file_path[:-4]+"_c1n")
    plt.close("all")
    gc.collect()
    print("(%s s)\n"%(t()-st))

# 4.8) Reads pulse power & phase
print("Measuring pulse power..."); st = t()
power = getpower(data, ninfo)
if data.shape[0] == 2:
    print("...& phase...")
    phase = abs(getphase(data, fps, target_freq, ninfo))
print("(%s s)\n"%(t()-st))

# 4.9) Saves processed pulses into .dat file
print("Saving processed pulses (%s.dat)... \n      (Assumes two
↳ antennas)"); st = t()
savepulses(file_path, tinfo, power, phase, pulse_types)
print("(%s s)\n"%(t()-st))

### END MESSAGE
print("### GETPULSES DONE! (%s)###"%name)
print("(%s s)\n"%(t()-Gst))

```

```

#####
#   Andrés Ignacio Bertoni (andresibertoni@gmail.com) - 2019   #
#   Summer Scholarship 2019 - Balseiro Institute - FiEstIn (CNEA) #
#####

```

foufilt.py

```

#####
## F O U R I E R F I L T E R I N G ##
#####

```

```

import numpy as np
from sswindow import sswindow #sswindow(x, centre, half_width, pext=1)

def foufilt(data, fps, target_freq, pad=10, phw=2.5, verb=True, phase=False):
    """ Fourier filters a real or complex signal without altering
    ↪ intensities """

    nantennas = data.shape[0]
    if phase == True:
        phase = np.zeros(nantennas)
    else:
        new_data = np.zeros(data.shape, dtype=complex)

    for i in np.arange(nantennas):
        if verb: print("    (Filtering %s antenna...)"%(i+1))
        n = data[i].size
        dn = 1/fps
        N = int(n*pad)
        freq = np.fft.rfftfreq(N, dn)
        if np.any(np.iscomplex(data[i])):
            if verb: print("        (FTing complex signal...)")
            FTdata_re = np.fft.rfft(data[i].real,N)
            FTdata_im = np.fft.rfft(data[i].imag,N)
            fullFT = abs(abs(FTdata_re)+1j*abs(FTdata_im))
        else:
            if verb: print("        (FTing real signal...)")
            FTdata = np.fft.rfft(data[i],N)
            fullFT = abs(FTdata)

        if verb: print("        (Selecting desired frequency...)")
        nolow = int(len(freq)*0.005) #Arbitrary: first 0.5% discarded
        nmax1 = np.argmax(fullFT[nolow:])+nolow
        nmax2 = np.argmax(fullFT[nolow:nmax1//2])+nolow
        if abs(freq[nmax1]-target_freq) < abs(freq[nmax2]-target_freq):
            if verb: print("        (Target frequency is the 1st
            ↪ dominant.)")

```

```

        centre = freq[nmax1]
    else:
        if verb: print("          (Target frequency is the 2st
        ↪ dominant!\n          High frequency noise detected.)")
        centre = freq[nmax2]
    hw = centre*(phw/100)
    wind = sswindow(freq, centre, hw)

    if np.any(np.iscomplex(data[i])):
        FTdata_re *= wind
        FTdata_im *= wind
        if type(phase) != bool:
            if verb: print("          (Taking phase from FT...)")
            FTdata = FTdata_re + 1j* FTdata_im
            nmax = np.argmax(abs(FTdata))
            phase[i] = np.angle(FTdata[nmax], deg=True)
        else:
            if verb: print("          (iFTing filtered FT...)")
            iFTdata_re = np.fft.irfft(FTdata_re,N)[:n]
            iFTdata_im = np.fft.irfft(FTdata_im,N)[:n]
            new_data[i] = iFTdata_re + 1j* iFTdata_im
    else:
        FTdata *= wind
        if type(phase) != bool:
            if verb: print("          (Taking phase from FT...)")
            phase[i] = np.angle(FTdata[nmax], deg=True)
        else:
            if verb: print("          (iFTing filtered FT...)")
            iFTdata = np.fft.irfft(FTdata,N)[:n]
            new_data[i] = iFTdata

    if type(phase) != bool:
        return phase
    else:
        return new_data

```

```
#####
#   Andrés Ignacio Bertoni (andresibertoni@gmail.com) - 2019   #
#   Summer Scholarship 2019 - Balseiro Institute - FiEstIn (CNEA) #
#####
```

sswindow.py

```
#####
## S O F T W I N D O W ##
#####
```

```
import numpy as np
```

```
def sswindow(x, centre, half_width, pext=1):
```

```
    """Generates a diferentiable 0-1-0 sqaure function
```

```
        Requires a centre and half_width for the pulse with an 'x' 1D array
```

```
→ for reference
```

```
        pext% is extended to both sides (default is 1%)
```

```
        Returns such window function"""
```

```
    window = np.zeros(x.shape)
```

```
    ext = pext/100
```

```
    if pext > 0:
```

```
        sta0 = abs(centre)-abs(half_width)*(1+ext*2)
```

```
        nsta0 = np.argmin(abs(x-sta0))
```

```
        sta1 = abs(centre)-abs(half_width)
```

```
        nsta1 = np.argmin(abs(x-sta1))
```

```
        end1 = abs(centre)+abs(half_width)
```

```
        nend1 = np.argmin(abs(x-end1))
```

```
        end0 = abs(centre)+abs(half_width)*(1+ext*2)
```

```
        nend0 = np.argmin(abs(x-end0))
```

```
    else:
```

```
        sta0 = abs(centre)-abs(half_width)
```

```
        nsta0 = np.argmin(abs(x-sta0))
```

```

    sta1 = abs(centre)-abs(half_width)*(1-ext*2)
    nsta1 = np.argmin(abs(x-sta1))
    end1 = abs(centre)+abs(half_width)*(1-ext*2)
    nend1 = np.argmin(abs(x-end1))
    end0 = abs(centre)+abs(half_width)
    nend0 = np.argmin(abs(x-end0))

window[nsta0:nsta1+1] = (3*((x[nsta0:nsta1+1]-sta0)/(sta1-sta0)**2)
↪ -(2*((x[nsta0:nsta1+1]-sta0)/(sta1-sta0)**3)
window[nsta1+1:nend1] = 1
window[nend1:nend0+1] = (3*((x[nend1:nend0+1]-end0)/(end0-end1)**2)
↪ +(2*((x[nend1:nend0+1]-end0)/(end0-end1)**3)

return window

```

```

#####
#   Andrés Ignacio Bertoni (andresibertoni@gmail.com) - 2019   #
#   Summer Scholarship 2019 - Balseiro Institute - FiEstIn (CNEA) #
#####

```

recpulses.py

```

#####
## R E C O G N I Z E P U L S E S ##
#####

import numpy as np
from sswindow import sswindow #sswindow(x, centre, half_width, pext=1)

def recpulses(data, time, fps, pulse_types):
    """ Recognize pulses """
    # Check if complex
    if np.any(np.iscomplex(data)):
        print("    (Converting complex data to real...)")
        datax = abs(data)
    else: datax = data

```

```

npoints = datax.shape[1]
nantennas = datax.shape[0]
output = {}

# Educated bar (threshold) estimation
def educbar(datax, bins=100):
    hist = np.histogram(datax,bins)
    x = hist[1][1:]
    y = hist[0]
    imax = np.argmax(y)
    for i in np.arange(len(y[imax:])):
        imin = imax+i
        if y[imax+i+1] > y[imax+i]: break
    bar = x[imin+1]
    return bar

# Sets a noise filtering threshold
print("    (Setting noise filtering threshold...)")
barrier = np.zeros(nantennas)
for i in np.arange(nantennas):
    barrier[i] = educbar(datax[i])
output['barrier'] = barrier

# Generates a 'clean' 'hard' pulse window (non-differentiable)
print("    (Generating 'hard' pulses...)")
twin = 0.05 # [s] ARBITRARY
nwin = int(twin*fps)
pulses = np.zeros(datax.shape)
ninfo = []
tinfo = []
for i in np.arange(nantennas):
    ninfo.append([])
    tinfo.append([])
    tics = list(np.nonzero(datax[i]>barrier[i])[0])
    on = int(tics[0])

```

```

for j in np.arange(1,len(tics)-1):
    if tics[j+1]-tics[j] > nwin:
        off=int(tics[j])
        tlen = time[off]-time[on]
        okflag = False
        for ptype in pulse_types.keys():
            ptlen = pulse_types[ptype]
            if tlen > ptlen[0] and tlen < ptlen[1]: okflag = True
        if okflag:
            ninfo[i].append((on,off))
            tinfo[i].append((time[on],tlen))
            pulses[i,on:off+1] = 1.0
        on = int(tics[j+1])
off=int(tics[-1])
for ptype in pulse_types.keys():
    ptlen = pulse_types[ptype]
    if tlen > ptlen[0] and tlen < ptlen[1]: okflag = True
if okflag:
    ninfo[i].append((on,off))
    tinfo[i].append((time[on],time[off]-time[on]))
    pulses[i,on:off+1] = 1.0
output['cln_pulses'] = pulses

npulses = []
for i in np.arange(nantennas):
    npulses.append(len(ninfo[i]))
npulses = max(npulses)
ninfo_ar = np.zeros((nantennas,npulses,2))
tinfo_ar = np.zeros((nantennas,npulses,2))
for i in np.arange(nantennas):
    ninfo_ar[i,:len(ninfo[i])] = np.array(ninfo[i])
    tinfo_ar[i,:len(ninfo[i])] = np.array(tinfo[i])
output['n_info'] = ninfo_ar # (n_on, n_off)
output['t_info'] = tinfo_ar # (t_on, t_len)

```



```

# Generates a 'clean' 'soft' pulse window (differentiable)
print("    (Generating 'soft' pulses...)")
pulses = np.zeros(pulses.shape)
for i in np.arange(nantennas):
    for ni in ninfo[i]:
        on = ni[0]
        off = ni[1]
        hw = (time[off]-time[on])/2
        centre = time[on]+hw
        pulses[i, on:off+1] = sswindow(time[on:off+1], centre, hw,
            ↪ pext=-1)
output['scln_pulses'] = pulses

return output

```

```

#####
#    Andrés Ignacio Bertoni (andresibertoni@gmail.com) - 2019    #
#    Summer Scholarship 2019 - Balseiro Institute - FiEstIn (CNEA)  #
#####

```

sahfuncs.py

```

#####
## S M A L L A D H O C F U N C T I O N S ##
#####
import numpy as np
from fougilt import fougilt
#fougilt(data, fps, target_freq, pad=10, phw=1, verb=True, phase=False)

def synchronize(data, ninfo, tinfo, pulse_types):
    try:
        rtype = "Oscillator"
        ref1 = np.intersect1d(np.where(tinfo[0,:,1]>pulse_types[rtype][0]),
            ↪ np.where(tinfo[0,:,1]<pulse_types[rtype][1]))[0]
        ref2 = np.intersect1d(np.where(tinfo[1,:,1]>pulse_types[rtype][0]),
            ↪ np.where(tinfo[1,:,1]<pulse_types[rtype][1]))[0]

```

```

    print("    (Using oscillator for reference...)")
except:
    print("    (Oscillator not found for both antennas!)")
    try:
        rtype = "Transmisor"
        ref1 =
        → np.intersect1d(np.where(tinfo[0,:,1]>pulse_types[rtype][0]),
        → np.where(tinfo[0,:,1]<pulse_types[rtype][1]))[0]
        ref2 =
        → np.intersect1d(np.where(tinfo[1,:,1]>pulse_types[rtype][0]),
        → np.where(tinfo[1,:,1]<pulse_types[rtype][1]))[0]
        print("    (Using transmisor for reference...)")
    except:
        print("    (Taking 1st pulse as a valid reference...)")
        ref1 = 0
        ref2 = 0
nshift = int(ninfo[0,ref1,0]-ninfo[1,ref2,0])
if nshift != 0:
    sdata = np.zeros(data.shape, dtype=complex)
    sdata[1] = data[1]
    sdata[0][:-nshift] = data[0][nshift:]
    return sdata
else:
    return data

def getpower(data, ninfo):
    power = np.zeros(ninfo.shape)
    adata = abs(data)
    for an in np.arange(data.shape[0]):
        for pu in np.arange(power.shape[1]):
            fr = int(ninfo[an,pu,0])
            to = int(ninfo[an,pu,1])
            power[an,pu,0] = np.mean(adata[an,fr:to+1])
            power[an,pu,1] = max(adata[an,fr:to+1])
    return power

```

```

def getphase(data, fps, target_freq, ninfo):
    phases = np.zeros(ninfo.shape)
    for pu in np.arange(phases.shape[1]):
        fr = int(ninfo[0,pu,0])
        while data[0,fr] != 0 and data[1,fr] != 0: fr -= 1
        to = int(ninfo[0,pu,1])
        while data[0,to] != 0 and data[1,to] != 0: to += 1
        pulse = np.zeros((2,data[0,fr:to+1].size), dtype=complex)
        pulse[0] = data[0,fr:to+1]
        pulse[1] = data[1,fr:to+1]
        phases[:,pu,1] = np.mean(np.angle(pulse[1]*np.conj(pulse[0]),
            ↪ deg=True))
        try: phases[:,pu,0] = fofilt(pulse, fps, target_freq, phw=5, pad=5,
            ↪ phase=True, verb=False)
        except: phases[:,pu,0] = 0.0
    return phases

```

```

def pairpulses(ninfo, tinfo):
    npulses1 = np.nonzero(tinfo[0,:,0])[0].size
    npulses2 = np.nonzero(tinfo[1,:,0])[0].size
    new_ninfo = np.zeros(ninfo.shape)
    new_tinfo = np.zeros(tinfo.shape)
    j = 0
    if npulses1 > npulses2:
        dtlist = abs(tinfo[1,1:,0]-tinfo[1,:-1,0])/2
        dtlist.sort()
        idt = 0
        dt = dtlist[idt]
        while dt == 0:
            idt += 1
            dt = dtlist[idt]
        for i in np.arange(ninfo.shape[1]):
            if abs(tinfo[0,i,0]-tinfo[1,j,0]) < dt:
                new_ninfo[0,i,:] = ninfo[0,i,:]
                new_ninfo[1,i,:] = ninfo[1,j,:]
                new_tinfo[0,i,:] = tinfo[0,i,:]

```

```

        new_tinfo[1,i,:] = tinfo[1,j,:]
        j += 1
    else:
        new_ninfo[0,i,:] = ninfo[0,i,:]
        new_ninfo[1,i,:] = 0.0
        new_tinfo[0,i,:] = tinfo[0,i,:]
        new_tinfo[1,i,:] = 0.0
else:
    dtlist = abs(tinfo[1,1:,0]-tinfo[1,:-1,0])/2
    dtlist.sort()
    idt = 0
    dt = dtlist[idt]
    while dt == 0:
        idt += 1
        dt = dtlist[idt]
    for i in np.arange(ninfo.shape[1]):
        if abs(tinfo[1,i,0]-tinfo[0,j,0]) < dt:
            new_ninfo[0,i,:] = ninfo[0,j,:]
            new_ninfo[1,i,:] = ninfo[1,i,:]
            new_tinfo[0,i,:] = tinfo[0,j,:]
            new_tinfo[1,i,:] = tinfo[1,i,:]
            j += 1
        else:
            new_ninfo[1,i,:] = ninfo[1,i,:]
            new_ninfo[0,i,:] = 0.0
            new_tinfo[1,i,:] = tinfo[1,i,:]
            new_tinfo[0,i,:] = 0.0
return new_ninfo, new_tinfo

def savepulses(file_path, tinfo, power, phase, pulse_types):
    npulses = tinfo.shape[1]
    times = np.zeros((npulses,2))
    for pu in np.arange(npulses):
        if np.any(tinfo[:,pu,0]==0):
            times[pu,:] = tinfo[np.nonzero(tinfo[:,pu,0]),pu,:]
        else:

```

```

times[pu,:] = np.sum(tinfo[:,pu,:],axis=0)/2

file = open(file_path.replace(".mat",".dat"), "w")
file.write("#%s\n"%npulses)
for ptype in pulse_types.keys():
    file.write("#%s\n"%ptype)
    file.write( "#on_time\t\t\tA1_pow_av\t\t\tA2_pow_av\t\t\tA1_pow_max
    → \t\t\tA2_pow_max\t\t\tph_diff_fq(A1-A2)\tph_diff_t(A1-A2)\n")
    ptlen = pulse_types[ptype]
    for pu in np.arange(npulses):
        if times[pu,1] > ptlen[0] and times[pu,1] < ptlen[1]:
            on_time = times[pu,0]
            A1_pow_av = power[0,pu,0]
            A2_pow_av = power[1,pu,0]
            A1_pow_max = power[0,pu,1]
            A2_pow_max = power[1,pu,1]
            ph_diff_fq = phase[1,pu,0]-phase[0,pu,0]
            ph_diff_t = phase[0,pu,1]

            → file.write("%.15f\t%.15f\t%.15f\t%.15f\t%.15f\t%.15f\t%.15f\n"%
            → (on_time,A1_pow_av,A2_pow_av,A1_pow_max,
            → A2_pow_max,ph_diff_fq,ph_diff_t))
file.close()

```

