



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Desarrollo de un sensor de granizo basado en técnicas acústicas

TESIS PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Florencia Blasina

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.

DIRECTORES DE TESIS

Nicolás Pérez Universidad de la República
Gabriel Usera Universidad de la República

TRIBUNAL

Pablo Monzón Universidad de la República
Madeleine Renom (Revisora Externa) . Universidad de la República
Alan Kubrusly (Revisor Externo) PUC-Rio (Brasil)

DIRECTOR ACADÉMICO

Nicolás Pérez Universidad de la República

Montevideo
viernes 8 marzo, 2024

*Desarrollo de un sensor de granizo
basado en técnicas acústicas*, Florencia Blasina.

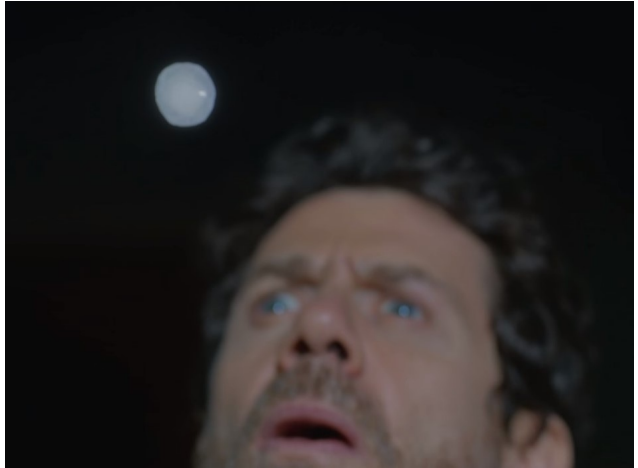
ISSN 1688-2784

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 153 páginas.

Compilada el viernes 8 marzo, 2024.

<http://iie.fing.edu.uy/>



¡“NOCHE DESPEJADA”, DIJO! - LUIS, PELÍCULA
Granizo

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

Quiero agradecerle a todas las personas que me ayudaron a valorar lo positivo de este camino y me acompañaron a alcanzar esta meta. Hubo momentos lindos, pero también crisis existenciales. Por suerte ustedes me acompañaron cuando lo necesité y ahora estoy cerrando esta etapa.

Agradezco a Juan, mi pareja, que me acompaña en el día a día y en los altibajos de ser estudiante de doctorado. A mis padres, que se enorgullecen más que yo misma de mis logros. A Nico, mi tutor, que es inspirador, optimista y siempre está. A Andrés, que pasó horas haciendo ensayos estruendosos conmigo. A todo mi círculo de familiares y amigos, que me alegraron la vida en estos 5 años. A mis compañeros doctorandos, cada quien con su tema, pero nos entendemos. Al grupo del IIE, mi segunda casa. Al grupo del IIQ, lleno de gente inspiradora.

Me gustaría agradecer también a todas las personas que manifestaron genuino interés por lo que estaba haciendo y me hicieron recordar que estaba bueno en los momentos en que mi propio entusiasmo decaía.

Y le agradezco los lindos momentos al Doctorado, especialmente aquellos que me permitieron conocer nuevos lugares.

Finalmente, agradezco a las entidades que me financiaron, haciendo posible mi dedicación a esta tarea: *Comisión Académica de Posgrados, Espacio Interdisciplinario*, a la *DAAD*, por financiar mi pasantía en Alemania y a la *Comisión Sectorial de Investigación Científica*, por financiar mi presentación al *SEIA 2023* en Madeira.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

*Para todas las personas que
me hicieron buena compañía
en estos cinco años.*

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

La falta de modelos predictivos de granizo es un problema en Uruguay y en el mundo. Para generarlos, necesitamos más información sobre el fenómeno. En este trabajo analizo aspectos clave para el diseño de un sensor de granizo, propongo un diseño, lo implemento, lo calibro y lo evalúo.

Este trabajo comienza con un estudio bibliográfico sobre las características del granizo y los daños que genera. También explico las formas tradicionales de caracterizar granizo, las cuales se pueden dividir en dos grandes categorías: métodos observacionales y métodos que utilizan algún tipo de tecnología para la detección. En la primera categoría, la población reporta características de las tormentas graniceras. La segunda categoría, podemos dividirla en tecnología de largo alcance (como los radares y los satélites) y tecnología específica y de contacto directo con la tormenta. En esta última categoría se encuentra mi sensor.

Debido a las posibilidades tecnológicas y en un impulso dado por la creciente capacidad de manejo de grandes volúmenes de información, se busca automatizar la adquisición de información sobre granizo. Este es un tema sumamente actual: el estado del arte varió en gran manera desde que comencé a investigar el tema en 2019. Recientemente aparecieron sensores comerciales con principios de funcionamiento con tecnología similar al que estuve desarrollando. Creo que el valor principal de mi trabajo está en presentar científicamente el principio de funcionamiento en que se basan los diseños comerciales modernos.

El sensor que propongo es de principio acustoeléctrico. Uno de los aspectos destacables de este trabajo es el diseño del elemento que se coloca expuesto a la intemperie, en el que se generan vibraciones ante cada impacto de granizo. Investigué la forma de colocar los transductores piezoeléctricos (los elementos que convierten las vibraciones en señales eléctricas) dentro de esta pieza. Parte de mi trabajo consistió en realizar ensayos sistemáticos para obtener señales eléctricas. A partir del procesamiento de estas señales, tomé las decisiones de diseño.

El aspecto que considero central de este trabajo es el vinculado con la calibración del sensor diseñado. Esto incluye la elaboración de una plataforma de ensayos, cuya necesidad identifiqué y que fue diseñada en el marco de un proyecto de fin de carrera de Ingeniería Eléctrica que planteé y dirigí.

Actualmente, el prototipo que construí está colocado en exteriores, a la espera de la ocurrencia de tormentas graniceras.

Entre los aspectos que me gustaría trabajar a futuro se incluyen: independizar el prototipo de la red eléctrica, sustituir la computadora actual por una que pueda embeberse en el sensor, sustituir la tarjeta adquisidora actual por una económica,

estudiar la influencia de la temperatura en las señales y trabajar en la incorporación del prototipo a una red de sensores inalámbricos.

En el contexto de esta investigación, realicé dos publicaciones en revistas [1,2] y presenté trabajos en tres eventos [3-5].

Espero que el conocimiento que generé en esta área mediante la investigación contribuya a la mejora de estos sistemas y promueva el desarrollo de este tipo de sensores con participación uruguaya, para que sea posible popularizarlos en nuestro país. En este sentido, me motivó observar el interés en mi trabajo por parte de la comunidad meteorológica uruguaya.

Abstract

The lack of predictive hail models is a problem in Uruguay and worldwide. To generate them, we need more information about the phenomenon. In this work, I analyze key aspects for the design of a hail sensor, propose a design, implement it, calibrate it, and evaluate its performance.

This work begins with a literature review on the characteristics of hail and the damages it causes. I also explain the traditional methods of characterizing hail, which can be divided into two main categories: observational methods and methods utilizing some form of technology for detection. In the first category, the population reports characteristics of hailstorms. The second category can be further divided into long-range technology (such as radars and satellites) and specific technology involving direct contact with the storm. My sensor falls into this latter category.

Due to technological possibilities and driven by the increasing capacity to handle large volumes of information, there is a quest to automate the acquisition of hail-related data. This is an extremely current issue: the state of the art has evolved significantly since I began researching the topic in 2019. Recently, commercial sensors with operating principles similar to the one I have been developing have emerged. I believe the main value of my work lies in scientifically presenting the operating principle upon which modern commercial designs are based.

The sensor I propose operates on the acoustoelectric principle. A notable aspect of this work is the design of the component exposed to weather conditions, where vibrations are generated with each hail impact. I researched the placement of piezoelectric transducers (the elements converting vibrations into electrical signals) within this component. A portion of my work involved conducting systematic tests to obtain electrical signals. Based on the processing of these signals, I made design decisions.

The aspect I consider central to this work is related to the calibration of the designed sensor. This involves the development of a testing platform, a necessity I identified and designed within the context of a final-year Electrical Engineering project that I proposed and led.

Currently, the prototype I built is situated outdoors, awaiting the occurrence of hailstorms.

Among the aspects I would like to address in the future are: making the prototype independent of the electrical grid, replacing the current computer with one that can be embedded in the sensor, substituting the current data acquisition card with a more cost-effective option, studying the influence of temperature on signals,

and working on integrating the prototype into a wireless sensor network.

In the context of this research, I published in two journals [1,2] and presented my work in three events [3-5].

I hope that the knowledge I've generated in this field through research contributes to the improvement of these systems and fosters the development of such sensors with Uruguayan participation, making it possible to popularize them in our country. In this regard, I was motivated to observe the interest in my work from the Uruguayan meteorological community.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	VII
Abstract	IX
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Alcance de la Tesis	2
1.3. Organización del Trabajo, Resultados Obtenidos y Publicaciones	3
1.4. Revisión Bibliográfica	4
1.4.1. Características del Granizo	4
1.4.2. Daños Provocados por Granizo	8
1.4.3. Ventajas y Aplicaciones de Cuantificar Granizo	9
1.4.4. Formas de Recabar Información sobre Granizo	11
1.4.5. Calibración de Sensores de Granizo	12
1.4.6. Incorporación a Estación Meteorológica	12
1.4.7. Redes de Sensores	16
2. Técnicas de Medición de Granizo	17
2.1. Formas de Recabar Información sobre Granizo	17
2.1.1. Estrategias basadas en Observación de Muestras	17
2.1.2. Sensores	18
2.2. Energy Matching	26
2.2.1. Objetivo	26
2.2.2. Descripción General e Hipótesis	26
2.2.3. Ecuaciones	28
2.2.4. Comentarios	30
3. Adquisición y Procesamiento de Señales Acústicas	33
3.1. Adquisición de Señales	33
3.1.1. Transductores Piezoeléctricos	33
3.1.2. Digitalización	34
3.2. Procesamiento de Señales	38
3.2.1. Cuantificar Energía	38
3.2.2. Ruido	39

Tabla de contenidos

3.2.3. Filtrado	39
3.2.4. Evaluar bondad de los resultados	41
3.2.5. Herramientas que se Evaluaron y se Descartaron	41
4. Métodos de Ensayo	43
4.1. Ensayos con Electroimán	43
4.2. Desarrollo de una Plataforma de Ensayos	44
4.2.1. Objetivos	44
4.2.2. Metodología	46
4.2.3. Resultados Obtenidos	46
4.2.4. Aplicación	47
4.3. Ensayos con Posicionador 2D	48
4.4. Videos en Cámara Lenta	48
5. Diseño del Sensor de Granizo	51
5.1. Objetivo	51
5.2. Descripción General	52
5.2.1. Hipótesis	52
5.2.2. Funcionamiento del Sensor	52
5.2.3. Tiempo de Detección	54
5.2.4. Definición de Características	57
5.2.5. Componentes Involucrados	58
5.3. Cavidad Acústica	59
5.3.1. Material	59
5.3.2. Forma	61
5.3.3. Tamaño	63
5.3.4. Fijación	64
5.3.5. Elección de Transductores	64
5.3.6. Fabricación y Ensamblaje	65
5.3.7. Conclusión sobre Diseño de Cavidad Acústica	69
5.4. Ensayos de Diseño	69
5.4.1. Repetitividad	69
5.4.2. Señales al Cambiar el Punto de Impacto	71
5.4.3. Ángulo de Incidencia	71
6. Calibración del Sensor de Granizo	75
6.1. Energías Involucradas en el Impacto	77
6.2. Relación entre Energía de Impacto y Energía de la Señal	78
6.3. Atenuación por Distancia del Impacto al Centro de la Placa	79
6.4. Detección de la Distancia del Impacto al Centro de la Placa	82
6.5. Resultados Finales	86
6.6. Resumen	87
6.7. Discusión	87

7. Ensayos en Exteriores	89
7.1. Acondicionamiento Físico	89
7.2. Acondicionamiento del Programa de Adquisición	90
7.3. Observaciones	92
8. Síntesis de Resultados, Conclusiones y Trabajos Futuros	93
8.1. Síntesis de Resultados	94
8.2. Conclusiones	96
8.3. Trabajos Futuros	98
8.3.1. Trabajos Científicos	98
8.3.2. Mejoras a la Implementación	100
A. Procesamiento de Señales	103
A.0.1. Base de Datos	103
A.0.2. <i>Scripts</i> Desarrollados	103
B. Integración del Sensor a una Red de Sensores Automáticos	111
B.1. Sistema Embebido	111
B.1.1. Sustituir PC	111
B.1.2. Sustituir Tarjeta Adquisidora	112
B.2. Red de Sensores Inalámbricos	114
B.2.1. Comunicación	114
B.2.2. Esquema General	114
C. Diagrama de Funcionamiento de Plataforma de Ensayos	115
Referencias	117
Glosario de Variables y Parámetros	127
Glosario	132

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

El granizo es un tipo de precipitación atmosférica, al igual que la lluvia, la nieve, el aguanieve y el *graupel*. A diferencia de los otros tipos de precipitación, la energía de impacto de las piedras de granizo le otorga gran poder destructivo. A su vez, como sociedad tenemos poca capacidad de pronóstico y mínima capacidad de control de daños. Ante una ocurrencia de granizo (figura 1.1), es común que nos encontremos desprevenidos. Esto es una amenaza para el bienestar de quienes se encuentran en una zona sin refugio en el momento de la tormenta. Lo mismo aplica para los bienes materiales, el granizo suele dañar los vehículos, como se dramatiza en la película *Granizo* [6]. Para el sector productivo, el granizo genera graves daños, que ilustraré en este capítulo. Buscando aumentar a mediano plazo la capacidad predictiva sobre los eventos de granizo, se me propuso tomar este tema para mi investigación de Doctorado. Acepté este desafío en mi interés por desarrollar sensores, particularmente aquellos ligados a la interacción entre la humanidad y el entorno.



Figura 1.1: Foto de granizo. ©Creative Commons 2.0, Autoría de *Discover Lehigh Valley, PA* en [flickr.com](https://www.flickr.com/photos/discoverlehighvalley/).

1.2. Alcance de la Tesis

En el marco de la tesis, desarrollé un prototipo de sensor de granizo (disdrómetro) de principio acustoeléctrico. Me enfoqué en el desarrollo del sensor que permite estimar la energía de impacto de las piedras de granizo. Esto permite en una etapa posterior la visualización de los datos en forma de histograma periódicamente durante la tormenta, por ejemplo cada un minuto. También prioricé la capacidad de individualizar los distintos impactos de granizo, para medir la frecuencia de los impactos. Además, el sensor registra el inicio y fin en tiempos absolutos de cada tormenta. La figura 1.2 brinda una idea global del sensor de granizo.

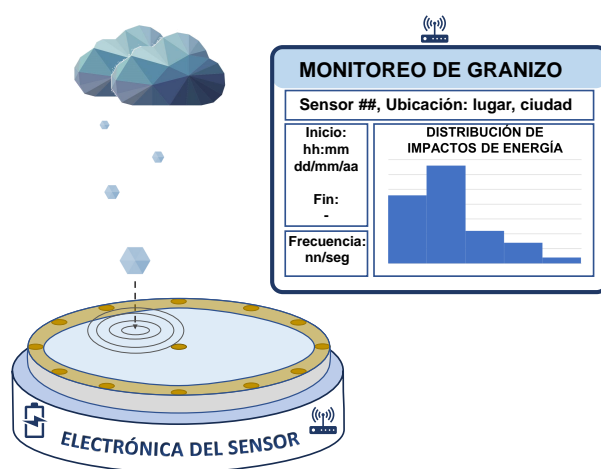


Figura 1.2: Idea global del sensor de granizo: Consiste en una placa que recibe los impactos de granizo y una electrónica que permite adquirir y procesar señales. Las señales llegan a la electrónica mediante transductores piezoeléctricos, que generan una señal de voltaje cuando son deformados por las vibraciones del impacto en la placa. Este sensor puede reconocer tiempo de inicio y fin de las tormentas graniceras. Además, puede estimar la energía con la que impactan las piedras de granizo.

Diseñé un sistema que obtiene señales debidas a cada impacto y las procesa para estimar la energía del impacto. Hice la especificación y dirigí un proyecto de grado en el que se realizó un prototipo de sistema de calibración. Desarrollé un procedimiento de calibración para una unidad básica del sensor. Dirigí un módulo de taller en el que se adecuaron los programas de adquisición para el funcionamiento continuo y la adquisición ante la detección de impactos únicamente e hice pruebas preliminares en exteriores.

En la revisión del estado del arte que realicé comenzando la investigación, hallé pocos trabajos académicos de sensores de granizo de este tipo. Ante la reciente aparición en el mercado de sensores de granizo comerciales, mi trabajo cobró la utilidad de explicar científicamente cómo pueden funcionar estos instrumentos. En paralelo, otros grupos de investigación publicaron trabajos académicos, demostrando la actualidad del tema.

Queda fuera del alcance la ejecución de algunas propuestas que se presentan en el desarrollo de este trabajo, las cuales se plantean como trabajos a futuro.

1.3. Organización del Trabajo, Resultados Obtenidos y Publicaciones

Entre ellas: la realización de un prototipo de sensor de granizo que consista en un sistema embebido que adquiera, procese y transmita la información; la inclusión de sensores típicos de una estación meteorológica al sistema embebido; la realización de pruebas en una estación meteorológica ya establecida; el desarrollo de una red de sensores o la integración a una ya existente.

1.3. Organización del Trabajo, Resultados Obtenidos y Publicaciones

En el capítulo 1, presenté mi motivación para trabajar en este tema y especifiqué el alcance de la tesis. El resto del capítulo es de revisión bibliográfica. Primero, la asociada al granizo como fenómeno meteorológico: características, problemas que causa y el propósito de caracterizarlo en una región y cuantificar el fenómeno. Presento una muy breve reseña de las formas de recabar información sobre el granizo y las técnicas de calibración de sensores de granizo. También discuto la posibilidad de incorporar el sensor a una Estación Meteorológica y presento algunas redes de sensores específicas para estudiar granizo.

En el capítulo 2, profundizo en las formas de recabar información sobre el granizo, dividiéndolas entre estrategias basadas en observación por un lado y utilización de sensores por otro lado. También explico la técnica de calibración con la que elegí trabajar: *Energy Matching*.

En el capítulo 3, abordo conceptos sobre adquisición y procesamiento de señales que son básicos para comprender el resto del documento. Sobre adquisición de señales, primero presento los transductores piezoeléctricos, parte fundamental del sensor diseñado y luego explico el concepto de digitalización, detallando las distintas etapas. Sobre procesamiento de señales, explico cómo cuantificar la energía de este tipo de señales y los conceptos de ruido y filtrado. Menciono brevemente otras herramientas de procesamiento de señales, que evalué pero no forman parte del algoritmo final.

En el capítulo 4 abordo los métodos de ensayo utilizados. El más básico consistió en soltar bolitas de acero con un electroimán. Este método evolucionó en una plataforma de ensayos que propuse desarrollar a un grupo de estudiantes de grado, cuyo proyecto dirigí. Otro método consiste en utilizar un sistema que posiciona (en el plano sobre el sensor) un elemento para impactar desde cerca. También explico la filmación de impactos en cámara lenta.

En el capítulo 5 presento el diseño del sensor de granizo. Planteo el objetivo de diseño y luego describo la idea general. Me enfoco en la cavidad acústica, que es la parte principal del sensor: la diseñé tomando decisiones informadas para el material, la forma, el tamaño, el método de fijación y la elección del modelo de transductores. Explico detalladamente la forma de fabricación y ensamblaje de esta pieza. El capítulo concluye con la presentación de algunos ensayos básicos de diseño, asociados a la obtención de salidas iguales ante impactos iguales y cómo varían las salidas cuando varían los impactos. En este punto, las salidas son señales de voltaje digitalizadas.

Capítulo 1. Introducción

En el capítulo 6 explico la calibración del sensor, focalizada en el prototipo construido con la placa diseñada. Primero presento las energías involucradas en el impacto. Luego, desarrollo las distintas etapas de la calibración, que abarcan tres secciones. Luego presento los resultados, seguidos por un resumen y una breve discusión.

En el capítulo 7 explico los ensayos realizados hasta el momento en exteriores. Para esta etapa fue necesario acondicionar el prototipo físicamente y también realizar un programa de adquisición específico. El capítulo finaliza con observaciones sobre el estado actual del prototipo.

El capítulo 8 contiene primero una síntesis de los resultados, luego mis conclusiones y por último la descripción de los trabajos a futuro.

El documento incluye tres apéndices. El apéndice A está asociado al repositorio de señales, imágenes y *scripts* [7]. En él explico la forma de procesar las señales. El apéndice B presenta algunos lineamientos básicos sobre cómo se podría avanzar hacia un sistema embebido y sobre la posibilidad de implementar una red de sensores inalámbricos. El apéndice C ilustra el funcionamiento de la plataforma de ensayos mediante un diagrama tomado de la documentación del proyecto.

Algunos de los capítulos mencionados se vinculan con las publicaciones en revistas que hice en el marco del Doctorado: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* [1] y *Memoria Investigaciones en Ingeniería* [2] y con las publicaciones derivadas de mis presentaciones en eventos: *URUCON 2021* [5], *Jornamet 2022* [4], *SEIA 2023* [3].

1.4. Revisión Bibliográfica

1.4.1. Características del Granizo

En Uruguay

Uruguay se encuentra en la región subtropical de Sudamérica, una de las regiones del mundo más afectadas por las tormentas graniceras [8]. Las características del granizo en Uruguay fueron estudiadas en [9] con fines estadísticos.

El Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET)¹ tiene publicados en su web boletines pluviométricos desde el año 2019 [10]. Además, realizó infografías que resumen los números de precipitaciones y temperatura del año 2022. Para la información relativa al granizo, se basa en la revisión de prensa y llamadas a las seccionales policiales donde se encuentran los pluviómetros de la Red Pluviométrica de INUMET, según informa en el reporte pluviométrico de agosto de 2019. En sus reportes se aclara que pueden haberse dado eventos de granizo sin registrar. En particular, en la región subtropical Sudamericana las tormentas graniceras suelen suceder durante la noche [8], lo que aumenta la probabilidad de que no sean observadas.

En la figura 1.3a, presento el resumen de eventos de granizo de 2022, tomado de la infografía de precipitaciones 2022 de INUMET. Se puede observar que nueve me-

¹www.inumet.gub.uy/

1.4. Revisión Bibliográfica

ses de ese año se presentó granizo, siendo julio el mes con más eventos acumulados, 79 en total. También se presenta la distribución de los eventos en el territorio. No obstante, este mapa guarda importantes similitudes con el de distribución poblacional (fig. 1.3b), por lo que es razonable suponer que en las zonas menos pobladas ocurrieran eventos de granizo sin ser observados. Elaboré dos gráficas a partir de los boletines pluviométricos disponibles. La primera muestra la cantidad de días con granizo por mes (fig. 1.4a), la segunda muestra la cantidad de eventos totales por mes² (fig. 1.4b). Dado que los eventos son sumamente localizados, un mismo día puede presentar varios eventos de granizo que se computan individualmente. En el día que más eventos de granizo se registraron en este periodo, se contabilizó un total de 45 eventos.

De las gráficas se pueden hacer las siguientes observaciones:

- En julio de 2020 no se reportaron eventos de granizo, siendo que en julio de otros años se reportaron varios.
- En 2020 fue el año con menos cantidad de reportes de granizo de los analizados. Esto puede deberse a que en situación de pandemia por covid-19 varios eventos no hayan sido reportados u observados.
- La presencia de granizo es más esperable entre junio y noviembre, aunque los únicos meses sin ningún registro de granizo en estos años son febrero, marzo, abril y diciembre.

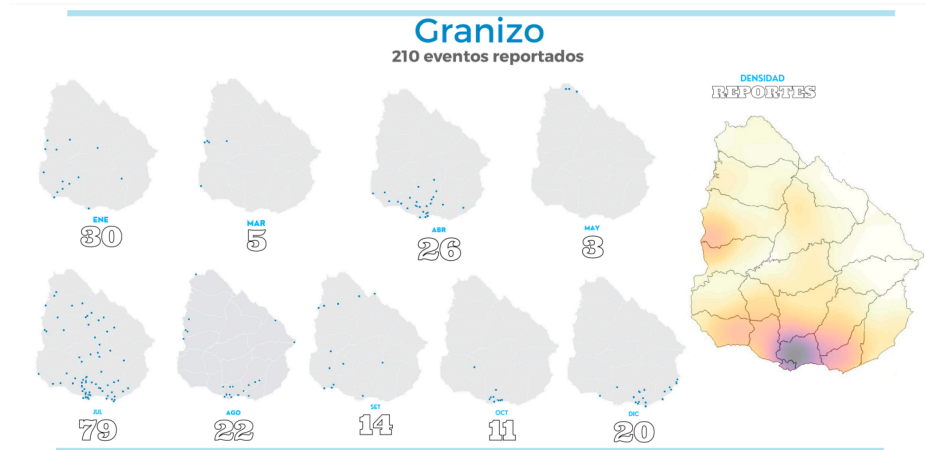
Formación de Granizo

Las piedras de granizo se forman cuando una “semilla” de granizo, por ejemplo una gota de agua, es elevada por las corrientes ascendentes en las tormentas convectivas, llegando a zonas de la atmósfera con condiciones propicias para el congelamiento. Dentro de la tormenta, las piedras de granizo crecen al colisionar con gotas, que se congelan sobre la superficie sólida. Se distinguen al menos dos tipos de granizo. Por un lado, si el agua se congela instantáneamente al colisionar, favorece la formación de granizo opaco, debido a las burbujas de aire que quedan atrapadas. En cambio, si el agua se congela lentamente, las burbujas de aire pueden escapar, favoreciendo la formación de granizo transparente. La piedra de granizo se precipita cuando la corriente ascendente ya no puede soportar su peso, ya sea debido al crecimiento de la piedra de granizo o a la debilitación de la corriente [12, 13].

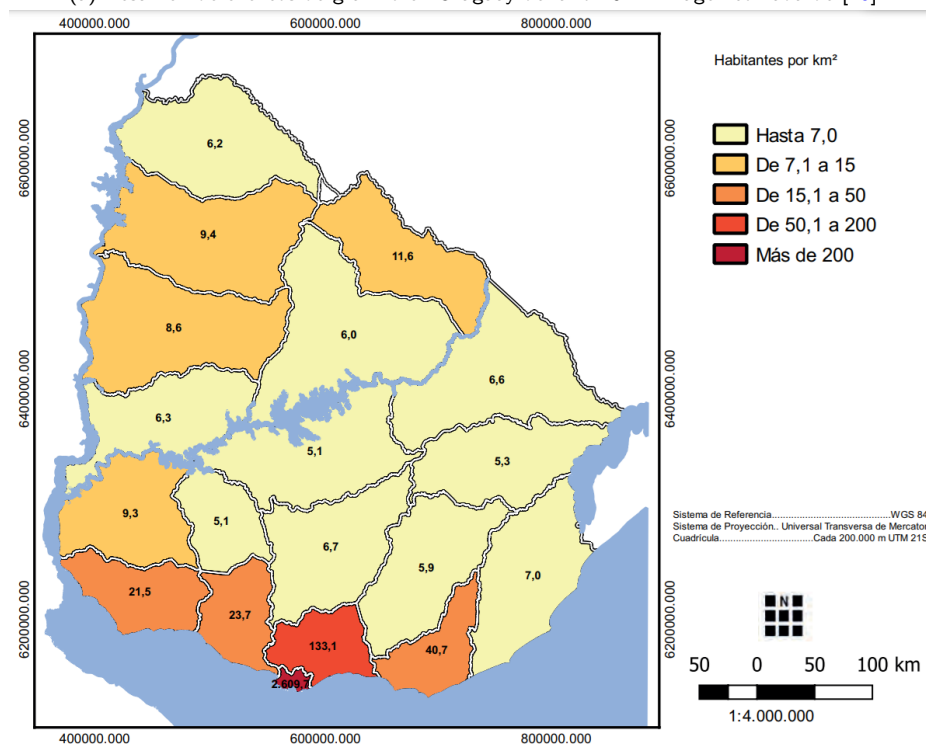
Las piedras de granizo pueden tener capas de hielo transparente y opaco en el caso de que encuentren distintas condiciones de temperatura y humedad a lo largo de su formación. Las corrientes de aire dentro de la tormenta trasladan a las piedras y además pueden hacerlas rotar. La formación de granizo requiere temperaturas

²Debí estimar la cantidad de eventos de granizo en junio y octubre de 2019. Para eso, se calculó la cantidad promedio de eventos por día de granizo en ese año y atribuí esa cantidad de eventos a cada día de granizo de los meses con datos faltantes.

Capítulo 1. Introducción



(a) Resumen de eventos de granizo en Uruguay del año 2022. Imagen tomada de [10].

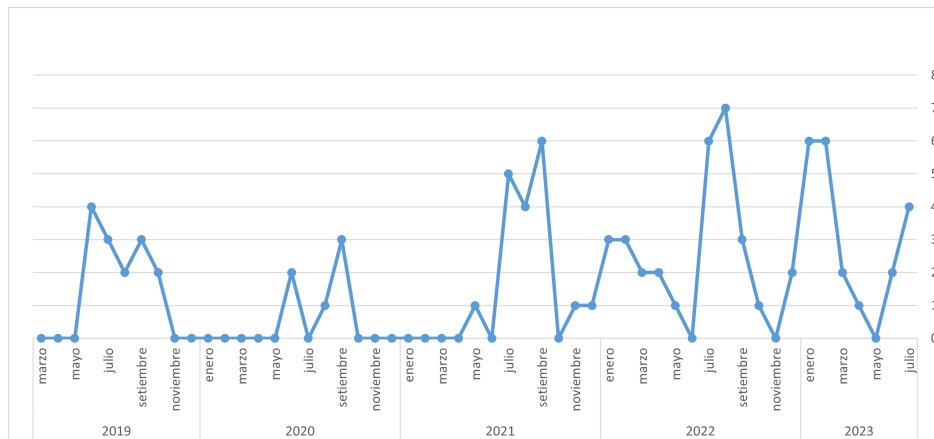


Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE) - Departamento de Infraestructura Geoestadística.

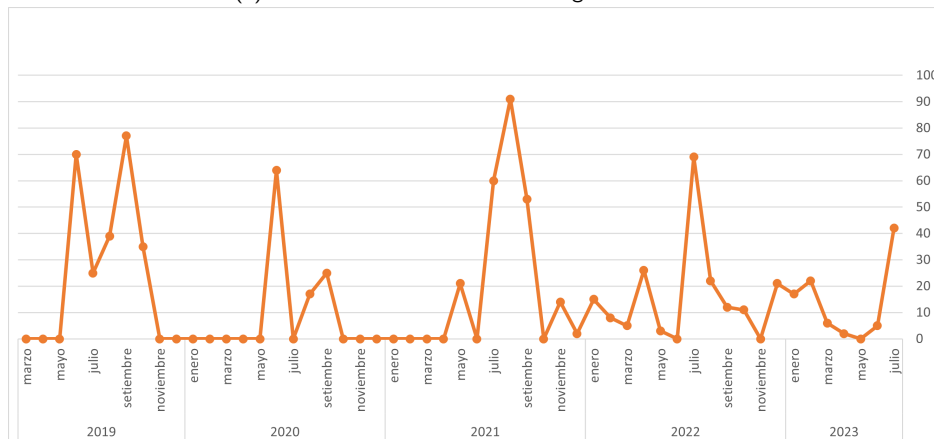
(b) Densidad poblacional en Uruguay en el año 2022. Imagen tomada de [11].

Figura 1.3: Síntesis de información sobre granizo en Uruguay en el año 2022 y densidad poblacional en el país.

1.4. Revisión Bibliográfica



(a) Cantidad de días de eventos de granizo al mes.



(b) Cantidad de eventos de granizo al mes.

Figura 1.4: Síntesis de información sobre granizo en Uruguay desde 2019, obtenida de boletines pluviométricos de INUMET.

bajas, pero no tanto como para que toda el agua de esa región de la atmósfera esté congelada.

Usualmente, las piedras de granizo más grandes caen más cerca de la región de corriente ascendente, porque las pequeñas pueden ser trasladadas fácilmente por vientos horizontales. A nivel del suelo, si los vientos cercanos a la superficie son suficientemente fuertes, el granizo puede incidir en ángulo con la superficie o incluso trasladarse paralelamente a la superficie.

Se considera piedras de granizo pequeñas a aquellas que tienen aproximadamente $0,5\text{ cm}$ de diámetro, mientras que las de aproximadamente 5 cm de diámetro se consideran grandes [14]. Excepcionalmente, puede haber piedras de casi 18 cm de diámetro [15].

Capítulo 1. Introducción

Velocidad y Energía

La velocidad de caída del granizo depende del tamaño de la piedra, su grado de derretimiento, la fricción entre ella y el aire y la velocidad y dirección del viento.

Típicamente en la investigación se modela a las piedras de granizo como esferas homogéneas de hielo con velocidades de caída muy altas. Esto es una aproximación rudimentaria a la realidad, siendo que estudios realizados por [16] con réplicas de piedras de granizo impresas en 3D suspendidas en un túnel de viento vertical demostraron que las piedras de granizo caen más lento que las esferas homogéneas de hielo. A rasgos generales, las piedras de granizo naturales tienen velocidades y energías según la tabla 1.1.

Tabla 1.1: Velocidades y energías esperadas en piedras naturales de granizo de distintos tamaños. Información de velocidades tomada de [16], unidades convertidas a las del Sistema Internacional. Energías calculadas considerando hipótesis típicas sobre el granizo.

Rango de diámetros (cm)	Rango de velocidades (km/h)	Rango de energías
0,5 a 2,5	15 a 40	0,5 mJ a 0,5 J
2,5 a 5	40 a 75	0,5 J a 15 J
5 a 10	75 a 120	15 J a 250 J

1.4.2. Daños Provocados por Granizo

Debido a los niveles de energía de impacto y el volumen de granizo descargado en poco tiempo, las tormentas graniceras provocan daños materiales (figura 1.5), así como a los animales y las personas.

[17,18] explican los daños por granizo en términos económicos. Entre los daños materiales se destacan los de los cultivos e invernaderos [19–21], los vehículos, las construcciones [22,23] y los paneles solares [24,25]. Los daños a personas y animales pueden ser mortales. Incluso pueden ocurrir daños materiales que devengan en riesgo de vida, tal es el caso cuando el granizo entra en las turbinas de los aviones [26,27].

El interés por la protección de cultivos es grande, ya que su afectación impacta directamente en la seguridad alimentaria y económica de las poblaciones. En Uruguay, el daño por granizo en los cultivos es un tema recurrente y que genera grandes pérdidas. [28] realizó un estudio exhaustivo en la afectación por granizo en cultivos de frutales de hoja caduca en Uruguay, destacando la importancia de elaborar estrategias para sobrellevar este fenómeno natural, destacando como positivas la diversificación geográfica y temporal de los cultivos. En [29,30] también presenta un estudio de los daños del granizo sobre cultivos en general. En [31] se presenta un estudio sobre los daños provocados por granizo sobre cultivos de trigo, maíz y soja, en [32] sobre cultivos de cebada, avena y canola, en [33] sobre cultivos de algodón. En general, se puede considerar que las tormentas graniceras con energía de impacto acumulada menor que $50 \frac{J}{m^2}$ son moderadas, las de $500 \frac{J}{m^2}$ son intensas y las de $1000 \frac{J}{m^2}$ son severas.

1.4. Revisión Bibliográfica



(a) Tomates. ©Creative Commons, Autoría de *Dwight Sipler* en [flickr.com](https://www.flickr.com/photos/dwightsipler/).



(b) Cortina. ©Creative Commons, tomada de [jenikirbyhistory.getarchive.net/media/roller-shutter-dents-hail-damage-ae4878](https://www.getarchive.net/media/jenikirbyhistory/roller-shutter-dents-hail-damage-ae4878).



(c) Invernadero. ©Creative Commons, Autoría de *Northfield.org (NCO)* en [flickr.com](https://www.flickr.com/photos/northfieldorg/).



(d) Parabrisas. ©Creative Commons, Autoría de *Wesley Fryer* en [flickr.com](https://www.flickr.com/photos/wesleyfryer/).

Figura 1.5: Fotografías de daños por granizo en distintos ámbitos.

1.4.3. Ventajas y Aplicaciones de Cuantificar Granizo

Ante una tormenta de granizo, se desea conocer sus tiempos absolutos de inicio y finalización o duración. Dentro de las características de interés de las piedras de granizo individuales, se encuentran: instante de impacto, punto de impacto, forma, tamaño, contenido de agua, densidad, dureza, estructura cristalina, velocidad de impacto, rotación al momento de impacto, energía de impacto y contenido de sustancias extrañas [16, 34–36]. Al medir algunas de estas variables, otras pueden calcularse exactamente, por ejemplo eso sucede con la terna inicio, finalización, duración. Otras de las características de interés guardan cierta correlación, por ejemplo el tamaño de las piedras y su energía.

Si bien podría haber algún interés en observar características de las piedras individualmente, es importante observar que nunca podría hacerse un muestreo exhaustivo, que estudiara de forma individual absolutamente todas las piedras descargadas en la tormenta sin pérdida de información por derretimiento, por lo que siempre se tendrá un muestreo. El interés de este trabajo se centra en obtener información de valor estadístico, relegando el interés en la información individual de las piedras. La información estadística podría observarse globalmente en la tormenta o en ventanas de tiempo para seguir la evolución del evento.

Capítulo 1. Introducción

Así, algunas variables de interés se traducen en el global a: frecuencia media de impactos por unidad de área, distribución de energías de impacto por unidad de área o volumen total de granizo.

Para simplificar el trabajo, otras de las variables las tomo como hipótesis de la misma forma que [14, 34, 37]. Por ejemplo, se modela las piedras de granizo como esferas homogéneas de hielo que alcanzan una velocidad terminal antes de impactar. Así se le llama a la velocidad que tiene la piedra de granizo en régimen, en el tramo final de su caída. Esto último implica que se toman hipótesis no sólo sobre las piedras de granizo, sino también sobre la atmósfera. En un futuro, sería conveniente incorporar hipótesis más realistas, como tener en cuenta que ni la atmósfera ni la piedra de granizo son homogéneas [38].

Existen otras dificultades para caracterizar granizo, de las cuales destaco las siguientes. Los eventos de granizo en un lugar específico son poco comunes. Además, son fenómenos muy localizados: sensores que se encuentran a cientos de metros entre sí pueden detectar situaciones significativamente distintas. Las hipótesis utilizadas, si bien son las que se manejan habitualmente, pueden diferir considerablemente de la realidad. La presencia de viento afecta la velocidad y el ángulo de incidencia de la piedra de granizo, a lo que se suma que una misma piedra pasa por regiones de viento variadas a lo largo de su trayectoria. Las piedras de granizo pueden rebotar o romperse al momento del impacto.

[39] destaca que el conocimiento respecto a la formación de las piedras de granizo y las propiedades resultantes no es suficiente aún. En el mismo trabajo, se sugiere que el cambio climático traerá cambios como tormentas graniceras más intensas.

Si bien el pronóstico de granizo es de gran interés, ya que permite anticiparse al peligro, evitando acercarse en el momento de riesgo y resguardando los bienes materiales previamente, también es un objetivo sumamente ambicioso y a largo plazo. Asimismo, la información instantánea del sensor permitiría alertar a la población de tormentas graniceras en curso. La utilidad de este tipo de alerta es para que la población se mantenga alejada de la zona de incidencia de granizo y del posible camino de la nube.

Algunas de las características que se desea pronosticar son el tiempo de inicio de la tormenta de granizo sobre el terreno, la intensidad máxima del granizo y la duración de la tormenta de granizo. El pronóstico de granizo puede hacerse principalmente mediante el análisis de las condiciones dinámicas atmosféricas que favorecen su formación. Es necesario tener mayor cantidad de información objetiva y observaciones de periodos prolongados [39, 40]. En la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay (FIng - UdelaR) un grupo del Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) desarrolló exitosamente un sistema de alerta temprana de inundaciones para el departamento de Durazno, Uruguay [41, 42] y tiene interés en desarrollar un sistema equivalente para alertas de granizo. Docentes de dicho instituto dirigieron un trabajo sobre ensayos de sistemas de protección contra el granizo [43]. Para desarrollar un sistema de alerta eficaz para granizo, es necesario generar una base de datos objetiva, como la que se tiene para lluvias. Existen antecedentes de modelos de pronóstico de granizo modernos

en el mundo, por ejemplo [44] describe un modelo usado en EEUU desde 2014, que actualmente utiliza algoritmos de *machine-learning* junto con un modelo físico que se perfecciona cada año. Los algoritmos de *machine-learning* tienen una cobertura sumamente localizada, no pudiendo generalizarse para otras partes del mundo.

La protección de cultivos redundaría de forma sumamente beneficiosa para los productores rurales. Debido a que algunos bienes deben estar habitualmente a la intemperie, existen elementos móviles de protección contra granizo, como por ejemplo mallas [43]. En el caso de más sencilla operación, estas tecnologías pueden ser automáticas [45]. Es necesario saber cuándo operar estos elementos: en el caso de los elementos manuales, se requiere un pronóstico que permita proteger los bienes materiales sin exponer a las personas al riesgo de la tormenta. Los elementos automáticos tienen la ventaja de que podrían accionarse en el momento ante la detección de granizo.

Para la protección de vehículos, existen fundas especiales para quienes deben dejarlos a la intemperie [43]. En el caso de los paneles solares, existen normas internacionales como la *IEC 612215* (europea). Una buena caracterización local del granizo permitiría evaluar la adecuación de las normas a territorios particulares y conocer mejor los niveles de protección requeridos y la probabilidad de daño en caso de no cumplirse con tales niveles.

Tener mejores herramientas para el análisis de granizo también es de interés de las compañías que ofrecen seguros contra granizo para el sector productivo, ya sea invernaderos y cultivos [46–48], pero incluso les serviría la mejora de la calidad de información sobre los eventos de granizo luego de sucedidos [49, 50].

1.4.4. Formas de Recabar Información sobre Granizo

Dado que el estado del arte de las técnicas para obtener información sobre el granizo es base para mi trabajo, desarrollo esta información en la sección 2.1. En este espacio, proporciono un resumen muy breve sobre los tipos de técnicas.

La forma más básica de recabar información sobre granizo se basa en la observación directa. Por lo general las entidades que utilizan esta estrategia lo hacen como esfuerzo colectivo, formando redes de observadores [16, 39, 51]. Es una técnica con limitaciones humanas y de exposición a riesgos [15]. Esta es la técnica utilizada actualmente en Uruguay por INUMET [10].

Desde mitad del siglo pasado, se toman medidas indirectas de granizo utilizando sensores básicos. El más común es el *hailpad*, que es muy sencillo de implementar, pero requiere análisis por parte de personal calificado y es de un solo uso [14, 34, 37, 50, 52–54]. Otros sensores clásicos funcionan por recolección de granizo o con circuitos electromagnéticos básicos, que graban información en cintas de papel o magnéticas [34]. Algunos sensores más modernos recaban información de manera automática, son de principio acustoeléctrico y procesan señales generadas por el impacto de granizo [55–60]. Existen pocos modelos comerciales de sensores de granizo automáticos [61–66]. Al inicio de esta tesis, no se encontró información sobre dispositivos comerciales de este tipo, sin embargo en este momento hay al menos tres empresas que los ofrecen. Esto muestra la actualidad de esta tecnología

Capítulo 1. Introducción

de sensores y la importancia de la comprensión de su funcionamiento. Otras formas de medida indirecta incluyen cámaras de alta velocidad [16], radar de polarización dual [16, 39, 67–69], imágenes satelitales [34] y fotos tomadas por drones [70].

1.4.5. Calibración de Sensores de Granizo

Desde la creación del *hailpad*, su calibración ha sido ampliamente estudiada [71]. Varios de los métodos y observaciones son aplicables a la calibración de los sensores acustoeléctricos, debido a que se enfocan en las características del granizo y la atmósfera.