```

#####
#   Andrés Ignacio Bertoni (andresibertoni@gmail.com) - 2019   #
#   Summer Scholarship 2019 - Balseiro Institute - FiEstIn (CNEA) #
#####

```



Análisis de señales y desarrollo de un algoritmo para el seguimiento de un marsupial vulnerable en el bosque andino-patagónico vía radio-telemetría



Becario: Lic. Andrés Ignacio Bertoni (andresibertoni@gmail.com)

Directora: Dra. Karina Laneri (karinalaneri@gmail.com)

Colaboradores: Lic. Laila Kazimierski (lailakazimierski@gmail.com)
Ing. Nicolás Catalano ; Dr. Guillermo Abramson



Caso de estudio



Monito del monte
(*Dromiciops gliroides*)

Marsupial Nocturno Vulnerable
Dispersor de 16 especies vegetales.

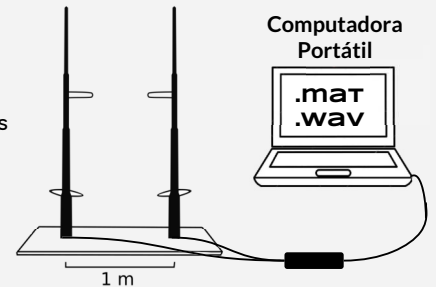
Dispositivos de radio-telemetría



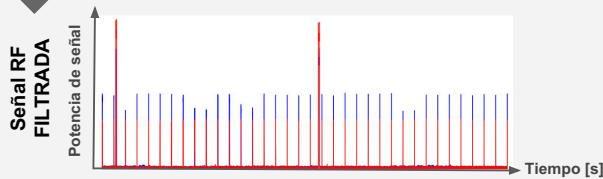
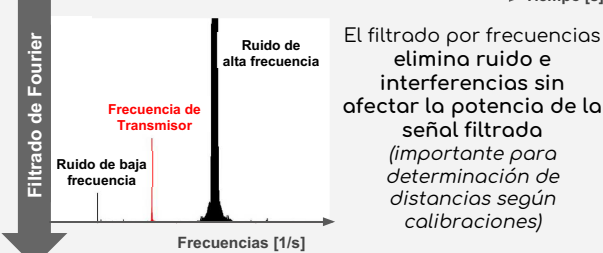
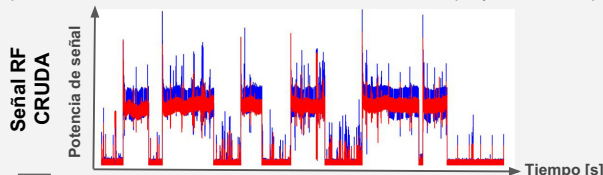
Transmisor VHF (~150 MHz)
Emite pulsos cada ~2 segundos

Estación receptora
(~150 MHz)

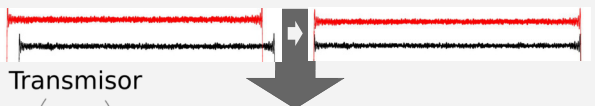
2 antenas omnidireccionales con polarización lineal + 2 receptores RTL-SDR que comparten el mismo reloj (clock)



[Objetivo 1] Protocolo de procesamiento de señales (Python3)



+ Recortado suave de pulsos (binarizado polinómico)
+ Sincronización de las señales



- + Armado de grilla temporal (reconocimiento de pulsos ausentes).
- + Lectura de potencia de pulso.
- + Cálculo de diferencia de fase por transformada de Fourier del pulso.
- + Énfasis en reducción de los tiempos de procesamiento de archivos.

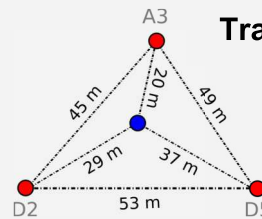
Receptor 1 Receptor 2

Trabajo a futuro

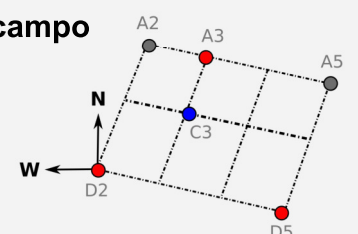
Si bien la implementación del primer objetivo ya es completa y funcional, aún resta considerar información de calibración (adquisición completa por finalizar) y de distribución espacial de las estaciones receptoras para la determinación de puntos geográficos en función del tiempo, que corresponden al animal monitoreado en su hábitat. Con dicha información se procederá a la implementación del modelo de movimiento propuesto para cumplir con el segundo objetivo.

Se acordó continuar el trabajo a la distancia durante marzo de 2019.

Trabajo de campo



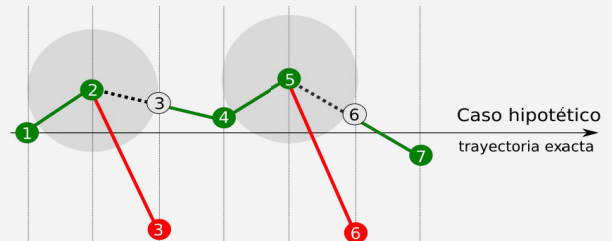
Configuración experimental en campo (manzanas IB-CAB)
(puesta a punto del protocolo de medición y dispositivos)



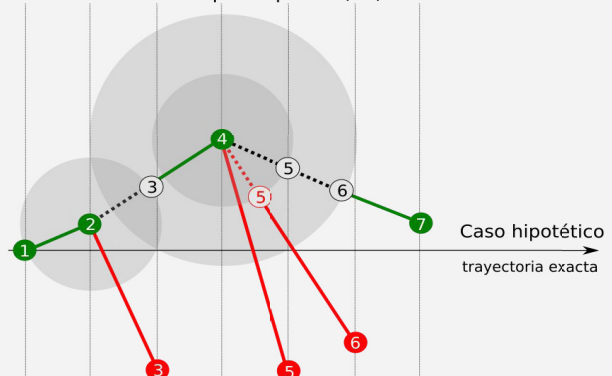
Configuración experimental en bosque (reserva municipal Llao-Llao)
(calibración pre-medición)

[Objetivo 2] Algoritmo de localización espacio-temporal + Modelo de movimiento

- 1) El primer punto es siempre **aceptado** (sitio de liberación conocido).
- 2) Puntos ausentes o que involucren una distancia o ángulo superior a los **valores límite*** para el paso temporal, serán **rechazados**. (*: valores determinados observacionalmente por biólogos)
- 3) Un punto **rechazado** (i) genera una **incertidumbre local** en la trayectoria, alrededor del punto previo (i-1); el siguiente punto (i+1) se **acepta** o **rechaza** tomando como reemplazo del rechazado al punto más próximo sobre la **circunferencia de incertidumbre local**.



- 4) Si dos o más puntos consecutivos son **rechazados** (i, i+1, i+2, ...), la **incertidumbre local** del punto previo (i-1) crece en radio linealmente.





Instituto Balseiro – Centro Atómico Bariloche

Becas de Verano 2019



Efecto de la humedad y del CO₂ sobre las propiedades de almacenamiento de CO₂ del material Li₄SiO₄

Federico Carlos David López

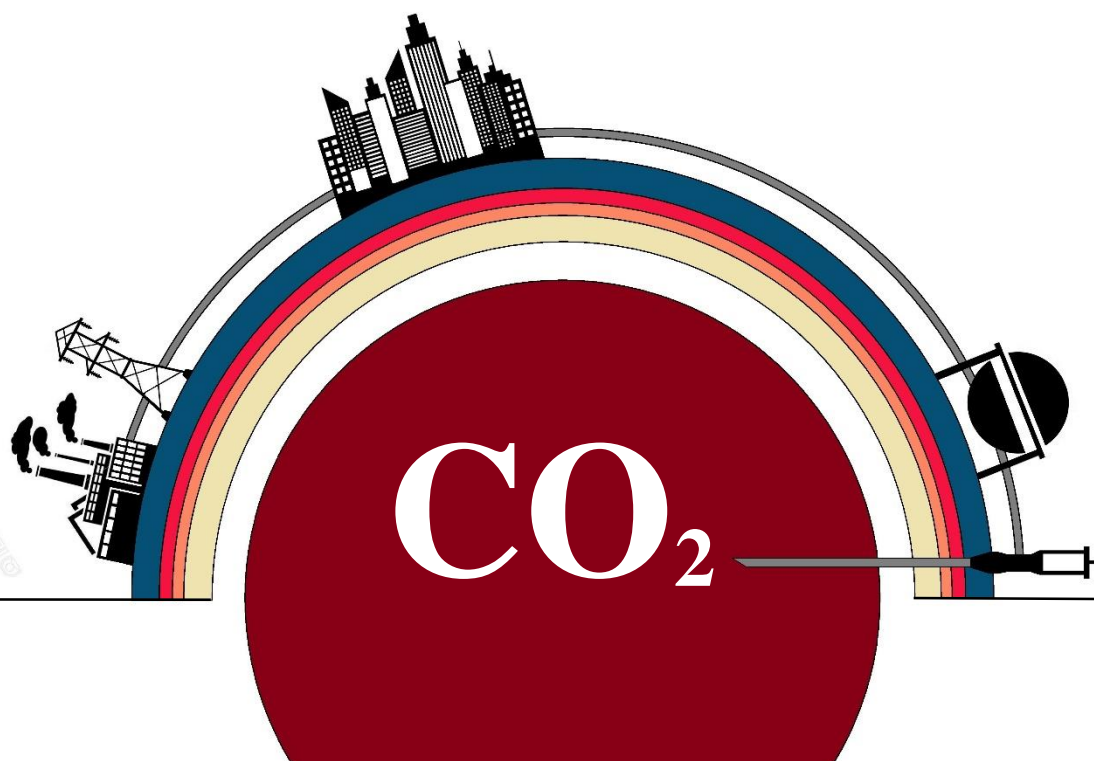
Licenciado en Química

Universidad Nacional de Catamarca

Lic. M. Laura Grasso
Directora

Dra. Fabiana Gennari
Directora

Dr. Pierre Arneodo Larochette
Director



Resumen

En las últimas décadas, algunos estudios sobre remediación ambiental, se han orientado al desarrollo de materiales sólidos capaces de capturar gases como una estrategia para reducir las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero (GEI). Una alternativa efectiva para reducir las emisiones de los GEI, es capturarlos en los sitios de generación, por ejemplo, mediante la captura selectiva de CO₂ en las chimeneas de las plantas de generación de energía eléctrica o las cementeras. Una de las alternativas consideradas es el uso del Ortosilicato de Litio (Li₄SiO₄), el cual puede ser sintetizado a partir de precursores químicos de bajo costo y cuya capacidad teórica para la captura de CO₂ es de 36,7% p/p (es decir, 36,7g de CO₂ por cada 100g del material). Además, el Li₄SiO₄ presenta también, un amplio rango de temperaturas de operación y una adecuada regeneración durante el proceso de carbonatación/descarbonatación.

La estabilidad química durante su manufactura y almacenamiento, son condición requerida para la aplicación en una escala mayor de este tipo de materiales absorbentes. Sin embargo, no hay información suficiente sobre los cambios que pueda presentar el material expuesto al CO₂ o a la humedad presente del aire ni recomendaciones específicas para su almacenamiento.

El presente trabajo se ha enfocado en síntesis de Li₄ SiO₄, la evaluación de la capacidad de captura de CO₂ efectiva después de la exposición del material al aire, considerando condiciones de humedad relativa variable y a temperatura ambiente, durante su almacenamiento. Para dicha evaluación se emplearon diferentes técnicas experimentales como Difracción de rayos X (XRD), Microscopía electrónica de barrido (SEM). Termogravimetría (TG), Determinación del área utilizando Isotermas de Absorción de N₂. Además, se estudiaron posibles métodos para dispersar el Li₄SiO₄ sobre un soporte inerte (Cordierita), buscando de esta manera, mejorar el contacto del Ortosilicato de Litio con CO₂.

Palabras Claves: Litio, Captura, CO₂, Cordierita.

Abstract

In recent decades, some studies on environmental remediation have focused on the development of solid materials capable of capturing gases as a strategy to reduce atmospheric concentrations of greenhouse gases (GHGs). An effective alternative to reduce GHG emissions is to capture said gases at the generation sites, for example, the selective capture of CO₂ in the exhaust gases of the electric power generation plants or cement plants. One of the alternatives considered as a carbon dioxide material is the use of Lithium Orthosilicate (Li₄ SiO₄), which can be synthesized from low-cost chemical precursors and has 36, 7% p / p of theoretical capacity (36,7 g of CO₂ per 100 g of material).

It also presents a wide range of operating temperatures and adequate regeneration during the carbonation / decarbonation process.

The chemical stability during its manufacture and storage is a condition required for the application on a larger scale of this type of absorbent material. However, there is not enough information about the changes that may occur in the material under exposition of moisture present in the air or specific recommendations for storage.

The present work has focused on the synthesis of Li_4SiO_4 , the evaluation of the CO_2 capture capacity after the exposure of the material to the air, considering conditions of variable relative humidity and time at room temperature, during its storage. For its evaluation were used different experimental techniques such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM). Thermogravimetry, Determination of the area using N_2 absorption isotherms.

In addition, methods for dispersing Li_4SiO_4 on an inert support (Cordierite) were studied, to improve the contact between the lithium Orthosilicate and CO_2 .

Key word: Lithium, Capture, CO_2 , Cordierite.

Objetivos del trabajo

El objetivo general de este trabajo es, en primer lugar, desarrollar materiales cerámicos de litio para su uso como absorbentes de CO_2 . Se prestará especial atención al efecto de variables ambientales, como la humedad relativa o CO_2 presente en el aire, a las cuales se encuentra expuesto el material absorbente luego de la síntesis hasta el inicio de la captura y la relación de dichas variables con su capacidad de captura. Y luego, lograr la dispersión del material obtenido sobre un soporte (Cordierita) que favorezca el contacto entre el absorbente y el gas.

Objetivos específicos:

- Sintetizar Ortosilicato de litio (Li_4SiO_4) por reacción sólido-sólido, aplicando condiciones experimentales óptimas para la obtención de un producto puro.
- Caracterizar la composición del material obtenido luego de su síntesis y luego de las diferentes etapas del ensayo, así como también las nuevas especies formadas luego de la captura de CO_2 en cada una de ellas.
- Realizar ensayos en condiciones de humedad al Li_4SiO_4 a diferentes tiempos de exposición y de exposición al CO_2 , para estudiar la influencia de estas variables con la de capacidad de captura del ortosilicato de litio.
- En base a los resultados obtenidos, establecer las condiciones óptimas de manipulación y almacenamiento del material absorbente.
- Aplicar a un soporte inerte (Cordierita), a un tratamiento químico con el fin de aumentar el área superficial de mismo y favorecer el contacto entre el gas silicato de litio.
- Buscar en bibliografía y aplicar un método de dispersión del Li_4SiO_4 sobre la Cordierita, el cual permita una elevada distribución espacial del material absorbente.

Índice

1. <u>Introducción</u>	5
1.1 El calentamiento global y CO ₂	5
1.2 Alternativas para mitigar las emisiones de CO ₂	5
1.3 Sistemas de captura de CO ₂	6
1.4 Sistemas de post-combustión.....	7
1.5 Materiales para captura de CO ₂	8
2 <u>Metodología experimental</u>	9
2.1 Síntesis de ortosilicato de litio (Li ₄ SiO ₄).....	9
2.2 Estudio de envejecimiento.....	10
2.2.1 Efecto de la humedad.....	10
2.2.2 Efecto del CO ₂	11
2.3 Tratamiento del soporte - Cordierita.....	11
2.4 Dispersión del material absorbente.....	12
2.5 Técnicas de caracterización.....	12
3. <u>Resultados y discusión</u>	14
3.1.1 Síntesis, tratamiento de humedad y flujo de CO ₂ : Análisis composicional.....	14
3.1.2 Síntesis, tratamiento de humedad y flujo de CO ₂ : Análisis morfológico.....	16
3.1.3 Síntesis: Determinación del área superficial.....	17
3.2.1 Evaluación de capacidad de captura.....	17
3.2.2 Evaluación de capacidad de captura: Análisis composicional.....	18
3.2.3 Evaluación de capacidad de captura: Análisis morfológico.....	19
3.3.1 Soporte.....	20
3.3.1 Soporte: Análisis morfológico.....	20
3.4 Dispersión del material absorbente.....	21
4. <u>Conclusiones</u>	23
5. <u>Bibliografía</u>	24

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El calentamiento global y CO₂

Desde hace unas décadas, para los científicos fue posible medir cambios en la temperatura media de la tierra, así como cambios en la concentración de ciertos gases en la atmósfera. Al parecer, un aumento en la concentración de estas especies químicas, estaba causando una modificación en el clima de ciertas regiones a escala global [1]. A este fenómeno se lo denominó “Cambio Climático”, evidenciándose principalmente como un aumento en la temperatura del globo terrestre. Actualmente, el calentamiento global y su relación directa con el incremento en las emisiones de estos gases está probada y aceptada por la comunidad científica.

Estos gases a los que se ha referido en el párrafo anterior, se conocen como gases de efecto invernadero (GEI) [1]. La concentración de estos contaminantes en la atmósfera se ha incrementado mayormente como resultado de la actividad industrial humana.

Entre ellos se encuentran el metano, los óxidos de nitrógeno, diferentes compuestos halogenados y el dióxido de carbono. Sin embargo, es este último quien más contribuye a la problemática ambiental. Lo anterior se debe a la gran cantidad de CO₂ producido por la quema de combustibles fósiles; tales como la producción de electricidad y la industria del transporte y a su largo tiempo de vida media en la atmósfera. De hecho, se estima que en el periodo comprendido entre el año 1995 a 2005, las emisiones globales de CO₂ se han incrementado en aproximadamente 1.4% anual [2], lo cual equivale a un aumento en la concentración de CO₂ atmosférico de alrededor de 1.9 ppm por año [3].

Un ejemplo más claro de la magnitud del problema, es que la concentración de CO₂ atmosférico en 2005 (379 ppm) fue estimada en un 35% mayor a la concentración de este gas hace 150 años. Estos cambios en la química de la atmósfera, han dado como resultado el incremento en la temperatura promedio de la superficie terrestre antes mencionado en alrededor de 0.7 °C en los últimos 100 años [4].

Aunado a lo anterior, y dado que en las próximas décadas los combustibles fósiles continuarán siendo la principal fuente de energía, se predice que para el año 2050 la concentración de CO₂ en la atmósfera podría alcanzar concentraciones alarmantes del orden de 550 ppm [5]. Por ello, se hace imperativo el tomar acciones para controlar la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera y prevenir de este modo una desestabilización peligrosa del sistema climático.

1.2 Alternativas para mitigar las emisiones de CO₂

Entre las diferentes alternativas para la reducción de la concentración de CO₂ atmosférico, se pueden mencionar las siguientes [2,6]:

- Hacer más eficiente la producción energética y consumo de energía.
- Desarrollo y uso de fuentes energéticas limpias (celdas de combustible, celdas solares, energía nuclear, etcétera).
- Reducción de las concentraciones de CO₂ en la atmósfera por medios naturales (programas de reforestación y/o reducción de la deforestación).

- Separación y uso del CO₂ en la fabricación de combustibles y otros compuestos químicos.
- Captura y posterior uso o confinamiento de CO₂.

No obstante, cabe mencionar que las dos primeras alternativas no solo involucran fuertes aspectos tecnológicos, sino que también aspectos económicos y sociales. Por otra parte, las restantes alternativas, pueden considerarse como alternativas viables, especialmente a corto y mediano plazo mientras se lleva a cabo la transición hacia el desarrollo y uso de fuentes energéticas ambientalmente más amigables [7].

1.3 Sistemas de captura de CO₂

Entre las alternativas antes mencionadas, existen métodos con menos relevancia mediática, pero que permiten continuar utilizando combustibles fósiles reduciendo enormemente las emisiones de CO₂. Estos sistemas, llamados “sistemas de captura y almacenamiento de CO₂” [1].

La captación y posterior uso o almacenamiento de dióxido de carbono constituyen una medida viable para la estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero. El proceso consiste en la separación del CO₂ emitido por la industria y su posterior uso como reactivo en diversos procesos industriales, como por ejemplo en la síntesis de metanol, dimetil-carbonato y ácido fórmico [2,6]; o bien su transporte a un lugar de almacenamiento y su aislamiento de la atmósfera a largo plazo. En este último caso, el CO₂ sería comprimido y transportado para ser confinado en formaciones geológicas (pozos de petróleo y gas agotados, y minas de carbón que no se vayan a explotar) o en el océano.

Es importante mencionar que los procesos de captura de CO₂ basados en el uso de absorbentes sólidos son especialmente factibles para el tratamiento en fuentes emisoras fijas y de grandes dimensiones como es el caso de las plantas generadoras de energía eléctrica, la industria de la producción de cemento, refinerías, industria siderúrgica e industria petroquímica, entre otras [2, 8]. Actualmente, ya se están llevando a la práctica aplicaciones de captura y/o separación de CO₂ en plantas industriales de gran magnitud, en particular en centrales de refinamiento de gas natural e instalaciones de producción de amoníaco.

Estos sistemas ganarán, sin duda, una gran relevancia a mediano plazo en el sector generador de electricidad. Esto se debe, en parte, a que algunos de estos sistemas, se pueden aplicar a plantas de generación eléctrica ya existentes, reduciendo los costos de inversión.

Sin embargo, estos sistemas difícilmente serían aplicables a todos los sistemas que utilizan combustibles fósiles como fuente de energía, bien por razones técnicas, bien por razones económicas. Para capturar el CO₂ es necesario disponer de una corriente pura en este compuesto, para reducir los costos de captura, haciendo a su vez, que el sistema sea más eficiente y más competitivo, respecto a otras alternativas.

En la **Figura 1** se muestra la evolución de la capacidad de captura de CO₂ de los sistemas actuales, desde el año 2012 hasta la actualidad, así como las previsiones de crecimiento

hasta el año 2022. Esta capacidad de captura se tendrá que multiplicar al menos por 100, si se pretende limitar el aumento de temperatura global a 2 °C, lo cual requiere fuertes inversiones económicas, principalmente, en el sector de la generación de energía eléctrica [9]. Este aumento de la capacidad de captura de CO₂ elevaría la capacidad actual de 40,3 millones de toneladas a 4.000 millones de toneladas.

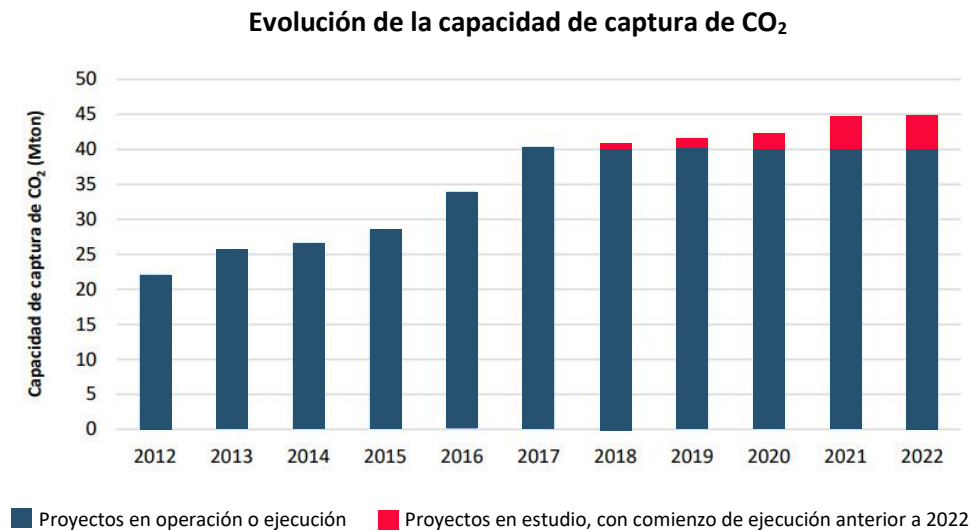


Figura 1: Evolución de la capacidad de captura CO₂ de sistemas vigentes y próximos a entrar en operación

Los sistemas de captura se pueden clasificar en:

- Sistemas de pre-combustión
- Sistemas de post-combustión
- Sistemas de oxycombustión

1.4 Sistemas de post-combustión

En los sistemas de captación posterior a la combustión o postcombustión, se separa el CO₂ de los gases de combustión (principalmente N₂) producidos por la quema del combustible fósil primario (carbón, gas natural, petróleo) en el aire, por lo que normalmente, estos flujos de gas de combustión tienen como componente principal nitrógeno (del aire) [7]. Estos sistemas están orientados para su aplicación en grandes focos emisores de CO₂, elevando su concentración desde un 10-15% (concentración media inicial en los gases de escape) a una concentración cercana al 100% de CO₂. Una vez alcanzada esta concentración, y al igual que en los sistemas de pre-combustión y oxycombustión, el CO₂ estaría listo para ser comprimido, transportado y almacenado o destinado a otros usos industriales [1].

Existen diferentes tecnologías dentro de este campo: la absorción química, absorción física, membranas, separación criogénica, micro-algas o bacterias y ciclo de calcinación-carbonatación, etc.

El principal inconveniente de este tipo de captura es el alto costo energético que requiere el proceso.

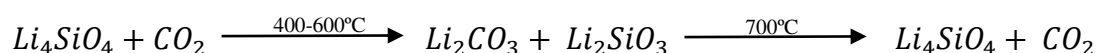
1.5 Materiales para captura de CO₂

Las diferentes tecnologías para la captura de CO₂, principalmente en sistemas de precombustión y postcombustión, usan absorbentes en fase líquida, membranas poliméricas, sistemas biológicos mediante el uso de enzimas, materiales híbridos (metal organic frameworks o MOFs), membranas y absorbentes sólidos [10]. Entre estos últimos, los materiales cerámicos han sido utilizados satisfactoriamente en sistemas de precombustión, tal es el caso de las membranas de separación (zeolitas y SiO₂ mesoestructurado) y en sistemas de postcombustión como materiales absorbentes (CaO, MgCO₃-CaCO₃) [3-12]. No obstante lo anterior, este tipo de tecnologías aún presenta ciertas limitantes para su aplicación a gran escala, entre las cuales se pueden mencionar su baja capacidad de absorción, la necesidad de utilizar sistemas a alta presión para llevar a cabo el proceso de absorción, cambios dimensionales considerables del material absorbente o la degradación térmica y química de los materiales.

En lo que respecta a las investigaciones existentes enfocadas al estudio de la separación selectiva del CO₂ mediante el empleo de cerámicos (como las espinelas) o materiales poliméricos en forma de membranas; el punto clave para realizar el control de CO₂ emitido, es su extracción de la mezcla de gases producido durante el proceso de combustión. En este sentido, hay básicamente dos problemas a resolver. Primero, el CO₂ y el nitrógeno (N₂) son dos de los principales gases producidos en muchos procesos de combustión y estos dos gases tienen tamaños cinéticos similares, lo que dificulta su separación. El segundo problema a resolver es que los gases producidos durante la combustión se generan a temperaturas muy altas, por lo cual, hay que enfriar los gases antes de poder usar cualquier proceso de separación [10,12].

En 1998, Nakagawa y Ohashi presentaron un nuevo método de captura de CO₂ utilizando metazirconato de litio, este trabajo también demostró la reversibilidad del proceso pudiendo regenerar casi por completo el material absorbente [13]. A partir de la publicación de este trabajo, se han reportado diversos artículos con otros cerámicos de litio como el Li₆Zr₂O₇ y el Li₄SiO₄ [8,11,12].

En la siguiente reacción se muestra la carbonatación del Li₄SiO₄ (proceso de absorción), seguido de la descarbonatación del silicato (regeneración).



La regeneración puede ser realizada a temperaturas mayores a la de captura (como indica la reacción) o cambiando la corriente gaseosa, desde una con alta concentración CO_2 a otra con gas inerte. El Li_4SiO_4 presenta una capacidad teórica de absorción química mayor (36.7 % en peso) en comparación con el Li_2ZrO_3 (28.7%) [14,15]; así como también, una cinética de reacción que permite la posibilidad de llevar a cabo el proceso de absorción desde temperatura ambiente y hasta 550 °C, con concentraciones de CO_2 entre 2 y 100% y presiones parciales de $0 < 20$ atm [10]. Todas estas propiedades lo hacen un material atractivo para la aplicación de captura en procesos postcombustión, por lo que es de interés estudiar su estabilidad durante el almacenamiento. Otro aspecto importante a analizar para la aplicación futura es la dispersión del material absorbedor sobre un soporte de alta área para favorecer la interacción con el CO_2 .

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Síntesis de ortosilicato de litio (Li_4SiO_4)

La preparación del material absorbente se llevó a cabo utilizando como método de síntesis la reacción sólido-sólido. Se partió de Li_2CO_3 (PA, Cicarelli) y SiO_2 (Sílica gel, Sigma Aldrich), con una relación estequiométrica $\text{Li}_2\text{CO}_3/\text{SiO}_2$ de 2 a 1.

Seguido del pesado de los reactivos, se inició una etapa de molienda mecánica, con el fin de lograr un contacto más íntimo entre los mismos. Para ello se colocó 1.5 g de la mezcla de partida en una cámara de acero inoxidable con 5 bolas del mismo material, utilizando una relación de masa de bolas/masa de muestra de 50:1. La molienda se realizó en un molino planetario Fritsch Pulverisette P6 a 400 rpm, temperatura ambiente y atmósfera de aire. Las etapas consideradas para realizar la molienda fueron 3 intervalos de 15 minutos y 3 pausas de 10 minutos, pudiendo evitar de esta manera, el calentamiento no deseado de la muestra.

La síntesis se concluyó calentando el material molido hasta 800°C durante 5 horas (Rampa de calentamiento de $5^\circ\text{C}/\text{min}$) en una cápsula de alúmina (tipo cazoleta). Seguido de esto, el enfriamiento de la muestra obtenida transcurrió por convección natural.

Finalmente, para los siguientes ensayos, la muestra utilizada fue obtenida por molienda mecánica (en las mismas condiciones que en la síntesis).

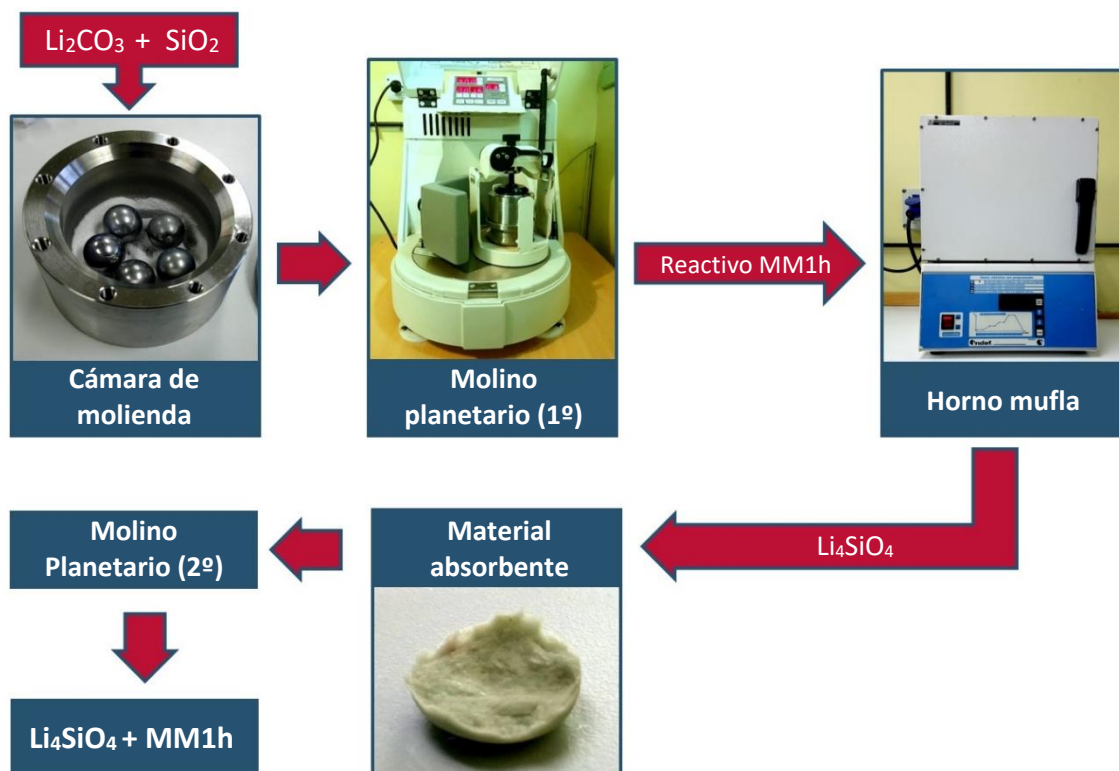


Figura 2.1: Diagrama de síntesis del material capturador

El producto de síntesis y sus derivados serán caracterizados inicialmente por las técnicas de Difracción de rayos X y Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier, con la finalidad de seguir la formación de los compuestos cristalinos y no cristalinos.

2.2 Estudio de envejecimiento

Como ha sido mencionado antes, el Li_4SiO_4 presenta un elevado potencial de aplicación como material capturador de CO_2 , para lo cual resulta interesante el estudio de la estabilidad química durante su almacenamiento a temperatura ambiente.

Estudios previos [16] sobre la capacidad de captura efectiva del Li_4SiO_4 con el tiempo de exposición al aire, muestran una disminución en dicha capacidad. Dicho trabajo mencionado propone dos posibles causas del envejecimiento observado, vapor de agua (humedad relativa) y el CO_2 presentes en el aire. Por lo anterior, resulta necesario un estudio sistemático de estas variables.

2.2.1 Efecto de la humedad

Para evaluar el efecto de la humedad del ambiente sobre la muestra, se diseñó un dispositivo (**Figura 2.2**), el cual permitió controlar condiciones de humedad relativa (HR) y temperatura. Este dispositivo consiste en un reservorio de agua, apoyado sobre una plancha calefactora y tapado por un vaso invertido, para conservar las condiciones de esta atmósfera. Durante el experimento, la muestra molida se colocó en el interior del dispositivo para su exposición a las condiciones mencionadas.

Se trabajó a una temperatura media de 32°C y una HR del 92%, tomando diferentes tiempos de exposición: 1, 5 y 10 horas.

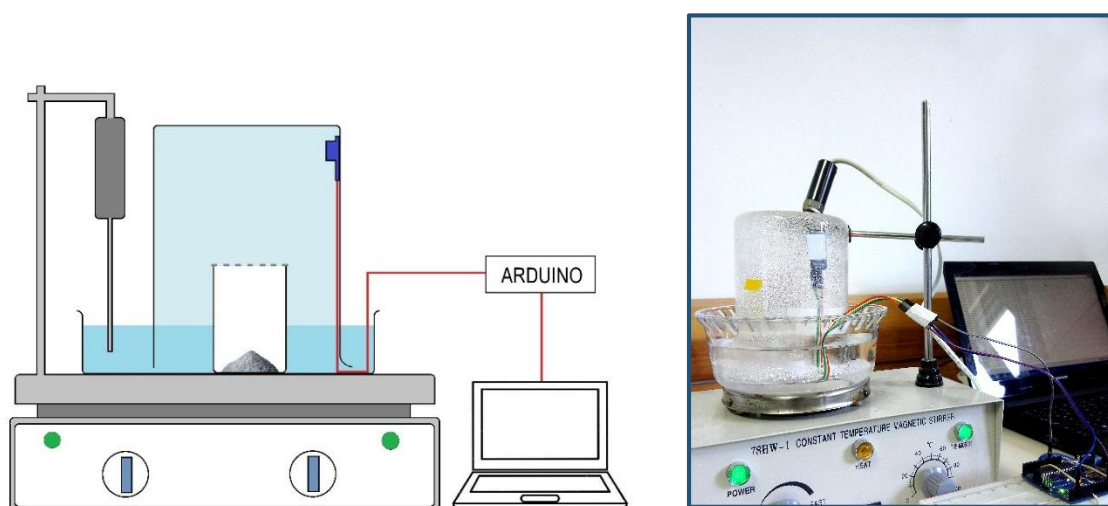


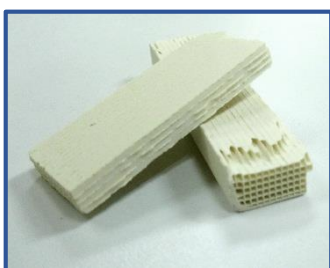
Figura 2.2: Esquema del dispositivo para el ensayo de humedad.

2.2.2 Efecto del CO₂

Para estudiar el efecto del CO₂ sobre la muestra molida, se la expuso a la misma a un flujo del gas (50 cm³/min) a temperatura ambiente durante 1 y 5 horas. Este ensayo se realizó en una balanza termogravimétrica (TG-HP50, TA Instrument), de manera de analizar las variaciones de masa de la muestra antes y después de la exposición al CO₂.

2.3 Tratamiento del soporte inerte

El tratamiento ácido de arcillas y silicatos naturales es desde hace tiempo estudiado con la intención de modificar su textura y acidez, haciéndolos útiles como adsorbentes o soportes de catalizadores y materiales de absorción. Sumado a esto, el tratamiento ácido a veces produce además un aumento de la especificidad superficial [17].



En este trabajo se propuso como soporte un silicoaluminato de hierro y magnesio (2MgO.2Al₂O₃.5SiO₂), denominado Cordierita. Sobre él se dispersará el material absorbente. Este soporte es inerte, de alta durabilidad, baja caída de presión, rápido tiempo de calentamiento y estabilidad estructural a altas temperaturas. Este es un requisito importante, ya que se desea utilizarlo a temperaturas de 800°C. El área superficial de la Cordierita fue medida (0,5 m²/g), coincidiendo con los valores de bibliografía [17]. Debido a este bajo valor, se buscaron diferentes métodos que permitan aumentar el área superficial del material para dicho fin. Se optó por un tratamiento con ácido clorhídrico (HCl) al 37% p/p durante 6 horas en ebullición (con renovaciones de la solución ácida cada una hora). El arreglo experimental utilizado fue diseñado considerando los posibles vapores generados y las condiciones de bioseguridad, es por ello que se contó con trampa de Na(OH) en donde dichos vapores eran neutralizados (**Figura 2.3**).

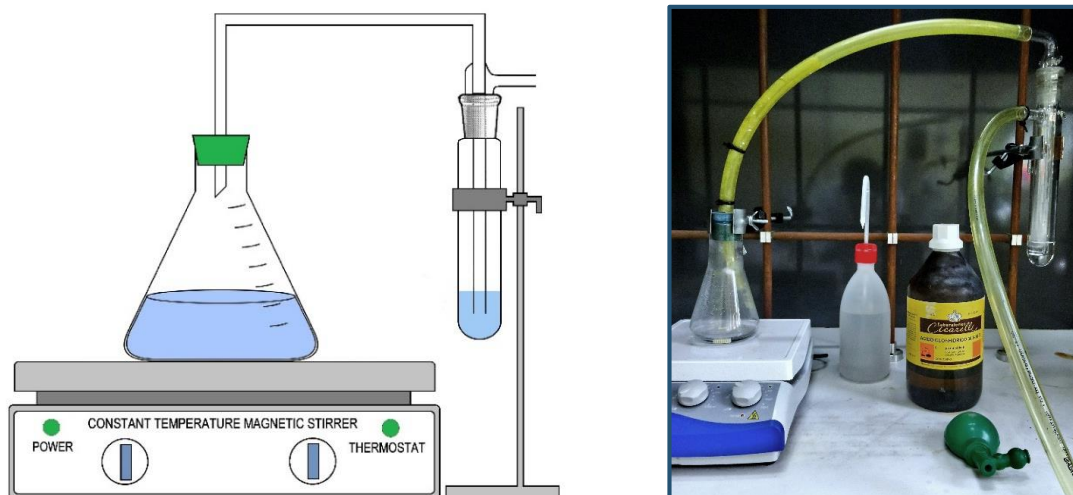


Figura 2.3: Tratamiento ácido del soporte

2.4 Dispersión del material absorbente

Para evaluar la dispersión del Li_4SiO_4 , se consultaron los valores de solubilidad de metasilicato y ortosilicato (ambos por similitud) en diferentes solventes.

En la bibliografía consultada (fichas de seguridad que se muestran a continuación), se encontraron discrepancias sobre la miscibilidad del compuesto en agua (**Figura 2.4**). Siguiendo el criterio de utilizar un solvente acuoso, más amigable con el ambiente, se decidió realizar pruebas de solubilidad del material sintetizado. Esto se realizó con la finalidad de encontrar un medio líquido en el cual suspender el Li_4SiO_4 , para dispersarlo, luego sobre el soporte de cordierita.

NAME USED ON LABEL: LITHIUM ORTHOSILICATE tech-95 - SIL6469.2	
CHEMICAL NAME: LITHIUM ORTHOSILICATE	
SYNONYMS: TETRALITHIUM ORTHOSILICATE	
CHEMICAL FAMILY: INORGANIC SILICATE	
PHYSICAL DATA	
Boiling Point: N/A	Melting Point: 1256°C
Specific Gravity: 2.33	Vapor Pressure, 20°: <0.01mm
Vapor Density (air = 1): NA	Solubility in water: insoluble
% volatiles: 0	Evaporation rate: NA
Molecular Weight: 119.85	Other: NA
Appearance & Color: White powder	


Lithium orthosilicate			
Material Safety Data Sheet		sc-269337	
Section 9 - PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES			
PHYSICAL PROPERTIES			
Mixes with water.			
Corrosive.			
Alkaline.			
State	DIVIDED SOLID	Molecular Weight	119.85
Melting Range (°F)	Not Available	Viscosity	Not Applicable
Boiling Range (°F)	Not available	Solubility in water (g/L)	Miscible
Flash Point (°F)	Not applicable	pH (1% solution)	Not applicable
Decomposition Temp (°F)	Not available.	pH (as supplied)	Not applicable
Autoignition Temp (°F)	Not applicable	Vapour Pressure (mmHG)	Not applicable
Upper Explosive Limit (%)	Not applicable	Specific Gravity (water=1)	Not Available
Lower Explosive Limit (%)	Not applicable	Relative Vapor Density (air=1)	Not applicable

Figura 2.4: Valores de solubilidad de Li_4SiO_4

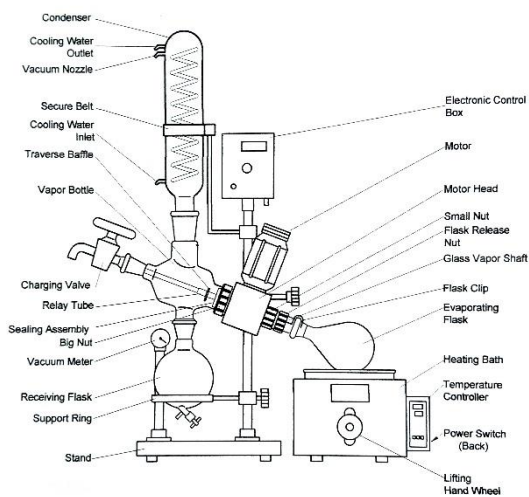


Figura 2.5: Grafico de rotavapor utilizado en el ensayo

Se pesó de 1.5g de Li_4SiO_4 molido y se lo puso en contacto con un volumen de H_2O en una relación 1:10 masa de solvente/masa de muestra. La mezcla fue colocada en rotavapor (**Figura 2.5**) hasta sequedad.

La muestra luego del ensayo fue analizada por Difracción de rayos X.

2.5 Técnicas de análisis

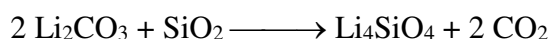
Las técnicas experimentales utilizadas en el trabajo para la caracterización de las muestras fueron:

- Difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés)
- Espectroscopia de infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR)
- Termogravimetría (TG)
- Microscopia electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés)
- Isotermas de absorción de nitrógeno

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.1 Síntesis, tratamiento de humedad y flujo de CO₂: Análisis composicional

La **Figura 3.1.a** corresponde al difractograma del material sintetizado antes y después de la molienda mecánica. En éste se identificó la presencia de la fase cristalina Li₄SiO₄ (ICDD: 00-017-0197). Pudiendo concluirse que la reacción de síntesis ocurrió de manera completa, al no observar Li₂CO₃ (uno de los reactivos de partida). La reacción puede expresarse:



En el difractograma del Li₄SiO₄ después de una hora de molienda mecánica (**Figura 3.1.b**), se observa la misma composición de fases cristalinas, aunque con picos más anchos debido a la disminución del tamaño de cristalita producto de la molienda.

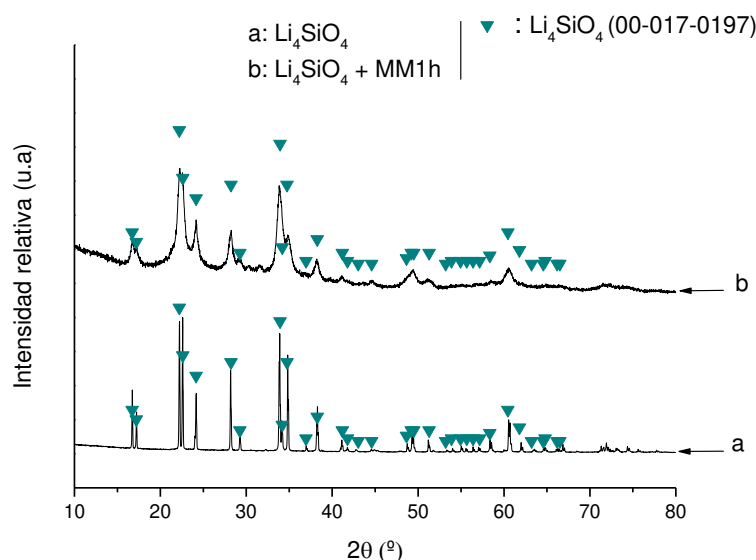


Figura 3.1: Difractograma de la muestra sintetizada antes (a) y después de la molienda (b).

La **Figura 3.2.a** corresponde al difractograma de la muestra molida, la cual ya fue analizada en el apartado anterior (**Figura 3.1.b**) y se emplea como referencia. La **Figura 3.2.b** corresponde a la muestra molida luego de una hora de tratamiento de humedad. En ella se identifican las fases correspondientes a Li₄SiO₄ (ICDD: 00-017-0197), Li(OH) (ICDD: 00-032-0564) y Li₂CO₃ (ICDD: 00-009-0359). Por su parte, la **Figura 3.2.c** muestra el patrón de difracción de la muestra molida luego de un tiempo de exposición a la humedad de 5 horas. Se pueden visualizar las fases correspondiente a Li₄SiO₄ (ICDD: 00-017-0197), Li(OH) (ICDD: 00-032-0564), Li₂CO₃ (ICDD: 00-009-0359) y Li(OH).H₂O (ICDD: 01-076-01074), la presencia de este último compuesto indica la hidratación de las especies ya previamente formadas a medida que el periodo de exposición a la atmósfera húmeda aumenta.

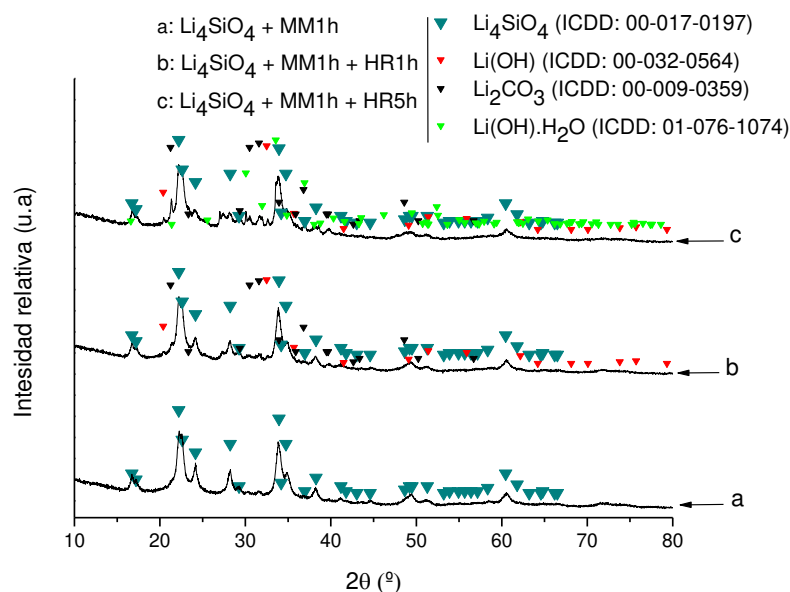


Figura 3.2: Difractograma de la muestra antes (a) y después del tratamiento de humedad (b,c)

La **Figura 3.3** muestra el espectro de FTIR de la muestra sintetizada y molida antes y después de los ensayos de humedad. Los picos observados a los 3677 cm^{-1} presentes en los espectros b y c se justifican para Li(OH) , mientras que solo en el espectro c se visualiza la presencia de $\text{Li(OH)·H}_2\text{O}$ con un singlete a los 3588 cm^{-1} , lo cual resulta lógico ya que a mayor tiempo de exposición a la humedad, mayor grado de hidratación de las especies presentes. El duplete localizado entre los 1500 y los 1428 cm^{-1} corresponde al Li_2CO_3 . Se debe tener en cuenta que este pico se agudiza a medida que el tratamiento de humedad es más prolongado, dándonos esto una idea semicuantitativa de la cantidad de este compuesto en cada muestra.

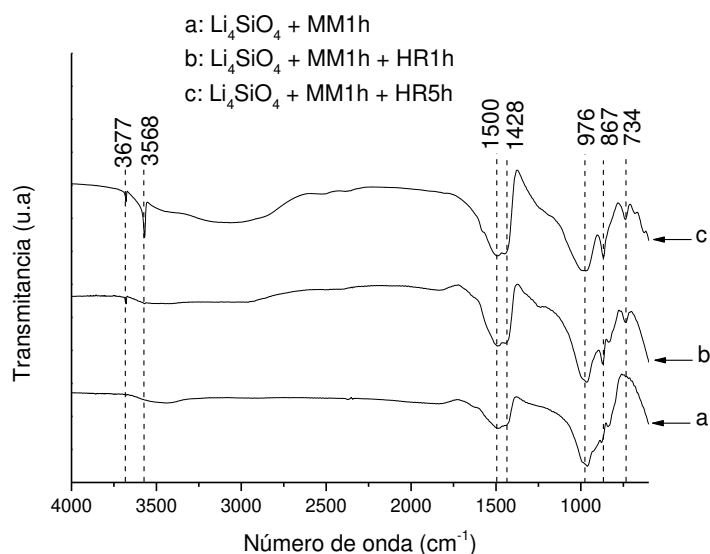


Figura 3.3: FTIR del Li_4SiO_4 antes (a) y después del tratamiento de humedad (b,c)

Finalmente, los últimos 3 picos más notorios, 976, 867 y 734 cm^{-1} corresponden al enlace O-Si propio del silicato de litio.

3.1.2 Síntesis, tratamiento de humedad y flujo de CO_2 : Análisis morfológico

En la **Figura 3.4** se observa una partícula del Li_4SiO_4 luego de la molienda mecánica, la cual presenta una textura rugosa (“escamas”), contrario a lo esperado en materiales sometidos a este proceso físico. Las partículas observadas presentan formas irregulares y con un tamaño promedio de $15\mu\text{m}$. Al analizar la distribución de la composición química de la muestra, por Análisis dispersivo en energía (EDS) se obtuvo una distribución uniforme en la composición de los elementos Si, O y C (no es posible detectar litio por esta técnica). No es concluyente que las “escamas” observadas sean de Li_2CO_3 .

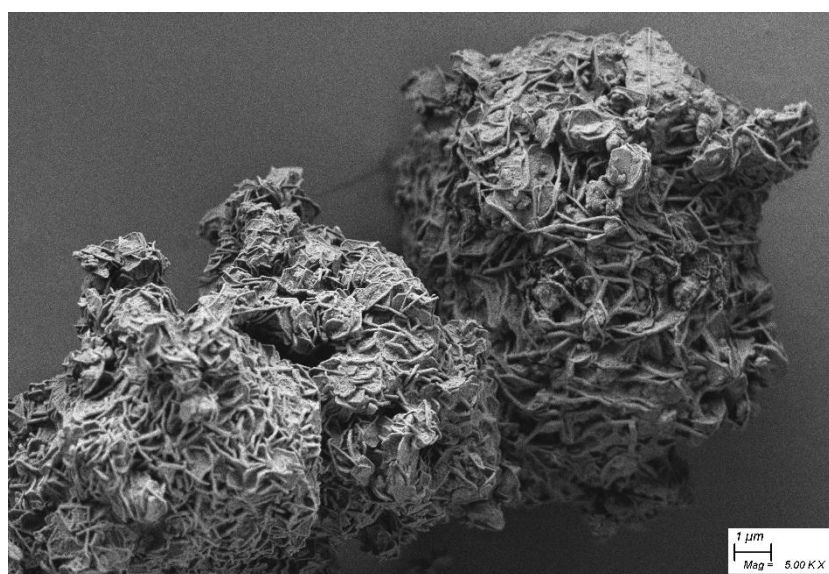


Figura 3.4: Micrografía de la superficie de Li_4SiO_4 molido



Figura 3.5: Micrografía de barrido de la superficie de Li_4SiO_4 molido luego de 1 hora de humedad

La micrografía de la **Figura 3.5** pertenece a la muestra de Li_4SiO_4 molido luego de una hora de tratamiento de humedad. Se muestran partículas con bodes lisos, claramente modificadas por la exposición a la humedad.

3.1.3 Síntesis: Determinación del área superficial

En la siguiente tabla se resumen los valores de área determinados para la muestra de Li_4SiO_4 antes y después de la molienda. Se observa el efecto de este proceso físico de molienda en el incremento del área. Analizando las isotermas de absorción de cada muestra se concluye que se trata en ambos casos de sólidos no porosos.

	Área BET (m^2/g)
Li_4SiO_4	> 0.5
Li_4SiO_4 Molido	~ 4

Tabla 3.1: Áreas BET de la muestra sintetizada y después de la molienda

3.2.1 Evaluación de capacidad de captura

La **Figura 3.6** corresponde al análisis termogravimétrico realizado a la muestra antes y luego de los diferentes experimentos de exposición a humedad relativa.

La muestra luego de síntesis y molienda presenta una capacidad de captura del 15.6 %. Por su parte, las muestras luego del tratamiento de humedad presentan una disminución en dicha capacidad, luego de 1 hora de tratamiento la muestra es capaz de capturar aproximadamente el 8% de CO_2 y luego de 5 horas de exposición solo un 3% del gas. Sin embargo, durante la descarbonatación, las muestras liberan mayor cantidad de CO_2 que el medido en el TG durante la carbonatación.

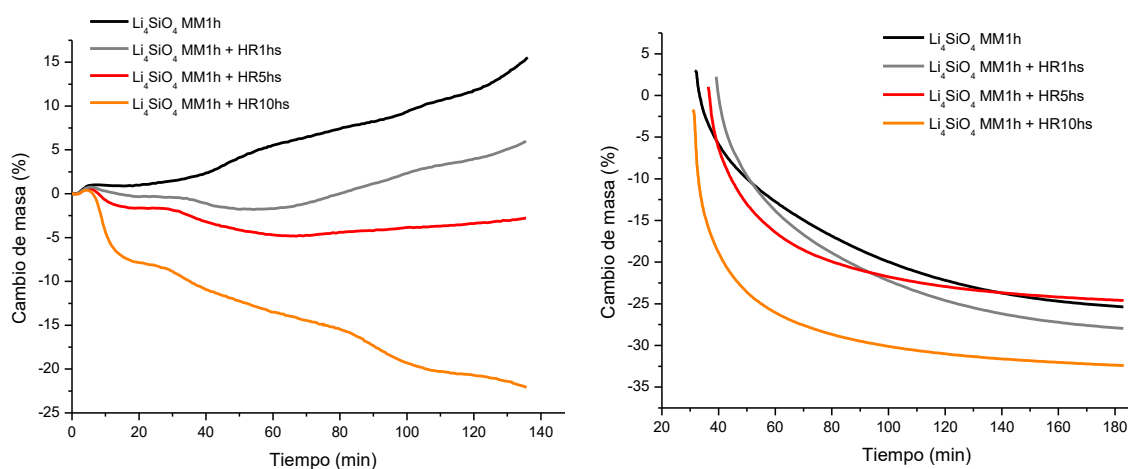


Figura 3.6: TG del Li_4SiO_4 molido y luego de las diferentes pruebas de humedad. a: etapa de carbonatación y b: etapa de descarbonatación

Esto indica que la muestra fue parcialmente carbonatada durante la manipulación al aire y este proceso se favorece a mayor tiempo de exposición a la humedad. Una vez colocada en la balanza, la carbonatación inicial medida es menor a mayor tiempo de exposición a la humedad. Es importante mencionar que este proceso se revierte luego de la primera descarbonatación.

Por su parte, las **Figuras 3.7 y 3.8** muestran el comportamiento en la captura del material expuesto 1 y 5 horas a un flujo puro de CO₂, respectivamente. Durante la primera hora de exposición a CO₂ no se observa una ganancia de masa apreciable (<1%). Luego, durante la carbonatación el material captura aproximadamente 22% y 20% para 1 y 5 h en flujo de CO₂, respectivamente, mientras que durante la descarbonatación en ambos casos se libera alrededor de 33%. Esto evidencia que las muestras capturan CO₂ previo a la medición, en forma similar a lo observado en los ensayos de humedad.

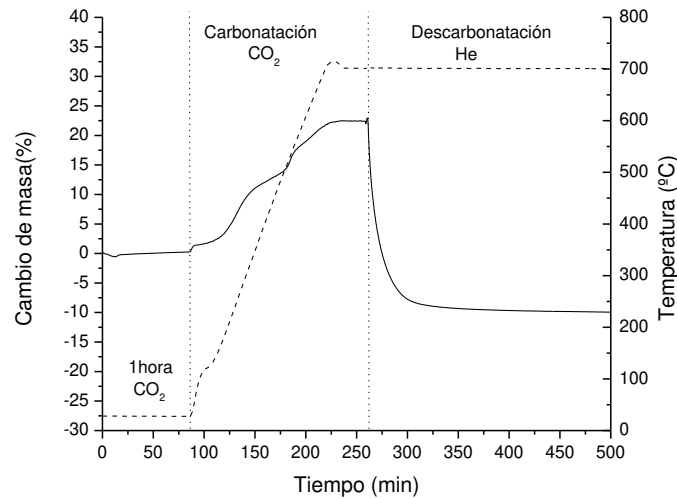


Figura 3.7: TG del Li₄SiO₄ molido y luego de exposición a flujo de 1 hora CO₂

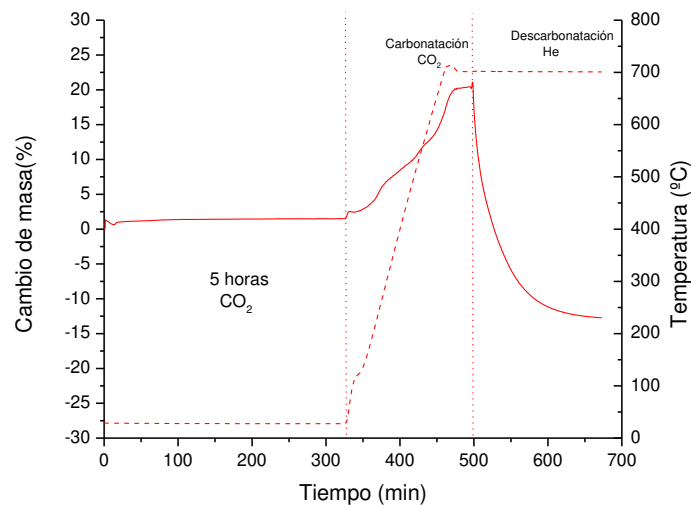


Figura 3.8: TG del Li₄SiO₄ molido y luego de exposición a flujo de 5 hora de CO₂

3.2.2 Evaluación de capacidad de captura: Análisis composicional

La **Figura 3.9** corresponde a la muestra sometida al tratamiento de 1 y 5 horas de humedad antes y luego de que se le realizara el análisis termogravimétrico.

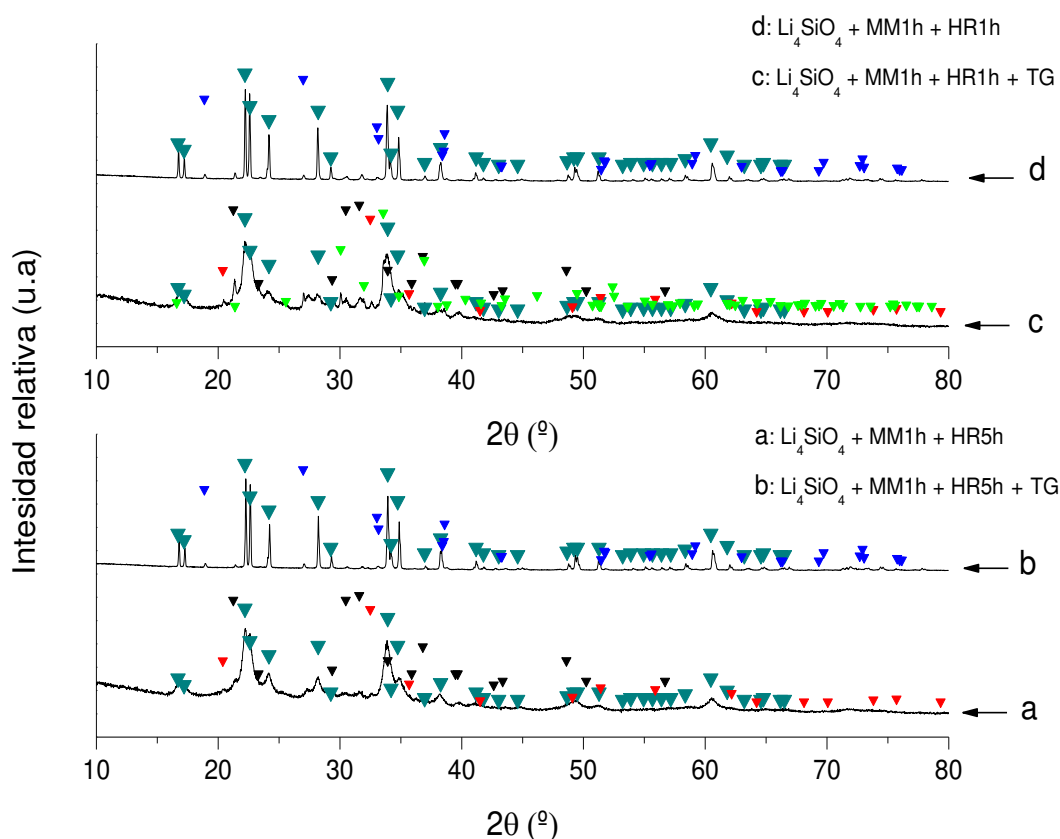


Figura 3.9: Difractograma de las muestras descarbonatadas

▼	: Li_4SiO_4 (ICDD: 00-017-0197)
▼	: $\text{Li}(\text{OH})$ (ICDD: 00-032-0564)
▼	: Li_2CO_3 (ICDD: 00-009-0359)
▼	: $\text{Li}(\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{O}$ (ICDD: 01-076-1074)
▼	: Li_2SiO_3 (ICDD: 01-083-1517)

Símbolos para cada fase cristalina diferentes fases identificadas en la **Figura 3.9**

En la **Figura 3.9.b** se verifica la presencia mayoritaria de Li_4SiO_4 (ICDD: 00-017-0197) y Li_2SiO_3 (ICDD: 01-083-1517), siendo éste último, uno de los productos de la reacción de descarbonatación. También se puede ver que los picos presentan un ancho similar al de los picos del difractograma de la muestra recién sintetizada, por lo que se supone un aumento de la cristalinidad con respecto a la muestra molida. No se evidencia la presencia de los compuestos productos del tratamiento de humedad ($\text{Li}(\text{OH})$ Y $\text{Li}(\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{O}$).

La **Figura 3.9.d** corresponde al difractogramas de Li_4SiO_4 molido, sometido a 5 horas de humedad y descarbonatado luego del TG. Las fases identificadas son las mismas que las en

la **Figura 3.9.b**. Estos resultados demuestran la reversibilidad del proceso de captura, desde el ortosilicato al metasilicato de litio (reacción 1).

3.2.3 Evaluación de la capacidad de captura: Análisis morfológico

En la **Figura 3.11** se observan partículas del Li_4SiO_4 molido, después del tratamiento de humedad de 1 hora, la muestra se encuentra descarbonatada al momento de la toma micrográfica.

Las partículas presentan una forma irregular con un tamaño medio de $50\ \mu\text{m}$. El aumento del tamaño, comparado con los $15\ \mu\text{m}$ de las partículas de la muestra antes de interactuar con CO_2 , podría deberse a la aglomeración (sinterización) de las partículas a altas temperaturas (700°C). A mayores aumentos de la micrografía, se observan las caras lisas con bordes definidos de cada partícula.

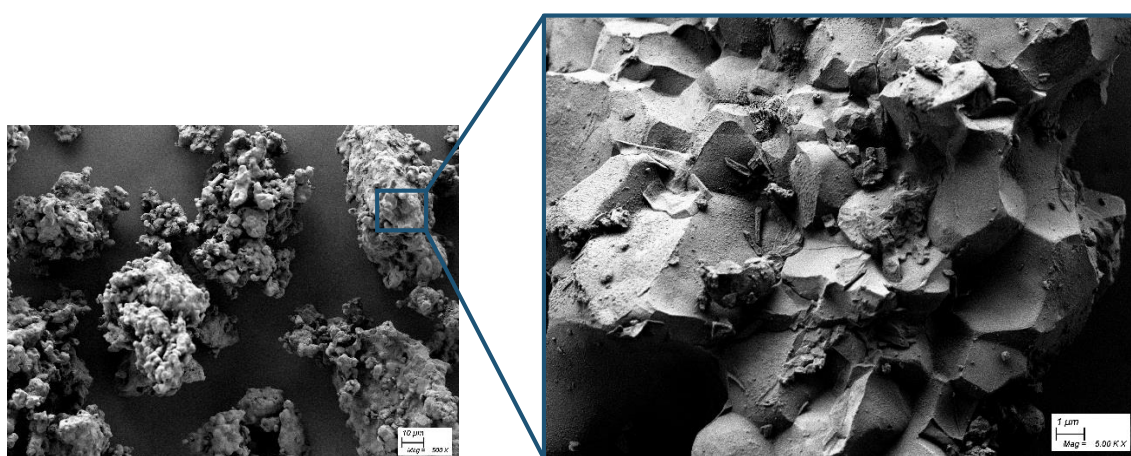


Figura 3.11: Micrografía de la superficie de Li_4SiO_4 molido luego de TG

3.3.1 Soporte

En tabla que se muestra a continuación, se resumen los valores de área determinados para el soporte elegido (Cordierita) antes y después del tratamiento ácido.

Si bien, es notorio un aumento de dos órdenes de magnitud en el área, esto no se corresponde con los valores reportados por la bibliografía donde se espera un aumento mayor []. Lo anterior, podría deberse a no alcanzar las condiciones de temperatura indicadas en la bibliográfica consultada. Analizando las isotermas de absorción de N_2 de cada muestra, se concluye que en ambos casos se trata de sólidos no porosos (ausencia de mesoporosidad y de poros en el rango de $< 100\ \text{nm}$).

	Área BET (m^2/g)
Cordierita	> 0.5
Cordierita Tratada	~ 2

Tabla 3.2: Áreas BET de Cordierita antes y después del tratamiento ácido

3.3.2 Soporte: Análisis morfológico

A pesar de obtener un cambio en el área específica luego del tratamiento con medio ácido, no se observan cambios morfológicos apreciables en las observaciones por microscopía electrónica de barrido (comparar **Fig. 12** y **Fig. 13**). En la **Figura 12** se muestra la naturaleza porosa del soporte, con poros de varios micrones y de forma irregular (no cuantificables con la técnica de isotermas de N₂). Una ampliación de la superficie del soporte permite identificar la presencia de cristales tubulares de la cordierita, con cierta alineación.

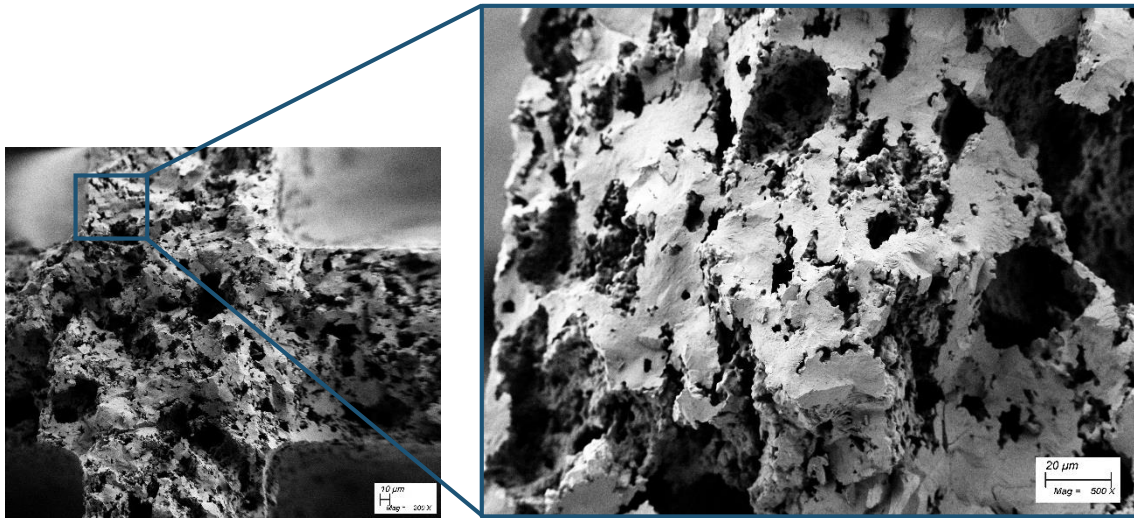


Figura 3.12: Micrografía de la superficie de la Cordierita previo al tratamiento ácido

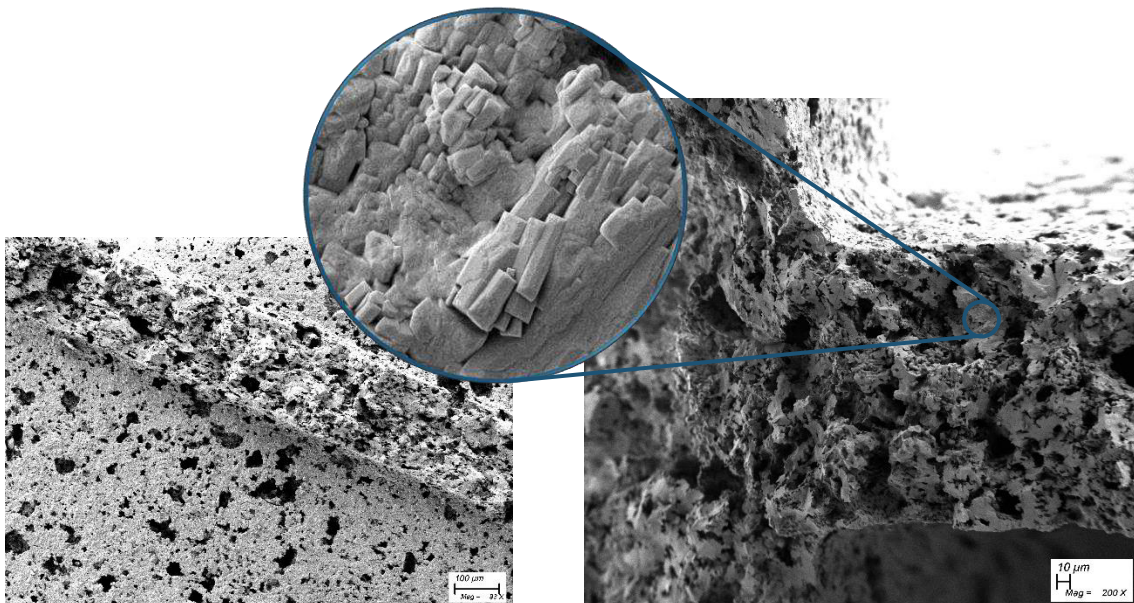


Figura 3.13: Micrografía de la superficie de la Cordierita luego del tratamiento ácido.

3.4 Dispersión del material absorbente

Se analizó la posibilidad de dispersar el Li_4SiO_4 molido en un solvente, seleccionándose para este fin el agua.

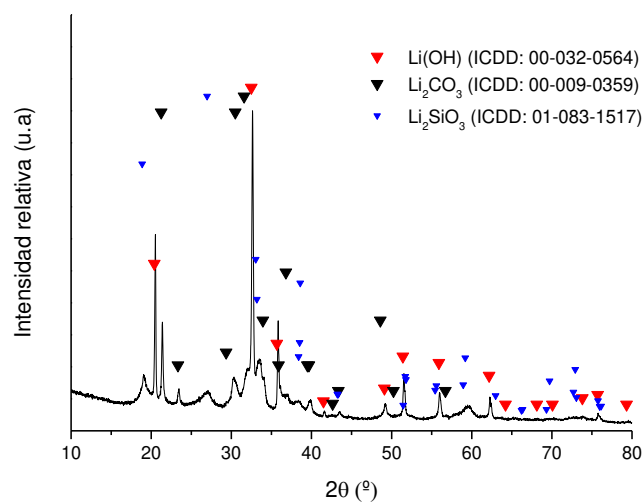


Figura 3.8: Difractograma Li_4SiO_4 molido luego del ensayo de solubilidad

La **Figura 3.13** corresponde al difractograma del Li_4SiO_4 molido, luego del ensayo de dispersión en agua y su posterior evaporación. Se puede identificar la presencia de Li(OH) (ICDD: 00-032-0564), Li_2SiO_3 (ICDD: 00-083-1517) y Li_2CO_3 (ICDD: 00-009-0359). Este resultado indicaría que el agua no sería un solvente adecuado para el estudio de dispersión del ortosilicato de litio, ya que implica la descomposición del material capturador. Esto demuestra que el Li_4SiO_4 es parcialmente soluble en agua a la temperatura del ensayo, es decir $70\text{ }^\circ\text{C}$ a presión reducida. El resultado confirma que una de las tarjetas de seguridad (sección §2) proporciona información válida.

4 CONCLUSIÓN

Se sintetizó el Li_4SiO_4 mediante un proceso combinado de molienda mecánica (1 h) seguido de un tratamiento térmico a $800\text{ }^\circ\text{C}$ por 5 h en aire. El botón de Li_4SiO_4 obtenido fue molido para modificar su superficie y manipulado en condiciones ambiente. El polvo de Li_4SiO_4 producido fue sometido a ensayos de humedad y flujo de CO_2 a diferentes tiempos de exposición. Se observó la formación de $\text{Li}(\text{OH})$, $\text{Li}(\text{OH})\cdot\text{H}_2\text{O}$ y Li_2CO_3 a tiempos prolongados de exposición a la humedad. Luego, la capacidad de captura durante la carbonatación se reduce al aumentar el tiempo de exposición. Sin embargo, la posterior descarbonatación alcanza valores cercanos a la capacidad teórica esperada para este material. Este comportamiento se atribuye a la formación de Li_2CO_3 a partir de $\text{Li}(\text{OH})$ y $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$, es decir la carbonatación durante la manipulación a temperatura ambiente. Por otro lado, luego de la exposición a flujo de CO_2 se observa un comportamiento similar. Sin embargo, la cantidad capturada del gas es mayor, debido a la menor hidroxilación de la superficie que solo ocurre por exposición al aire durante la molienda y traslado de la muestra. Por lo tanto, el polvo de Li_4SiO_4 es sensible a la humedad del ambiente, que puede hidroxilar la superficie y luego en presencia de CO_2 del aire formar Li_2CO_3 .

En la búsqueda de dispersar el Li_4SiO_4 en un soporte inerte para posibilitar su implementación en un dispositivo tipo “reactor de lecho relleno”, se realizaron ensayos con cordierita. Este cerámico es ampliamente usado en la industria como soporte de catalizadores y se buscó aprovechar su estabilidad química y térmica para dispersar el Li_4SiO_4 . En una primera instancia se aplicó un tratamiento de ataque ácido al soporte, con el fin de aumentar su área superficial. Luego de tratar la cordierita por 6 h con HCl 37% a $80\text{ }^\circ\text{C}$, se obtuvo un aumento de área específica desde < 0.5 a $\sim 2\text{ m}^2/\text{g}$. Las pruebas iniciales de dispersión del material absorbedor se realizaron en agua como solvente. Se observó que el agua no es un solvente adecuado porque descompone y/o solubiliza parcialmente el Li_4SiO_4 .

Los estudios realizados en el marco de esta beca de verano han permitido clarificar aspectos de la estabilidad del Li_4SiO_4 en aire y avanzar en la búsqueda de métodos de dispersión del material absorbedor.

5 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Adrián Queijo Fraga; *Sistemas de captura de CO₂*, (Tesis de maestría); Escuela técnica superior de neumática y maquinas, Universidad de Coruña, España; 2017.
- [2] E. Rubin, Leo Meyer L. and Coninck H. *IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*; ISBN 92-9169-319-7; pp.18-30; 2005.
- [3] *CO₂ Emisión from Fuel Combustion: Highlights*; Statistics Publication of the International Energy Agency (IEA); 2009.
- [4] J. Srinivasan; *Resonance: Journal of Science Education*, 13; pp: 1148-1155; 2008.
- [5] Q. Wang, J. Luo, Z. Zhong and A. Borgna; *Energy and Environmental Science*, 4; pp: 42-55; 2011.
- [6] Kai Man Kerry Yu, Igor Curcic, Joseph Gabriel, and Shik Chi Edman Tsang, *ChemSusChem*, 1; pp: 893– 899; 2008
- [7] José Ortiz Landeros; *Fabricación de materiales basados en silicatos de litio (Li₄SiO₄ y Li₂SiO₃) para captura de CO₂*, (Tesis doctoral); Instituto politécnico nacional, escuela superior de ingeniería e industria extractiva; D.F. México; 2011.
- [8] M. Escobedo, V. Guzmán, D. Lardizábal, V. Collins and A. López, *Catalysis Today* 107-108; pp: 863-87; 2005.
- [9] *The global status of CCS. Sumar Report*; Global CCS Institute; 2016
- [10] D. Figueroa J., T. Fout, S. Plasynski, *J. of Greenhouse Gas Control* 2; pp: 9-20; 2008.
- [11] Chang C., Wang C., p.n. Kumta; *Materials and Desing* 22; pp: 617- 623; 2001.
- [12] Xiong R., Ida J. I. and Lin Y.S.; *Chem. Eng. Sci.*, 58; pp: 4377; 2003.
- [13] Nakagawa K. and Ohashi T., *J. Electrochem. Soc.*, 145; pp: 13344; 1998.
- [14] C. Gough; *J. of Greenhouse Gas Control* 2; pp: 155-168; 2008.
- [15] Kato M., Nakagawa K. Essaki K., Maezawa Y., Takeda S., Kogo R., and Hagiwara Y.; *Int. J.Appl. Ceram. Technol.*, 2; pp: 467-475; 2005.

[16] María Laura Grasso, Pierre Arneodo Larochette, Fabiana Gennari; *Estudio del efecto de las condiciones de almacenamiento de muestras de Li_4SiO_4 sobre sus propiedades de captura de CO_2* ; Asociación de física Argentina; 2018.

[17] Albert N. Shigapov, George W. Graham, Robert W. McCabe, Michellene Paputa Peck, H. Kiel Plummer Jr; *The preparation of high-surface area cordierite monolith by acid treatment*, Applied Catalysis A: General 182; pp: 137-146; 1999.

EFECTO DE LA HUMEDAD Y DEL CO₂ SOBRE LAS PROPIEDADES DE ALMACENAMIENTO DE CO₂ DEL MATERIAL Li₄SiO₄

López, F. C.; Grasso M. L.; Arneodo Larochette P.; Gennari, F.
 Instituto Balseiro
 Centro Atómico Bariloche - Comisión Nacional de Energía Atómica



INTRODUCCIÓN

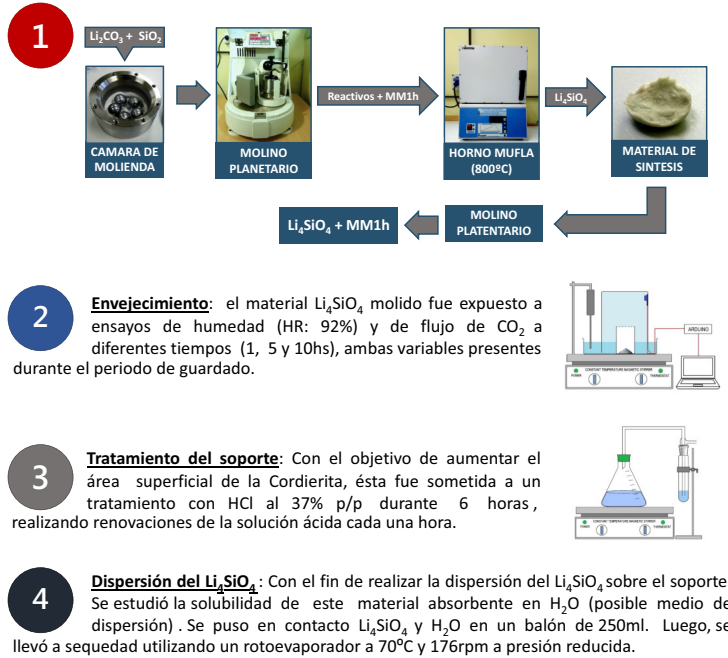
En las últimas décadas, estudios sobre remediación ambiental se han orientado al desarrollo de materiales sólidos capaces de capturar gases como estrategia para reducir las concentraciones atmosféricas de los gases de efecto invernadero (GEI). Una alternativa efectiva para reducir dichos valores, es capturar los GEI en los sitios de generación, por ejemplo, la captura selectiva de CO₂ en las chimeneas de las plantas de generación de energía eléctrica o las cementeras. Una de las alternativas consideradas, es el uso del Ortosilicato de Litio (Li₄SiO₄), el cual puede ser sintetizado a partir de precursores químicos de bajo costo y cuya capacidad teórica para la captura de CO₂ es de 36,7% p/p.

El presente trabajo se ha enfocado en la síntesis de Li₄SiO₄ y la evaluación de sus propiedades de captura de CO₂ efectiva dada por el efecto del tiempo de exposición del material al aire, en condiciones de humedad relativa variable y flujo de CO₂ a temperatura ambiente.

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es, por una parte estudiar materiales cerámicos de litio para su uso como absorbentes de CO₂, atendiendo al efecto de variables ambientales, tales como la humedad relativa y el CO₂ presente en el aire y la relación de dichas variables con la capacidad y la velocidad de captura del material. Luego, evaluar la dispersión del Li₄SiO₄ sobre un soporte inerte (Cordierita) para mejorar el contacto entre el material absorbente y el CO₂.

METODOLOGÍA



Síntesis y ensayos de humedad

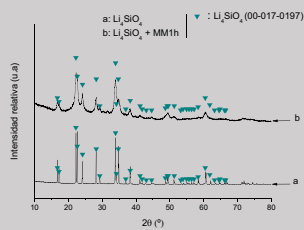


Fig 1: XRD del Li₄SiO₄ antes y después de MM1h

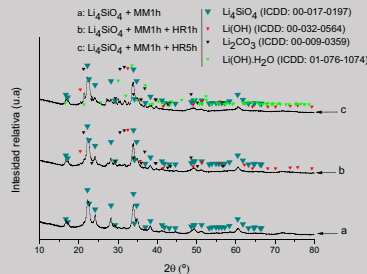


Fig 2: XRD del Li₄SiO₄ MM1h después del tratamiento de humedad

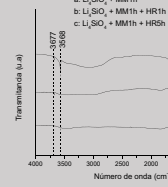


Fig 3: FTIR de la muestra antes y después del tratamiento de humedad

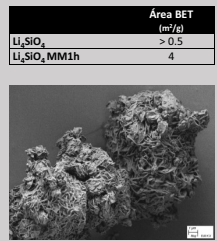


Fig 4: Micrografía SEM de Li₄SiO₄

Estudio de la capacidad de captura de CO₂

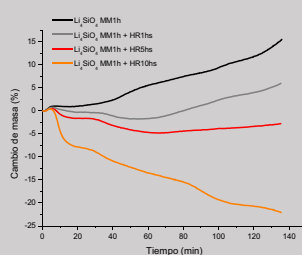


Fig 5: TG del Li₄SiO₄ MM1h y luego de las diferentes pruebas de humedad (carbonatación)

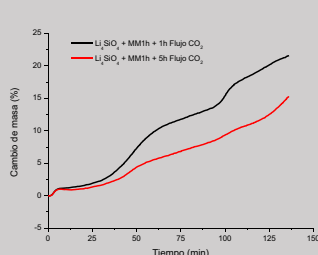


Fig 6: TG del Li₄SiO₄ MM1h y luego de las diferentes pruebas con CO₂ (carbonatación)

Tratamiento del soporte inerte

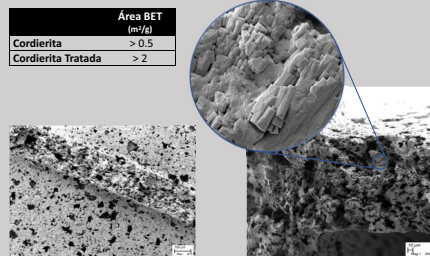


Fig 7: Micrografía SEM de la superficie de la Cordierita posterior al tratamiento ácido

Dispersión de Li₄SiO₄

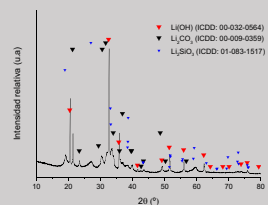


Fig 8: XRD Li₄SiO₄ MM1h luego del ensayo de solubilidad en H₂O

CONCLUSIONES

Se concluye que el efecto del vapor de H₂O (presente en el aire) disminuiría la capacidad de captura de CO₂ del Li₄SiO₄ a la temperatura de trabajo (700°C), pudiendo deberse a la formación de Li(OH) y Li(OH).H₂O, ya que éstos presentan una elevada capacidad para interactuar con CO₂ aún a temperaturas bajas (ejemplo, durante el almacenamiento).

Por otro lado, el tratamiento ácido realizado sobre el soporte generó un leve aumento del área superficial, pero no se corresponde con los valores reportados en bibliografía. Esto podría deberse a que la temperatura requerida para el ensayo no fue suficiente. Finalmente, no se recomienda al H₂O como medio dispersión del Li₄SiO₄ (como solvente) debido a que provoca su descomposición en Li₄SiO₄ en Li(OH) y Li₂SiO₃.

AGRADECIMIENTO

- Al Programa de Becas de Verano del Instituto Balseiro.
- A mis directores por brindarme sus conocimientos y tiempo con la mayor de las predisposiciones.
- Finalmente a los coordinadores del programa por su predisposición y acompañamiento.

Armado de un medidor de flujo de muones

Autor: Germán Chiarelli¹

¹Licenciado en Física, Universidad de Buenos Aires, Argentina

Director: Xavier Bertou²

²Laboratorio Detección de Partículas y Radiación

1 de marzo de 2019

Resumen

Con el objetivo final de realizar mediciones en favor de detectar la materia oscura, es necesario conocer todo el ruido proveniente de partículas ionizantes del lugar a medir. En este caso, es de interés estudiar completamente una instalación situada en una mina en Sierra grande, Rio Negro, a 400 mts bajo tierra. Se espera, casi exclusivamente, la presencia de muones. Con esto en mente, se pusieron a punto y se caracterizaron 4 detectores centelladores para medir en coincidencia. Durante el trabajo se los aisló lumínicamente, y se los reforzó estructuralmente para evitar cualquier tipo de movimiento accidental durante su transporte y manejo. Además, se analizó la uniformidad de los detectores, colocando una fuente radioactiva en distintos puntos de los mismos, encontrando mayor captura en la zona central y menor en los bordes, para todos los casos

Palabras claves: Muon, centellador, partículas subatómicas, PMT

Abstract

Looking forward to make measurements in favor of detecting dark matter, it is necessary to know all the noise coming from ionizing particles of the place to be measured. In this case, it is relevant to study an installation located in Sierra Grande, Rio Negro, 400 meters underground. It is heavily expected the presence of muons, over other types of particles.

With this in mind, 4 scintillator detectors were tuned and characterized to measure in coincidence. During the work they were isolated lightly, and reinforced structurally to avoid any kind of accidental movement during transport and handling. Moreover, the uniformity of the detectors is analyzed, placing a radioactive source in different points of the same. A lack of homogeneity was found that was characterized and was comparable between detectors

Keywords: Muon, scintillator, subatomic particles, PMT

Índice

1. Introducción	3
1.1. Rayos C3smicos	3
1.2. Componentes de una cascada	3
1.3. Motivaci3n del trabajo	4
1.3.1. Sitio de medici3n	4
1.4. Estado del arte	4
2. Desarrollo experimental	5
2.1. Centellador	5
2.2. Fotomultiplicadores	5
2.3. Construcci3n de los detectores de centelleo	6
2.4. Caja estanca a la luz	6
2.5. Detecci3n y an3lisis de la se1al	7
3. Resultados y discusiones	7
3.1. Se1ales medidas	8
3.2. Sellado de las cajas	8
3.3. Mejoras al sistema centellador-PMT	9
3.4. Caracterizaci3n de los detectores	9
4. Conclusiones	11
4.1. Trabajo a futuro	11

1. Introducción

1.1. Rayos Cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas que llegan desde el espacio y bombardean constantemente a la Tierra desde todas las direcciones. La mayoría de estas partículas son núcleos de átomos o electrones. Algunas de ellas son más energéticas que cualquier otra partícula observada en la naturaleza. Los rayos cósmicos ultra-energéticos viajan a una velocidad cercana a la de la luz y tienen cientos de millones de veces más energía que las partículas producidas por cualquier acelerador en el mundo.[1].

El descubrimiento de estos rayos cósmicos tuvo lugar a principios del siglo XX. En 1912, Victor F. Hess afirmó que la mejor interpretación para sus resultados consistía en suponer una radiación de gran poder penetrante, incidiendo desde arriba de la atmósfera[2]. Sin embargo, recién 24 años más tarde se descubrió que la radiación llegaba en forma de cascadas de partículas, gracias a P. Auger, R. Maze y T. Grivet-Meyer, que observaron coincidencias entre contadores separados 5 m entre sí[3].

Cuando un rayo cósmico o *primario* ingresa a la atmósfera, sufre su primera colisión con un núcleo de alguno de los elementos que la constituyen típicamente unos 12 km por sobre el nivel del mar. En el choque se generan más partículas, *secundarios*, de identidad diferente de la del primario. Los secundarios pueden o bien interactuar nuevamente, o bien decaer, generando más secundarios en ambos casos. Cual de estos procesos gana, depende de la vida media de la partícula en cuestión, de su energía y de la densidad del aire. A medida que la cascada se desarrolla, la energía de una cierta partícula secundaria es una fracción cada vez más pequeña de la energía del primario. En algún momento, la energía es suficiente solo para interactuar con el medio a través de la ionización, decaer o ser absorbidas. A partir de ese momento, el número de secundarios empieza a disminuir.

1.2. Componentes de una cascada

Por cada primario que colisiona con la atmósfera, se genera una cascada de secundarios particular. Es interesante describir las distintas partículas que se generan y las componentes más importantes.

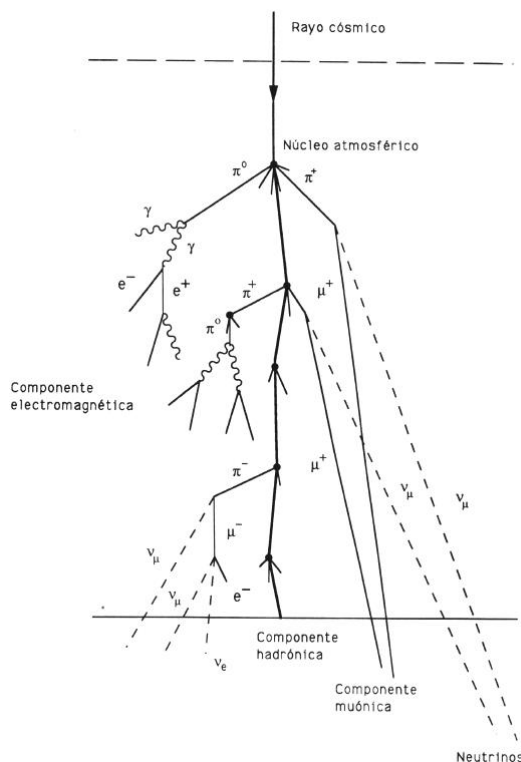


Figura 1: Esquema de una cascada de partículas iniciada por un rayo cósmico de alta energía. Se distinguen las componentes más importantes de la cascada: la componente electromagnética dominante, la componente hadrónica, y la muónica.

En la figura 1 se muestra un esquema de una cascada, explicitando las partículas que constituyen cada componente. Estas son:

- La componente hadrónica, conformada por protones y neutrones. En sus interacciones producen mesones como piones neutros π^0 , piones cargados $\pi^+\pi^-$ y kaones.

- La componente electromagnética, la dominante en todas las cascadas, en la que hay fotones γ , electrones e^- y positrones e^+ .
- la componente muónica, integrada por muones μ^- y antimuones μ^+

La componente electromagnética es la dominante, la más estudiada, y la mejor reproducida por las simulaciones. Por ejemplo, a 10 EeV un protón que interactúa con la parte superior de la atmósfera produce a nivel del mar del orden de 3×10^{10} partículas. De estas, el 99 % son fotones y electrones o positrones. Sus energías están dentro del rango de 1 a 10 MeV y transportan 85 % de la energía total. El resto de las partículas son muones, con una energía promedio de 1 GeV (10 % de la energía aprox.), piones de unos pocos GeV, neutrinos y bariones[4].

En este trabajo se tiene especial interés por la componente muónica.

1.3. Motivación del trabajo

Aproximadamente el 85 % de la materia del universo corresponde a la llamada *materia oscura*. [6]. Esta definición corresponde a una hipotética forma de masa necesaria para comprender ciertas observaciones astrofísicas, que incluyen efectos gravitacionales, que solo pueden ser explicados si hay más masa de la que se ve.

Se la llama materia oscura porque no interactúa con la radiación electromagnética, como la luz, y es invisible en todo el espectro, lo cual genera que sea extremadamente difícil de detectar.

Se sospecha que es de una naturaleza no-bariónica, pudiendo ser una partícula sub-atómica aún no descubierta[7]. El primer candidato a materia oscura es una especie de partícula elemental que no fue descubierta, llamada *WIMPs* por sus siglas en inglés *Weakly Interacting Massive Particles*. Actualmente se están realizando experimentos en busca de detectar y estudiar estas partículas de materia oscura, pero todavía ninguno alcanzó un resultado aceptado por la comunidad científica[8].

La hipótesis que se busca estudiar en el presente trabajo, se basa en un flujo aparente de materia oscura desde Cygnus debido al movimiento propio del sol dentro de la galaxia. Éste incide casi perpendicularmente sobre los 40° latitud sur y media vuelta de la tierra después, se encuentra diametralmente opuesto. Esto significa que al medir en esa latitud, se espera una modulación entre las partículas que inciden directamente, y 12 hs después, las que tienen que atravesar el núcleo masivo de la tierra.

Es este contexto es que el actual trabajo busca poner a punto una serie de detectores de muones para caracterizar la zona de medición antes de comenzar a buscar la materia oscura. Es muy importante caracterizar los eventos de detección, ya que, en caso de comprobarse la hipótesis planteada, estos serán modulados diariamente por el cambio del flujo de materia oscura.

1.3.1. Sitio de medición

En Sierra grande, Rio Negro, hay una mina que ya se usó para intentar medir partículas en el pasado. Ahora, 20 años después, con nueva tecnología, es de interés regresar a dicha mina en busca de materia oscura. Típicamente se eligen ubicaciones bajo tierra, para filtrar la mayor parte de las partículas de menor energía de los rayos cósmicos. Aún así, alguna partículas muy energéticas alcanzan a pasar, como es el caso de los muones. Este lugar en particular es elegido porque se encuentra a 40° latitud sur, y se conserva en condiciones seguras para acceder y medir.

Es de interés caracterizar este *fondo* de muones con los detectores desarrollados.

1.4. Estado del arte

Hoy día existen muchos experimentos a lo largo del globo buscando la materia oscura. En la mayoría de los casos lo que se utilizan son detectores lo más aislados posibles y con muy bajo ruido, para que la señal detectada sea una interacción con materia oscura. Limitaciones técnicas no permiten, hasta ahora, mirar por debajo de cierto umbral de energías.

El primer (y único) experimento que dice haber detectado materia oscura, es el del DAMA[9]. En este se mide una magnitud que corresponde al flujo de materia oscura que penetra la tierra, mientras esta viaja a favor del mismo, y en contra. Se esperaba ver una modulación distinta en cada caso, de frecuencia anual, y esto mismo se observó. Este experimento es bastante cuestionado, y existen otros experimentos que lo contradicen, como el caso del LUX y el SuperCDMS [10].

Por otro lado, el trabajo actual apunta a realizar otro tipo de medición de materia oscura. En este caso, se quiere observar una modulación diaria en las interacciones que ocurren en el detector. El ruido en si mismo no es un problema, ya que se puede caracterizar y luego observar las modulaciones sobre este. Esta configuración permite buscar en umbrales de energías mucho menores a los estudiados hasta el momento.

2. Desarrollo experimental

Existen varias maneras de construir un detector de partículas subatómicas. Típicamente se necesita que dichas partículas interactúen con algún material, y luego medir esta interacción.

En el caso de los tanques Cherenkov del conocido observatorio Pierre Auger, estos utilizan agua y la emisión que se genera por el efecto Cherenkov de las partículas al viajar más rápido que la luz en el medio [5]. Estos fotones son captados luego por uno o más fotomultiplicadores.

En el caso de estudio de este trabajo se utiliza un plástico centellador acoplado a un fotomultiplicador.

2.1. Centellador

Un centellador refiere a materiales que cuando son expuestos a radiación ionizante, emiten un pequeño destello de luz, es decir un centelleo. Este fenómeno ocurre cuando la radiación interactúa con la materia, excitando e ionizando un gran número de átomos y moléculas, las cuales al volver a su estado fundamental, se desexcitan emitiendo fotones con rango de energía en el espectro visible o en los alrededores de él.

La mayoría de los materiales transparentes producen una pequeña cantidad de luz de centelleo cuando sobre ellos incide radiación ionizante. Sin embargo, en algunos pocos la conversión de energía de excitación a luz es eficiente: a estos los llamamos materiales centelladores.

2.2. Fotomultiplicadores

Para que un centellador sea útil en como detector de partículas es necesario acoplarle un fotodetector que traduzca la luz liberada en una señal eléctrica. Los tubos fotodetectores (PMT) son los dispositivos adecuados para esto [11]. Un PMT cuenta con un fotocátodo, el cual libera electrones cuando sobre él inciden fotones visibles, llamados fotoelectrones; y con un arreglo de electrodos conectados a alta tensión creciente llamados dínodos, encargados de la multiplicación de los fotoelectrones. En la figura 2 se puede ver un esquema de un centellador acoplado a un tubo fotomultiplicador.

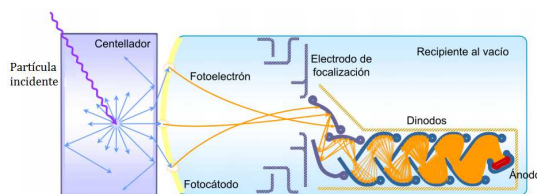


Figura 2: Esquema de un tubo fotomultiplicador acoplado a un centellador.

El fotocátodo es una fina capa de material fotosensible, de unos pocos nm, cuya función es liberar la mayor cantidad de electrones como sea posible, dada una cantidad de fotones incidentes. Cuando un fotón incide, transfiere su energía a un electrón del material, alrededor de 3 eV para un centellador con emisión en la región azul/violeta. La trayectoria del electrón tiene una distribución angular muy extendida. El efecto fotoeléctrico, dominante a estas energías, eyecta electrones con poca predilección por la dirección inicial del fotón, dado que el núcleo del átomo de donde se arranca el electrón toma parte del momento del fotón. A temperatura ambiente, la energía media de los electrones es 0,025 eV, con lo cual, el electrón perderá energía por colisiones en su trayecto hacia la superficie del material. Si, al llegar allí, aún posee suficiente energía como para superar la barrera energética inherente a la interfase material/vacío, el electrón podrá escapar del material. Esta barrera es frecuentemente llamada función trabajo, que para los metales supera los 4 eV, puede estar en el orden de 1,5 eV para semiconductores dopados ad hoc. Así, puede verse que tan solo una porción de los electrones liberados por los fotones incidentes serán capaces de escapar del fotocátodo.

Cuando un fotón incide sobre un dínodo con la energía cinética suficiente, puede arrancar electrones secundarios del material. De los electrones excitados por el electrón incidente, tan solo una pequeña fracción logrará escapar del dínodo para aportar a la multiplicación, por razones similares a las antes expuestas. El factor de multiplicación de un dínodo, δ , se define como la cantidad de electrones secundarios emitidos por electrón incidente. Los materiales frecuentemente utilizados en los dínodos tienen un $\delta \sim 5$, de modo que para obtener ganancias de 10^6 , típica de un PMT comercial, es necesario un arreglo del orden de 10 dínodos. El último de los dínodos es el ánodo. De donde se debe entender que el ánodo es aquel electrodo con potencial positivo, el cual atrae electrostáticamente a las cargas negativas.

2.3. Construcción de los detectores de centelleo

En este trabajo, se acopló un plástico centellador cuadrado de $25 \times 25 \times 2$ cm a un PMT *Hamamatsu, R1463* y una electrónica correspondiente para contar los pulsos. Todo esto se confinó dentro de una caja estanca a la luz, para obtener un detector compacto y robusto.

En la imagen 3 se muestra un esquema del detector. La sección eficaz del PMT es mucho mas pequeña que el tamaño del centellador. Por esto, típicamente se utiliza una guía de onda para que toda la luz emitida pueda ser detectada correctamente. En este trabajo se optó por no aumentar el tamaño de la caja, por lo tanto no se introdujo esta guía de onda. Se espera que esto genere una detección inhomogénea, que varía en cada sección del detector, y que será caracterizada mas adelante en este trabajo utilizando una fuente radiactiva.

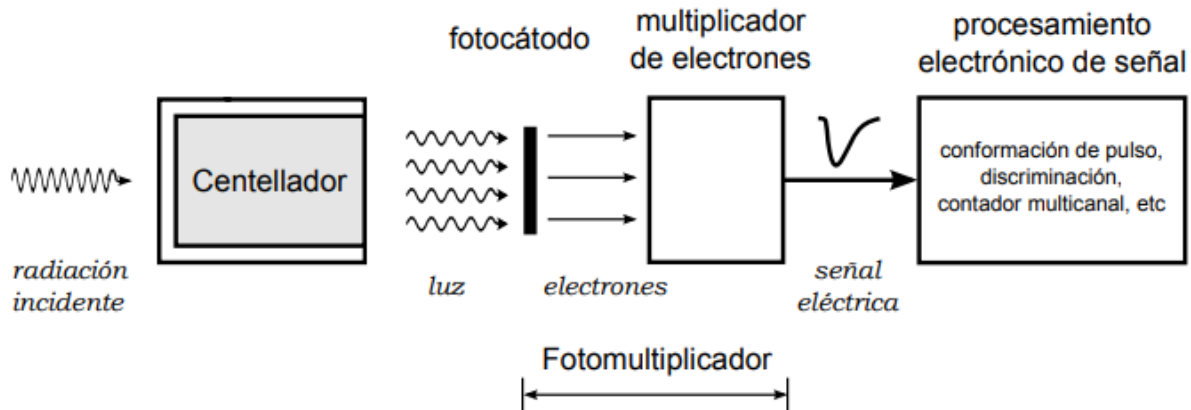


Figura 3: Esquema del setup experimental. La radiación incidente interactúa con el centellador, el cual genera algunos fotones que son captados por el PMT que los transforma en una señal eléctrica, que utilizamos para contar.

Las componentes mas importantes de los detectores descritos ya existían en el laboratorio al comenzar el proyecto. Es decir, se contó con una caja, un centellador, un PMT y su electrónica. La primera parte del trabajo consistió en obtener una caja efectivamente estanca, donde la luz no interfiera la medición de partículas. También es importante agregar que dicha caja tiene que poder abrirse, por motivos de traslado, y mantenimiento.

Por otro lado, se buscó mejorar la señal de detección con los medios disponibles. Se buscaron alternativas a la guía de ondas, en particular, la de envolver al centellador en papel aluminio. De esta manera se obtiene una probabilidad de que algún fotón que se emite en una dirección que no interactúa con el PMT, rebote contra el aluminio y se redirija a la zona de medición.

Además, se mecanizaron dos piezas de plástico personalizadas para sostener al PMT de manera estable y centrado respecto al centellador.

En cada etapa del proceso de construcción, se realizaron las mediciones necesarias para confirmar las mejoras parciales de cada caso, hasta obtener el resultado final que será completamente caracterizado para su uso en el campo.

En la imagen 4 se muestra el detector antes de iniciar el trabajo (a), y luego de realizarlo (b). Se puede apreciar que los bordes inferiores se cubrieron con cinta de aluminio, el PMT se fijó con unas piezas de plástico adicionales y el centellador fue cubierto en aluminio entre otras cosas.

2.4. Caja estanca a la luz

Al utilizar un detector de fotones, como es el caso del PMT, es muy importante evitar el ingreso de luz al detector. Ya que se observarían falsos positivos.

Para esto, se volvieron a pegar los cuatro laterales de la caja con pegamento para PVC, se sellaron todas las uniones con silicona negra, y se remató pegándole cinta de aluminio sobre la silicona. De esta manera, la cinta no sufre un doblez muy pronunciado y no es tan fácil que se rompa.

Para el lado de la tapa, se adicionó una goma aislante sobre el borde interno de la caja, para que ejerza presión, y se cerro con 19 tornillos bien distribuidos.

Para detectar posibles entradas de luz, se utilizó en primera instancia, una tela de blackout, con la cual se podía tapar y destapar completamente el detector. Luego, para un estudio mas fino, se diseñó una sonda de exploración con un led sincronizado en frecuencia al detector, para solo observar las cuentas que corresponden a dicho led. Se barrió toda la caja, para detectar posibles errores en la aislación lumínica localmente y resolverlos con algún agregado similar a los métodos ya descritos.

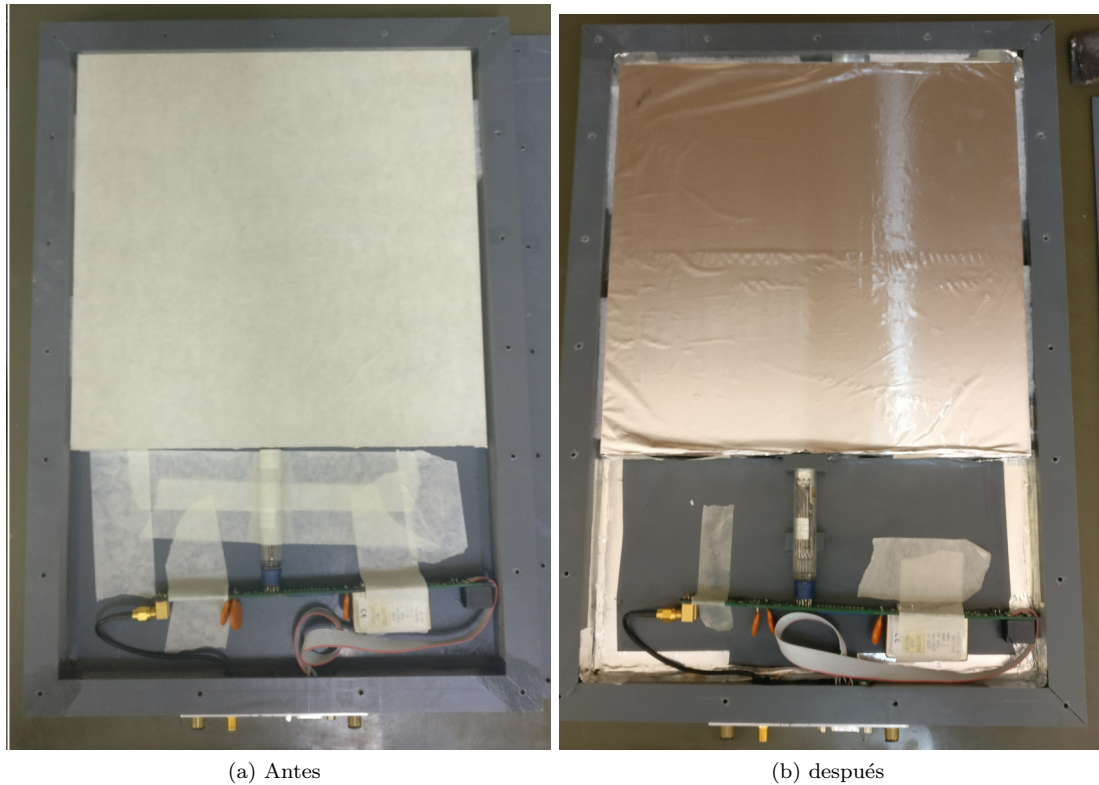


Figura 4: Comparación de como estaba el detector antes de iniciar el trabajo, y como fue modificado finalmente.

2.5. Detección y análisis de la señal

En todos los casos se adquirieron los pulsos del PMT utilizando un sistema de adquisición desarrollado previamente en el laboratorio basado en una tarjeta comercial *Red Pitaya*. La misma cuenta con un conversor analógico digital (ADC) de 14 bits, y una frecuencia de adquisición de 125 MHz, lo cual define una separación entre puntos adquiridos de 8 ns. Históricamente se observó que los pulsos no miden más de 100 ns, entonces, se eligió utilizar 32 bins para cada pulso, es decir, 256 ns de ventana temporal. Todos estos datos son almacenados para un posterior análisis.

Para detectar los pulsos de interés, se define un nivel de trigger *razonable*. La señal se adquiere solo cuando supera este nivel, guardando 8 puntos anteriores y 24 posteriores, 32 en total.

Para elegir este nivel, se observa en el osciloscopio los eventos que corresponden a partículas, pero alejado de la zona de ruido electrónico

Se utilizó un nivel de 36 mV como señal de trigger, con un voltaje de alimentación de 1800 mV para la electrónica, que se traduce en una tensión de 1800 V en el PMT, con la fuente interna del mismo. Con estos valores se observaron una cantidad de eventos aceptables y con poco ruido, para realizar las experiencias.

A medida que se fueron realizando estos cambios, fue necesario tener un programa para analizar los datos guardados. Para esto se generó un código en Python con el cual se automatizó la lectura de los archivos y su análisis.

3. Resultados y discusiones

Lo primero que se realizó fue un control del funcionamiento de los detectores ya existentes en el laboratorio. Con esto se observó que no estaban aislados a la luz, y eran mediciones poco reproducibles a causa de movimientos internos al manipularlos.

Una vez caracterizados como estaban se procedió a mejorarlos mediante un buen cierre hermético para la luz, y alguna mejora al sistema centellador-PMT.

Por ultimo se caracterizó su uniformidad con una fuente radiactiva de $Co - 60$.

En todos los casos, las mediciones realizadas se analizaron utilizando un programa desarrollado *Adhoc* durante el proyecto, bajo la plataforma de Python.

La primera parte del análisis consistió en calcular y remover la línea de base montada sobre la señal. Este cálculo fue posible introducirlo directamente sobre el firmware, por otro miembro del laboratorio, y se realizó automáticamente en cada medición.

3.1. Señales medidas

El análisis de los datos obtenidos se realizó aprovechando los conocimientos previos en Python. Lo primero fue observar efectivamente que existen los pulsos. Para esto se graficó una fracción de la información colectada, y se muestra en la figura 5.

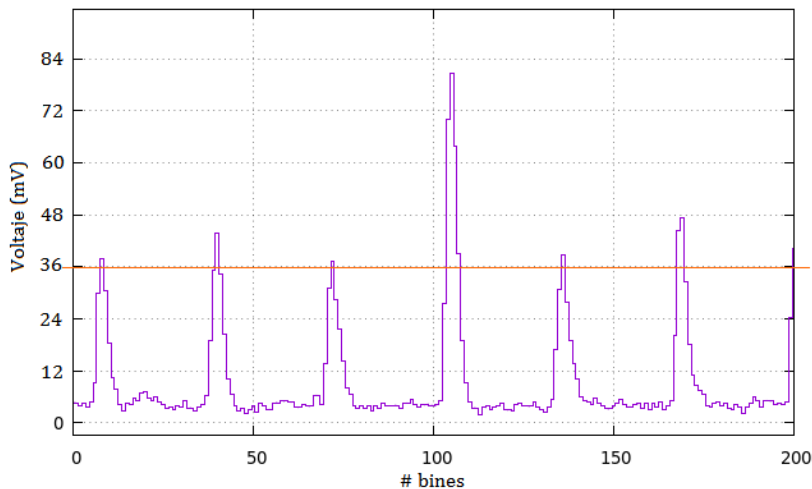


Figura 5: Gráfico de datos adquiridos en función del tiempo. Se pueden observar 6 pulsos bien discriminados sobre el valor, señalado en rojo, de 36 mV del trigger impuesto.

Luego, se estudió el comportamiento de la línea de base a lo largo de la medición, realizando un histograma con los primeros bins de cada pulso. Como se esperaba, se encontró una distribución gaussiana en derredor del valor al cual definimos como línea de base (ver figura 6). Se ajustó con una gaussiana para obtener su media y ancho con el cual corregir las mediciones. Más tarde este procesamiento fue automatizado vía firmware. A pesar de haberlo corregido, este histograma se siguió realizando en todas las mediciones, como una precaución más en el análisis.

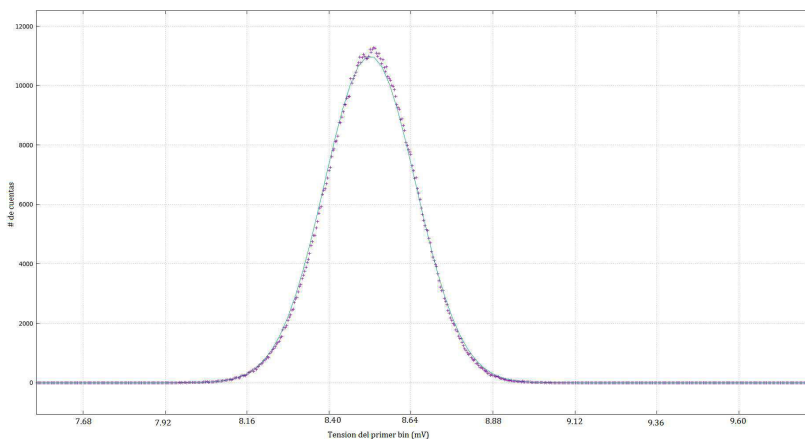


Figura 6: Histograma de los puntos para obtener la línea de base de la medición. Se ajustó con una gaussiana para obtener su valor medio y restarlo como línea de base.

3.2. Sellado de las cajas

Se midió la tasa de conteo del detector completamente cubierto por blackout, y descubierto con las luces del laboratorio prendidas. De esta manera se estudió cuanto afecta la luz ambiente a las cuentas del medidor.

Al medir con el blackout cubriendo completamente al detector, se obtuvieron del orden de unas pocas decenas de cuentas por segundo (aproximadamente 12 cuentas/s). Al retirar la tela, el detector aumentaba hasta saturar incluso en algunas partes (> 5000 cuentas/s). Era evidente el ingreso excesivo de luz.

Con esto en mente, se procedió a sellar completamente la caja (de la manera ya explicada) para poder independizarnos del blackout, y asegurar que no ingresa luz externa.

Para estar completamente seguro se lo iluminó con una linterna por todos los bordes. En los casos donde se detectó un aumento de cuentas, se utilizó la sonda led, para marcar el lugar preciso de fuga y corregirlo. Una vez corregidas todas las fugas, se repitió la experiencia de medición con blackout, obteniendo prácticamente los mismo valores tapado y destapado.

3.3. Mejoras al sistema centellador-PMT

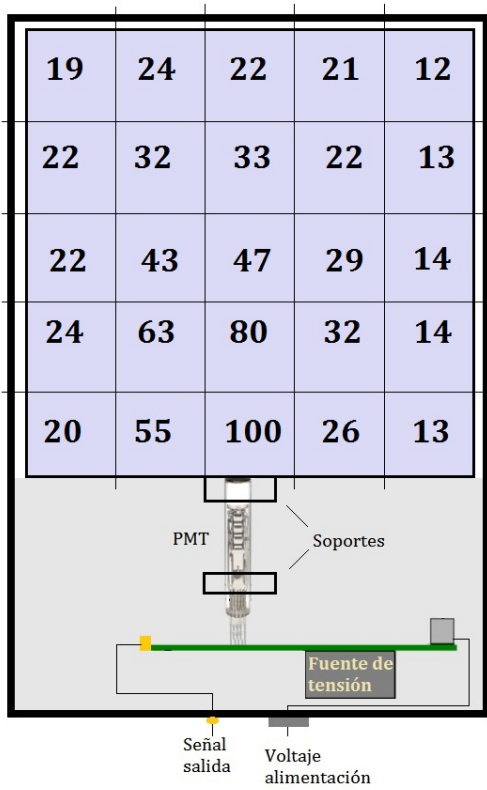
Para aumentar la probabilidad de que un fotón emitido por el centellador llegue a la sección eficaz del PMT, se envolvió al primero en papel aluminio. De esta manera, la luz emitida hacia afuera puede *rebotar* contra el papel y reorientarse hacia el PMT.

Además, se hizo especial hincapié en que el PMT se encuentre en el centro del centellador, para captar la mayor cantidad de fotones en todo el volumen.

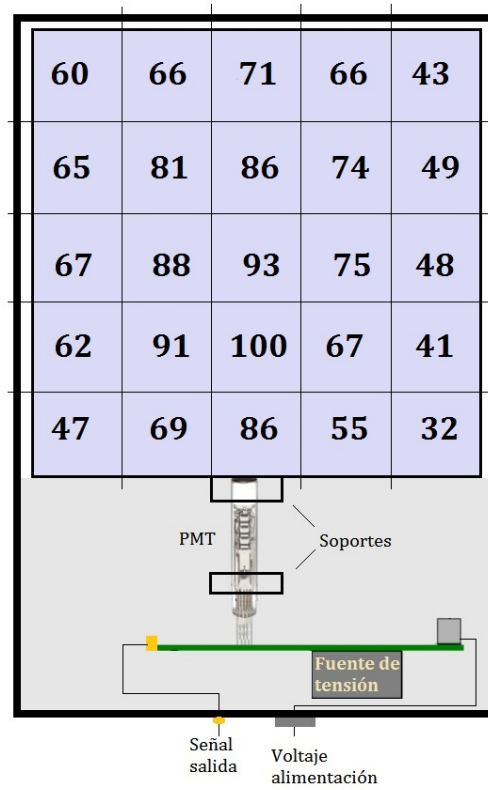
3.4. Caracterización de los detectores

Se realizaron mediciones de homogeneidad antes y después de intervenirlos. Para esto se dibujó una grilla de 5x5, que se ubicó sobre la parte del centellador por fuera de la caja del detector. Con una fuente radiactiva de cobalto-60 del tamaño de una moneda, se fue midiendo en cada locación. Los gammas emitidos por esta fuente corresponden a una energía de 1,3 MeV aproximadamente, y con una tasa de emisión de unos pocos μCi .

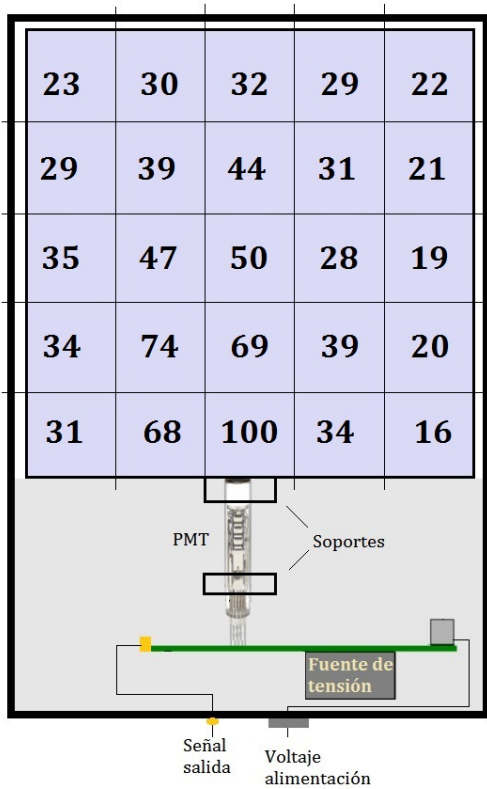
Se ubicó la fuente durante 1 minuto en cada posición de la grilla, y se promedió la cantidad de eventos por segundos obtenidos. De esta manera se conformó un mapa de efectividad sobre cada centellador, como se muestra en la figura 7. Como el interés consistía en comparar las distintas secciones, los valores presentados están referidos al máximo valor de cuentas obtenido, y expresados en porcentajes respecto del mismo.



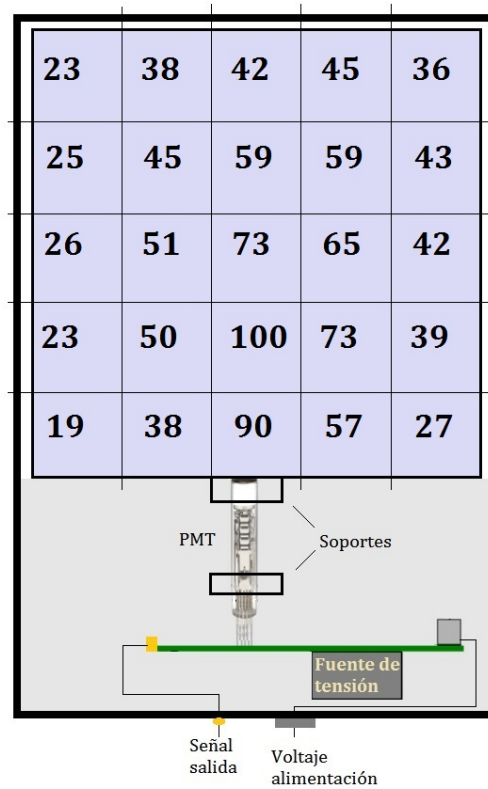
(a) Detector 1



(b) Detector 2



(c) Detector 3



(d) Detector 4

Figura 7: Mapa de los porcentajes de muestreo de acuerdo a cada zona del detector terminado. Se refirieron todas las medidas al valor máximo obtenido.

4. Conclusiones

Del trabajo propuesto se logró armar los detectores previstos, evitando la entrada de luz en todos los casos. Se trabajó mucho en el aspecto artesanal durante el sellado de las cajas, utilizando múltiples herramientas para la alineación y pegado de los distintos componentes.

Fue posible medir la homogeneidad de los mismos utilizando una fuente radiactiva. Se verificó que no son homogéneos, pero en todos los casos se observó que la zona central es la más eficiente y los bordes donde menos se detecta.

Además, se destaca que durante la experiencia se participó de las actividades del grupo, pudiendo conocer las actividades de cada uno y nutrirse de las mismas.

4.1. Trabajo a futuro

Luego del trabajo realizado, solo resta ajustar las ganancias de los cuatro detectores para hacerlas coincidir en cantidad de cuentas, y realizar una calibración de mediciones en coincidencia.

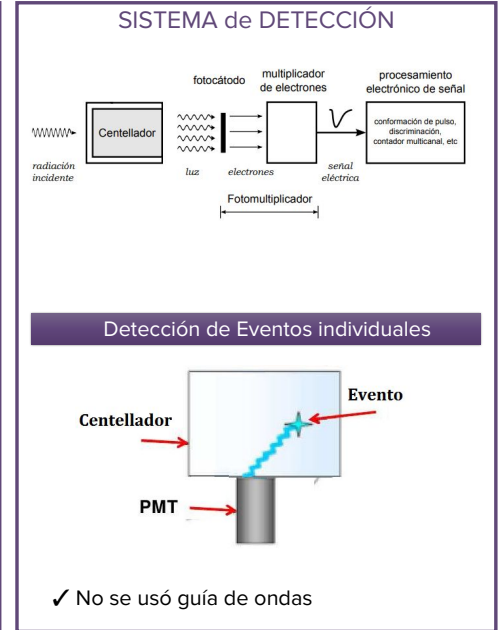
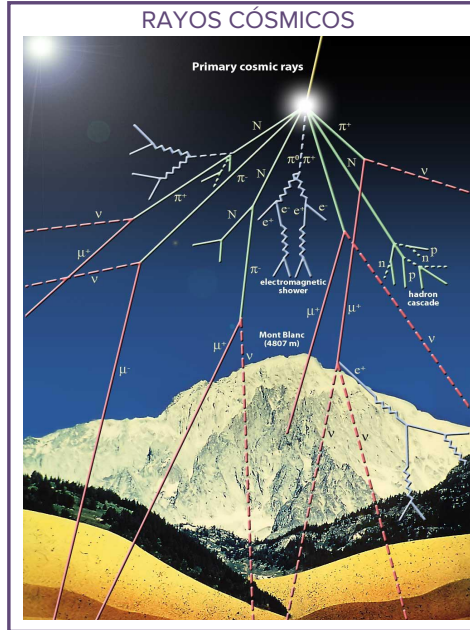
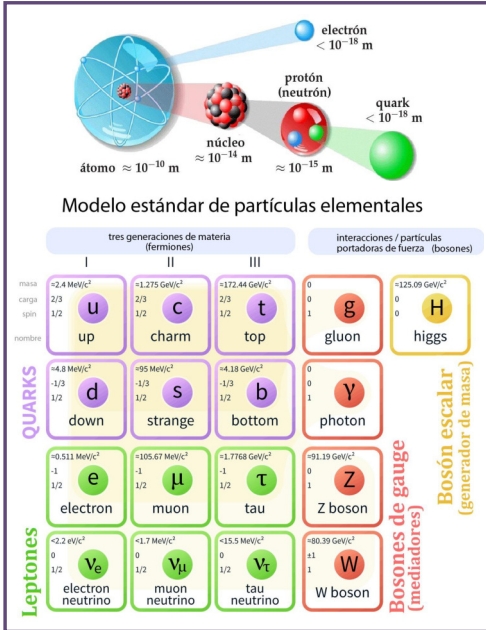
Es de interés para el grupo completar estas caracterizaciones en un tiempo acotado, para instalarse a medir en la mina de Sierra Grande.

Referencias

- [1] https://www.auger.org.ar/argentina/rayos_osmicos.shtml
- [2] STEINMAUER, R, *Recuerdos de V. F. Hess, descubrimiento de los rayos cósmicos, y los primeros años de funcionamiento del laboratorio Hafelekar*, Springer 1985.
- [3] JÁNÓSSY, L., LOVELL, A, *Nature of extensive cosmic ray showers*, Nature, 142, 716, 1938.
- [4] GOLUP, G, *Estudio de las direcciones de arribo de los rayos cósmicos de ultra-alta energía del observatorio Pierre Auger*, instituto Balseiro, universidad nacional de cuyo, Bariloche, 2012.
- [5] GRIEDER, P, *Extensive Air showers: high Energy Phenomena and Astrophysical Aspects A Tutorial, Reference Manual and Data Book*, tomo 1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [6] *Dark Energy, Dark Matter*. NASA Science: Astrophysics. 2015.
- [7] GRIEDER, P, *Dark Matter*. CERN Physics. 2012.
- [8] BERTONE, G.; HOOPER, D.; SILK, J., *Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints*. Physics Reports 405 (5-6): 279-390, 2005
- [9] R. BERNABEI ET AL, *The DAMA/LIBRA apparatus*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 592 (3): 297-315, 2008.
- [10] DAVIS, JONATHAN H, *The Past and Future of Light Dark Matter Direct Detection*. Int. J. Mod. Phys. A., (2015).
- [11] *Caracterización de un sistema de detectores de centelleo y utilización del mismo en el estudio del flujo de rayos cósmicos secundarios*, David Melon Fuksman - Instituto Balseiro. 2014

Experimentos en busca de materia oscura se vienen realizando activamente hace más de 30 años, sin éxito. Algunos resultados apuntan a una medición definitiva en Sierra grande, Río Negro, Argentina. Para eso es importante caracterizar el fondo de otras partículas ionizantes, como los muones.

En este trabajo se presenta un estudio sistemático de la construcción y puesta a punto de 4 detectores de muones. Se caracterizó la homogeneidad de dichos detectores, la cual fue obtenida con ayuda de una fuente radiactiva de Co-60.



RESULTADOS

Antes Después

Centellador

Soportes

PMT

Placa

Conectores

- ✓ Se obtuvo un sellado total ante la entrada de fotones
- ✓ Se mejoró la eficiencia, captando más eventos de relevancia
- ✓ Se desarrolló una configuración más robusta contra vibraciones

RESULTADOS

Uniformidad del detector normalizada

60	66	71	66	43
65	81	86	74	49
67	88	93	75	48
62	91	100	67	41
47	69	86	55	32

PMT

Soportes

Fuente de tensión

Señal salida

Voltaje alimentación

✓ Caracterizada la no-homogeneidad de los detectores

CONCLUSIONES

- ✓ Se logró el objetivo de obtener 4 cajas portables y estancas a la luz donde armar los detectores de centellador
- ✓ Se estudió el funcionamiento de cada detector, analizando los pulsos obtenidos. Se escribió un script en python para automatizar el análisis.
- ✓ Se obtuvo la distribución de eficiencias en todo el área del detector, comprendiendo la inhomogeneidad de cada uno.

→ Resta medir con los 4 detectores en coincidencia, y utilizarlos para caracterizar el sitio de observación!

PROGRAMA “BECAS DE VERANO”

**ENSAYOS PREPARATIVOS PARA EL
CONTROL DEL MOVIMIENTO VERTICAL
DE UN ROBOT SUBACUÁTICO**

Sol Micaela Maldonado Betanzo

Estudiante de Ingeniería Electrónica
Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

Esp. Ing. Lautaro Acha
Director

Ing. Matías Robador
Co-director

01 de Marzo de 2019

División Robótica y Automatización del Proyecto CAREM
Centro Atómico Bariloche
Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina

Índice de contenidos

Resumen	2
Abstract	3
Capítulo 1: Introducción	4
1.1. Motivación del Proyecto	4
1.2. Prototipo <i>Robotino 1.0</i>	4
1.3. Prototipo <i>VaFlo</i>	5
1.4. Prototipo <i>Robotino 2.0</i>	5
1.5. Instalaciones donde se realiza el trabajo	7
1.6. Objetivos del proyecto	8
Capítulo 2: Principio de funcionamiento del sistema de flotación	10
2.1. Objeto sumergido en un fluido	10
2.2. Lastre variable	11
Capítulo 3: Puesta a punto del robot	13
3.1. Prueba de estanqueidad	13
3.2. Prueba de flotabilidad	14
3.3. Prueba de estabilidad	14
Capítulo 4: Pruebas del sistema de flotabilidad	15
4.1. Respuesta natural del sistema	15
Ensayos experimentales	15
4.2. Caracterización del motor paso a paso	17
4.3. Modelización del sistema	19
Ajuste del modelo	19
Modelado y simulaciones	21
Validación del modelo	24
Conclusiones	27
Bibliografía	28

Resumen

El presente proyecto, se centra en la puesta a punto y estudio de un sistema de flotación para variar la profundidad de un robot esférico destinado a inspeccionar ambientes subacuáticos cerrados.

El mismo, utiliza un mecanismo de tuerca-husillo accionado por un motor paso a paso para actuar un pistón, controlando la entrada o salida de agua y modificando así la masa del vehículo submarino no tripulado. De esta manera, se logra variar la profundidad del mismo, mediante el lastre variable aplicado.

Se realizaron diversas pruebas de estanqueidad para corroborar que efectivamente el robot estaba preparado para su ambiente de trabajo. Luego, se continuó con ensayos de flotabilidad y estabilidad, buscando que el mismo tenga una flotabilidad levemente positiva y que se encuentre equilibrado en su posición de reposo, eliminando el momento de vuelco que podría tener.

Después, se llevaron a cabo ensayos para determinar la respuesta natural del sistema de flotación con distintas condiciones iniciales de lastre variable, para consecuentemente modelizarlo. Luego, se validó el modelo mediante simulaciones y con eso finalizaron los ensayos preparativos para el control del sistema.

Palabras clave: ROBOT SUBACUÁTICO ESFÉRICO, SISTEMA DE FLOTACIÓN.

Abstract

The present project focuses on the fine tuning and study of a buoyancy system aimed to change the depth of a spherical robot, which is destined to inspect closed underwater environments.

The system uses a spindle screw mechanism driven by a stepper motor in order to move a piston, which allows to control the entrance or expulsion of water, therefore modifying the mass of the unmanned underwater vehicle. Thus, it is possible to vary the depth of the robot through the variable ballast.

Different waterproofness tests were made to corroborate that it was effectively suited for its work environment. Afterwards, buoyancy and stability tests were performed, looking for it to have a slightly positive buoyancy and that it is balanced in its resting position, removing the rollover moment that it could have.

Subsequently, tests were carried out to establish the natural response of the buoyancy system with different initial conditions to consequently model it. Finally, the model was validated through simulations and hence, the preliminary trials were finalized.

Keywords: SPHERICAL UNDERWATER ROBOT, BUOYANCY SYSTEM.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación del Proyecto

Dentro de los Ensayos No Destructivos, uno de los más utilizados es la inspección visual, ya que es sencillo y permite examinar grandes áreas. Es por esto, que en el marco del Proyecto *CAREM 25*, se plantea el desarrollo de un vehículo sumergible no tripulado (o *UUV* por sus siglas en inglés, *Unmanned Underwater Vehicle*) destinado a inspeccionar ambientes cerrados tales como tanques, cisternas y piletas, esperando a futuro que se pueda utilizar para inspeccionar el interior del recipiente del reactor nuclear del *CAREM*.

1.2 Prototipo *Robotino 1.0*

El primer prototipo llevado a cabo fue *Robotino 1.0* [1]. El mismo, cuenta con pequeñas bombas hidráulicas como propulsores, direccionando el sentido de los chorros de agua con servomotores y ubicando los componentes de manera tal que los jets se disponen en forma simétrica en el plano horizontal.

Tuvo como falla que, al ser construido con componentes inadecuados para el medio acuático, se debieron sellar los mismos de forma artesanal con poliuretano, y, al ceder los sellos, los componentes comenzaron a fallar.

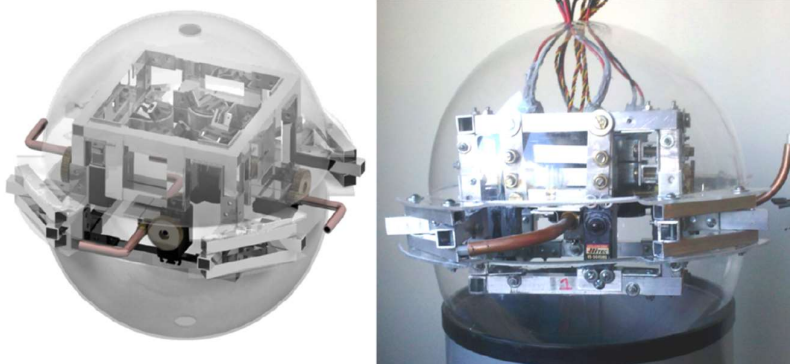


Figura 1.1: Robotino 1.0. Diseño CAD (izquierda) y modelo real construido (derecha).

1.3 Prototipo *VaFlo*

A causa de los problemas de *Robotino 1.0* (para más información, consultar [1]) para desplazarse en el eje vertical, se diseñó el prototipo *VaFlo* en [2].

Éste, utiliza un mecanismo tuerca-husillo para actuar un pistón y controlar en consecuencia la entrada o salida de agua, modificando de esta manera la masa de agua del vehículo. Así, se varía su flotabilidad, cambiando la profundidad a la cual está sumergido. En la parte superior del tornillo de avance se ubica un disco de goma que hace a la vez de pistón y sello dinámico, mientras que el cilindro es implementado con un tubo de acero.

En [2] se comprobó que este mecanismo es más eficiente en comparación con otras alternativas existentes, como la implementada en *Robotino 1.0*. Esta afirmación es posible justificarla teniendo en cuenta que el actuador no necesita estar activo durante el desplazamiento, como si lo requieren por ejemplo los propulsores a hélices o chorros de agua. El vehículo solo se desplaza en dirección vertical si se establece una flotabilidad distinta a la neutra.

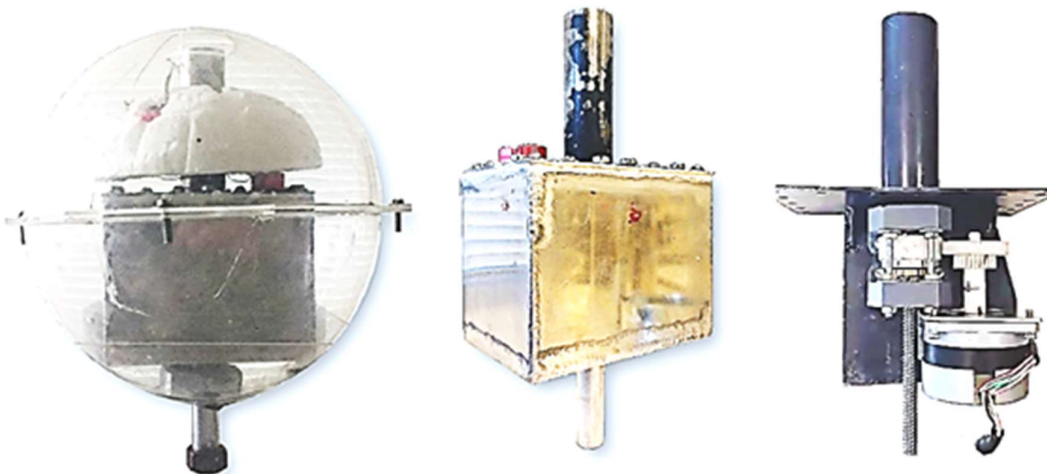


Figura 1.2: fotografías de *VaFlo*. En la imagen de la izquierda, el prototipo completo. En el centro, el prototipo sin carcasas de acrílico, ni contrapesos, ni flotadores. A la derecha, los componentes situados dentro de la caja estanca.

1.4 Prototipo *Robotino 2.0*

El segundo prototipo diseñado para la Tesis de la Carrera de Maestría en Ingeniería [3] del co-director del presente trabajo y sobre el cual se realizan los ensayos preparativos para el control del movimiento vertical es el denominado *Robotino 2.0*.



Figura 1.3: diseño CAD de Robotino 2.0 (izquierda) y su correspondiente implementación (derecha).

Este UUV cuenta con un sistema de propulsión basado en pequeñas bombas hidráulicas. El sentido de los chorros se direcciona con servomotores y con un mecanismo de engranajes; ubicándose así los componentes de forma tal que los jets se disponen simétricamente, con una carcasa externa esférica.

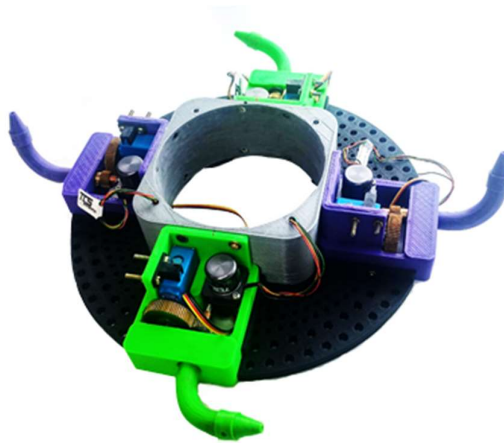


Figura 1.4: sistema de propulsión de Robotino 2.0.

El sistema de propulsión del nuevo robot se construyó con componentes impermeables, siendo su grado de protección internacional IP67, lo que garantiza que pueden resistir la inmersión completa al agua durante 30 minutos como mínimo [4]. La puesta a punto de este sistema se lleva a cabo en [5].

En cuanto al sistema de flotación en el cual se centra este trabajo, se implementó un sistema similar al utilizado en el Proyecto Integrador de la Carrera de Ingeniería Mecánica [2].

En la siguiente figura, se pueden observar los componentes principales del sistema de flotación:

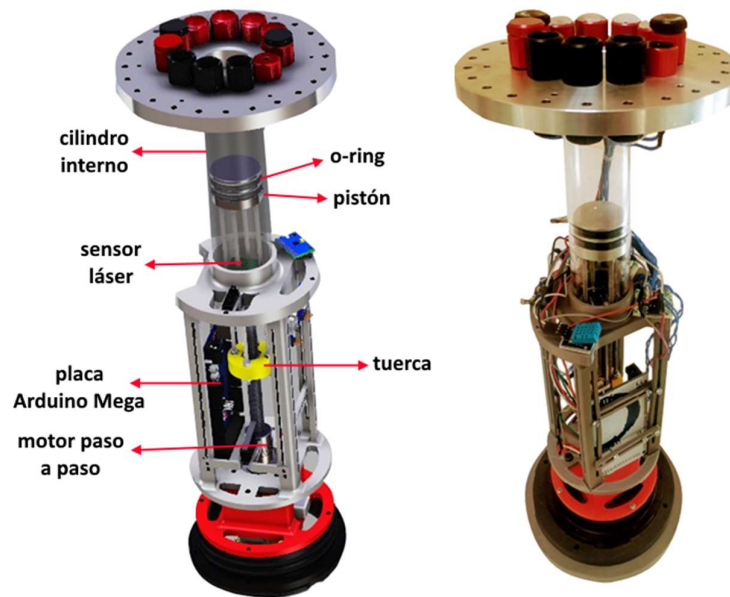


Figura 1.5: diseño del sistema de lastre variable de Robotino 2.0 (izquierda) y prototipo implementado (derecha).

Dicho sistema, cuenta con un cilindro interno de acrílico por el que se mueve el pistón y que originalmente cuenta con dos o-rings que hacen de sello para evitar el ingreso de agua. Además, se tiene un sensor láser de distancia para medir la posición del pistón, el cual se encuentra conectado a una placa Arduino Mega 2560 que es la encargada de la comunicación y el control de *Robotino*. El mecanismo tuerca-husillo es accionado por un motor paso a paso modelo Nema 17.

1.5 Instalaciones donde se realiza el trabajo

Los ensayos preparativos del sistema de flotación de *Robotino 2.0* se realizan en las instalaciones del Proyecto CAREM, más precisamente en el Laboratorio de Robótica.



Figura 1.6: laboratorio de robótica del proyecto CAREM. A la izquierda, el pozo de agua de las dimensiones del recipiente de presión del reactor.

Para realizar la puesta a punto del robot, se utiliza un tanque de agua de 1000 litros, mostrado en la siguiente figura:



Figura 1.7: tanque de agua utilizado para la puesta a punto de Robotino 2.0

En cuando a los demás ensayos necesarios para caracterizar el movimiento vertical, se cuenta con el pozo de agua de las dimensiones del recipiente de presión del reactor, en el cual se colocó en la parte inferior una red de seguridad. El mismo se puede observar en las siguientes imágenes:

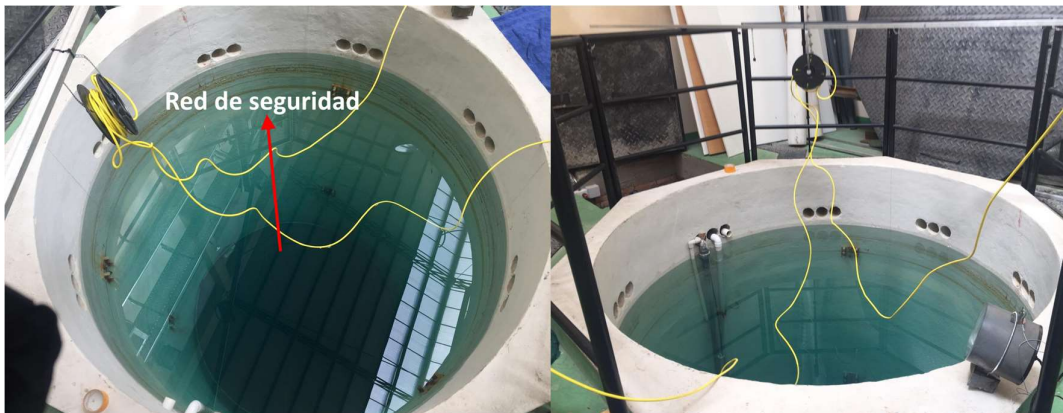


Figura 1.8: pozo de agua utilizado para las pruebas de flotabilidad.

1.6 Objetivos del proyecto

El objetivo de este proyecto es realizar los ensayos preparativos para controlar el sistema de flotación del robot subacuático denominado *Robotino 2.0*.

Para lograr este objetivo, se deben realizar los siguientes ensayos experimentales:

1) Puesta a punto del robot:

- a) Prueba de estanqueidad: consiste en sumergir al robot submarino y observar si hay filtraciones. Para tal fin, se cuentan con sensores de fuga que se encienden

ante la presencia de agua y avisan con una alarma si ha habido una filtración. El objetivo de esta prueba es asegurar el correcto funcionamiento de los sellos del robot, tanto estáticos como dinámicos.

Luego, se realizará la inmersión completa a 1 metro durante 30 minutos para corroborar si se puede asegurar un grado de impermeabilización IP67, y así estandarizar el ensayo con la norma internacional IP.

- b) Prueba de flotabilidad: se debe colocar el pistón en su posición neutra (es decir, a la mitad del cilindro), ubicar el robot en un tanque de agua y verificar si se hunde o si flota. Se busca una flotabilidad levemente positiva, esto es, su “densidad equivalente” debería ser levemente menor a la del agua. Esta flotabilidad se logra cuando sobresale una pequeña parte (unos 5 cm) del robot por encima de la superficie del agua.
- c) Prueba de estabilidad: consiste en equilibrar de forma estable el robot en su posición de reposo. Esto significa que hay que balancear la masa del robot de forma tal que su centro de gravedad quede verticalmente por debajo de su centro de flotación. El objetivo es eliminar el momento de vuelco que podría tener el robot debido al aire en su interior.

2) Pruebas del sistema de flotabilidad

- a) Respuesta natural del sistema: se busca dejar el pistón en distintas posiciones (flotabilidad positiva, neutra y negativa) y tomar datos de su respuesta natural, en principal su profundidad con respecto al tiempo.
- b) Caracterización del motor paso a paso: se quiere estimar la potencia consumida y las constantes geométricas de movimiento del motor utilizado para mover el pistón del sistema de flotación.
- c) Modelización del sistema: con las curvas obtenidas en 2a) y 2b), se busca encontrar el modelo de control que represente al sistema de flotabilidad con las herramientas informáticas *Matlab* y *Simulink*.