Para calibrar los sensores, es necesario generar impactos equivalentes a los de la piedra de granizo natural, dado que se requieren impactos de características conocidas, en el momento y lugar precisos. El uso de piedras de granizo naturales presenta problemas en cuanto a la obtención de las piedras y la conservación de las mismas para el momento del ensayo. Es una gran dificultad atinarle al sensor de granizo soltando las piedras desde grandes alturas, que permitan alcanzar las velocidades de impacto de interés. Si bien [14, pág. 27] lo intenta, la tasa de éxito es muy baja (7 de 60 proyectiles) y la repetitividad inviable.

Existen dos técnicas ampliamente aceptadas: el lanzador neumático de hielo y soltar un proyectil que impacte con energía equivalente a la de una piedra de granizo. A esta última técnica se le llama típicamente *Energy Matching*, por lo que es el nombre con el que se la referirá a lo largo del texto. Existen otras técnicas menos difundidas, como el sistema de ensayos con motor presentado por [25] que hace girar bolas para que impacten sobre un objetivo a ensayar.

El lanzador neumático de hielo consiste en disparar esferas de hielo con un lanzador de aire comprimido (similar en aspecto a una *bazooka*). Tiene las ventajas de que permite utilizar piedras de granizo recolectadas o artificiales y que el ensayo puede llevarse a cabo en una habitación de tamaño regular. Tiene desventajas, al igual que la técnica de ensayos con motor, en cuanto a su baja de precisión y repetitividad frente a las necesarias para calibrar un sensor acustoeléctrico. El lanzador neumático fue utilizado para ensayar con granizo artificial y alimentar modelos de simulación de impactos de granizo para estudiar el impacto sobre aeronaves [26, 27, 72], plantaciones [33], paneles solares [24] y para estudiar las fuerzas de contacto de las piedras de granizo con la superficie de impacto [73]. En FIng - UdelaR, se construyó una herramienta de este tipo [43] para ensayar protecciones contra granizo. La técnica de *Energy Matching* es ampliamente utilizada [14, 15, 37, 54, 71, 74]. Por ser la elegida para los ensayos y la calibración de mi sensor, la explico detalladamente en la sección 2.2.

1.4.6. Incorporación a Estación Meteorológica

Para entender mejor la física y la dinámica de la ocurrencia de granizo, es necesario contar con información meteorológica complementaria sobre el estado de la atmósfera.

1.4. Revisión Bibliográfica

Sería sumamente interesante integrar el sensor de granizo a las estaciones meteorológicas gestionadas por INUMET (indicadores rojos y verdes en la figura 1.6³). Esto permitiría vincular la información brindada por el sensor de granizo con la de información de otras variables climáticas, obtenida de forma profesional (temperatura, presión atmosférica, dirección e intensidad del viento, humedad relativa y lluvias). Además, simplifica la instalación del sensor, porque se podría aprovechar infraestructura física y de comunicación ya existente.

En la etapa de evaluación del sensor de granizo, es más propicio incorporarlo a las estaciones *convencionales* (indicadores rojos), ya que estas cuentan con personal y sería posible contrastar sus observaciones respecto al granizo con las medidas del sensor. En una etapa más avanzada, incorporar el sensor de granizo a las estaciones *automáticas* (indicadores verdes) dotaría a estas estaciones de una nueva capacidad, ya que actualmente no detectan granizo [75].

Mapa de estaciones

Se presenta la ubicación espacial de las estaciones convencionales y automáticas que constituyen la Red Pluviométrica Nacional y la Red Meteorológica Nacional.

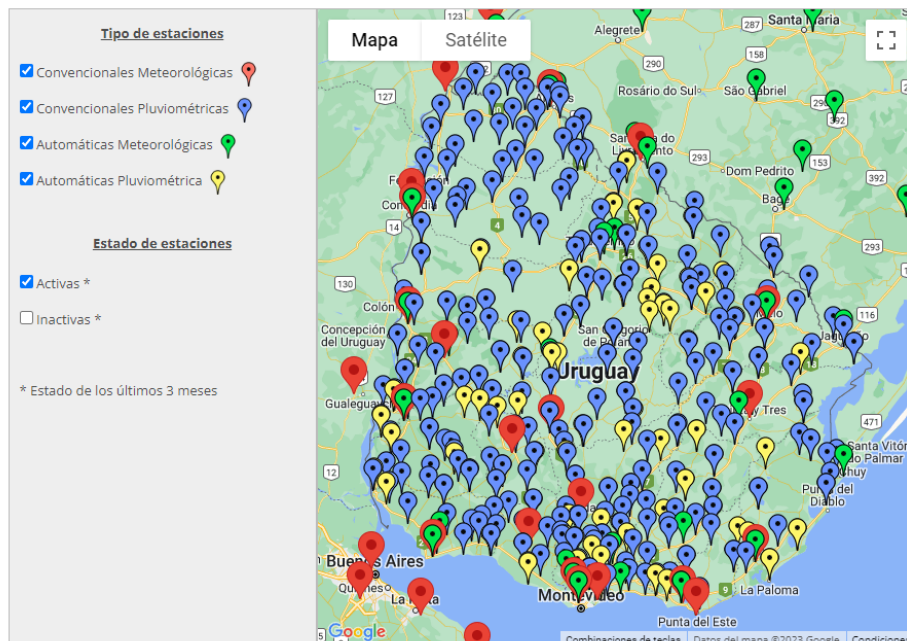


Figura 1.6: Estaciones meteorológicas en Uruguay. Imagen extraída de [10]. La red de estaciones pluviométricas es más densa que la de estaciones meteorológicas debido a la mayor variabilidad espacial del fenómeno lluvia frente a otros fenómenos meteorológicos.

En conversación con la comunidad de meteorólogos de INUMET en *Jornamet 2022*, manifestaron interés por que la información del sensor pudiera ser incorporada al Protocolo de Alerta Común (CAP) [76]. Se trata de un formato digital para intercambiar alertas de emergencias de forma consistente para diseminar simultáneamente a través de distintos medios de comunicación. Permite generar

³inumet.gub.uy/clima/recursos-hidricos/mapa-de-estaciones

Capítulo 1. Introducción

alertas para una región geográfica objetivo, ya que divide la tierra en polígonos sin fronteras políticas, aumentando la probabilidad de que la población objetivo reciba el mensaje. El protocolo maneja objetos en el formato de intercambio de información JSON [77], que agrupan pares clave-valor. INUMET está camino a emitir alertas en formato CAP [78].

El planteo de incorporar el sensor de granizo a estaciones ya existentes tiene la desventaja de que la ubicación fue determinada sin contemplar particularmente el interés por las medidas de granizo. La distancia entre estaciones meteorológicas e incluso entre las pluviométricas desplegadas en Uruguay (fig. 1.6) no permite realizar un estudio espacial exhaustivo sobre el granizo, aún si se instalaran sensores en cada una de las estaciones existentes. Para hacer un estudio exhaustivo del granizo en una región, sería necesario desplegar una red específica de sensores de granizo. [79–82] proponen diseños de estaciones meteorológicas en la que las variables auxiliares se miden con sensores más simples.

A continuación explico brevemente algunas variables de interés y las suposiciones que se pueden hacer sobre ellas y su forma de medida habitual. Todas las variables atmosféricas a considerar serán a la intemperie, en condiciones realistas, considerando los casos extremos. A priori, el sensor se utilizará en Uruguay, por lo que hago un estudio sobre las medidas que realiza INUMET, tomando como referencia especialmente sus informes de Climatología Estacional que abarcan el periodo 1981-2010 y sus boletines posteriores [10]. En caso de que se vaya a utilizar en países con climas extremos, se debería verificar que el sensor seleccionado sea adecuado.

Temperatura

INUMET mide la temperatura del aire a 1,5 m sobre el nivel del suelo con césped corto, a resguardo de la radiación solar. La temperatura mínima absoluta en Uruguay fue de -8°C en Mercedes en el año 1993 (*Climatología del Invierno*), mientras que la máxima absoluta fue de $44,0^{\circ}\text{C}$ en Florida en 2022 (*boletín, infografía de temperaturas del año 2022*). Las temperaturas medias para el Uruguay son de $17,5^{\circ}\text{C}$.

Humedad

La variable de interés en este caso es la *humedad relativa*, que en Uruguay varía en el rango de 20% a 100% y corresponde a la cantidad de vapor de agua que puede contener una masa de aire relativa a la temperatura que está. Cuando la humedad relativa alcanza el 100%, la masa de aire está saturada y comienza el proceso de condensación.

Presión atmosférica

Corresponde a la presión que ejerce la atmósfera que rodea a la Tierra sobre todos los objetos que se hallan en contacto con ella. La presión atmosférica disminuye con la altitud. INUMET mide la presión atmosférica con barómetros de

1.4. Revisión Bibliográfica

mercurio, al abrigo de la radiación solar, y calcula su valor equivalente al nivel medio del mar. En Uruguay, la presión atmosférica promedio es de 1013 hPa .

Viento

Interesa medir la velocidad y dirección del viento en superficie. Particularmente, las tormentas graniceras suelen ser más dañinas cuando hay presencia de vientos intensos en superficie [46]. En la figura 1.7 se pueden observar las ocho direcciones básicas conformadas por los cuatro puntos cardinales y los cuatro puntos laterales. En Uruguay, predominan los vientos del sector *NE* al *E*, con velocidades del orden de 4 m/s en la mayoría del territorio y 7 m/s sobre la costa suroeste. Son relativamente frecuentes los vientos superiores a 30 m/s .

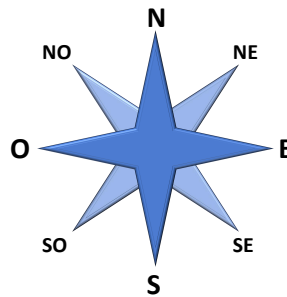


Figura 1.7: Rosa de los vientos. N: norte, S: sur, E: este, O: oeste, NE: noreste, SE: sudeste, NO: noroeste, SO: sudoeste.

Lluvia

INUMET mide las precipitaciones a $1,5 \text{ m}$ sobre el nivel del suelo con un pluviómetro, contabilizando las precipitaciones sólidas junto con las líquidas. Las precipitaciones son medidas en más de 300 estaciones pluviométricas de la Red Pluviométrica Nacional y son acumuladas diariamente. La precipitación acumulada media anual está habitualmente entre los 1000 mm y los 1500 mm .

Pensando en incorporar la medida de las variables meteorológicas de interés al sensor de granizo en los casos en que no se dispone de medidas de estaciones meteorológicas ya establecidas, hice un estudio de mercado para escoger sensores comerciales. Una opción económica para una primera etapa de pruebas es el sensor *Grove-Barometer Sensor BME 280*⁴, que mide temperatura, humedad y presión. La empresa que lo fabrica proporciona una librería para Arduino que lo hace muy sencillo de usar. Puede comunicarse mediante protocolos I2C o SPI, que son estándar y ampliamente difundidos. Se alimenta a $3,3 \text{ V}$ o 5 V . Mide presión entre 300 y 1100 hPa con una precisión de $\pm 1,0 \text{ hPa}$. Mide temperatura entre -40°C y

⁴wiki.seeedstudio.com/Grove-Barometer_Sensor-BME280/

Capítulo 1. Introducción

85°C con una precisión de $\pm 1,0^\circ\text{C}$. Mide humedad relativa entre 0% y 100% con una precisión de $\pm 3\%$.

Adicionalmente, se podría incorporar un pluviómetro óptico, como el *RG-15*⁵. Estos sensores utilizan luz infrarroja para contabilizar las precipitaciones que impactan en su superficie. Esta es una opción moderna de relevamiento de precipitaciones, más robusta que los sensores mecánicos.

Debido a que los anemómetros resultaron ser los sensores comerciales más costosos, hice también un relevamiento de soluciones académicas para implementar un anemómetro. Para medir la velocidad del viento, [79] propone utilizar un motor DC con aspas conectadas al eje, mientras que [83] propone utilizar las aspas con un imán y un Reed Switch, que detecta campo magnético. [84] propone la utilización de sensores de ultrasonido, lo cual tiene la ventaja de que puede realizarse en 3 ejes, para incluir también la dirección del viento. [83] presenta un sensor de dirección con una veleta que se mueve solamente en el plano horizontal y mediante un potenciómetro se determina su posición complemento a su sensor de velocidad. [85] propone usar un módulo con brújula compuesto por un sensor magnético de tres ejes. [86] diseñó una cavidad resonante que incorpora ocho barritas piezoeléctricas para medir velocidad y dirección del viento. Además, el despliegue de redes de sensores meteorológicas simples es un tema estudiado en [87]. Al diseño de estas redes, se les podría incorporar el sensor de granizo en cada nodo.

1.4.7. Redes de Sensores

Desde que se inventó el *hailpad* se han desplegado redes de este dispositivo alrededor del mundo [36, 54, 88–91], típicamente con varias decenas de nodos cada una.

El principal motivo por el que es interesante que los sensores de granizo funcionen en red es que, al querer medir un evento sumamente localizado, el área de cobertura estadística de cada dispositivo es pequeña en comparación con otros sensores meteorológicos. Relacionado a esto, tener una red densa de sensores de granizo permite estudiar los patrones espaciales dejados por el granizo [92]. En [88] se presenta un método para estimar el área de cobertura estadística de los sensores de granizo.

Una opción muy interesante sería incorporar los sensores de granizo a la solución de [45] para proteger cultivos del granizo. Esta solución utiliza Raspberry Pi⁶, que debido a su gran capacidad podría utilizarse de forma compartida para los sensores y el sistema de protección y se comunica mediante ZigBee [93] dentro de la red y mediante WiMAX [94] a internet.

⁵rainsensors.com/products/rg-15/

⁶raspberrypi.com

Capítulo 2

Técnicas de Medición de Granizo

2.1. Formas de Recabar Información sobre Granizo

2.1.1. Estrategias basadas en Observación de Muestras

La observación directa de muestras de granizo es una práctica habitual de caracterización, que no requiere de sensores. Se basa en la recolección y observación de piedras de granizo por parte de las personas: habitualmente, son los residentes de las áreas afectadas quienes reportan su apreciación sobre los eventos. Esto se ha gestionado en todo el mundo mediante comunicación telefónica primero y mediante web o aplicaciones para celular más recientemente [39]. Uno de los problemas en cuanto a calidad de la información obtenida es que estas muestras suelen ser recolectadas luego de avanzado su derretimiento, por lo que pierden masa y su forma se suaviza. También el agua derretida llena espacios vacíos dentro de la piedra, afectando la densidad [15]. Si bien se intenta realizar una selección aleatoria de muestras, se tiende a seleccionar la piedras de mayor tamaño y a ignorar aquellas que se rompieron en el impacto. Por otro lado, hay información, como la estructura cristalina (figura 2.1) de las piedras de granizo, que sólo se obtiene mediante la recolección.

[16] describe un proyecto que recolectó datos sobre granizo entre 2006 y 2015 mediante llamadas telefónicas a hogares que se vieron expuestos a tormentas graniceras. También presenta una aplicación gratuita para celular, llamada mPING¹, que recibe información meteorológica por parte de la población. La información es usada para mejorar algoritmos de radar para detectar granizo.

La red *CoCoRaHS*² [51] celebra en 2023 sus 25 años recolectando información sobre precipitaciones en EEUU, incluyendo granizo, gracias al reporte voluntario vía internet de miles de colaboradores.

[95] describe el proyecto *Alert.ar*, que funcionó en Argentina impulsado por la Universidad de Buenos Aires, para reportar eventos meteorológicos.

¹Actualmente disponible en *Google Play* Uruguay.

²cocorahs.org

Capítulo 2. Técnicas de Medición de Granizo



Figura 2.1: Foto de granizo en la que se pueden apreciar distintas estructuras cristalinas. ©Creative Commons 2.0, Autoría de *Woodleywonderworks* en [flickr.com](https://www.flickr.com/photos/woodleywonderworks/).

En Uruguay, INUMET elabora Boletines Pluviométricos [10] utilizando reportes de observación directa.

2.1.2. Sensores

Contar con sensores permite obtener información sin interacción de personas con el granizo. La información obtenida siempre es parcial y depende del tipo de sensor.

Sensores Clásicos

Por sensores clásicos me refiero a aquellos que no requieren electricidad para funcionar o se basan en circuitos eléctricos simples, sin procesamiento de señales. [34] es la referencia principal para los sensores clásicos y divide a los sensores en *integradores* y *grabadores*.

Los sensores *integradores* solamente aportan información global sobre la tormenta. El más básico y utilizado es el *hailpad*. Se trata de un cuadrado de espuma de poliestireno de 20 a 60 cm de lado, envuelto en hoja de aluminio (figura 2.2a). Se los coloca al menos a 30 cm del nivel del suelo [14]. Luego de cada evento de granizo, cada *hailpad* debe ser recolectado y analizado por personal capacitado para interpretar las marcas dejadas por el granizo. A partir de las marcas, se estima el diámetro de las piedras y la energía cinética en el momento de impacto. De acuerdo con [34], en este instrumento se pueden reconocer impactos de piedras de granizo con diámetros mayores a 1 mm. Estos dispositivos funcionan adecuadamente como indicador de la ocurrencia de granizo y dada su sencilla construcción, es posible instalar varias unidades para cubrir el área de interés. Tienen la desventaja de ser de un solo uso y en caso de ser sometidos a más de una tormenta

2.1. Formas de Recabar Información sobre Granizo

de granizo, los eventos son indistinguibles. Además, las marcas podrían solaparse, resultando en pérdida de información. La colocación, mantenimiento y extracción de la información requieren una importante cantidad de trabajo humano.

El *hailpad* se popularizó debido a su sencilla construcción [14] y la difusión de cómo calibrarlo y analizarlo [37, 50, 52, 53]. Las formas de analizar los *hailpads* al principio fueron completamente observacionales, pero con el avance de la tecnología, se propusieron técnicas de procesamiento de imágenes por computadora [54] que facilitan el trabajo de los investigadores.

El *hailpad* presenta algunas variantes. Una de ellas es el *hail stool*, que adiciona un cuerpo cilíndrico vertical de los mismos materiales que el *hailpad*, el cual permite calcular el ángulo de incidencia, para lo que es necesario un análisis riguroso. Otra variante es el *hail cube* (figura 2.2c), que tiene un *hailpad* horizontal y otros cuatro verticales, orientados hacia cada punto cardinal. Da información sobre la componente horizontal de la velocidad, pero multiplica los costos y tiempos de análisis. Finalmente, el *hail-wind detector* consiste de un *hailpad* en forma de ‘U’ (figura 2.2b) que tiene secciones marcadas cada 15° . Tiene como ventaja que la incidencia es siempre en la dirección del viento, pero son más frágiles.

[34] también reporta sensores clásicos que graban información temporal gracias a circuitos eléctricos y magnéticos básicos que mueven motores. Uno de estos sensores consiste en un balde con un sistema de pesaje adaptado de un sistema de medida de lluvia, modificado para activarse con piedras de granizo en su lugar. Cuando cae una piedra, mueve un brazo con una lapicera que deja marcas en una gráfica dependiente del tiempo.

Otro sensor consiste en un colector que separa el granizo de la lluvia (figura 2.3a). En su versión más básica, simplemente acumula los volúmenes generados durante una tormenta, pero se lo puede dotar de un mecanismo que registra el volumen de cada piedra de granizo, mediante desplazamiento de agua y una cámara de 35 mm.

Existen sensores con una placa receptora circular, de diámetro 36 cm y un motor que funciona a batería y se activa con el movimiento de la placa y mueve un rodillo a velocidad constante para grabar desplazamiento vertical en una cinta (figura 2.3b). Pueden grabar hasta 3 eventos de granizo de 10 minutos de duración. Detecta adecuadamente piedras de diámetro mayor a 1 cm. Brinda información sobre cantidad de impactos y tiempos, pero es sensible a vientos fuertes y requiere mucho mantenimiento.

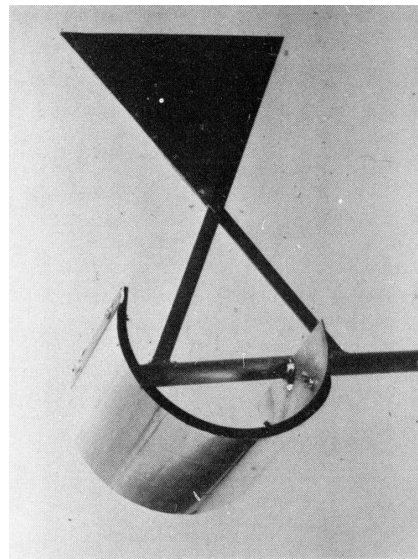
El *geophone hailgage* consiste en una placa de diámetro 15 cm que transfiere impactos y torque a una gran masa, unida a un transductor de velocidad. Hay un circuito electrónico que funciona a baterías y recibe un pulso eléctrico de amplitud proporcional al torque. Tiene varias ventajas, como que aporta información sobre tamaño, cantidad y tiempo y cubre un rango razonable de torques verticales. Es un sensor antiguo (anterior a 1976), por lo que no aprovecha la tecnología disponible actualmente.

[16] utilizó cámaras de alta velocidad de adquisición para capturar imágenes de piedras de granizo de gran tamaño en caída natural, para confirmar las estimaciones de características de caída de esas piedras. También desarrolló un algoritmo

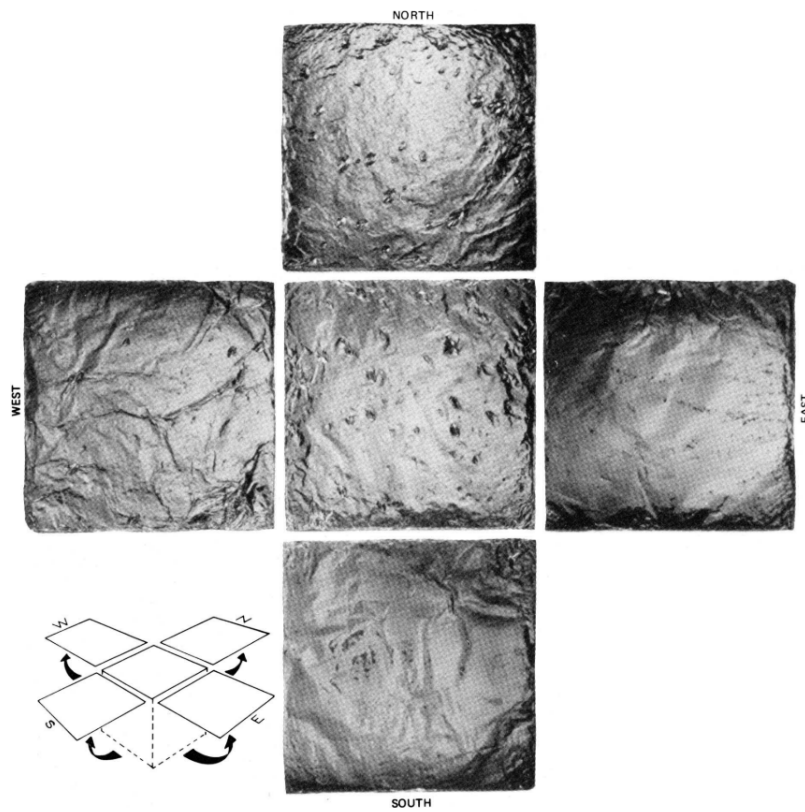
Capítulo 2. Técnicas de Medición de Granizo



(a) *Hail pad*. Imagen tomada de [14] ©Creative Commons.



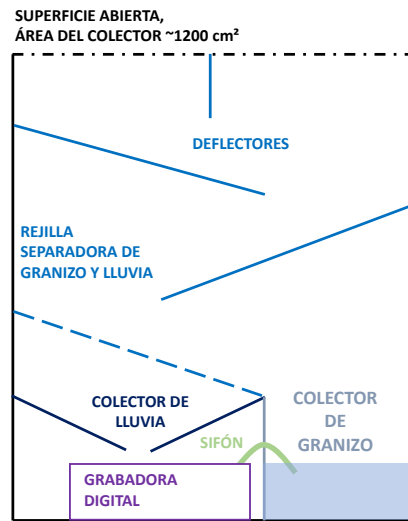
(b) *Hail pad con forma de 'U'*. Imagen tomada de [34] ©Published 1976 by the American Meteorological Society.



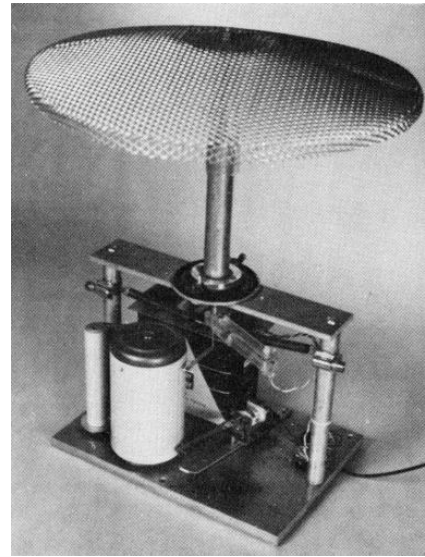
(c) *Hail cube con marcas de granizo*. Imagen tomada de [34] ©Published 1976 by the American Meteorological Society.

Figura 2.2: Ejemplos de sensores clásicos.

2.1. Formas de Recabar Información sobre Granizo



(a) Sensor que separa lluvia y granizo, con capacidad de registro temporal. Imagen redibujada a partir de [34].



(b) Sensor basado en el péndulo balístico. Imagen tomada de [34]. ©Published 1976 by the American Meteorological Society.

Figura 2.3: Ejemplos de sensores que graban información.

para clasificar hidrometeoros, que utiliza radares de polarización dual. Este método, que es capaz de distinguir entre gotas de lluvia grandes y granizo, permite hacer predicciones en el corto plazo.

Los radares de polarización dual se presentan como una opción para la detección del granizo y la estimación de sus daños en superficie [39, 67–69]. Permiten estimar el tamaño del granizo, mediante diversos modelos que se seleccionan según la zona de estudio y las condiciones dinámicas atmosféricas. La adquisición e instalación del radar tiene un alto costo asociado. Su principal ventaja es la cobertura de áreas amplias, pero como el punto de detección es en la capa de nubes, siendo que el proceso de formación y crecimiento del granizo es sumamente complejo, puede suceder que se detecte granizo en formación en regiones sobre las que finalmente no precipita. Además, la resolución del radar puede ser insuficiente cuando se busca obtener información detallada. Sería interesante disponer al mismo tiempo de información de radar y de sensores de granizo en superficie, ya que la información de ambos se complementa y los sensores de granizo contribuyen a la calibración del radar.

Existen soluciones basadas en satélites [34], que tienen la desventaja de que la relación de granizo en las nubes con el granizo que alcanza la tierra en una determinada región es débil.

Una forma de recabar información sobre el granizo a posteriori es utilizar imágenes tomadas desde un dron [70]. Tiene la ventaja de ser un método exhaustivo en cuanto al área afectada, pero requiere trabajar de manera inmediata a la culminación de las tormentas, requiriendo condiciones propicias para volar el dron. En el artículo citado, se miden las piedras de granizo, pero para ello se requiere un

Capítulo 2. Técnicas de Medición de Granizo

terreno homogéneo que contraste en color con las piedras de granizo, por ejemplo césped cortado, y que el tamaño de las piedras sea mayor que 20 mm, debido a la resolución de la cámara y que la densidad de muestras sea baja, de forma tal que se encuentren dispersas en terreno. Sería especialmente interesante complementar la información obtenida mediante el sensor de granizo diseñado con imágenes obtenidas por drones. Por ejemplo, sensores como el que propongo en este trabajo permitirían conocer el momento ideal para tomar fotografías aéreas.

Para calibrar los métodos más globales, como el Radar, el satélite y el análisis de condiciones dinámicas atmosféricas que favorecen la formación de granizo, es necesario contar con medidas adecuadas a nivel de suelo, lo que hace necesario el despliegue de sensores de granizo a nivel de suelo [39].

Sensores Acustoeléctricos

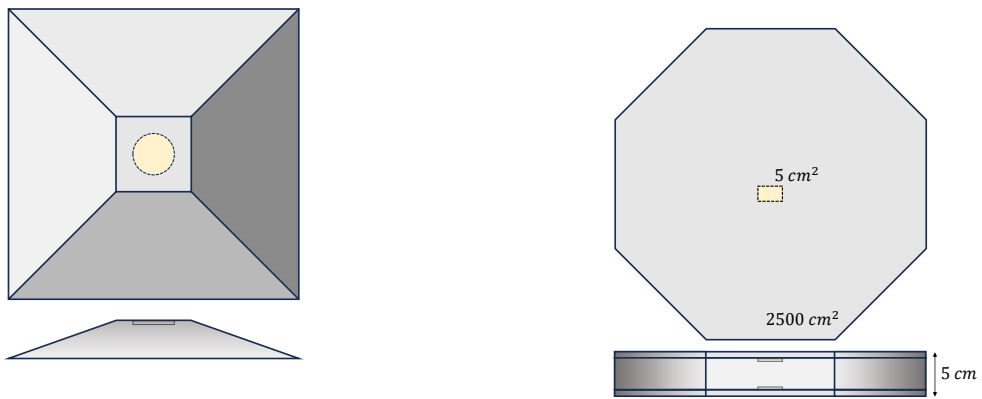
Los sensores acustoeléctricos comenzaron a desarrollarse en este siglo y son el estado del arte. Se trata de sensores que tienen un cuerpo principal, que vibra cuando es golpeado por una piedra de granizo. Las vibraciones son convertidas a señales eléctricas por uno o varios sensores acustoeléctricos, habitualmente transductores piezoeléctricos.

La NASA presentó un sensor acustoeléctrico en el marco de sus investigaciones [55–57] para monitorear la zona de lanzamientos espaciales. Utiliza un único disco piezoeléctrico adosado a una estructura de metal (no especificado) hueca de forma pseudo piramidal, como se muestra en la figura 2.4a. La estructura funciona como cavidad acústica. El impulso del impacto se convierte a un único impulso eléctrico. La forma está pensada para que el granizo rebote hacia fuera del sensor. Gracias al espectro en frecuencia de los impulsos eléctricos, puede distinguir entre una piedra de granizo y una gota de lluvia. El tamaño del sensor tiene un compromiso entre ser suficientemente grande como para detectar una cantidad significativa de impactos, pero no ser tan grande como para que la integración de las vibraciones producidas por la lluvia interfiera con la detección de granizo.

Otra línea de trabajo es la de [96], basada en el sensor HARE [58], cuyo diseño básico se patentó en [59]. El sensor HARE tiene dos placas octagonales de igual área, dispuestas en paralelo como en la figura 2.4b, cada una con un transductor piezoeléctrico colocado en el centro. Cuenta con un sistema embebido, con una memoria interna accesible a través de un conector USB. Fue testado utilizando un lanzador neumático, dispositivo que se describe más adelante en este capítulo. La descripción del HARE explica que el transductor superior entrega una señal de voltaje proporcional al impulso de la piedra mientras que el transductor inferior entrega una señal proporcional a la energía de la piedra. La cavidad acústica, conformada por los octágonos, está hecha de policarbonato, habiendo evaluado también teflón, PVC expandido y plexiglas. La elección de utilizar un plástico fue para obtener buena atenuación de la señal. Destacan del material seleccionado que tiene buena protección del clima y resistencia UV. De las elecciones asociadas a la electrónica, las que más destacan son el uso de una frecuencia de muestreo de 20 kHz, un microcontrolador de la familia de los MSP430 de Texas Instruments [97] con un ADC de 16 bits con voltaje de referencia 12 V para evaluar las señales

2.1. Formas de Recabar Información sobre Granizo

eléctricas y la alimentación mediante un panel solar con batería. Indican un tiempo de detección de 10 ms para las piedras más grandes (peor caso). Tienen mejor precisión para las piedras grandes que para las más pequeñas. Buscan detectar *potencial de daño de los impactos*. Distingue entre gotas de lluvia, piedras de granizo y copos de nieve mediante análisis frecuencial: cuanto más denso y duro el objeto que impacta al sensor, el espectro de la señal se encuentra en frecuencias más altas. En caso de saturación, descarta la ventana temporal saturada y se queda con una ventana posterior de la señal. Esto puede ser un problema, porque las altas frecuencias se extinguen más rápido que las bajas frecuencias, por lo que el espectro se ve afectado.



(a) Sensor desarrollado por la NASA. No se reportan las medidas exactas.

(b) Sensor HARE.

Figura 2.4: Croquis de las cavidades acústicas de los sensores de granizo acustoeléctricos reportados en la bibliografía, indicando la ubicación de los transductores. Para cada uno, se presenta vista superior y lateral.

Un diseño totalmente distinto pero también acustoeléctrico es el de [60], que patentó un sensor acustoeléctrico basado en cuerdas o elementos similares colocadas de forma paralela y aproximadamente equidistantes. Cada cuerda tiene que tener al menos un conversor analógico a digital. La diferenciación entre granizo y lluvia se hace por la mayor probabilidad de la lluvia de pasar entre las cuerdas sin tocarlas. Propone utilizar un sistema embebido con una unidad de memoria o de procesamiento.

Uno de los desafíos de los sensores acustoeléctricos es distinguir el granizo de la lluvia. [57] plantea que el espectro en frecuencia de la lluvia es más plano que el del granizo.

Sensores Acustoeléctricos Comerciales

En los últimos años aparecieron en el mercado algunos sensores de granizo comerciales, de principio acustoeléctrico. La aparición tan reciente de estos sensores muestra que el desarrollo de sensores de granizo se encuentra en auge. La

Capítulo 2. Técnicas de Medición de Granizo

mayoría de los sensores que menciono en esta sección salieron al mercado durante el desarrollo de esta tesis.

Aproximadamente en 2015, la empresa *Vaisala* comenzó a comercializar sensores que tienen dentro de sus posibilidades medir granizo. La Serie *WXT530* (figura 2.5e) indica en su hoja de datos [61] que los sensores de esta serie que miden precipitaciones tienen la capacidad de medir la cantidad acumulada de granizo en términos de golpes contra una superficie colectora. Si bien este modelo tiene una cierta capacidad de medir granizo, no se enfoca en eso, lo que se nota en el mismo resumen de la hoja de datos, en la que no aparece como una funcionalidad destacada, si bien es probablemente la menos común de sus funcionalidades.

Desde 2020 se encuentran disponibles en el mercado los sensores de granizo *HailFlow HF4*, *ISAW* (figura 2.5a) [63] y *HDI*, *Sommer* (figura 2.5b) [62]. Las mismas empresas ofrecen también sensores de lluvia *RainFlow RF4*, *ISAW* (figura 2.5c) [65] y *RHD*, *Sommer* (figura 2.5d) [66]. Debido al parecido físico y a las características reportadas para los sensores de ambas empresas, es razonable suponer que un mismo fabricante las provee a ambas y ellas simplemente comercializan. Una diferencia clara entre los modelos específicos para lluvia y los específicos para granizo es la forma de la superficie colectora, que oficia de cavidad acústica y es una semiesfera en el caso de los sensores de lluvia y un disco de acero de 20 cm de diámetro en el caso de los de granizo. En cuanto a sus especificaciones, estos sensores también son sumamente parecidos, por lo que parece que ambas empresas ofrecen productos iguales.

En primer lugar, ambos sensores de lluvia pueden detectar granizo. La hoja de datos del *RainFlow* indica que solamente cuenta el número total de impactos de granizo. La hoja de datos del *RHD* indica lo mismo, especificando que puede contar hasta 5 impactos por segundo, de piedras mayores que 0,5 cm.

Los sensores diseñados específicamente para granizo, *HailFlow* y *HDI*, tienen mayores prestaciones. Ambos pueden contar impactos por segundo, indicando promedio y desviación estándar, así como el número total de impactos. Lo más interesante es que puede indicar el porcentaje de piedras de granizo en distintas clases. Las clases consideradas son respecto al diámetro de las piedras de granizo, dividiéndose el rango de 5 a 75 mm en 14 categorías uniformes, más una categoría para las piedras de diámetro mayor a 75 mm, que saturan al instrumento. No puede detectar piedras menores a 5 mm de diámetro. *HDI* especifica además que el límite de impactos que puede contar es 25 por segundo.

En 2022 comenzó a comercializarse *HailSens IoT*, *Kisters* (figura 2.5f) [64], que tiene como cavidad acústica un disco de policarbonato de 50 cm de diámetro. Mide energía cinética, de 0,01 J a 28 J, a partir de ella estima diámetro de la piedra de granizo, entre 5 y 50 mm. No detecta piedras de diámetro inferior a 5 mm. Este es el sensor desarrollado por [96].

2.1. Formas de Recabar Información sobre Granizo



(a) *HailFlow*. Imagen tomada de [63].



(b) *HDI*. Imagen tomada de [62].



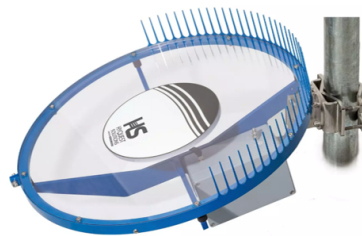
(c) *RainFlow*. Imagen tomada de [65].



(d) *RHD*. Imagen tomada de [66].



(e) *Vaisala*. Imagen tomada de [61].



(f) *Hailsens IoT*, sensor usado por [96]. Imagen tomada de [64].

Figura 2.5: Sensores acustoeléctricos comerciales, imágenes de catálogos.

2.2. Energy Matching

En esta sección, describo la técnica que elegí para la simulación de impacto de granizo [2, 5].

2.2.1. Objetivo

La técnica de *Energy Matching* es una estrategia para simplificar la calibración de los sensores de granizo. Un objetivo es replicar el fenómeno de los impactos de granizo sin necesidad de piedras de granizo reales ni sintéticas. Otro objetivo es reducir la altura de la que deben soltarse los proyectiles, simplificando los ensayos.

2.2.2. Descripción General e Hipótesis

La técnica consiste en soltar un proyectil que impacte con energía equivalente a la de una piedra de granizo. La figura 2.6 contiene un diagrama explicativo en el que se representan todas las variables involucradas.

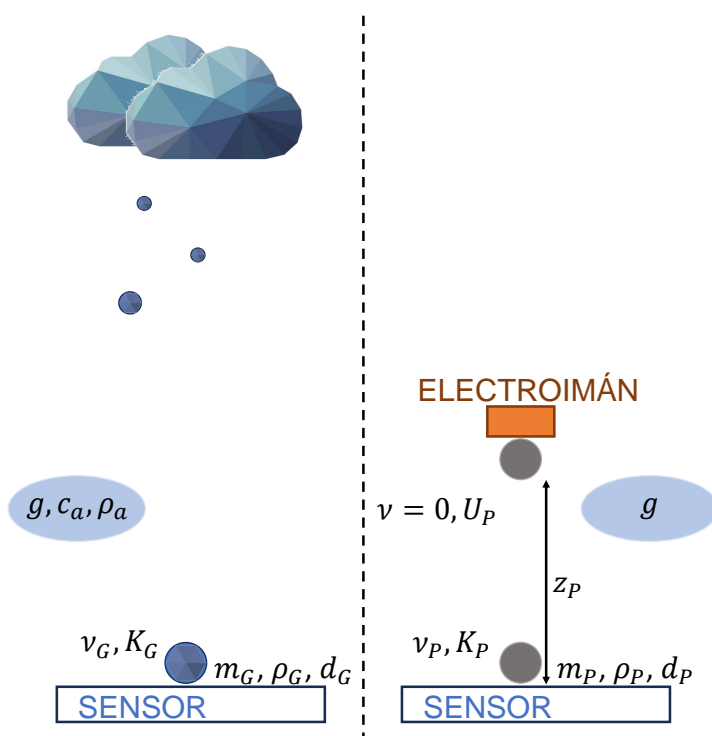


Figura 2.6: Diagrama explicativo de la técnica de *Energy Matching*. El eje punteado divide las dos situaciones. A la izquierda: piedra de granizo natural de masa m_G , densidad ρ_G y diámetro d_G impactando con el sensor a velocidad v_G con energía K_G . A la derecha: proyectil sustituto, de masa m_P , densidad ρ_P y diámetro d_P impactando con el sensor a velocidad v_P con energía K_P al caer desde una altura z_P , desde el reposo, donde tenía energía U_P . En el caso de la izquierda, además de la aceleración gravitacional g se consideran el coeficiente de arrastre del aire, c_a y la densidad del aire ρ_a . En el caso de la derecha sólo actúa g .

Hipótesis sobre las Piedras de Granizo

- Son esferas homogéneas de hielo (sección 1.4.1).
- Son duras y no se desintegran al momento del impacto [37]. Esta es una hipótesis habitual pero débil, ya que gran parte de las piedras de granizo se rompen, por lo que podría mejorarse utilizando el enfoque de [73].

Hipótesis sobre la Interacción con la Atmósfera

- Las piedras de granizo alcanzan una velocidad terminal antes de impactar con el sensor, o sea que la ecuación cinemática de la piedra de granizo incluye la resistencia del aire, representada por un coeficiente de arrastre del aire no nulo. Este coeficiente se supone constante, más allá de que en realidad depende de múltiples factores, atmosféricos y de forma de la piedra de granizo.
- El proyectil sustituto tiene un recorrido suficientemente corto como para despreciar totalmente la resistencia del aire y suponer que la energía del proyectil se conserva. Entonces, la energía cinética iguala en todo momento a la energía potencial gravitatoria consumida.

Material

Habitualmente se elige el acero como material para el proyectil sustituto, debido a su densidad, que permite lograr la equivalencia de energías soltando los proyectiles desde alturas accesibles. Además, el acero presenta los siguientes beneficios: tiene gran resistencia a los impactos, por lo que los proyectiles son reutilizables; es ferromagnético, lo que permite soltarlo con velocidad nula desde una posición exacta utilizando un electroimán; se pueden utilizar bolas de rodamiento, que tienen alta disponibilidad comercial, vienen justamente el formato requerido para los ensayos, son sometidas a controles de calidad que dan garantías en su constitución y su precio es sumamente accesible. Por estos motivos, también elegí el acero como material para mis proyectiles de calibración.

Valores de los Parámetros

En la tabla 2.1 se resumen los valores de los distintos parámetros bajo las hipótesis mencionadas [37, 71].

Igualar Diámetro del Proyectil y la Piedra

Una restricción que suele agregarse es que el diámetro del proyectil sea el mismo que el de la piedra de granizo que replica. Si bien esta práctica tiene más sentido para la calibración de *hailpads*, en los que justamente se mide el diámetro de la marca dejada por la piedra de granizo, es conveniente también para la calibración de sensores acustoeléctricos, porque reduce el número de variables al lograr un área de contacto más parecida a la de una piedra de granizo real (suponiendo que

Capítulo 2. Técnicas de Medición de Granizo

Tabla 2.1: Valores elegidos para los parámetros de *Energy Matching*.

Símbolo	Valor	Significado
g	$9,81 \frac{m}{s^2}$	aceleración de la gravedad
ρ_G	$0,9 \frac{g}{cm^3}$	densidad del granizo
ρ_a	$1,1 \times 10^{-3} g/cm^3$	densidad de la atmósfera
ρ_P	$7,8 g/cm^3$	densidad del proyectil de acero
c_a	0,6	coeficiente de arrastre del aire

la piedra de granizo no se rompe). Igualar el diámetro del proyectil y la piedra mejora el análisis frecuencial de las señales, debido a que se logran estímulos más parecidos en área de contacto que cuando no se tiene esta precaución. El área de contacto es un factor importante en la excitación de ondas de distintas frecuencias.

A lo largo de esta tesis trato el área de impacto como si fuera nula (contacto puntual), aunque es evidente que no es esa la realidad. Por un lado, ensayos con bolitas de acero colocando papel carbónico para marcar el punto de impacto muestran que la misma bolita deja una marca de mayor área cuanto mayor es su energía de impacto. Por otro lado, existen estudios en este aspecto utilizando piedras de granizo artificiales [73], que podrían contemplarse como trabajo futuro.

2.2.3. Ecuaciones

En esta sección presento las ecuaciones que se usan para calcular la altura desde la que se debe soltar el proyectil sustituto para impactar con la misma energía que la de una piedra de granizo del mismo diámetro, basándome en [14, 32, 71]. El significado de las variables se presentó en la figura 2.6.