El trabajo se plantea dentro del marco de las Becas de Verano, en donde el objetivo principal es familiarizarse con técnicas experimentales en Física e Ingeniería y conocer nuevos ambientes de trabajo. También, colaborar en tareas de investigación en laboratorios de Física e Ingeniería del Centro Atómico Bariloche.

Se considera que con los objetivos planteados por los miembros del Laboratorio de Robótica del Proyecto CAREM, se lograrían adquirir nuevas técnicas experimentales en ingeniería, aplicando los métodos de trabajo de este grupo de investigación. Además, se colaboraría con la investigación del co-director de este proyecto para su Tesis de la Carrera de Maestría en Ingeniería [3].

Capítulo 2

Principio de funcionamiento del sistema de flotación

2.1 Objeto sumergido en un fluido

A continuación, se describe el modelo físico del sistema de variación de flotabilidad para entender cómo éste facilita el control de profundidad del UUV.

En la siguiente figura, se pueden observar las fuerzas actuantes sobre un cuerpo sumergido y en movimiento dentro de un fluido:

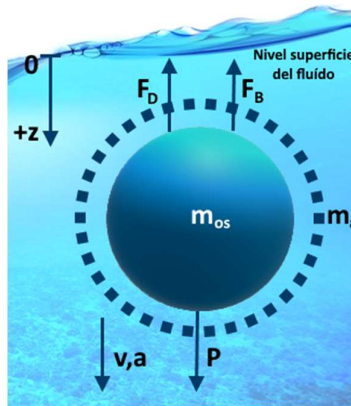


Figura 2.1: fuerzas actuantes sobre un cuerpo sumergido en movimiento.

En donde:

- $P = m_{os}g$ es el peso;
- $F_B = \rho V_{OS}g$ es la fuerza boyante;
- $F_D = \text{sign}(v) \frac{1}{2} C_D A_{OS} \rho |v|^2$ es la fuerza de arrastre; [6]
- m_{os} es la masa del objeto sumergido;
- m_a es la masa de fluido agregada;
- g es la aceleración gravitatoria;
- ρ es la densidad del fluido;
- V_{OS} es el volumen del objeto sumergido, que se considera constante (indeformable);
- A_{OS} es el área proyectada del objeto sumergido;
- v y a son la velocidad y aceleración del cuerpo sumergido en movimiento;
- C_D es el coeficiente de arrastre.

A partir de la 2° ley de Newton se obtiene que:

$$(m_{os} + m_a) a = P - F_B - F_D \quad (1)$$

Se considera que la masa del objeto sumergido se puede expresar como $m_{os} = m_e + \Delta m$, siendo m_e la masa en equilibrio y Δm la variación de masa. Se utiliza una convención de signos es donde un aumento de masa se representa como Δm positivo. Reemplazando en (1) se obtiene:

$$a = \frac{\Delta m g - \frac{1}{2} C_D A_{os} \rho v |v|}{m_e + \Delta m + m_a} \quad (2)$$

Analizando (2), puede observarse que si se parte del reposo (es decir, $v = 0$) y con $\Delta m = cte$, la aceleración tendrá su valor máximo en el $t = 0$. Durante el transitorio, esta aceleración irá disminuyendo hasta converger a un valor nulo ($a = 0$). Al mismo tiempo, la velocidad irá aumentando hasta llegar a una velocidad conocida como velocidad terminal:

$$v_{terminal} = sign(\Delta m) \sqrt{\frac{2 \Delta m g}{C_D A_{os} \rho}} \quad (3)$$

Entonces, puede verse que con una variación en la masa del UUV, puede controlarse su velocidad terminal.

En conclusión, si Δm es positiva significa que la fuerza del peso es mayor que la de empuje, por lo que el UUV se acelerará en el sentido +z hasta alcanzar su velocidad terminal o hasta ser frenado por el fondo del recipiente. Caso contrario, si Δm es negativa, entonces el peso será menor que el empuje y el UUV se acelerará hasta -z, hasta alcanzar su velocidad terminal o emerger del fluido.

2.2 Lastre variable

Como se dijo anteriormente, para la implementación del lastre variable se opta por un mecanismo tuerca-husillo accionado por un motor paso a paso. Esta tuerca se acopla a un pistón que se desplaza dentro de una camisa. De esta manera, cuando el motor gira en un cierto sentido, ingresa una cierta cantidad de agua, aumentando la masa del UUV. Entonces, cuando gira en sentido contrario, sale una cierta cantidad de agua, disminuyendo en este caso la masa. Con el control de masa del UUV, se lograría un control sobre la sumatoria de fuerzas sobre el mismo, y variando la masa, se controlaría la profundidad del robot.

Al variar la posición del pistón, es posible aumentar o disminuir la masa de agua que ingresa o egresa del cilindro. Por lo tanto $\Delta m = \rho A_c \Delta h$, siendo A_c el área del cilindro y Δh la posición del pistón. Cuando el pistón se encuentra a mitad de carrera

$\Delta h = 0$, cuando está al fondo del cilindro $\Delta h = \frac{h}{2}$ y cuando está al tope del cilindro $\Delta h = -\frac{h}{2}$.

En la siguiente figura se pueden observar las fuerzas involucradas en el mecanismo y las fuerzas actuantes sobre el pistón en condición estática. La siguiente figura, hace referencia al mecanismo diseñado en [2], en el cual el pistón está acoplado al husillo, en lugar de la tuerca:

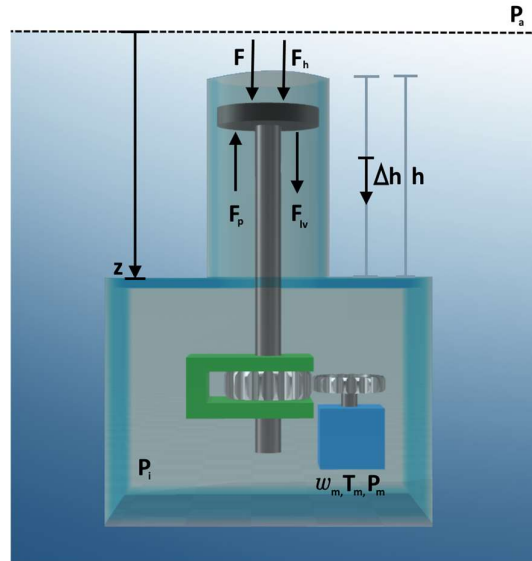


Figura 2.2: esquema del mecanismo de lastre variable, con las fuerzas actuantes sobre el pistón.

En donde:

- F es la fuerza necesaria para que el pistón se mueva, siendo la resultante entre P_{lv} , F_p y F_h ;
- P_{lv} es el peso del lastre;
- P_i es la presión del aire;
- F_p es la fuerza debida a P_i dentro de la cámara estanca;
- F_h es la fuerza hidrostática, dependiente de z y del área del lastre;
- z es la profundidad a la se encuentra el vehículo medida desde la superficie del fluido;
- F_f es la fuerza de fricción entre el pistón con las paredes del cilindro.

Si se plantea un balance de fuerzas, se obtiene como resultado:

$$F = P_{lv} + F_h - F_p + F_f \quad (4)$$

La ecuación (4) sirve para seleccionar el motor y los componentes del mecanismo. En la figura 2.2 también se muestran los parámetros de funcionamiento del motor, es decir:

- la velocidad de rotación ω_m ;
- el torque requerido T_m ;
- la potencia consumida P_m

Capítulo 3

Puesta a punto del robot

3.1 Prueba de estanqueidad

Como se detalló en la sección 1.3, esta prueba consistió en realizar los procedimientos necesarios para determinar si el robot tenía o no filtraciones de agua en el interior del cilindro estanco. Además, se buscó asegurar un grado de protección *IP67*.

Para tal fin, en primer lugar se procedió a sumergir a *Robotino* en un tanque de agua para verificar si se encendían o no las alarmas activadas por los sensores de fuga. Como se encendieron, se debió desarmar el robot y dejarlo secar. El sensor que se activó fue el del cilindro interno, develando que el problema estaba en ese sello (el indicado en la figura 1.5). Por lo que se procedió a colocarle dos o-rings nuevos y también a lijar las varillas debido a que se encontraban oxidadas por la presencia de agua. Consecuentemente, se repitió el procedimiento anterior. Esta vez, no se activaron las alarmas, pero los o-rings causaban mucha fricción, imposibilitando que el pistón se desplazara de manera correcta. Por lo tanto, se debió desarmar nuevamente el robot y se retiró un o-ring. Se probó moviendo el pistón, haciéndolo esta vez adecuadamente, y se rearmó a *Robotino*, colocándole también precintos a la estructura para evitar la desconexión de cables debido al desarmado de la misma. Se volvió a sumergir a *Robotino* y no se encendió ninguna alarma, superando finalmente la prueba de estanqueidad.

Luego, se llenó el tanque de agua hasta 1 metro de altura y se realizó la inmersión completa del robot, colocándole un contrapeso en la parte superior para evitar que flote. Se lo dejó durante 30 minutos y al no encenderse ninguna alarma, se comprobó que no ocurrieron filtraciones, confirmando así que cumple con el grado de impermeabilización *IP67*.



Figura 3.1: prueba de estanqueidad.

3.2 Prueba de flotabilidad

Esta prueba, consistió en colocar el pistón en posición neutra (a la mitad del cilindro, en nuestro caso fue a los 42 mm marcados por un sensor de distancia láser ubicado en la parte inferior del cilindro) y sumergir a Robotino en el tanque con agua. Se verificó que tenía gran flotabilidad positiva, por lo que se le colocaron tornillos con arandelas y tuercas hasta lograr la flotabilidad deseada, mostrada en la siguiente figura:



Figura 3.2: flotabilidad obtenida con el balance grueso.

Así, se logró la flotabilidad levemente positiva buscada, teniendo una densidad equivalente levemente menor a la del agua.

Luego, se pesó a Robotino y a los contrapesos para utilizar los datos en la etapa de modelización del sistema, obteniendo los siguientes datos:

<i>Masa Robotino</i>	5,5 kg
<i>Masa contrapesos</i>	0,15 kg

3.3 Prueba de estabilidad

Una vez lograda la flotabilidad levemente positiva, se procedió a verificar que *Robotino* era estable. Para tal fin, se desestabilizó el robot dentro del agua, moviéndolo hacia distintos lados y verificando que regresara a la posición de equilibrio (con el pistón en distintas posiciones). De esta manera, se comprobó que siempre su centro de gravedad se encontraba verticalmente por debajo de su centro de flotación, ya que de no ser así, el robot se hubiera volcado. Así, se cumplió el objetivo de eliminar el momento de vuelco que podría tener el robot debido al aire en su interior.

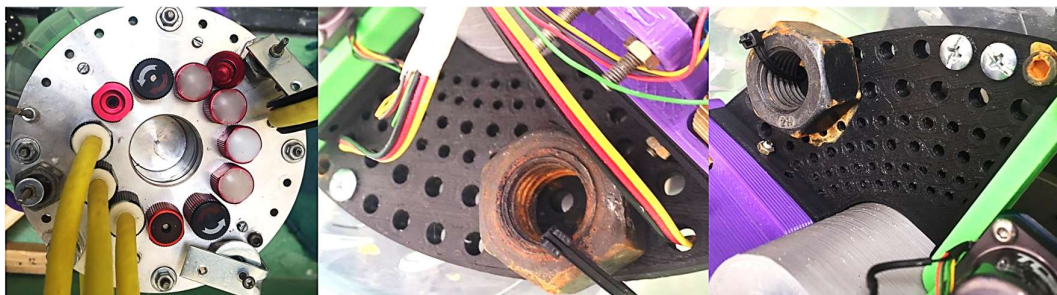


Figura 3.3: contrapesos utilizados para estabilizar a Robotino.

Capítulo 4

Pruebas del sistema de flotabilidad

4.1 Respuesta natural del sistema

Ensayos experimentales

Se llevaron a cabo diversos experimentos para obtener la respuesta natural del sistema. Es decir, la respuesta del robot sin actuar sobre el sistema de flotación (con el motor apagado), partiendo desde distintas condiciones iniciales del lastre variable. Como el interés del sistema de flotabilidad es principalmente determinar la profundidad recorrida con respecto al tiempo, se programó un código en *Arduino* que permitiera medir la presión para determinar la profundidad, y con *LABView* un datalogger para guardar los datos de presión y tiempo.

Las tres condiciones iniciales fueron:

1. Pistón en el tope: flotabilidad positiva, $\Delta h = -\Delta h_{max} = \frac{-h}{2}$.
2. Pistón en el medio: flotabilidad neutra, $\Delta h = 0$.
3. Pistón en el fondo: flotabilidad negativa, $\Delta h = \Delta h_{max} = \frac{h}{2}$.

Este ensayo se realizó en primer lugar en el tanque de agua, pero el recorrido disponible (~ 40 cm) no era suficiente, porque el robot chocaba con las paredes del recinto. Es por eso que se decidió llenar el pozo de agua de ~ 10 m de profundidad, destinado a pruebas del proyecto *CAREM*. Se realizaron cuatro ensayos: dos con la condición 1, uno con la condición 2 y uno con la condición 3.

El experimento consistió en posicionar el pistón en la condición inicial deseada, llevar el robot a una profundidad inicial acorde a la condición y luego soltarlo. De esta forma, se desplaza de forma natural sin actuar sobre el mismo. La profundidad se midió indirectamente, con un sensor de presión absoluta, teniendo en cuenta la presión atmosférica.

Los resultados experimentales se muestran a continuación, fijando el error en las mediciones en ± 2 cm porque ese es el ruido que se observó con el robot en una profundidad estable:

Pruebas en el Pozo de agua

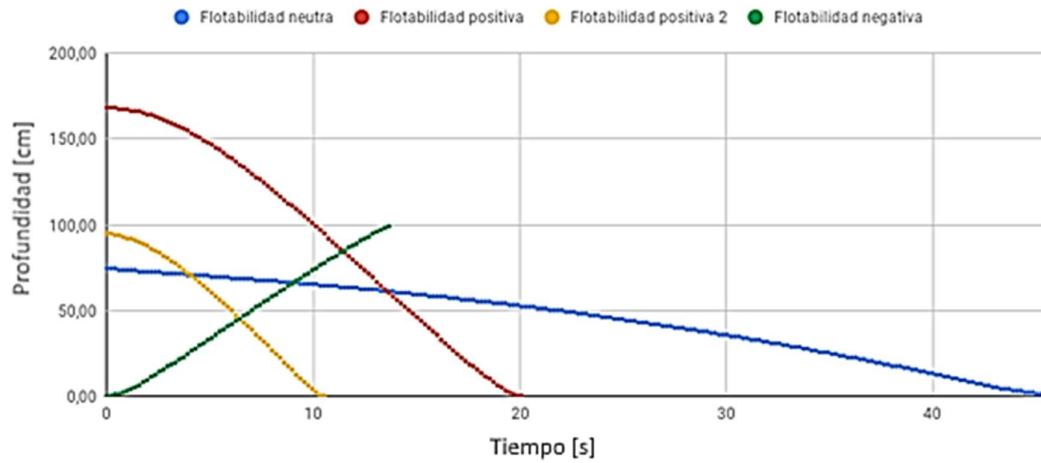


Figura 4.1: respuesta natural para distintas condiciones iniciales.

Cabe aclarar que el recorrido del pistón era de 10 mm a 95 mm marcados por el sensor láser, realizando las pruebas de “flotabilidad neutra” a 42.5 mm, cuando en realidad deberían haber sido a 52.5 mm. Si se repiten las pruebas, se sugiere establecer la posición “neutra” del pistón en 52.5 mm de distancia.

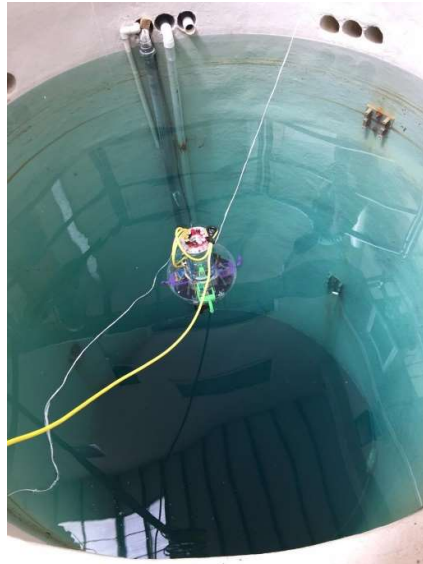


Figura 4.2: ensayos en el pozo de agua.

4.2 Caracterización del motor paso a paso

En esta etapa, se desea caracterizar el actuador del sistema. Para ello, se pretende estimar la potencia consumida y las constantes geométricas y de tiempo del movimiento del motor paso a paso que acciona el mecanismo tuerca-husillo.

El motor paso a paso utilizado es un Nema 17 con las siguientes características:

Especificaciones generales	
Ángulo de paso (°)	1.8
Aumento de temperatura (°C)	80 máx (corriente nominal, 2 fases)
Temperatura ambiente (°C)	-20 ~ +50
Número de fases	2
Resistencia de aislamiento (MΩ)	100 min (500 VDC)
Clase de aislamiento	Clase B
Fuerza radial máxima (N)	28 (20 mm desde la brida)
Fuerza axial máxima (N)	10

Especificaciones eléctricas	
Tensión nominal (V)	2.8
Corriente nominal (A)	1.68
Resistencia por fase ($\pm 10\%$ Ω)	1.65
Inductancia por fase ($\pm 20\%$ mH)	3.2
Par de anclaje (N.cm)	36
Par de retención (N.cm)	150
Par del rotor (N.cm)	54
Peso (kg)	0.28

Para realizar la caracterización del motor, se llevó el pistón desde su posición superior (~95 mm) hasta su posición inferior (~10 mm), variando la cantidad de pasos y la tensión de alimentación. Así, se obtuvo la curva de “bajada”. De forma inversa, se obtuvo la curva de “subida”. La posición del pistón se midió con un sensor láser y se fijó un error en la medición de ± 3 mm.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

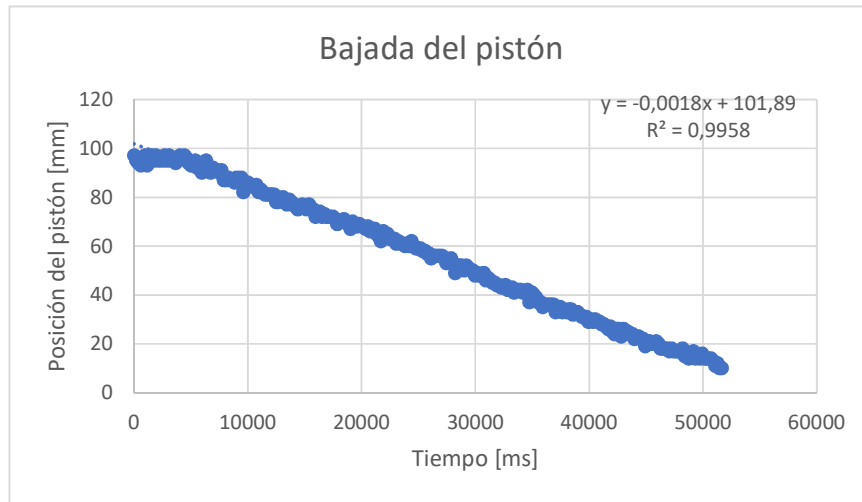


Figura 4.3: posición del pistón en función del tiempo durante la bajada del mismo.

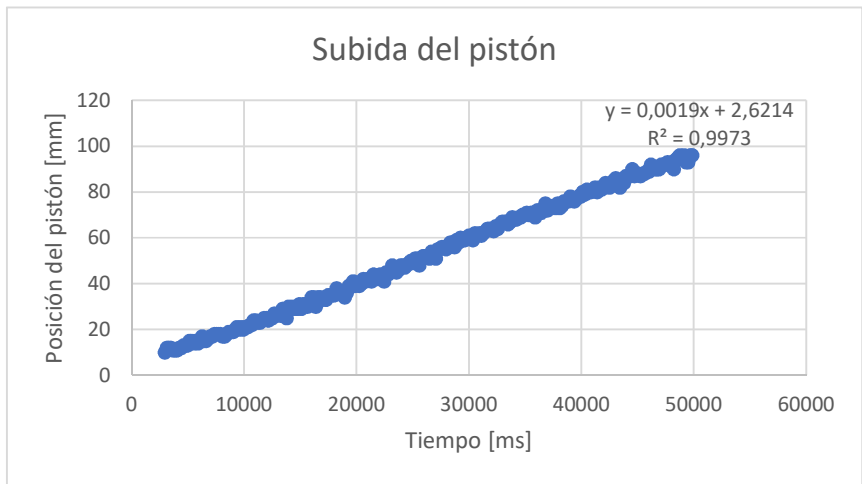


Figura 4.4: posición del pistón en función del tiempo durante la subida del mismo.

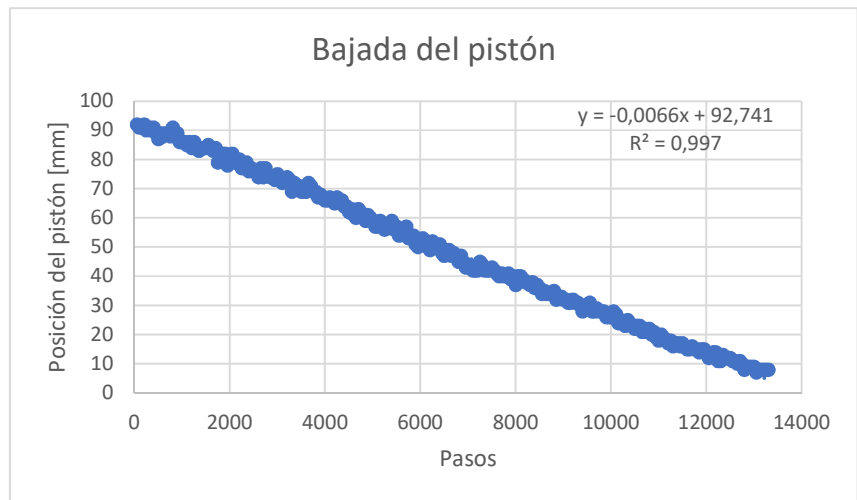


Figura 4.5: posición del pistón en función de los pasos durante la bajada del mismo.

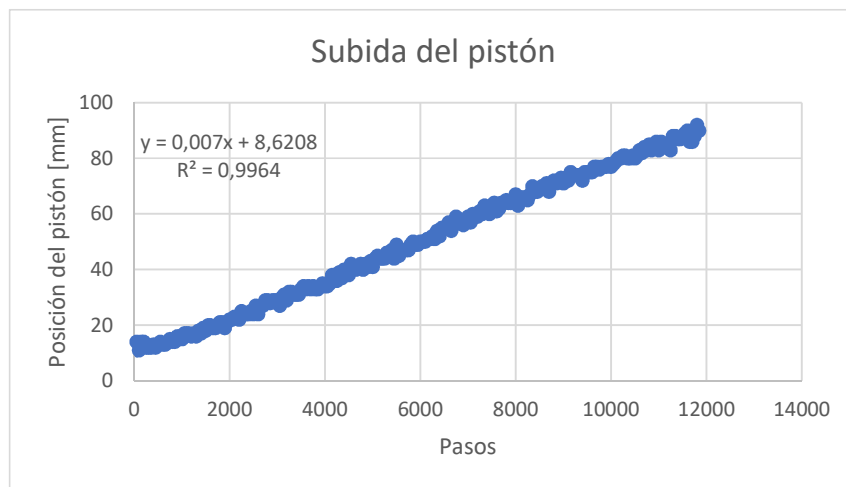


Figura 4.6: posición del pistón en función de los pasos durante la subida del mismo.

Con las figuras 4.3 y 4.4 se puede calcular el tiempo para recorrido total del pistón, y con las figuras 4.5 y 4.6, la constante geométrica. Además, variando la tensión de alimentación y con la corriente que indicaba la fuente, se obtuvo la potencia máxima. Se resumen los resultados a continuación:

Constante geométrica (calculada por regresión lineal) [pasos/mm]	$150 \pm 5\%$
Velocidad máxima [RPM] (Para velocidades > a este valor, el motor pierde pasos).	$100 \pm 5\%$
Tiempo para recorrido total del pistón (subida) [s]	$46 \pm 13\%$
Tiempo para recorrido total del pistón (bajada) [s]	$52 \pm 13\%$
Potencia máxima [W]	$1.5 \pm 10\%$

4.3 Modelización del sistema

Ajuste del modelo

A partir de las curvas obtenidas en 4.1, se escribe un archivo en *Matlab* para ajustar los datos y calcular los tres parámetros desconocidos en la ecuación (2): la masa constante, la masa añadida, el coeficiente de drag estimado y la constante K_d ($K_d = \frac{\rho}{2} C_D A_{proy} \bar{v}$).

Las curvas utilizadas para el ajuste fueron 3 e las 4 curvas de la Figura 4.1: la curva roja (Flotabilidad Positiva), la verde (Flotabilidad Negativa) y la azul (Flotabilidad Neutra). Se muestran a continuación, junto con una curva de estas tres pruebas concatenadas.

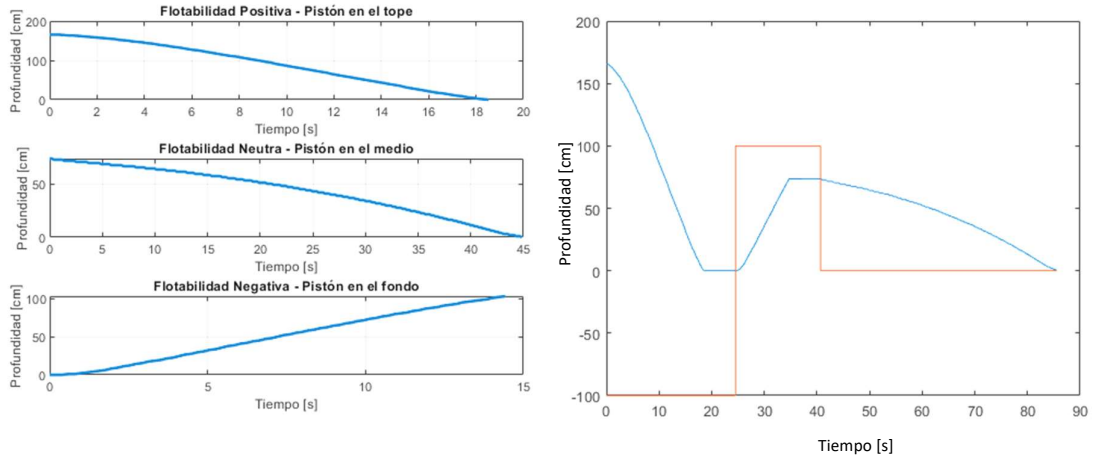


Figura 4.7: en la figura de la izquierda, se puede observar el reajuste de los datos experimentales. En la de la derecha, el concatenado de las tres pruebas de la izquierda (azul) y la posición del pistón (anaranjado).

Los datos se ajustaron con la solución exacta de la ecuación (2), para el caso en que el lastre es constante. Según [3], esta solución es:

$$z(t) = \text{sign}(v_{term}) \frac{1}{\alpha} \log \cosh(|v_{term}| \alpha * t) + z_0$$

Donde:

- $z(t)$ es la profundidad;
- v_{term} es la velocidad terminal;
- α es un parámetro que depende de C_D ;
- t es el tiempo;
- z_0 es la profundidad inicial.

A continuación, se muestran los resultados el ajuste realizado, con un intervalo de confianza del 90%. En todos los casos se obtuvo un valor de $R^2 > 0.98$.

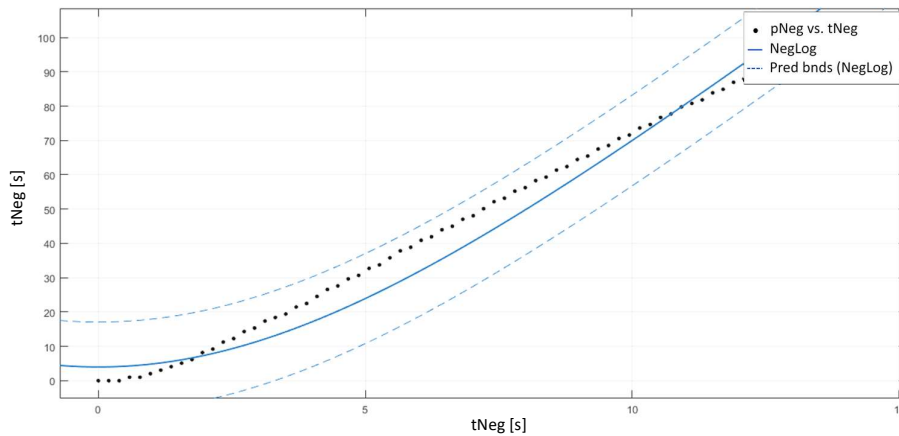


Figura 4.8: ajuste de curva flotabilidad negativa.

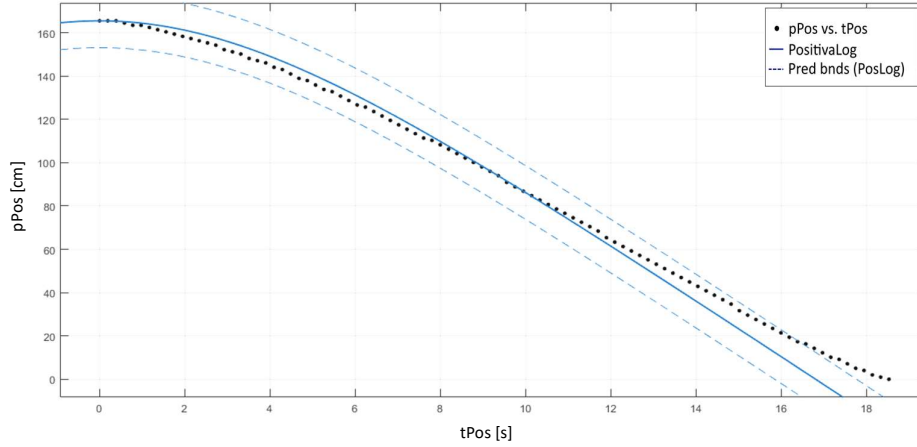


Figura 4.9: ajuste de curva para flotabilidad positiva.

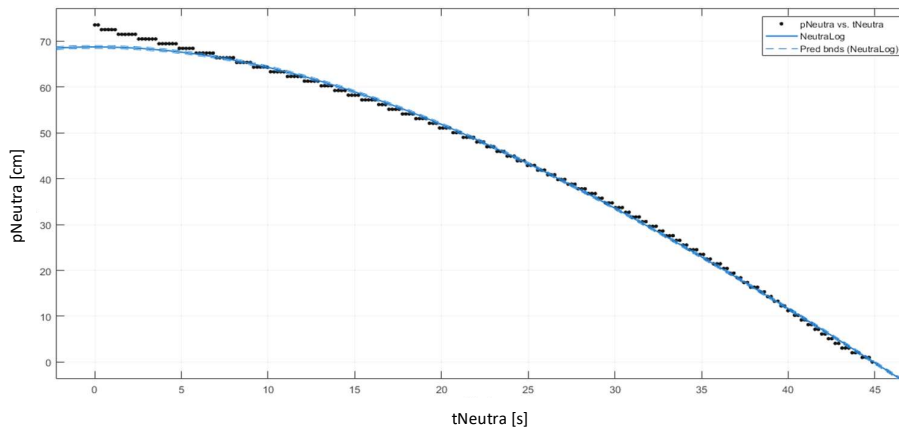


Figura 4.10: ajuste de curva flotabilidad neutra.

En la siguiente tabla se resumen los parámetros estimados a partir del ajuste:

Flotabilidad	$V_{med} \left[\frac{cm}{s} \right]$	$V_{term} \left[\frac{cm}{s} \right]$	$m_{cte} [g]$	C_D
Positiva	-9	-13	-3	0.47
Negativa	7	12	-3	0.47
Neutra	-2	-3	-2	0.47

De la tabla anterior, se puede decir que las velocidades obtenidas se encuentran dentro del orden de magnitud esperado. Se puede obtener una masa constante media de -3 g. Estos valores serán utilizados en la siguiente etapa.

Modelado y simulaciones

A partir de las ecuaciones obtenidas en (2.1) y con el ajuste realizado, se efectúa un modelo matemático de control del sistema. En la siguiente figura se muestra el diagrama de bloques implementado en *Simulink* [3]:

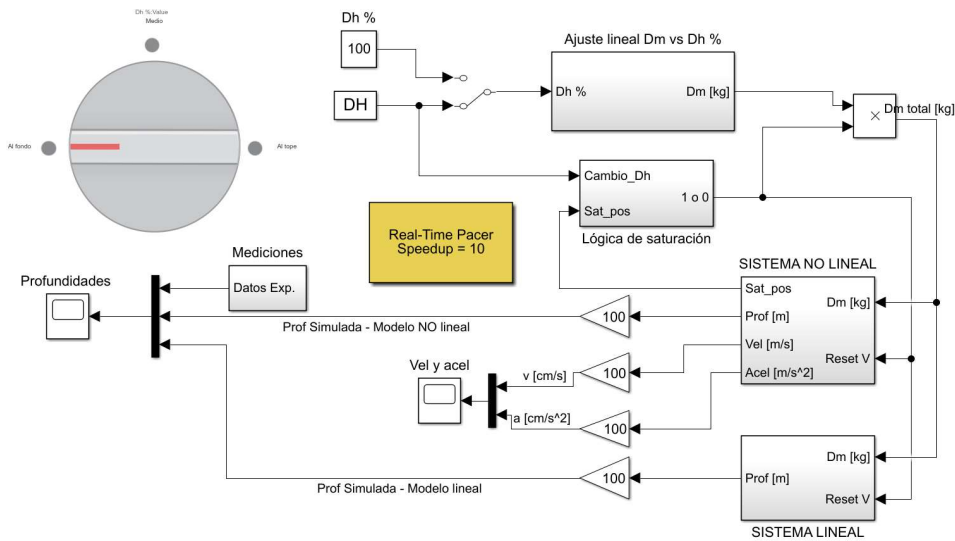


Figura 4.11: diagrama de bloques del sistema de flotación.

Se utiliza una perilla para seleccionar la condición inicial, ya sea pistón al tope ($Dh\%=-100$), en el medio ($Dh\%=0$) o al fondo ($Dh\%=100$). Con el conmutador, se puede elegir si simular cada prueba por separado o todas juntas eligiendo “DH”. Luego, el bloque de “Ajuste lineal Dm vs Dh%” recibe como entrada la posición inicial del pistón en porcentaje respecto al máximo cambio de altura ($\Delta h[\%] = \frac{\Delta h}{\Delta h_{max}} * 100$) y da como salida el valor correspondiente de Δm [kg]. Es decir $\Delta m = m_{cte} + \rho A_c \frac{\Delta h[\%]}{100} \Delta h_{max}$. El bloque “lógica de saturación” se utiliza para simular los límites de profundidad posibles en el experimento. Es decir, los límites impuestos por el fondo del recipiente o la superficie del agua, y si se queda en reposo, el bloque entrega un cero. Posteriormente, el bloque amarillo “Real-Time Pacer” sirve para reproducir la simulación en tiempo real. Finalmente, se observan los bloques “sistema lineal” (Figura 4.12) y “sistema no lineal” (Figura 4.13):

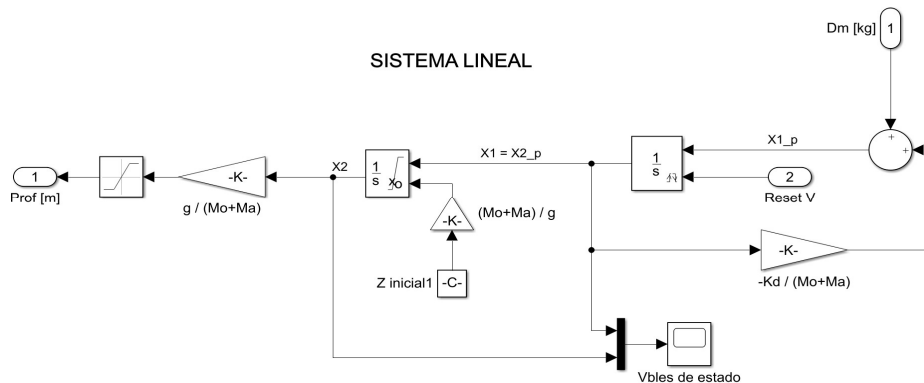


Figura 4.12: diagrama de bloques “sistema lineal”.

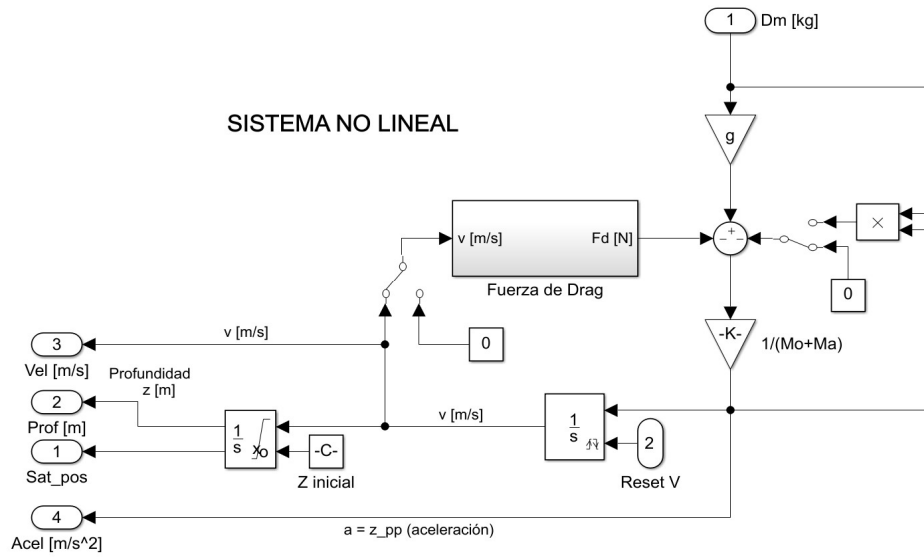


Figura 4.13: diagrama de bloques "sistema no lineal".

En ambos, se ingresa con Δm y estos entregan valores de velocidad, profundidad y aceleración. El diagrama de bloques de la Figura 4.13 es una representación de la ecuación (2), en el cual se añade un conmutador para confirmar la aproximación $(m_e + m_a) \gg \Delta m$. Dentro del mismo, se añade el bloque "fuerza de drag" que se observa en la figura siguiente:

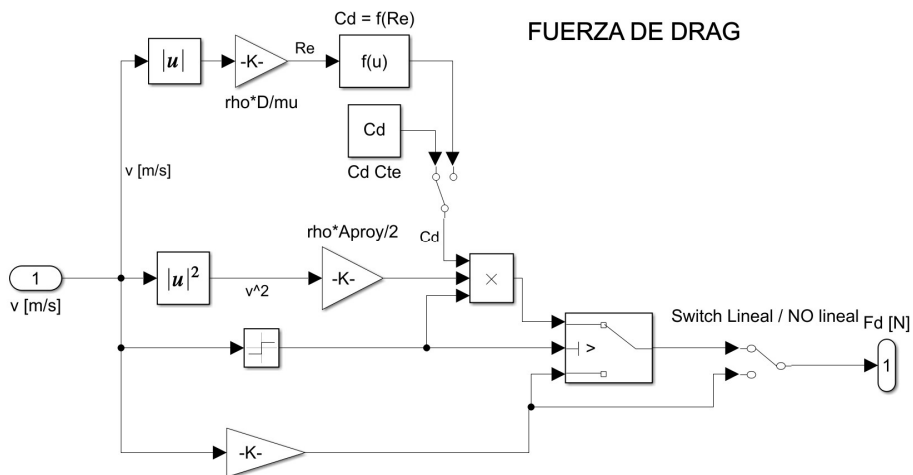


Figura 4.14: diagrama de bloques "fuerza de drag".

Este bloque, es el que representa la gran diferencia entre el sistema lineal y no lineal, el cual recibe la velocidad del robot y calcula con ella la fuerza de resistencia del agua. Los resultados de las pruebas se pueden ver en la siguiente imagen:

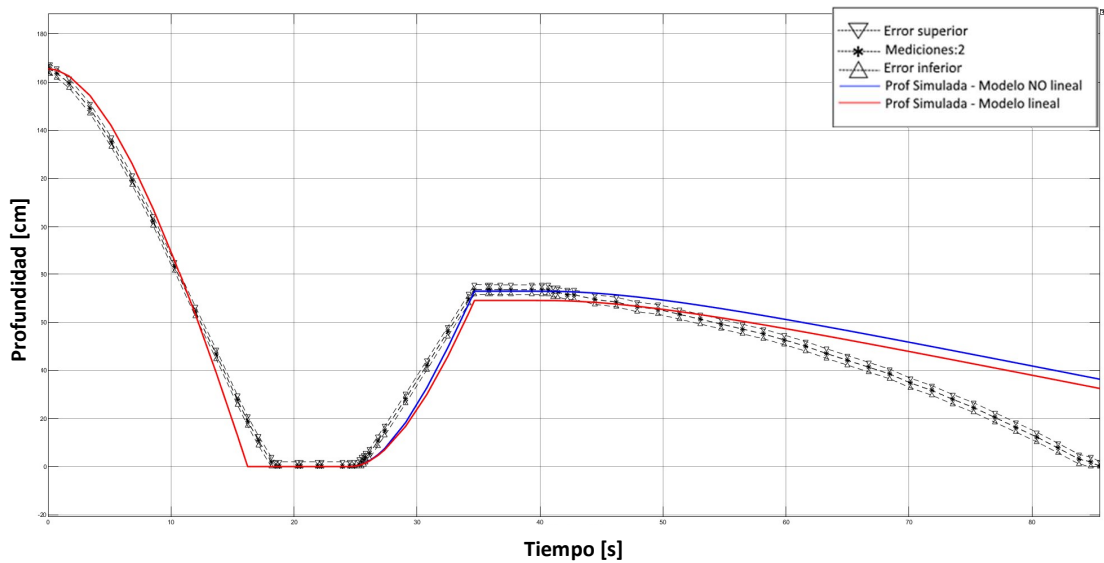


Figura 4.15: resultados de la simulación. En negro se encuentran los datos experimentales medidos junto con los errores de medición, en azul la simulación del modelo no lineal y en rojo la del modelo lineal.

Se puede observar que, en un inicio, los modelos se ajustan de manera aceptable a las mediciones, pero después de los 60 segundos, los datos medidos muestran que el robot llegó a la superficie con una velocidad superior a la simulada. Esto se puede deber al cable mediante el cual se alimenta y se controla el robot, ya que por momentos se tensaba y podría haber ocasionado que ejerza una fuerza que lo haga subir más rápido.

La función de transferencia obtenida a partir de los ensayos realizados es:

$$G(s) = \frac{g}{s(s(m_o + m_a) + Kd)} = \frac{9.807}{12.02 s^2 + 0.3 s}$$

Siendo $Kd=0.3$.

Al ser un sistema de dos polos en el semiplano izquierdo, se puede decir que el mismo es intrínsecamente estable a lazo abierto.

Validación del modelo

Finalmente, se ejecutó una prueba de validación, tomando datos mientras se colocaba el pistón en distintas posiciones. El error en la medición se fijó en ± 3 mm, que es la desviación estándar que se obtuvo luego de varias mediciones. Se obtuvo el siguiente resultado:

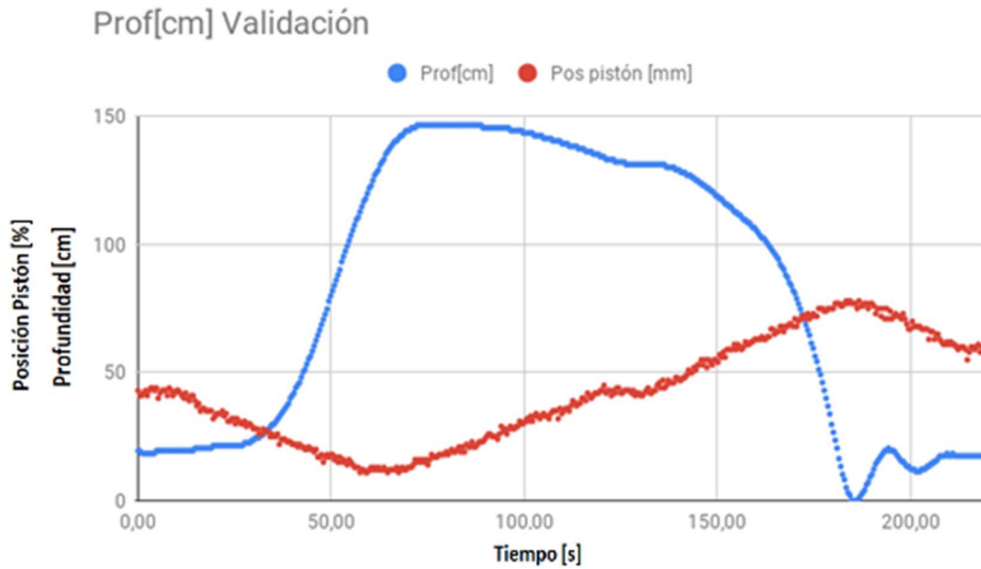


Figura 4.16: prueba de validación.

De la figura 4.16 se puede observar que al principio de la prueba, cuando el pistón se encuentra en el medio del cilindro (~42 cm), el robot está en su posición neutra, es decir está quieto. Cuando se baja el pistón, el robot se empieza a hundir hasta los 150 cm. Luego, se sube el pistón y *Robotino* empieza a subir hasta llegar a la superficie, comprobando así que el comportamiento es el esperado.

Para validar el modelo, se utilizó el siguiente diagrama de bloques:

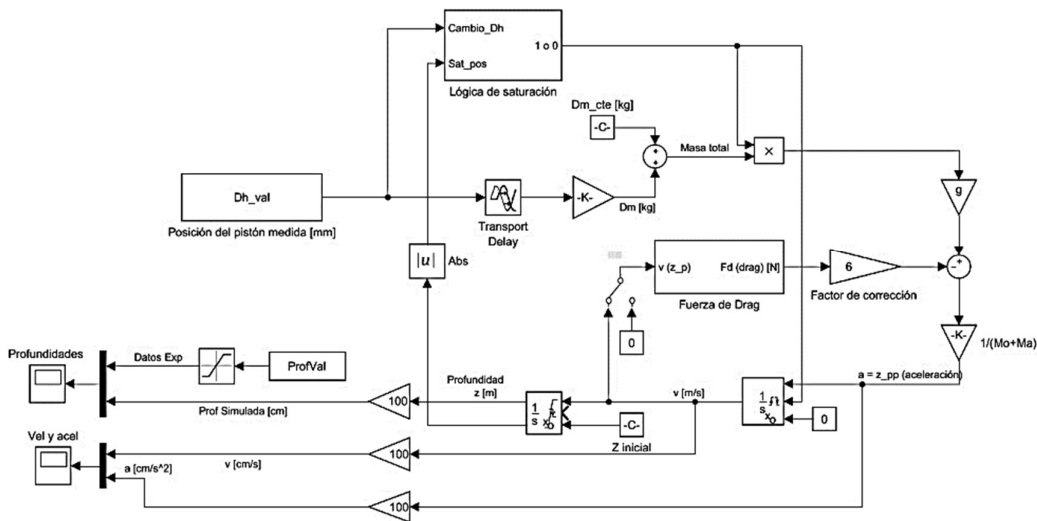


Figura 4.17: diagrama de bloques para validar el modelo.

Comparado con el de la figura 4.10, fue necesario incluir algunos cambios:

- Incluir un retardo al sistema, debido a la demora del movimiento del pistón;
- Saturar la profundidad en ~127 cm, debido al efecto del cable que tensa al robot y no permite que siga sumergiéndose;

- Incluir un factor de corrección en la fuerza de drag (de 6) determinado por prueba y error.

El resultado obtenido es el siguiente:

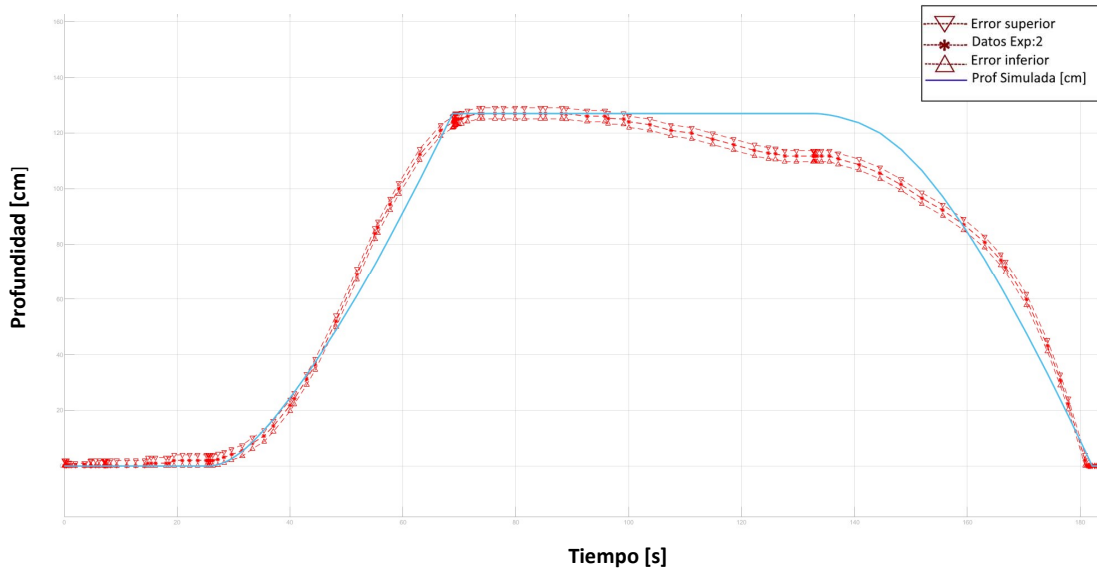


Figura 4.18: resultado obtenido de la validación del modelo. En rojo los datos experimentales, en azul la profundidad simulada.

Puede decirse, que los resultados obtenidos son satisfactorios, viendo algunas discrepancias durante la subida del robot, pudiendo ser debidas nuevamente al cable tensado que ocasionaba que subiera más rápido de lo esperado.

Conclusiones

En líneas generales, se puede concluir que los objetivos planteados al inicio de este trabajo fueron cumplidos satisfactoriamente. Se logró realizar los acondicionamientos previos al control del UUV, que incluían pruebas de estanqueidad, flotabilidad y estabilidad. También, se hicieron ensayos de respuesta natural para encontrar finalmente la función de transferencia que representa el comportamiento del sistema de flotabilidad para controlar la profundidad del robot.

Se pueden enumerar las siguientes futuras mejoras surgidas a partir de diversas problemáticas ocurridas durante la etapa de experimentación:

- Calibración de los finales de carrera del cilindro interno, ya que no se activaban las alarmas correspondientes cuando debían hacerlo. Esto será de suma importancia al momento de implementar el control de profundidad.
- Construcción de un mecanismo para disminuir el efecto del cable sobre la dinámica de Robotino, en lo posible investigar la forma de lograr hacerlo inalámbrico, ya sea con alguna nueva tecnología de telecomunicaciones, como por ejemplo transmisión por ultrasonido. También se puede plantear la posibilidad de transformarlo de un ROV a un AUV, con rutinas predeterminadas y memoria para registrar los datos obtenidos. De igual manera debe considerarse en ese caso, un estudio de posibles baterías que cumplan con los requerimientos necesarios.
- Repetición de los ensayos para encontrar un modelo que se ajuste mejor al comportamiento del robot, intentando disminuir el gran efecto del cable.
- Diseño de un controlador a lazo cerrado, que cumpla con los requerimientos finales de este sistema, es decir el ajuste grueso de la profundidad de *Robotino*, dejando el ajuste fino al sistema de propulsión del mismo.
- Reemplazo de los contrapesos por otros de acero inoxidable o bien pintar los que actualmente posee.

Como conclusión general del trabajo realizado durante la Beca de Verano, puedo decir que se cumplieron mis expectativas en su totalidad. Aprendí de nuevas técnicas experimentales en ingeniería, teniendo la posibilidad de trabajar en un laboratorio especializado en Robótica, área en el cual nunca antes había tenido la posibilidad. También, me familiaricé con la forma de trabajo del grupo, distinta a la manera que tenía acostumbrada. Es por todo esto que puedo decir que la Beca de Verano me ha brindado una gran experiencia personal para mi futuro como profesional.

Bibliografía

- [1] E. M. Robador, Diseño conceptual de módulo robótico de inspección para ambientes subacuáticos, Proyecto de Fin de Carrera de Ingeniería Mecánica, Instituto Balseiro, 2014.
- [2] G. M. Hansen, Diseño conceptual de un sistema de flotabilidad para el control de profundidad de un vehículo robótico subacuático, Proyecto Fin de Carrera, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, 2017.
- [3] E. M. Robador, Diseño de un módulo robótico de inspección para ambientes subacuáticos, No publicado. Tesis de la Carrera de Maestría en Ingeniería, Instituto Balseiro, 2019.
- [4] C. d. Wikipedia, «Grado de Protección IP,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Grado_de_protecci%C3%B3n_IP&ol did=113262215.
- [5] G. Granados, Caracterización del Sistema de Propulsión para el Control de un Robot Submarino, Becas de Verano, Instituto Balseiro, Comisión Nacional de Energía Atómica, 2019.
- [6] F. White, Fluid mechanics. 6° ed°. , Boston: McGraw-Hill, 1999.

Sol M. Maldonado Betanzo¹ – Lautaro Acha² – E. Matías Robador²

1. Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. solmabet@hotmail.com
 2. División Robótica y Automatización del Proyecto CAREM, CNEA, Centro Atómico Bariloche. lautaro.acha@cab.cnea.gov.ar, eduardo.robador@cab.cnea.gov.ar

Introducción

En el marco del Proyecto CAREM 25, se plantea el desarrollo de un vehículo sumergible no tripulado (UUV) destinado a inspeccionar ambientes cerrados, esperando a futuro que se pueda utilizar para inspeccionar el interior del recipiente a presión del reactor nuclear CAREM 25. El prototipo VaFlo [1] plantea utilizar un mecanismo tuerca-husillo para actuar un pistón y controlar la entrada o salida de agua, modificando así la masa de agua del vehículo, y en consecuencia su flotabilidad y profundidad.

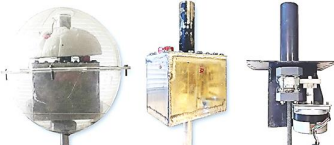
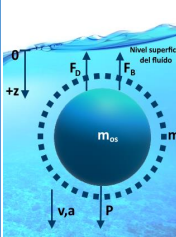


Fig. 1: fotografías de VaFlo. En la imagen de la izquierda, el prototipo completo. En el centro, el prototipo sin carcasas de acrílico, ni contrapesos, ni flotadores. A la derecha, los componentes situados dentro de la caja estanca.

Principio de funcionamiento

Objeto sumergido en un fluido



- $P = m_{os}g$, el peso;
- $F_B = \rho V_{OS}g$, la fuerza boyante;
- $F_D = \frac{1}{2} C_D A_{OS} \rho |v|^2$, la fuerza de arrastre;
- m_{os} , la masa del objeto sumergido;
- m_a , la masa de fluido agregada;
- V_{OS} , el volumen del objeto sumergido;
- A_{OS} , el área proyectada del objeto sumergido;

Fig. 2: fuerzas actuantes sobre un cuerpo sumergido en movimiento.

- v y a , la velocidad y aceleración del cuerpo sumergido en movimiento;
- C_D , el coeficiente de arrastre;
- $m_e = \rho V_{OS}$.

$$a = \frac{\Delta mg - \frac{1}{2} C_D A_{OS} \rho v |v|}{m_e + \Delta m + m_a}$$

Lastre variable

El sistema está implementado a partir de un mecanismo tuerca-husillo accionado por un motor paso a paso.

Al variar la posición del pistón, es posible aumentar o disminuir la masa de agua que ingresa o egresa del cilindro. Si $\Delta m = \rho A_c \Delta h$ (siendo A_c el área del cilindro y Δh la posición del pistón) entonces:

- $\Delta h = 0 \rightarrow$ pistón al medio flotabilidad positiva.
- $\Delta h = \frac{h}{2} \rightarrow$ pistón al fondo flotabilidad negativa.
- $\Delta h = -\frac{h}{2} \rightarrow$ pistón al tope flotabilidad neutra.

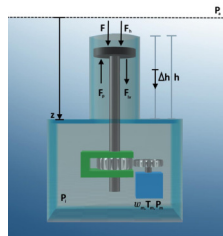
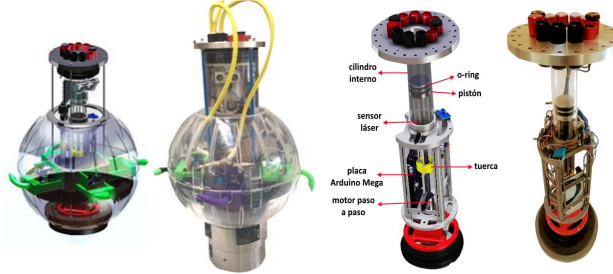


Fig. 3: esquema del mecanismo de lastre variable, con las fuerzas actuantes sobre el pistón.

Robotino 2.0



a) Prototipo completo Fig. 4: diseño y prototipo construido de Robotino 2.0 [3]. b) Sistema de flotación

Respuesta natural del sistema Caracterización del motor paso a paso

Se realizaron ensayos teniendo flotabilidad positiva, negativa y neutra, obteniendo los siguientes resultados:

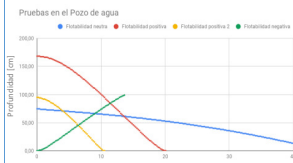


Fig. 6: respuesta natural para distintas condiciones iniciales.

Se caracterizó llevando el pistón de su posición superior a inferior y viceversa, variándole la cantidad de pasos y la tensión de alimentación. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Caracterización motor paso a paso	
Constante Geométrica [pasos/mm]	150 ± 5%
Velocidad máxima [RPM]	100 ± 5%
Tiempo de recorrido total (subida) [s]	46 ± 13%
Tiempo de recorrido total (bajada) [s]	52 ± 13%
Potencia máxima [W]	1.5 ± 10%

Ajuste del modelo

Se realizó un archivo en *Matlab* para ajustar los datos y calcular la masa constante, la masa añadida, C_D y $K_d = \frac{\rho}{2} C_D A_{proy} \bar{v}$.

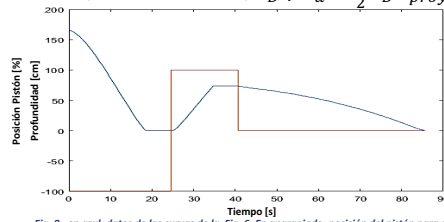


Fig. 8: en azul: datos de las curvas de la Fig. 6. En anaranjado: posición del pistón para cada prueba.

Se utilizó la app *Curve Fitting* para obtener los valores de velocidad terminal, coeficiente de arrastre, masa constante y velocidad media:

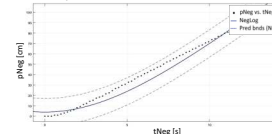


Fig. 9: ajuste de curva flotabilidad negativa.

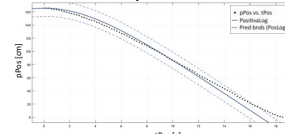


Fig. 10: ajuste de curva flotabilidad positiva.

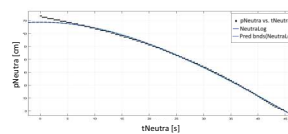


Fig. 11: ajuste de curva flotabilidad neutra.

Pudiendo resumir los siguientes resultados:

	Flotabilidad	V_{med} [cm/s]	V_{term} [cm/s]	m_{cte} [g]	C_D
Positiva		-9	-13	-3	0.77
Negativa		7	12	-3	0.77
Neutra		-2	-3	-2	0.77

Conclusiones

Se logró realizar los acondicionamientos previos al control del UUV. Se hicieron ensayos de respuesta natural para encontrar la función de transferencia que representa el comportamiento del sistema para controlar la profundidad del robot. Las diferencias entre el modelo y la planta pueden ser debidas al gran efecto del cable, planteando a futuro la posibilidad de utilizar tecnología inalámbrica.

Puesta a punto

Se llevaron a cabo tres ensayos preparativos al control del UUV:

Estanqueidad: se comprobó que cumple con la norma IP67.

Flotabilidad: se logró que tenga flotabilidad levemente positiva.

Estabilidad: se balanceó la masa del robot de forma tal que su centro de gravedad quedó verticalmente por debajo de su centro de flotación, eliminando el momento de vuelco.



Fig. 5: (izquierda) prueba de estanqueidad, (centro) prueba de flotabilidad y (derecha) prueba de estabilidad.

Modelado y simulación

Se efectuó el modelo dinámico de la planta con la herramienta *Simulink*:

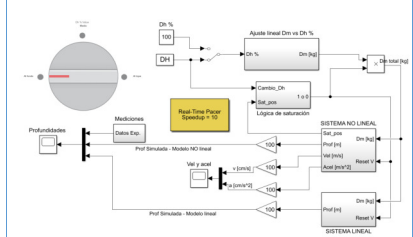


Fig. 12: diagrama de bloques del sistema de flotación.

Obteniendo el siguiente resultado:

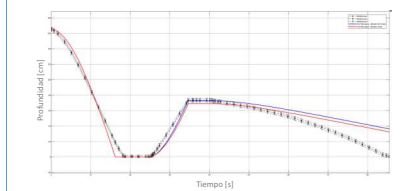