Como la energía del proyectil sustituto se conserva, su energía cinética al momento del impacto (K_P), que imponemos que sea igual a la de la piedra de granizo (K_G), es igual a la diferencia de energía potencial gravitatoria entre el punto inicial y el punto de impacto del proyectil (U_P) (ecuación (2.1)).

$$K_G = K_P = U_P \quad (2.1)$$

Considerando que la piedra de granizo alcanzó su velocidad terminal, K_G se calcula mediante la ecuación (2.2). Como la piedra de granizo es esférica, su masa m_G se calcula mediante la ecuación (2.4).

$$K_G = \frac{1}{2} m_G v_G^2 \quad (2.2)$$

$$K_P = \frac{1}{2} m_P v_P^2 \quad (2.3)$$

$$m_G = \rho_G \frac{\pi}{6} d_G^3 \quad (2.4)$$

Para el proyectil sustituto, calculamos U_P y su masa mediante las ecuaciones (2.5) y (2.6) e imponemos la igualdad de diámetros, d , mediante la ecuación (2.7).

2.2. Energy Matching

$$U_P = m_P g z_P \quad (2.5)$$

$$m_P = \rho_P \frac{\pi}{6} d_P^3 \quad (2.6)$$

$$d = d_G = d_P \quad (2.7)$$

Planteando el diagrama de cuerpo libre de la figura 2.7 sobre la bola de granizo que cae a velocidad terminal, se igualan las dos fuerzas y se despeja la velocidad terminal, obteniendo la ecuación (2.8).

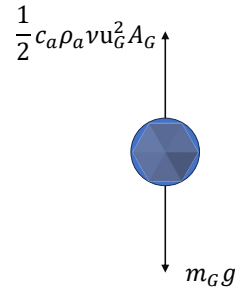


Figura 2.7: Diagrama de cuerpo libre para una piedra de granizo a velocidad terminal. Fuerza ascendente ejercida por el aire: c_a : coeficiente de arrastre del aire, ρ_a : densidad del aire, v_G : velocidad terminal del granizo, A_G : área horizontal de la piedra de granizo, al ser una esfera $A_G = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi$. Fuerza descendente ejercida por la gravedad: m_G : masa de la piedra de granizo, g : aceleración gravitatoria.

$$v_G = \left(\frac{4 \rho_G g d_G}{3 \rho_a c_a} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.2) y (2.5) en la ec. (2.1) se obtiene la ec. (2.9). Sustituyendo las ecuaciones (2.4) y (2.6) en la ec. (2.9) y aplicando la ec. (2.7), se puede despejar la altura z_P de la que debe soltarse el proyectil en función de la velocidad terminal v_G de la piedra de granizo que se simula (ec. (2.10)). Finalmente, de sustituir la ecuación (2.8) en la ec. (2.10), se obtiene z_P en función del diámetro d , que es tanto el de la piedra de granizo como el del proyectil. La relación obtenida es lineal.

$$\frac{1}{2} m_G v_G^2 = m_P g z_P \quad (2.9)$$

$$z_P = \frac{\rho_G v_G^2}{2 \rho_P g} \quad (2.10)$$

$$z_P = \frac{2}{3} \frac{\rho_G^2}{\rho_a \rho_P c_a} d \quad (2.11)$$

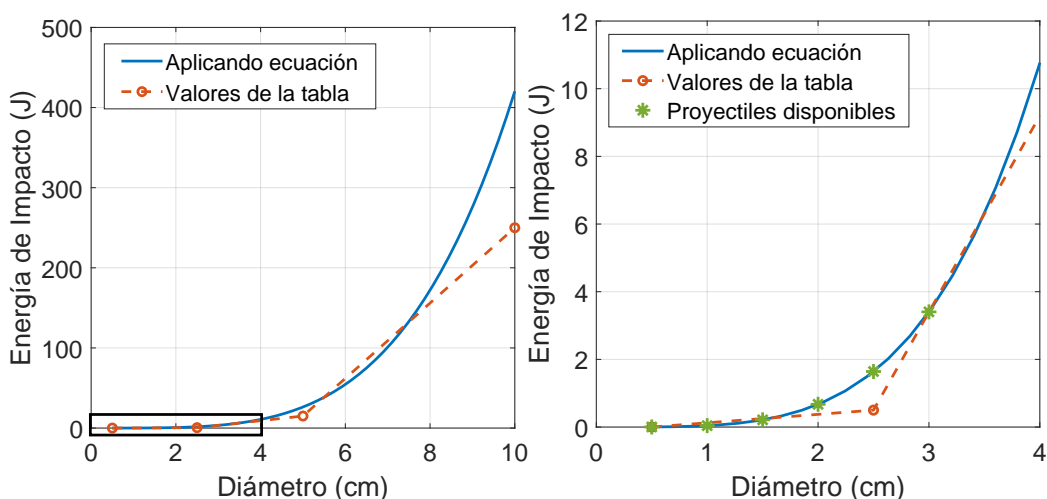
2.2.4. Comentarios

Proyectiles Adquiridos

En la tabla 2.2 se presentan los diámetros de los proyectiles de acero adquiridos, la altura desde la que deben soltarse para lograr *Energy Matching* y las energías asociadas. La máxima energía será de $3,4 J$, que se logra soltando un proyectil de $3,0 cm$ de diámetro desde una altura de $3,15 m$. En la figura 2.8 comparo la energía obtenida mediante la ecuación (2.2) con los rangos de energía reportados en [47]. Observar que ambas curvas coinciden razonablemente hasta el punto en que las piedras de granizo tienen un diámetro de aproximadamente $8 cm$. Luego, la ecuación (2.2) devuelve resultados bastante mayores que los reportados en [47]. Un motivo razonable es que las hipótesis se alejan de la realidad a medida que el tamaño de las piedras aumenta (hipótesis sobre la forma, la homogeneidad, la densidad y el coeficiente de arrastre del aire sobre la piedra de granizo).

Tabla 2.2: Diámetros de proyectiles adquiridos (bolas macizas de acero), altura de la que deben ser soltados para lograr *Energy Matching* y energía con la que impactan en ese caso.

Diámetros (cm)	Altura para <i>Energy Matching</i> (m)	Energía
0,5	0,52	2,6 mJ
1,0	1,05	42 mJ
1,5	1,57	213 mJ
2,0	2,08	672 mJ
2,5	2,62	1,64 J
3,0	3,15	3,40 J



(a) Comparación en todo el rango de diámetros reportados por [47]. (b) Acercamiento a las curvas en el rango de diámetros ensayado (recuadro negro de (a)).

Figura 2.8: Comparación de curvas de energía de impacto según el diámetro de la piedra de granizo. Curvas elaboradas a partir de la ecuación (2.2) y los datos de la tabla 1.1 [47].

Levantando Restricción de Igualdad de Diámetros

Si bien esta técnica hace accesibles las alturas desde las que debe soltarse el proyectil sustituto, al imponer la igualdad entre d_P y d_G se necesitan recintos de techos altos y elaborar una técnica para soltar los proyectiles sustitutos desde la altura. La forma de evitar este problema, manteniendo el material elegido dadas las ventajas adicionales que presenta, es levantar la restricción de la igualdad de diámetros. En tal caso, al tirar proyectiles del mismo diámetro desde distintas alturas, la energía varía linealmente ((2.5)), mientras que al soltar proyectiles de distinto diámetro desde la misma altura, la energía varía de forma cúbica con el diámetro, como se muestra en la ecuación (2.12) que se obtiene de sustituir la ec. (2.6) en la ec. (2.5).

$$U_P = \rho_P \frac{\pi}{6} d_P^3 g z_P \quad (2.12)$$

Relaciones más Complejas

Es posible considerar relaciones más complejas, que no abordaré en este trabajo, pero podrían mejorar el desempeño del sensor. Por ejemplo, [98] considera cambios en el coeficiente de arrastre.

Dispositivo Auxiliar para *Energy Matching*

Mediante ensayos preliminares, identifiqué la necesidad de contar con un dispositivo auxiliar para implementar el *Energy Matching* de forma de tener suficiente control sobre el punto de impacto y la altura del que se suelta el proyectil como para realizar ensayos repetitivos. Profundizo este tema en la sección 4.2.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 3

Adquisición y Procesamiento de Señales Acústicas

3.1. Adquisición de Señales

3.1.1. Transductores Piezoeléctricos

Los transductores elegidos para convertir las vibraciones debidas al impacto a señales de voltaje son piezoeléctricos. Particularmente, utilizo *diafragmas piezoeléctricos* (figura 3.1) que consisten en un disco fino de bronce con una capa de cerámica PZT (material piezoeléctrico compuesto por *titanato zirconato de plomo*). Uno de los mayores proveedores de este tipo de transductor es *Murata*¹. Evalué los modelos presentados en la tabla 3.1, que fueron utilizados en [99].

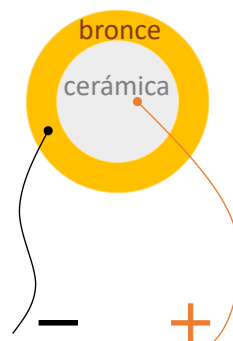


Figura 3.1: Diafragma piezoeléctrico.

Este tipo de transductor funciona por efecto piezoeléctrico (figura 3.2), ya sea directo o inverso. En el efecto directo, una deformación en el disco genera una diferencia de potencial entre los electrodos. En el efecto inverso, la aplicación

¹murata.com

Capítulo 3. Adquisición y Procesamiento de Señales Acústicas

de una diferencia de potencial entre los electrodos genera una deformación en el disco. En este caso, el efecto que se utiliza es el primero. Una alternativa posible a los transductores piezoeléctricos son las láminas de de un material termoplástico llamado *Fluoruro de Polivinilideno* (PVDF) [100–102].

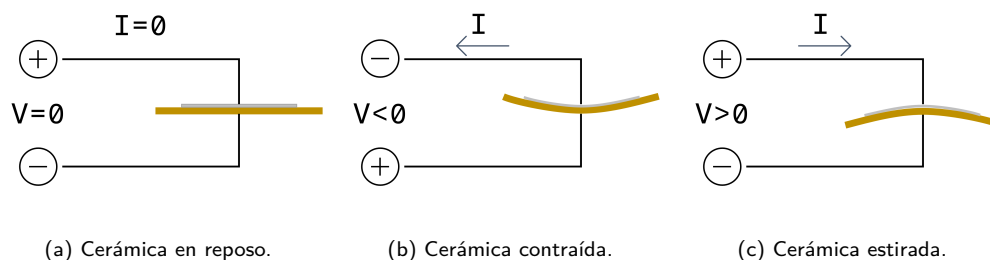


Figura 3.2: Diafragma piezoeléctrico, distintos casos.

Tabla 3.1: Transductores piezoeléctricos considerados.

Modelo	Frecuencia de resonancia f_r (kHz)	Diámetro de la placa (mm)	Diámetro de la cerámica (mm)	Espesor de la cerámica (mm)
7BB-12-9	9	12	9	0,22
7BB-20-67BB-20-6	6,3	20	14	0,42
7BB-35-3	2,8	35	25	0,53

En [103] se encuentran las ecuaciones constitutivas de los piezoeléctricos y en [104, sec. 3.3] se encuentra más información sobre piezoelectricidad.

Las características principales de estos transductores son su tamaño y su frecuencia de resonancia, que se relacionan inversamente: cuanto más grandes son, la frecuencia de resonancia es más baja (tabla 3.1). La frecuencia de resonancia siempre es menor que la frecuencia de corte (f_c) del transductor, por lo que el transductor puede trabajar con frecuencias por encima de la de resonancia. Una característica importante en este trabajo es que los transductores de menor tamaño brindan mejor resolución espacial.

3.1.2. Digitalización

Para pasar las señales generadas por los transductores piezoeléctricos a la computadora, es necesario digitalizarlas [105, cap. 4]. Esto es tomar las señales analógicas $v(t)$, de valores reales continuos en el rango de trabajo de los piezoeléctricos y representarlas digitalmente, mediante secuencias de palabras formadas por ceros y unos (*bits*). Este es el objetivo del Conversor Analógico a Digital, ADC. A continuación, listo algunos conceptos clave.

- Frecuencia de muestreo (f_s), es la cantidad de muestras de la señal analógica que se adquieren por segundo.

3.1. Adquisición de Señales

- Espectro de una señal, representa la distribución de energía de la señal en las distintas frecuencias. En la sección 4.1 presento ejemplos del espectro en frecuencia de las señales adquiridas en los ensayos de diseño del sensor.
- Frecuencia de Nyquist (f_N), es la máxima frecuencia del espectro de la señal analógica que se puede representar dada f_s . El teorema de Nyquist indica que es la mitad de f_s , relación presentada en la ecuación (3.1).
- Tiempo de muestreo (t_s), corresponde al tiempo entre muestras. Es el inverso de f_s .
- Ventana temporal (ΔT), es el tiempo durante el que se adquiere una señal. No necesariamente se corresponde con la duración de la señal de voltaje analógica.
- Resolución en frecuencia (δf) corresponde al mínimo salto de frecuencias que se puede distinguir. Es el inverso de ΔT . Se relaciona con f_s y L mediante la ecuación (3.2).
- Largo de la señal (L), corresponde a la cantidad de muestras que forman una señal. Se relaciona con t_s y ΔT mediante la ecuación (3.3). En la sección 5.2.3 explico más sobre la elección del largo de la señal y el método de disparo de las adquisiciones.
- Rango de entrada (ΔV), es la diferencia entre el máximo y el mínimo voltaje a representar.
- Número de bits (N) de la palabra digital, corresponde a la cantidad de ceros y unos que forman una palabra.
- Resolución en voltaje (δV) es el mínimo salto de voltajes que se puede distinguir. Cumple con ΔV y N la relación de la ecuación (3.4).

$$f_N = f_s/2 \quad (3.1)$$

$$\delta f = f_s/L \quad (3.2)$$

$$\Delta t = L t_s \quad (3.3)$$

$$\delta V = \frac{\Delta V}{2^{N-1}} \quad (3.4)$$

La figura 3.3 describe el proceso de digitalización. La señal $v(t)$ a la entrada del proceso representa a la señal de voltaje que se genera en bornes de los electrodos de un piezoeléctrico. La etapa de acondicionamiento depende de la relación entre $v(t)$ y las características del ADC. En la sección 3.1.2 explico cómo es la etapa que utilicé. El muestreo y retención consiste en tomar el valor de la señal cada instante que corresponde y mantenerlo fijo mientras que se realiza la conversión. Para la etapa de conversión analógico a digital existen distintos sistemas, que explico en la sección 3.1.2. A la salida de la conversión, se tiene una palabra digital por cada punto muestreado. La secuencia de palabras digitales es la señal digital, que en este caso se almacena y se continúa procesando.

Capítulo 3. Adquisición y Procesamiento de Señales Acústicas

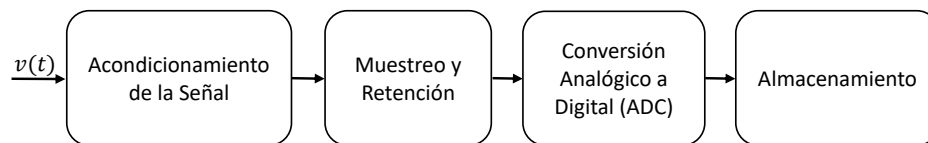


Figura 3.3: Proceso de digitalización de señales. En este caso, $v(t)$ es la señal en voltaje generada por un piezoeléctrico.

Conversor Analógico a Digital

Existen diversos tipos de conversores Analógico a Digital, ADC [106]. Los más convenientes para esta aplicación son el de aproximaciones sucesivas (SAR) o el $\Delta - \Sigma$. Otros, como los *Flash* y *Pipelined* (Conversores Flash en cascada) son sumamente rápidos, pero comprometen la resolución (suelen trabajar con menor número de bits (N) por palabra). Los Doble Rampa son demasiado lentos.

En cuanto a los tipos de medida, pueden ser: referida a tierra (*single-ended*), diferencial o pseudo-diferencial.

En la medida referida a tierra, el sistema de conversión tiene únicamente una entrada por canal y mide cada entrada con respecto al valor de referencia (tierra) del circuito. Tanto la medida pseudo-diferencial como la diferencial requieren de dos entradas por canal. En la figura 3.4, en la que la adquisidora se representa con el bloque ADC, la entrada positiva se llama $IN+$ y la negativa $IN-$.

Tanto en la medida diferencial como en la pseudo-diferencial, el conversor mide la diferencia entre $IN+$ e $IN-$ [107, sec. 9.3.3]. En la medida pseudo-diferencial (figura 3.4c), el voltaje en $IN-$ es un valor constante que se impone mediante una fuente v_{ref} , idealmente en el punto medio entre los voltajes de alimentación de la adquisidora, $+V_{cc}$ y $+V_{cc}$. El voltaje en $IN+$ corresponde a la señal a medir montada en v_{ref} . En la medida diferencial, el sistema está diseñado para medir $IN+$ e $IN-$ referidas al valor de modo común (v_{CM}) de la señal, por lo tanto ambas entradas varían simétricamente con respecto a v_{CM} .

Tarjeta Adquisidora Utilizada

La tarjeta adquisidora es la que realiza las etapas de “Muestreo y Retención” y “Conversión Analógico a Digital” de la figura 3.3.

En este trabajo, utilicé dos tarjetas adquisidoras de laboratorio. La *NI USB6210* [108] la utilicé en los ensayos preliminares. Una vez diseñada la cavidad acústica del sensor, utilicé la *NI USB6009* [109]. Las características principales de ambas se resumen en la tabla 3.2. El sensor que diseñé requiere de dos canales diferenciales y seleccioné una frecuencia de muestreo de 20 kHz para cada uno.

En la sección B.1.2 analizo la sustitución de la *NI USB6009* por una opción más económica para una futura implementación del sensor.

3.1. Adquisición de Señales

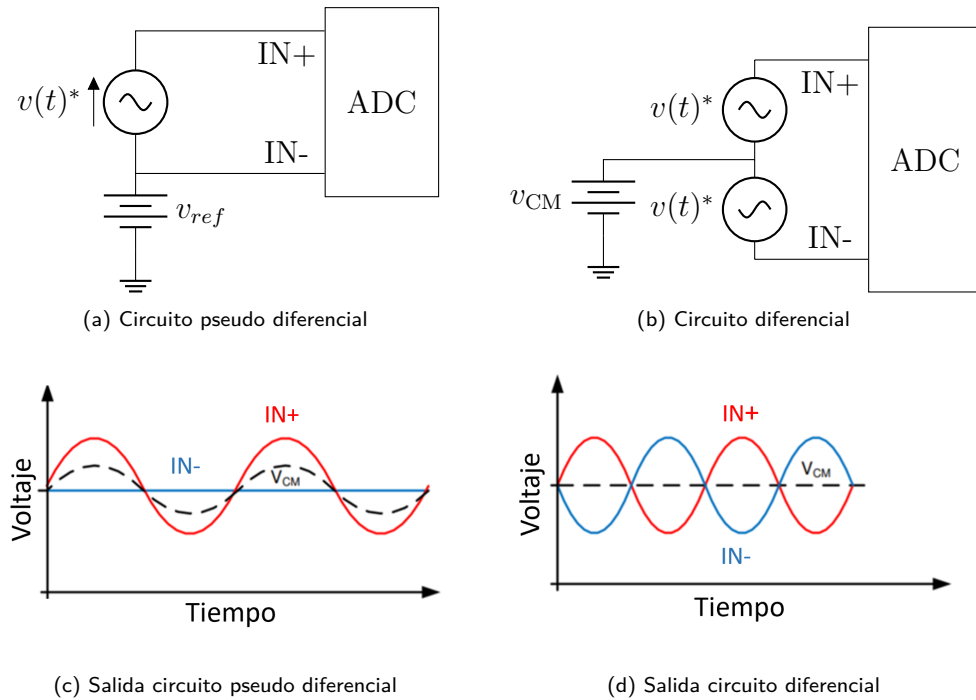


Figura 3.4: Ejemplos de conexiones y medidas pseudo-diferenciales y diferenciales.

Tabla 3.2: Características principales de las tarjetas adquirentes de marca *National Instruments* utilizadas en este trabajo.

Modelo	NI USB6009	NI USB6210
Tipo de convertor	Registro de Aproximaciones Sucesivas (SAR)	
Entradas analógicas diferenciales	4	8
Número de bits (N)	14	16
Velocidad (kSa/s multiplexados entre todos los canales)	48	250
Relación de Rechazo al Modo Común (CMRR) (dB)	100	
El menor rango de entrada	$\pm 1 V$	$\pm 0,2 V$
Mayor rango de entrada	$\pm 10 V$	
Impedancia de entrada	$144 k\Omega$	$> 10 G\Omega, 144 pF$
Precio aproximado (USD)	650	1200

Etapa de Acondicionamiento

Se verificó que el rango de voltaje de las señales en bornes de los transductores piezoeléctricos utilizados alcanza el rango $\pm 100 V$, por lo que es necesario acondicionar la salida de estos elementos para adecuarla al rango de entrada de la NI (tabla 3.2).

Para esto, implementé una tarjeta acondicionadora con dos divisores de tensión (figura 3.5), que permite adaptar la entrada a dos canales de la NI. Para lograr versatilidad en la etapa experimental, en ambos divisores de tensión implementé R_1 con un *preset multivuelta*, lo que permite variar su valor, mientras que R_2 es para cada divisor una resistencia fija de valor $1,1 k\Omega$. Las resistencias utilizadas en esta etapa son mucho menores que la impedancia de entrada de la tarjeta adquirentes

Capítulo 3. Adquisición y Procesamiento de Señales Acústicas

(tabla 3.2), por lo que V_{medida} y V_{piezo} cumplen la relación de la ecuación (3.5). El valor de este divisor de tensión afecta la calibración, por lo que si se cambiara, sería necesario recalibrar.

$$V_{medida} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{piezo} \quad (3.5)$$

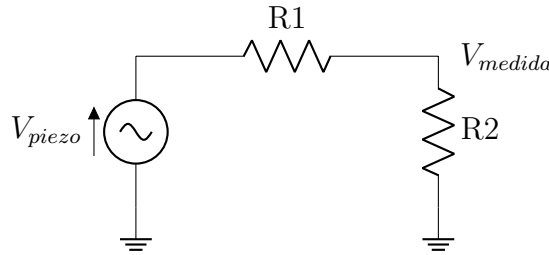


Figura 3.5: Circuito de divisor de tensión.

En una etapa avanzada del desarrollo del sensor, observé que la impedancia de salida de los transductores es en realidad demasiado alta como para ser despreciada al plantear el divisor resistivo, siendo que además varía notoriamente con la frecuencia (figura 3.6). La consecuencia de esto es que el factor de atenuación resulta variable y mayor que el calculado inicialmente. Particularmente, las frecuencias más bajas resultan fuertemente castigadas, obteniendo un filtrado pasa-altos. En la práctica, por cómo es el procesamiento de las señales (capítulo 6), esto no afecta a los resultados.

3.2. Procesamiento de Señales

En esta sección describo algunos conceptos y técnicas de procesamiento de señales a las que hago referencia en el resto del documento.

3.2.1. Cuantificar Energía

Las señales de voltaje generadas por los transductores piezoeléctricos ante un impacto son finitas, por lo tanto es posible calcular su energía [105, Cap. 2]. Como además están discretizadas, consistiendo en una secuencia de L de muestras, la energía se puede calcular a partir de las muestras en el dominio del tiempo, $v(n_t)$, mediante la ecuación (3.6), donde n_t son los índices de dichas muestras. Es posible obtener el mismo resultado a partir de las muestras $\mathcal{V}(n_f)$ de la transformada de Fourier de la señal. Las muestras $\mathcal{V}(n_f)$ se encuentran en el dominio de la frecuencia. La energía se calcula en este caso como en la ecuación (??), donde n_f son los índices del vector de largo L que contiene la transformada de Fourier de la señal. En la práctica, es habitual obtener las $\mathcal{V}(n_f)$ mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), para ganar eficiencia computacional [105, cap. 9].

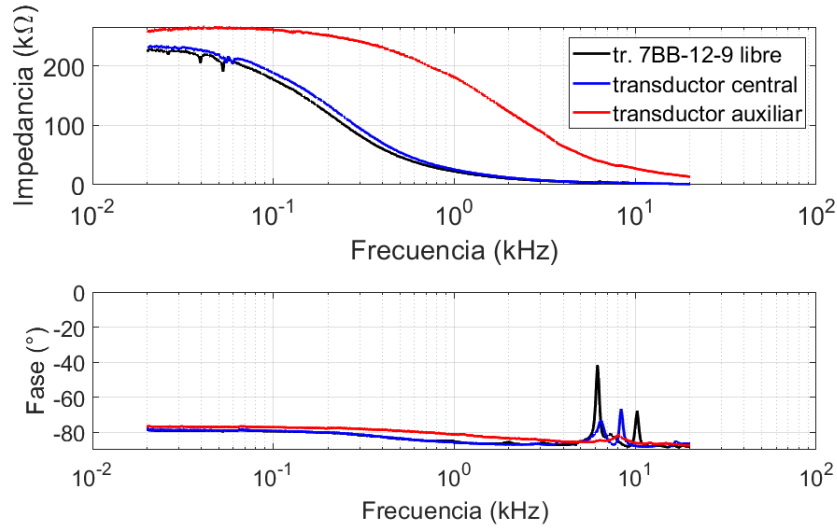


Figura 3.6: Impedancia de salida de los transductores utilizados en el diseño final. Curva negra: transductor 7BB-12-9 libre, esto es, sostenido de forma tal que no entra en contacto con ninguna superficie. Curva azul: transductor 7BB-12-9 pegado en el centro de un disco de acrílico. Curva roja: serie de 12 transductores, pegados formando un aro en el borde de un disco de acrílico. Los detalles de la disposición de los transductores en la placa se presentan en el capítulo 5.

Usando la expresión de \mathcal{V} la energía calculada es proporcional a la energía física de la señal muestreada. El factor de proporcionalidad queda determinado en la calibración.

$$E = \sum_{n_t=1}^L |v(n_t)|^2 \quad (3.6)$$

$$E = \frac{1}{L} \sum_{n_f=1}^L |\mathcal{V}(n_f)|^2 \quad (3.7)$$

3.2.2. Ruido

Existe un nivel de *ruido blanco*, independiente de la frecuencia, debido a causas aleatorias ajenas al experimento [110, cap.11]. Una causa de ruido que se destaca es el llamado *ruido térmico*. El ruido debe ser tenido en cuenta especialmente para obtener la diferencia de tiempos de vuelo de las señales, en la sección 6.4.

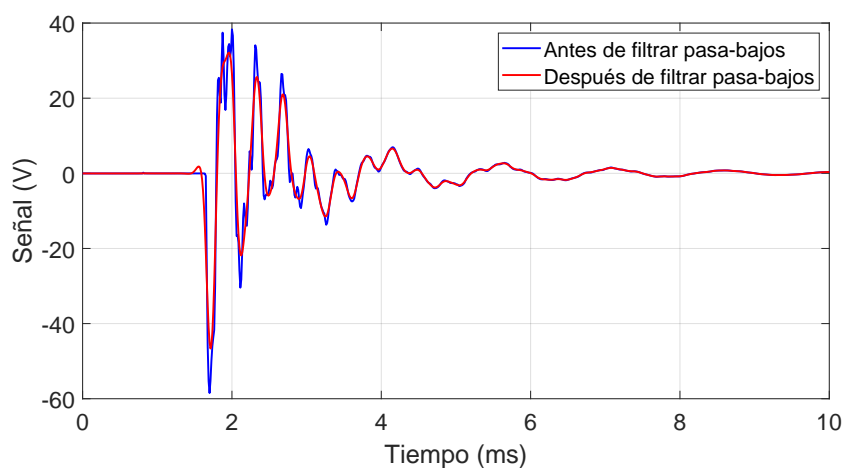
3.2.3. Filtrado

Una forma de reducir el efecto del ruido es atenuar las frecuencias para las que la señal tiene poca energía y en las que el ruido resulta predominante. Una forma de lograrlo es utilizar filtros digitales, que trabajan sobre la señal ya adquirida.

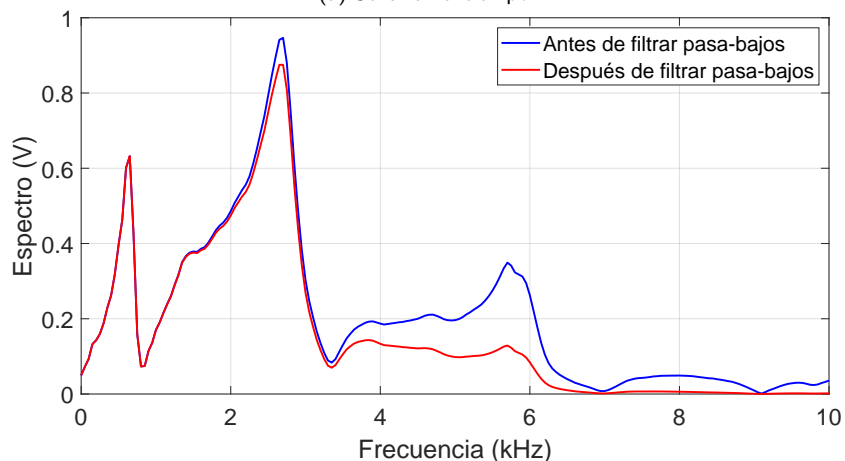
Capítulo 3. Adquisición y Procesamiento de Señales Acústicas

Los filtros más básicos son pasa-bajos, que dejan pasar las componentes de bajas frecuencias y atenúan las de altas frecuencias y pasa-altos, que funcionan de forma opuesta [111, 16]. La frecuencia de corte del filtro es, en el planteo más simple, aquella que separa las frecuencias que se mantienen de las frecuencias que se eliminan. El orden del filtro determina qué tanto se atenúan las frecuencias según su distancia a la frecuencia de corte.

Para filtrar la señal adquirida, utilizo el filtro digital de *Butterworth*. En *Matlab*[®], se utiliza la función *butter* en conjunto con la función *filtfilt*, para construir y aplicar el filtro. En este caso, las señales son filtradas con un filtro pasa-bajos de orden 4 y frecuencia de corte 5 kHz. La figura 3.7 ejemplifica la aplicación del filtro.



(a) Señal en el tiempo.



(b) Señal en frecuencia.

Figura 3.7: Ejemplos de filtrado pasa bajos de señal adquirida. En el tiempo, se observa que la señal se suaviza. En frecuencia, se observa que se conservan las componentes de baja frecuencia y se atenúan las de alta frecuencia.

3.2.4. Evaluar bondad de los resultados

En las pruebas de calibración, los resultados fueron evaluados por observación de los gráficos y mediante el cálculo de la de bondad de ajuste. Utilicé el método de raíz cuadrada media del error NRMSE [112], en una variante que tiene en cuenta la estimación de múltiples parámetros [113] (ecuación (3.8)). A su vez, normalicé los resultados por valor medio [114] (ecuación (3.9)). Las variables n y m representan respectivamente el número total de elementos y el número de parámetros que fueron ajustados con esos elementos, mientras que y es el vector de observaciones y \hat{y} es el vector de predicciones del modelo. Si una observación se corresponde exactamente con la predicción, no aporta al NRMSE.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n-m} \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3.8)$$

$$\text{NRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\langle y \rangle} \quad (3.9)$$

3.2.5. Herramientas que se Evaluaron y se Descartaron

Al tratarse de un sensor que tiene que procesar velozmente los impactos para evitar llenar su *buffer* de memoria, el criterio que utilicé fue eliminar todo procesamiento que no tuviera impacto significativo en los resultados. Las siguientes herramientas las evalué en la etapa de desarrollo de los algoritmos, pero debido a que los resultados finales no diferían significativamente, descarté su aplicación.

Interpolación en el Tiempo

Interpolación en el tiempo [105, cap. 4] consiste en calcular el valor que deberían tener algunos puntos entre las muestras adquiridas e incluirlos como si fueran muestras. Se simula entonces el aumento de f_s o equivalentemente la reducción de t_s . Requiere información sobre que el espectro en frecuencia de la señal es acotado y no se perdió información espectral, por lo que los puntos de interpolación a agregar permiten reconstruir la señal adquirida analíticamente. En este caso, evalué la necesidad de interpolar, para la detección de la diferencia de tiempos de vuelo de las señales (sección 6.4), pero la diferencia en los resultados no fue significativa, por lo que descarté la necesidad de utilizar esta herramienta con ese fin, que aumenta los requisitos de cómputo. Utilicé en cambio esta herramienta por cuestiones estéticas, como en la figura 6.8b, en la que interpolé la señal para mejorar su presentación gráfica.

Eventanado Hanning

Consiste en multiplicar la señal por una función llamada ventana de Hanning [105, cap.7], obteniendo una ventana que lleva los bordes suavemente a cero, logrando suavidad en el final de la señal, a diferencia de lo que ocurre con la ventana rectangular. Una gran ventaja es evitar las frecuencias debidas al corte abrupto

Capítulo 3. Adquisición y Procesamiento de Señales Acústicas

de la señal. Por otro lado, se debe tener cuidado de no deformar en demasía la parte de la señal que presenta más interés. Si bien fue considerado en la etapa de acondicionamiento de señales, en la que se cortan las señales a la duración del impacto, luego fue descartado debido a que no mejoraba los resultados en cuanto a la estimación de la energía.

Capítulo 4

Métodos de Ensayo

En esta sección explico los montajes de ensayo que utilicé. En cuando a la generación de impactos, trabajé con tres montajes diferentes. En dos de ellos, dejo caer bolitas de acero para que impacten el sensor con energía conocida. El primero es un lanzador fijo con electroimán, que es una plataforma de ensayos con proyectiles sumamente simple y el otro es el *SGran*, descrito en la sección 4.2, que es una plataforma de ensayos con proyectiles elaborada. El otro montaje consiste en un dispositivo de mesa que realiza impactos a corta distancia (Posicionador 2D), que me sirvió para evaluar la variabilidad espacial de las señales de manera sencilla. También realicé videos en cámara lenta para observar la interacción de los proyectiles con las placas que evalué y estimar la altura del rebote de los proyectiles.

4.1. Ensayos con Electroimán

Para lograr repetitividad de las pruebas, es necesario contar con un dispositivo que permite soltar los proyectiles desde un punto fijo. Esto garantiza impactar sobre un mismo punto de la placa ensayada tantas veces como se desee. Además, implica una altura fija y conocida, para poder calcular la energía del proyectil al momento de impacto. Una manera sencilla de lograr esto es con un electroimán.

Implementé un dispositivo basado en un electroimán, capaz de sostener el proyectil de ensayos de $3,0\text{ cm}$ de diámetro. Realicé un montaje con un soporte horizontal para el electroimán y una fuente DC comandable desde una computadora. En mi programa de adquisición de señales, inicio la adquisición de señales cuando desenergizo el electroimán, lo que da un sincronismo (*trigger*) estable para la adquisición de las señales.

Realicé ensayos en un diseño preliminar de la placa del sensor, para tener una primera aproximación a las características de las señales que se podrían obtener. Solté bolitas de acero de diámetros 10 mm , 15 mm , 20 mm , 25 mm y 30 mm desde 1 m de altura, obteniendo energías cinéticas de 40 a 600 mJ . Las hice impactar siempre sobre el mismo punto de una placa de acrílico de espesor $1,0\text{ cm}$, como la de la figura 4.1. Utilicé como transductor un diafragma piezoeléctrico *Murata 7BB-35-3* (tabla 3.1). Los apoyos consistieron en cilindros de goma rígida. La

Capítulo 4. Métodos de Ensayo

adquisición de las señales de voltaje la hice con una tarjeta *NI USB6210* [108] (tabla 3.2), muestreando a $f_s = 80 \text{ kHz}$. En la figura 4.3 presento ejemplos de estas adquisiciones, al utilizar proyectiles de 10 mm y 25 mm de diámetro, incluyendo los espectros en frecuencia de estas señales.

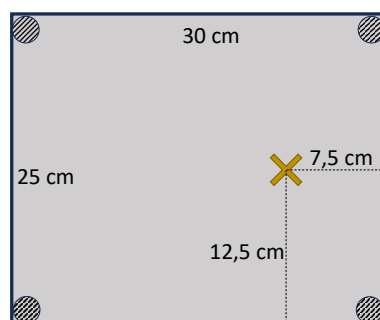


Figura 4.1: Diagrama de la placa de acrílico utilizada en los primeros ensayos con electroimán. La cruz indica la posición del transductor, los círculos indican los apoyos.

Las señales adquiridas presentan múltiples oscilaciones con muy poco *offset* y tienen algunos milisegundos de duración, con una envolvente con forma exponencial decreciente. La amplitud pico a pico varía entre aproximadamente 10 V y 100 V . En los primeros milisegundos, la señal contiene frecuencias más altas, que se extinguen antes que las frecuencias bajas. El espectro en frecuencias se encuentra concentrado en los primeros 10 kHz . En la sección 5.2.3 analizo en mayor profundidad la aproximación exponencial de la envolvente para estimar el tiempo de detección de la señal.

Los ensayos con electroimán fueron útiles como prueba de concepto y me llevaron a proponer el Proyecto de Fin de Carrera de Ingeniería Eléctrica descrito en la sección 4.2 para desarrollar un dispositivo más cómodo de operar.

4.2. Desarrollo de una Plataforma de Ensayos

4.2.1. Objetivos

Habiendo decidido simular los impactos de granizo mediante la técnica de *Energy Matching* (sección 2.2), observé la necesidad de contar con una plataforma de ensayos.

Si bien algunos de los artículos en los que se presenta la teoría de *Energy Matching* describen formas de llevarla a la práctica, dichas implementaciones cuentan con deficiencias, entre las que destaco el rozamiento del proyectil sustituto con una guía vertical [71] y la falta de repetitividad en el punto de impacto [74]. La repetitividad en el punto de impacto no era importante para la calibración de *hailpads*, pero es crucial para la calibración de sensores acustoeléctricos.

4.2. Desarrollo de una Plataforma de Ensayos

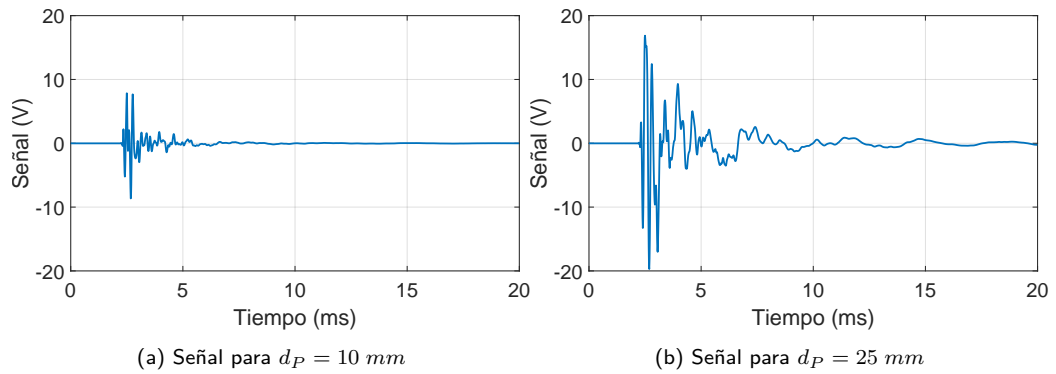


Figura 4.2

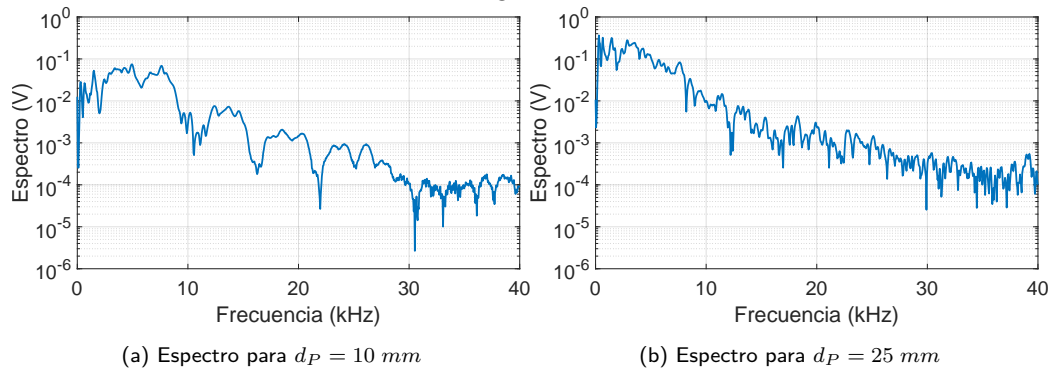


Figura 4.3: Ejemplos de señales en voltaje obtenidas al impactar con bolitas de acero de 10 mm y 25 mm de diámetro desde la misma altura sobre la placa de ensayos preliminares. Ejemplos de espectros en frecuencia de las señales. La información espectral se obtuvo mediante la transformada rápida de Fourier (FFT).

Los objetivos principales que planteé para la plataforma de ensayos se asocian a llevar a cabo la técnica con la posibilidad de repetir impactos idénticos:

- Los proyectiles son bolitas de acero de entre $0,5$ y $3,0 \text{ cm}$.
- Soltar los proyectiles con velocidad inicial nula.
- Soltar los proyectiles desde el rango de alturas necesario para *Energy Matching*, con precisión de $0,5 \text{ cm}$ en la medida de la altura.
- Tener precisión y exactitud de $0,5 \text{ cm}$ frente al punto de impacto elegido.
- Una vez posicionado el lanzador, no puede sufrir desplazamiento a soltar los proyectiles.
- Variar la altura de tiro desde un PC.
- Realizar varios tiros seguidos, de forma remota, comandados desde un PC.
- Coordinación automática de la adquisición de señales con el instante de tiro.

Capítulo 4. Métodos de Ensayo

- Implementación por duplicado del sistema de tiro, permitiendo soltar dos proyectiles al mismo tiempo o con un retraso a elección en el orden de los pocos milisegundos, para estudiar la capacidad de detección de impactos múltiples.
- Incluir una base para el sensor a ensayar, que lo mantenga en su lugar ante el impacto y permita inclinarlo para realizar ensayos con incidencias oblicuas, simulando el efecto del viento.

4.2.2. Metodología

Propuse y dirigí el *Proyecto de Fin de Carrera de Ingeniería Eléctrica* titulado *SGran: Diseño de un Dispositivo de Simulación de Granizo*¹ [115]. Como producto de este proyecto, tuve la plataforma de ensayos *SGran*. Con los resultados preliminares del proyecto presentamos el trabajo *Why and How to Construct a Device for Hail Simulation* al congreso *URUCON 2021*, organizado por la IEEE [5]. Luego, el congreso nos invitó a publicar un trabajo extendido en la revista *Memoria Investigaciones en Ingeniería*, el cual realizamos con los resultados finales del proyecto y titulamos *Implementation and Evaluation of a Hail-Impact Simulation Device* [2]. El enfoque del primer trabajo está orientado a presentar la necesidad de construir un dispositivo para calibración de sensores de granizo y dar una idea preliminar de cómo hacerlo. El segundo trabajo profundiza en la implementación del dispositivo y presenta ensayos básicos hechos con él, que permitieron evaluar su desempeño.

4.2.3. Resultados Obtenidos

El dispositivo realizado consiste de tres grandes partes físicas y una interfaz gráfica que se representan en la figura 4.4. Las grandes partes físicas son: una estructura mecánica, que actúa como la guía de un ascensor; una plataforma que se mueve dentro de la guía de ascensor, en la que se cargan los proyectiles y una base sobre la cual se coloca el sensor a ensayar, permitiendo variar el ángulo de inclinación respecto al piso. Además, desde la interfaz gráfica se comanda el tiro de los proyectiles. En el apéndice C se puede ver el diagrama de funcionamiento del sistema, de acuerdo a las distintas acciones que se pueden solicitar desde la interfaz.

La plataforma se mueve verticalmente en la guía impulsada por un motor eléctrico paso a paso, mediante un sistema de polea móvil. La plataforma cuenta con dos cargadores en los que se almacenan los proyectiles y dos lanzadores que sueltan los proyectiles desde el reposo. Los proyectiles caen por acción de la gravedad hacia el sensor, que se atornilla a la base. La posición del punto de impacto se regula moviendo la base que contiene el sensor, se incorporaron dos láseres en la estructura elevadora que actúan como referencias, contribuyendo a la alineación.

¹El proyecto fue llevado a cabo por los estudiantes Andrés Echarri, Gabriel Farber y Federico Molina y cotutoreado por Nicolás Pérez. Debido al desafío mecánico que suponía, contamos con el asesoramiento de Sofía Machín, docente del *Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial*(IIMPI).

4.2. Desarrollo de una Plataforma de Ensayos

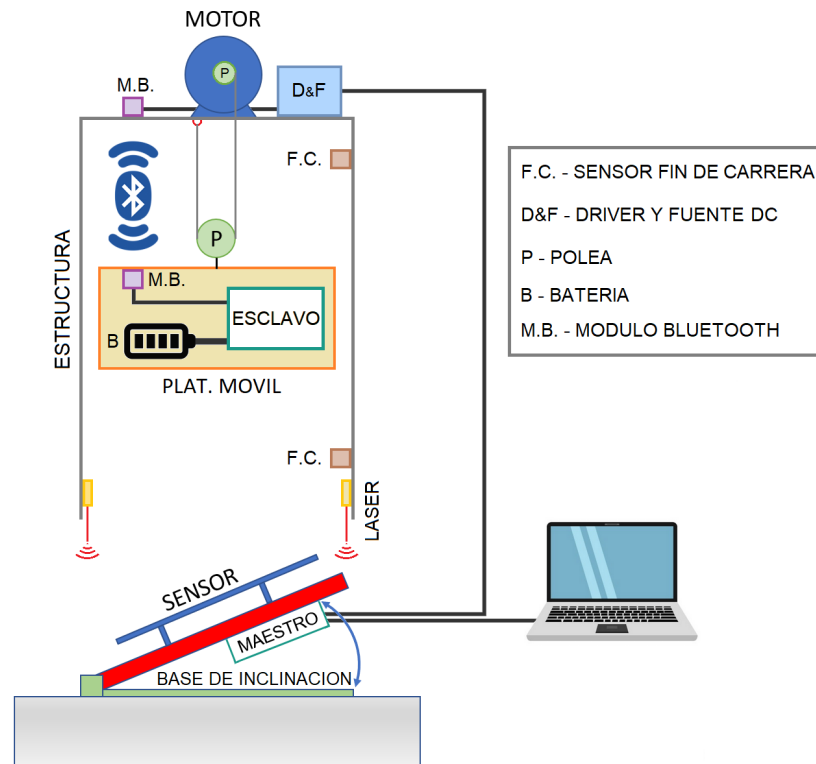


Figura 4.4: Diagrama general de la plataforma de ensayos *SGran*. *Estructura* refiere a la estructura mecánica que actúa como una guía de ascensor. *Plat. móvil* es la que contiene los proyectiles y el sistema que los suelta. *Base de inclinación*, además de contener al sensor contiene a la parte de la electrónica (*Maestro*) que se comunica de forma directa con la interfaz gráfica del PC y da órdenes a la parte subordinada (*Esclavo*). Los láseres se utilizan para facilitar la alineación con la base. Imagen tomada de [115]

Los cargadores permiten realizar hasta catorce impactos con cada carga, la mitad proveniente de cada lanzador. El recorrido de altura del dispositivo es de 1 m; las alturas de tiro necesarias para *Energy Matching* se logran apoyando la estructura vertical sobre un soporte o colgándola.

Desde la interfaz gráfica puede controlarse toda la secuencia de ensayos, visualizar las señales adquiridas y guardarlas junto con la información auxiliar (por ejemplo *timestamp*, altura de tiro, diámetro del proyectil).

El diseño del *SGran* es adecuado, pero la implementación práctica tiene limitaciones naturales de los proyectos estudiantiles, sobre todo pensando en su uso sostenido en el tiempo.

4.2.4. Aplicación

Los primeros ensayos que hice con el *SGran*², fueron de evaluación del dispositivo y comparativos de distintos materiales para la placa [2, 5].

²Agradezco a Andrés Echarri por su ayuda al realizar los ensayos con el *SGran*.

Capítulo 4. Métodos de Ensayo

Otro ensayo de diseño en el que fue importante el *SGran* fue el realizado en conjunto con los videos en cámara lenta (sección 4.4), que me llevó a determinar la forma de fijar la placa (sección 5.3.4).

También utilicé el *SGran* para todos los ensayos de calibración (sección 6). Los resultados de calibración los presenté en el *9th International Conference on Sensors and Electronic Instrumentation Advances (SEIA2023)* con el trabajo *Calibration of a Hail Impact Sensor based on Piezoelectric Transducers* [3], el cual expuse oralmente en el congreso. Finalmente, publiqué el artículo *Calibration of a Hail-Impact Energy Electroacoustic Sensor* en la revista *Transactions on Instrumentation and Measurement* de la IEEE [1].

4.3. Ensayos con Posicionador 2D

Para caracterizar espacialmente la respuesta de distintos sistemas de placa y piezoeléctricos, utilicé un dispositivo que permite posicionar en un plano el elemento comandable que ejecuta un golpe seco [116]³.

Estos ensayos fueron cruciales para el diseño de mi sensor, particularmente en cuanto a la elección de un disco como forma de la placa (sección 5.3.2) y para la elección del apoyo total de la cara inferior de la placa como método de fijación (sección 5.3.4).

Entre otros aspectos, pude observar el decaimiento de la energía de la señal obtenida al alejar el punto de impacto del transductor, pero no utilicé estos ensayos para la calibración, ya que el tiempo y el área de contacto son mayores para el elemento que ejecuta el impacto en el *posicionador 2D* que los del impacto de los proyectiles del *SGran*, que se parecen más al más al impacto de las piedras de granizo, por lo que lo utilicé para la calibración (sección 6.3).

4.4. Videos en Cámara Lenta

Para observar el comportamiento de los proyectiles al impactar, tomé videos utilizando la cámara “superlenta” del *Samsung Galaxy S10+*, que graba a 960 *fps*. En el repositorio [7] disponibilizo los videos. La figura 4.5 es un ejemplo de fotograma de una bolita en el punto máximo que alcanza luego de rebotar. En el acercamiento se puede observar que el contorno de la bolita es difuso, por lo que al medir sobre la imagen, se tiene una incertidumbre de algunos *píxeles*.

Utilicé los videos para medir la altura de rebote de los proyectiles y calcular la relación entre la energía que se transfiere al sensor y la que es conservada por los proyectiles. Las energías involucradas se representan en la ecuación (4.1), donde U_P es la energía potencial gravitatoria del proyectil antes de soltarlo y U_P^{rebote} es la energía que el proyectil conserva luego del impacto y utiliza para rebotar. E_{otros} corresponde a otras formas de energía dispersadas, que describo en la sección 6.1.

³Dispositivo desarrollado en un Proyecto de Fin de Carrera de Ingeniería Eléctrica. A lo largo de este trabajo le llamo *Posicionador 2D*.

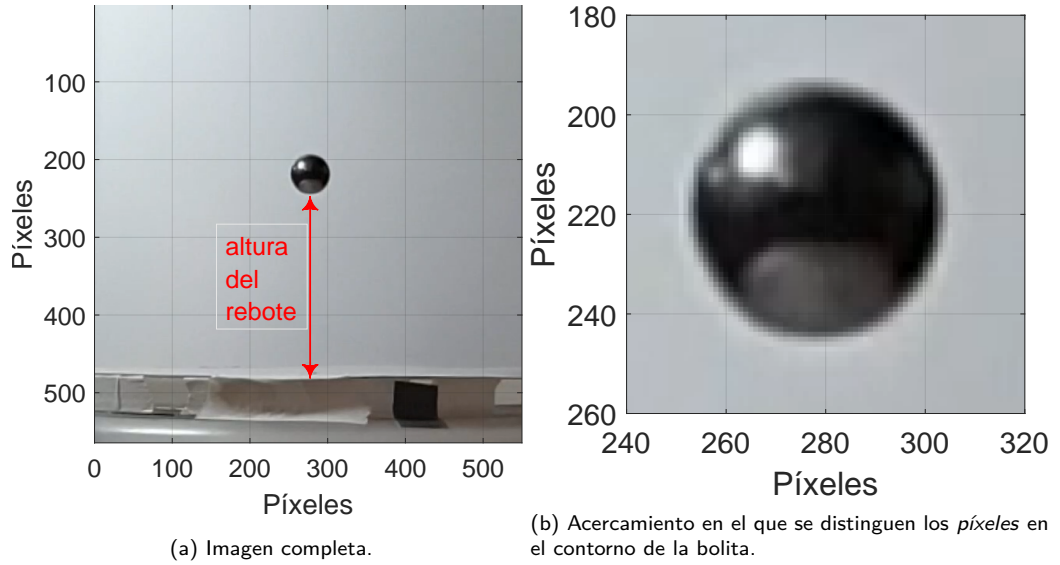


Figura 4.5: Imagen del rebote obtenida a partir de un video.

$$E_{transferida} = U_P - U_P^{rebote} - E_{otros} \quad (4.1)$$

Las energías de la ecuación (4.1) se calculan tomando los valores de la tabla 2.1. U_P y U_P^{rebote} se calculan como en la ecuación (2.12), donde z_P es la altura inicial o la altura del rebote según el caso.

En cuanto a la incertidumbre, la única variable con una incertidumbre a priori significativa es la altura, por lo que la incertidumbre de la energía se calcula sencillamente sustituyendo z_P por Δz_P de cada caso. Calculo directamente la incertidumbre expandida, porque es la que me sirve para graficar. La incertidumbre de $E_{transferida}$ se propaga como la suma de la incertidumbre de U_P y U_P^{rebote} .

Para medir la altura del rebote, desarrollé un *script* de *Matlab*[®] que automatiza parte del trabajo, interactuando con la interpretación humana mediante la herramienta *ginput* que permite seleccionar puntos en una gráfica. A continuación describo el procedimiento.

1. Cargar el video y correrlo cuadro por cuadro, para seleccionar el que muestra la bolita en la cima del rebote.
2. Con la herramienta *ginput* de *Matlab*[®], seleccionar el píxel superior e inferior de la bolita.
3. Conociendo el diámetro de la bolita, calcular el alto de un píxel en milímetros.
4. Mediante *ginput*, marcar el punto de impacto y el punto inferior de la bolita.
5. Calcular la cantidad de píxeles que abarca la altura recorrida.

Capítulo 4. Métodos de Ensayo

6. Obtener la altura en mm que recorrió la base de la bolita en el rebote. La altura recorrida por el centro de masa de la bolita es igual.

Estimé la incertidumbre en los videos de rebotes de la siguiente manera:

- **Apreciación:** dada por los píxeles y la definición de los límites de las bolitas en las imágenes, teniendo en cuenta que son fotogramas de una bolita en rápido movimiento. Tomé cuadros representativos para cada tamaño de bolita y se estimó la apreciación de la definición de los bordes en píxeles. El resultado fue similar para todos los diámetros: $3 px$. Se debe encontrar borde superior e inferior de la bolita, estimando la incertidumbre máxima en $6 px$. Para cada diámetro estimé el equivalente en mm de $1 px$, que varía debido al encuadre, ya que se varió la distancia de la cámara al plano de la acción según las necesidades de cada caso. Tomé el peor caso, $\Delta_{apr} = 5 mm$.
- **Medición:** lo que más influye en este caso es la perspectiva de filmación, tomo su valor en $\Delta_{med} = 5 mm$.
- **Estadística:** dada por las repeticiones de los ensayos. Adquirí al menos tres impactos en idénticas condiciones para cada tamaño de bolita. La incertidumbre estadística está dada por la desviación estándar de ese conjunto. Para la incertidumbre expandida, supuse distribución Gaussiana, con factor de cobertura $k = 2$.

Incertidumbre en la altura inicial. La “altura inicial” es en realidad la correspondiente a la diferencia entre la base del lanzador del *SGran* y la superficie de impacto. Esta medida se realizó de manera tradicional, con cinta métrica, por lo que sus fuentes de incertidumbre son: posible inclinación de la cinta en las medidas (incertidumbre de medición): $\Delta_{med} = 1 cm$ y apreciación de la cinta: $\Delta_{apr} = 1 mm$ (despreciable), luego $\Delta_{zP} = 1 cm$.

Capítulo 5

Diseño del Sensor de Granizo

5.1. Objetivo

Conceptualicé el sensor de granizo como una herramienta para:

1. Reconocer sin intervención humana la ocurrencia de eventos de granizo en el momento en que suceden.
2. Caracterizar el granizo y generar estadística útil para su pronóstico.

A nivel de prototipo, quería:

- Detectar inicio y fin de una tormenta de granizo.
- Estimar la energía de impacto de piedras de granizo de entre $d = 0,5 \text{ cm}$ y $d = 3 \text{ cm}$.
- Distinguir impactos que difieran más de $\Delta t = 10 \text{ ms}$ entre sí.
- Brindar información de frecuencia de impactos segmentando la tormenta en ventanas de tiempo.
- Generar un histograma de energías de impacto por ventana de tiempo.
- Diferenciar impactos de piedras de granizo de impactos de gotas de lluvia.
- Construir una unidad calibrada con los elementos principales, para ensayarla a la intemperie.

Al diseñar el prototipo, pienso en su aplicación en Uruguay, donde los principales usuarios a corto plazo son investigadores de la academia e INUMET. Debe ser posible entonces incorporar el diseño final a estaciones meteorológicas existentes o desplegar redes de este sensor, en conjunto con sensores que midan otras variables atmosféricas.

5.2. Descripción General

En esta sección describo el mecanismo de funcionamiento general del sensor de granizo y las hipótesis en las que se basa. También explico cuáles son los componentes del sensor y las principales características a definir en el componente en el que me focalicé, que es la cavidad acústica. Explico a qué me refiero a lo largo del trabajo por “tiempo de detección” y cómo manejo la lógica de detección de comienzo y fin de una tormenta de granizo.

5.2.1. Hipótesis

El diseño contempla las hipótesis sobre el granizo y la atmósfera presentadas en la sección 2.2. Básicamente, modelo las piedras de granizo como esferas homogéneas de hielo que alcanzan una velocidad terminal antes de impactar. Los valores de los parámetros se presentaron en la tabla 2.1.

Para la calibración, supongo que las piedras de granizo impactan de forma perpendicular a la placa del sensor y no se desintegran. En la sección 5.4.3 realizo un breve análisis sobre qué ocurre cuando el impacto no es perpendicular a la placa.

5.2.2. Funcionamiento del Sensor

El sensor diseñado permite la caracterización de eventos de granizo mediante la adquisición de señales generadas por cada piedra de granizo que lo impacta. Tiene un cuerpo principal que funciona como colector de impactos y cavidad acústica, con diafragmas piezoeléctricos incorporados.

La información cruda son las señales en voltaje generadas por la deformación de los piezoeléctricos ante cada impacto. La figura 5.1 muestra cómo el sensor cuenta con una placa que recibe los impactos de granizo cuyas ondas alcanzan a los diafragmas piezoeléctricos, que convierten las vibraciones en señales de voltaje. El sensor cuenta con la electrónica para acondicionar y adquirir las señales de voltaje, que se procesan para estimar la energía de los impactos.

La señal $v_{piezo}(K_P, t)$ combina información del impulso aplicado por el proyectil con energía de impacto, $f_{impulso}(K_P, t)$, la propagación de ondas en la placa $f_{propaga}(t)$ y la respuesta del diafragma piezoeléctrico $f_{piezo}(t)$. Matemáticamente, esto se representa por el operador de convolución, como en la ecuación (5.1). A partir de la señal adquirida, se obtiene información sobre la energía cinética de cada piedra de granizo al momento del impacto.

$$v_{piezo}(K_P, t) = f_{impulso}(K_P, t) * f_{propaga}(t) * f_{piezo}(t) \quad (5.1)$$

5.2. Descripción General

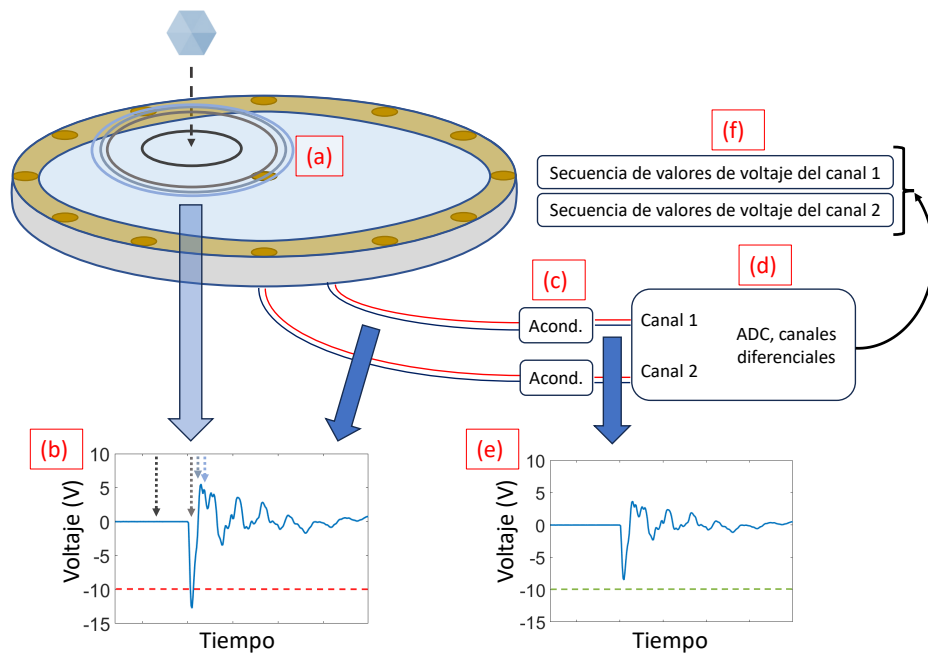


Figura 5.1: Diagrama del funcionamiento del sensor. Tras el impacto de la piedra de granizo, se genera un frente de ondas circular (a) que avanza desde el punto de impacto. En esta figura, los distintos tonos de color del frente de ondas representan distintos instantes de tiempo. En la gráfica de la izquierda (b) se muestra cómo varía en el tiempo la señal en el transductor central, donde el frente de ondas representado con un trazo más oscuro aún no alcanzó al transductor central, mientras que todas las otras representaciones sí lo hicieron. La línea roja de esta misma gráfica indica que la señal saturaría al ADC, por lo que el circuito de acondicionamiento, representado por un bloque etiquetado como *Acond.* (c) atenúa la señal de forma conocida, en este ejemplo $\times 1,5$, para que la adquisición sea correcta. La señal que entrará al ADC (d) se presenta en la gráfica de la derecha (e), donde la línea horizontal verde indica que ya no habrá problemas de saturación. Finalmente, la adquisición tiene como resultado dos secuencias discretas de valores de voltaje (f), siendo la del canal 1 la señal correspondiente al transductor central y la del canal 2 la señal correspondiente al transductor auxiliar.

5.2.3. Tiempo de Detección

En este trabajo le llamo tiempo de detección al tiempo luego de un impacto durante el que no puede reconocerse uno nuevo, debido a que la placa vibra de forma tal que un impacto nuevo se confundiría con el anterior. Es deseable que el tiempo de detección sea lo más corto posible. A modo de ejemplo, el desarrollo de [59] tiene un tiempo de detección de 10 ms para piedras grandes. Los sensores acustoeléctricos comerciales (sección 2.1.2) que reportan la frecuencia de impactos máxima que pueden resolver, indican 25 impactos por segundo, lo que permite inferir que tienen un tiempo de detección promedio de 40 ms.

En la figura 5.2, el valor absoluto de la envolvente de la señal de ejemplo está ajustado por una exponencial decreciente como la de la ecuación (5.2). En el procesamiento básico de la señal calculo y elimino el offset, siendo este generalmente pequeño debido al filtro pasa-altos que impone la etapa de acondicionamiento (sección 3.1.2). De esta forma, la exponencial de ajuste no tiene constante aditiva. Utilizo t' como variable temporal, donde $t' = 0$ ms corresponde al tiempo en que se da el máximo del valor absoluto de la señal. Entonces, A_y corresponde a la amplitud en $t' = 0$ ms y τ es el tiempo característico de la exponencial. En la gráfica presento la exponencial durante 2τ , que es una estimación razonable del tiempo de detección, ya que en ese tiempo la exponencial de ajuste se redujo a menos de 15% de su amplitud inicial. Para hallar la envolvente, utilicé la función *envelope* de *Matlab*[®], que utiliza un filtro de Hilbert [117]. La exponencial decreciente fue ajustada utilizando la función *fminsearch*, que implementa la minimización de funciones no lineales multidimensionales.

$$y(t') = A_y e^{-t'/\tau} \quad (5.2)$$

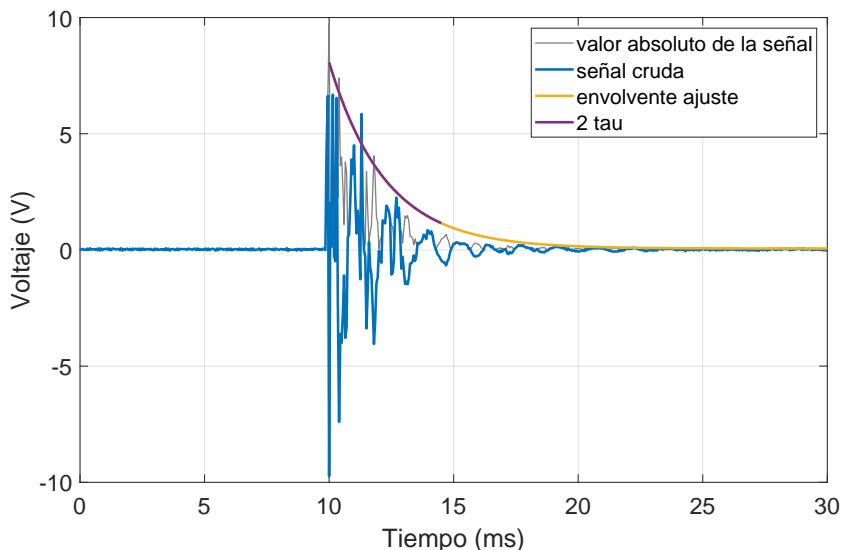


Figura 5.2: Ajuste de la envolvente de una señal en valor absoluto por un modelo de exponencial decreciente. La duración 2τ de la exponencial corresponde a la porción de la señal con mayor concentración de energía, por lo que representa razonablemente la duración de la señal.

5.2. Descripción General

En la figura 5.3a muestro la señal debida a un impacto sobre una placa de acero, con el objetivo de compararla con la señal de la figura 5.3b, debida a dos impactos casi simultáneos en puntos cercanos entre sí de la misma placa, utilizando proyectiles idénticos. La figura 5.3c muestra una foto de un instante previo a los impactos del segundo caso, obtenida de un video en cámara lenta (sección 4.4). Los impactos en la segunda señal son apenas distinguibles, donde la información a priori juega un papel importante: la parte de la señal de la figura 5.3b que comienza con la flecha negra, es muy parecida a la señal de la figura 5.3a.

Le llamo *tiempo de detección dinámico* al que está fuertemente relacionado con el tiempo durante el que la señal se encuentra por encima de determinado porcentaje de su máximo. Por ejemplo, podría considerar 2τ como tiempo de detección de la señal, no pudiendo atender señales nuevas hasta luego de cumplido este tiempo. Es dinámico porque depende del tamaño de la piedra.

Le llamo *tiempo de detección estático* al que cubre todos los casos esperables, para trabajar con un valor constante. Si bien esto no es óptimo, simplifica considerablemente el procesamiento de señales.

En este trabajo, comencé utilizando un tiempo de detección dinámico, pero una vez diseñada la placa del sensor, preferí pasar a una estrategia de tiempo de detección constante, por los motivos que detallo a continuación:

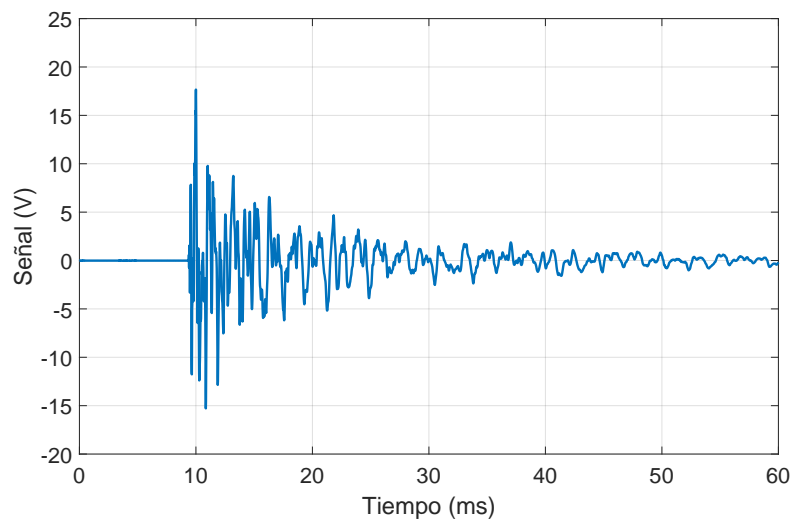
- Sencillez en el algoritmo.
- Latencia fija.
- Diferencia poco significativa en los resultados, comparada con factores de incertidumbre vinculados a las hipótesis sobre la piedra de granizo.

Los motivos por los que la diferencia en los resultados es poco significativa se deben en primer lugar a que el decaimiento de la envolvente de la señal es exponencial, por lo tanto la energía está concentrada en los primeros instantes y por otro lado a que la etapa de calibración compensa la diferencia.

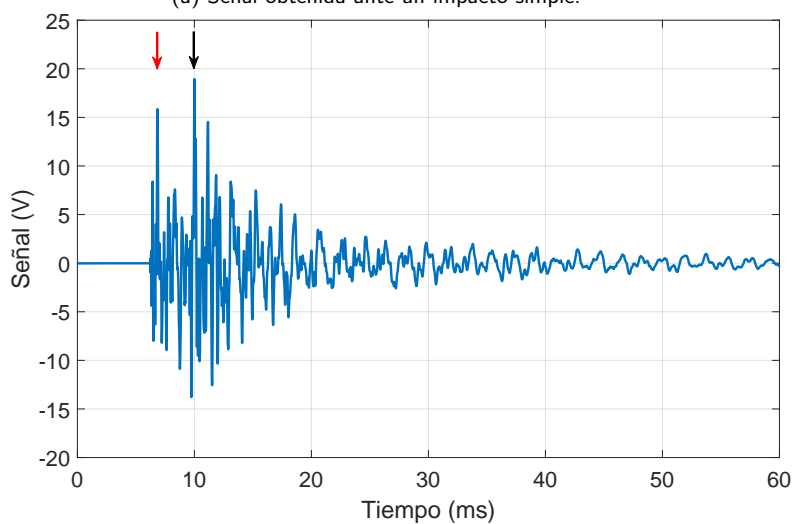
En la sección 5.3.1 hago énfasis en el tiempo de detección para la elección del material. En la etapa de calibración del sensor elegí una ventana fija de largo 10 ms , en la que el máximo valor absoluto de la señal queda cercano a los 2 ms . La posición del máximo es resultado del recorte de señal, ya que en la etapa de calibración, realicé las adquisiciones en coordinación con el lanzamiento del proyectil y recorté luego las señales a la ventana de interés. En cambio, en el prototipo instalado en exteriores, la adquisidora está siempre activa y almacena las adquisiciones cuando detecta que se salen de un umbral, descartando las adquisiciones que sólo contienen ruido.

Con el procesamiento que realizo actualmente, si se superpusieran dos impactos, la energía detectada sería la asociada a la superposición de las señales, computándose como un único impacto mayor que los originales. Este error no es grave para la estadística global de energía de la tormenta, pero afecta al conteo de la frecuencia de impactos, donde es importante tener presente que la máxima frecuencia que puede reportar el sensor actualmente es de 100 impactos por segundo.

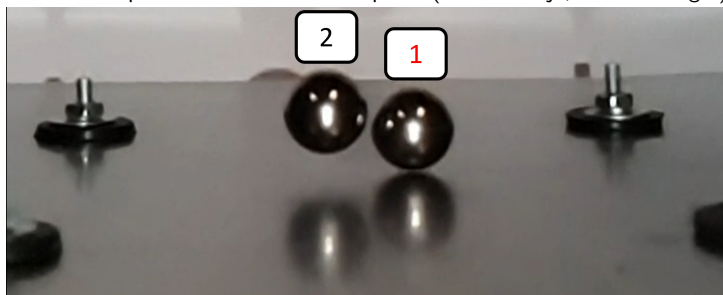
Capítulo 5. Diseño del Sensor de Granizo



(a) Señal obtenida ante un impacto simple.



(b) Señal obtenida ante impactos con aproximadamente 3 ms de diferencia, generados con proyectiles idénticos, a menos de 2 cm de distancia entre sí. Las flechas señalan el máximo de la componente debida a cada impacto (1- flecha roja, 2- flecha negra).



(c) Cuadro obtenido de video en cámara lenta (sección 4.4).

Figura 5.3: Impactos casi simultáneos en placa de acero.

5.2.4. Definición de Características

El diseño de la cavidad acústica es clave para el sensor de granizo. Para reducir las variables, definí desde un principio que se trataría de una placa plana. Esto facilita el prototipado y simplifica considerablemente el problema al acotar el universo de posibilidades.

Entre las características a definir estuvieron:

- Material: consideré metales (acero y aluminio), plásticos (acrílico, teflón) y vidrio templado.
- Espesor: decidí que este parámetro quedara definido por la disponibilidad comercial de cada material y su resistencia a los impactos.
- Contorno: es uno de los parámetros que evalué en mayor profundidad. En un principio, consideré válida cualquier forma, no necesariamente geométrica.
- Elección de los transductores piezoeléctricos: tomé como base el uso de diafragmas piezoeléctricos, los cuales presenté en la sección 3.1.1.
- Número de transductores. Aumentar el número de transductores aumenta los requisitos de adquisición y cómputo, por lo que es deseable trabajar con el mínimo necesario.
- Posición de los transductores. En principio la única condición era situarlos en la cara inferior de la placa, para evitar impactos directos que los dañaran.

Lógica de Tormentas

Como las tormentas graniceras suelen durar pocos minutos, la lógica que propongo para detectar inicio y fin de las tormentas es que si pasa un tiempo $t_{tranquilo}$, a priori de 5 minutos, sin recibirse nuevos impactos, la tormenta se considera finalizada. Si luego hubiera un nuevo impacto, el sensor considera una tormenta nueva. Quienes hacen uso del sensor pueden evaluar luego si efectivamente se trata de tormentas distintas e incluso modificar el parámetro $t_{tranquilo}$ para futuros eventos. Esta estrategia es versátil para que el usuario del sensor, que por ejemplo podría ser INUMET, interprete la información según su criterio.

Transmisión y Almacenamiento de Datos

La propuesta es que la información de inicio, fin, frecuencia de impactos e histogramas de energía se transmitan en el momento, mientras que los datos crudos de las señales de impacto queden almacenados para transmitirlos a demanda. La implementación de esta propuesta queda fuera del alcance de la tesis.

5.2.5. Componentes Involucrados

Aquí hago un breve resumen de los componentes del sensor, que se encuentran estrechamente ligados a la sección 3.1. En el resto del capítulo profundizo en el diseño. En la figura 5.4 se presenta la interconexión de estos componentes.

- Cavity acústica: es una placa, cuyo material y forma diseñó, que se coloca expuesta a la intemperie para recibir el impacto directo del granizo. El impacto genera ondas que se trasladan dentro de la placa, rebotando en los bordes. Este es uno de los componentes del sensor en los que más se centra esta tesis.
- Transductores piezoeléctricos: descritos en la sección 3.1.1, se utilizan para convertir las vibraciones en señales de voltaje. Estas señales corresponden a $v(t)$ de la figura 3.3.
- Etapa de acondicionamiento de señales: es una de las etapas de la digitalización, representada en la figura 3.3 y descritas en la sección 3.1.2. En este caso incorpora un divisor de tensión que acondiciona las señales generadas por los piezoeléctricos para las siguientes etapas de la digitalización.

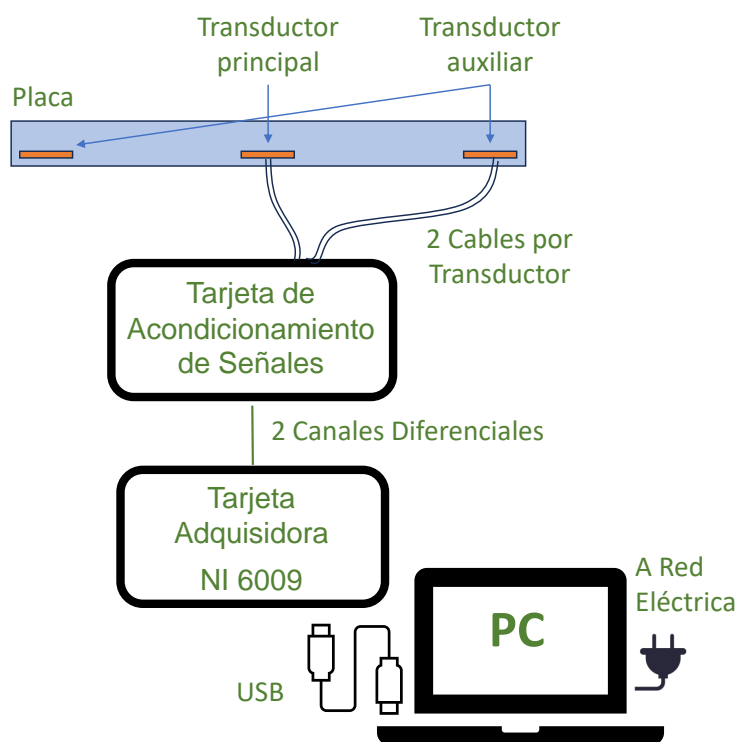


Figura 5.4: Diagrama que muestra la interconexión de los distintos componentes del sensor.

- Tarjeta adquisidora: cumple con las funciones de *muestreo y retención* y de *conversión analógico a digital* representadas en la figura 3.3. En el prototipo final utilizo la tarjeta adquisidora *NI USB6009* marca *National Instruments*.
- Computadora: utilizo una computadora para almacenar y procesar la información adquirida. Como trabajo futuro, sería necesario sustituirla por una unidad de almacenamiento y procesamiento dedicada, que también debería encargarse de la transmisión de información, aspecto que quedó por fuera del alcance de este trabajo.

5.3. Cavity Acústica

5.3.1. Material

El material de la cavity acústica para un sensor acustoeléctrico de granizo tiene dos requisitos básicos. En primer lugar, debe resistir a la intemperie durante un tiempo razonable en el orden de años, soportando particularmente los impactos de granizo sin romperse o deformarse permanentemente. Además, debe propagar las ondas acústicas generadas por los impactos de forma tal que se pueda extraer la información buscada, en este caso relativa a tiempos y energías. También es deseable que cumpla con otras características como un precio accesible y disponibilidad en el mercado local, facilidad de construcción e instalación y posibilidad de reutilización o reciclaje luego de su reemplazo.

En el proceso de selección del material del sensor, evalué los siguientes materiales: acero inoxidable, aluminio, teflón, acrílico y vidrio templado.

Los ensayos preliminares me llevaron a elegir el acrílico como material. Es un material con buen desempeño teórico a la intemperie [118], [119, cap. 9] que presenta ventajas frente a los otros materiales considerados. Se trata de un material isotrópico sumamente homogéneo en su estructura, por lo que es esperable que el comportamiento de un dispositivo a otro tenga poca variabilidad. En relación a los metales, es más atenuante, lo que permite trabajar con señales de corta duración, acortando el tiempo de detección. En la figura 5.5 comparo la duración de las señales utilizando placas de dimensiones y métodos de fijación similares, impactando de forma similar y donde el principal factor de variación es el material de la placa. Si bien el tiempo de detección en todos los casos está en el orden de los milisegundos, para aluminio y vidrio templado se encuentra un orden de magnitud por encima que para acrílico.

En cuanto al precio, si bien es un material más caro que los otros considerados, no es prohibitivo. Actualmente, una placa de acrílico de 10 mm de espesor de 125 cm × 185 cm de área cuesta unos USD 265, mientras que una de 2 mm de espesor cuesta unos USD 60¹. Considerando que se podrían obtener al menos 28 discos como el diseñado (sección 5.3.6), se tendría un costo en acrílico inferior a USD 14 por sensor.

¹Precios de plaza en Uruguay, agosto de 2023.

Capítulo 5. Diseño del Sensor de Granizo

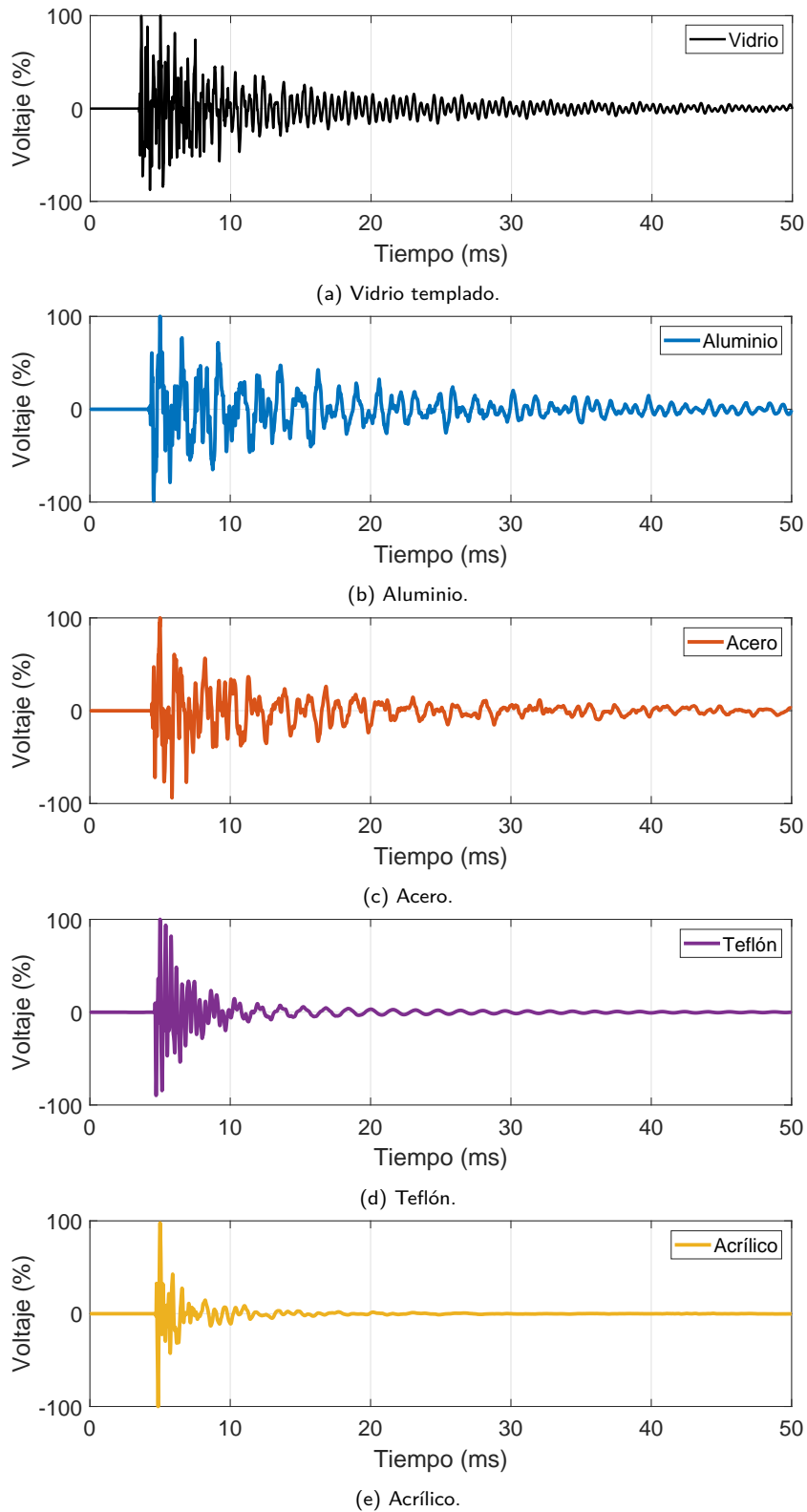


Figura 5.5: Comparación de impactos en distintos materiales. Para dimensiones de placa y métodos de fijación similares, la velocidad de extinción de las vibraciones se ordena como: 1-acrílico, 2- teflón, 3- acero, 4- aluminio y vidrio templado.

5.3. Cavity Acústica

El corte de las placas puede realizarse con láser de manera muy sencilla, obteniendo resultados sumamente prolijos. El ensamblaje de acrílico puede realizarse con cloroformo u otros productos. Tiene la ventaja frente a los metales y el vidrio de que es sencillo de embeber los transductores en el ensamblaje. Es un plástico más fácil de trabajar industrialmente que el teflón, ya que este último se derrite si se lo intenta cortar con láser.

5.3.2. Forma

La forma del contorno de la placa fue uno de los aspectos centrales del diseño. Este aspecto tiene un fuerte vínculo con la determinación de qué característica de las señales utilizar para estimar la energía de los impactos. También está asociado a la forma de satisfacer la condición de que la salida del sensor sea independiente del punto sobre el que impacta cada piedra.

Las señales provenientes de una cavidad caótica presentan un espectro frecuencial más variado que las provenientes de cavidades con condiciones de borde simples, debido a las incidencias de las ondas en los bordes de la placa [120, 121]. Por eso, comencé trabajando con la hipótesis de que sería preferible un contorno con varias aristas o una forma orgánica (figura 5.6a). Esto iba asociado a la idea de corregir la estimación de la energía según el punto de impacto utilizando una tabla calibrada para una cantidad discreta de puntos, de los que se seleccionaría el más próximo a cada nuevo impacto mediante el método de correlación cruzada. Este método requiere que cada nueva señal sea comparada con señales almacenadas en una base de datos, obtenidas en condiciones conocidas. Esto implicaba determinar qué puntos serían representativos de la superficie y particularmente cuántos sería necesario relevar. La calidad de la compensación se beneficia de una discretización fina de la superficie.

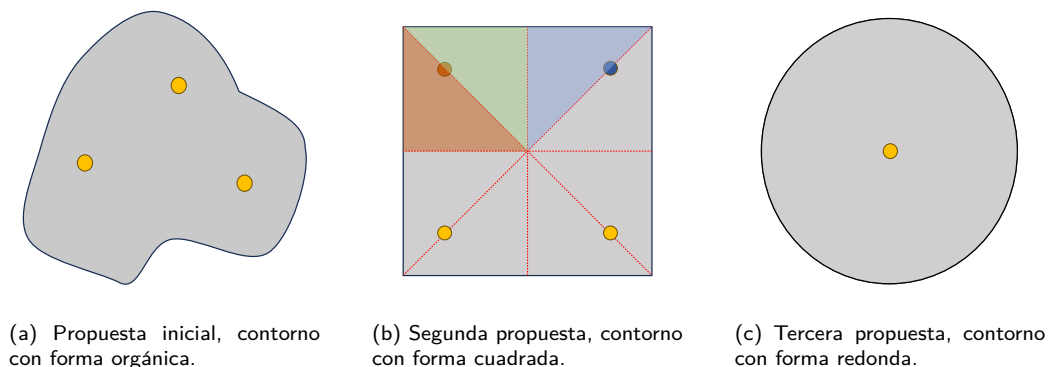


Figura 5.6: Formas consideradas para la placa principal del sensor

La estrategia de correlación cruzada se podría llevar a cabo con cualquier cantidad de transductores, siempre que la asimetría de la placa brinde señales que *decorrelacionen* significativamente al cambiar el punto de impacto. Presenta mejores resultados al aumentar el número de transductores, siendo tres o cuatro una cantidad razonable para el tamaño de placa evaluado. El tamaño del banco de

Capítulo 5. Diseño del Sensor de Granizo

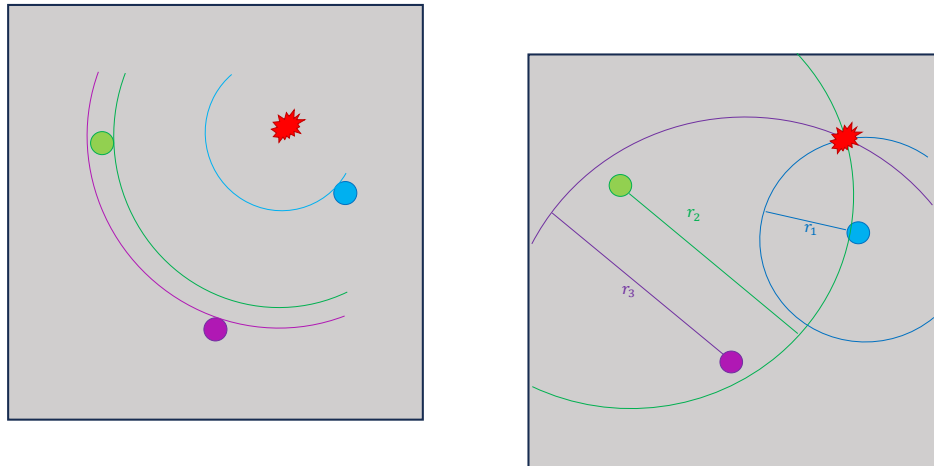
señales y los tiempos de cómputo aumentan proporcionalmente con el número de transductores y la cantidad de puntos relevados. Además, la correlación cruzada es en sí misma un algoritmo costoso en cómputo.