Fig. 13: resultados de la simulación. En negro se encuentran los datos experimentales medidos junto con los errores de medición, en azul la simulación del modelo no lineal y en rojo la del modelo lineal.

Siendo la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{g}{s(s(m_o + m_a) + Kd)} = \frac{9.807}{12.02 s^2 + 0.3 s}$$

Es decir, es intrínsecamente estable a lazo abierto.

Se valida el modelo, obteniendo el siguiente resultado:

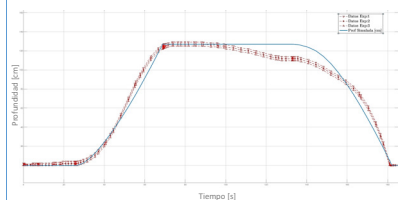


Fig. 14: resultado obtenido de la validación del modelo. En rojo los datos experimentales, en azul la profundidad simulada.

[1] G. M. Hansen, Diseño conceptual de un sistema de flotabilidad para el control de profundidad de un vehículo robótico subacuático, Proyecto Fin de Carrera, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo, 2017.
 [2] E. M. Robador, Diseño de un módulo robótico de inspección para ambientes subacuáticos, No publicado. Tesis de la Carrera de Maestría en Ingeniería, Instituto Balseiro, 2019.



Comisión Nacional
de Energía Atómica



INFORME BECA DE VERANO 2019 – INSTITUTO BALSEIRO

GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE PARTÍCULAS EN AIRE

MILOC DALILA

ESTUDIANTE DE INGENIERÍA QUÍMICA – UTN FACULTAD REGIONAL VILLA MARÍA

MARCELO CAPUTO

DIRECTOR

Laboratorio de Seguridad Nuclear
Departamento de Seguridad Nuclear
Gerencia de Ingeniería Nuclear
Centro Atómico Bariloche
Comisión Nacional de Energía Atómica
Universidad Nacional de Cuyo





Contenido

Palabras claves.....	3
Resumen	3
Introducción teórica al tema	3
Motivación	3
Material particulado (aerosoles).....	4
Tamaños de partículas atmosféricas.....	5
Fuentes de material particulado atmosférico.....	6
Polvo mineral	6
Planteamiento de la investigación	7
Metodología	7
Condiciones de aplicación	7
Equipo y materiales a utilizar	8
Otros equipos para medición de concentración de aerosoles	11
Mediciones experimentales y resultados.....	11
Caracterización del aerosol ambiente presente en el laboratorio de Seguridad Nuclear.....	11
Medición en día ventoso.....	16
Generación y medición de partículas de poliestireno	20
Medición del espectro de aerosoles generado por un dispositivo de aplicación de medicamento	24
Conocimientos adquiridos durante la investigación.....	25
Conclusiones.....	25
Referencias.....	26

Palabra claves

aerosol, partícula, particle, espectro, spectrum

Resumen

En este trabajo se caracterizaron espectros de tamaños de aerosoles utilizando el Aerodynamic Particle Sizer (APS). Los espectros caracterizados fueron el aire ambiental del laboratorio en dos situaciones distintas, día calmo y día con viento, el espectro emitido por un atomizador de aerosoles y el generado por un dispositivo de dosificación de medicamentos.

En el primer caso se pudo observar el efecto de la resuspensión de partículas de mayor tamaño. En el segundo caso se observó el espectro generado por el atomizador con y sin secado, pudiéndose determinar que el dispositivo de secado reduce en dos órdenes de magnitud la cantidad de gotas de agua. En el tercer caso se pudo verificar la influencia de pesar los espectros de aerosoles según el número, la superficie y el volumen. Obteniéndose los resultados presentados en la bibliografía.

Introducción teórica al tema

Motivación

Las partículas en suspensión (aerosoles) son un medio importante para el transporte de sustancias en distintas áreas de la ciencia, desde la medicina, tal es el caso de los dispositivos presurizados para la aplicación de medicamentos (figura 1), hasta las aplicaciones en ingeniería, como en el caso de los inyectores de motores (Figura 2), la aplicación de pinturas (figura 3) y turbinas. Los aerosoles también pueden ser generados por mecanismos naturales como es el caso del polen, del spray marino o de las erupciones volcánicas.

Es por este motivo que el estudio de la dinámica de los aerosoles, esto es la manera en que interactúan entre ellos y cómo son transportados en el medio, cobra especial importancia para evaluar su concentración y los posibles efectos en el medio.



Figura n° 1: cartucho presurizado para administración de fármacos



Figura n° 2: inyectores de motores



Figura n° 3: aerosol para aplicación de pintura

El estudio de los aerosoles atmosféricos ha cobrado gran interés en los últimos años debido a la evidencia del papel desempeñado por estos en el forzamiento radiativo del clima. A pesar de que los aerosoles merecen la misma consideración que los gases de efecto invernadero, muy estudiados en las últimas décadas, se ha avanzado relativamente poco en su conocimiento. El motivo principal reside en la complejidad del problema, tanto desde el punto de vista experimental como modelístico. La gran variedad de fuentes (naturales y artificiales) de aerosoles, su distribución espacial heterogénea (tanto a nivel regional como global) y su corta vida media (entre 5 y 10 días) hacen que su caracterización y modelización se convierta en una tarea muy complicada. ^[1]

Las partículas también juegan un papel indirecto actuando como núcleos de condensación de nubes y modificando sus propiedades ópticas. Incrementan el número de gotas al tiempo que se disminuye su tamaño medio, afectando así su eficiencia de precipitación y también la capacidad de reflejar la radiación solar hacia el espacio. ^[1]

Debido al papel fundamental que juegan los aerosoles en diversos aspectos de la naturaleza, la tecnología y la salud, me entusiasma interiorizarme en el tema tanto en la práctica como en la teoría. Para investigar e interpretar los principios de su comportamiento, se plantean sencillas mediciones de aerosoles.

Material particulado (aerosoles)

Un aerosol es una suspensión de finas partículas sólidas o líquidas en un medio, comúnmente se utiliza para referirse a un aerosol como al componente particulado solamente. Los aerosoles en la atmósfera pueden surgir tanto de fuentes naturales, como el spray marino (figura 4), polvo levantado por el viento (figura 5), y volcanes, como de actividades antropogénicas, por ejemplo, la combustión de hidrocarburos (figura 6). ^[2]

Emitidos directamente como partículas (aerosoles primarios) o formados en la atmósfera por procesos de conversión de gas a partícula (aerosoles secundarios), los aerosoles tienen un rango de tamaño desde unos pocos nanómetros (nm) hasta decenas de micrómetros (μm) de diámetro. Una vez en el aire, los aerosoles pueden cambiar su tamaño y composición por condensación de especies de vapores o por evaporación, por coagulación con otras partículas, por reacción química, o por activación en presencia de sobresaturación de agua para convertirse en niebla o gotas de nubes. Aerosoles de diámetro menor a $1 \mu\text{m}$ generalmente tienen una concentración en la atmósfera en el rango de 10 a varios miles por cm^3 , aquellos que exceden $1 \mu\text{m}$ de diámetro son encontrados usualmente en concentraciones menores que 1 por cm^3 . ^[2]



Figura n°4: Spray marino



Figura n° 5: Polvo suspendido por el viento



Figura n°6: Humo generado por la combustión

Los aerosoles son removidos del medio por dos mecanismos: deposición seca o deposición húmeda. Debido a estos fenómenos y a que la distribución geográfica de las fuentes es no uniforme, el tiempo de residencia de los aerosoles es relativamente corto en la tropósfera, entre unos pocos días a pocas semanas. Esto conduce a que su concentración y composición alrededor de la tierra varíen ampliamente. ^[2]

Terminología relacionada a partículas atmosféricas

Aerosoles, aerocoloides, sistemas aerodispersos: partículas sólidas o líquidas en suspensión en un medio.

Polvo: suspensión de sólidos particulados producidos por desintegración mecánica de material como pulverización, molienda, y voladura. Poseen un diámetro de partícula mayor a 1 μm .

Tamaños de partículas atmosféricas

Los aerosoles atmosféricos menores que 2.5 μm de diámetro son referidos como “finos” y aquellos mayores que 2.5 μm como “gruesos”. Los modos de partículas fino y grueso, en general, se originan, son transformados y removidos por diferentes mecanismos. Por lo tanto, tienen diferente composición química y forma. Esto hace que la distinción entre partículas finas y gruesas es fundamental en cualquier discusión de la física, química, medición y los efectos en la salud de los aerosoles. ^[2]

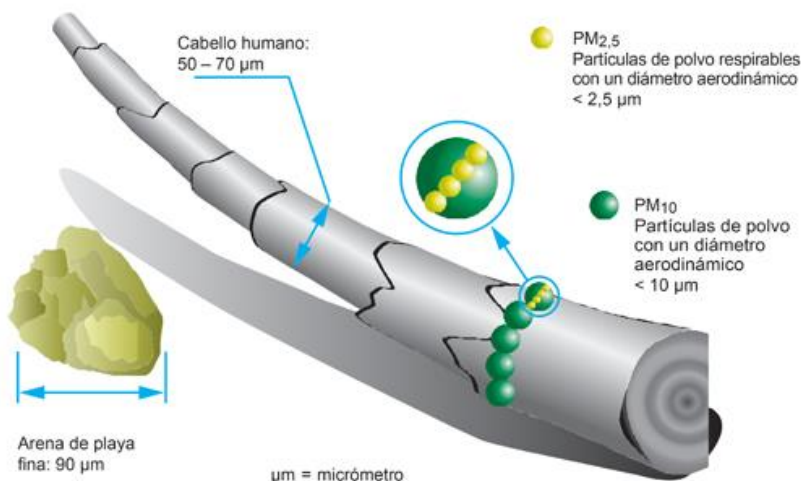


Figura n°7: tamaño de partículas menores a 2.5 μm ($\text{PM}_{2,5}$) y menores a 10 (PM_{10}) μm respecto del tamaño de un cabello humano.

El modo grueso es formado por procesos mecánicos. Estos tienen velocidades de sedimentación lo suficientemente grandes por lo que son removidos de la atmósfera en un tiempo razonablemente corto.^[2] Dado el equipamiento con el que se cuenta en el Laboratorio de Seguridad Nuclear este análisis se centrará en la medición del modo grueso.

Fuentes de material particulado atmosférico

Fuentes naturales significativas de partículas incluyen tierra y escombros de roca (polvo terrestre), acción volcánica, spray marino, quema de biomasa y reacciones entre emisiones gaseosas. La emisión de material particulado atribuible a la actividad humana surge principalmente de cuatro categorías: combustión de gasolina, procesos industriales, fuentes fugitivas (polvo de caminos pavimentados y no pavimentados, erosión del viento de campos de cultivo, construcciones, etc.) y fuentes de transporte (automóviles, etc.).^[2]



Figura n° 8: Partículas en suspensión emitidas por acción volcánica

Polvo mineral

El aerosol de polvo mineral surge de la acción del viento en las partículas sólidas. Las regiones áridas y semiáridas del mundo, las cuáles cubren alrededor de un tercio de la superficie global de la tierra, son dónde están localizadas las principales fuentes de polvo. Las emisiones de polvo están controladas por la velocidad del viento y la naturaleza de la superficie en sí misma.

Las principales especies encontradas en el polvo de cielo son cuarzo, arcilla, calcita, yeso y óxidos de hierro; las propiedades (ópticas especialmente) dependen de la abundancia relativa de los diferentes minerales. La sedimentación por gravedad y la deposición húmeda son los principales procesos de remoción de polvo mineral desde la atmósfera. El tiempo de vida



promedio de las partículas de polvo en la atmósfera es de dos semanas aproximadamente, durante el cual pueden ser transportadas miles de kilómetros.

Éstas partículas son emitidas desde fuentes naturales y antropogénicas. Las emisiones naturales provienen de la acción del viento en regiones de origen inalteradas. Las emisiones antropogénicas resultan de la actividad humana, incluyendo:

- Uso del suelo que modifican las condiciones superficiales del mismo
- Modificaciones climáticas que alteran las emisiones de polvo. Tales modificaciones incluyen cambios en la velocidad del viento, nubes y precipitaciones y la cantidad de material soluble levantado por el viento.

Planteamiento de la investigación

En el presente trabajo se plantea el estudio experimental de la generación y caracterización de aerosoles en aire, para esto último, se medirán los espectros de tamaño de los aerosoles que se pueden observar de distintas fuentes.

El objetivo es comparar los distintos espectros, y en función de esto, comprender los diferentes fenómenos físicos que hacen a su discrepancia; conjuntamente realizar el análisis de los resultados experimentales obtenidos. Se propone encontrar la distribución de diámetros que mejor ajuste los datos medidos, y estimar cual fenómeno físico modifica la población de aerosoles.

Metodología

Se llevaron a cabo mediciones en condiciones ambiente del laboratorio de Seguridad Nuclear del Centro Atómico de Bariloche, con el Aerodynamic Particle Sizer (APS). La medición se realizó bajo condiciones ambientales para así analizar el aerosol formado por el aire del propio lugar, además de los aerosoles generados artificialmente.

Para interpretar los datos se emplearon herramientas de probabilidad y estadística como la media, desviación estándar, coeficiente de determinación R^2 , distribución log-normal y criterio de distinguibilidad.

Los objetivos de las mediciones fueron los siguientes:

- Caracterizar el aerosol a través de espectros de dispersión, ya sea de diámetros aerodinámicos, superficie o masa.
- Aproximar dicha distribución con modelos matemáticos
- Determinar el tiempo necesario de medición para generar una muestra representativa de la población a analizar.
- Relacionar las diferencias encontradas en los espectros con los fenómenos físicos que pudieran sustentarlas.

Condiciones de aplicación

Las mediciones se realizaron en el Laboratorio de Seguridad Nuclear ubicado en el Centro Atómico de Bariloche. El laboratorio es un ambiente cerrado con una ventana al exterior que, si bien está ubicado en un área urbana, se encuentra rodeado de árboles. No hay industrias cercas ni gran actividad antropogénica, lo que resulta en un ambiente con características intermedias entre rural y urbana.



Equipo y materiales a utilizar

El equipamiento utilizado durante este experimento fue el analizador de tamaño aerodinámico de partículas marca TSI modelo APS 3320. El rango de medición es de 0.37 y 20 μm de diámetro brindando alta resolución para el rango de 0.5 a 20 μm . Este equipo es capaz de realizar dos mediciones del diámetro de aerosoles:

- diámetro aerodinámico equivalente de aerosoles: técnica de medición del tamaño aerodinámico de partícula en tiempo real llamada tiempo de vuelo. Cuando se habla de diámetro, se refiere dicho concepto.
- diámetro óptico equivalente de aerosoles: utiliza la medición de la intensidad de dispersión de luz (light-scattering)

El diámetro aerodinámico es definido como el diámetro físico de una esfera, de una unidad de densidad, que se transporta a través del aire con una velocidad igual a la de la partícula en cuestión. Esta magnitud determina el comportamiento de la partícula mientras se encuentra en la atmósfera. Además, los aerosoles que exhiben el mismo diámetro aerodinámico, poseen el mismo comportamiento al ser transportadas por el aire, independientemente de su tamaño físico, forma, densidad o composición. Es por ello que esta magnitud es una de las más importantes a la hora de caracterizar un aerosol.

Saber el diámetro aerodinámico de las partículas permite determinar:

- si el aerosol será depositado en el tracto respiratorio y dónde lo hará.
- cuanto tiempo el aerosol será transportado por el aire.
- si el aerosol penetrará en un filtro, ciclón, tubería o canal.

Este equipo fue el primero capaz de detectar coincidencia, es decir, cuando más de dos partículas están presentes en el volumen de medición. Esto afecta a todos los instrumentos continuos contadores de partículas simples, pudiendo distorsionar la medición produciendo una concentración de aerosoles menor.^[3]

Operación

El equipo acelera la muestra de aerosol a través de un orificio (figura n°9 a la izquierda), el tamaño aerodinámico de la partícula determina la velocidad de aceleración. Las partículas más grandes se aceleran más lentamente debido a la mayor inercia, al contrario de las más pequeñas. Cuando las partículas salen de la boquilla, cruzan a travez de los dos haces de laser parcialmente solapados, en el área de detección. Al pasar la partícula a través de los haces, ésta genera la señal (figura n°9 a la derecha) que provee la información sobre el diámetro aerodinámico.

En ésta área la luz es dispersada cada vez que una partícula cruza a través del láser. Un espejo elíptico (eliptical mirror en la figura 11), localizado a 90° respecto a la diección del láser, colecta la luz y la enfoca sobre un fotodetector de avalancha (APD por sus siglas en inglés). El APD convierte los pulsos de luz en pulsos eléctricos. Cresta a cresta el tiempo de vuelo de la partícula se mide con una resolución de 4 nanosegundos y, la amplitud de la señal es registrada por la intensidad de la dispersión de la luz.

El APS clasifica las mediciones en cuatro efectos. Las partículas más pequeñas que pueden generar solo una cresta detectable son descartadas, se registran como efecto 1. En un modo no correlacionado (configuración que permite al APS) éstas partículas son exhibidas en el rango de



tamaño más pequeño, es decir menos de $0.5 \mu\text{m}$. Las partículas que generan las dos crestas corresponden al efecto dos y son las contabilizadas como aerosoles efectivamente medidos. Las partículas que generan más de dos crestas, indicativas de coincidencias, también son seleccionadas separadamente y designadas como efecto tres. El efecto cuatro se produce cuando una partícula es más grande que lo que el instrumento puede medir, ocurre cuando el tiempo entre cresta y cresta es mayor a $4.096 \mu\text{s}$. Los registros en éstos dos últimos efectos no son usados para construir la distribución de tamaño de diámetro aerodinámico, o dispersión de luz. En la figura 10 se pueden observar los cuatro efectos mencionados y sus correspondientes señales. Un esquema general del funcionamiento del equipo se puede observar en la figura 11.

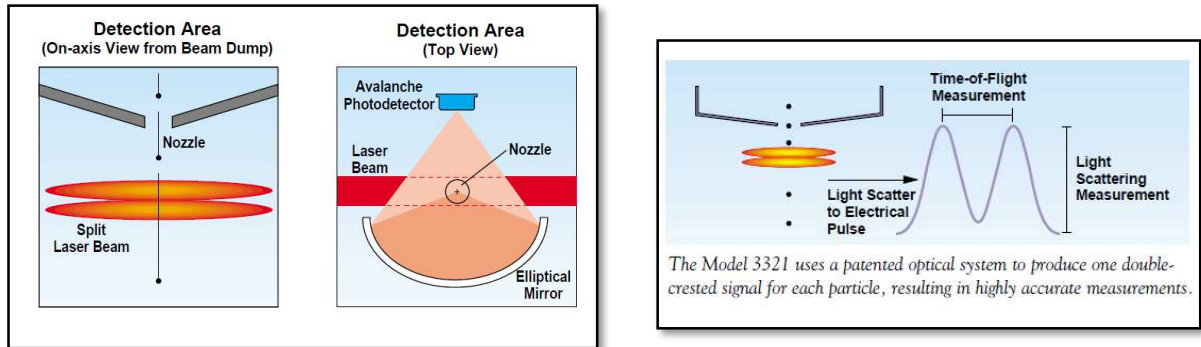


Figura n° 9: esquematización del haz doble de láser del APS, al ser atravesado por una partícula

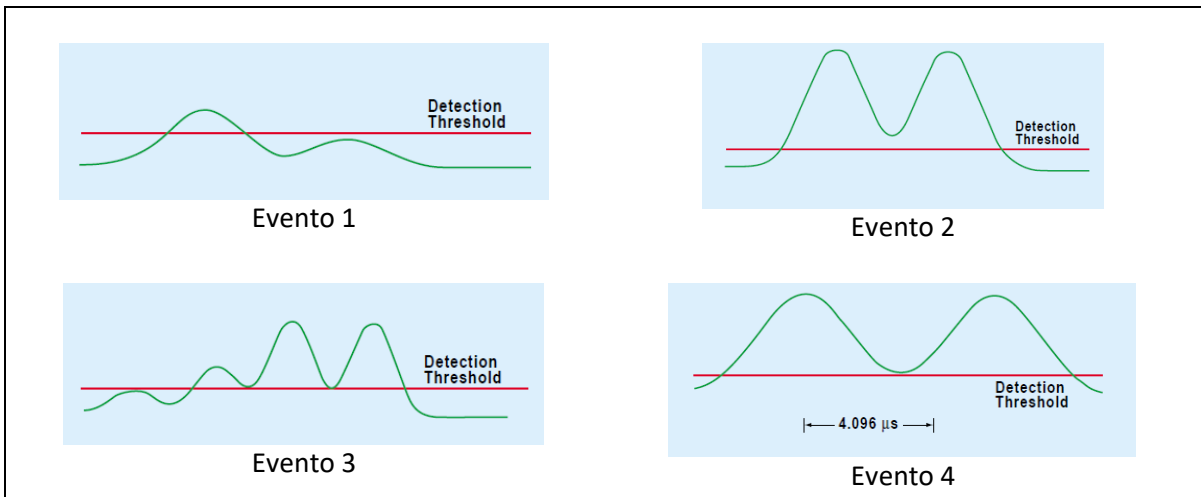


Figura n° 10: eventos que registra en APS, la línea roja indica el límite de detección

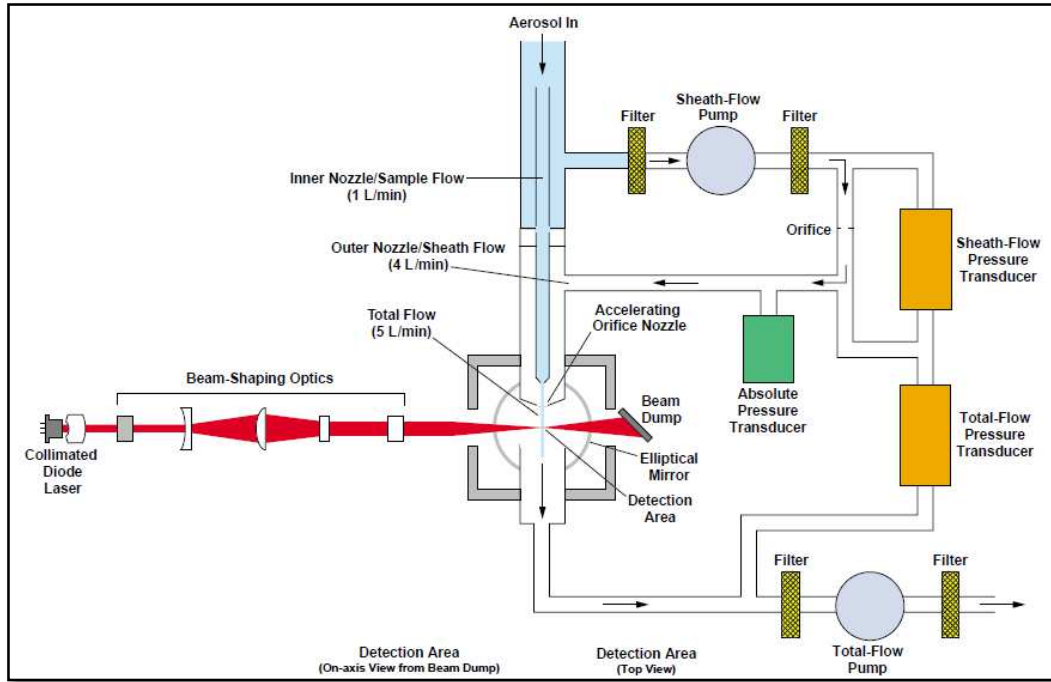


Figura n° 11: funcionamiento del APS

Las mediciones con el APS pueden ser utilizadas en las siguientes áreas:

- Inalaciones toxicológicas
- Estudios de suministro de medicamentos por vía respiratoria
- Riesgo biológico
- Estudios atmosféricos
- Monitoreo de aire ambiental
- Monitoreo de calidad de aire interior
- Testeo de filtros y equipos de limpieza de aire
- Caracterización de pruebas de aerosoles usados en calibración de instrumentos de partículas.
- Tecnología spray
- Evaluación de performance de otros artefactos aerodinámicos
- Medición de polvos
- Investigación básica

Aclaraciones:

- Tiempo de vuelo: señal de medición de tiempo, que mide la diferencia entre dos detectores con buena resolución de tiempo.^[6]
- Dispersión de la luz (light-scattering): se da cuando algunas partículas o moléculas encontradas en la atmósfera, tienen la habilidad de dispersar la radiación de luz en todas direcciones. A diferencia de la reflexión, donde la luz es reflejada en una sola dirección.^[7]



Otros equipos para medición de concentración de aerosoles

Medición automática de PM₁₀: equipo TEOM.

Este equipo emplea un principio cuya sofisticación ya comienza en la toma de muestra. Debido a que la captación de partículas menores a 10 micrones se hace selectivamente atendiendo a parámetros físicos de transporte aerodinámico, este equipo requiere controladores de flujo que mantengan el caudal ingresante al sistema en 16,7 litros por minuto. Este caudal controlado, conjuntamente con el diseño de la toma de muestra, asegura que la unidad sensible, que describiremos en el párrafo siguiente, colecte solamente aquellas partículas de los diámetros de interés.

La unidad sensora del equipo de medición del polvo en suspensión es una microbalanza oscilatoria. En el monitor automático y conocido como TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance), las partículas se colectan continuamente en un filtro montado en la punta de un elemento de vidrio hueco, el cual oscila en un campo eléctrico. El aire pasa a través del filtro y del elemento de vidrio, manteniéndose la frecuencia de oscilación del elemento de vidrio por medio de la retroalimentación de una señal de un sensor óptico. La frecuencia de resonancia del elemento decrece a medida que la masa de las partículas se acumula en el filtro, ya que se incrementa su masa. La concentración de la masa de las partículas se calcula por medio de una relación calibrada entre la frecuencia y la cantidad de partículas, tomando en cuenta el volumen del aire muestreado. ^[5]

Mediciones experimentales y resultados

Caracterización del aerosol ambiente presente en el laboratorio de Seguridad

Nuclear

Las mediciones se realizaron en horarios diurnos en días de clima seco, en el mes de febrero del 2019.

El tiempo de medición fue de 1 hora, ya que se realizaron muestras a un tiempo menor y debido al reducido número de partículas en aire no se consideraron representativas de la población de aerosoles. Se realizaron 4 mediciones seguidas de una hora cada una, pertenecientes a la prueba seis (figuras n° 12 a la n° 15). Con el objetivo de verificar la reproducibilidad de los resultados se realizó otra medición en idénticas condiciones, denominada prueba cuatro (figura n° 16) otro día.



Prueba 06

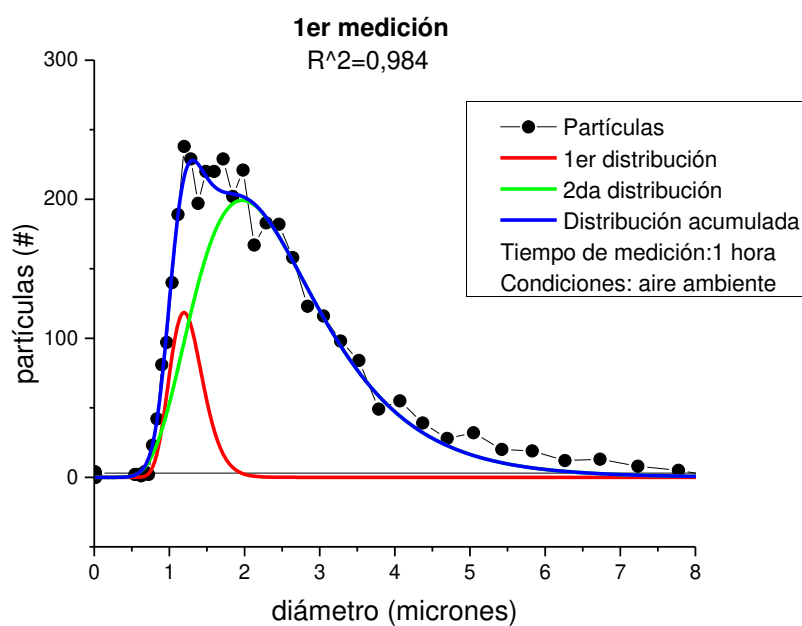


Figura n° 12: espectro de aerosoles medido a la hora 12:00 del día 13/02/19

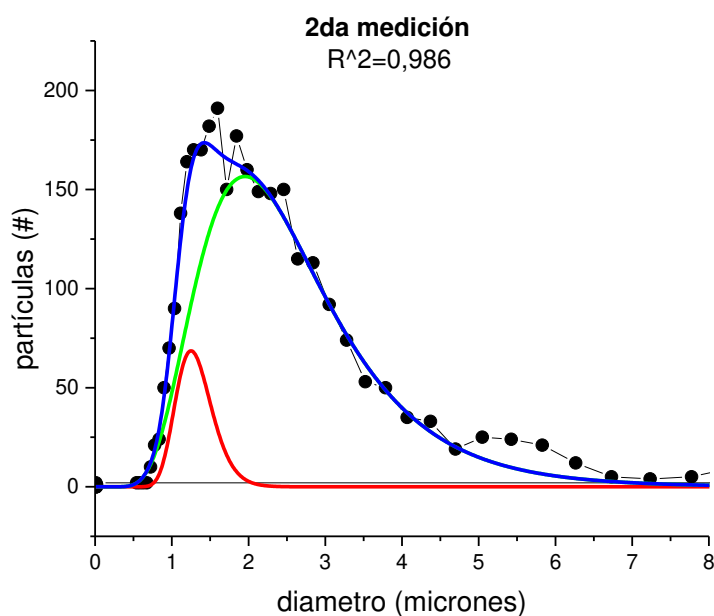


Figura n° 13: espectro de aerosoles medido a la hora 13:00 del día 13/02/19

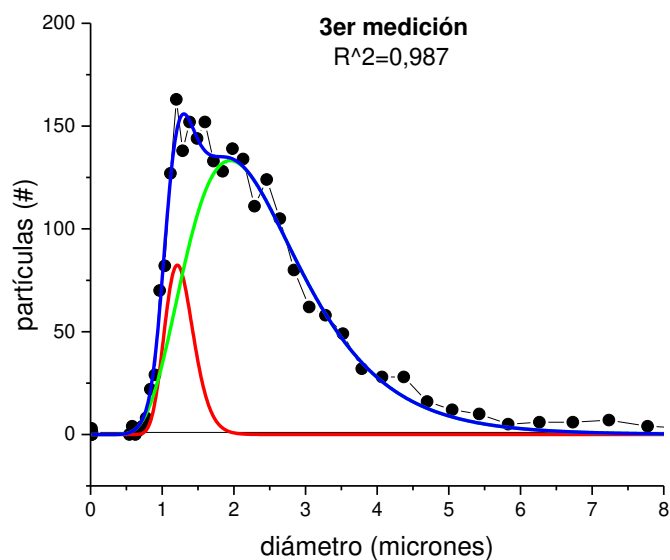


Figura n° 14: espectro de aerosoles medido a la hora 14:00 del día 13/02/19

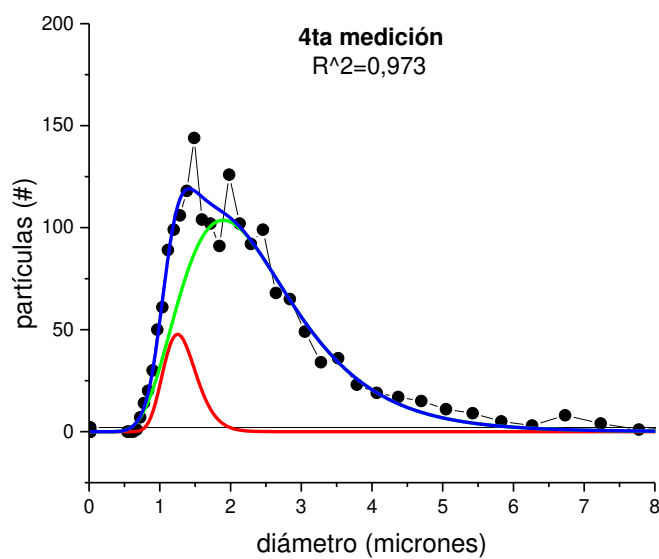


Figura n° 15: espectro de aerosoles medido a la hora 15:00 del día 13/02/19



Prueba 4

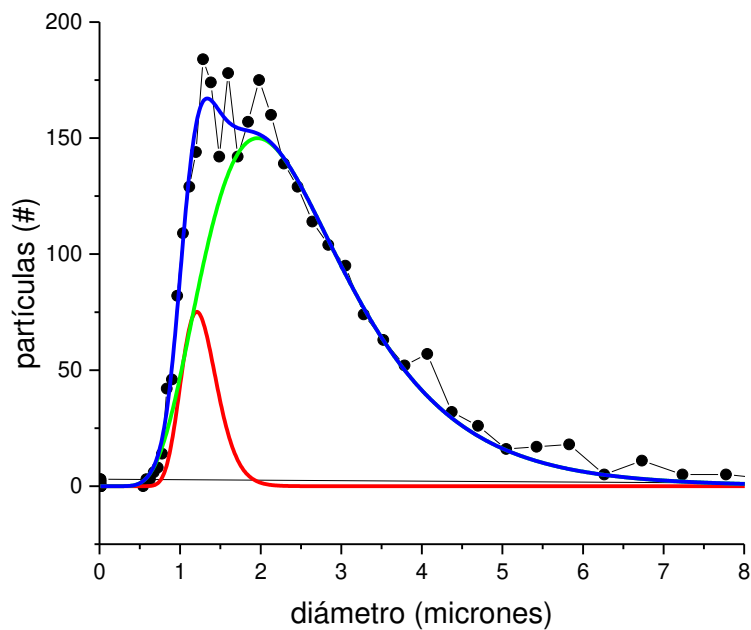


Figura n° 16: espectro de aerosoles medido a la hora 12:30 del día 12/02/19

En las figuras n° 12, 13, 14, 15 y 16 se observan los espectros de diámetros aerodinámicos de aerosoles medidos en tal fecha. Se puede apreciar que los espectros obtenidos pueden ser ajustados por dos distribuciones de probabilidad log-normal. Para comparar entre ellas se utiliza el criterio de distinguibilidad de una desviación estándar:

$$|x_{ci} - x_{cj}| \leq \Delta x_{ci} + \Delta x_{cj} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

x_{ci} es el valor medio de la distribución i

x_{cj} es el valor medio de la distribución j

Δx_{ci} es el error del ajuste del valor medio de la distribución i

Δx_{cj} es el error del ajuste del valor medio de la distribución j

Análisis de la primera distribución log-normal



Tabla n°1: Datos de la curva de ajuste (color rojo)

	Media[μm]		desviación estándar[μm]		Área[#* μm]	
	valor	error	valor	error	valor	error
Prueba 4.1	1,25	0,02	0,18	0,03	42	7
Prueba 6.1	1,23	0,02	0,18	0,02	66	12
Prueba 6.2	1,29	0,03	0,18	0,03	40	8
Prueba 6.3	1,24	0,02	0,16	0,02	42	6
Prueba 6.4	1,29	0,04	0,18	0,04	28	8

La condición presentada en la ecuación 1 se cumplió para todas las combinaciones posibles entre las medias de las mediciones, salvo para el par 6.1 y 6.2, que quedaron dentro del criterio de distinguibilidad de las dos desviaciones estándar.

$ X_{c1}-X_{c2} $	\leq	$\Delta X_{c1}+\Delta X_{c2}$
0,06	\leq	0,05

Lo cual no representa una discrepancia de una magnitud significativa, conjuntamente con valores de desviación estándar semejantes ($\cong 0.18 \mu\text{m}$) se puede asumir que la distribución representa a la misma población de partículas dentro de las 2 desviaciones estándar.

Tabla n°2: Análisis de la segunda distribución log-normal

	Media[μm]		desviación estándar[μm]		Área[#* μm]	
	valor	error	valor	error	valor	error
Prueba 4.1	2,39	0,06	0,44	0,02	361	9
Prueba 6.1	2,34	0,06	0,42	0,02	448	10
Prueba 6.2	2,36	0,06	0,43	0,02	365	9
Prueba 6.3	2,30	0,05	0,41	0,02	287	6
Prueba 6.4	2,25	0,08	0,41	0,03	223	8

Similar al caso anterior, el criterio de distinguibilidad se cumplió para todas las combinaciones posibles entre las medias de las mediciones, y los valores de las desviaciones estándar se corresponden a $\cong 0.4 \mu\text{m}$. Por ende, se trata de la misma población de partículas.

Conclusión

Dado que el espectro medido puede ser descrito con dos distribuciones log-normal, es una indicación de que posiblemente haya dos fuentes de partículas distintas, que, si bien se desconocen, podrían corresponderse a dos poblaciones de aerosoles con propiedades físicas diferentes. Para obtener una prueba concluyente de esto se deberían realizar mediciones con instrumentos que permitan adquirir una muestra de aerosoles, por ejemplo, un impactador de cascada, para el estudio de su composición. La disparidad en los valores de las áreas se debe a que se midieron cantidades distintas de partículas, lo cual podría deberse a factores aleatorios como cambios en la circulación del aire debido a ventilación y/o movimiento de personas.

Se realizó una medición más durante 1 hora, correspondiente a la prueba 4.1, un día antes de la prueba anterior. Los valores de las medias de dicha prueba se compararon con todas las medias



de la prueba 6, cumpliéndose el criterio de distinguibilidad para todas las combinaciones de mediciones.

Medición en día ventoso

La misma medición efectuada en el caso anterior se repitió en el caso de días ventosos para comprobar la posible resuspensión de aerosoles.

Se realizó la prueba 10 que consta de cuatro mediciones seguidas de 1 hora cada una. Las mediciones 1 (figura n° 17), 2 (figura n° 18) y 4 (figura n° 20) fueron aproximadas con 3 distribuciones log-normal, ya que el factor de correlación R^2 era mayor que si se utilizaban 2 distribuciones como en el caso anterior. La medición 3 (figura n° 19) presentó un comportamiento diferente debido a factores desconocidos. Para corroborar de que la medición 3 estaba afectada por factores aleatorios, se realizó la prueba 11, obteniéndose los mismos resultados que en las mediciones 1,2 y 4. Las mediciones 1, 2, 4 y la prueba 11 se analizaron aplicando el criterio de distinguibilidad para cada distribución por separado, la cual se cumplió para todas las combinaciones posibles entre las medias de las muestras.

Prueba 10

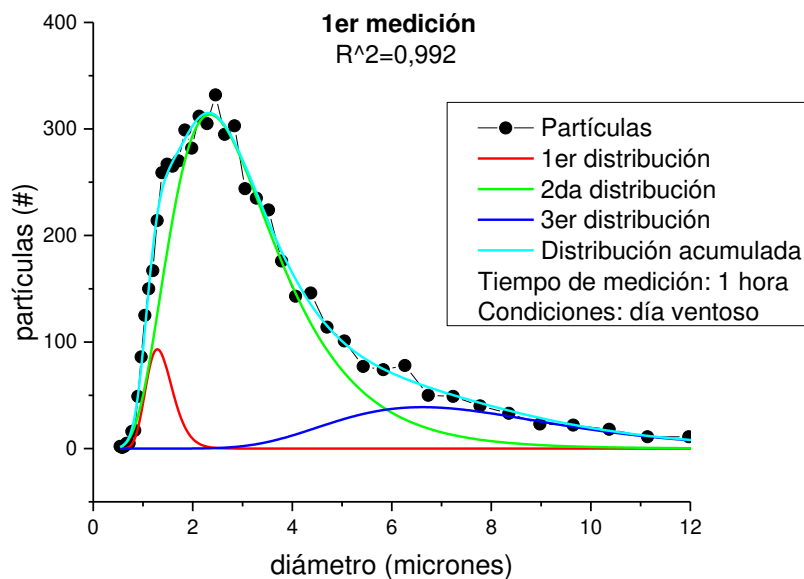


Figura n° 17: espectro de aerosoles medido a la hora 12:36 del día 18/02/19

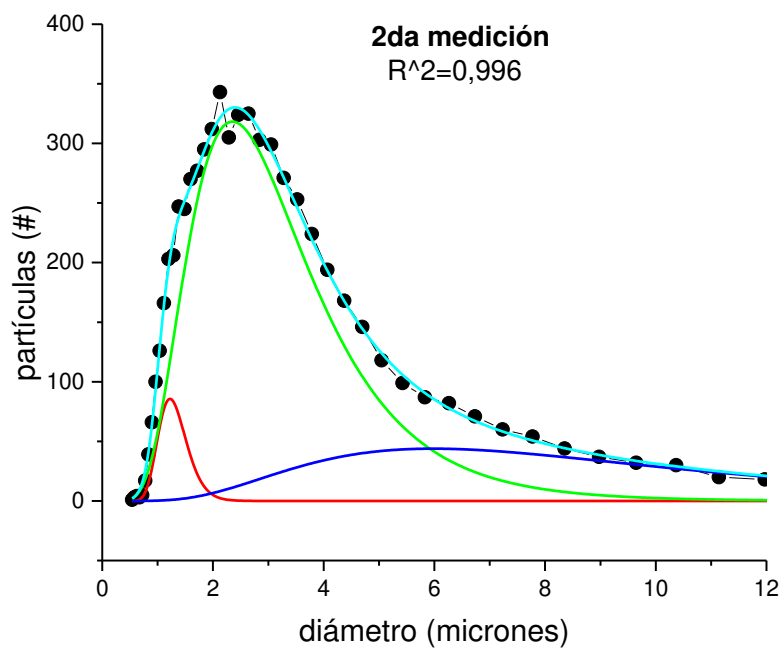


Figura n° 18: espectro de aerosoles medido a la hora 13:44 del día 18/02/19

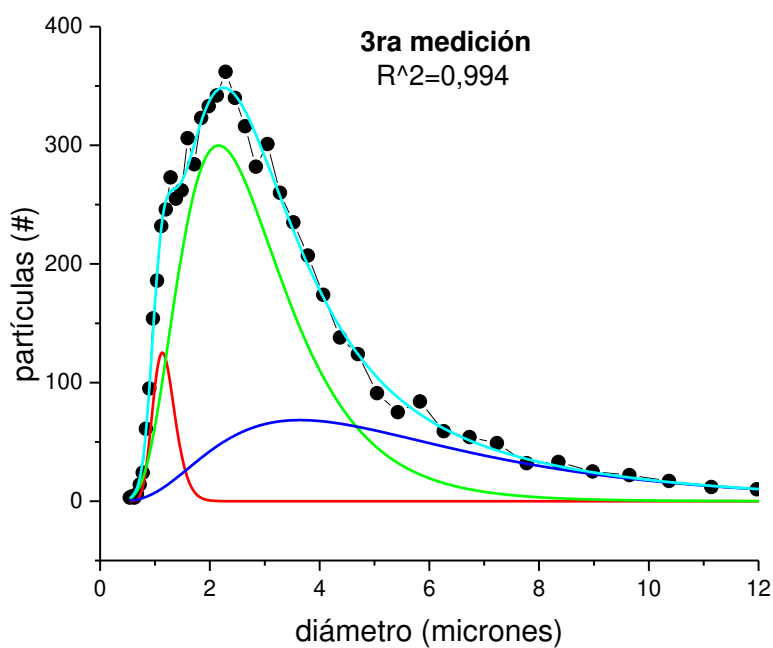


Figura n° 19: espectro de aerosoles medido a la hora 14:44 del día 18/02/19



Observaciones: la muestra 3 no pudo ser aproximada con 3 distribuciones log-normal ya que el error de los parámetros a medir era mayor al valor del mismo parámetro, independientemente de que el factor R^2 sea alto.

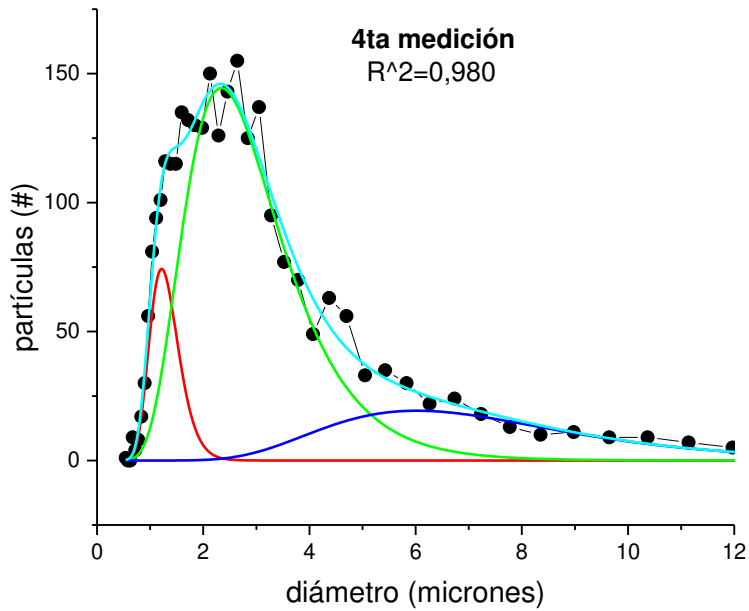


Figura n° 20: espectro de aerosoles medido a la hora 15:44 del día 18/02/19

Prueba 11

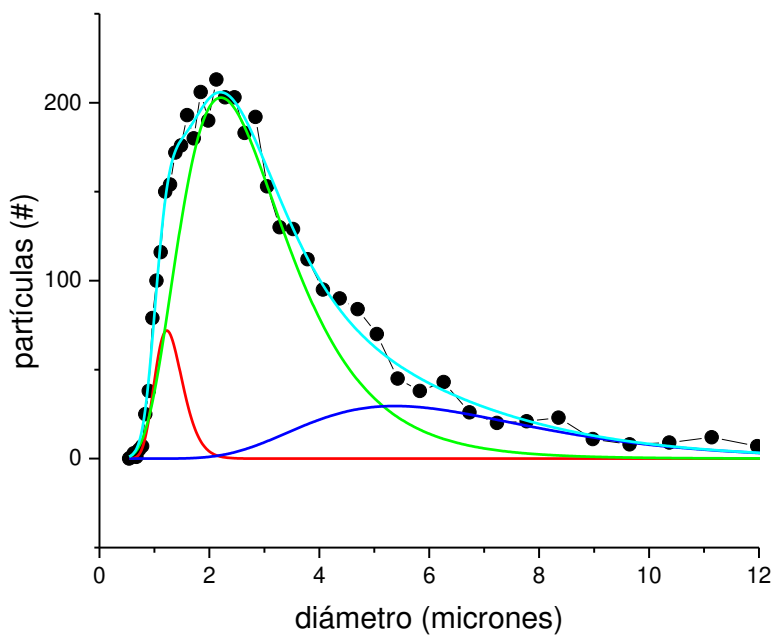


Figura n° 21: espectro de aerosoles medido a la hora 17:13 del día 18/02/19



Se observa que el espectro de diámetros aerodinámicos de partículas se compone de 3 distribuciones log-normal bien diferenciadas. las muestras 1, 2 y 4 de la prueba 10 fueron comparadas entre sí y con la prueba 11 mediante la ecuación 1, satisfaciéndose para todas las combinaciones posibles de valores de medias. Esto hace a las muestras totalmente comparables y analizables.

Análisis de la primera distribución log-normal

Tabla n°3: Datos de la curva de ajuste (color rojo)

	Media[μm]		desviación estándar[μm]		Área[#* μm]	
	valor	\pm error	valor	\pm error	valor	\pm error
Prueba 10.1	1,34	0,04	0,2	0,04	63	20
Prueba 10.2	1,28	0,03	0,21	0,03	55	12
Prueba 10.3	-	-	-	-	-	-
Prueba 10.4	1,28	0,08	0,22	0,04	51	22
Prueba 11.1	1,3	0,04	0,2	0,04	46	13

Comparando las muestras tomadas anteriormente (prueba 6 y 4, ver tabla n°1), se concluye que la primera distribución tiene aproximadamente la misma desviación estándar y valores de media. En base a esto podemos asumir que se trata de la misma población de partículas.

Análisis de la segunda distribución log-normal

Tabla n°4: Datos de la curva de ajuste (color verde)

	Media[μm]		desviación estándar[μm]		Área[#* μm]	
	valor	error	valor	error	valor	error
Prueba 10.1	2,86	0,08	0,44	0,04	905	20
Prueba 10.2	2,9	0,2	0,46	0,04	968	164
Prueba 10.3	-	-	-	-	-	-
Prueba 10.4	2,7	0,2	0,39	0,1	352	28
Prueba 11.1	2,7	0,2	0,43	0,06	533	51

La segunda distribución presenta valores de medias y desviaciones estándares levemente mayores que los de las pruebas 4 y 6, al contrario de lo que pasa con el valor del área que es significativamente mayor (ver tabla n°2). Al haber viento hay más cantidad de partículas en suspensión, lo que aumenta significativamente el área bajo la curva. Además, se presenta más variedad de diámetros de partículas, aumenta en la desviación estándar, y al ser el flujo de aire mayor, se resuspenden partículas de mayor tamaño traduciéndose en un aumento de la media. Se puede concluir que el aerosol presente tiene aproximadamente las mismas características; solo que en un día sin viento se observa solamente una parte de la población de partículas, aquellas que son resuspendidas por una corriente de aire de menor magnitud.



Análisis de la tercera distribución log-normal

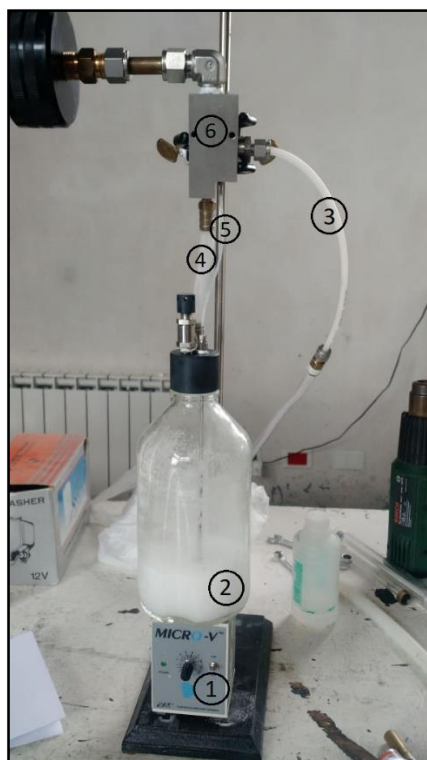
Tabla n°5: Datos de la curva de ajuste (color azul)

	Media[μm]		desviación estándar[μm]		Área[#* μm]	
	valor	error	valor	error	valor	error
Prueba 10.1	7,4	0,6	0,33	0,08	226	38
Prueba 10.2	8	2	0,6	0,2	433	84
Prueba 10.3	-	-	-	-	-	-
Prueba 10.4	7	2	0,4	0,2	114	36
Prueba 11.1	6,2	1,2	0,38	0,14	163	59

La tercera distribución log-normal se debe a que los aerosoles de mayor diámetro están asociadas a altas velocidades del viento ^[4]. Estos podrían ser de origen natural o geológico. En general se producen en procesos mecánicos como la resuspensión o abrasión. Pueden ser por ejemplo esporas, polen, suelos, partículas de hojas, polvos generados por el tráfico o producto del desgaste de las plantas. ^[5]

Generación y medición de partículas de poliestireno

En la siguiente medición se generaron aerosoles con partículas de poliestireno de aproximadamente 5 μm de diámetro, en una suspensión acuosa. En la figura n°22 se puede observar el montaje de los elementos que componen la cadena de generación de aerosoles.



- Referencias figura n° 22:
- 1- Agitador magnético
 - 2- Suspensión de partículas de poliestireno
 - 3- Ingreso de aire comprimido
 - 4- Retorno de líquido
 - 5- Capilar de aspiración
 - 6- Atomizador

Figura n° 22: montaje para generar aerosoles