Los ensayos con el *posicionador 2D* (sección 4.3) me permitieron observar que la información de interés para el sensor se puede tomar de la energía de los primeros milisegundos de las señales. Esta ventana de tiempo, contiene principalmente información de las ondas que se propagan directamente del punto de impacto al transductor. Esto permite trabajar con un material de mayor atenuación y un tiempo de detección corto, de forma tal que las ondas se extingan velozmente para que no se superpongan las correspondientes a distintos impactos, pudiendo reconocer mayor cantidad de impactos por minuto. Asimismo, va en detrimento de detección del punto de impacto por correlación cruzada, ya que no se adquiriría suficiente tiempo de la señal como para tener información de múltiples incidencias en los bordes, por lo que las señales correspondientes a distintos puntos de impacto no decorrelacionarían significativamente.

Pensando en aligerar el procesamiento de señales y tras las observaciones anteriores, evalué placas de contorno cuadrado. Esta forma tiene la ventaja de que, si los transductores se disponen adecuadamente, la simetría puede aprovecharse para calibrar un octavo la placa en lugar de toda la superficie. Por ejemplo, los transductores podrían colocarse como en la figura 5.6b. Entonces, se podría calibrar únicamente una región triangular, como la destacada en rojo. Observar que cualquier punto de la placa en conjunto con el transductor más cercano a él guarda una relación de equivalencia con un punto de la región roja ante el transductor marcado con el mismo color. Por ejemplo, la relación entre los puntos de la región azul y el transductor azul es igual a la de los puntos de la región roja y el transductor rojo. De la misma forma, se puede observar la equivalencia entre los puntos de la región verde ante el transductor rojo con los puntos de la región roja que son simétricos por la diagonal que separa a la región verde y la roja. Entonces, la señal que se utilizaría para estimar la energía sería siempre la obtenida mediante el transductor más cercano al punto de impacto y se la corregiría según la calibración.

En paralelo, evalué la posibilidad de sustituir la idea original de detección del punto de impacto (correlación cruzada) por una estrategia de triangulación por medidas de tiempos de vuelo de las señales a cada transductor [122]. La triangulación se basa en detectar el punto de emisión de las ondas, correspondiente al punto de impacto, mediante el tiempo de vuelo de la onda a cada transductor (figura 5.7a). Conociendo este tiempo y la velocidad de propagación del frente de ondas en el material, se halla el lugar geométrico del impacto según cada transductor (una circunferencia centrada en cada transductor) y la intersección de los lugares geométricos corresponde al punto de impacto (figura 5.7b). La cantidad de transductores podría ser la misma que en la otra opción, pero el beneficio se encuentra en que el cómputo de los tres tiempos de vuelo es significativamente más económico que la correlación con todo el banco de señales.

Finalmente, el análisis de la geometría me llevó a observar que utilizando un contorno circular, podría colocar un transductor en el centro de la placa y simplificar el problema: en lugar de la ubicación exacta del punto de impacto, necesitaría



(a) La onda generada por el impacto presenta distintos tiempos de vuelo a cada transductor.

(b) Calculando la distancia de cada transductor al impacto, se halla la intersección de las circunferencias que tienen por radio esa distancia y centro en cada transductor y se determina el punto de impacto.

Figura 5.7: Método de triangulación para detectar el punto de impacto.

únicamente la medida de la distancia del impacto al centro de la placa. Esto es, sustituir un problema bidimensional por uno unidimensional. La energía de las señales adquiridas en el centro de la placa decae con la coordenada radial, independientemente de la coordenada angular (figura 5.6c). Elaboro este aspecto en la sección 6.3.

Observé además que con un único transductor auxiliar, en forma de anillo, abarcando el contorno, es posible determinar la distancia al centro (coordenada radial) por diferencia de tiempos de vuelo. El transductor auxiliar es necesario para obtener una señal de sincronismo. La detección de la coordenada radial la desarrollo en la sección 6.4.

5.3.3. Tamaño

En cuanto al tamaño de la placa, debe ser suficiente para recabar información representativa del evento de granizo en la zona en que se encuentra. Por otro lado, debido a la atenuación del material es necesario considerar contemplar que las señales lleguen al transductor incluso si las piedras de granizo son pequeñas e impactan en los puntos más lejanos. Además, el costo de fabricación y la simplicidad para la instalación pesan a favor de tamaños reducidos. El espesor de la placa lo determino por la resistencia del material a los impactos.

En este caso, me guí de forma general por el tamaño de los *hailpads*, donde los más pequeños tienen aproximadamente 20 cm de lado.

Las primeras pruebas las hice con placas cuadradas, de 20 cm de lado. Final-

Capítulo 5. Diseño del Sensor de Granizo

mente, elegí fabricar el prototipo con forma de disco, de diámetro de 25 *cm*, como puede verse en la figura 5.10b. Este tamaño podría reducirse, especialmente si se optara por instalar varias placas orientadas hacia los distintos puntos cardinales como parte de un mismo sensor.

5.3.4. Fijación

La forma de sostener la cavidad acústica es sumamente importante, ya que impone condiciones de borde que afectan a las vibraciones.

En los primeros ensayos, utilicé tres o cuatro apoyos según la placa, pensando que más libertad de movimiento sería mejor. Los ensayos con el *Posicionador 2D* (sección 4.3) y los videos en cámara lenta para observar el rebote de las bolitas (sección 4.4) fueron contundentes. Uno de los efectos que se pueden observar cuando algunos puntos de la placa se encuentran fijos y otros no, es que si el proyectil impacta sobre un punto fijo, rebota menos que si impacta sobre un punto con más libertad de movimiento, de la misma forma que ocurre en un trampolín.

Observé entonces que la fijación del sensor debe mantener la simetría central del diseño de la placa. Las tres opciones son: fijar únicamente el centro de la placa; utilizar un aro, por ejemplo fijando todo el borde de la placa; o apoyar completamente la cara inferior de la placa. La primera opción la descarté por ser poco robusta físicamente. La segunda y la tercera opción son igualmente viables. Elegí la tercera opción por ser más simple, ya que se obtiene la misma condición de borde en todo el plano.

En caso de cambiar el método de fijación, sería necesario volver a calibrar el sensor (capítulo 6).

5.3.5. Elección de Transductores

Habiendo decidido que la placa tendría forma de disco, es inmediata la decisión de colocar el transductor con el que se mide la energía de los impactos en el centro de la placa, para aprovechar la simetría. El transductor principal fue escogido para ser lo más puntual posible y con el objetivo de abarcar una banda de frecuencias lo más ancha posible (sección 3.1.1). Estos dos objetivos llevaron a escoger el transductor *Murata 7BB-12-9* [123], presentado en la tabla 3.1, que es el transductor más pequeño del catálogo.

Debido a la atenuación de las vibraciones en la placa, es necesario conocer la distancia del punto de impacto al centro de la placa. Observé la necesidad de utilizar al menos un transductor auxiliar para tal fin.

Una opción era utilizar suficientes transductores independientes como para poder triangular y hallar el punto de impacto exacto. Esto requería de tres transductores auxiliares, debido a que no se conocen los tiempos de vuelo absolutos, sino en referencia al tiempo de vuelo de la señal al transductor más cercano. Cada transductor auxiliar implica un canal más de adquisición y requiere capacidad de cómputo para procesar su señal.

La opción que elegí consiste en utilizar un único transductor auxiliar con forma

5.3. Cavity Acústica

de anillo del mismo diámetro de la placa. Utilizando el método descrito en la sección 6.4 es posible obtener la distancia del punto de impacto al centro de la placa de manera automática.

La implementación del transductor con forma de aro no es trivial, ya que no es un producto comercial estándar. Entre las opciones para implementarlo se encuentran las láminas de PVDF, que se pueden recortar con la forma adecuada. Si bien son muy convenientes, porque permiten lograr un anillo perfecto, también se trata de transductores de alto costo y no se encuentran disponibles en el mercado uruguayo. La solución a la que llegué fue utilizar doce diafragmas piezoeléctricos formando un aro como los números en un reloj. Eléctricamente, estos elementos se encuentran conectados en serie (figura 5.8), de forma tal que se comportan como un único transductor. Para lograr un anillo lo más angosto posible, escogí el mismo modelo que para el transductor principal (*Murata 7BB-12-9*). Con doce transductores se logra una aproximación adecuada a la forma buscada teóricamente, sin dificultar demasiado la implementación. De ser necesario, se podría aumentar la cantidad de transductores para cubrir mejor el perímetro de la placa.

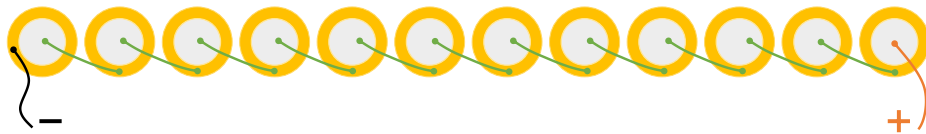


Figura 5.8: Diagrama que muestra conexión en serie de los transductores piezoeléctricos utilizados para construir el transductor auxiliar.

5.3.6. Fabricación y Ensamblaje

Habiendo elegido material (acrílico), forma (disco de diámetro 25 *cm* y altura 1,4 *cm*), tipo, cantidad y ubicación de los transductores (*Murata 7BB-12-9*, uno ubicado en el centro y un arreglo de doce formando un aro en el borde de la placa, eléctricamente en serie entre sí, que conforman el transductor auxiliar), procedí a realizar el diseño del prototipo de la placa para fabricación. Utilicé el programa *Autodesk Inventor*, que permite realizar el modelo en 3D de a partes que se ensamblan en el propio software para ver el resultado final.

Tratándose de una placa que estará expuesta a la intemperie (figura 5.9), la diseñé con los transductores embebidos en el acrílico. Los cables que van de los transductores a la tarjeta adquisidora salen por el lado inferior de la placa, para que en el diseño completo del sensor la placa pueda apoyarse sobre una caja estanca (conteniendo a la electrónica de acondicionamiento y adquisición).

En la figura 5.10 se puede observar la placa principal del sensor, tanto en perspectiva como de frente. En ambos casos, la cara más visible es la de abajo, para que se puedan apreciar los espacios reservados para los transductores y para los cables internos del transductor auxiliar. En la práctica, la fabricación se realizó mediante un disco de 10 *mm* de espesor al que se le incorporaron piezas en acrílico de 2 *mm* de espesor. En la figura 5.11a se muestra la placa inferior del sensor, que



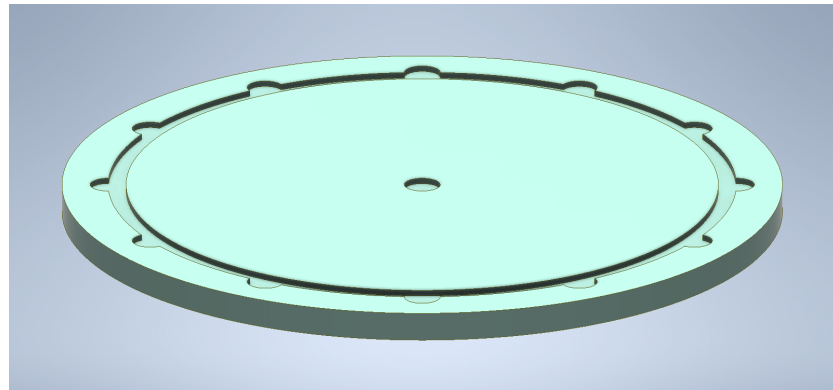
Figura 5.9: Foto de la pieza principal de la placa del sensor, con los transductores piezoeléctricos montados. Para que los transductores queden embebidos en el acrílico, se completa la placa con un disco fino de acrílico que protege los transductores, con dos pequeños orificios para la salida de los cables. Las piezas de acrílico se pegan con cloroformo, quedando firmemente selladas.

se coloca para que los transductores queden embebidos en el ensamble; se pueden observar los orificios de salida de los cables. En la figura 5.11b se presenta un corte transversal del ensamble que atraviesa el centro, con el objetivo de mostrar los espesores de las distintas capas. El ensamble completo, en posición de funcionamiento, se puede observar en la figura 5.11c, donde se muestran punteadas las aristas ocultas.

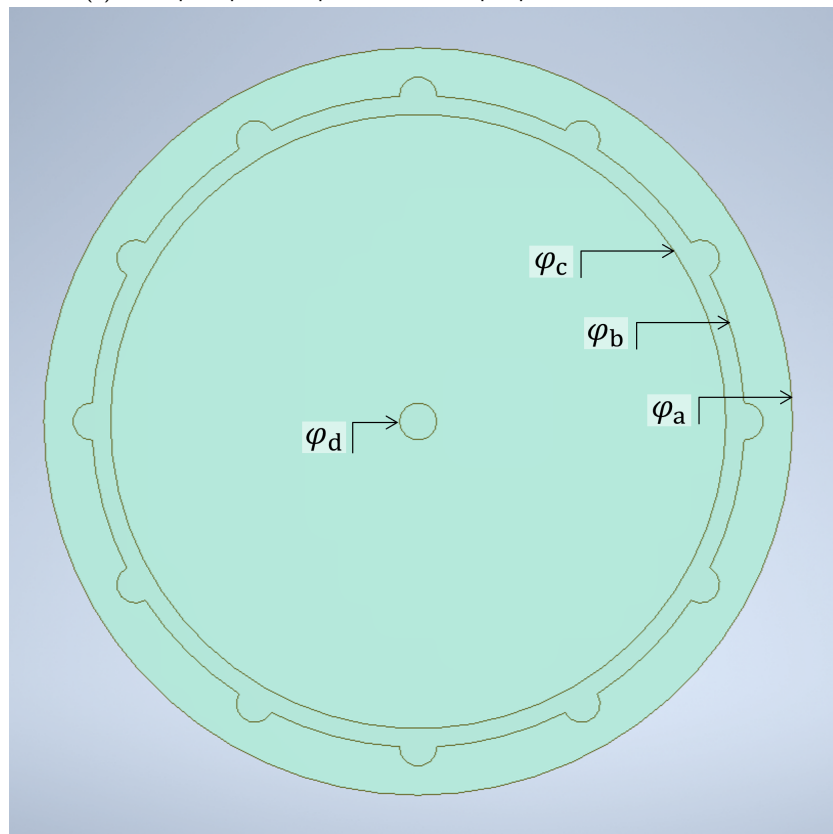
Para fabricar el prototipo de laboratorio, mandé el diseño a una empresa especializada en corte láser de acrílico. Para esto, tuve que exportar el diseño realizado en *Autodesk Inventor*[®] al formato *dwg*, de *AutoCAD*[®]. La pieza principal de la placa fue ensamblada por el fabricante. Pegué los transductores a la placa utilizando *2-etilcianoacrilato*². Pegué la pieza de acrílico que protege los transductores utilizando cloroformo. Monté la placa armada en una capa de poliestireno expandido, que brinda aislamiento acústica.

²Marca comercial: *La Gotita*.

5.3. Cavity Acústica



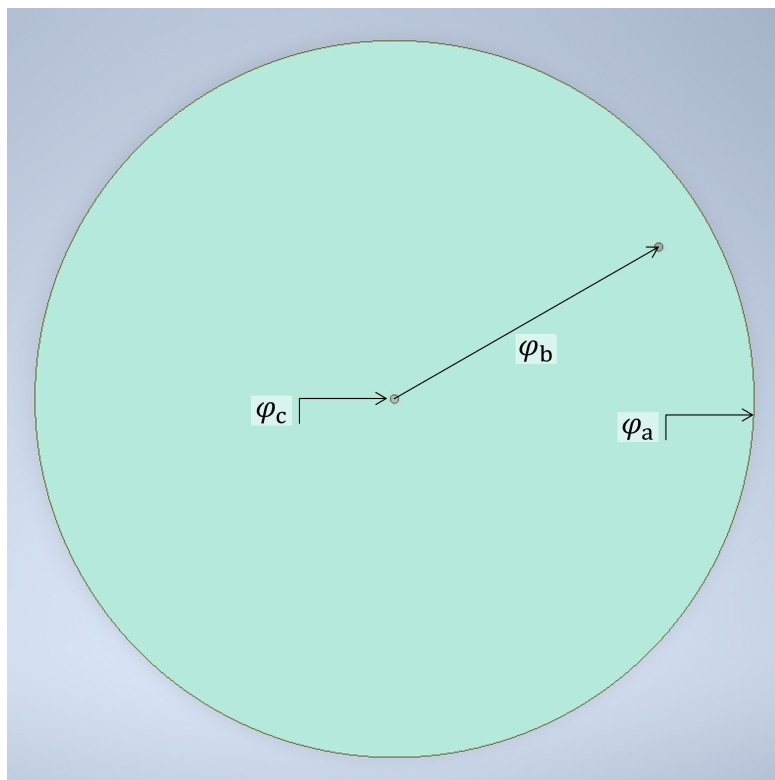
(a) Pieza principal de la placa del sensor, perspectiva de la cara inferior.



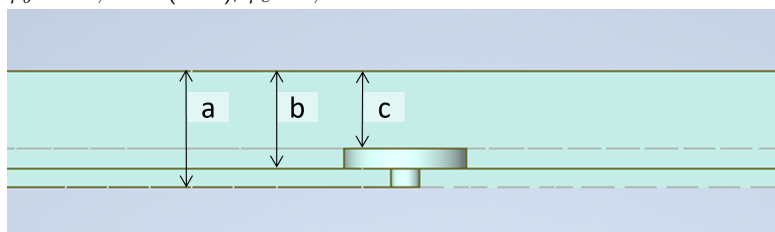
(b) Pieza principal de la placa del sensor, cara inferior. Diámetros indicados: $\varphi_a=250,0\text{ mm}$, $\varphi_b=218,0\text{ mm}$, $\varphi_c=207,5\text{ mm}$, $\varphi_d=12,5\text{ mm}$

Figura 5.10: Diseño de la placa principal del sensor

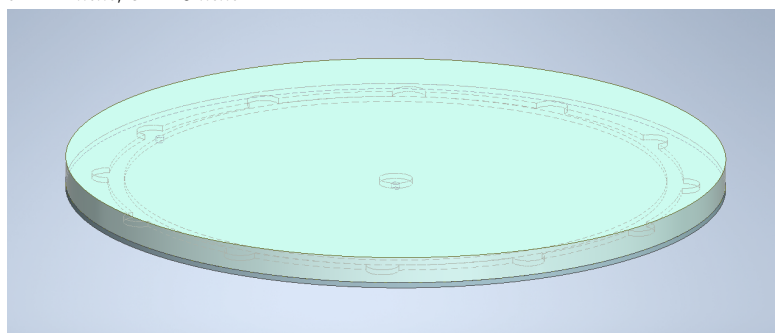
Capítulo 5. Diseño del Sensor de Granizo



(a) Pieza inferior de la placa del sensor. Diámetros indicados: $\varphi_a = 250,0 \text{ mm}$, $\varphi_b = 106,0 \text{ mm}$ (radio), $\varphi_c = 3,0 \text{ mm}$



(b) Corte transversal del ensamblaje en tramo central. Alturas indicadas: $a = 14 \text{ mm}$, $b = 12 \text{ mm}$, $c = 10 \text{ mm}$.



(c) Perspectiva del ensamblaje en posición de funcionamiento.

Figura 5.11: Diseño de la placa inferior del sensor y ensamblaje.

5.3.7. Conclusión sobre Diseño de Cavidad Acústica

El diseño de la cavidad acústica fue una parte central de este trabajo. La propuesta final es lo más simple posible, permitiendo una calibración sencilla, puesto que al colocar el transductor principal en el centro y al tener simetría de revolución, se simplifica la variable *posición de impacto* en beneficio de la variable *distancia del impacto al centro*, $r_{Impacto}$.

Comparando el diseño al que llegué con el de los sensores comerciales y académicos, veo que mi resultado se parece más a los de los sensores comerciales, destacando entre ellos el de [64]. En cuanto a los sensores académicos, mi diseño guarda más similitudes con [58, 59], debido al material. En los sensores comerciales y académicos analizados, parecería que no se presta atención a la corrección por posición del impacto por lo que, aunque existen similitudes entre los diseños, la inclusión del factor de corrección presenta una mejora respecto a los casos analizados. Esto no necesariamente implica una falla en esos diseños, ya que tal vez usaron un método diferente al mío. En particular, [57] manifiesta que tiene uniformidad en la respuesta sobre la superficie activa debido a la forma de su cavidad acústica y [124] indica que logra esto mediante el uso de un transductor colocado en su placa de arriba y otro en su placa de abajo.

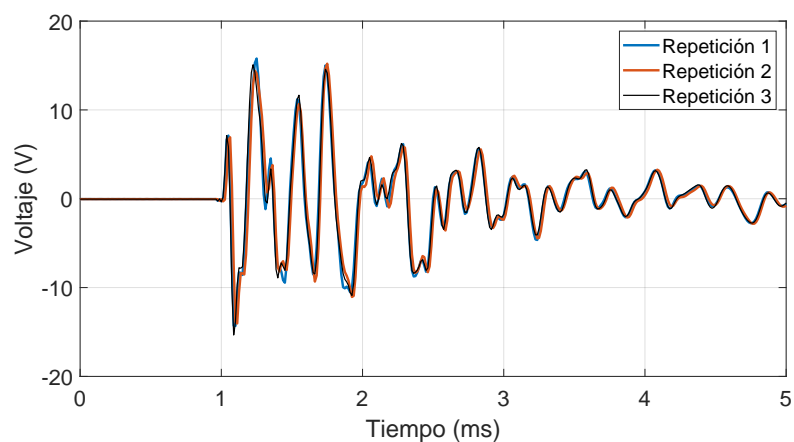
5.4. Ensayos de Diseño

En esta sección describo algunos ensayos básicos. Uno de ellos es el asociado a repetitividad del sistema: obtención de señales iguales ante impactos iguales. Otro ensayo consistió en observar qué tan diferentes son las señales cuando se generan impactos iguales pero sobre distintos puntos de la placa, particularmente sin mantener una simetría específica. Finalmente, hice algunos ensayos para observar cómo varían las señales cuando los impactos son iguales y sobre el mismo punto de la placa, pero cambia el ángulo de incidencia.

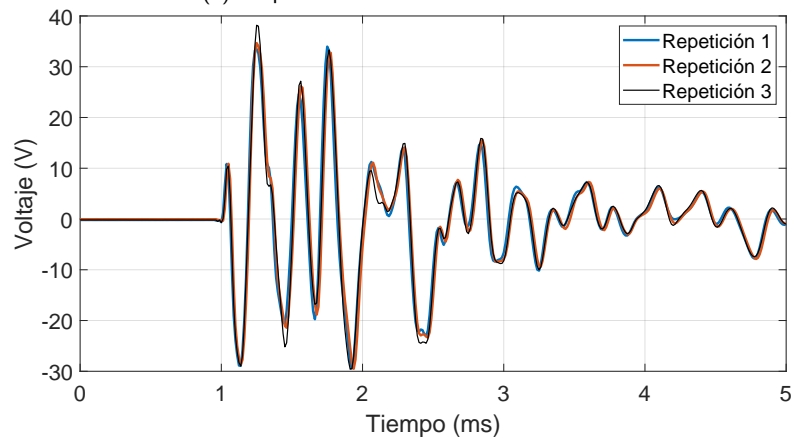
5.4.1. Repetitividad

El sensor requiere un comportamiento determinístico ante los impactos: ante entradas iguales, la salida debe ser la misma. Los ensayos que realicé para evaluar la posibilidad de construir este sensor consistieron en comparar las señales obtenidas ante estímulos esencialmente iguales. En la figura 5.12 muestro ejemplos de las señales obtenidas ante la repetición de estímulos, impactando en el mismo punto de una placa de acrílico. En cada subfigura se presenta el ensayo con un proyectil diferente. Las señales cumplen con el requisito de repetitividad, siendo que las diferencias son adjudicables a la dificultad de lograr estímulos idénticos y al ruido.

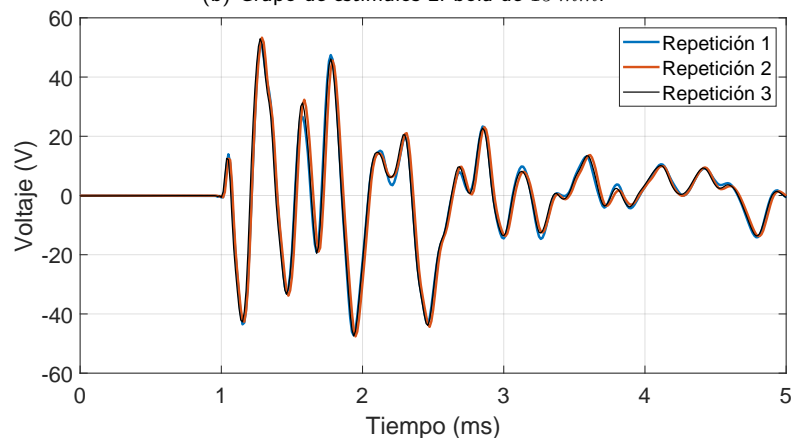
Capítulo 5. Diseño del Sensor de Granizo



(a) Grupo de estímulos 1: bola de 10 mm.



(b) Grupo de estímulos 2: bola de 15 mm.



(c) Grupo de estímulos 3: bola de 20 mm.

Figura 5.12: Ejemplos de repetitividad en la salida del sistema ante estímulos esencialmente iguales. En todos los casos se impactó en el mismo punto de una placa de acrílico cuadrada, soltando el proyectil desde la misma altura.

5.4.2. Señales al Cambiar el Punto de Impacto

Cuando se cambia el punto de impacto, manteniendo la ubicación del transductor, las señales cambian, ya que el recorrido de las ondas es diferente. Utilizando la configuración presentada en la sección 4.1, realicé un ensayo impactando de igual forma en distintos puntos de la placa, para corroborar que el cambio de forma de las señales sea significativo. En la figura 5.13 ejemplifico los resultados.

La forma de las señales obtenidas cambia significativamente, pudiéndose afirmar que esta característica no aporta información para la estimación directa de la energía, pero sí de la posición. El resultado muestra que es viable estimar el punto de impacto mediante correlación cruzada y que las condiciones de borde de una placa cuadrada serían suficientes. De todas formas, descarté el método de correlación cruzada por ser más ineficiente que las otras opciones.

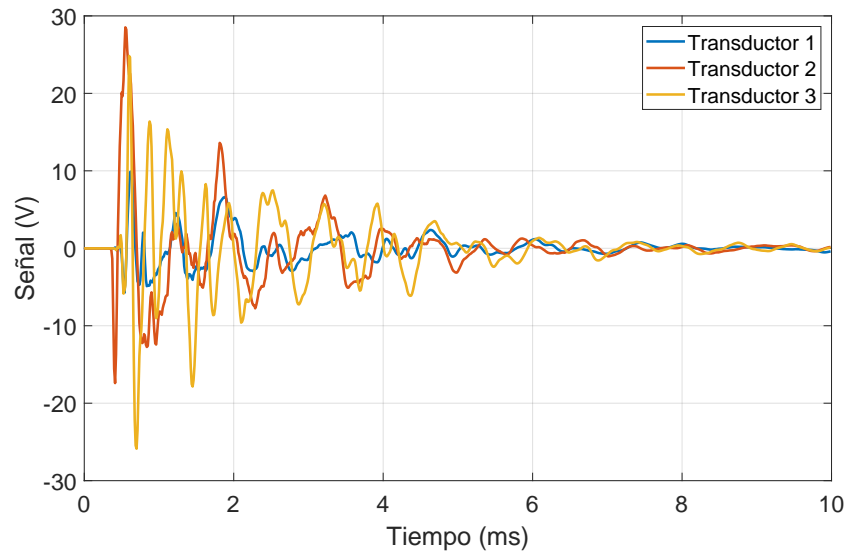


Figura 5.13: Señales adquiridas realizando tres impactos iguales en distintos puntos de una placa cuadrada de acrílico. Los puntos de impacto no guardan una simetría específica con respecto al punto del transductor. Las señales son claramente diferentes, debido a que las ondas recorren caminos distintos para llegar al transductor.

5.4.3. Ángulo de Incidencia

Hice ensayos para observar cómo afecta el ángulo de incidencia (θ) a las medidas. La manera más sencilla de realizar estos ensayos es inclinar la base del *SGran* y soltar los proyectiles verticalmente. Se tiene entonces la situación de la figura 5.14, en la que la relación entre la señal obtenida incidiendo de forma oblicua ($v_{oblicua}(t)$) y señal obtenida incidiendo de forma perpendicular ($v(t)$) cumple la relación de la ecuación (5.3) y por lo tanto las energías respectivas ($E_{señal}^{oblicua}(t)$ y $E_{señal}^{perpendicular}(t)$) cumplen la relación de la ecuación (5.4).

En este aspecto, es necesario tener en cuenta que, si bien al impactar de forma oblicua se generan también ondas de corte que no se excitan al impactar de forma

Capítulo 5. Diseño del Sensor de Granizo

perpendicular, el transductor no es sensible a ellas, al menos para el rango relevado en los ensayos, $\theta \leq 45^\circ$. Sería interesante profundizar en el estudio, probando con ángulos más cercanos a los 90° . Podría ocurrir que para ángulos mayores las ondas de corte sean convertidas a ondas longitudinales al interactuar con los bordes de la placa y dichas ondas sí serían percibidas por el transductor. Este tema queda planteado como trabajo a futuro.

$$v_{oblicua}(t) = v(t)\cos(\theta) \quad (5.3)$$

$$E_{señal}^{oblicua} = E_{señal}^{perpendicular} \cos^2(\theta) \quad (5.4)$$

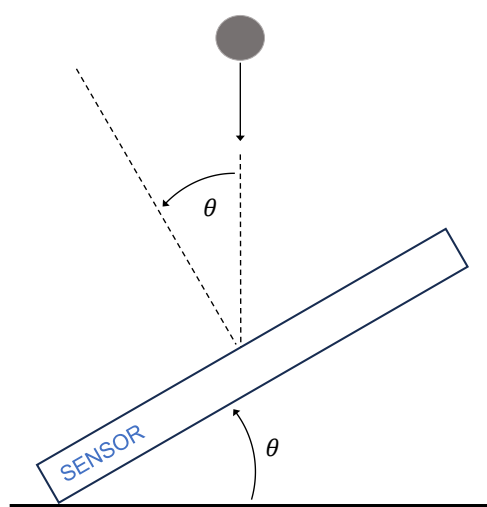
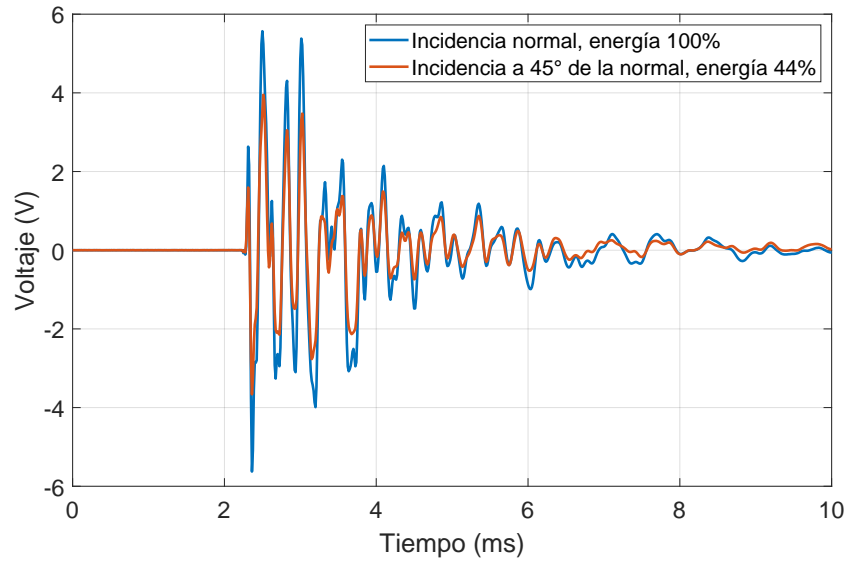


Figura 5.14: Esquema de ensayos con incidencia oblicua. Se gira el sensor un ángulo θ , por lo que el proyectil incide con el mismo ángulo respecto a la normal.

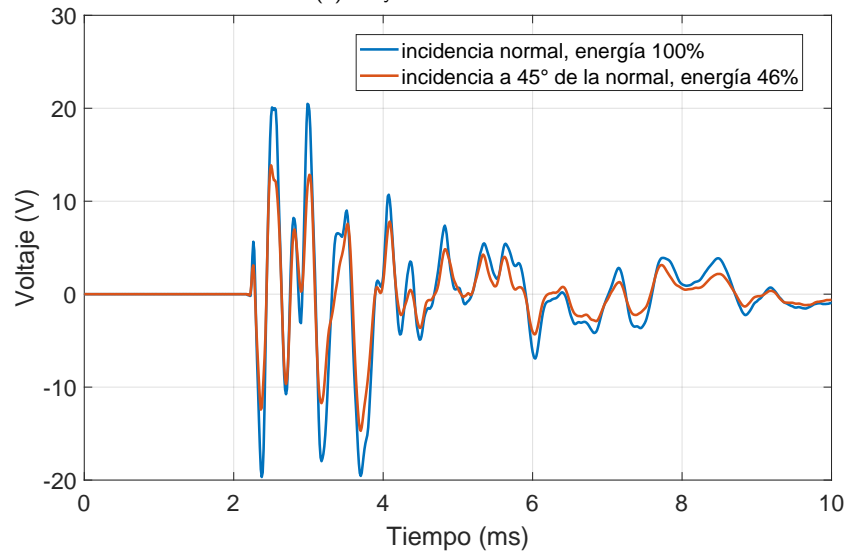
En los ensayos preliminares observé que al impactar sobre el sensor sin cambiar ninguna variable salvo el ángulo de incidencia, se cumple la relación de la ecuación (5.3), siendo que la señal conserva su forma, sufriendo igual atenuación para todas las frecuencias de interés, como se muestra en la figura 5.15. En los ejemplos, el ángulo es de 45° y la atenuación en energía es cercana al 50 % que se espera según la ecuación (5.4). La diferencia corresponde a un error de menos de 4° en la medida del ángulo.

Un estudio profundo de este tema, así como la detección automática del ángulo de incidencia, corresponden a los trabajos futuros. El ángulo de incidencia en la práctica dependerá del viento. En [46, 71] se plantea cómo determinar el ángulo medio de incidencia de las piedras usando paneles verticales orientados a cada punto cardinal.

5.4. Ensayos de Diseño



(a) Proyectil de 10 mm.



(b) Proyectil de 25 mm.

Figura 5.15: Señales adquiridas impactando con el sensor a 45°.

Figura 5.16: Señales obtenidas incidiendo de forma perpendicular y con un ángulo de $\theta = 45^\circ$ sobre una placa de acrílico.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 6

Calibración del Sensor de Granizo

El proceso de calibración es el que nos permite relacionar los valores obtenidos con valores convencionalmente verdaderos para la comunidad internacional [125]. Para relacionar la energía eléctrica de las señales adquiridas en el piezoeléctrico central con la energía mecánica de los proyectiles que impactan en el sensor de granizo es necesaria una calibración.

En esta sección explico los modelos que utilicé para obtener la energía de impacto de los proyectiles a partir de las señales crudas. Luego de analizar los posibles modelos, determiné la necesidad de calibrar dos modelos, con un total de cinco parámetros.

El **primer modelo**, relaciona la energía de impacto en el centro del sensor con la energía eléctrica de la señal adquirida. Los impactos se realizan sobre el centro de la placa, en un rango conocido de energías. El **segundo modelo** representa la atenuación de la energía eléctrica obtenida al realizar impactos de energía constante recorriendo un radio de la placa del sensor hacia el borde. Incorporar este modelo permite que, ante impactos de igual energía, la energía estimada sea la misma independientemente del punto de impacto sobre el sensor.

Como el segundo modelo requiere del reconocimiento automático de la distancia entre el punto de impacto y el centro, propongo una técnica de bajo costo computacional que requiere el ajuste de un **tercer modelo**.

En estos ensayos, utilicé la tarjeta adquisidora *NI USB6009* con una PC con *Matlab*[®] y el *Instrument Control Toolbox*. Configuré la NI con rango de entrada $\Delta V = \pm 10 V$, frecuencia de muestreo $f_s = 20 kHz$ y una ventana de adquisición $\Delta T = 0,5 s$. Utilicé una frecuencia de corte del filtro pasa-bajos de $5 kHz$, que tiene la ventaja de dejar fuera la frecuencia de resonancia de los transductores ($9 kHz$), donde el comportamiento no es suave. En la etapa de acondicionamiento del transductor central utilicé el divisor descrito en la sección 3.1.2, que es aproximadamente $\times 10$ para frecuencias entre $1 kHz$ y $5 kHz$. Recordar que la impedancia de salida de los transductores hace que el sistema se comporte como si tuviera un filtro pasa-altos con frecuencia de corte en aproximadamente $1 kHz$ (sección 3.1.2), motivo por el que no es necesario un filtro pasa-altos digital.

La figura 6.1 resume el proceso de estimación de la energía de un impacto (E_{impacto}) a partir de las señales obtenidas por los piezoeléctricos. Cuando ocurre

Capítulo 6. Calibración del Sensor de Granizo

un impacto, ambos transductores generan señales, las cuales son adquiridas. Se calcula la energía de la señal del transductor central ($E_{señal}$) y a partir de ella se estima la energía del impacto suponiendo que el mismo fue en el centro de la placa, mediante la constante G_{EE} , obteniendo un **resultado parcial**. Se obtiene la diferencia de tiempos de vuelo de ambas señales. Se estima la distancia del impacto al centro de la placa ($r_{Impacto}$) y se la usa para corregir el **resultado parcial** conociendo la atenuación debida a la distancia al centro ($A(r_{Impacto})$), obteniendo así la estimación de la energía del impacto. La ecuación (6.1) representa el proceso completo.

En las figuras de esta sección, cada punto representa un *clúster* de aproximadamente 5 resultados. La incertidumbre representada contempla incertidumbres tipo A y tipo B [126], donde la incertidumbre tipo A es estadística y la tipo B es la asociada al proceso de medición, lo que contempla precisión y resolución del instrumento de medida, habilidad del operador y constantes asociadas al cálculo.

$$E_{impacto} = G_{EE} \frac{E_{señal}(r_{Impacto})}{A(r_{Impacto})} \quad (6.1)$$

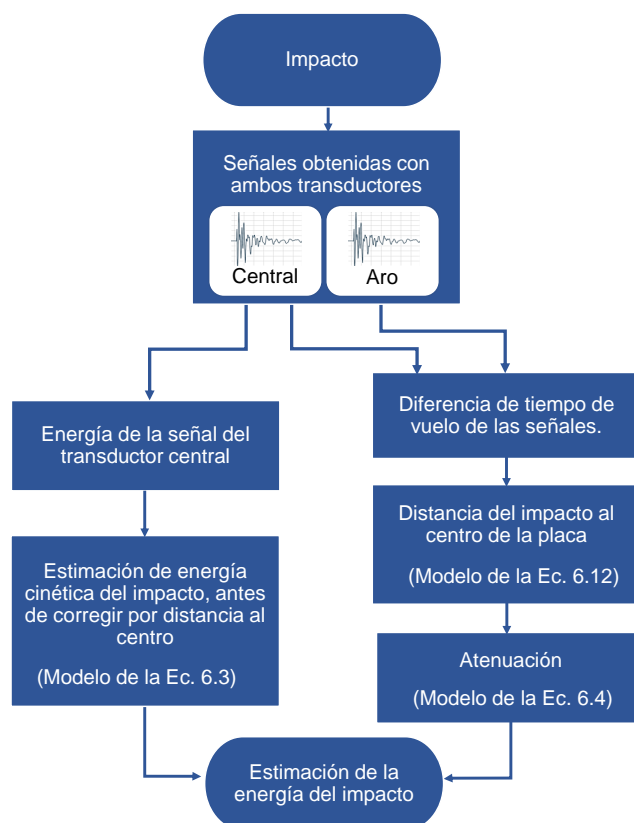


Figura 6.1: Diagrama de flujo del proceso de estimación de la energía del proyectil que impacta el sensor.

6.1. Energías Involucradas en el Impacto

Para analizar las energías involucradas en el instante de impacto, utilicé los videos en cámara lenta descritos en la sección 4.4. La ecuación (6.2) es equivalente a la ecuación (4.1) pero en el instante mismo en torno al impacto. Por conservación de la energía en los ensayos con bolitas, las energías potenciales U_P y U_P^{rebote} se sustituyen respectivamente por las energías cinéticas del proyectil justo antes (E_{total}) y justo después (E_{rebote}) del impacto. Además, expandí E_{otros} en distintas fuentes de disipación de energía. En la figura 6.2 represento estas energías gráficamente.

$$E_{total} = E_{transferida} + E_{rebote} + E_{calor} + E_{sonido} + E_{rotura} \quad (6.2)$$

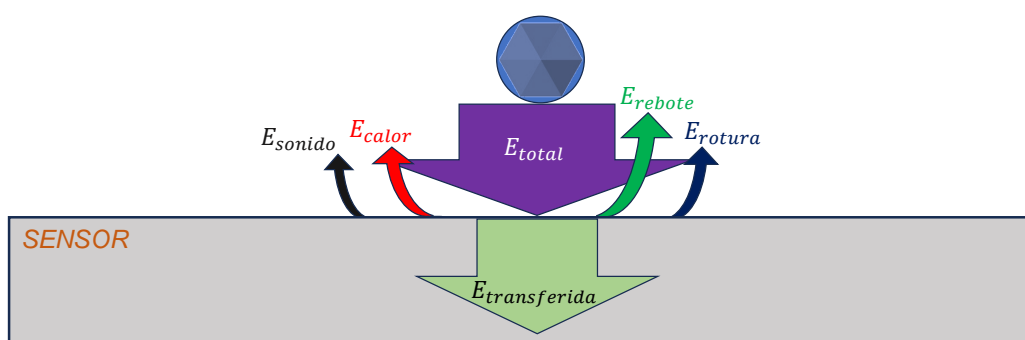


Figura 6.2: Representación gráfica de las energías involucradas en el instante de impacto.

Al momento del impacto, la energía total E_{total} se distribuye como: una porción de energía transferida a la placa, $E_{transferida}$, una porción de energía conservada por el proyectil, E_{rebote} , y una porción de energía que se disipa, ya sea como calor E_{calor} , como sonido E_{sonido} o debido a la rotura del granizo E_{rotura} . $E_{transferida}$ es la energía asociada a las vibraciones provocadas en la placa y es la que se puede medir directamente con los piezoeléctricos.

En las piedras de granizo reales el rebote no siempre ocurre, ya que depende de su estructura interna. Al utilizar proyectiles sustitutos, los videos en cámara lenta permiten medir E_{rebote} , como describí en la sección 4.4. Verifiqué experimentalmente que el rebote es un término despreciable en casi todas las situaciones, pudiendo introducir alguna diferencia para impactos de granizo de diámetro pequeño. El rebote depende del material de la placa [2, 5] y de el método de fijación. Pensando en el poder destructivo de las piedras de granizo, la interacción de una misma piedra es diferente si impacta contra una estructura rígida, como un panel solar, que si impacta contra una estructura blanda, como un fruto. Considerando estas observaciones y siendo que es imposible medir E_{rebote} sin una cámara, no la considero en el análisis posterior.

La disipación de energía como E_{calor} y E_{sonido} ocurre tanto en el impacto de la piedra de granizo natural como en el del proyectil sustituto. La disipación como E_{rotura} está estrechamente ligada a la estructura de la piedra de granizo y no es posible modelarla con los proyectiles de acero. En este trabajo, considero

Capítulo 6. Calibración del Sensor de Granizo

que E_{calor} , E_{sonido} y E_{rotura} son despreciables frente a $E_{transferida}$. De los tres fenómenos, el que más podría afectar los resultados es E_{rotura} , que es un caso de interés para trabajos futuros.

De aquí en más, le llamo $E_{impacto}$ a la energía que debe reportar el sensor de granizo. Esta energía la calibro contra la energía potencial gravitatoria del proyectil antes de soltarlo, que en *Energy Matching* corresponde a E_{total} .

6.2. Relación entre Energía de Impacto y Energía de la Señal

Utilizo el modelo más sencillo posible para relacionar la energía de la señal adquirida con el transductor central y la energía de impacto, que es el de la ecuación (6.3) (figura 6.3). En este modelo, $E_{impacto}$ se relaciona proporcionalmente con $E_{señal}$, mediante un factor de ganancia G_{EE} adimensionado. En este caso, sólo se consideran impactos sobre el centro de la placa. El modelo cumple con una condición intuitiva: cuando no se detecta una señal con energía por encima del nivel de ruido, se puede suponer que no hubo un impacto.

Debido a la forma de cálculo de la energía de la señal (sección 3.2.1), el parámetro G_{EE} depende del tiempo de detección. Esto es porque se promedia dividiendo entre el total (L), de puntos de la señal, que a frecuencia de muestreo (f_s) fija varía proporcionalmente con el largo de la ventana observada (ΔT). Entonces, si se decide cambiar el largo de la ventana, es necesario recalibrar G_{EE} . Esta es una ventaja de la elección de tiempo de detección fijo, ya que de otra forma se debería revisar el cálculo de la energía.

$$E_{impacto} = G_{EE}E_{señal}(0) \quad (6.3)$$

Físicamente, la medida de $E_{señal}$ corresponde a la energía disipada por la señal en una resistencia de 1Ω . Se obtiene así una unidad proporcional a los *Joules*, que es la misma unidad de $E_{impacto}$.

En las señales, aílo los impactos y obtengo la energía $E_{señal}$, considerando solamente una ventana de $10 ms$ alrededor del máximo. El procesamiento para aislar los impactos lo describo en la sección A.0.2.

Los resultados mostrados en la figura 6.3 y la tabla 6.1 muestran un ajuste muy satisfactorio entre las observaciones y el modelo de energía transferida. Observar que el NRMSE del conjunto de evaluación duplica el del conjunto de calibración, lo que podría deberse a que el rango de energías calibrado fue menor al evaluado.

Tabla 6.1: NRMSE calculado para el modelo de energía cuando los impactos son en el centro.

Calibración	Evaluación
0,14	0,30

6.3. Atenuación por Distancia del Impacto al Centro de la Placa

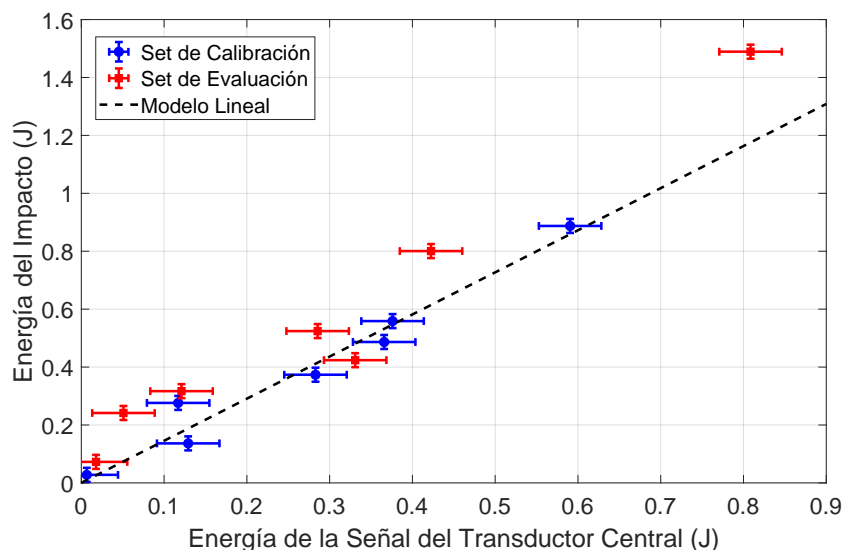


Figura 6.3: Representación gráfica del modelo de la ecuación (6.3) calibrado a partir de parejas $(E_{señal}(0), E_{impacto})$ correspondientes a impactos en el centro de la placa. Los datos fueron separados en *clústers*. Los círculos azules corresponden al set de calibración, mientras que los cuadrados rojos corresponden al set de evaluación. Los puntos se muestran con incertidumbre, considerando los tipos A y B. Parámetro calibrado: $G_{EE} = 1,45$.

6.3. Atenuación por Distancia del Impacto al Centro de la Placa

Cuanto más lejos del centro de la placa ocurre el impacto, menor es la energía de la señal capturada por el transductor central, como se muestra en la figura 6.4.

Tratándose de ondas bidimensionales, existen dos fenómenos físicos que afectan significativamente a la energía detectada a distancia $r_{Impacto}$ del punto de generación de las ondas. Por un lado está el fenómeno de *atenuación por absorción* y por otro lado el fenómeno de *difracción*. Si bien podría considerar ambos fenómenos simultáneamente, es conveniente simplificar los modelos para evitar el sobreajuste a los datos de calibración. Esto se debe a la imposibilidad de obtener un banco de datos mayor, debido al costo en tiempo de obtención de cada dato.

La **atenuación por absorción** ($A(r_{Impacto})$) corresponde a la disipación de energía en forma de calor cuando la onda viaja a través del medio material. El factor de atenuación por absorción se modela como una exponencial decreciente que vale 1 en $r_{Impacto} = 0$ y vale 0 en $r_{Impacto} \rightarrow \infty$. Para compensar dividiendo por el factor de atenuación, no es conveniente trabajar con valores tendiendo a 0. Entonces, busco una curva que tienda a un valor pequeño positivo. En la práctica, este valor nunca se alcanza porque la placa es finita. El modelo que utilicé para la atenuación por absorción es el de la ecuación (6.4).

La **difracción** ($D(r_{Impacto})$) se asocia a la apertura del campo de onda bidimensional a medida que se aleja del punto de origen, que provoca que la amplitud de las crestas sea inversa a la distancia recorrida. En la ecuación (6.5) presento el

Capítulo 6. Calibración del Sensor de Granizo

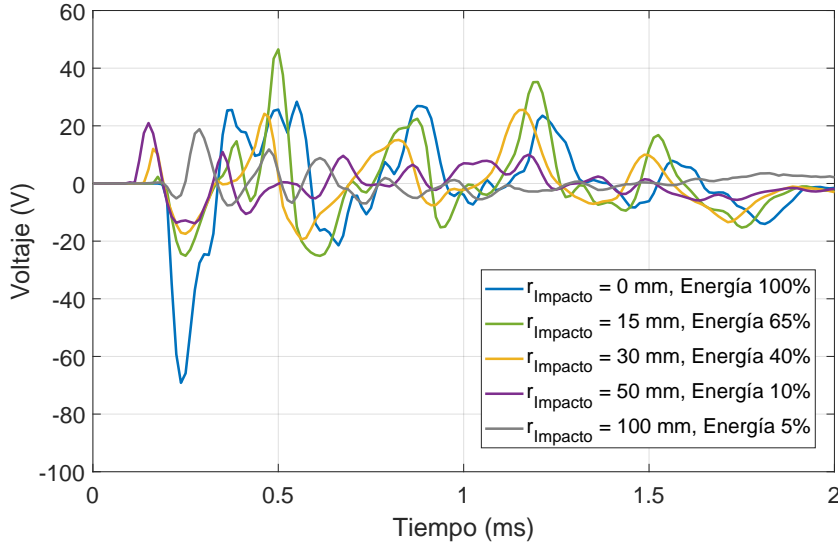


Figura 6.4: Señales obtenidas impactando con igual energía a distintas distancias del centro de la placa. Para cada señal, se indica la distancia y el porcentaje de energía de la señal con respecto a la señal obtenida al impactar en el centro de la placa.

modelo que utilicé, que contempla la difracción mediante el término que depende de forma inversa con $r_{Impacto}$. Este modelo tiene dos parámetros útiles en la práctica, b_1 que incorpora un offset y b_2 que contempla que el transductor central no es puntual.

$$A(r_{Impacto}) = a_1 + (1 - a_1)e^{-a_2 r_{Impacto}} \quad (6.4)$$

$$D(r_{Impacto}) = 1 - \frac{b_1 r_{Impacto}}{b_2 + r_{Impacto}} \quad (6.5)$$

En la figura 6.5 comparo el ajuste de los datos con ambos modelos. Calculo el factor de atenuación experimental como en la ecuación (6.6). Todos los impactos se realizan con la misma energía $E_{impacto}$. $E_{señal}(r_{Impacto})$ corresponde al impacto a una distancia $r_{Impacto}$ del centro de la placa, mientras que $E_{señal}(0)$ corresponde al impacto sobre el centro de la placa.

$$A_{experimental}(r_{Impacto}) = \left. \frac{E_{señal}(r_{Impacto})}{E_{señal}(0)} \right|_{E_{impacto}} \quad (6.6)$$

Preferí que la compensación de la energía debida a este fenómeno fuera más bien por defecto que por exceso, ya que la sobre-compensación puede llevar a falsas alarmas debidas a reportes de granizo de tamaño exagerado. Esto podría ocurrir especialmente cuando los impactos son muy cercanos al borde de la placa. Una estrategia útil en este sentido es limitar el factor de compensación. Así, todos los impactos detectados a una distancia mayor que $r_{Impacto} = 8,5 \text{ cm}$ los compenso con el mismo factor. Esto tiene la ventaja adicional de relajar los requerimientos sobre la detección de la distancia del impacto al centro cuando el impacto es cercano al

6.3. Atenuación por Distancia del Impacto al Centro de la Placa

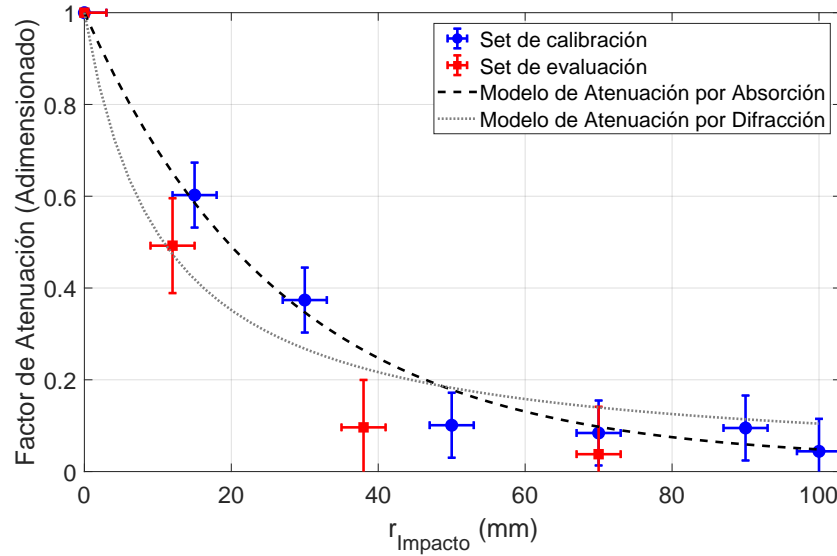


Figura 6.5: Representación gráfica de los modelos de atenuación de la energía de la señal que alcanza al transductor central, según la distancia del punto de impacto al centro de la placa de las ecuaciones (6.4) (Absorción) y (6.5) (Difracción). Modelos calibrados a partir de parejas $(A_{experimental}, r_{Impacto})$, donde $A_{experimental}$ se calcula como en la ecuación (6.6). Los datos fueron separados en *clústers*. Los círculos azules corresponden al set de calibración, mientras que los cuadrados rojos corresponden al set de evaluación. Los puntos se muestran con incertidumbre, considerando los tipos A y B. Parámetros calibrados: $a_1 = 0,024$ y $a_2 = 0,037 \text{ mm}^{-1}$, $b_1 = 0,99$ y $b_2 = 10,6 \text{ mm}$.

borde de la placa, lo que permite trabajar bien con el transductor auxiliar del que se dispone actualmente.

Para generar los datos de calibración utilicé el *SGran*, impactando a distancias conocidas del centro de la placa. Con ayuda de un papel carbónico, es sencillo verificar la distancia midiéndola de forma tradicional.

Los valores obtenidos para el NRMSE se presentan en la tabla 6.2. Si bien el NRMSE del conjunto de evaluación es mejor cuando se considera el modelo de difracción, observando gráficamente los resultados de ambos modelos (figura 6.5), elegí continuar trabajando con el modelo de Atenuación por Absorción (ecuación (6.4)), ya que es más consistente en compensar por defecto y no por exceso.

Tabla 6.2: NRMSE calculado para los modelos de atenuación por distancia al centro considerados.

	Calibración	Evaluación
Absorción	0,22	0,67
Difracción	0,56	0,47

6.4. Detección de la Distancia del Impacto al Centro de la Placa

Para detectar automáticamente la distancia del impacto al centro de la placa, utilizo la diferencia de tiempo de vuelo de las ondas a los dos transductores. La figura 6.6 ayuda a comprender el método.

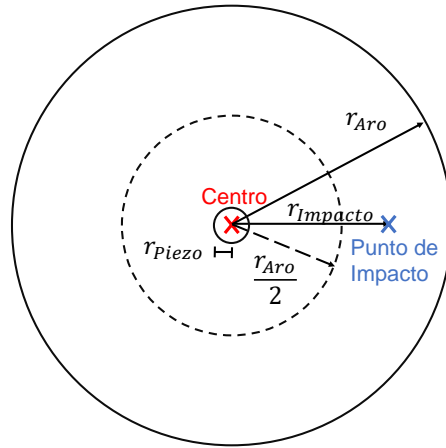


Figura 6.6: Referencia para la explicación de la estimación de la distancia del impacto al centro de la placa.

La cara de la placa expuesta al granizo es circular, de centro C . Supongo que el transductor auxiliar, con forma de anillo, de radio r_{Aro} , es de grosor nulo y se encuentra exactamente sobre el borde de la placa. Le llamo r_{Piezo} al radio del transductor piezoeléctrico que se encuentra colocado en el centro de la placa. Llamo $r_{Impacto}$ a la distancia que quiero obtener, que es la distancia del punto de impacto al centro de la placa. Le llamo ν a la velocidad de grupo de las ondas acústicas en el material de la placa. La velocidad para las distintas frecuencias que componen a la onda no es exactamente la misma, pero considerando que el trayecto directo del punto de impacto al receptor es corto, puedo suponer que el primer frente de onda no se deforma significativamente por este motivo y trabajar con la velocidad de grupo. Le llamo t_{Vuelo}^C y t_{Vuelo}^A al tiempo de vuelo al transductor central (ecuación (6.7)) y el tiempo de vuelo al transductor auxiliar (ecuación (6.8)) respectivamente.

Trabajando a la escala de los tiempos de vuelo, no se dispone de información absoluta del instante del impacto, ya que el tiempo que se conoce es cuándo el primer frente de onda alcanza a uno de los transductores. Si bien no se dispone de los tiempos de vuelo, sí se puede medir la diferencia de los tiempos de vuelo desde el punto de impacto a cada uno de los transductores. Como excepción, cuando el impacto es sobre el transductor central, se puede decir que $t_{Vuelo}^C = 0$, por lo que $\Delta t_{Vuelo} = t_{Vuelo}^A$ (ver ecuación (6.7)).

Se puede dividir el problema en el caso en que el impacto fue sobre el área

6.4. Detección de la Distancia del Impacto al Centro de la Placa

del transductor central y el caso en que no. Dado que el área del transductor es sumamente pequeña en relación con el área de la placa, en la mayoría de los casos se estará trabajando fuera, pero de todas formas se tiene en cuenta el caso excepcional, por completitud.

Tomando el signo de la diferencia de tiempos de vuelo Δt_{Vuelo} como en la ecuación (6.9), obtengo Δt_{Vuelo} en función de r_{Aro} , r_{Piezo} , ν y $r_{Impacto}$ (ecuación (6.10)). Luego despejo la distancia $r_{Impacto}$ para las dos regiones de la placa consideradas. En ambos casos, la relación es una recta. La pendiente de la recta correspondiente a la región sobre el piezoeléctrico es el doble que en la otra región, como se muestra en la figura 6.7.

$$t_{Vuelo}^C = \begin{cases} \frac{r_{Impacto} - r_{Piezo}}{\nu} & \text{si } r_{Impacto} > r_{Piezo} \\ 0 & \text{si } r_{Impacto} \leq r_{Piezo} \end{cases} \quad (6.7)$$

$$t_{Vuelo}^A = \frac{r_{Aro} - r_{Impacto}}{\nu} \quad (6.8)$$

$$\Delta t_{Vuelo} = t_{Vuelo}^A - t_{Vuelo}^C \quad (6.9)$$

$$\Delta t_{Vuelo} = \begin{cases} \frac{1}{\nu}(r_{Aro} + r_{Piezo} - 2r_{Impacto}) & \text{si } r_{Impacto} > r_{Piezo} \\ \frac{1}{\nu}(r_{Aro} - r_{Impacto}) & \text{si } r_{Impacto} \leq r_{Piezo} \end{cases} \quad (6.10)$$

$$r_{Impacto} = \begin{cases} \frac{1}{2}(r_{Aro} + r_{Piezo}) - \frac{1}{2}\nu\Delta t_{Vuelo} & \text{si } r_{Impacto} > r_{Piezo} \\ r_{Aro} - \nu\Delta t_{Vuelo} & \text{si } r_{Impacto} \leq r_{Piezo} \end{cases} \quad (6.11)$$

En la práctica, tengo el problema de que el aro implementado es simplemente una aproximación, por lo que el modelo se cumple solamente cuando se está lejos del borde. Este es un motivo adicional para compensar con el mismo factor todos los impactos detectados a más de 8,5 cm del centro, ya que la incertidumbre en la posición crece al acercarse al borde de la placa. Observar que, en la región de la curva en que se tiene este problema, la pendiente es poco pronunciada y en la región en que la pendiente es más pronunciada sí se tiene una buena medida de la distancia.

Atendiendo a que el aro es una aproximación y que la velocidad de las ondas en el material no se conoce con exactitud, en lugar de utilizar el modelo de la ecuación (6.11), calibré el modelo presentado en la ecuación (6.12)

$$r_{Impacto} = \begin{cases} a_3 - a_4\Delta t_{Vuelo} & \text{si } r_{Impacto} > r_{Piezo} \\ r_{Aro} + a_4 2 \Delta t_{Vuelo} & \text{si } r_{Impacto} \leq r_{Piezo} \end{cases} \quad (6.12)$$

Usualmente se utiliza la técnica de correlación cruzada para obtener la diferencia de tiempos de vuelo. Este algoritmo tiene el problema de ser costoso en cómputo, lo que es problemático cuando se tiene poca capacidad de cómputo o se necesitan velocidades de cómputo altas. En los ensayos de calibración realizo el procesamiento *offline* a partir de la base de datos que generé, pero el objetivo final es desarrollar un sensor que opere en campo y estime energía de impactos en tiempo real, por lo que es importante reducir el costo de los algoritmos.

Capítulo 6. Calibración del Sensor de Granizo

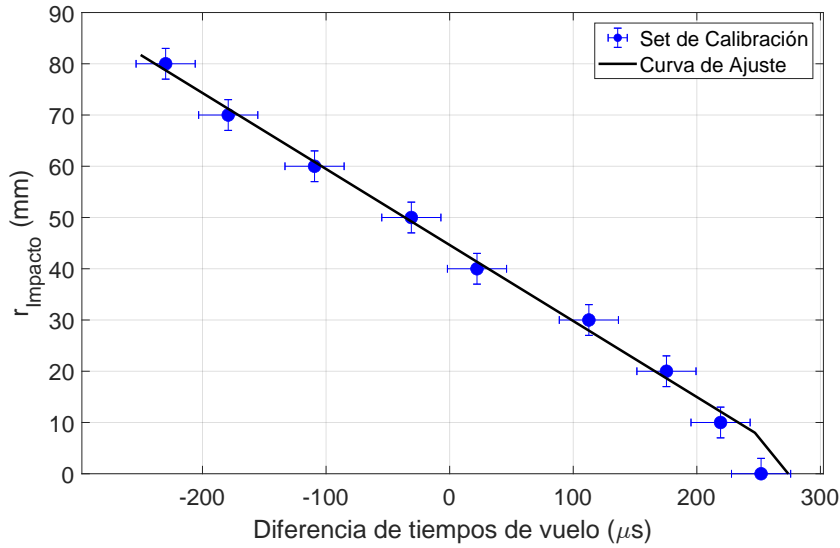


Figura 6.7: Representación gráfica del modelo de la ecuación (6.12) calibrado a partir de parejas ($r_{Impacto}, \Delta t_{Vuelo}$). Los datos fueron separados en *clústers*. Los círculos azules corresponden al set de calibración, mientras que los cuadrados rojos corresponden al set de evaluación. Los puntos se muestran con incertidumbre, considerando los tipos A y B. Parámetros calibrados: $a_3 = 45 \text{ mm}$, $a_4 = -150 \text{ mm/ms}$.

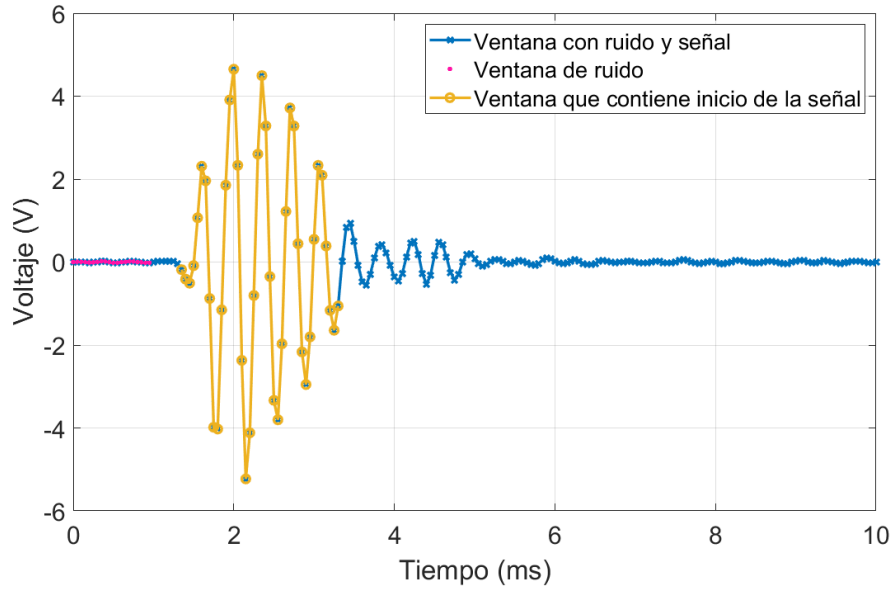
Además, las diferencias de tiempos de vuelo están en el orden de los microsegundos, por lo que utilizando $f_s = 20 \text{ kHz}$ a priori no se tiene muy buena resolución. Para salvar este problema, utilizo la función *compute difference time of flight*, que describo en la sección A.0.2. Es importante destacar que, si bien el método siempre halla el cruce por cero unos instantes antes de cuando se da en la señal, esto ocurre sistemáticamente para ambas señales, por lo que se compensa al calcular la diferencia de tiempos de vuelo.

Para determinar un punto a detectar consistentemente, observé que las señales asociadas al impacto comienzan siempre con una polaridad negativa, debido a que el impacto ocurre siempre en la cara superior de la placa y que los transductores están todos pegados contra la misma cara interna de la placa y cableados respetando la polaridad estándar, en la que el borne de la cerámica es el positivo. Es posible detectar el comienzo de la señal, con baja precisión, utilizando un umbral de tensión negativa (figura 6.8a) y luego aumentar la precisión detectando el primer cruce por cero en una ventana de tiempo asociada al punto detectado mediante el umbral (figura 6.8b).

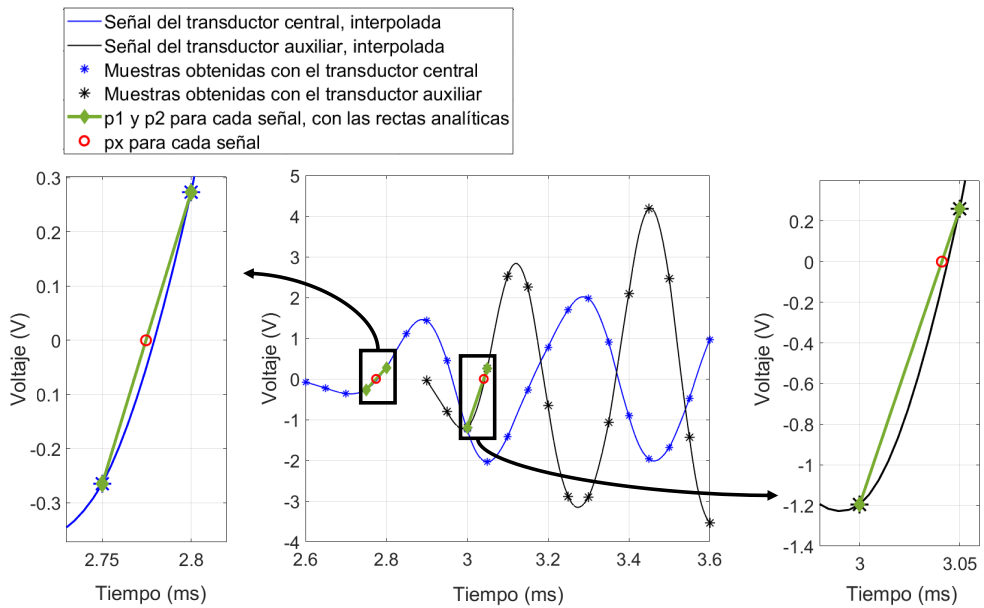
En este punto, estudié si la interpolación mejoraba los resultados. Agregar puntos de interpolación hace el algoritmo significativamente más pesado computacionalmente, para obtener un beneficio insignificante, por lo que descarté esta posibilidad.

Los algoritmos que utilizo controlan que $r_{Impacto}$ no salga de los valores esperados. Por un lado, $r_{Impacto} \geq 0$, ya que es una distancia. Además, $r_{Impacto}$ no puede ser superior al radio de la placa, que es de $12,5 \text{ cm}$. Incluso, como mencioné antes, elegí limitar $r_{Impacto}$ a $8,5 \text{ cm}$ para el algoritmo de compensación. En

6.4. Detección de la Distancia del Impacto al Centro de la Placa



(a) Para cada señal, se toma una ventana fija a partir de que la señal sale del umbral de ruido.



(b) En la ventana hallada, se detecta el primer cruce por cero con pendiente ascendente. La diferencia de tiempos de vuelo es el tiempo entre ambos cruces por cero. Al centro: señales superpuestas, parte inicial de cada ventana. A la izquierda: acercamiento de la señal del transductor central. A la derecha: acercamiento de la señal del transductor auxiliar.

Figura 6.8: Detección automática de diferencia de tiempos de vuelo.

Capítulo 6. Calibración del Sensor de Granizo

los casos en que el valor obtenido para $r_{Impacto}$ resulta fuera de los límites, elijo no compensar. Esto resulta en una subestimación de la energía del impacto, pero evita falsas alarmas, mientras que el impacto igual resulta contabilizado, lo que es importante para conocer la frecuencia de impactos.

Los resultados que obtengo con este tipo de procesamiento son sumamente satisfactorios y se pueden observar en la figura 6.9 y la tabla 6.3.

Tabla 6.3: NRMSE calculado para el modelo de estimación de distancia del impacto al centro.

	Calibración	Evaluación
Posición	0,073	0,15

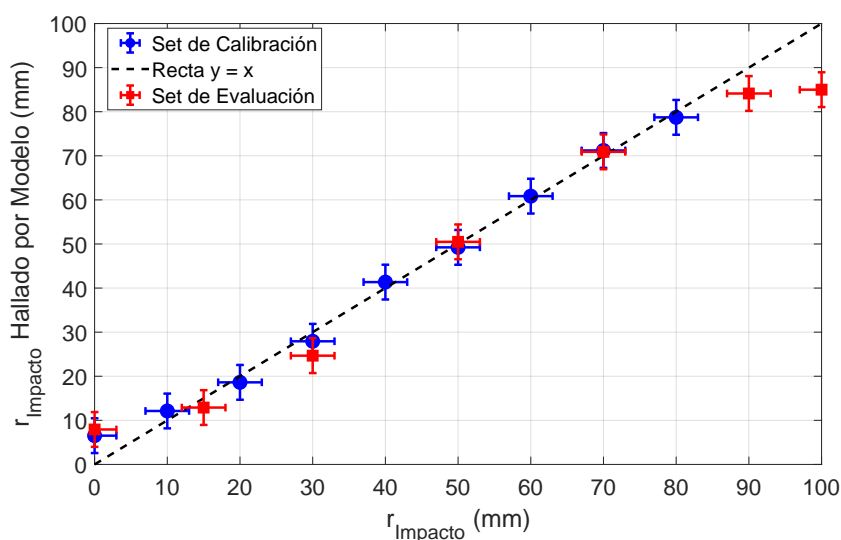


Figura 6.9: Comparación de las distancias obtenidas mediante el procesamiento propuesto, aplicándolo a señales obtenidas de forma controlada, en que la distancia de impacto se midió con una regla.

En el apéndice A describo la base de datos que armé con las señales adquiridas en la etapa de calibración y el código que desarrollé para procesar la información.

6.5. Resultados Finales

En la figura 6.10 presento los resultados de procesar nuevos datos utilizando los modelos calibrados. Las señales fueron obtenidas impactando fuera del centro de la placa. Se muestra la diferencia antes y después de compensar la energía por la distancia al centro de la placa. En este caso es particularmente útil la observación de los NRMSE obtenidos (tabla 6.4), que muestran una mejora sustancial.

Tabla 6.4: NRMSE calculado para el resultado antes de compensar por distancia al centro y después de hacerlo. En este caso, el valor modelo es 100 %.

Antes de compensar	Después de compensar
4,57	0,74

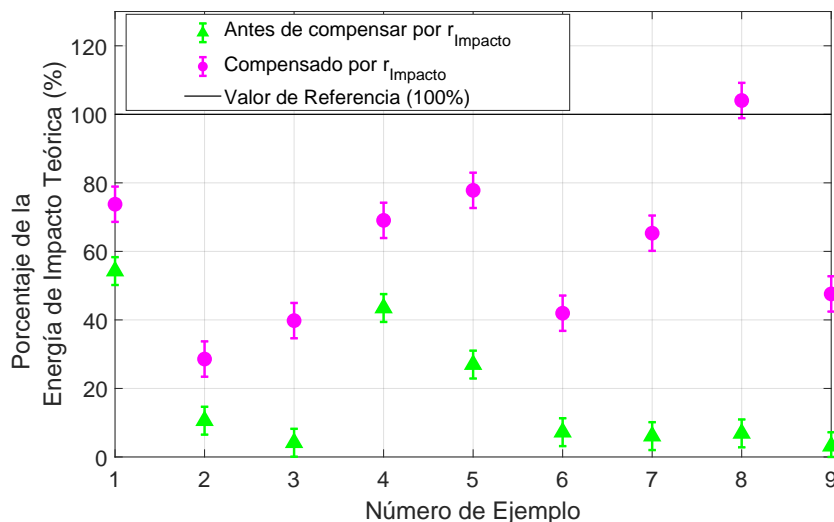


Figura 6.10: Resultados de aplicar los modelos calibrados a nuevos datos.

6.6. Resumen

La tabla 6.5 presenta un resumen de los modelos calibrados y los parámetros obtenidos.

Relación	Ec.	Modelo Matemático	Parámetros
Energía de Impacto dada la Energía de la Señal (impactos en el centro)	(6.3)	$E_{\text{impacto}} = G_{EE} E_{\text{señal}}(0)$	$G_{EE} = 1,45$
Atenuación de la Energía de la Señal dada la Distancia del Impacto al Centro de la Placa	(6.4)	$A(r_{\text{Impacto}}) = a_1 + (1 - a_1)e^{-a_2 r_{\text{Impacto}}}$	$a_1 = 0,024$ $a_2 = 0,037 \frac{1}{\text{mm}}$
Distancia del Impacto al Centro de la Placa dada la medida de Diferencia de Tiempos de Vuelo	(6.12)	$r_{\text{Impacto}} = \begin{cases} a_3 - a_4 \Delta t_{\text{Vuelo}} & \text{si } r_{\text{Impacto}} > r_{\text{Piezo}} \\ r_{\text{Aro}} + a_4 2 \Delta t_{\text{Vuelo}} & \text{si } r_{\text{Impacto}} \leq r_{\text{Piezo}} \end{cases}$	$a_3 = 45 \text{ mm}$ $a_4 = -150 \frac{\text{mm}}{\text{ms}}$
Proceso completo	6.1	$E_{\text{impacto}} = G_{EE} \frac{E_{\text{señal}}(r_{\text{Impacto}})}{A(r_{\text{Impacto}})}$	

Tabla 6.5: Resumen de los modelos calibrados.

6.7. Discusión

Sin considerar daños permanentes, la calibración se verá afectada por la temperatura, el envejecimiento del acrílico y el envejecimiento de los transductores. Por el primer factor, sería interesante realizar un trabajo que permita evaluar la

Capítulo 6. Calibración del Sensor de Granizo

influencia de la temperatura las medidas. Por los dos últimos factores, es necesario establecer un periodo de validez tras el cual es necesario recalibrar. Esto es una práctica habitual en los equipos de medición. Ambos estudios quedan planteados para realizarlos como trabajos futuros.

Capítulo 7

Ensayos en Exteriores

Si bien el objeto de la tesis es el diseño, la fabricación y la calibración del sensor, la continuación natural del trabajo son las pruebas de campo, por lo que desarrollé un primer prototipo de exteriores para evaluar su funcionamiento.

En este capítulo describo el acondicionamiento de los componentes del sensor para su exposición a la intemperie y al funcionamiento continuo y la instalación del prototipo en exteriores. Una vez diseñado el ensayo, propuse y dirigí un *Módulo de Taller de Ingeniería Eléctrica* que contribuyó a esta adaptación.

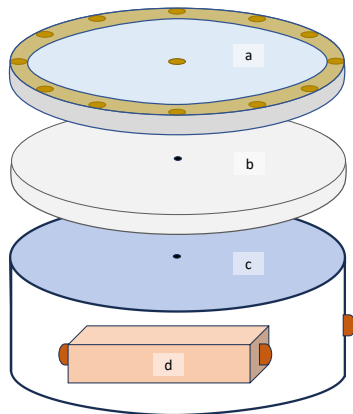
7.1. Acondicionamiento Físico

Para colocar el sistema a la intemperie, es esencial proteger la electrónica. Utilicé el diseño de la figura 7.1a. En una caja estanca (*d*), se colocan la tarjeta adquisidora y la etapa de acondicionamiento de señales. La caja tiene dos prensa-cables, uno para la conexión con los transductores y otro para el cable USB que se utiliza para comunicación y alimentación eléctrica. La caja está a su vez dentro de un recipiente de plástico de 25 cm de diámetro (*c*), sobre cuya tapa se fija la placa de acrílico (*a*), mediante una capa de polietileno expandido (*b*) que funciona de aislante acústico. Los cables de los transductores entran directo al recipiente exterior a través de un orificio en la tapa. El cable USB entra al recipiente exterior por un orificio lateral con prensa-cables.

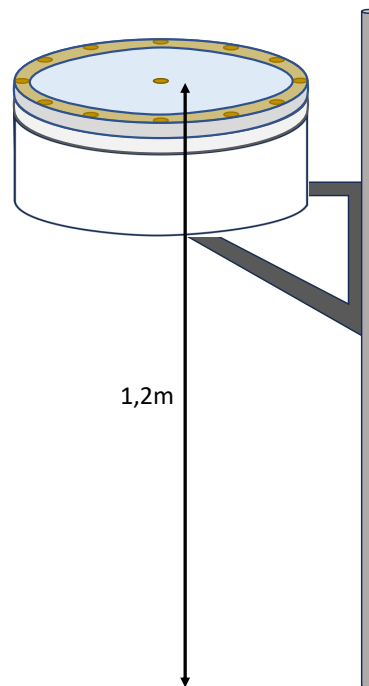
Además, el recipiente se rellena de poliuretano expandido, añadiendo otro nivel de protección a la caja estanca y brindando mayor firmeza al recipiente exterior. El sensor queda conformado por todo el conjunto mencionado. La forma de fijar el sensor es la de la figura 7.1b. Se lo coloca a aproximadamente 1,2 m de altura, sostenido mediante una escuadra a un poste firmemente enclavado en el suelo.

Instalé el prototipo en la terraza del Instituto de Ingeniería Eléctrica, FIng - Udelar. En estos ensayos aún se utiliza una PC, por lo que el USB debe ser suficientemente largo para llegar a la PC que se encuentra en la sala junto a la terraza. En este caso, utilicé un USB de 3 m. En la figura 7.2 muestro el sensor instalado.

Capítulo 7. Ensayos en Exteriores



(a) Acondicionamiento del sensor para instalarlo en exteriores. a- cavidad acústica con transductores embebidos; b- aislamiento de poliestireno expandido, con orificio para cables de transductores; c- recipiente exterior, con orificio para cables de transductores en la tapa y prensa-cables para USB en el lateral; d- caja estanca que contiene la tarjeta adquisidora y la tarjeta de acondicionamiento de señales, con un prensa-cables para USB y un prensa-cables para cables de transductores a los costados. El recipiente c se rellena con poliuretano expandido.



(b) Sensor sostenido por un poste, mediante una escuadra.

Figura 7.1: Instalación para ensayo en exteriores.



Figura 7.2: Prototipo del sensor de granizo instalado en exteriores, en la terraza del Instituto de Ingeniería Eléctrica, FIng - UdelaR.

7.2. Acondicionamiento del Programa de Adquisición

El programa de adquisición del sensor debe determinar automáticamente cuándo sucede un evento, para adquirir y almacenar las señales. La estrategia elegida con-

7.2. Acondicionamiento del Programa de Adquisición

siste en utilizar la tarjeta adquisidora en modo *background*, de forma que adquiere señales continuamente en un hilo de procesamiento y en otro hilo de procesamiento evalúa si almacenarlas y en caso afirmativo lo hace junto con la metadata de interés. Se almacenan solamente las señales que escapan en amplitud del umbral de ruido. Como consecuencia de la utilización de este umbral y debido a la cuantización de las señales, no se almacenarán tampoco señales correspondientes a impactos suaves, como los de gotas de lluvia. En la figura 7.3 mostramos un ejemplo de la señal base adquirida por el sensor, la cual habitualmente se descarta.

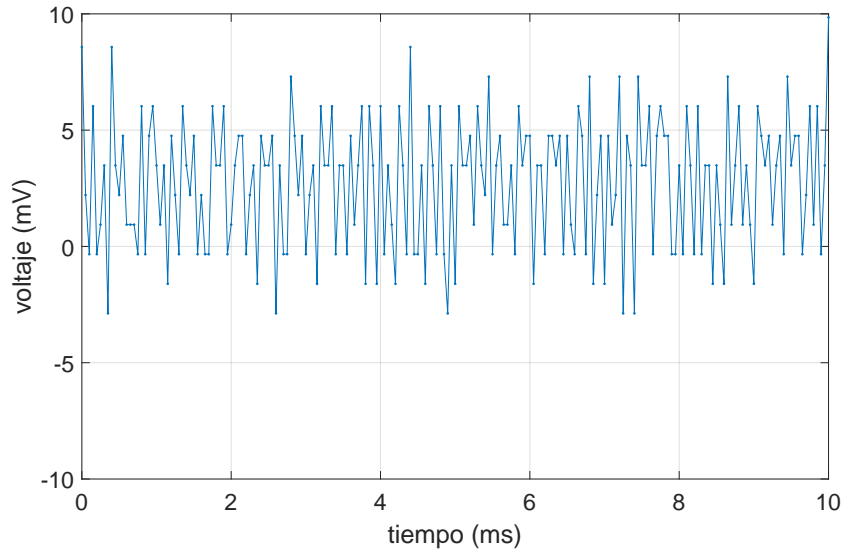


Figura 7.3: Señal de base del sensor instalado. Esta señal sólo contiene ruido, por lo que en el normal funcionamiento del sensor se descarta. Amplitud pico a pico del ruido menor a 15 mV. Este valor puede verse afectado por condiciones climáticas y ruido electromagnético. En esta señal, no fue compensada la atenuación $\times 10$ de la etapa de acondicionamiento.

El sistema de adquisición agrupa las señales obtenidas por tormentas, siguiendo el criterio de la sección 5.2.4. En particular, cuando se detecta el inicio de una tormenta se crea una estructura llamada *tormenta* que almacena *fecha y hora* de inicio, *frecuencia de muestreo* y un arreglo de celdas llamado *impactos*. Mientras dura la tormenta, cada señal adquirida que escapa del umbral se almacena dentro de *impactos*, como una estructura que contiene una matriz de tamaño $2 \times L$, donde L es el largo de las señales y las filas corresponden al transductor central y al auxiliar respectivamente. En la estructura *impacto* también se almacena el *tiempo* en milisegundos desde el inicio de la tormenta.

$$\text{tormenta (struct)} = \begin{cases} \text{inicio (datetime)} \\ f_s \text{ (double)} \\ \text{impactos (cell array con estructuras impacto)} \end{cases}$$

$$\text{impacto (struct)} = \begin{cases} \text{central (1} \times L \text{ double)} \\ \text{auxiliar (1} \times L \text{ double)} \\ \text{tiempo (double)} \end{cases}$$

Las tormentas de almacenan en archivos *.mat* para procesar los datos *offline*.

7.3. Observaciones

No se han registrado eventos de granizo con posteridad a la instalación del prototipo.

Más allá del cumplimiento de los objetivos de la tesis, aún resta trabajo para obtener un sensor de granizo que pueda instalarse en una estación meteorológica. Los primeros trabajos de interés luego de concluida esta etapa, es sustituir la PC por una computadora que pueda embeberse en el diseño de la figura 7.1 y la tarjeta adquisidora por un sistema de menor costo.

En la sección 8.3 explico estas y otras mejoras que necesita el prototipo para funcionar de manera autocontenida en exteriores. Además, en el apéndice B profundizo en la sustitución del PC y de la tarjeta adquisidora.

Capítulo 8

Síntesis de Resultados, Conclusiones y Trabajos Futuros

En mi doctorado trabajé en el diseño de un sensor automático que estima la energía de impacto de piedras de granizo (sección 5.2). Se trata de un sensor de principio acustoeléctrico, que utiliza transductores piezoeléctricos para convertir las vibraciones debidas a los impactos en señales eléctricas, a partir de las cuales se estima la energía del impacto. Trabajé sobre varias interrogantes, que listo a continuación.

¿Qué características son deseables en las señales que se adquieren para estimar la energía de los impactos de granizo? Comencé trabajando con la hipótesis de que las ondas que generan estas señales debían tener múltiples incidencias sobre los bordes de la cavidad acústica. Luego observé que esto era innecesario y que era conveniente trabajar con señales más cortas, correspondientes principalmente a las ondas que viajan directo del punto de impacto al transductor. Estas señales tienen información suficiente en su energía para estimar la energía de impacto de las piedras.