El aerosol se generó con un atomizador de salida constante (figura n° 23). El ingreso de aire comprimido, generado por un compresor, pasa por una boquilla y produce una caída de presión abrupta. El vacío que produce esta disminución de presión, justo después del orificio, eleva el líquido por un capilar (liquid in) dispersándolo luego como aerosol. Las gotas de mayor diámetro chocan contra la pared y caen de nuevo al frasco, mientras que el aerosol es arrastrado junto con la corriente de aire.

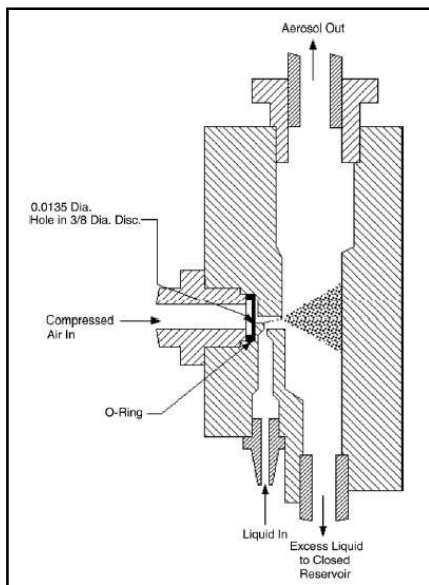


Figura n° 23: atomizador

Un tubo conecta la salida del aerosol con la toma muestras del APS en forma de Y de vidrio (figura n° 24). Se observa que por la derecha ingresa el aerosol y por la izquierda aire. La mezcla resultante ingresa al APS.



Figura n°24: ingreso de la muestra al APS



Con el objetivo de medir las partículas de poliestireno, es necesario eliminar las gotas de agua que son arrastradas junto con las partículas de éstas. Para esto se realizaron dos mediciones: la prueba 16 con la población completa de aerosoles tal cual es generado por el atomizador, la prueba 17 donde el aerosol es secado con silica gel antes de ser medido.

Prueba 16

El espectro de distribución de diámetros aerodinámicos obtenido se aproximó con dos distribuciones de probabilidad log-normal. La explicación de que haya dos distribuciones de aerosoles es que una de debe a las gotas de agua solamente, y el otro a las gotas de agua y poliestireno.

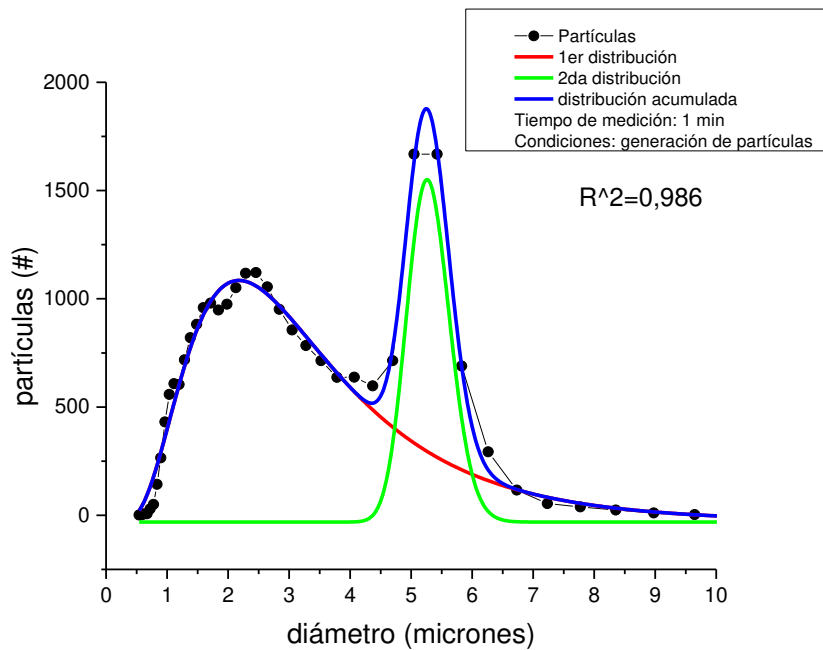


Figura n° 25: espectro de aerosoles medido a la hora 15:00 del día 22/02/19

Prueba 18

Al montaje anterior se le sumó un cilindro relleno de silica gel (figura n° 26) por donde pasa el aerosol antes de llegar al APS. Nuevamente al espectro de diámetros obtenido se lo aproximó con dos distribuciones log-normal.

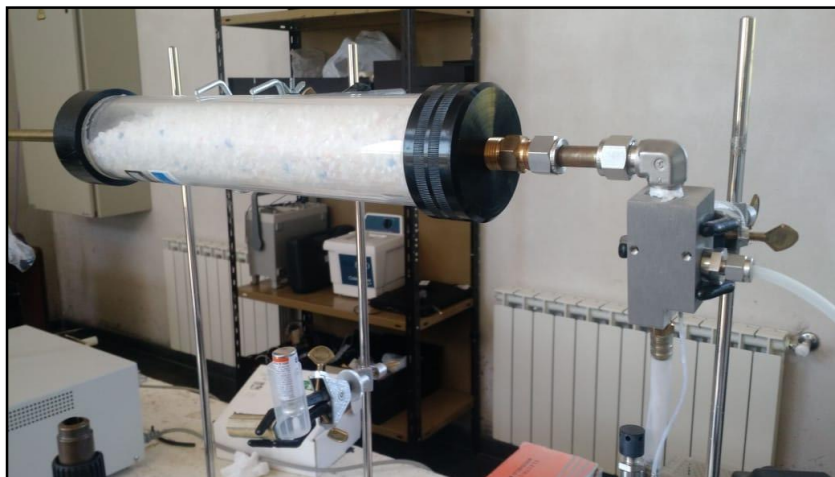


Figura n°26: acople del cilindro de silica gel

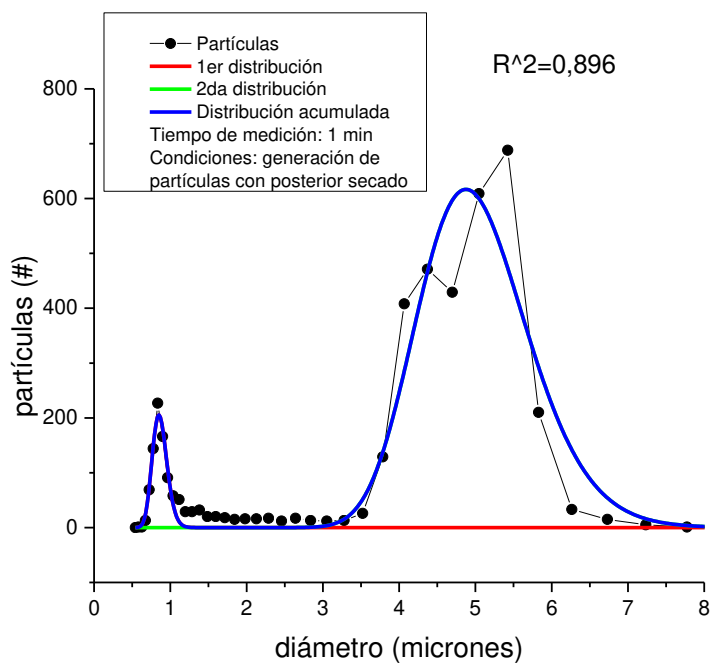


Figura n° 27: espectro de aerosoles medido a la hora 15:43 del día 22/02/19

Se mantienen las dos distribuciones, pero ahora la que corresponde a las gotas de agua solamente está mucho menos marcada, lo cual denota el secado con silica gel.



Análisis de la primera distribución

Tabla n° 6:

	Media[μm]		desviación estándar[μm]		Área[#* μm]	
	valor	\pm error	valor	\pm error	valor	\pm error
Prueba 16	2.92	0.06	0.54	0.01	3734	74
Prueba 18	0.86	0.02	0.11	0.02	49	9

Los tres parámetros aproximados disminuyen de la prueba 16 a la 18 debido a que la silica gel eliminó gran parte del agua. La disminución en el área muestra que muchas gotas de agua quedaron retenidas en el absorbente, y otras tantas disminuyeron su tamaño, esto conlleva a la reducción de la media y la desviación estándar.

Análisis de la segunda distribución

Tabla n° 7:

	Media[μm]		desviación estándar[μm]		Área[#* μm]	
	valor	error	valor	error	valor	error
Prueba 16	5.28	0.01	0.066	0.003	1393	51
Prueba 18	4.98	0.05	0.146	0.009	1113	60

Medición del espectro de aerosoles generado por un dispositivo de aplicación de medicamento

El mismo dispositivo de medición que se muestra en la figura n° 22 se le reemplazó el aspersor por un dispositivo de aplicación de medicamento (similar a los de la figura n°1).

Hasta el momento se analizaron los espectros de dispersión del tamaño de las partículas, pero dependiendo de la aplicación de aerosol, puede ser muy relevante saber la concentración de área y masa de las partículas. Este es el caso de estos dispositivos, en la figura n°28 se ven los 3 espectros.

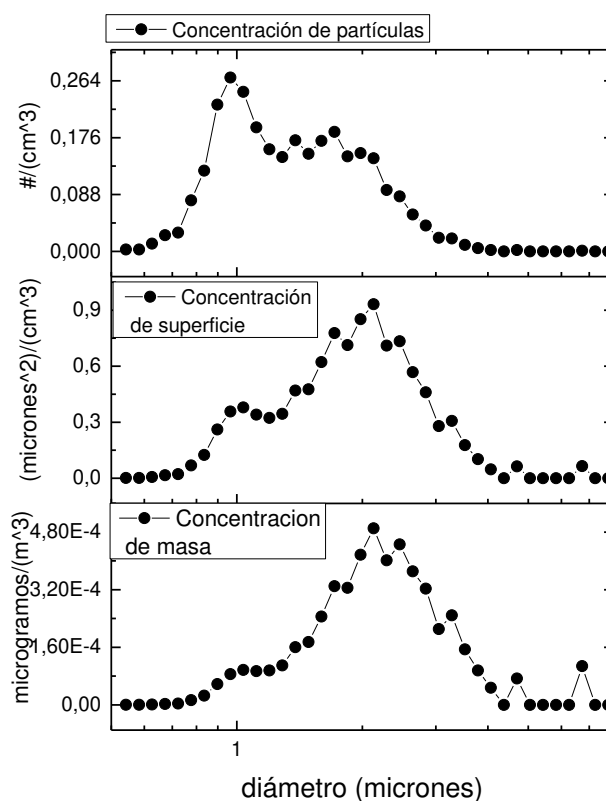


Figura n° 28: espectros de aerosoles medidos a la hora 11:40 del día 21/02/19

Se distingue que el pico registrado en 1 μm va desapareciendo en los gráficos de concentración de área y masa. Esto se corresponde a que, si bien hay muchas partículas con ese diámetro, no representan en conjunto, una superficie relativamente significativa. Al depender el volumen de una esfera del radio al cubo, el pico observado en aproximadamente 1 μm , cae aún más en el tercer espectro debido a que la masa depende linealmente del volumen.

Conocimientos adquiridos durante la investigación

En la realización de este trabajo la pasante adquirió conocimientos acerca del manejo del APS, y diversos softwares como Aerodynamic Instrument Management, Origin, Excel y Power Point. Se interiorizó en la teoría de aerosoles y adquirió los conocimientos básicos del tema. Durante la beca se realizó el pasaje de conocimientos a una colega, fortaleciendo así el trabajo en equipo, así como las relaciones interpersonales con su director, compañeros del área de trabajo y personal en general.

Conclusiones

El análisis de datos permitió reconocer que, los espectros de diámetro aerodinámico de aerosoles medidos pueden ser ajustados con curvas de distribución log-normal. De esta manera se obtuvo el diámetro medio, desviación estándar y área bajo las curvas, correspondiente a cada uno de las distribuciones que componen los espectros medidos.



Comparando las distribuciones que componen cada uno de los espectros se pudo observar que en días sin viento los espectros pudieron ser descompuestos en dos distribuciones, una con diámetro medio en $1.2 \mu\text{m}$ y otra con diámetro medio $2.3 \mu\text{m}$. En el caso de los días ventosos el espectro se descompuso en tres distribuciones. Las correspondientes a los diámetros más pequeños son similares en diámetro medio y desviación estándar. Sin embargo, en este último caso aparece una tercera distribución de diámetro medio $\approx 7 \mu\text{m}$ que podría deberse a la resuspensión de partículas generadas por el viento.

Se generó aerosol a partir de una suspensión de partículas de poliestireno de $5,4 \mu\text{m}$ de diámetro y $0.5 \mu\text{m}$ de desviación estándar. Se observó que el atomizador de aerosoles junto con las partículas en suspensión genera un gran número de gotas de agua. Dado que para la realización de experimentos de dinámica de aerosoles es deseable tener un espectro monodisperso con diámetros conocidos se implementó un sistema de secado utilizando silica gel. Con este dispositivo se logró reducir en dos órdenes de magnitud el área bajo la curva para la distribución correspondiente a las gotas de agua.

Para demostrar la diferencia entre pesar un espectro por número, superficie y volumen, se realizó la medición del espectro de aerosoles emitido por un dispositivo de dosificación de medicamentos. Se pudo observar que los modos de mayor diámetro contribuyen más al espectro si es pesado por superficie o volumen que por número, manteniendo el número total de aerosoles constante.

Referencias

- [1] Estellés Leal, V., (2006) "Caracterización de los aerosoles atmosférico en Valencia mediante Fotometría solar" Tesis Doctoral, Universidad de Valencia.
- [2] Seinfeld, J. H., Pandir, S. N., (1998) "Atmospheric chemistry and physics" Editorial: John Wiley y Sons.
- [3] Product Information – Model 3321 Aerodynamic Particle Sizer (2001) TSI Incorporated.
- [4] Deventer, M. J., El-Madany, T., Griessbaum, F. y Klemm, O., (2015) "One-year measurement of size-resolved particle fluxes in an urban area" Institute of Landscape Ecology, Climatology Working Group, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Münster, Germany
- [5] Sbarato, V.; et. al. "Análisis y Caracterización del Material Particulado Atmosférico" Maestría en Gestión para la Integración Regional y Centro de Información y Documentación Regional, Universidad Nacional de Córdoba. Ciudad de Córdoba, Argentina.
- [6] Particle Identification (PID) distinguishing particle types.
- [7] WW2010 University of Illinois: scattering of light.

GENERACIÓN Y MEDICIÓN DE PARTÍCULAS EN AIRE

MILOC DALILA
UTN Facultad Regional Villa María

RESUMEN

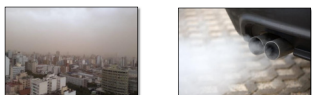
En este trabajo se caracterizaron espectros de tamaños de aerosoles utilizando el Aerodynamic Particle Sizer (APS). Los espectros caracterizados fueron el aire ambiental del laboratorio en dos condiciones, día calmo y día con viento, el espectro emitido por un atomizador de aerosoles y el generado por un dispositivo de dosificación de medicamentos.

En el primer caso se pudo observar el efecto de la resuspensión de partículas de mayor tamaño. En el segundo caso se observó el espectro generado por el atomizador con y sin secado, pudiéndose determinar que el dispositivo de secado reduce en dos órdenes de magnitud la cantidad de gotas de agua. En el tercer caso se pudo verificar la influencia de pesar los espectros de tamaños aerosoles según el número, la superficie y el volumen. Obteniéndose los resultados presentados en la bibliografía.

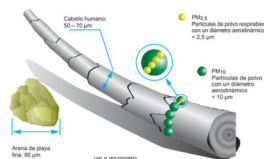
Aerosoles: Definición y características

Los Aerosoles son partículas sólidas o líquidas en suspensión en un medio.

En la atmósfera pueden surgir de fuentes naturales, como el polvo levantado por el viento, spray marino, y volcanes, o de actividades antropogénicas, como la combustión de hidrocarburos.



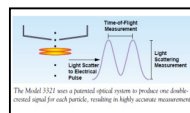
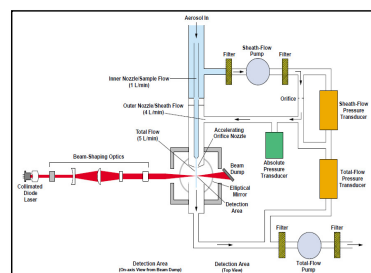
Aplicaciones:



Pueden ser emitidos directamente como partículas (aerosoles primarios) o formados en la atmósfera por procesos de conversión de gas a partícula (aerosoles secundarios), los aerosoles tienen un rango de tamaño desde unos pocos nanómetros (nm) hasta decenas de micrómetros (μm) de diámetro. Una vez en el aire, los aerosoles pueden cambiar su tamaño y composición por condensación, coagulación o por reacción química. [1]

Aerosoles: Medición del espectro

Este equipo usa un sistema óptico con dos haces laser superpuestos parcialmente. Cuando una partícula pasa a través de los haces solapados, se genera una señal con dos crestas. El tiempo transcurrido entre ellas es proporcional a su diámetro aerodinámico. [2]



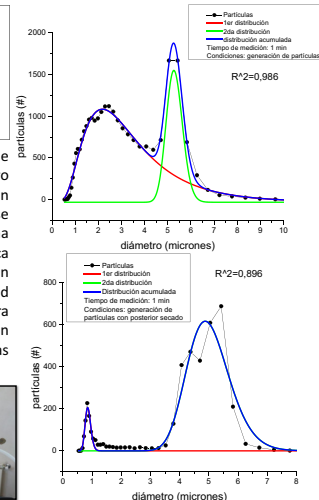
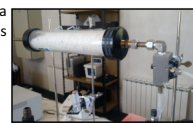
GENERACIÓN DE AEROSOLES

1. Agitador magnético
2. Suspensión de partículas de poliestireno
3. Ingreso de aire comprimido
4. Retorno de líquido
5. Capilar de aspiración
6. Atomizador



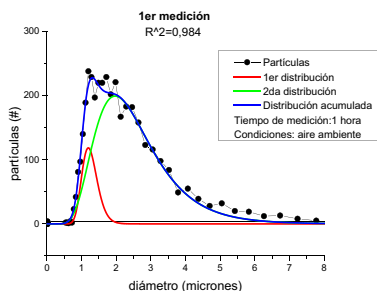
Se generaron aerosoles a partir de una suspensión de partículas en agua de $5,4 \mu\text{m}$ de diámetro y $0,5 \mu\text{m}$ de desviación estándar.

Este atomizador genera un gran número de gotas de agua.

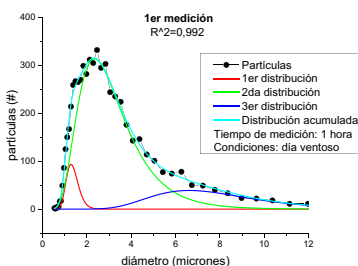


CARACTERIZACIÓN DE AIRE AMBIENTAL

DÍA CALMO



DÍA VENTOSO



	Media [μm]		Desviación estándar [μm]		Área [$\#\mu\text{m}$]	
	valor	error	valor	error	valor	error
Primer distribución	1,26	0,04	0,18	0,04	44	12
Segunda distribución	2,33	0,08	0,42	0,03	337	10

En las tablas superiores se muestran los valores promedios de la media, desviación estándar y área de 5 mediciones. Los espectros se aproximaron con dos distribuciones log-normal.



	Media [μm]		Desviación estándar [μm]		Área [$\#\mu\text{m}$]	
	valor	error	valor	error	valor	error
Distribución 1 (roja)	1,3	0,08	0,21	0,04	54	20
Distribución 2 (verde)	2,8	0,2	0,4	0,1	689	164
Distribución 3 (azul)	7,1	1,2	0,4	0,2	234	84

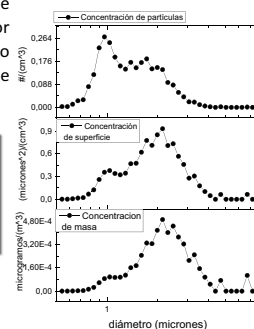
En este caso los espectros se aproximó con 3 distribuciones log-normal bien diferenciadas.

Comparando ambas mediciones se concluye que la primera distribución se trata de aerosoles semejantes El aerosol presente tiene aproximadamente las mismas características, solo que en un día sin viento está presente sólo una parte de la población de partículas.

El dispositivo de medición se puede ver en la foto de la izquierda.

ESPECTROS GENERADO POR UN DISPOSITIVO DE DOSIFICACIÓN DE MEDICAMENTO

La diferencia entre pesar un espectro por número, superficie y volumen, se observó el número total de realizando la medición del espectro de aerosoles emitido por un dispositivo de dosificación de medicamentos. los modos de mayor diámetro contribuyen más al espectro si es



CONCLUSIONES

- **Días sin viento:** los espectros se ajustaron con dos distribuciones, una con diámetro medio en $1,26 \mu\text{m}$ y $2,33 \mu\text{m}$. **Días ventosos:** los espectros se ajustaron con tres distribuciones, los dos de menor diámetro medio semejantes a los anteriores, y la tercera distribución con diámetro medio $7,1 \mu\text{m}$ - > resuspensión de partículas.
- Se observó que el atomizador de aerosoles junto con las partículas en suspensión genera un gran número de gotas de agua.
- Se implementó un sistema de secado utilizando silica gel -> se logró reducir en dos órdenes de magnitud el área bajo la curva para la distribución de tamaños de gotas de agua.
- Se observó que los modos de mayor diámetro contribuyen más al espectro si es pesado por superficie o volumen que por número, manteniendo el número total de aerosoles constante.

REFERENCIAS

- [1] Seinfeld, J. H., Pandir, S. N., (1998) "Atmospheric chemistry and physics" Editorial: John Wiley y Sons.
- [2] Model 3321 Aerodynamic Particle Sizer® Spectrometer Instruction Manual P/N 1930092, Revision E January 2004

ANEMOMETRÍA TÉRMICA EN FLUJOS AXIALES A TRAVÉS DE GEOMETRÍAS COMPLEJAS

Londra, L.¹, Osorio O.D.^{2,3}, Lazo, P.M.^{2,3}

1. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina
2. Instituto Balseiro, S.C. de Bariloche, Argentina
3. Centro Atómico Bariloche, S.C. de Bariloche, Argentina (CNEA)

Resumen

Los reactores nucleares son capaces de desarrollar altas densidades de potencia. Sin embargo, la potencia producida se encuentra limitada principalmente por la aparición del fenómeno de flujo crítico de calor (CHF). El CHF es un fenómeno que se relaciona directamente con las condiciones termohidráulicas del refrigerante en el elemento combustible (EC). Por lo tanto, si se lograsen modificar dichas condiciones, sería posible aumentar la potencia producida manteniendo los márgenes de seguridad. Ante este panorama, se llevaron a cabo numerosas investigaciones a lo largo de los años con el objetivo de caracterizar el comportamiento fluidodinámico del refrigerante en geometrías intrincadas. De todas formas, hasta nuestros días, no se ha llegado a resultados concluyentes, por lo que, este sigue siendo un tema de desarrollo y estudio.

En este contexto, se han utilizado diferentes mecanismos para aumentar el margen a CHF, como por ejemplo colocar dispositivos promotores de turbulencia, incorporar obstrucciones en sub-canales e incluir patines en las vainas, entre otros. Estos mecanismos tienen como consecuencia aumentar la pérdida de carga, y aunque disminuyen el caudal circulante, como contrapartida aumentan el margen a CHF. Uno de los componentes más importantes desde el punto de vista del diseño de los elementos combustibles es el separador. Este elemento tiene la doble función de promover el flujo lateral de intercambio de masa y de energía. De esta manera, resulta clave el estudio y la comprensión de los mecanismos de mezclado que favorecen el comportamiento del refrigerante en el interior de los ECs.

En este trabajo se estudiará el comportamiento hidrodinámico de un fluido circulando por una sección de ensayos simplificada, similar a la de un EC, utilizando anemómetros de hilo caliente de temperatura constante. Asimismo, se caracterizará el flujo a través de distintas secciones de prueba, lo que permitirá comprender y caracterizar la fenomenología presente en geometrías complejas como la presente en los ECs nucleares.

Abstract

Nuclear reactors are capable of developing high power densities. However, the power output is limited by the phenomenon known as “critical heat flux” or CHF, which limits the capacity of extraction of heat of the coolant fluid. This phenomenon it is directly related with the thermo-hydraulic conditions of the coolant flowing through the core, formed by rod bundles. Therefore, if these conditions could be increased so as to delay the appearance of CHF effect, it would be possible to increase the power output of the same nuclear reactor, staying within safety margins. Given this context, several researches were made over the years with the solely objective of characterizing the fluid dynamic behavior of the refrigerant in complex geometries.

Nevertheless, conclusive results have not yet been achieved, making it an on-going research topic.

Different mechanisms have been tried to increase the CHF margin, i.e. adding turbulence-promoting devices, including obstructions within the sub-channels, etc. Although these mechanisms increase the pressure loss while decreasing the flow rate, there is an increase the 'critical heat flux' margin. One of the most important components of the rod bundles, from the design perspective, it is the separator. This element has the double task of promoting lateral flux of mass and energy exchange. Therefore, it is key to study and understand the mixing mechanisms that favour the coolant behavior inside the rod bundles.

In this work, the hydro-dynamic behavior of a fluid flowing through a test section, using 'hot-wire' anemometers, will be studied. The results obtained will be used to describe the turbulent flow, a fundamental phenomenon that will allow us to understand how to optimize the geometry of the rod bundles, and, as a consequence, expand the margins of CHF.

Introducción

En la Central Nuclear Atucha II (CNAII), las vainas de los elementos combustibles se encuentran dispuestas en separadores elásticos, cuya función es brindar rigidez estructural al arreglo de vainas y además promover el mezclado turbulento del fluido refrigerante, pudiéndose retrasar de esta manera la aparición de CHF.

Para poder estudiar este fenómeno, resulta necesario reproducirlo en un laboratorio de manera controlada y segura. Para alcanzar dicho objetivo, en el Laboratorio de Termohidráulica del Centro Atómico Bariloche se encuentra en etapa pre-operativa el “Loop de Freón”. Debido a que resulta poco práctico utilizar agua pesada y elementos fisibles en el laboratorio, el “loop” se refrigera con freón R134a, y los resultados obtenidos se trasladan al fluido real de trabajo, agua pesada en el caso de la CNAII, mediante técnicas de escaleo fluido a fluido. La utilización de freón permite reproducir las condiciones termohidráulicas a las que se produce el CHF en condiciones de presión y temperatura moderadas empleando menores potencias, por lo que resulta conveniente desde el punto de vista del diseño y la operación de esta facilidad.

Para caracterizar elementos combustibles, es necesario hacer estudios termohidráulicos muy detallados y costosos que permitan determinar márgenes de operación de manera que en ninguna situación se produzca el CHF. Sin embargo estos estudios difícilmente incluyan mediciones de las fluctuaciones de velocidad en los distintos sub-canales del EC, que aportarían datos fundamentales acerca del mezclado hidrodinámico y de la fluidodinámica en general. La obtención de datos con este nivel de información permitiría optimizar los diseños de elementos combustibles reales y aumentar el margen a CHF. Hay que destacar que aún con una pequeña mejora en los márgenes térmicos, se podría aumentar de manera muy considerable la rentabilidad de la planta.

Como se mencionó anteriormente, en el diseño de un reactor nuclear es muy importante poder predecir adecuadamente la distribución de temperaturas, y los perfiles del flujo del refrigerante en su núcleo, ya que, para lograr una operación confiable y segura, se requiere de un diseño termohidráulico preciso. Para calcular estas distribuciones, suelen utilizarse códigos de cálculo de sub-canal tales como COBRA, que modelan la transferencia de masa momento y energía. Sin embargo, dada la complejidad de la geometría analizada, estos códigos emplean suposiciones e hipótesis que simplifican los cálculos y permiten obtener un resultado. En otras palabras, se necesita un modelo de mezclado entre los sub-canales del elemento combustible, para asegurar la capacidad del código de predecir el comportamiento del flujo en régimen turbulento.

A lo largo del tiempo, se han observado una variedad de movimientos coherentes en el flujo turbulento (Figura 1); estas observaciones han conducido a un área de investigación que intenta dividir el flujo turbulento complejo en movimientos elementales organizados. A pesar de esto, los pioneros de la turbulencia no consideraron los movimientos coherentes en sus estudios de turbulencia, aunque el concepto de vórtices desempeñó un papel muy importante en la construcción de modelos matemáticos de turbulencia (Dennis, 2015). El interés en los movimientos coherentes se desencadenó en gran medida por la visualización del flujo que permitió observar las características estructurales del régimen turbulento.

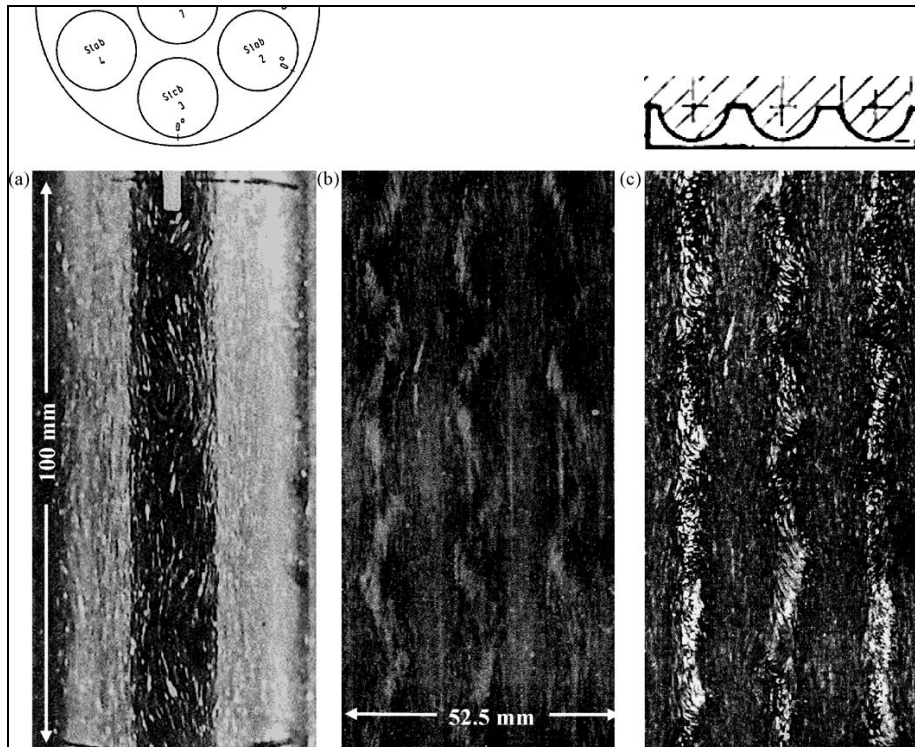


Figura 1 - Visualización de flujo en agua: (a) G. Hofmann (1964) [G. Hofmann, "Qualitative Untersuchung örtlicher Wärmeübergangszahlen im 7-Stabbündel, Internal Report No.13, IRB/KfK, 1964], arreglo de 7 vainas de 14mm de diámetro, con un gap de 2mm y velocidad $v = 0.94$ m/s. (b) H. Hoffmann (1973) [H. Hoffmann, Internal Report IRB/KfK, 1973], arreglo de 3 medias vainas de 7mm de radio con un gap de 0.8mm y una velocidad $v = 1.55$ m/s. (c) Idem a (b) con un gap de 0.4mm y una velocidad $v = 1.76$ m/s.

Los primeros trabajos relacionados con mezclado atribuían este fenómeno a la presencia de flujo secundario, generado por la turbulencia en geometrías complejas como las de ECs. Sin embargo, a partir resultados obtenidos de mediciones en geometrías complejas, se encontraron tasas de mezclado turbulento mucho mayores que las predichas por los modelos para geometrías simples. Estos resultados implicaban que la difusividad turbulenta de energía en arreglos de vainas era mucho mayor que la correspondiente a un tubo circular, empleada en los cálculos. Algunos investigadores intentaron explicar esta diferencia a partir del efecto del flujo secundario formado en los sub-canales. Trupp y Aly postularon en 1979 que existía un consenso de opiniones en el cual se creía que el flujo secundario era responsable de estas diferencias (Trupp y Aly, 1979). En este contexto, todos los esfuerzos se focalizaron en adaptar los modelos existentes para predecir correctamente las mediciones realizadas, sin conseguirse resultados satisfactorios.

Algunas investigaciones experimentales realizadas posteriormente demostraron que los resultados obtenidos no se explicaban con los modelos de flujo secundario empleados hasta ese momento. Por esta razón, se realizaron estudios particulares en zonas cercanas a los gaps para analizar el intercambio de masa momento y energía entre los sub-canales de ECs. La conclusión general obtenida de estas investigaciones fue que el comportamiento del fluido en estas regiones está dominado por la presencia de un flujo transversal cuasi-periódico (Möller, 1991; Rehme, 1992; Meyer, 2010; Wu y Trupp, 1993). Actualmente se acepta que estas pulsaciones son causadas por trenes de estructuras coherentes de gran escala, que se forman de a pares a cada lado del gap que une dos sub-canales. Lamentablemente, no existe una definición inequívoca y universalmente aceptada de lo que es una estructura coherente. Sin

embargo, del análisis de estas dos palabras podríamos decir que: "coherente" implica tanto consistencia como algo que forma parte de un todo unificado, y "Estructura" indica algo que se compone de partes organizadas de alguna manera ordenada. Por lo tanto, la característica principal de las estructuras coherentes es su consistencia (por ejemplo, un patrón consistente en el campo de velocidades) (Dennis, 2015).

El análisis de estructuras turbulentas realizado por Rehme (1992) sugiere que la principal causa del mezclado turbulento en geometrías complejas como la de los ECs, se debe justamente a la presencia del flujo pulsante, normalmente asociado con la turbulencia anisotrópica. A partir de estas conclusiones, muchos investigadores centraron sus investigaciones en el desarrollo de una correlación adecuada teniendo en cuenta la componente anisotrópica de la turbulencia.

En la Figura 2 se describe, para una geometría simple, cómo se origina el fenómeno de mezclado entre sub-canales debido a vórtices de gran escala. El perfil de velocidades del flujo principal, asumiendo que el flujo es turbulento completamente desarrollado y que además la geometría es simétrica (condiciones ideales), debería tener cualitativamente la forma descrita en la Figura 2-a). En esta figura se observa que existe un mínimo local de velocidad donde el área de pasaje es menor, y un máximo local de velocidad cercano al centro del sub-canal. Estos gradientes pueden generar las condiciones necesarias para la existencia de inestabilidades de tipo Kelvin-Helmholtz, dando a lugar a dos vórtices a cada lado del gap girando uno contra el otro (Möller, 1991).

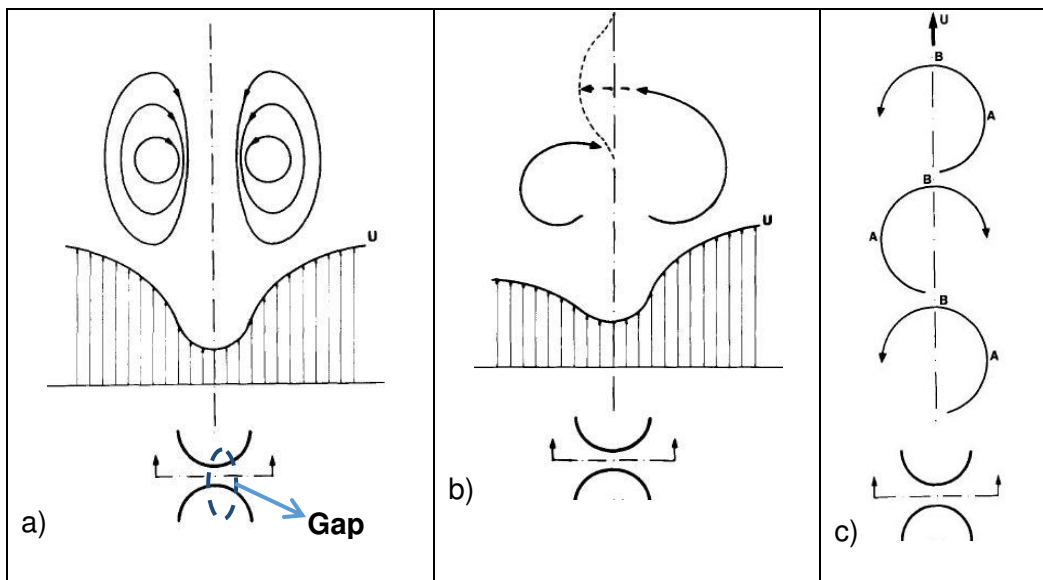


Figura 2 - a) Perfil de velocidad entre dos sub-canales en el caso ideal. b) Perfil de velocidades entre dos sub-canales descrito de forma general. c) Tren de vórtices entre dos sub-canales.

En condiciones reales, no es posible encontrar una situación como la descrita anteriormente, dado que los sub-canales no son todos iguales, tanto por características del diseño como por las tolerancias al momento de construirlos. Además, el comportamiento estocástico del flujo turbulento lleva a que los perfiles instantáneos de velocidad y la distribución de vorticidad sean

diferentes a ambos lados del gap que comunica los sub-canales. En estas circunstancias, los vórtices generados en cada sub-canal se mueven atravesando el gap mientras son conducidos por la corriente principal mientras giran en sentido contrario como se puede observar en la Figura 2-b). El movimiento resultante es similar a un tren de vórtices de von Kármán transportado por el flujo principal con un patrón estable y ordenado como se indica en la Figura 2-c) (Möller, 1991). Este tipo de estructuras se conocen como tren de vórtices coherentes de gran escala y contribuyen al intercambio de masa, momento y energía, es decir que contribuye al mezclado (Houssain, 1983). En resumen, el mezclado entre sub-canales se caracteriza por tener diferentes contribuciones como:

- Flujo secundario, el cual contribuye al transporte transversal de masa y momento.
- Mezclado turbulento, que es el resultado de oscilaciones en la componente transversal del flujo entre dos sub-canales.
- Flujo cruzado, que resulta del transporte de masa entre dos sub-canales causados por diferencia de presión.
- Turbulencia generada al atravesar un separador.
- Flujo cruzado generado por la geometría, como por ejemplo con desviadores de flujo o promotores de turbulencia, etc.

En los ECs nucleares, el transporte de las estructuras de gran escala a través del gap podría mejorar significativamente la transferencia convectiva de calor a nivel local, produciendo mezclado de fluido entre sub-canales adyacentes. Por lo tanto, se puede extraer más calor de la superficie de las vainas reduciendo la temperatura media del fluido en la zona del gap, con lo que se mejoraría la eficiencia termohidráulica del EC.

El mezclado transversal permite homogeneizar la temperatura del refrigerante en el EC y así atenuar las consecuencias de tener perfiles radiales de potencia, de allí su importancia y el interés en su estudio.

Hoy en día, a pesar de los avances en técnicas computacionales, los resultados numéricos siguen siendo muy dependientes de esquemas y modelos de cierre. Además, la mayoría de los estudios experimentales sobre mezclado e identificación de estructuras de vórtices en el flujo han sido realizados en geometrías simplificadas. Por esta razón, son prácticamente inexistentes los datos experimentales confiables respecto a los mecanismos de mezclado entre los sub-canales en regiones cercanas a los separadores, especialmente con alta resolución espacial y temporal. En este contexto, el objetivo de este trabajo es caracterizar el flujo en una sección de ensayos similar a la de un EC de la CNAII e identificar estructuras coherentes de gran escala, asociadas a los fenómenos de mezclado.

Esquema experimental

La facilidad experimental que se utilizó para desarrollar este trabajo se puede observar en la Figura 3.

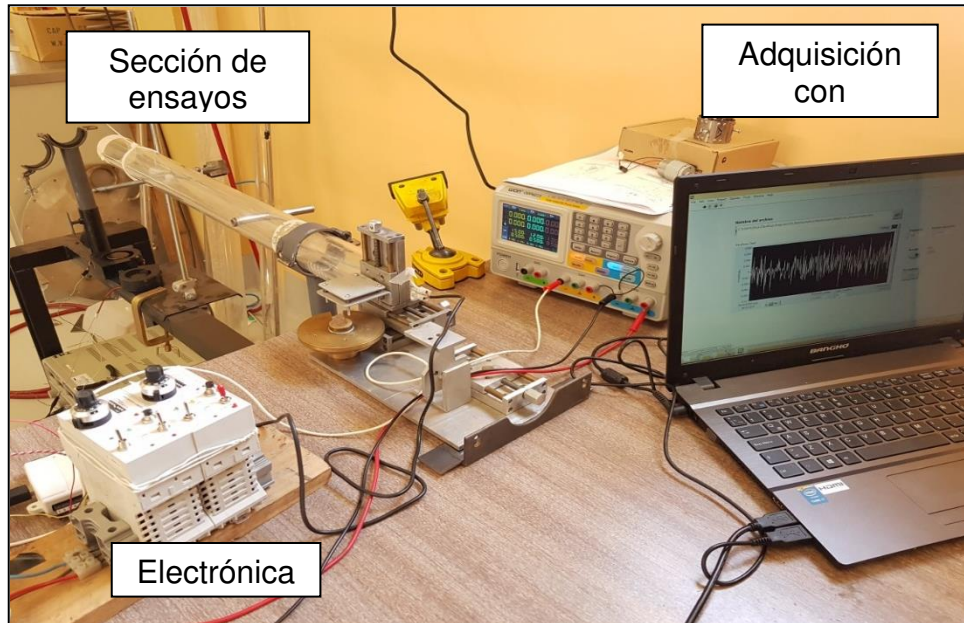


Figura 3 – Arreglo experimental en donde se observa la sección de ensayos, la electrónica de los anemómetros de hilo caliente de temperatura constante y la interfaz gráfica de adquisición de las señales con LabVIEW.

En el caso de la Figura 3, la sección de ensayos consistió en un tubo de acrílico de aproximadamente 50 mm de diámetro interno, que contiene un obstáculo transversal al flujo de 12,7 mm de diámetro externo. Además de esta sección, se utilizaron secciones con una vaina de 12,9 mm de diámetro externo paralela al flujo de INCONEL 618 y otra con un arreglo de siete vainas de acero inoxidable AISI 304 de 12,7 mm de diámetro externo, sostenidas por separadores, como se observan en la Figura 4 y en la Figura 5, respectivamente.



Figura 4 – Sección de ensayos con vaina paralela al flujo



Figura 5 – Sección de ensayos con siete vainas, similar a elemento combustible nuclear (ECN)

Esquemáticamente, el montaje experimental se puede observar en la Figura 6. Para impulsar el aire se utilizó un soplador centrífugo, que se conecta a la sección de pruebas a través de un adaptador especialmente diseñado. En celeste, se observan dos anemómetros de hilo caliente de temperatura constante, conectados cada uno de ellos a una electrónica que ajusta tanto la respuesta en frecuencia de los sensores como el offset de la señal (para obtener mejor resolución en la adquisición), realimentando a su vez la señal de los sensores. La señal de los anemómetros se adquiere con una placa de adquisición de National Instruments, modelo NI-USB6009 con una resolución de 14 bits y una tasa máxima de adquisición de 48 kHz. La placa se comunica vía USB a una computadora, la cual lee, muestra en pantalla y almacena los datos adquiridos mediante una interfaz implementada con el software NI LabVIEW.

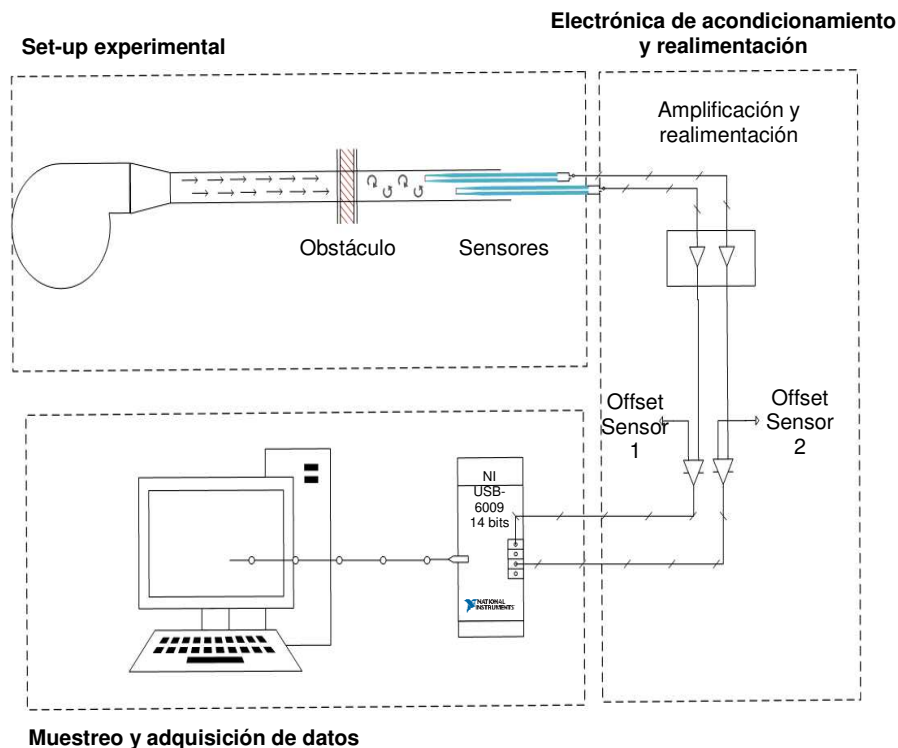


Figura 6 – Representación esquemática del montaje experimental