Sabiendo qué señales quiero, ¿cómo las consigo a partir de una implementación física? En esta interrogante se basó gran parte del diseño de la cavidad acústica. En un principio pensaba trabajar con una cavidad acústica metálica, pero luego de responder a la primera pregunta, observé la conveniencia de utilizar un material atenuante, por lo que consideré materiales plásticos, de los que terminé seleccionando el acrílico. Además esto me ayudó a tomar decisiones sobre la forma de la placa, ya que al elegir señales más cortas, de pocas incidencias en las condiciones de borde, comenzaron a tener más sentido las formas geométricas regulares que las formas irregulares que consideraba en un principio.

Habiendo respondido la primeras interrogantes, debía abordar la siguiente pregunta: ¿cómo calibrar la energía de forma que se obtenga la misma salida independientemente del punto de impacto sobre la placa? En este punto podía calibrar una curva relacionando la energía del impacto en un punto fijo con la energía de la señal obtenida con el transductor en otro punto fijo, pero las piedras de granizo pueden impactar en cualquier parte de la superficie de la cavidad acústica y es necesario que la energía estimada sea independiente del punto de impacto. Evalué distintas

Capítulo 8. Síntesis de Resultados, Conclusiones y Trabajos Futuros

maneras de estimar el punto de impacto (correlación cruzada, triangulación por tiempos de vuelo), al mismo tiempo que consideraba distintas formas geométricas para el contorno de la cavidad acústica (cuadrada, circular) y analizaba dónde podría colocar los transductores en cada caso. Gracias al análisis geométrico, logré simplificar considerablemente el problema, sustituyendo la necesidad de detectar un punto en el plano por la necesidad de detectar una distancia unidimensional, al utilizar una placa circular y la disposición correcta de los transductores. Particularmente, la determinación de la conveniencia de utilizar la forma de disco para la cavidad acústica del sensor es uno de mis principales aportes al estado del arte.

La última interrogante de diseño de la cavidad acústica era cómo vincularla con el resto del espacio. Esto es, ¿cómo fijo la cavidad acústica, de forma que los puntos de apoyo no estropeen el diseño? Primero consideré que podría trabajar con puntos de apoyo puntuales, pero la experimentación hizo evidente que reducían los beneficios de la simetría central. Por lo tanto, los únicos apoyos válidos eran aquellos que mantenían la simetría: puntual en el centro, un anillo o el apoyo total de la placa. La necesidad de robustez física fue el argumento principal para elegir la última opción, utilizando un aislante acústico para separar la cavidad acústica de la superficie también rígida sobre la que la fijé. En el diseño final, la cavidad acústica está fijada de esta manera a la tapa del contenedor de la electrónica del sensor.

Con el diseño, debía resolver cómo calibrar el sensor de la forma más simple posible. Al tener una placa con simetría central, lo natural era colocar el transductor en el centro de la cara inferior y calibrar energías ante impactos en el centro de la cara superior. Esta es la primera curva de calibración. Luego, al realizar impactos iguales, cada vez más lejos del transductor, es natural que la energía decaiga. Esta es la segunda curva de calibración. Finalmente, era necesario reconocer de forma automática el punto de impacto, para lo que calibré una tercera curva que relaciona la diferencia de los tiempos de vuelo de las ondas a los transductores con la distancia al centro. Esto último podría a priori calcularse de forma teórica, pero los detalles de implementación hacen conveniente la calibración, considerando que los tiempos de vuelo se encuentran en el orden de los microsegundos.

En paralelo con las interrogantes anteriormente descritas, tuve que resolver la implementación práctica de los ensayos. Esto me llevó a plantear y dirigir el proyecto de fin de carrera en el que se implementó un dispositivo auxiliar de simulación de impactos de granizo. También diseñé los experimentos que me permitieron observar la relación entre las señales, los impactos y las distintas posibilidades de implementación de la cavidad acústica.

8.1. Síntesis de Resultados

Como producto final de este trabajo obtuve un prototipo cuyas características destaco a continuación.

Diseñé la superficie colectora del sensor, que actúa como cavidad resonante (sección 5.3). Consta de una placa de acrílico (sección 5.3.1) con forma de disco (sección 5.3.2), de 25 *cm* de diámetro y 1,4 *cm* de altura (sección 5.3.3). Una de las

8.1. Síntesis de Resultados

caras circulares del disco está expuesta de forma directa a los impactos de piedras de granizo. En un plano cercano a la otra cara del disco se encuentran embebidos los transductores piezoeléctricos. Hice fabricar la cavidad acústica en una tienda especializada en corte láser de acrílico (sección 5.3.6). El disco de acrílico se apoya completamente sobre un aislante acústico (sección 5.3.4). Para los transductores, elegí diafragmas piezoeléctricos *Murata 7BB-12-9* (secciones 3.1.1 y 5.3.5). Uno de ellos se encuentra centrado en el corte circular de la placa y es el que utilizo para calcular la energía de las señales (sección 3.2.1), que luego convierto a energía de impacto. Otros doce diafragmas piezoeléctricos están posicionados sobre el borde, formando un aro como si fueran los números de un reloj. Eléctricamente, están conectados entre sí en serie, por lo que se comportan como un único transductor, que utilizo junto con el principal para estimar la distancia de los impactos al centro del disco. El método que utilizo es la diferencia de tiempos de vuelo de las ondas a ambos transductores. Es necesario conocer esta distancia, porque las ondas que llegan al centro del disco se ven atenuadas en función de ella.

La calibración del sensor (capítulo 6) consistió en encontrar los parámetros de tres curvas: 1- Una recta creciente por el origen, que relaciona la energía de las señales con la energía del impacto, cuando el impacto ocurre en el centro de la placa (sección 6.2). 2- Una exponencial decreciente que corresponde a la atenuación de la energía de las señales relevadas con el transductor central cuando se aleja el punto de impacto del centro de la placa, impactando siempre con igual energía (sección 6.3). 3- Una recta decreciente que relaciona la diferencia de tiempos de vuelo del punto de impacto a cada transductor, con la distancia buscada (sección 6.4). En la tabla 6.5 se encuentra un resumen de los modelos utilizados y los parámetros calibrados. Presenté el trabajo *Calibration of a Hail Impact Sensor based on Piezoelectric Transducers*, sobre el proceso de calibración, en *IFSA SEIA 2023* [3]. Con los resultados finales de calibración, publiqué en la revista *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* el trabajo *Calibration of a Hail-Impact Energy Electroacoustic Sensor* [1].

Identifiqué la necesidad de contar con una plataforma de ensayos para el diseño y la calibración, propuse un proyecto de grado para tres estudiantes y lo dirigí (sección 4.2). Utilicé la plataforma en las etapas de diseño y calibración. Presenté el trabajo *Why and How to Construct a Device for Hail Simulation*, asociado a la primera etapa de desarrollo del *SGran*, en *IEEE URUCON 2021* [5]. Con los primeros resultados obtenidos con la plataforma, publiqué en la revista *Memoria Investigaciones en Ingeniería* el trabajo *Implementation and Evaluation of a Hail-Impact Simulation Device* [2].

Actualmente, un prototipo con el acondicionamiento necesario se encuentra instalado en exteriores en la facultad (capítulo 7). Con el diseño y el procesamiento propuesto se pueden identificar hasta 100 impactos por segundo (sección 5.2.3).

Pensando en una futura red de sensores de granizo, realicé la presentación del trabajo *Caracterización Automática de Granizo: Red Inalámbrica de Sensores* en el evento *Jornamet 2022*, organizado por *INUMET* [4].

8.2. Conclusiones

Sobre la Importancia del Trabajo en General

Este trabajo recopila pruebas de la utilidad de contar con sensores de granizo en diversos ámbitos. Esto es respaldado por las posibilidades modernas de protección contra granizo, herramientas que se despliegan para proteger los bienes y luego se retiran en forma automática. Por supuesto que el pronóstico de granizo también tiene ventajas en planificación y organización, por lo que es interesante contribuir a la generación de información útil para generar modelos y elaborar métodos de pronóstico de granizo. Para esto último, se pueden aprovechar las herramientas actuales para manejo de grandes volúmenes de datos, siendo deseable la generación de grandes volúmenes de información. También es deseable aprovechar las ventajas proporcionadas por las redes inalámbricas, que pueden desplegarse en áreas despobladas, permitiendo la obtención en tiempo real de información sobre esas áreas en las ciudades.

Diseño de la Cavidad Acústica

Con respecto al diseño del sensor, me centré en la cavidad acústica, ya que es la parte más específica para un sensor de impacto acustoeléctrico y es crucial para cumplir los objetivos.

Destaco la elección de las características de la placa que permite distinguir impactos que ocurren con más de 10 *ms*, ya que para muchas aplicaciones es interesante conocer si la energía descargada se debe a muchos impactos suaves o a pocos impactos fuertes. Los elementos que se desean proteger del granizo son sumamente variados. Por ejemplo, un parque de paneles solares podría soportar muy bien una descarga de energía debida a gran cantidad de piedras pequeñas y sufrir daños costosos debido a la misma energía distribuida en pocos impactos de piedras grandes. En cambio, una cosecha podría verse más dañada por la descarga del primer caso, si por ejemplo el granizo golpea a un mayor porcentaje de frutos y quedan todos dañados que por la descarga del segundo caso, en el que podría verse afectado un porcentaje bajo de los frutos, perdiéndose, pero sin ser afectados los demás.

También considero que un aporte importante al estado del arte es haber determinado la conveniencia de utilizar una forma simple como el disco. Esto se compone de dos partes: en primer lugar, haber observado que con la forma de disco las señales tienen información suficiente para cumplir el objetivo de estimar la energía de impacto; en segundo lugar, que la forma de disco es beneficiosa al momento de calibrar el sensor. Simplificar el proceso de calibración es sumamente importante, ya que cualquier instrumento de este tipo debe ser recalibrado periódicamente para garantizar la calidad de las medidas.

Calibración

Otro aporte al estado del arte en cuanto a los sensores de granizo está asociado a su calibración. La importancia de entender cómo se relacionan las señales obtenidas por los transductores con la información buscada, en este caso la energía de impacto.

Particularmente, destaco haber logrado una forma de compensación de la atenuación de las señales, que permite obtener la misma información de energía independientemente de en qué punto de la placa impacta el granizo. La compensación es simple, no requiere el uso de sensores auxiliares de otra naturaleza que los que ya se están usando, piezoeléctricos. Considero un éxito haber logrado hacer la compensación con un único transductor adicional en lugar de tres, al convertir el problema, que en un principio era de triangulación para encontrar un punto específico en el plano a un problema unidimensional. Además, esto simplifica también el método de compensación y la calibración de dicho método, ya que se tiene una función de $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ en lugar de una de $\mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$.

Vigencia del Trabajo

La aparición de sensores comerciales de granizo en los últimos años y los trabajos académicos que han sido publicados recientemente comprueban la vigencia de este trabajo. Los desarrollos comerciales suelen dar poca información sobre cómo están implementados. Este estudio queda a disposición de la comunidad académica. La actualidad de mi tema de estudio es también respaldada por la publicación de mi trabajo [1] en una revista como *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. También respalda la vigencia de este trabajo el interés manifestado por el auditorio durante las presentaciones en eventos que he realizado.

Diseño de una Plataforma de Ensayos

Otro aporte importante creo que es el diseño de la plataforma de ensayos *SGran*. En ese sentido, mi contribución está en la observación de la necesidad, el planteo del problema, la guía a los estudiantes hicieron la parte principal en diseño y construcción y la evaluación posterior del sistema construido. Observando que no se describen sistemas similares en la bibliografía previa a las publicaciones del *SGran*, creo que es un buen aporte que puede ser replicado y mejorado también por otros grupos de investigación.

8.3. Trabajos Futuros

Los trabajos futuros sobre el sensor de granizo se pueden clasificar en dos categorías: científicos y mejoras a la implementación.

8.3.1. Trabajos Científicos

Ensayos con Lluvia

Existen dos trabajos interesantes para realizar en este sentido. Por un lado, es deseable que el sensor de granizo sea capaz de discriminar la lluvia del granizo pequeño, para lo que es necesario analizar las señales generadas por la lluvia y elaborar criterios. Por otro lado, podría estudiarse la posibilidad de cuantificar lluvia utilizando el mismo sensor, o bien analizar los cambios necesarios para obtener un diseño enfocado en dicho objetivo. Un sensor de lluvia de principio acustoeléctrico tiene la principal ventaja frente a varios sensores de lluvia tradicionales de no tener partes móviles.

Estudiar Dependencia del Diámetro en el Método de Calibración

Me gustaría evaluar cuánto afecta a la calibración del sensor acustoeléctrico el impactar con las energías objetivo levantando la restricción de igualdad de diámetros, como planteo en la sección 2.2.4. Al impactar ya sea con igual energía usando proyectiles de distinto diámetro o con distinta energía usando un mismo proyectil, cambia ligeramente el área de contacto.

Temperatura

Considerando que la temperatura afecta a la conducción de ondas en los materiales, sería interesante evaluar su influencia en las medidas. Se podría variar la temperatura de la placa del sensor y observar cómo cambian las señales ante impactos iguales en el centro. Es probable que esto muestre la necesidad de calibrar un modelo adicional. La incorporación de ese modelo podría disminuir la incertidumbre en las medidas, ya que mi banco de señales presenta mayor variabilidad en las señales obtenidas con impactos teóricamente iguales en días distintos que en los experimentos realizados en el mismo día. Actualmente atribuyo esta variabilidad a posibles diferencias en el *setup* experimental, es probable que la diferencia corresponda a la temperatura ambiente.

Ensayos sobre Ángulo de Incidencia

Debido a que en la práctica la influencia del viento hará que la mayoría de los impactos sean oblicuos, me gustaría realizar más experimentos con incidencia oblicua para validar la hipótesis planteada en la sección 5.4.3. En particular, sería interesante validar para qué ángulos es válida dicha hipótesis y estudiar cómo se incorporarían las ondas de corte en caso de que sean percibidas para algún ángulo.

8.3. Trabajos Futuros

En este aspecto, es necesario tener en cuenta que, si bien al impactar de forma oblicua se excitan también ondas de corte que no se excitan al impactar de forma perpendicular, el transductor no es sensible a ellas, al menos no para ángulos $\theta \leq 45^\circ$. Sería interesante profundizar en el estudio, probando con ángulos de incidencia diversos. Particularmente, para ángulos más cercanos a los 90° , podría ocurrir que las ondas de corte sean convertidas a ondas longitudinales al interactuar con los bordes de la placa y dichas ondas sí serían percibidas por el transductor. Este tema queda planteado como trabajo a futuro.

Incorporación a Estaciones Meteorológicas

Un hito significativo en el desarrollo del sensor de granizo sería incorporarlo a una estación meteorológica ya establecida. Como expliqué en la sección 1.4.6, primero debería incorporarlo a una estación convencional, para tener la posibilidad de contrastar los datos con las observaciones del personal de la estación. Para llegar a este punto, antes debería revisar el criterio para discriminar lluvia de granizo, estudiar cómo afecta al sensor la temperatura, verificar la hipótesis sobre los impactos de incidencia oblicua, sustituir la PC y la *NI USB6009* e incorporar el procesamiento de señales en tiempo real.

Estudio del Envejecimiento

Para mantener la confiabilidad de los datos, los sensores deben calibrarse periódicamente. La realización de ensayos de envejecimiento me permitiría determinar el periodo de recalibración necesario. Particularmente, este es un sensor expuesto a impactos y a la intemperie, lo que favorece el envejecimiento. Para trabajar en este punto, sería beneficioso tener el sensor en una estación meteorológica.

Piedras de Granizo que se Rompen

Me gustaría profundizar en el análisis del modelo de transferencia de energía cuando las piedras de granizo se rompen. Para eso, podría utilizar esferas de hielo. Este análisis presenta dos dificultades, por un lado en cuanto a la elaboración de las esferas de hielo con iguales características y su mantenimiento en iguales condiciones hasta el momento de ser utilizadas. Por otro lado, se debe sustituir el sistema con electroimán por uno que permita soltar las esferas de hielo en las condiciones necesarias, velando especialmente por la repetitividad del experimento.

Simulaciones

Para optimizar el diseño de la cavidad acústica, sería interesante simular el comportamiento de la placa colectora ante los impactos en *software* como *COM-SOL Multiphysics*[®].

Capítulo 8. Síntesis de Resultados, Conclusiones y Trabajos Futuros

Comparar Técnica de Localización Actual con Correlación Cruzada

Me gustaría realizar un trabajo específico comparando la técnica actual de detección de la distancia del impacto al centro con la técnica de correlación cruzada.

8.3.2. Mejoras a la Implementación

Sustituir Computadora

Para que el sensor sea un sistema embebido, será necesario sustituir la PC por una computadora de menor porte, como podría ser un Raspberry Pi o una plataforma de desarrollo que integre un *System on Chip* (SoC) *ESP32*¹. Esto permitiría tener un prototipo compacto simplificando significativamente su instalación en exteriores.

Sustituir la Tarjeta Adquisidora

Me gustaría probar el chip *MCP3208*, para ver si es adecuado como sustituto de la adquisidora *NI USB6009*. Probar el chip implica también reescribir el código de adquisición. Lo ideal sería cumplir con este punto en simultáneo con la sustitución del PC, para reescribir el código directamente en el nuevo lenguaje que vaya a utilizar.

Mejoras en el Acondicionamiento de Señales

La etapa de *Acondicionamiento* de la digitalización de señales podría mejorarse incluyendo un filtro pasabajos analógico. Si bien a priori no hay problemas de solapamiento, limitar el ancho de banda de la señal previo a la adquisición robustece el sistema.

Procesamiento en Tiempo Real

Si bien tomé varias decisiones pensando en procesar las señales en tiempo real, en la etapa actual de desarrollo del sensor, continúo procesando las señales de forma *offline*. Para tener un sensor automático que funcione en tiempo real, es necesario avanzar en este sentido, para lo que sería conveniente antes sustituir el PC.

Sustituir Fuente de Alimentación

Para que el sensor pueda instalarse en el campo, será necesario independizarlo de la red eléctrica. Podría por ejemplo alimentar al sistema con un panel solar y una batería. Para esto sería necesario estimar el consumo energético, que dependerá principalmente del elemento con el que se sustituya la PC.

¹[espressif.com/en/products/socs/esp32](https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32)

Sustituir el Transductor Auxiliar

Podría evaluar la sustitución de la implementación actual del transductor auxiliar por un aro de PVDF o de pintura piezoeléctrica. Esto haría más robusto el diseño y reduciría la incertidumbre en la detección del punto de impacto, especialmente si se quisiera cambiar el criterio actual de compensar de igual forma todos los impactos que ocurren a más de $8,5 \text{ cm}$ del centro. De todas formas, actualmente en la zona en que la curva de atenuación tiene una pendiente grande, el diseño tiene buena capacidad de identificación de la distancia del impacto al centro y en la zona en que no se puede identificar adecuadamente, la curva de atenuación es casi plana, siendo razonable aproximarla por un valor constante. Sería necesario evaluar la relación entre el costo adicional que implicaría este cambio frente a la mejora en los resultados de estimación de la energía, ya que la tecnología de diafragmas piezoeléctricos utilizada actualmente es sumamente económica en comparación.

Economía Circular

Me gustaría adaptar el diseño del sensor a la economía circular, de forma tal de recuperar los desperdicios de la elaboración y darle uso a los materiales, como el acrílico de las placas y los componentes electrónicos, luego de terminado el ciclo de vida del sensor.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice A

Procesamiento de Señales

En esta sección describo la base de datos que armé con las señales adquiridas en la etapa de calibración. También describo el código que desarrollé para procesar esta información. Toda esta información queda disponible en el repositorio [7].¹

A.0.1. Base de Datos

Armé una base de datos SQLite que contiene las señales adquiridas en la etapa de calibración del sensor. La base de datos depurada contiene en total señales de 91 impactos. La tabla SQLite guarda la *metadata* de las adquisiciones. Los campos de la base de datos son los de la tabla A.1.

Los vectores con las señales se almacenan en un directorio junto con la tabla de la base de datos, con el nombre *vibra ID (.mat)*, donde *ID* es el valor *id* de la tabla.

La principal ventaja de la base de datos es que permite fácilmente tomar conjuntos de señales que cumplen distintos criterios. Por ejemplo, el conjunto de las señales asociadas a impactos en el centro de la placa, o el de las señales adquiridas impactando con proyectiles de 10 *mm* de diámetro. También es posible armar cadenas de consulta en las que se combinen características mediante operadores *AND* y *OR*.

A.0.2. Scripts Desarrollados

En esta sección comento brevemente los *scripts* de *Matlab*[®] desarrollados para el procesamiento de señales. Todos los *scripts* son archivos de extensión *.m* que se encuentran en el repositorio [7]. Divido las funciones en dos grandes grupos. Las *específicas*, que se utilizan sólo para la calibración de uno de los modelos; en los diagramas están rodeadas por un recuadro; en el repositorio se encuentran en el directorio de calibración de cada modelo. Las *básicas*, que se comparten entre la

¹Para hacer más amena la lectura del documento, escribo los nombres de las funciones y variables aludidas separando las palabras en lugar de hacerlo exactamente como se encuentran en el repositorio. Asimismo, no las traduzco, para que sean fáciles de identificar en el repositorio.

Apéndice A. Procesamiento de Señales

Tabla A.1: Campos de la base de datos de calibración.

Campo	Descripción
<i>id</i>	Identificador único. Entero.
<i>ini Height cm</i>	Altura de la que se soltó el proyectil. En centímetros.
<i>diam mm</i>	Diámetro del proyectil. En milímetros.
<i>dist mm</i>	Distancia del punto de impacto al centro de la placa. En milímetros.
<i>repe</i>	Número de repetición. Entero.
<i>R1 center Ohm</i>	Valor de la resistencia R_1 del divisor de tensión del circuito de acondicionamiento, para el transductor del centro. En Ohmios.
<i>R1 ring Ohm</i>	Valor de la resistencia R_1 del divisor de tensión del circuito de acondicionamiento, para el transductor auxiliar. En Ohmios.
<i>R2 Ohm</i>	Valor de la resistencia R_2 del divisor de tensión del circuito de acondicionamiento, igual para ambos transductores. En Ohmios.
<i>bounce Height cm</i>	Altura hasta la que rebotó el proyectil, en los casos en que no se midió, se asignó 0. En centímetros.

calibración de los distintos modelos y en el uso habitual del sensor con los modelos calibrados; en los diagramas, cuando aparecen más de una vez comparten el color de fondo, para simplificar la identificación; en el repositorio, se encuentran en el directorio *common functions*. Las funciones básicas las describo sobre el final de la sección.

En los diagramas y en la descripción destaco las funciones que contienen los modelos de las ecuaciones (6.2), (6.4), (6.12), que también se encuentran en el directorio *common functions* y en los diagramas aparecen con letras blancas sobre fondos de tonos azulados.

Calibración del Modelo que Relaciona Energías

El **script principal de calibración del modelo de energías** de la sección 6.2 es *calibrate Energies Center*. En la figura A.1 se muestra el diagrama relacional de este *script* con otras funciones.

La función *energy Plate Center To Impact Energy* implementa el **modelo** de la ecuación (6.2), que relaciona la energía de impacto con la energía de las señales. Esta función recibe como parámetro G_{EE} .

Funciones específicas

- *get Required Energies*: Carga las señales de la base de datos y devuelve su energía eléctrica y su energía de impacto.

- *model Kinetic Energy By Electrical Energy Center*: Implementa el llamado a la función *energy Plate Center To Impact Energy* desde *polyfit* de *Matlab*[®], que ajusta polinomios por mínimos cuadrados.
- *load And Compute Energies*: Dada una serie de datos para cargar (datos con determinadas características, por ejemplo *impactos en el centro*), devuelve una tabla con la información almacenada en la base de datos, agregando la información de la tabla A.2.
- *train Test Groups*: Separa los datos disponibles entre los que se usan para calibración y los que se usan para evaluación. Esto también se hace en la calibración de los otros modelos, pero sin utilizar esta función.
- *procesar Clusters*: Agrupa los resultados obtenidos en clústers para que las gráficas sean más sencillas de interpretar. Esto también se hace en la calibración de los otros modelos, pero sin utilizar esta función.

Tabla A.2: Campos que la función *load And Compute Energies* agrega a la tabla obtenida de la base de datos.

Campo	Descripción
<i>grupo</i>	Clúster.
<i>plate Energy J</i>	Energía eléctrica en <i>J</i> .
<i>masas kg</i>	Masa del proyectil en <i>kg</i> .
<i>initial Energy J</i>	Energía potencial antes de soltar el proyectil en <i>J</i> .
<i>std Initial Energy J</i>	Desviación estándar de <i>initial Energy J</i> dentro del clúster.
<i>bounce Energy J</i>	energía conservada por el proyectil luego del impacto, medida mediante la energía potencial del punto máximo del rebote, en <i>J</i> .
<i>std Bounce Energy J</i>	desviación estándar <i>bounce Energy J</i> dentro del clúster.
<i>transferred Energy J</i>	energía transferida a la placa, en <i>J</i> .
<i>std Transferred Energy J</i>	desviación estándar de <i>transferred Energy J</i> dentro del clúster.

Calibración de los Modelos de Atenuación

El **script principal de calibración del modelo de atenuación** de la sección 6.3 es *calibrate Attenuation Distance*. En la figura A.2 se muestran los diagramas relacionales de este *script* con otras funciones.

La función *distance To Attenuation* implementa el **modelo** de la ecuación (6.4), que relaciona la distancia al centro con el factor de atenuación por absorción de las señales. Esta función recibe como parámetros a_1 y a_2 .

Apéndice A. Procesamiento de Señales

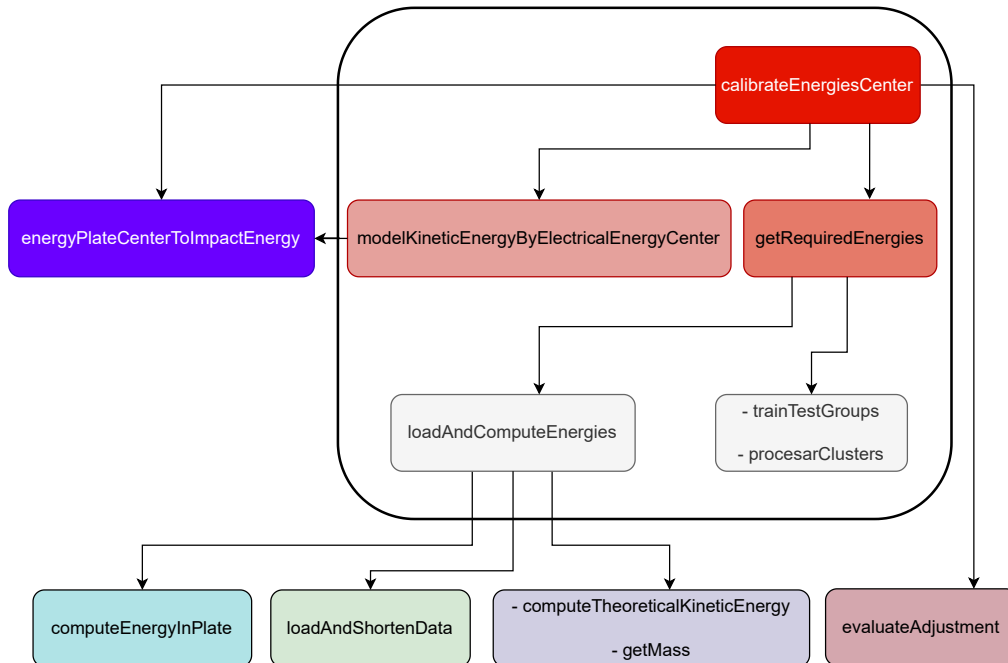


Figura A.1: Diagrama relacional de las funciones utilizadas para calibrar la curva de Energía de Impacto en función de Energía de la Señal, representada con la ecuación (6.2) y en la figura 6.3.

Funciones específicas

- *get Plate Energies And Distances*: carga las señales de la base de datos y devuelve su energía eléctrica y las distancias de impacto teóricas. Agrupa los datos en *clústers*, devolviendo su valor medio y desviación estándar.
- *model Attenuation By Distance*: implementa el llamado a la función *distance To Attenuation* desde *fmincon* de *Matlab*[®], que encuentra mínimos en problemas convexos con restricciones. En este caso la restricción es que la curva quede ligeramente por encima de los puntos adquiridos, ya que tratándose de atenuación prefiero corregir por defecto (como si hubiera menos atenuación de la que hay) que por exceso.

Calibración de los Modelo de Distancia

El **script principal del modelo de distancias** a partir de las diferencias de tiempos de vuelo de la sección 6.4 es *calibrate Distance Time Of Flight*. En la figura A.2 se muestran los diagramas relacionales de este *script* con otras funciones.

La función *difference Times Of Flight To Distance* implementa el **modelo** de la ecuación (6.12), que relaciona la diferencia de tiempos de vuelo de las señales con la distancia del impacto al centro de la placa. Esta función recibe como parámetros a_3 y a_4 .

- *get Distances And Difference TOF Series*: carga las señales de la base de datos y devuelve las diferencias de tiempos de vuelo entre transductores y las distancias teóricas de los impactos al centro de la placa. Agrupa los datos en *clústers*, devolviendo también su valor medio y desviación estándar.
- *model Distance By Diff TOF*: implementa el llamado a la función *difference Times Of Flight To Distance* desde *robustfit* de *Matlab*[®], que implementa una regresión por mínimos cuadrados más robusta a *outliers*.

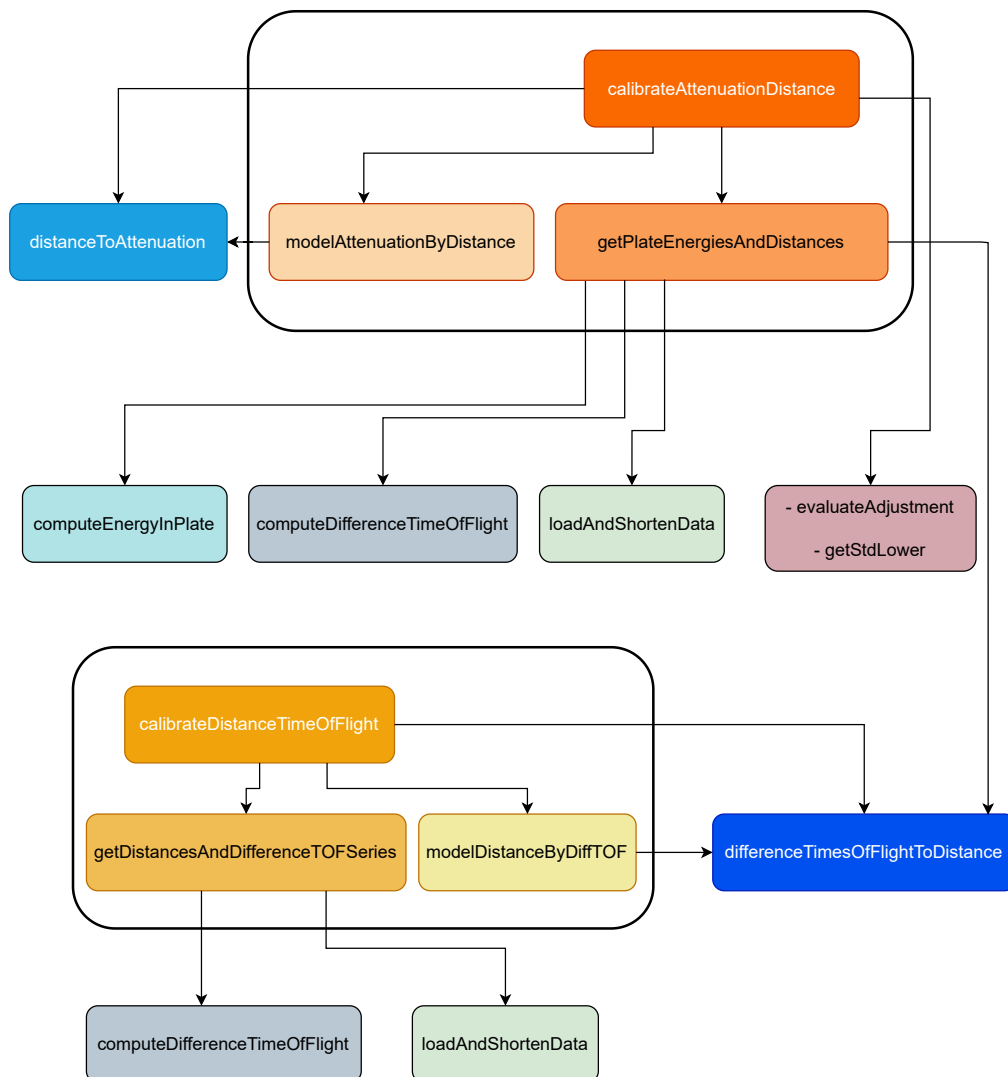


Figura A.2: Diagramas relacionales de las funciones utilizadas para calibrar la curva de Atenuación en función de la Distancia, representada con la ecuación (6.4) y en la figura 6.5 y diagramas relacionales de las funciones utilizadas para calibrar la curva de Distancia en función de la Diferencia de Tiempos de Vuelo, representada con la ecuación (6.12) y en la figura 6.7.

Apéndice A. Procesamiento de Señales

Funciones básicas En esta sección describo las funciones básicas presentadas en las figuras A.1 y A.2. Además, en la figura A.3 presento algunas funciones que se encuentran por debajo de las anteriores.

- *get Std Lower*: Es una función auxiliar para graficar.
- *get Mass*: Las masas de los proyectiles fueron medidas de forma directa. Para cada diámetro de proyectil, asigna la masa correspondiente *masas kg*. Esto evita incertidumbres asociadas a la constitución exacta de los proyectiles.
- *compute Theoretical Kinetic Energy*: Calcula *initial Energy J*.
- *load And Shorten Data*: dada la solicitud de una serie de señales con determinadas características, devuelve una tabla con la parte de la base de datos correspondiente y levanta las señales crudas almacenadas, las cuales corta a 10 *ms* alrededor del máximo. También construye los vectores de tiempos correspondientes a partir de δt . Utiliza funciones auxiliares las funciones auxiliares *series Reference*, *query Database Table* y *query Database Signals* que explico más adelante.
- *compute Difference Time Of Flight*: obtiene la diferencia de tiempos de vuelo de las ondas generadas por el impacto a los transductores a partir de las señales obtenidas con ambos transductores. Filtra las señales, determina un inicio grosero a partir de que la señal escapa por debajo de un umbral y halla el primer cruce por cero con pendiente positiva a partir de ese punto. Utiliza las funciones auxiliares *compute Half Spectrum*, *apply Filter*, *find Start Using Threshold* y *find Analytical Zero* que explico más adelante.
- *compute Energy In Plate*: dada una señal, la filtra y devuelve su energía en *J*.

A continuación explico las funciones auxiliares de *load And Shorten Data*:

- *series Reference*: agrupa datos con características específicas en series. Una serie puede contener por ejemplo “todas las pruebas en que el diámetro del proyectil es 20 *mm* y se impacta en el centro de la placa”.
- *query Database Table*: dada una serie, devuelve una tabla con la *metadata* contenida en la base de datos.
- *query Database Signals*: dada una serie, devuelve las señales y los δt .

A continuación explico las funciones auxiliares de *compute Difference Time Of Flight*:

- *compute Half Spectrum*: dada una señal, devuelve la mitad positiva del espectro en frecuencia.
- *apply Filter*: dada una señal, una frecuencia de corte y un tipo (pasa-altos o pasa-bajos), aplica un filtro de Butterworth de orden 2.

- *find Start Using Threshold*: dada una señal en la que los primeros puntos son de ruido, calcula la desviación estándar del ruido y halla el primer punto de voltaje negativo para el que la señal escapa del umbral de ruido. Devuelve la señal recortada a partir de el punto hallado.
- *find Analytical Zero*: dada la señal devuelta por *find Start Using Threshold*, halla el primer cruce por cero con pendiente positiva. Utiliza el método ilustrado en la figura 6.8b, que consiste en hallar el primer punto muestreado posterior al cruce por cero y calcular la recta que pasa por este punto y el punto muestreado anterior. A partir de la recta analítica, se calcula el tiempo en el que se da el cruce por cero.

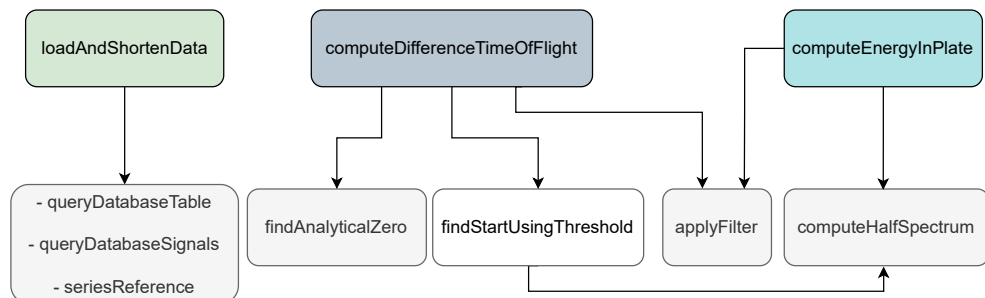


Figura A.3: Diagrama relacional de las funciones básicas utilizadas por las funciones de las figuras A.1 y A.2.

Procesamiento de Señales con los Modelos Calibrados

La figura A.4 muestra las funciones principales utilizadas en el procesamiento de las señales con el sensor calibrado. Este es el método de procesamiento actual de las señales, que se realiza a posteriori. Para el diseño final, pensando en incorporar la funcionalidad de alertas instantáneas, el procesamiento debe realizarse en el momento, por lo que se debe incorporar el procesamiento al *script* de adquisición de señales, sustituyendo la función *load And Shorten Data*.

Apéndice A. Procesamiento de Señales

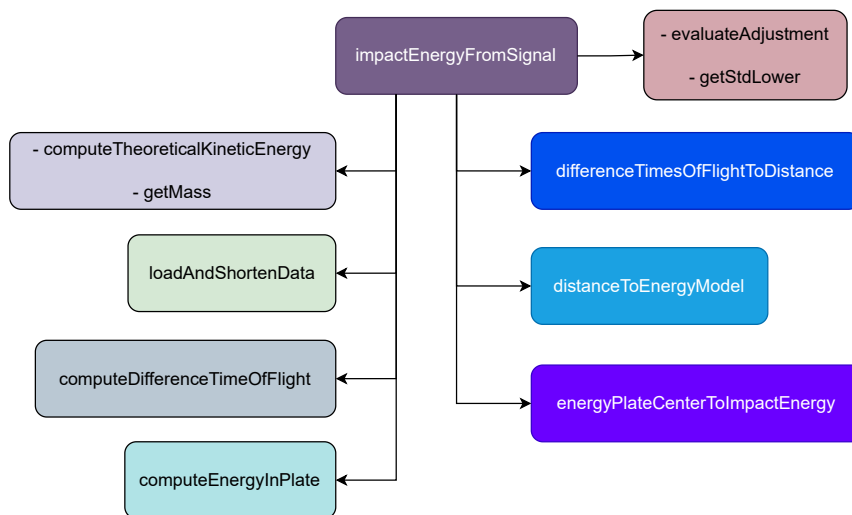


Figura A.4: Diagrama relacional de las funciones que se utilizan para el procesamiento de las señales con el sensor calibrado.

Apéndice B

Integración del Sensor a una Red de Sensores Automáticos

B.1. Sistema Embebido

Pensando en integrar el sensor a estaciones meteorológicas, es necesario hacer algunas modificaciones. En este apéndice amplío dos aspectos fundamentales sugeridos en la sección 8.3: la sustitución del PC y la sustitución de la tarjeta adquisidora.

B.1.1. Sustituir PC

Creo que una buena opción sería sustituir la PC por una Raspberry Pi. Se trata de una mini computadora que presenta varias versiones con distintas prestaciones para elegir ¹. La versión más reciente es *Raspberry Pi 5*, que cuesta USD 80 y tiene un procesador marca *ARM* de 64 bits y 2,4GHz y hasta 8Gb de RAM. Tiene como principal ventaja el tamaño (el modelo más grande es de 10 cm × 6 cm × 2 cm), que permitiría colocarla en la caja externa del sensor, la existencia de una amplia comunidad de usuarios y que levanta un sistema operativo de igual manera que las computadoras tradicionales. Raspberry Pi recomienda usar su propio sistema operativo, llamado *Raspberry Pi OS*, pero también admite otros, como *Ubuntu*.

En cuanto a la comunicación inalámbrica, los modelos más modernos de Raspberry Pi incluyen antena Wifi. Esto es importante para poderme comunicar de forma remota en la próxima etapa de ensayos.

Al cambiar de sistema operativo, parte del trabajo consistirá en migrar los *scripts* de *Matlab*[®] a un lenguaje abierto. En ese caso, *Python* sería para mí la mejor opción, por ser un lenguaje que conozco y con una gran comunidad de usuarios por detrás.

La Raspberry Pi no tiene conversores ADC integrados. Pensando en sustituir la adquisidora *NI USB6009*, es necesario buscar una alternativa de menor porte

¹raspberrypi.com/products/

Apéndice B. Integración del Sensor a una Red de Sensores Automáticos

(sección B.1.2). De todas formas, en una etapa intermedia de pruebas, podría continuar utilizando la *NI USB6009* [127].

B.1.2. Sustituir Tarjeta Adquisidora

La *NI USB6009* es un instrumento de alto costo, útil en los ensayos de laboratorio, pero que debe sustituirse en el diseño de un sensor de costo moderado. Para sustituir este instrumento, se puede adquirir un chip que implemente un conversor analógico a digital.

Como el sensor utiliza dos transductores piezoeléctricos, a priori deberían utilizarse dos canales diferenciales, pero también se podrían adaptar canales pseudo-diferenciales. El tipo de conversor debe ser un $\Delta - \Sigma$ o SAR. Sería ideal contar con una frecuencia de muestreo que permita continuar trabajando a 20 kHz , pero dado que sólo se utiliza la información hasta los 5 kHz , podría reducir la frecuencia de muestreo 10 kHz de ser necesario. En tal caso, sería conveniente en tal caso incorporar un filtro analógico pasa-bajos a la etapa de acondicionamiento para evitar el solapamiento. A priori es deseable mantener la resolución actual del conversor, pero debido a las dificultades de conseguir los circuitos integrados, consideré conversores de hasta 12 bits de resolución, 2 bits menos de los que estoy usando actualmente. En la tabla B.1 presento una lista de circuitos integrados que podrían servir, el nivel adecuación es variado, pero es conveniente contar con una lista amplia debido a lo variable de la disponibilidad.

Conseguí un chip *MCP3208*² de la empresa Microchip [128]. Entre las características de este chip se destacan cuatro canales pseudo-diferenciales de 12 bits y una tasa de muestreo de 100 kSa/s con un ADC tipo SAR.

Comparando las características, la principal pérdida en relación con la NI actualmente utilizada serían los 2 bits de resolución. Por otro lado, se debería adaptar la lógica de adquisición, que actualmente utiliza funciones del *toolbox* daq de *Matlab*[®]. La diferencia de precios es significativa, siendo que el *MCP3208* se puede conseguir por aproximadamente USD 5, mientras que la *NI USB6009* cuesta actualmente más de USD 650³.

²La disponibilidad de circuitos integrados en Uruguay es sumamente limitada, conseguí este en San Pablo, Brasil.

³Precios en el extranjero, actualmente ni las tarjetas adquisidoras de National Instruments ni los chips de la tabla B.1 se consiguen en el mercado uruguayo.

B.1. Sistema Embebido

Tabla B.1: Lista de circuitos integrados que implementan ADC y podrían sustituir a la *NI USB6009*.

Marca y Modelo	Canales	Bits	kSa/s	tipo
Microchip MCP 3208	4 ps. dif.	12	100	SAR
Microchip MCP 3464	4 dif.	16	150	$\Delta - \Sigma$
Maxime MAX 1130/1	10 dif.	12	400	SAR
Maxime MAX 11328	8 dif.	12	1000	SAR
Maxime MAX 11331	8 dif.	12	3000	SAR
Maxime MAX 11128	8 dif.	12	1000	SAR
TI ADS 131 E08(S)	8 dif y ps. dif	24	64	$\Delta - \Sigma$
TI ADS 1178	8	16	52	$\Delta - \Sigma$
TI ADS 8548	8 dif	14	650	-
TI ADS 8568	8 dif	12	650	-
TI ADS 8588H	8 dif	16	500	SAR

B.2. Red de Sensores Inalámbricos

En esta sección, desarrollo el concepto de integrar el sensor de granizo en una red de sensores inalámbricos (sección 1.4.7). Se relaciona con el trabajo *Caracterización automática de granizo: Red inalámbrica de sensores*, que presenté en *Jornamet 2022* [4]. La idea es que cada nodo contenga un sensor de granizo y sensores de variables climáticas auxiliares. Los elementos del nodo conforman una estación climática, enfocada en la caracterización de granizo.

B.2.1. Comunicación

Pensando en desplegar el sistema en el campo, con escaso acceso a internet, es conveniente que se deba proveer de acceso a un único nodo. Se podría brindar el acceso a internet mediante *LTE*, utilizando uno de los accesorios disponibles para *Raspberry Pi*, como por ejemplo el de *Sixfab*⁴ que tiene un costo de USD 135.

Para la comunicación dentro de la red de nodos, es adecuada la tecnología de radio *LoRaWAN*, ya que la tasa de datos a transmitir es baja: durante la tormenta, alcanza con transmitir los histogramas de la energía de impacto de granizo en cada nodo para cada ventana de tiempo de interés, que es del orden de 1 *min*. Luego de la tormenta, se podrían solicitar las señales completas, pero no hay exigencias en cuanto a la velocidad de transmisión una vez pasada la tormenta.

En la comunicación *LoRaWAN*, cada nodo se comunica con un *gateway*. El *gateway* puede atender varios nodos. Dependiendo del tamaño de la red, puede haber varios *gateway* que se comuniquen con el *Network Server*, que es único, o puede haber un único *gateway* que incorpore a su vez el *Network Server*. El *Network Server* es el gestor de la red. Es una herramienta de *software* que centraliza la información y la transmite vía *TCP/IP SSL*.

B.2.2. Esquema General

Sería deseable cubrir una región con frecuente ocurrencia de granizo con una grilla densa de sensores, para analizar la variabilidad espacial del fenómenos. Se podría comenzar con una grilla cuadrada de con 9 nodos, espaciados cada 3 km. Al comenzar con una red pequeña, podría implementar el *Network Server* en el mismo nodo que el *gateway*.

Debido a que el fenómeno de granizo es extremadamente localizado, la información de cada nodo debe tratarse de forma independiente: un nodo puede estar detectando una tormenta de granizo, mientras que el nodo más cercano no.

Teniendo en cuenta los reportes de granizo en Uruguay presentados en la figura 1.4, sería razonable comenzar instalando la red en una región de Montevideo o Canelones, ya que son las regiones que suelen tener más reportes de granizo. Esto permitiría evaluar la red de sensores mientras que está en etapa de prueba.

⁴<https://sixfab.com/product/raspberry-pi-4g-lte-modem-kit/>

Apéndice C

Diagrama de Funcionamiento de Plataforma de Ensayos

En la figura C.1 se presenta el diagrama de funcionamiento general de la plataforma de ensayos *SGran* (sección 4.2).

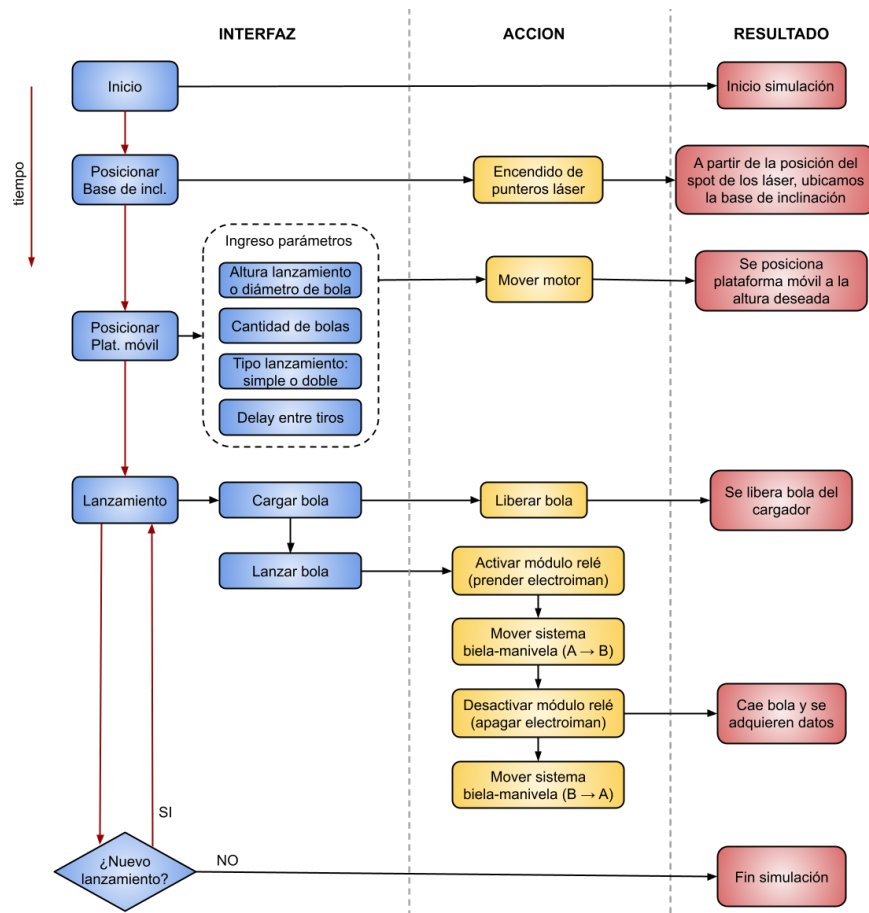


Figura C.1: Diagrama general de funcionamiento del *SGran*. Tomado de [115].

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Referencias

- [1] Blasina F, Echarri A, Pérez N. 2023 Calibration of a hail-impact energy electroacoustic sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **72**, 1–9. (doi:10.1109/TIM.2023.3325516).
- [2] Blasina F, Echarri A, Farber G, Molina F, Machín S, Pérez N. 2022 Implementation and evaluation of a hail-impact simulation device. *Memoria Investigaciones en Ingeniería* **23**, 1, 135–150. (doi:10.36561/ING.23).
- [3] Blasina F, Echarri A, Pérez N. 2023 Calibration of a hail impact sensor based on piezoelectric transducers. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Sensors and Electronic Instrumentation Advances*, pp. 117–119. IFSA Publishing. ISBN: 978-84-09-53746-4.
- [4] Blasina F, Usera G, Pérez N. 2022 Caracterización automática de granizo: Red inalámbrica de sensores. *Revista de 1a jornada meteorológica del Uruguay, INUMET*. **1**, 45–47. inumet.gub.uy/sites/default/files/2023-01/REVISTA%20JORNAMET%20N1%202022.pdf.
- [5] Blasina F, Echarri A, Farber G, Molina F, Machin S, Pérez N. 2021 Why and how to construct a device for hail simulation. *2021 IEEE URUCON proceedings* pp. 450–454. (doi:10.1109/URUCON53396.2021.9647310).
- [6] Carnevale M. 2022. Granizo. Película distribuida por Netflix.
- [7] Blasina F. Doctorado de Florencia Blasina, Repositorio Público. <https://gitlab.fing.edu.uy/fblasina/doctorado-florencia-blasina-repositorio-publico.git>.
- [8] Bruick ZS, Rasmussen KL, Cecil DJ. 2019 Subtropical South American hailstorm characteristics and environments. *Monthly weather review* **147**, 12, 4289–4304.
- [9] Rijo L, Santiñaque F. 2011. Investigación de metodologías para el análisis espacio-temporal del evento granizo en Uruguay. <hdl.handle.net/20.500.12008/543>. Tesis de Grado, Facultad de Ciencias Económicas y Administración, Universidad de la República, Uruguay.
- [10] INUMET. Sitio web, sección sobre el clima en Uruguay. inumet.gub.uy/clima. Visitado 2023-08.

Referencias

- [11] Instituto Nacional de Estadística, Uruguay. Anuario estadístico 2022. <https://www.gub.uy/instituto-nacional-estadistica/comunicacion/publicaciones/anuario-estadistico-nacional-2022>. Visitado 2024-01.
- [12] Zhou Z, Zhang Q, Allen JT, Ni X, Ng CP. 2021 How many types of severe hailstorm environments are there globally? *Geophysical Research Letters* **48**, 23, e2021GL095485. (doi:10.1029/2021GL095485).
- [13] Allen JT, Giammanco IM, Kumjian MR, Punge HJ, Kunz M, Zhang Q, Groenemeijer P. 2020 Ice from above: Toward a better understanding of hailstorms. *Eos* **101**. (doi:10.1029/2020EO148818).
- [14] Long AB, Matson RJ, Crow EL. 1979 *The hailpad: construction and materials, data reduction, and calibration*. NCAR. (doi:10.5065/D6DR2SDW). Convective Storms Division, National Center for Atmospheric Research, Technical Note (EEUU).
- [15] Heymsfield AJ, Giammanco IM, Wright R. 2014 Terminal velocities and kinetic energies of natural hailstones. *Geophysical Research Letters* **41**, 23, 8666–8672. (doi:10.1002/2014GL062324).
- [16] NOAA - EEUU. National Severe Storms Laboratory. nssl.noaa.gov/education/svrwx101/hail/. Sitio web, visitado en octubre de 2023.
- [17] Púčik T, Castellano C, Groenemeijer P, Kühne T, Rädler AT, Antonescu B, Faust E. 2019 Large hail incidence and its economic and societal impacts across Europe. *Monthly Weather Review* **147**, 11, 3901 – 3916. (doi:10.1175/MWR-D-19-0204.1).
- [18] Dzombak B. 2021. Severe hailstorms are costly and hard to predict. (doi:10.1029/2021EO158268).
- [19] Bellini Saibene Y. 2017 *Radar Meteorológico de la EEA Anguil*, chap. 7, pp. 81–104. Ediciones INTA, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Argentina. (doi:20.500.12123/4500). Clasificación de daño en cultivos por granizo utilizando técnicas de Data Mining.
- [20] Valdivieso Jurío E. 2011. Simulación de daños por pedrisco en berenjena. Tesis de grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Pública de Navarra, España.
- [21] Rueda IBDQ. 2009. Estudio de la evolución e intensidad de los daños por granizo en trigo y cebada. Tesis de grado, Departamento de Matemática Aplicada a la Ingeniería Agronómica, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- [22] Steinbauer V, Kaufmann J, Zurbriggen R, Bühler T, Herwegh M. 2017 Tracing hail stone impact on external thermal insulation composite systems

- (ETICS)—an evaluation of standard admission impact tests by means of high-speed-camera recordings. *International journal of impact engineering* **109**, 354–365. (doi:10.1016/j.ijimpeng.2017.07.016).
- [23] Marshall T, Morrison S. 2004 Hail damage to built-up roofing. In: *22nd Conference on Severe Local Storms*.
- [24] Majdi A, Alqahtani MD, Almakytah A, Saleem M. 2021 Fundamental study related to the development of modular solar panel for improved durability and repairability. *IET Renewable Power Generation* **15**, 7, 1382–1396.
- [25] KiliKevičienė K, Matijošius J, Fursenko A, Kilikevičius A. 2019 Tests of hail simulation and research of the resulting impact on the structural reliability of solar cells. *Eksplatacja i Niezawodność* **21**, 2, 275–281.
- [26] Render P, Pan H. 1995 Experimental studies into hail impact characteristics. *Journal of Propulsion and Power* **11**, 6, 1224–1230. (doi:10.2514/3.23961).
- [27] Doubrava R, Oberthor M, Belský P, Raska J. 2018 Bird and hail stone impact resistance analysis on a jet engine composite air inlet. *MATEC Web Conf.* **188**. (doi:10.1051/mateconf/201818804006).
- [28] Linari Fuentes G. 2013. Diversificación en frutales de hoja caduca como estrategia para enfrentar el granizo: aportes desde la agroecología. hdl.handle.net/20.500.12008/29298. Tesis de maestría, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Uruguay.
- [29] Seino H. 1980 On the characteristics of hail size distribution related to crop damage. *Journal of Agricultural Meteorology* **36**, 2, 81–88.
- [30] Summers PW, Wojtiw L. 1971 The economic impact of hail damage in Alberta, Canada and its dependence on various hailfall parameters. In: *The 7th Conference on Severe local Storms*, pp. 5–7.
- [31] Changnon Jr SA. 1971 Hailfall characteristics related to crop damage. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)* **10**, 2, 270–274.
- [32] Strong G, Lozowski E. 1977 An Alberta study to objectively measure hailfall intensity. *Atmosphere* **15**, 1, 33–53.
- [33] Yue Y, Zhou L, Zhu Ax, Ye X. 2019 Vulnerability of cotton subjected to hail damage. *PLOS ONE* **14**, 1, 1–21. (doi:10.1371/journal.pone.0210787).
- [34] Towery NG, Changnon Jr SA, Morgan Jr GM. 1976 A review of hail-measuring instruments. *Bulletin of the American Meteorological Society* **57**, 9, 1132–1141. (doi:10.1175/1520-0477(1976)057<1132:AROHMI>2.0.CO;2).
- [35] Schleusener RA. 1963 Hailstorm characterization and the crystal structure of hail. *Meteorological Monographs* **5**, 27, 173–176. (doi:10.1007/978-1-940033-56-3_9).

Referencias

- [36] Morgan GM, Towery NG. 1974 *Micro-scale studies of surface hailfall*, vol. 154. Illinois State Water Survey Urbana. core.ac.uk/works/17428068.
- [37] Schleusener RA, Jennings PC. 1960 An energy method for relative estimates of hail intensity. *Bulletin of the American Meteorological Society* **41**, 7, 372–376.
- [38] Perera S, Lam N, Pathirana M, Zhang L, Ruan D, Gad E. 2018 Probabilistic modelling of forces of hail. *Natural hazards* **91**, 133–153. (doi:10.1007/s11069-017-3117-7).
- [39] Martius O, Hering A, Kunz M, Manzato A, Mohr S, Nisi L, Trefalt S. 2018 Challenges and recent advances in hail research. *Bulletin of the American Meteorological Society* **99**, 3, ES51–ES54. (doi:10.1175/BAMS-D-17-0207.1).
- [40] Prein AF, Holland GJ. 2018 Global estimates of damaging hail hazard. *Weather and Climate Extremes* **22**, 10–23. (doi:doi.org/10.1016/j.wace.2018.10.004).
- [41] Silveira L, Chreties C, Crisci M, Usera G, Alonso J. 2015 Sistema de alerta temprana para previsión de avenidas en la ciudad de Durazno. *Innotec* **10**, 56–63.
- [42] Fing - UdelaR. El sistema de alerta temprana del IMFIA da sus frutos a Durazno. www.fing.edu.uy/noticias/area-de-comunicación/el-sistema-de-alerta-temprana-del-imfia-da-sus-frutos-durazno. Nota publicada en setiembre de 2013, visitada en agosto de 2023.
- [43] Amilivia G, Iztueta G, Roquero E, Usera G, Figueredo H. 2021. Diseño de sistema para ensayo de protecciones anti-granizo. hdl.handle.net/20.500.12008/29458. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.
- [44] Adams-Selin RD, Clark AJ, Melick CJ, Dembek SR, Jirak IL, Ziegler CL. 2019 Evolution of WRF-HAILCAST during the 2014–16 NOAA/hazardous weather testbed spring forecasting experiments. *Weather and Forecasting* **34**, 1, 61–79. (doi:10.1175/WAF-D-18-0024.1).
- [45] Cagnetti M, Leccese F, Trinca D. 2013 A new remote and automated control system for the vineyard hail protection based on ZigBee sensors, Raspberry-Pi electronic card and WiMAX. *Journal of Agricultural Science and Technology. B* **3**, 12B, 853.
- [46] Morgan Jr GM, Towery NG. 1976 On the role of strong winds in damage to crops by hail and its estimation with a simple instrument. *Journal of applied meteorology* **15**, 8, 891–898. (doi:10.1175/1520-0450(1976)015<0891:OTROSW>2.0.CO;2).
- [47] Pennini MN. 2020. Seguros agropecuarios: tasaciones de cultivos. Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

- [48] Hatch DC, Núñez M, Vila F, Stephenson K, *et al.* 2012. Los seguros agropecuarios en las Américas: un instrumento para la gestión del riesgo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- [49] Changnon SA, Fosse ER, Lecomte EL. 1999 Interactions between the atmospheric sciences and insurers in the United States. In: *Weather and Climate Extremes*, vol. 42, pp. 51–67. Springer. (doi:10.1023/A:1005408131413).
- [50] Jones KL. 2008 *The application of mathematical ecology and spatial clustering analysis techniques to hailpad measurements*. Ph.D. thesis, Texas Tech University, EEUU.
- [51] Reges H, Doesken N, Turner J, Newman N, Bergantino A, Schwalbe Z. 2016 CoCoRaHS: The evolution and accomplishments of a volunteer rain gauge network. *Bulletin of the American Meteorological Society* **97**, 10, 1831–1846. (doi:10.1175/BAMS-D-14-00213.1).
- [52] Lozowski E, Strong G. 1978 On the calibration of hailpads. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **17**, 4, 521–528.
- [53] Lozowski E, Strong G. 1978 Further reflections on the calibration of hailpads. *Atmosphere-Ocean* **16**, 1, 69–80.
- [54] Tsitouridis KG. 2019 The calibration of the hailpads upon the Greek National Hail Suppression Program, using the classical and inverse regression methods. *Open Science Journal* **4**, 1.
- [55] Lane JE, Youngquist RC, Haskell WD, Cox RB. 2006 A hail size distribution impact transducer. *The Journal of the Acoustical Society of America* **119**, EL47–EL53.
- [56] Lane JE, Sharp DW, Kasparis TC, Doesken NJ. 2008 Hail disrometer array for launch systems support. In: *12th Conference on IOAS-AOLS*, KSC-2008-016.
- [57] Younquist R, Haskell W, Immer C, Cox B, Lane J. 2009 Hail monitor sensor. *Nasa tech briefs* pp. 5–6.
- [58] Schön D, *et al.* 2017. Precipitation sensor, especially a hail sensor, and method for detecting a precipitation particle. US Patent 9,632,211.
- [59] Löffler-Mang M, Schön D, Landry M. 2011 Characteristics of a new automatic hail recorder. *Atmospheric research* **100**, 4, 439–446.
- [60] Lanzinger E. 2018. Hail sensor. US Patent 9,958,574.
- [61] Vaisala. Weather Transmitter WXT530 series datasheet. docs.vaisala.com/v/u/B211500EN-K/en-US. Sitio web, visitado en agosto de 2023.

Referencias

- [62] Sommer. HDI. sommer.at/en/products/wind-weather/hail-sensor-hdi. Indexado en Google 2020-05, Accedido 2023-08.
- [63] ISAW. HailFlow HF-4. isaw-products.com/hailflow-hf4/. Sitio web indexado en Google en febrero de 2020-02, accedido agosto de 2023.
- [64] Hyquestsolutions. Hailsens monitoring system. hyquestsolutions.com.au/products/hardware/meteorology/hailsens-iot-hail-monitoring-system. Sitio web, visitado en junio de 2023.
- [65] ISAW. RainFlow RF-4. isaw-products.com/rainflow-rf4/. Sitio web, visitado en agosto de 2023.
- [66] Sommer. RHD. <https://sommer.at/en/products/wind-weather/rain-sensor-rhd>sommer.at/en/products/wind-weather/rain-sensor-rhd. Indexado en Google 2020-05, Accedido 2023-08.
- [67] Mallafre MC. 2008 *Identificación y caracterización del granizo mediante el radar meteorológico. Modelos de predicción del ciclo de vida de las células convectivas*. Ph.D. thesis, Universitat de Barcelona, España.
- [68] Sánchez J, López L, García-Ortega E, Gil B. 2013 Nowcasting of kinetic energy of hail precipitation using radar. *Atmospheric research* **123**, 48–60.
- [69] Ni X, Liu C, Cecil DJ, Zhang Q. 2017 On the detection of hail using satellite passive microwave radiometers and precipitation radar. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **56**, 10, 2693–2709.
- [70] Soderholm JS, Kumjian MR, McCarthy N, Maldonado P, Wang M. 2020 Quantifying hail size distributions from the sky—application of drone aerial photogrammetry. *Atmospheric Measurement Techniques* **13**, 2, 747–754.
- [71] Vento D. 1976 The hailpad calibration for Italian hail damage documentation. *Journal of Applied Meteorology* **15**, 9, 1018–1022.
- [72] Dousset S, Girardot J, Dau F, Gakwaya A. 2018 Prediction procedure for hail impact. In: *EPJ Web of Conferences*, vol. 183, p. 01046. EDP Sciences. (doi:10.1051/epjconf/201818301046).
- [73] Sun J, Lam N, Zhang L, Ruan D, Gad E. 2015 Contact forces generated by hailstone impact. *International Journal of Impact Engineering* **84**, 145–158.
- [74] Lozowski E, Erb R, Wojtiw L, Wong M, Strong G, Matson R, Long A, Vento D, Admirat P. 1978 The hail sensor intercomparison experiment. *Atmosphere-Ocean* **16**, 1, 94–106.
- [75] INUMET. ¿Qué son y cuál es el trabajo de las estaciones meteorológicas de INUMET? youtu.be/GxKDUpyLOdQ. Video, visitado en octubre de 2023.

- [76] FEMA. Common Alerting Protocol. fema.gov/emergency-managers/practitioners/integrated-public-alert-warning-system/technology-developers/common-alerting-protocol. (EEUU), Actualizado 6 de enero 2021, acceso 15 de diciembre 2022.
- [77] Smith B. 2015 *Beginning JSON*. Apress.
- [78] Rivero P, Pereyra F. 2022 Implementación del estándar CAP en INUMET y predicciones, avisos que tienen en cuenta los impactos. *Revista de 1a jornada meteorológica del Uruguay*. **1**, 9–11. inumet.gub.uy/sites/default/files/2023-01/REVISTA%20JORNAMET%20N1%202022.pdf.
- [79] Mendez L. 2019 Prototipo de estación meteorológica. *Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals*.
- [80] Peña Cáceres OJM. 2019. Sistema de información de mini estación meteorológica para la captura de datos de temperatura, humedad y presión atmosférica–Centro de Operaciones de Emergencia Regional-Piura. Programa de Maestría en Ingeniería Informática, Universidad Nacional de Piura, Perú.
- [81] Salgado Ortiz SI, *et al.* 2019. Diseño y construcción de una estación portátil de medición de presión atmosférica, humedad relativa y temperatura. Tesis Grado en Tecnología en Saneamiento Ambiental, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.
- [82] Correa NM, Santamaria M, Guerra S, Moreno JE, Moreno YE. 2017 Selección de sensores para la adquisición de datos atmosféricos utilizando la plataforma de hardware libre arduino. *Tecnociencia* **19**, 2, 103–120.
- [83] Sabharwal N, Kumar R, Thakur A, Sharma J. 2014 A low cost ZigBee based automatic wireless weather station with gui and web hosting facility. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering* **1**.
- [84] Fernandes D, Gomes L, Costa A. 2017 Wind speed and direction measurement based on time of flight ultrasonic anemometer. In: *2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 1417–1422. IEEE. (doi:10.1109/ISIE.2017.8001453).
- [85] Kartika L, Hapsari GI, Mutiara GA. 2015 Smart-cane for the blind with wind direction position based-on Arduino. In: *4th Annual South East Asian International Seminar (ASAIS)*.
- [86] Hu J, Wang L, Chen S. 2022 Design and optimization of resonant cavity piezoelectric cantilever sensor for wind velocity and direction measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **71**, 1–12. (doi:10.1109/TIM.2022.3178490).

Referencias

- [87] Marino P, Machado F, Fontan FP, Otero S. 2008 Hybrid distributed instrumentation network for integrating meteorological sensors applied to modeling of propagation impairments. *IEEE transactions on instrumentation and measurement* **57**, 7, 1410–1421. (doi:10.1109/TIM.2008.915451).
- [88] Long AB. 1980 On estimating hail frequency and hailfall area. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **19**, 12, 1351–1362.
- [89] Sánchez J, Gil-Robles B, Dessens J, Martin E, Lopez L, Marcos J, Berthet C, Fernández J, García-Ortega E. 2009 Characterization of hailstone size spectra in hailpad networks in France, Spain, and Argentina. *Atmospheric Research* **93**, 1-3, 641–654.
- [90] Eccel E, Cau P, Riemann-Campe K, Biasioli F. 2012 Quantitative hail monitoring in an alpine area: 35-year climatology and links with atmospheric variables. *International journal of climatology* **32**, 4, 503–517. (doi:10.1002/joc.2291).
- [91] Aran M, Pena J, Torà M. 2011 Atmospheric circulation patterns associated with hail events in Lleida (Catalonia). *Atmospheric research* **100**, 4, 428–438. (doi:10.1016/j.atmosres.2010.10.029).
- [92] Towery NG, Morgan Jr GM. 1977 Hailstripes. *Bulletin of the American Meteorological Society* **58**, 7, 588–591.
- [93] Venco Electrónica. Qué es ZigBee, cómo funciona y características principales. vencoel.com/que-es-zigbee-como-funciona-y-caracteristicas-principales/. Sitio web, visitado en octubre de 2023.
- [94] Acomsis. Internet WiMAX: qué es y cómo funciona. web.acomsis.com/internet-wimax-que-es-y-como-funciona/. Sitio web, visitado en octubre de 2023.
- [95] NexCiencia, Universidad de Buenos Aires. Reporte desde el celular. nexciencia.exactas.uba.ar/nueva-aplicacion-meteorologica-alertamos-alertar-pronostico-meteorologico-paola-salio. Visitado 2024-01.
- [96] Kopp J, Manzato A, Hering A, Germann U, Martius O. 2023 How observations from automatic hail sensors in Switzerland shed light on local hailfall duration and compare with hailpad measurements. *Atmospheric Measurement Techniques* **16**, 14, 3487–3503.
- [97] Texas Instruments. Microcontroladores MSP430. <https://www.ti.com/es-mx/microcontrollers-mcus-processors/msp430-microcontrollers/overview.html>. Sitio web, visitado en octubre de 2023.
- [98] Bilham E, Relf E. 1937 The dynamics of large hailstones. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **63**, 269, 149–162.

- [99] De Freitas ES, Baptista FG, Budoya DE, De Castro BA. 2017 Equivalent circuit of piezoelectric diaphragms for impedance-based structural health monitoring applications. *IEEE Sensors Journal* **17**, 17, 5537–5546. (doi:10.1109/JSEN.2017.2725946).
- [100] Capsal JF, David C, Dantras E, Lacabanne C. 2012 Piezoelectric sensing coating for real time impact detection and location on aircraft structures. *Smart materials and structures* **21**, 5, 055021. (doi:10.1088/0964-1726/21/5/055021).
- [101] Omnexus. Comprehensive guide on Polyvinylidene Fluoride (PVDF). omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyvinylidene-fluoride-pvdf-plastic. Visitado 2023-10.
- [102] Precision Acoustics. Piezo-electric PVDF film. [precision-acoustics.co.uk/wp-content/uploads/2023/10/Application-note-for-piezoelectric-PVdF.pdf](https://www.precision-acoustics.co.uk/wp-content/uploads/2023/10/Application-note-for-piezoelectric-PVdF.pdf). Nota de aplicación en sitio web, visitado en octubre de 2023.
- [103] Benjeddou A. 2000 Advances in piezoelectric finite element modeling of adaptive structural elements: a survey. *Computers & Structures* **76**, 1-3, 347–363. (doi:10.1016/S0045-7949(99)00151-0).
- [104] Silva ECN. 1993 *Modelagem vibracional de transdutores de ultra-som piezo-elétricos pelo método de elementos finitos*. Ph.D. thesis, Universidade de São Paulo, Brasil.
- [105] Oppenheim AV, Schafer RW, Buck JR, *et al.* 2011 *Tratamiento de señales en tiempo discreto*. Pearson Educación.
- [106] Folkesson K. 2003 *ADC modeling for system simulation*. Ph.D. thesis, Linköping studies in science and technology, Suecia.
- [107] Texas Instruments. Hoja de datos de los convertidores ADS131E0x. [ti.com/lit/ds/symlink/ads131e08.pdf?ts=1698407097258](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads131e08.pdf?ts=1698407097258). Sitio web, visitado en octubre de 2023.
- [108] National Instruments. USB-6210 specifications. [ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6210-specs/page/specs.html](https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6210-specs/page/specs.html). Sitio web, visitado en octubre de 2023.
- [109] National Instruments. USB-6009 specifications. [ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6009-specs/page/specs.html](https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6009-specs/page/specs.html). Sitio web, visitado en octubre de 2023.
- [110] Kinsler LE, Frey AR, Coppens AB, Sanders JV. 2000 *Fundamentals of acoustics*. John Wiley & sons.
- [111] Svoboda JA, Dorf RC. 2013 *Introduction to electric circuits*. John Wiley & Sons.

Referencias

- [112] Hodson TO. 2022 Root mean square error (rmse) or mean absolute error (mae): When to use them or not. *Geoscientific Model Development Discussions* **2022**, 1–10.
- [113] Olumide S. Root Mean Square Error (RMSE): What You Need To Know. arize.com/blog-course/root-mean-square-error-rmse-what-you-need-to-know/. Visitado 2024-02.
- [114] Otto, SA. How to normalize the RMSE. marinedatascience.co/blog/2019/01/07/normalizing-the-rmse/. Visitado 2024-02.
- [115] Echarri A, Farber G, Molina F. 2022. SGran - diseño de dispositivo de simulación de granizo. hdl.handle.net/20.500.12008/31671. Tesis de Grado en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.
- [116] Scopelli V, Silva M, Vigliecca G. 2017. Dispositivo para el estudio del reconocimiento de la posición mediante ondas acústicas. hdl.handle.net/20.500.12008/20127. Tesis de grado en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay.
- [117] Feldman M. 2011 Hilbert transform in vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing* **25**, 3, 735–802. (doi:10.1016/j.ymssp.2010.07.018).
- [118] Rainhart L, Schimmel Jr W. 1975 Effect of outdoor aging on acrylic sheet. *Solar Energy* **17**, 4, 259–264. (doi:10.1016/0038-092X(75)90008-0).
- [119] McKeen LW. 2019 *The effect of UV light and weather on plastics and elastomers*. William Andrew.
- [120] Montaldo G, Palacio D, Tanter M, Fink M. 2003 The time reversal kaleidoscope: a new concept of smart transducers for 3d imaging. In: *IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003*, vol. 1, pp. 42–45 Vol.1. (doi:10.1109/ULTSYM.2003.1293353).
- [121] Pérez N, Montaldo G, Negreira CA. 2005 Spatial focalization using temporal inversion in chaotic cavities: influence of surface roughness. In: *IEEE Ultrasonics Symposium, 2005.*, vol. 4, pp. 2255–2258. IEEE.
- [122] Kundu T, Das S, Jata KV. 2007 Point of impact prediction in isotropic and anisotropic plates from the acoustic emission data. *The Journal of the Acoustical Society of America* **122**, 4, 2057–2066.
- [123] Murata. 7BB-12-9 datasheet. murata.com/en-global/products/productdetail?partno=7BB-12-9. Sitio web, visitado en mayo de 2023.
- [124] Löffler-Mang M. 2009 HARE—a new intelligent hail recorder for networks and field campaigns. In: *5 th European Conference on Severe Storms*, pp. 12–16.

- [125] BIPM, IEC, IFCC, ILAC, IUPAC, IUPAP, ISO, OIML. 2012 *The international vocabulary of metrology—basic and general concepts and associated terms (VIM)*. JCGM, 3 ed.
- [126] Comité Conjunto de Guías en Metrología. 2008. Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010_0.pdf.
- [127] National Instruments. Low cost USB DAQ driver for use with Raspberry Pi. Sitio web, visitado en octubre de 2023.
- [128] Microchip. MCP3204/3208. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21298e.pdf>. Hoja de datos, visitada en octubre de 2023.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Glosario de Variables y Parámetros

$A(r_{Impacto})$ Atenuación debida a la distancia del punto de impacto al centro de la placa del sensor. 76, 79

A_G Área horizontal de la piedra de granizo. 29

A_y Amplitud inicial de una exponencial decreciente. 54

$A_{experimental}$ Atenuación en la energía de la señal dependiente de $r_{Impacto}$, medidas experimentales. 81

$D(r_{Impacto})$ Difracción de las ondas debida a la distancia del punto de impacto al centro de la placa del sensor. 79

E_{calor} Energía de la piedra de granizo o el proyectil que se disipa en calor ante el impacto con el sensor. 77, 78

$E_{impacto}$ Energía de impacto del proyectil sobre el sensor. 75, 78–80

E_{otros} Energía que se disipa en el momento del impacto. 48, 77

E_{rebote} Energía que conserva la piedra de granizo o el proyectil justo después del impacto con el sensor. 77

E_{rotura} Energía que se disipa debido a la rotura de la piedra de granizo cuando impacta con el sensor. 77, 78

$E_{señal}$ Energía de la señal adquirida. 76, 78–80

$E_{señal}^{oblicua}(t)$ Energía de la señal obtenida cuando la incidencia del proyectil sobre el sensor es oblicua. 71

$E_{señal}^{perpendicular}(t)$ Energía de la señal obtenida cuando la incidencia del proyectil sobre el sensor es perpendicular. 71

E_{sonido} Energía de la piedra de granizo o el proyectil que se disipa en sonido ante el impacto con el sensor. 77, 78

E_{total} Energía de la piedra de granizo o el proyectil justo antes del impacto con el sensor. 77, 78

$E_{transferida}$ Energía transferida al sensor en el momento de impacto. 49, 77, 78

Glosario de Variables y Parámetros

- G_{EE} Parámetro calibrado de la curva que relaciona la energía de la señal con la energía de impacto. 76, 78, 79, 87, 104
- K_G Energía cinética de una piedra de granizo en el instante previo al impacto. 26, 28
- K_P Energía cinética del proyectil sustituto en el instante previo al impacto. 26, 28
- L Largo de una señal. 35, 78, 91
- N Número de bits. 35–37
- R_1 Resistencia de divisor de tensión, en etapa de acondicionamiento. 104
- R_2 Resistencia de divisor de tensión, en etapa de acondicionamiento. 104
- U_P Energía potencial gravitatoria del proyectil sustituto antes de soltarlo. 26, 28, 48, 49, 77
- U_P^{rebote} Energía potencial gravitatoria del proyectil sustituto cuando llega al punto máximo luego de rebotar. 48, 49, 77
- V_{medida} Voltaje en bornes de la adquisidora. 38
- V_{piezo} Voltaje en bornes de un piezoeléctrico. 38
- ΔT Ventana temporal. 35, 75, 78
- ΔV Rango de entrada en voltaje. 35, 75
- Δ_{apr} Incertidumbre expandida de apreciación. 50
- Δ_{med} Incertidumbre expandida de medida. 50
- Δt Diferencia de tiempos. 51
- $\Delta t_{V_{velo}}$ Diferencia de tiempos de vuelo de las ondas generadas en el punto de impacto a ambos transductores. 82–84
- Δz_P Incertidumbre expandida en la medida de la altura del proyectil sustituto. 49, 50
- δV Resolución en voltaje. 35
- δf Resolución en frecuencia. 35
- δt Tiempo de muestreo. 108
- \hat{y} Vector de predicciones del modelo, en cálculo de la RMSE. 41
- ν Velocidad de grupo de las ondas en la placa del sensor. 82, 83
- ν_G Velocidad de impacto de una piedra de granizo. 26, 29

- ν_P Velocidad de impacto del proyectil sustituto . 26
- ρ_G Densidad del granizo. 26, 28
- ρ_P Densidad del proyectil de acero. 26, 28
- ρ_a Densidad de la atmósfera. 26, 28, 29
- θ Ángulo de incidencia del impacto sobre el sensor. 71–73
- φ_a Diámetro de la cavidad acústica del sensor. 67
- φ_b Diámetro medio del transductor auxiliar (aro). 67
- φ_c Diámetro interno del espacio para el transductor auxiliar (aro) en la cavidad acústica del sensor. 67
- φ_d Diámetro del espacio para el transductor central en la cavidad acústica del sensor. 67
- a_1 Parámetro calibrado de la curva de atenuación. 81, 87, 105
- a_2 Parámetro calibrado de la curva de atenuación. 81, 87, 105
- a_3 Parámetro calibrado de la curva de distancias y diferencias de tiempos de vuelo. 84, 87, 106
- a_4 Parámetro calibrado de la curva de distancias y diferencias de tiempos de vuelo. 84, 87, 106
- b_1 Parámetro calibrado de la curva de difracción. 81
- b_2 Parámetro calibrado de la curva de difracción. 81
- c_a Coeficiente de arrastre del aire. 26, 28, 29
- d Diámetro. 28, 29, 51
- d_G Diámetro de una piedra de granizo. 26, 31
- d_P Diámetro del proyectil sustituto (bolita de acero). 26, 31
- f_N Frecuencia de Nyquist. 35
- f_c Frecuencia de corte. 34
- f_s Frecuencia de muestreo. 34, 35, 41, 75, 78, 84, 91
- $f_{impulso}(K_P, t)$ Función de impulso aplicada por el proyectil, consiste en un estímulo de muy corta duración. 52
- $f_{piezo}(t)$ Función de respuesta del diafragma piezoeléctrico ante un impulso ideal. 52

Glosario de Variables y Parámetros

- $f_{propaga}(t)$ Función de propagación de ondas en la placa. 52
- g Aceleración de la gravedad. 26, 28, 29
- k Factor de cobertura (en expresión de incertidumbres). 50
- m Número de parámetros que fueron ajustados (en cálculo de la RMSE). 41
- m_G Masa de una piedra de granizo. 26, 29
- m_P Masa del proyectil sustituto . 26
- n Número total de elementos (en cálculo de la RMSE). 41
- n_f Índice de las muestras en frecuencia de una señal. 38
- n_t Índice de las muestras en el tiempo de una señal. 38
- r_{Aro} Radio del aro formado por el transductor auxiliar. 82, 83
- $r_{Impacto}$ Distancia del punto de impacto al centro de la placa del sensor. 69, 76, 79–84, 86
- r_{Piezo} Radio del transductor piezoeléctrico central. 82, 83
- t_s Tiempo de muestreo. 35, 41
- t_{Vuelo}^A Tiempo de vuelo de las ondas generadas en el punto de impacto al transductor auxiliar. 82
- t_{Vuelo}^C Tiempo de vuelo de las ondas generadas en el punto de impacto al transductor central. 82
- $t_{tranquilo}$ Tiempo durante el que no deben recibirse impactos de granizo en el sensor, para considerar que terminó la tormenta de granizo. 57
- $v(n_t)$ Señal discreta de voltajes, es una serie temporal de valores en Voltios, adquiridos con tiempo de muestreo t_s . 38
- $v(t)$ Voltaje en función del tiempo. 34–36, 58, 71
- $v_{oblicua}(t)$ Señal obtenida cuando la incidencia del proyectil sobre el sensor es oblicua. 71
- $v_{piezo}(K_P, t)$ Señal de salida del piezoeléctrico cuando se aplica un impulso sobre la placa. 52
- y Vector de observaciones, en cálculo de la RMSE. 41
- z_P Altura desde la que se deja caer el proyectil sustituto. 26, 29, 49
- $\mathcal{V}(n_f)$ Espectro en frecuencia de la señal $v(n_t)$, calculado mediante la transformada rápida de Fourier (FFT). 38

Glosario

ADC Conversores Analógico Digitales (Analog Digital Converters). 22, 34–36, 53, 111–113

CAP Protocolo de Alerta Común (Common Alert Protocol). Consiste en un formato digital para intercambiar alertas sin fronteras políticas. 13, 14

CMRR Relación de Rechazo de Modo Común (Common Mode Rejection Ratio). Es el cociente entre la ganancia diferencial y la ganancia en modo común, expresado en decibeles.. 37

DC Corriente Continua (Direct Current). 16, 43

$\Delta - \Sigma$ Es un tipo de ADC. 36, 112, 113

Doble Rampa Es un tipo de ADC. 36

EEUU Estados Unidos de América. 11, 17

FFT Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform), es un algoritmo de alto desempeño que estima la Transformada de Fourier de una señal. 38, 132

FIng - UdeLaR Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay. 10, 12, 89, 90

Flash Es un tipo de ADC. 36

HARE Hail Recorder, sensor de [59]. 22

I2C Circuito Inter-Integrado (Inter-Integrated Circuit). Es una forma de comunicación serial.. 15

IEEE Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, Organización Internacional (Institute of Electrical and Electronics Engineers). 46, 48

IIMPI Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial de FIng - UdeLaR. 46

Glosario

- IMFIA** Instituto de Mecánica de los Fluídos e Ingeniería Ambiental de FIng - UdelaR. 10
- INUMET** Instituto Uruguayo de Meteorología. 4, 7, 11, 13–15, 18, 51, 57
- JSON** Formato de intercambio de información habitualmente usado para bases de datos no relacionales (NoSQL), que agrupa pares *clave-valor*. 14
- mPING** Meteorological Phenomena Identification Near the Ground, aplicación para celular que permite recolectar datos sobre granizo. 17
- NASA** Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (National Aeronautics and Space Administration), EEUU. 22
- NI** National Instruments. Marca de las tarjetas adquisidoras usadas en este trabajo. 37, 75, 112
- NRMSE** Raíz Cuadrada Media del Error Normalizada (Normalized Root Mean Squared Error), método de evaluación de bondad de ajuste.. 41, 78, 81, 86, 87
- PC** Computadora Personal (Personal Computer). 45, 47, 75, 89, 92, 99, 100, 111
- Pipelined** Es un tipo de ADC. 36
- PVC** Policloruro de vinilo. Material plástico.. 22
- PVDF** Fluoruro de Polivinilideno, material termoplástico con propiedades piezoeléctricas. 34, 65, 101
- PZT** Cerámica piezoeléctrica compuesta por *titanato zirconato de plomo*. 33
- RAM** Memoria de Acceso Aleatorio (Random Access Memory), almacena a corto plazo los datos con los que se está trabajando en el momento, brindando acceso rápido.. 111
- Raspberry Pi** Es una computadora de tamaño pequeño y con una gran comunidad de usuarios.. 16, 100, 111
- Reed Switch** Es un interruptor que se activa en presencia de campos magnéticos. Según el tipo, sus contactos pueden estar normalmente abiertos o normalmente cerrados. 16
- SAR** Registros de Aproximaciones Sucesivas (Successive Approximation Registers). Es un tipo de ADC. 36, 37, 112, 113
- SoC** Sistema integrado en un chip (System on a Chip). Es un circuito integrado que incorpora en un solo chip una unidad de procesamiento, memorias y eventualmente otros elementos como tarjeta gráfica o módems de red.. 100

- SPI** Interfaz de Puerto Serial (Serial Port Interface). Es una forma de comunicación serial. 15
- SQLite** Sistema de base de datos relacionales (Structured Query Language, SQL) simplificado. En las bases de datos relacionales, la información se almacena en tablas. 103
- USB** Bus Serial Universal (Universal Serial Bus), estándar actual de comunicación serial cableada. El cable USB, además de permitir la comunicación, permite la alimentación de dispositivos pequeños y medianos. 22, 89, 90
- USD** Dólares Americanos (Moneda de EEUU). 37
- UV** Ultravioleta. Se refiere a la componente de la radiación solar de entre 100 y 400 *nm* de longitud de onda.. 22
- WiMAX** Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access). Es un tipo de conexión a internet de banda ancha, en el que la señal se transmite por ondas de radio en las frecuencias de 2,5 a 5,8 GHz, permitiendo conexiones inalámbricas a una distancia de hasta 70 km. Es especialmente adecuado para viviendas y establecimientos rurales. 16
- ZigBee** Protocolo de comunicaciones inalámbrico de alto nivel, basado en el estándar 802.15.4 para las capas bajas de comunicación y que tiene bajo consumo y baja tasa de transferencia de datos y topología de red tipo *mesh*. Se presenta como una buena solución para la comunicación entre equipos desplegados en campo. 16

Esta es la última página.
Compilado el viernes 8 marzo, 2024.
<http://iie.fing.edu.uy/>