Anemómetro de temperatura constante tipo hilo caliente

El foco de estudio en cada montaje experimental realizado fue la medición de las fluctuaciones de velocidad del flujo a través de las vainas del símil de EC para lo cual se utilizó el anemómetro de hilo caliente de temperatura constante, con su electrónica asociada.

Esta electrónica consiste de un lazo realimentado que mantiene la temperatura del sensor constante ante la transferencia de calor entre el hilo y el aire circundante.

El sensor de hilo caliente utilizado en este trabajo consta de dos soportes de cobre separados entre sí 2 mm con pegamento tipo *epoxy*, que le otorga resistencia mecánica y rigidez. El elemento sensible a las fluctuaciones es un alambre de platino muy delgado de

aproximadamente 15 μm. Este alambre se encuentra soldado mediante soldadura por punto a los extremos soportes, como se observa en la Figura 7.

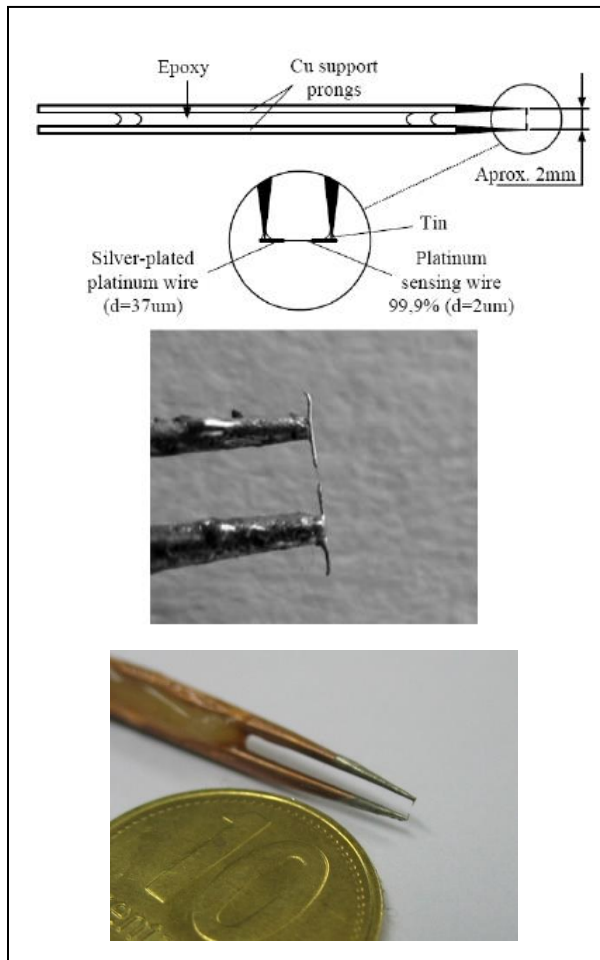


Figura 7 – Anemómetros de hilo caliente de temperatura constante

La característica principal de este sensor, radica en que su resistencia varía con la temperatura. Este comportamiento se puede aproximar de forma lineal con la siguiente ecuación:

$$R = R_r \cdot [1 + \alpha \cdot (T_m - T_r)]$$

Donde R es la resistencia del sensor a la temperatura T_m , R_r es la resistencia a la temperatura de referencia T_r y α es el coeficiente de temperatura. Para poder mantener la temperatura del hilo constante frente a las variaciones de velocidad del fluido, el sensor se conecta mediante un puente de “Wheatstone”, como se observa en la Figura 8. De esta forma, cuando el flujo de aire aumenta, la temperatura del sensor y por tanto también su resistencia, disminuyen. Esto provoca un aumento en la salida del amplificador, aumentando la corriente que circula por el sensor, lo que permite mantener su temperatura y su resistencia constante. En pocas palabras, la caída de tensión U es proporcional a la corriente que circula por el sensor y proporcional a la velocidad del fluido que refrigera al sensor.

Debido a la inercia del sensor y al retardo introducido por los cables, es necesario compensar el puente por medio de capacitancias en paralelo con R_2 o inductancias en serie con R_3 (ver Figura 8)

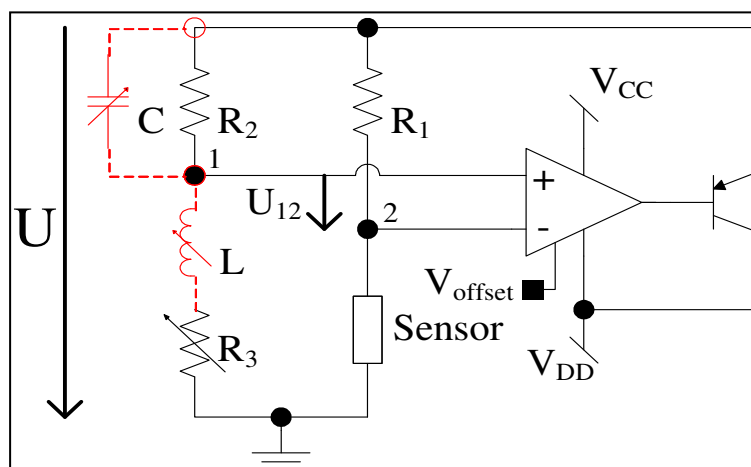


Figura 8 – Esquema simplificado de la electrónica de acondicionamiento y realimentación de los anemómetros de hilo caliente

Respuesta en frecuencia del anemómetro

La característica más importante del puente de realimentación es el rango de frecuencias en el que puede trabajar. Para poder ajustar esta respuesta, la electrónica tiene incorporado un generador de onda cuadrada que actúa como entrada y con la que es posible, modificando la capacitancia y el offset del amplificador, obtener una respuesta óptima.

La frecuencia de corte del anemómetro se calcula modificando los parámetros de ajuste mencionados previamente hasta obtener una respuesta apenas sub-amortiguada, como la de la Figura 9. Luego, se obtiene esta frecuencia midiendo la constante de tiempo τ (Figura 9), tal como lo describen Freymuth (1977) y Fingerson (1994). Esto es:

$$f_{cutoff} = \frac{1}{1,3\tau} \quad (1)$$

Donde τ se define como se muestra en la Figura 9.

La respuesta en frecuencia del sensor y la electrónica utilizada en este trabajo se puede observar en la Figura 10. El cálculo de la frecuencia de corte se realizó empleando el procedimiento descrito anteriormente.

Según la Figura 10, calculamos los siguientes parámetros:

$$\frac{0,156 - 0,076}{0,464 + 0,076} = 0,148$$

Como este ajuste de la electrónica es próximo al recomendado, procedemos a medir la constante de tiempo y a calcular la frecuencia de corte.

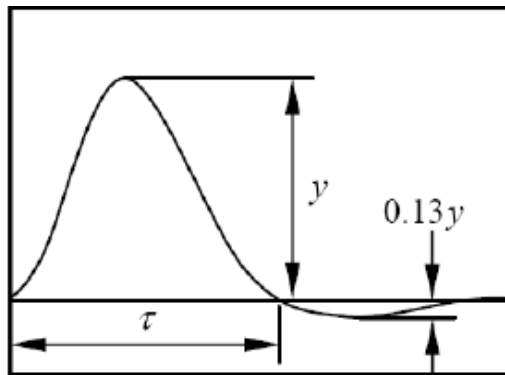


Figura 9- Respuesta a un escalón de corriente en la entrada para un ajuste apropiado de la electrónica



Figura 10 – Respuesta a una entrada tipo escalón del sensor de hilo caliente y su electrónica asociada

$$\tau = 1,85 \times 10^{-5} s$$

$$f_{cutoff} = \frac{1}{1,3} \cdot 1,85 \times 10^{-5} s$$

$$f_{cutoff} = 41580 \text{ Hz}$$

Ensayos preliminares

En primer lugar, se llevaron a cabo mediciones con secciones de prueba de diferentes longitudes y diámetro igual al del símil del EC en estudio (sin vainas), con el fin de medir fluctuaciones de velocidad y observar la respuesta de los sensores, mediante un análisis dinámico de sus señales. A continuación se describen los procedimientos experimentales que se siguieron y sus respectivos resultados.

Se comenzó utilizando una sección de ensayos de aproximadamente 48,7 mm de diámetro y una boquilla montada en un soporte para fijarla a uno de los extremos de la sección, como se observa en la Figura 11. A esta boquilla se conectó aire comprimido, el cual circularía por el tubo. En el extremo opuesto se dispuso un anemómetro de hilo caliente de temperatura constante, junto a su electrónica asociada. Mediante la apertura de una válvula esférica se reguló el caudal de forma incremental. Previo a cada adquisición de datos, se midió la velocidad media del flujo con un anemómetro de turbina (Skywatch Xplorer 1) para el cálculo del número de Reynolds. A continuación se presentan los resultados obtenidos para los distintos tubos, utilizando una frecuencia de muestreo de 500 Hz.

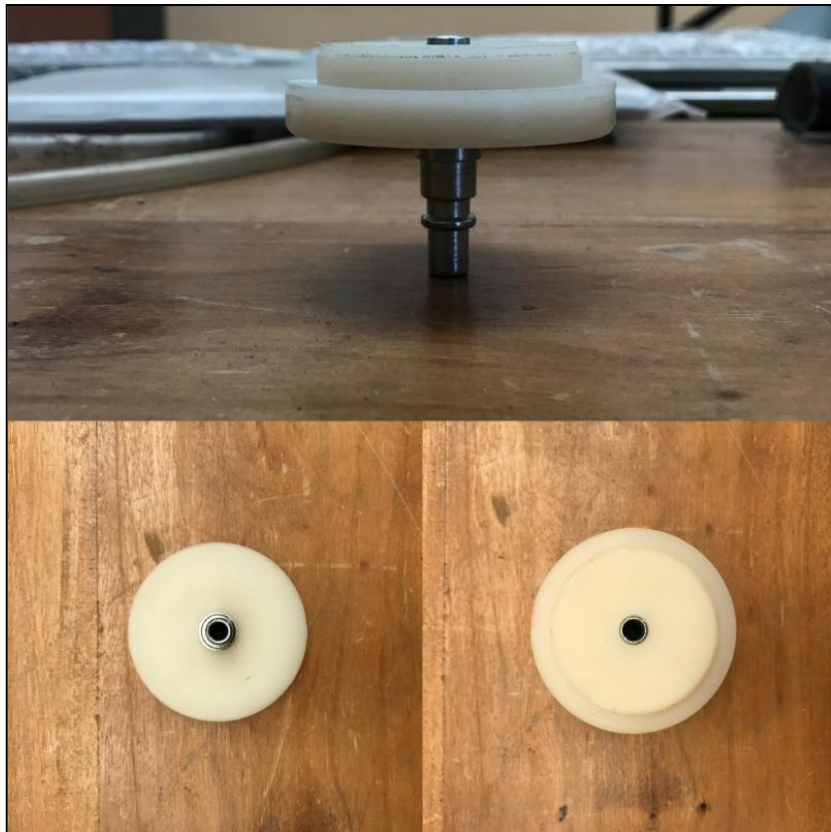


Figura 11 – Boquilla de conexión para el ingreso de aire comprimido al tubo de acrílico

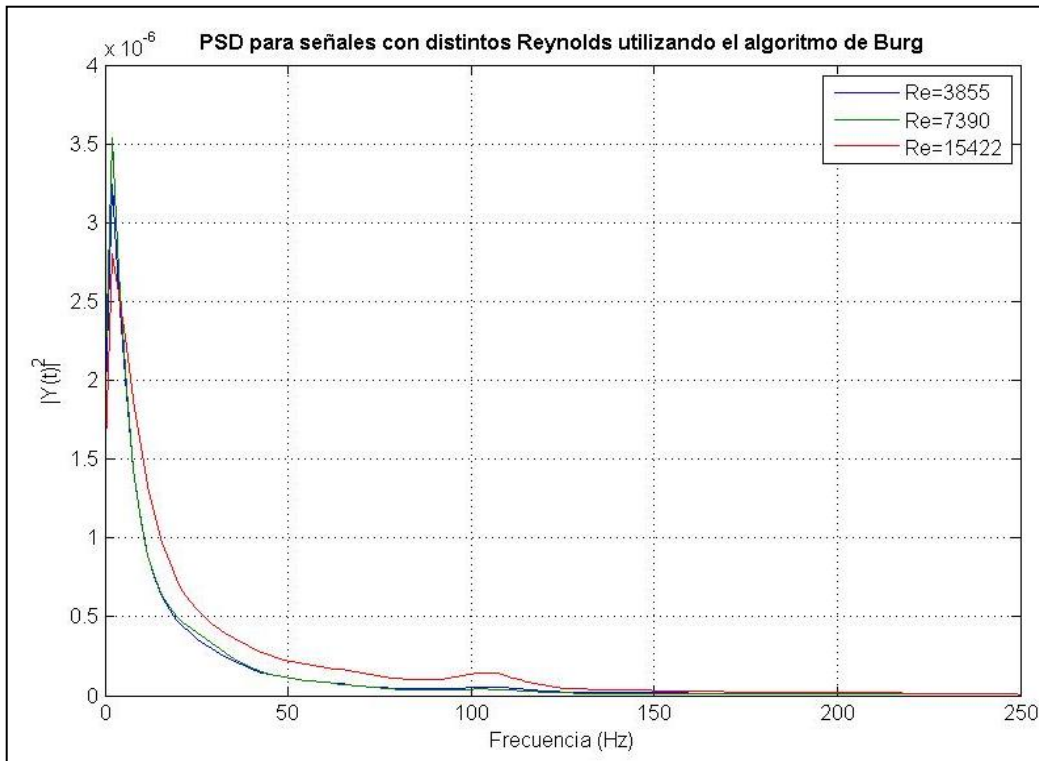


Figura 12 – Tubo de 785mm sin obstáculos

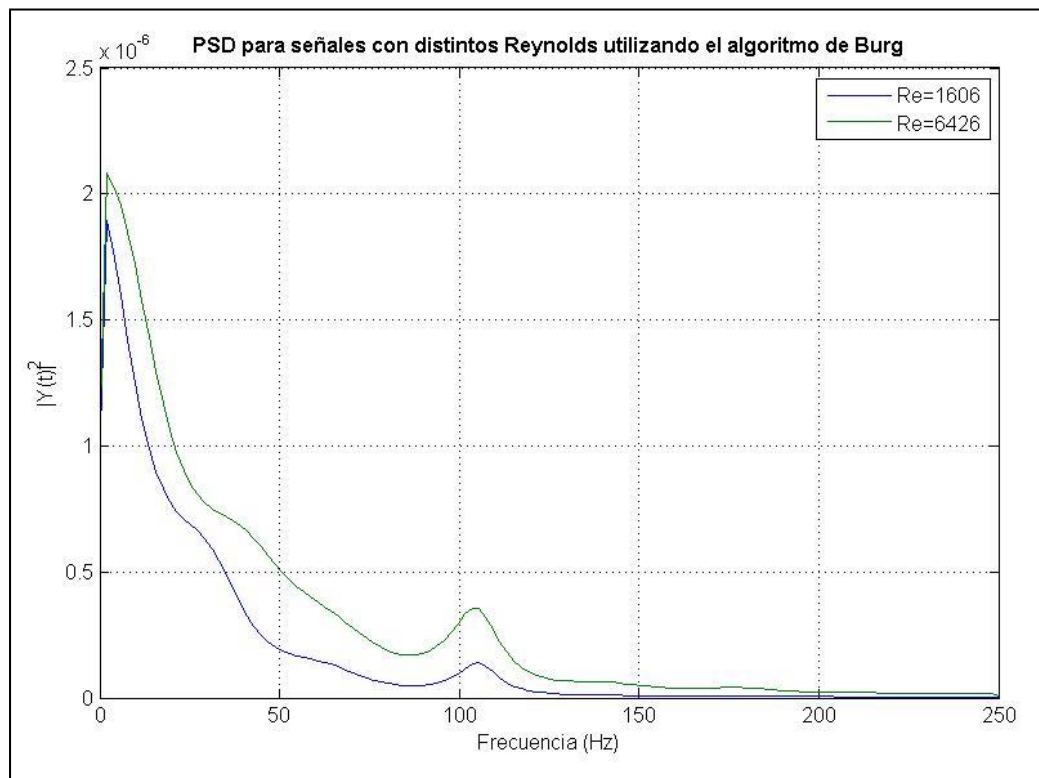


Figura 13 – Tubo de 785mm con obstáculo transversal de 12.8mm de diámetro

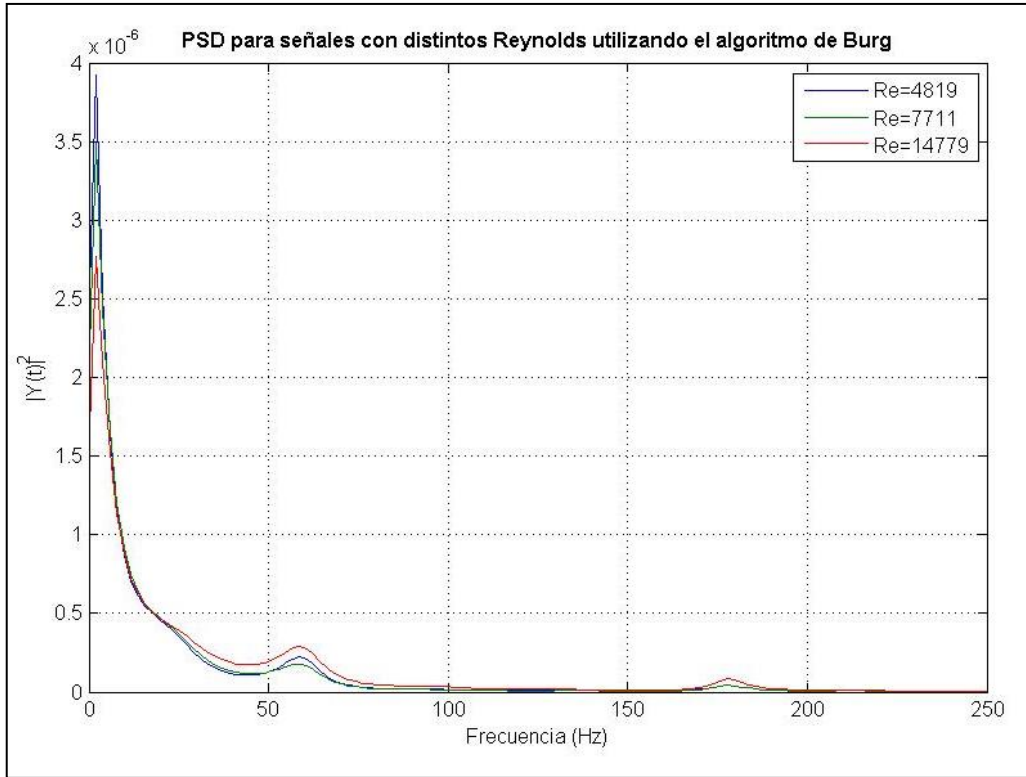


Figura 14 – Tubo de 1426mm sin obstáculos

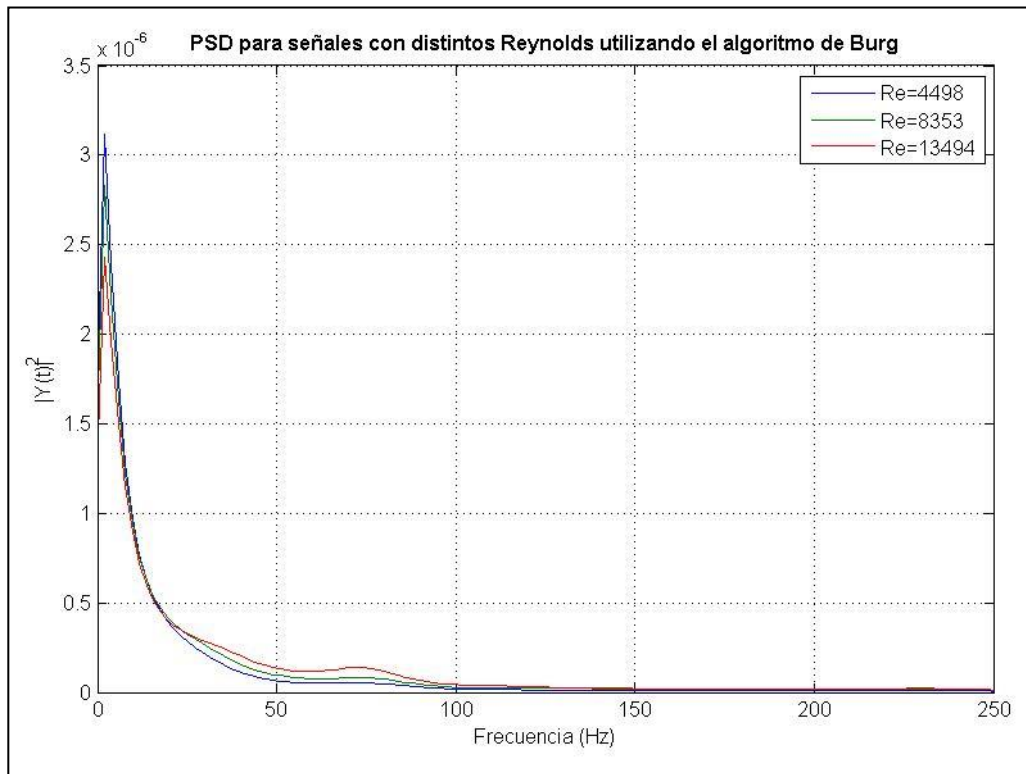


Figura 15 – Tubo de 1110mm con enderezador de flujo tipo "honeycomb"

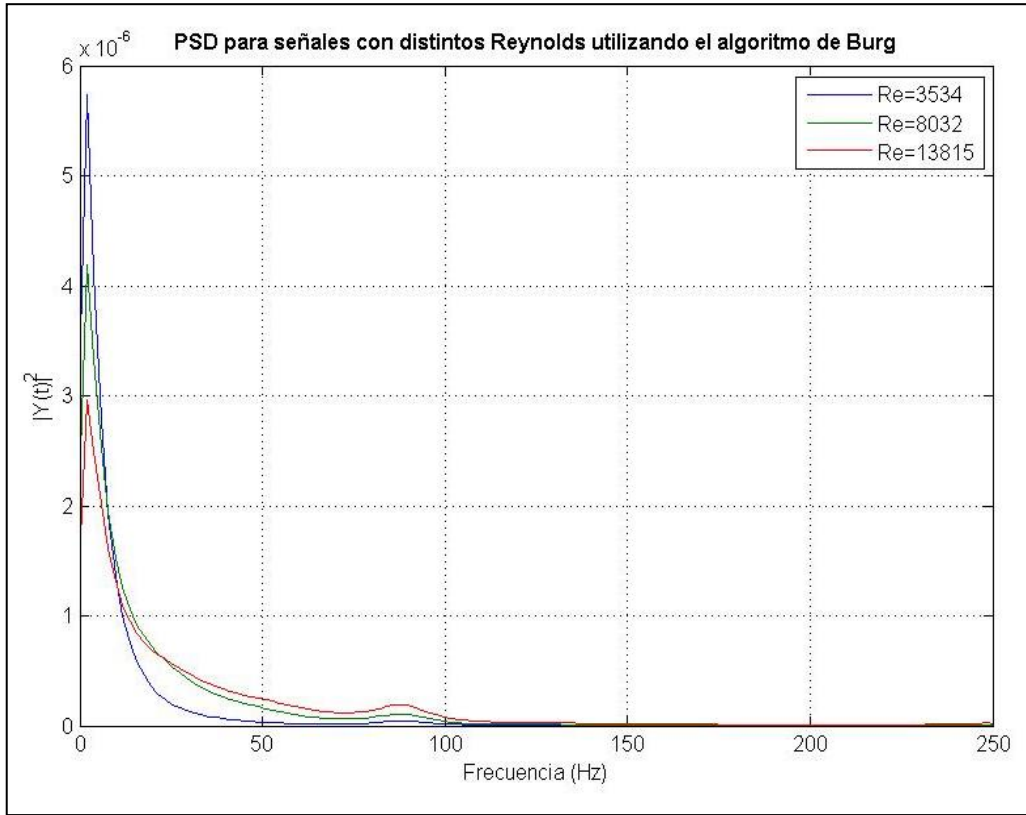


Figura 16 – Tubo de 980mm con una vaina paralela al flujo de 12.8mm

Los gráficos presentados muestran la densidad de potencia espectral (PSD) en el eje de las ordenadas en función de las frecuencias en el eje de las abscisas para diferentes números de Reynolds. Para obtener dichos espectros se utilizó el algoritmo de Burg, el cual subdivide la señal medida por el sensor en varios segmentos de señal con cierto solapamiento. Luego calcula el espectro de densidad de potencia para cada segmento utilizando una ventana del tipo “Hamming” y las promedia. Esto nos permite ver de forma más clara los resultados.

Como se puede observar en las PSD correspondientes a cada sección, se observa un comportamiento concentrado en bajas frecuencias independientemente del tipo de sección de ensayos utilizada. Se cree que dichas componentes se pueden corresponder a vibraciones del tipo mecánicas como consecuencia de la expansión abrupta del flujo de aire comprimido. Se pueden observar también máximos locales en cada uno de los espectros, los cuales se corresponden con las frecuencias naturales de cada uno de los tubos de acrílico. Para realizar esta verificación se calculó, para cada uno de ellos, los modos naturales de vibración, considerando que se trataba de tubos circulares con un extremo cerrado y el otro abierto. La ecuación de onda estacionaria para el desplazamiento de las moléculas de aire, respecto al medio sin perturbar está dada por la siguiente expresión:

$$y(x, t) = 2 \cdot A \cdot \sin(kx) \cdot \cos(\omega t) \quad (2)$$

Donde

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

y

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

Debido a que nuestro experimento tiene un extremo cerrado (por el cual ingresa el aire) y el otro abierto, establecemos las siguientes condiciones de borde:

$$y(0, t) = 0 \rightarrow \text{existe un nodo en } x = 0$$

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=L} = 0 \rightarrow \text{existe un vientre en } x = L$$

Donde L es la longitud del tubo.

A partir de las condiciones de contorno impuestas se obtuvo que la frecuencia de resonancia para el canal acrílico utilizado está dada por la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{v_s}{4L} \quad (5)$$

Donde v_s es la velocidad del sonido en el medio. Para este cálculo adoptaremos una velocidad de sonido de 343,6 m/s para presión atmosférica y 20°C. De esta manera, se obtuvo para cada una de las secciones de prueba utilizadas, su frecuencia natural (Tabla 1).

L_{tubo} [mm]	f_0 [Hz]
785	109.4
980	87.7
1110	77.4
1426	60.2

Tabla 1

Analizando los resultados obtenidos de las mediciones, podemos ver una relación entre la frecuencia de los máximos locales mencionados anteriormente y los valores obtenidos con la ecuación de onda. En la Figura 14 se observa además una componente de mayor frecuencia que corresponde al tercer armónico de la frecuencia natural del tubo, de aproximadamente 180 Hz.

De esta manera se puede concluir que la excitación por medio de un acople con expansión abrupta del flujo de aire no es adecuada para los experimentos que se desean realizar, ya que se excitan los modos naturales de la sección generando componentes de frecuencia no deseadas. En la Figura 15 también se puede observar que la adición de un enderezador de flujo no logró amortiguar las componentes de baja frecuencia ni la frecuencia natural de la sección de ensayos.

En segundo lugar, se optó por cambiar la forma de impulsar el aire en la sección de ensayos utilizando sopladores centrífugos. En el espectro de potencia obtenido con esta configuración no se observaron comportamientos frecuenciales indeseados (espectro plano y de baja intensidad en todo el rango de frecuencias). Por esta razón, se decidió utilizar este dispositivo de entrada de flujo para los ensayos posteriores.

Ensayo con obstáculo transversal (calle de vórtices de von Kármán)

Para poner a punto el sistema de medición y adquisición se estudió en primer lugar el flujo alrededor de un cuerpo. Para este ensayo se utilizó una sección de $L=785$ mm de longitud con un obstáculo cilíndrico de $d=12,7$ mm de diámetro exterior centrado y ubicado transversalmente a la dirección del flujo a aproximadamente 500 mm desde la entrada de la sección. Para medir las fluctuaciones de velocidad generadas por el obstáculo se utilizó un anemómetro de hilo caliente cuyo sensor se ubicó a aproximadamente $x=120$ mm detrás del mismo. El objetivo de esta experiencia fue detectar y caracterizar el desprendimiento de trenes de vórtices tipo von Kármán generado por el obstáculo.

Calle de vórtices de von Kármán

Algunos campos de flujo poseen un comportamiento oscilatorio el cual es función del número de Reynolds. Uno de estos ejemplos es el desprendimiento periódico de vórtices detrás de un cuerpo cilíndrico inmerso en un flujo libre. Se esquematiza en la Figura 17.

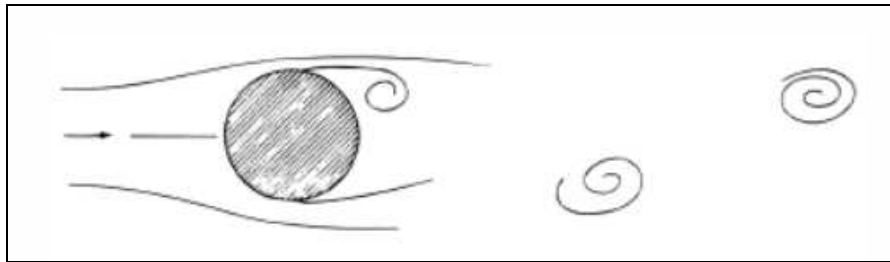


Figura 17 – Recuperado de <http://www.thermopedia.com/content/1247/>

En la Figura 17 se observa lo que von Kármán describió como “calle de vórtices”. En la figura se observa un vórtice formándose en la parte superior de la superficie del cilindro. Abajo a la derecha se ve otro vórtice que se formó en algún instante anterior. El estudio de von Kármán consistió en estudiar la periodicidad de los mismos y la relacionó con el número adimensional de Strouhal, Str , el cual se define como:

$$Str = \frac{f_s \cdot d}{v} \quad (6)$$

Donde d corresponde al diámetro del cilindro, v a la velocidad de flujo libre y f_s a la frecuencia de generación de vórtices. La variación en el número de Strouhal está asociada con cambios en la estructura del flujo.

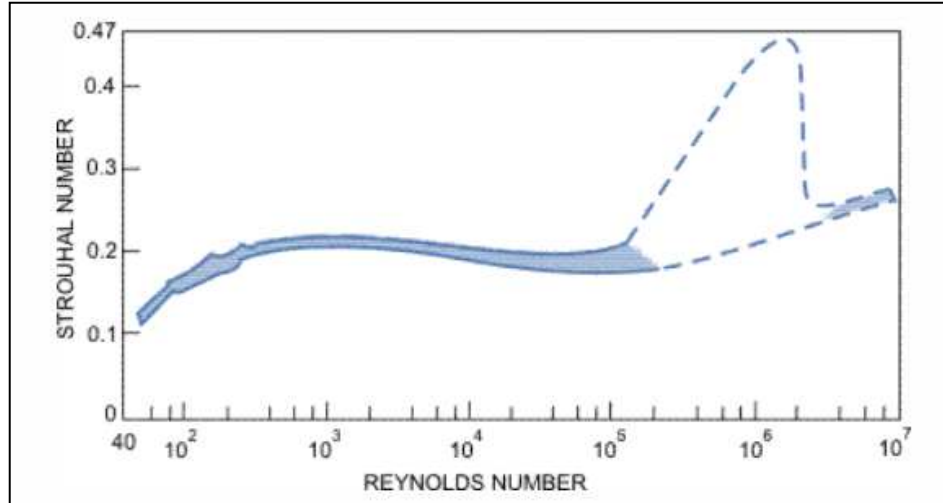


Figura 18 – Número de Strouhal vs el número de Reynolds para cilindros. Recuperado de <http://www.thermopedia.com/content/1247/>

De la Figura 18 se observa que el número de Strouhal es aproximadamente 0,2 para un gran rango de número de Reynolds. Para el rango de Reynolds $250 < Re_D < 2 \times 10^5$ se recomienda utilizar la fórmula empírica:

$$Str = 0,198 \cdot \left(1 - \frac{19,7}{Re_D}\right) \quad (7)$$

Igualando las dos expresiones y despejando para f_s , podemos obtener una estimación de la frecuencia del desprendimiento de vórtices. Entonces:

$$f_s = \frac{0,198 \cdot \left(1 - \frac{19,7}{Re_D}\right) \cdot v}{d} \quad (8)$$

El número de Reynolds para este experimento se calcula como:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\mu} \quad (9)$$

Donde ρ y μ corresponden a la densidad y viscosidad cinemática para presión atmosférica y temperatura ambiente promedio de 20°C, respectivamente, d es una longitud característica, que se corresponde con el diámetro del obstáculo cilíndrico en este experimento y v es la velocidad media del flujo.

Ensayo con obstáculo

A diferencia del experimento original de von Kármán (de flujo libre), este se realizó con flujo interno, por lo que se esperan diferencias entre la frecuencia de los vórtices que su modelo predice y los que se obtuvieron de las mediciones realizadas. Además, debido a las mismas

diferencias, el desprendimiento de vórtices que tendremos en la sección de ensayos será de carácter tridimensional.

Se realizaron 11 mediciones variando la velocidad del flujo en la sección. En la Figura 19 se muestran los resultados obtenidos calculando la densidad espectral de potencia de cada señal.

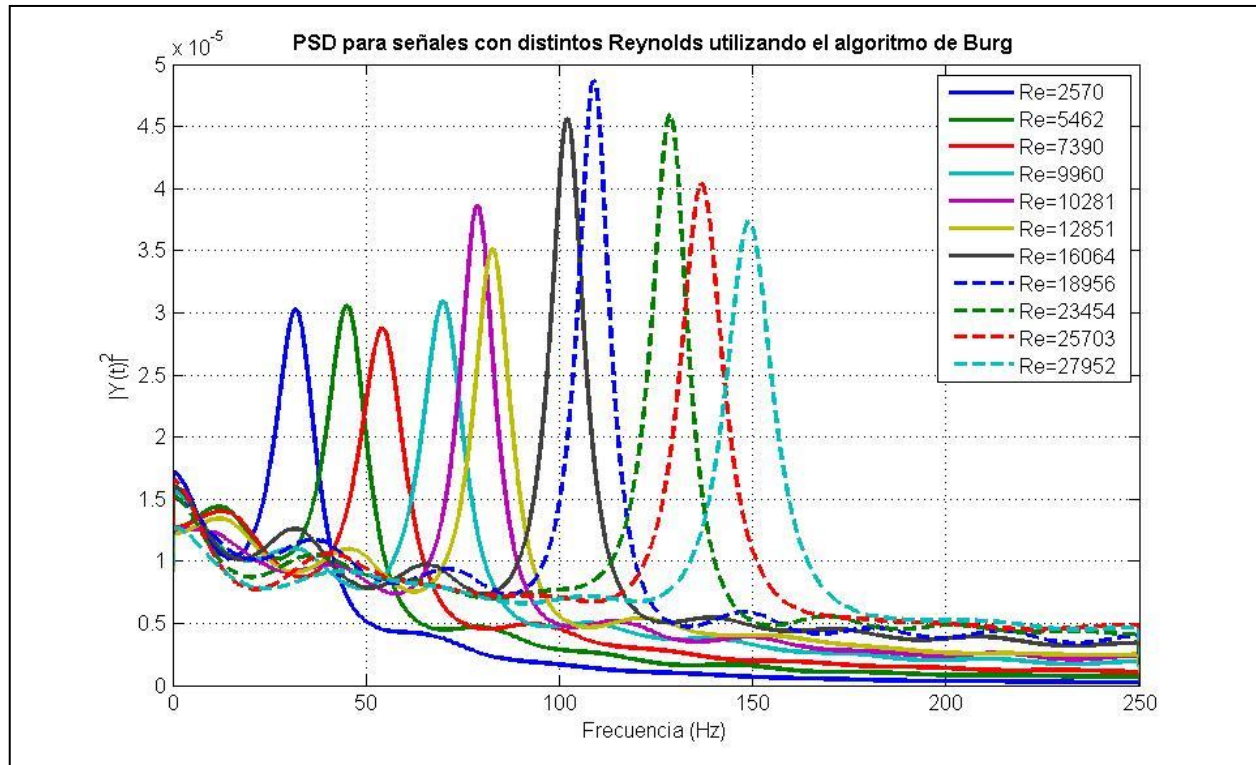


Figura 19 – Tubo de 785 mm con obstáculo transversal de 12,8 mm excitado con ventilador centrífugo

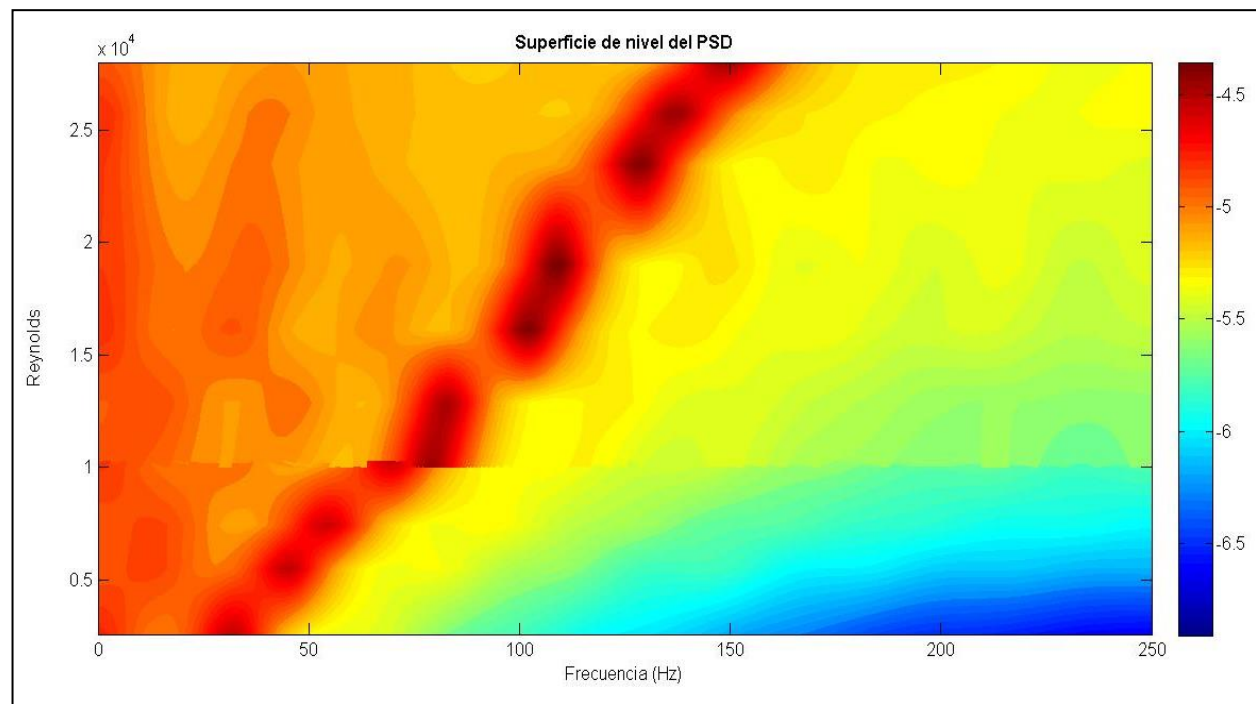


Figura 20 – Superficie de nivel de la densidad espectral de potencia vs la frecuencia y el número de Reynolds

De la Figura 20 se observa que el comportamiento en frecuencia del desprendimiento de vórtices aumenta al aumentar el número de Reynolds, como la ecuación 8 lo describe.

Al calcular la frecuencia para cada una de las velocidades y compararla con las frecuencias a las cuales se obtuvieron picos en el experimento, se obtiene la siguiente figura:

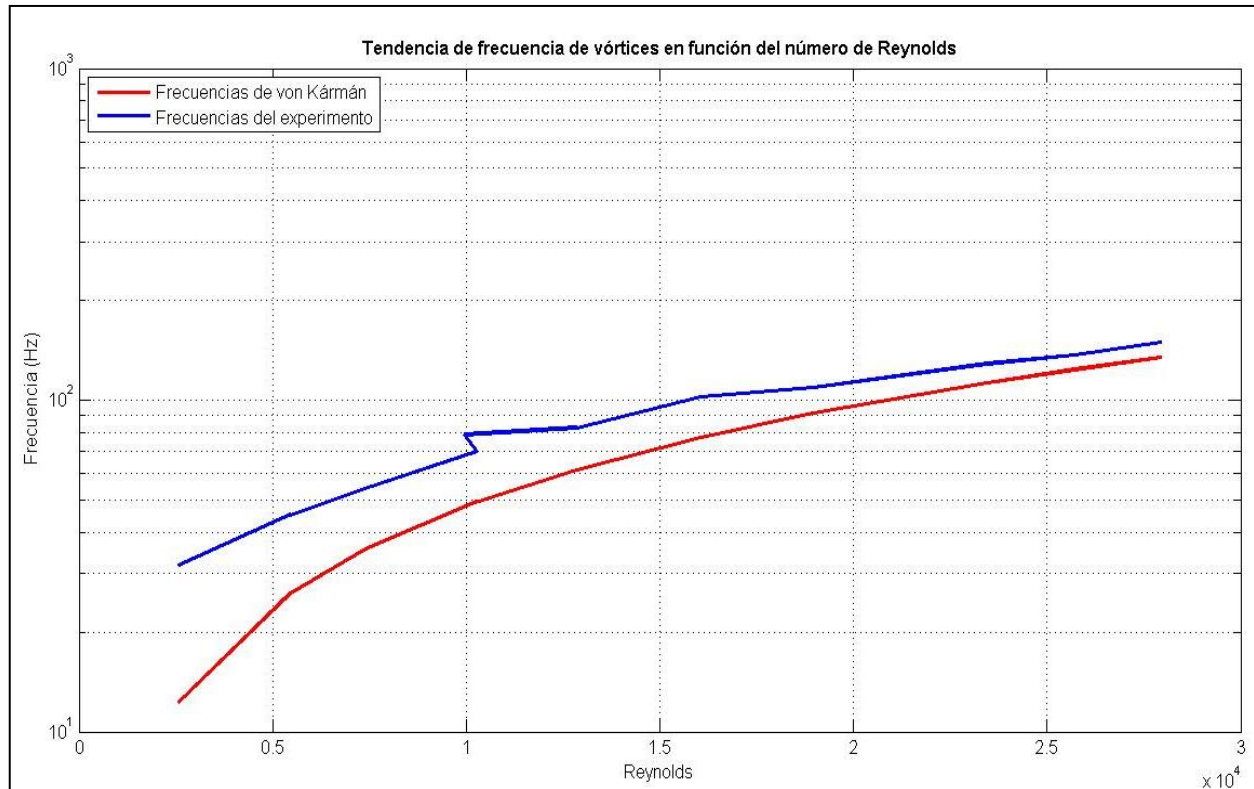


Figura 21 – Frecuencia de los vórtices detectados (azul) y frecuencia de vórtices calculados por la ecuación 8

De la Figura 21, podemos concluir que al aumentar el número de Reynolds del ensayo, las curvas se aproximan.

Ensayo con obstáculo transversal (dos anemómetros)

Se llevó a cabo el ensayo anterior pero esta vez con dos anemómetros separados espacialmente en dirección del flujo. Los dos anemómetros se dispusieron de forma que sean paralelos al flujo, pero separados espacialmente uno del otro en dirección axial, es decir, uno estará más cerca del obstáculo que el otro, como se observa en la Figura 6. Esto último permitirá realizar una correlación cruzada entre las señales. Esta técnica permite detectar la “similitud” entre dos señales. Con esta herramienta será posible determinar si las perturbaciones detectadas por un sensor son captadas por el otro un tiempo más tarde, es decir, en qué medida están correlacionadas. En caso de haber detectado los vórtices, debería ser posible detectarlos con los dos sensores, con un desfase temporal inversamente proporcional a la velocidad del fluido.

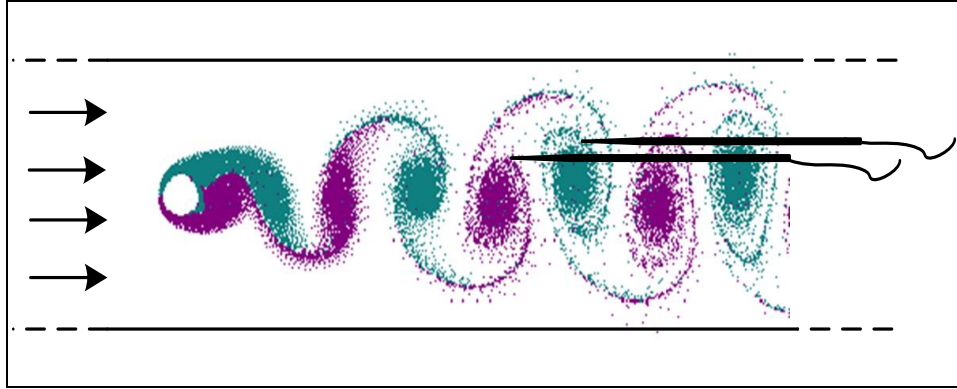


Figura 22- Esquema experimental, vista lateral

A continuación se muestran los datos procesados, obtenidos del experimento.

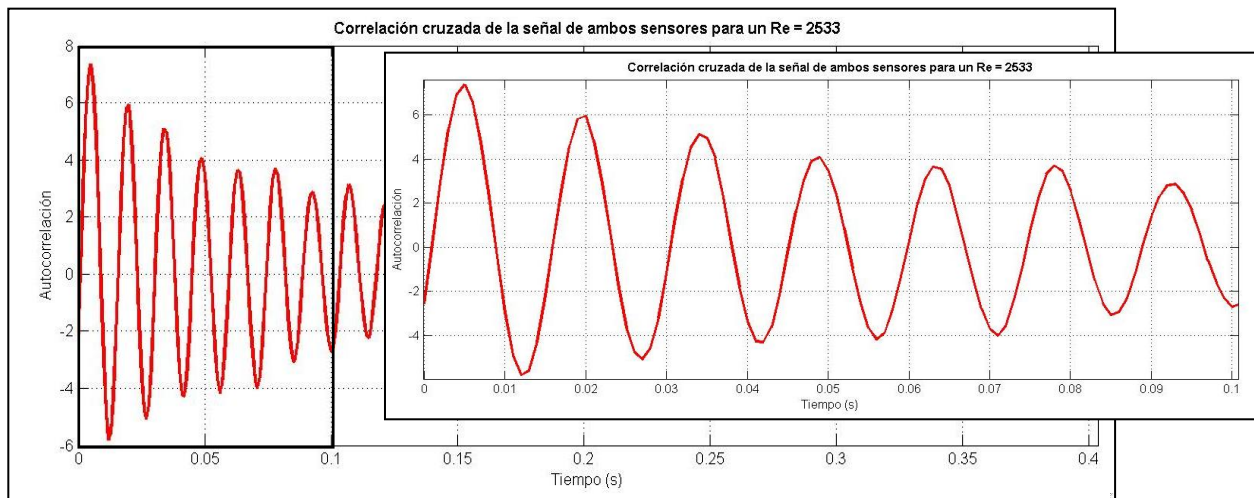


Figura 22- Correlación cruzada de las señales de los sensores, se aprecia el desfase espacial de los sensores a partir del desfase temporal de las señales. Tau = 0.005 s

Mediante la correlación cruzada se determina que las señales tiene una correlación fuerte para $t=0.005$ s en el caso ilustrado en la figura, lo que significa que la señal detectada por el sensor ubicado aguas arriba fue detectada por el segundo 5 ms más tarde. Si hacemos un análisis espectral de la serie de mediciones completa para esta configuración, obtenemos el siguiente espectro de la Figura 23.

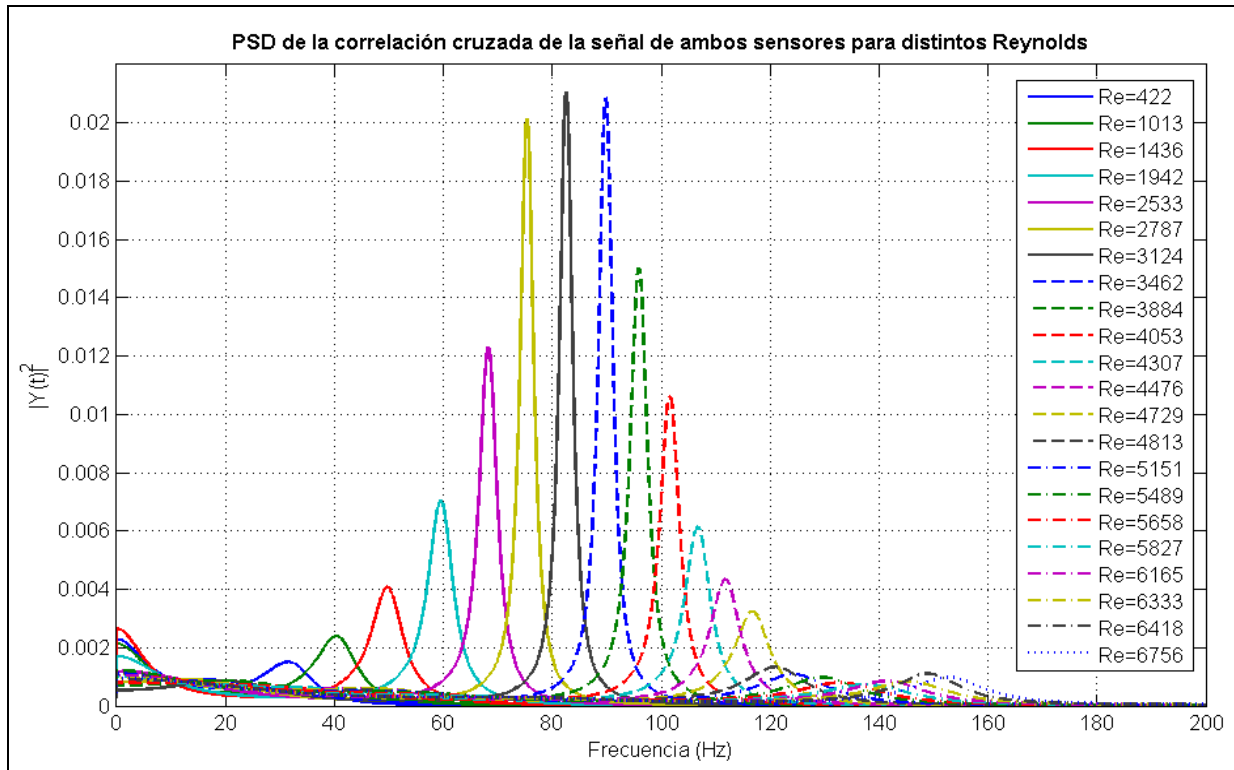


Figura 23 - Densidad espectral de potencia para distintos Reynolds

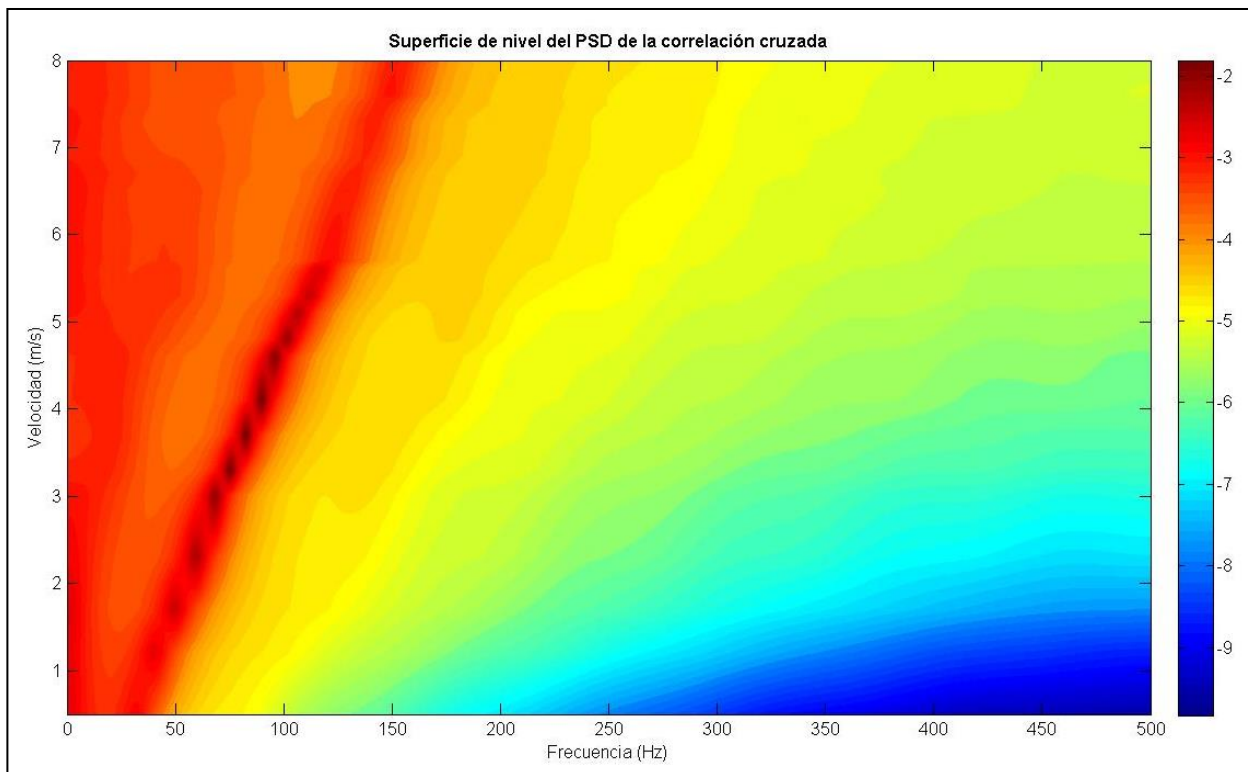


Figura 24 - Tendencia de la frecuencia de generación de vórtices

En la Figura 23 y Figura 24 se puede observar cierta relación entre la frecuencia de generación de vórtices y el número de Reynolds (que es proporcional a la velocidad media del fluido).

Si graficamos el comportamiento de las frecuencias correspondientes a los máximos absolutos del PSD para cada Reynolds y para cada sensor, y lo comparamos con las frecuencias del experimento de von Kármán, se obtiene lo que se muestra en la Figura 25.

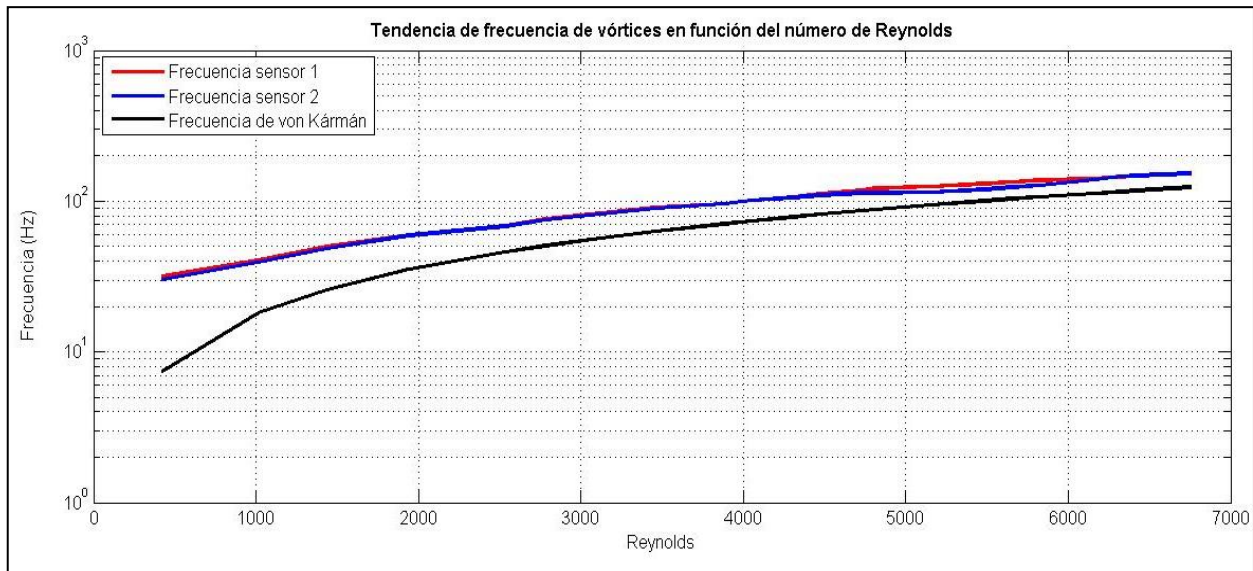


Figura 25 – Frecuencia de los vórtices detectados por cada sensor (rojo y azul) comparados con los calculados con la ecuación 8

El resultado es similar al del experimento con un único anemómetro, es decir, la frecuencia de desprendimiento de vórtices observada en el experimento se asemeja cada vez más a la calculada por medio de la correlación de von Kármán a medida que el número de Reynolds del experimento aumenta.

Simulaciones

Se llevaron a cabo simulaciones de la dinámica de fluidos del experimento con obstáculo utilizando el software CFD “ANSYS Fluent” para convalidar los datos experimentales obtenidos y además observar el carácter tridimensional que adquieren los vórtices al desprenderse aguas abajo del obstáculo. De las simulaciones se obtuvieron los siguientes perfiles de velocidad, donde la Figura 26 corresponde a la vista lateral y la Figura 27 a la vista superior.

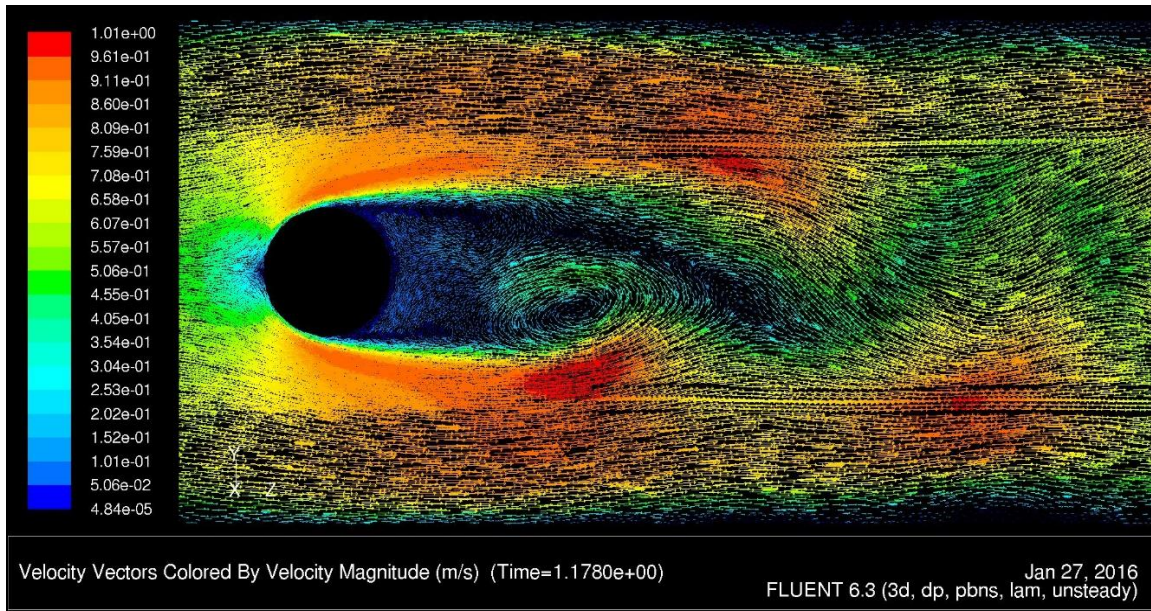


Figura 26 – Vista lateral del mapa de velocidades para el experimento, simulado en “ANSYS Fluent”

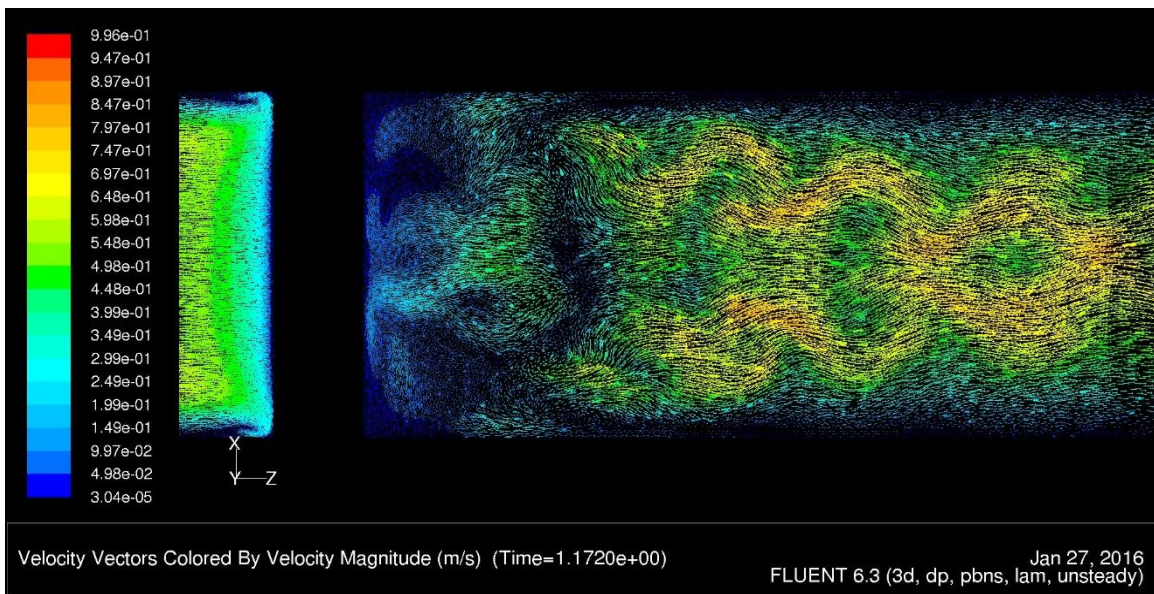


Figura 27 – Vista superior del mapa de velocidades para el experimento, simulado en “ANSYS Fluent”

Ensayos con símil de ECN

Una vez que verificamos los sensores y la técnica de medición (anemometría de hilo caliente de temperatura constante) con un fenómeno conocido y estudiado, se procedió a realizar las mediciones de interés, es decir, con las secciones de ensayo con vainas de acero inoxidable, símil a la de un elemento combustible nuclear.

Para las dos configuraciones de ensayo de las Figuras 4 y 5 se obtuvieron resultados similares, por lo que se decidió discutir sobre ellos en la misma sección.

El fenómeno que se buscaba medir y caracterizar es el que se encuentra ilustrado en la Figura 2 b) y c). Sobre la Figura 2 b), se presenta un corte como lo indica la línea punteada, dividiendo la sección de ensayos en dos sub-canales por donde circula el flujo. Estos canales se encuentran comunicados por un “gap”, que es el espacio que queda entre la vaina y la superficie interna del canal de acrílico. Debido a diferencias leves en las geometrías (tolerancias de construcción), a la forma en la que ingresa el flujo o a la misma turbulencia, existen diferencias de velocidad entre ambos sub-canales, generando una diferencia de presión entre ellos. Por esto, existe circulación de flujo en forma de vórtices entre ambos sub-canales a través del “gap” que los une, generando un intercambio de energía. Estos intercambios se dan con una frecuencia característica para condiciones dadas, y puede estimarse a partir de la correlación de Wu y Trupp (1993) dada por la ecuación 10, quienes estudiaron este fenómeno para una sección trapezoidal.

$$Str^{-1} = \left(\frac{f_p d}{v^*}\right)^{-1} = \frac{0.822g}{d} + 0.144 \quad (10)$$

$$v^* = Vel_{msd} \sqrt{\frac{F}{8}} \quad (11)$$

Donde g es el gap, d es el diámetro externo de la vaina, v^* es la velocidad de fricción y F el factor de fricción. Esta relación sugiere que la frecuencia de pasaje de vórtices depende fuertemente de la geometría de los sub-canales dada por la de la sección de ensayos.

Para las mediciones de fluctuaciones de velocidad se colocaron dos anemómetros, uno en cada sub-canal, tanto para el experimento de una vaina como para el que se realizó con las 7 vainas. Para el ensayo con 7 vainas se eligió una de ellas de forma arbitraria y se colocó un anemómetro en cada uno de sus sub-canales adyacentes. De igual forma que para el experimento anterior, los anemómetros se encontraban separados espacialmente.

Lamentablemente, las ecuaciones citadas no se pudieron verificar y la caracterización en el dominio de la frecuencia de pasaje de vórtices no se pudo realizar debido a que con nuestro montaje experimental no se lograron alcanzar números de Reynolds lo suficientemente altos ($Re > 20000$). En otras palabras, no se logró alcanzar un flujo turbulento como el que utilizaron Wu y Trupp (1993), cuyo número de Reynolds se encuentra en el orden de los 50000. Sin embargo, lo que sí se pudo comprobar es el intercambio de energía entre los sub-canales de ambas secciones de pruebas como se ilustra en la Figura 28.

Siguiendo el diagrama esquemático de la Figura 6, con la salvedad de que en lugar de un obstáculo hubo una vaina para un ensayo y siete vainas para el otro, los anemómetros se

dispusieron de la misma forma. Es decir, uno se encontraba más cerca del impulsor de flujo que el otro. En la Figura 28, el sensor 1 (azul) es el que se encontraba más cerca del impulsor y el sensor 2 (verde), más alejado. Es apreciable cómo los mínimos y máximos del sensor 1 se corresponden con los máximos y mínimos del sensor 2, respectivamente. Además de esta correspondencia, también se capturó un desfase temporal, debido a la separación en el espacio de ambos sensores.

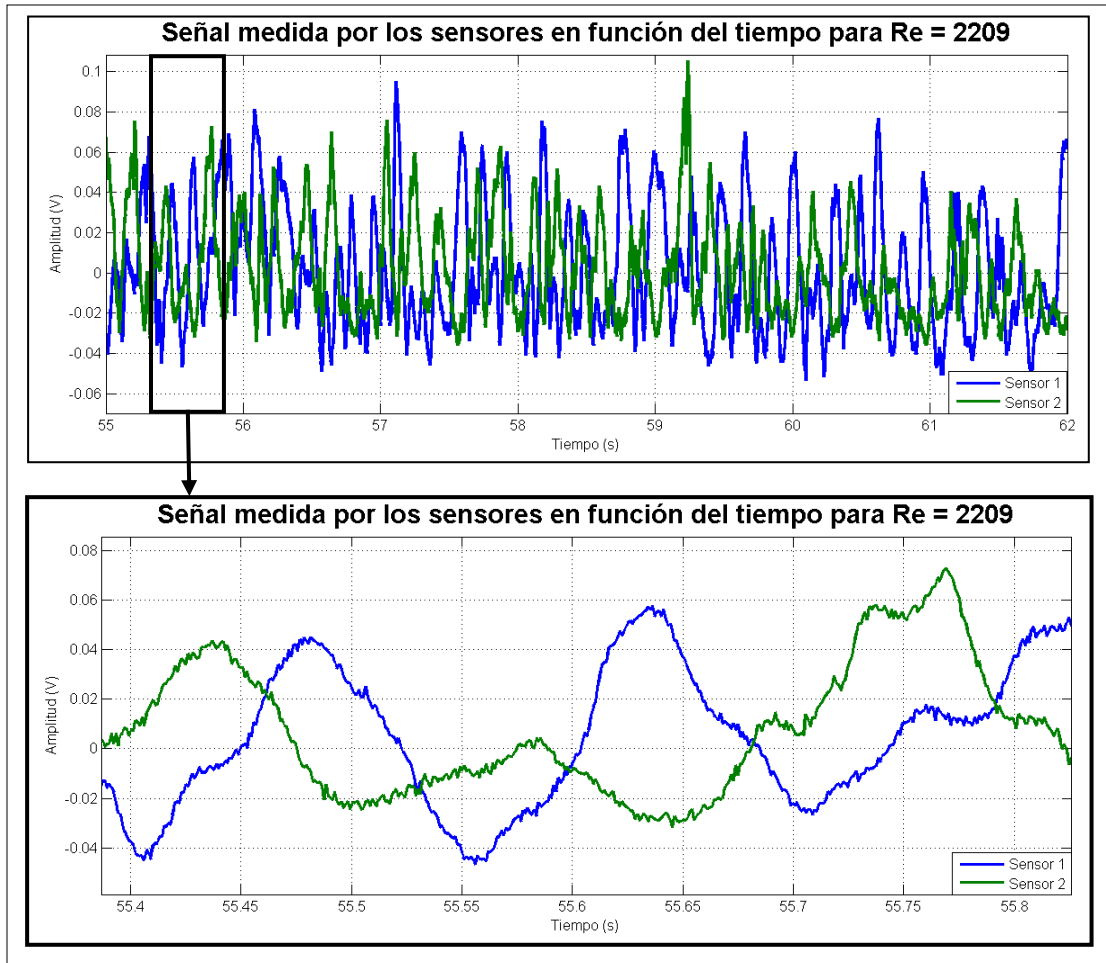


Figura 28 – Señal de los sensores graficada vs el tiempo y un acercamiento, en donde se aprecia el carácter cuasi-periódico de las señales y la correspondencia entre máximos y mínimos.

Conclusiones

Se pudieron verificar de forma aproximada modelos teóricos (calle de vórtices de von Kármán) a partir de resultados experimentales obtenidos mediante la técnica de anemometría térmica de temperatura constante con sensores de hilo caliente.

El objetivo de caracterizar la frecuencia de pasaje de vórtices en la sección con el arreglo completo de vainas no pudo concluirse ya que el sistema impulsor de fluido que se utilizó (ventiladores centrífugos) no fue suficiente para alcanzar un régimen turbulento, debido a que la pérdida de carga de las siete vainas más los separadores fue demasiado alta. Sin embargo pudo comprobarse la existencia del intercambio de energía entre los sub-canales mediante el análisis de las señales en el dominio del tiempo, a partir de la observación del corrimiento temporal de las mismas.

Se pudo observar que las estructuras de gran escala dependen fuertemente de la geometría, tal como se observa en otros trabajos.

Se propone como trabajo futuro la implementación de un nuevo impulsor de flujo más potente y con el cual se puedan alcanzar números de Reynolds del orden de los utilizados por Wu y Trupp y utilizando la misma técnica que se empleó en este trabajo, esto es, anemometría térmica de temperatura constante.

Referencias

- David, J. D. (2015). Coherent structures in wall-bounded turbulence. *An Acad Bras Ciênc vol.87 n°2*.
- Fingerson, K. (1994). Thermal anemometry, current state, and future directions. *Review of Scientific Instruments 65*, 285-300.
- Freymuth, P. (1977). Frequency response and electronic testing for constant-temperature hot-wire anemometers. *Journal of Physics E: Scientific Instruments 10*, 705-710.
- Goldstein, R. J. (1996) *Fluid Mechanics Measurements*. Washington: Taylor & Francis.
- Houssain, A. K. (1983). Coherent structures - Reality and Myth. *Phys. Fluids*.
- Meyer, L. (2010). From discovery to recognition of periodic large scale vortices in rod bundles assource of natural mixing between subchannels - a review. *Nuclear Engineering and Design 240*, 1575-1588.
- Möller, S. V. (1991). On Phenomena of Turbulent Flow Through Rod Bundles. *Experimental Thermal and Fluid Science*.
- Osorio, O.; Silin, N.; Converti, J.;. (2010). Fabrication of hot-wire probes and electronics for constant temperature anemometers. *Latin American Applied Research, vol. 40 n°3*, 233-239.
- Rehme. (1992). The structure of turbulence in rod bundles and the implications on natural mixing between the subchannels. *Int. J. Heat Mass Transfer 35*.
- Sunden, B. (22 de Febrero de 2019). *Thermopedia*. Obtenido de <http://www.thermopedia.com/content/1247>
- Trupp, A.C.; Aly, A.M.M. (1979). Predicted secondary flows in triangular array rod bundles. *Trans. ASME 101*, 354-363.
- Wu, X.; Trupp, A. C. (1993). Spectral measurements and mixing correlation in simulated rod bundle subchannels. *J. Heat Mass Transfer Vol. 37*.

Agradecimientos

Primeramente, me gustaría agradecer al equipo organizador que hace posible que estas becas de verano se lleven a cabo, considero que fue un mes en el que crecí mucho tanto a nivel profesional como personal, conociendo estudiantes y profesionales apasionados de muchas partes de Argentina e incluso algunos del exterior.

También quisiera agradecer particularmente a mis directores de proyecto, Darío y Pablo, que supieron acompañarme, guiarme y enseñarme las herramientas necesarias para que pudiera completar el trabajo propuesto, así como también por haberme incluido en su equipo y haberme hecho sentir parte. Ellos fueron, en gran medida, los que hicieron que esta estadía haya sido tan disfrutable. Destaco su predisposición y buena voluntad en todo momento.

Además, me gustaría mencionar a Pierre, Javier, Adriana y Federico, que estuvieron siempre atentos a nuestras necesidades, solucionándolas en la medida en que podían hacerlo, aconsejándonos e incluso acompañándonos a salidas extra curriculares.

Considero relevante agradecer también a Sergio Obregón y a Javier Etcheto, División Numérico Analítica, Departamento Termohidráulica, por haber prestado su tiempo para realizar las simulaciones que se presentaron en las Figuras 26 y 27, además de otras que se incluyeron en la presentación del póster de este trabajo, enriqueciéndolo considerablemente.

Por último pero no por eso menos importante, agradecer al resto de los becarios con quienes compartimos la mayor parte de las vivencias y quienes supieron ser abiertos al intercambio cultural, el cual no fue menor a pesar de ser en su mayoría del mismo país.

Anemometría térmica en flujos axiales a través de geometrías complejas

Leandro Londra¹, Darío Osorio^{2,3}, Pablo Lazo^{2,3}

1. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional C. del Uruguay, Entre Ríos
2. Instituto Balseiro, San Carlos de Bariloche
3. Centro Atómico Bariloche, San Carlos de Bariloche



Resumen

El mezclado entre sub-canales en un elemento combustible nuclear (ECN) tiene gran relevancia en el diseño del mismo. Una técnica muy utilizada para analizar el mezclado consiste en medir fluctuaciones de velocidad mediante anemometría térmica. Esta técnica hace uso de un sensor cuya resistencia eléctrica es función de la velocidad. El trabajo consistió en llevar a cabo la caracterización del campo de velocidades de un flujo en un canal de geometría similar a la de un ECN.

Montaje experimental

Set-up experimental

Electrónica de acondicionamiento y realimentación

Amplificación y realimentación

Obstáculo Sensores

Ventilador centrífugo

Offset Sensor 1

Offset Sensor 2

Muestreo y adquisición de datos

Sección de ensayo

Adquisición con LabVIEW

Electrónica

Electrónica de temperatura constante

Esquema simplificado de la electrónica

Sensor de hilo caliente (Hot wire)

Recubrimiento del sensor

Contactos

Bornes

Epoxy

Soportes

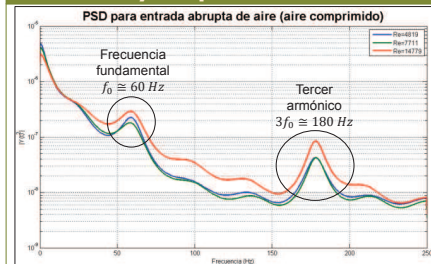
Elemento sensor

Respuesta en frecuencia del sensor

$$f_{cutoff} = \frac{1}{1.3 \cdot 18,5 \times 10^{-6} s} = 41580 Hz$$

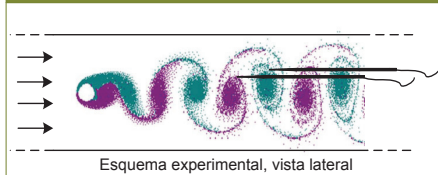
Respuesta en frecuencia del sensor a una excitación tipo escalón para ajuste de la respuesta en frecuencia de la electrónica

Ensayos preliminares



Se observó que al utilizar aire comprimido se excitan los modos naturales de la sección de pruebas, por lo que se decidió utilizar ventiladores centrífugos. Se observaron componentes de baja frecuencia en las mediciones realizadas debido a la expansión abrupta del flujo, el modo fundamental a alrededor de los 60 Hz y el tercer armónico del mismo a aprox. 180 Hz.

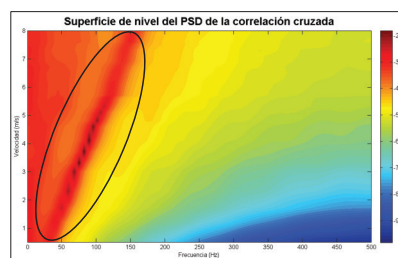
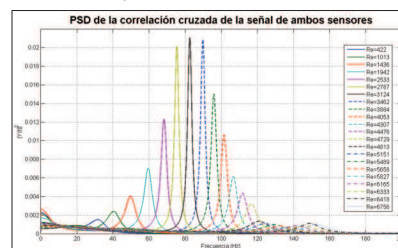
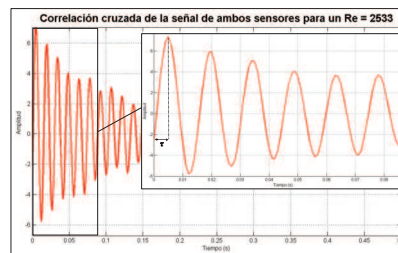
Trenes de vórtices de von Kármán



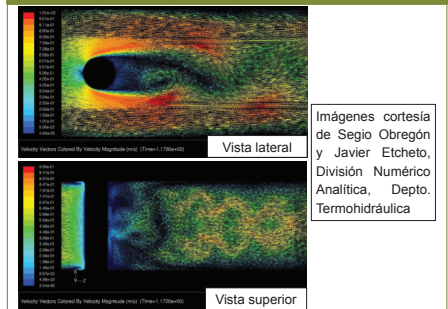
Calle de vórtices de von Kármán

$$Str = \frac{fd}{V} = 0,198 \left(1 - \frac{19,7}{Re} \right)$$

Donde el lado izquierdo de la igualdad se conoce como **número de Strouhal**



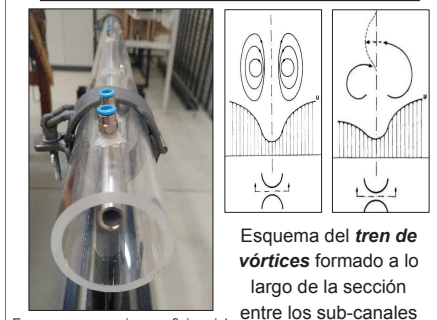
Simulaciones



Ensayos con símil de ECN

Relación de Wu y Trupp para sección trapezoidal con una vaina

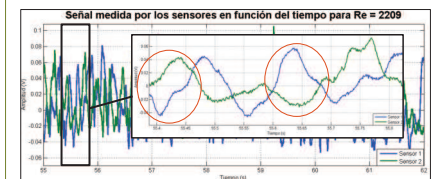
$$Str^{-1} = \left(\frac{f_p d}{v^*} \right)^{-1} = 0,822g/d + 0,144$$



Ensayo con una vaina con flujo axial



Ensayo con siete vainas sostenidas por separadores



Para ambos ensayos se observó que los máximos y mínimos en el sensor 1 se corresponden con mínimos y máximos, respectivamente, desfasados para el sensor 2

Conclusiones

- ❖ Se corroboraron modelos teóricos a partir de resultados experimentales.
- ❖ Se comprobó que ajustando correctamente el anemómetro de temperatura constante y optimizando el montaje del experimento (para evitar fenómenos de resonancia), es posible medir estructuras de flujo conocidas.
- ❖ Se detectaron comportamientos cuasi-periodicos en ambos sub-canales, dejando en evidencia una transferencia de energía entre los mismos.
- ❖ Se propone como trabajo futuro la utilización de un nuevo impulsor de flujo para alcanzar Reynolds más altos.

Referencias

- ❖ Wu X., Trupp A.C.:1993. Spectral measurements and mixing correlation in simulated rod bundle subchannels.
- ❖ Osorio O. D., N. Slim y J. Conventi. Fabrication of Hot-Wire Probes and Electronics for Constant Temperature Anemometers. Latin American Applied Research, vol.40 n°3, p.233- 239. 2010.
- ❖ Goldstein R. J. Fluid Mechanics Measurements, 2nd edition, Taylor & Francis, Washington DC. 1996.

San Carlos de Bariloche, Argentina
Marzo 2019